

COMITÉ CONSULTATIF DE THERMOMÉTRIE

SESSION DE 1967

COMITÉ INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES

COMITÉ CONSULTATIF
DE THERMOMÉTRIE

8^e SESSION — 1967
(6-14 septembre)



BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES
Pavillon de Breteuil, F 92-SÈVRES, France

AVERTISSEMENT HISTORIQUE

Le Bureau International des Poids et Mesures a été créé par la *Convention du Mètre* signée à Paris le 20 mai 1875 par dix-sept États, lors de la dernière séance de la Conférence Diplomatique du Mètre. Cette Convention a été modifiée en 1921.

Le Bureau International a son siège près de Paris, dans le domaine du Pavillon de Breteuil (Parc de Saint-Cloud) mis à sa disposition par le Gouvernement français; son entretien est assuré à frais communs par les États membres de la Convention du Mètre ⁽¹⁾.

Le Bureau International a pour mission d'assurer l'unification mondiale des mesures physiques; il est chargé :

- d'établir les étalons fondamentaux et les échelles des principales grandeurs physiques et de conserver les prototypes internationaux;
- d'effectuer la comparaison des étalons nationaux et internationaux;
- d'assurer la coordination des techniques de mesure correspondantes;
- d'effectuer et de coordonner les déterminations relatives aux constantes physiques fondamentales.

Le Bureau International fonctionne sous la surveillance exclusive d'un *Comité International des Poids et Mesures*, placé lui-même sous l'autorité d'une *Conférence Générale des Poids et Mesures*.

La Conférence Générale est formée des délégués de tous les États membres de la Convention du Mètre et se réunit au moins une fois tous les six ans. Elle reçoit à chacune de ses sessions le Rapport du Comité International sur les travaux accomplis, et a pour mission :

- de discuter et de provoquer les mesures nécessaires pour assurer la propagation et le perfectionnement du Système International d'Unités (SI), forme moderne du Système Métrique;
- de sanctionner les résultats des nouvelles déterminations métrologiques fondamentales et les diverses résolutions scientifiques de portée internationale;
- d'adopter les décisions importantes concernant l'organisation et le développement du Bureau International.

Le Comité International est composé de dix-huit membres appartenant à des États différents; il se réunit au moins une fois tous les deux ans. Le bureau de ce Comité adresse aux Gouvernements des États membres de la Convention du Mètre un *Rapport Annuel* sur la situation administrative et financière du Bureau International.

Limitées à l'origine aux mesures de longueur et de masse et aux études métrologiques en relation avec ces grandeurs, les activités du Bureau International ont été étendues aux étalons de mesure électriques (1927), photométriques (1937) et des radiations ionisantes (1960). Dans ce but, un agrandissement des premiers laboratoires construits en 1876-1878 a eu lieu en 1929 et deux nouveaux bâtiments ont été construits en 1963-1964 pour les laboratoires de la Section des radiations ionisantes.

⁽¹⁾ Au 31 décembre 1967, quarante États sont membres de cette Convention : Afrique du Sud, Allemagne, Amérique (É.-U. d'), Argentine (Rép.), Australie, Autriche, Belgique, Brésil, Bulgarie, Canada, Chili, Corée, Danemark, Dominicaine (Rép.), Espagne, Finlande, France, Hongrie, Inde, Indonésie, Irlande, Italie, Japon, Mexique, Norvège, Pays-Bas, Pologne, Portugal, République Arabe Unie, Roumanie, Royaume-Uni, Suède, Suisse, Tchécoslovaquie, Thaïlande, Turquie, U.R.S.S., Uruguay, Vénézuéla, Yougoslavie.

Devant l'extension des tâches confiées au Bureau International, le Comité International a institué depuis 1927, sous le nom de *Comités Consultatifs*, des organes destinés à le renseigner sur les questions qu'il soumet, pour avis, à leur examen. Ces Comités Consultatifs, qui peuvent créer des « Groupes de travail » temporaires ou permanents pour l'étude de sujets particuliers, sont chargés de coordonner les travaux internationaux effectués dans leurs domaines respectifs et de proposer des recommandations concernant les modifications à apporter aux définitions et aux valeurs des unités, en vue des décisions que le Comité International est amené à prendre directement ou à soumettre à la sanction de la Conférence Générale pour assurer l'unification mondiale des unités de mesure.

Les Comités Consultatifs ont un règlement commun (*Procès-Verbaux C.I.P.M.*, 31, 1963, p. 97). Chaque Comité Consultatif, dont la présidence est généralement confiée à un membre du Comité International, est composé d'un délégué de chacun des grands Laboratoires de métrologie et des Instituts spécialisés dont la liste est établie par le Comité International, ainsi que de membres individuels désignés également par le Comité International. Ces Comités tiennent leurs sessions à des intervalles irréguliers; ils sont actuellement au nombre de sept:

1. Le *Comité Consultatif d'Électricité*, créé en 1927.
2. Le *Comité Consultatif de Photométrie*, créé en 1933 (de 1930 à 1933 le Comité précédent s'est occupé des questions de photométrie).
3. Le *Comité Consultatif de Thermométrie*, créé en 1937.
4. Le *Comité Consultatif pour la Définition du Mètre*, créé en 1952.
5. Le *Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde*, créé en 1956.
6. Le *Comité Consultatif pour les Étalons de Mesure des Radiations Ionisantes*, créé en 1958.
7. Le *Comité Consultatif des Unités*, créé en 1964.

Les travaux de la Conférence Générale, du Comité International, des Comités Consultatifs et du Bureau International sont publiés par les soins de ce dernier dans les collections suivantes:

- *Comptes rendus des séances de la Conférence Générale des Poids et Mesures*;
- *Procès-Verbaux des séances du Comité International des Poids et Mesures*;
- *Sessions des Comités Consultatifs*;
- *Recueil de Travaux du Bureau International des Poids et Mesures* (Ce Recueil rassemble les articles publiés dans des revues et ouvrages scientifiques et techniques, ainsi que certains travaux publiés sous forme de rapports multicopiés).

La collection des *Travaux et Mémoires du Bureau International des Poids et Mesures* (22 tomes publiés de 1881 à 1966) a été arrêtée en 1966 par décision du Comité International.

Le Bureau International publie de temps en temps, sous le titre *Les récents progrès du Système Métrique*, un rapport sur les développements du Système Métrique dans le monde.

Depuis 1965 la revue internationale *Metrologia*, éditée sous les auspices du Comité International des Poids et Mesures, publie des articles sur les principaux travaux de métrologie scientifique effectués dans le monde, sur l'amélioration des méthodes de mesure et des étalons, sur les unités, etc., ainsi que des rapports concernant les activités, les décisions et les recommandations des divers organismes issus de la Convention du Mètre.

Comité International des Poids et Mesures

| | | |
|-------------------|-----------------------|------------------|
| <i>Secrétaire</i> | <i>Vice-Président</i> | <i>Président</i> |
| J. DE BOER | J. M. OTERO | L. E. HOWLETT |

LISTE DES MEMBRES

DU

COMITÉ CONSULTATIF DE THERMOMÉTRIE

Président

F. G. BRICKWEDDE, Evan Pugh Research Professor of Physics, Pennsylvania State University, University Park, *Pennsylvania* 16 802.

Membres

PHYSIKALISCH-TECHNISCHE BUNDESANSTALT [P.T.B.], *Braunschweig* (H. MOSER, Vice-Président).

DEUTSCHES AMT FÜR MESSWESEN UND WARENPRÜFUNG [D. A. M. W.], *Berlin* (M. RICHTER, Direktor der Fachabteilung « Wärme und Druck »).

NATIONAL BUREAU OF STANDARDS [N. B. S.], *Washington* R. P. HUDSON, Chief, Heat Division; L. A. GUILDNER; H. PLUMB; J. L. RIDDLE, Physicist).

CONSEIL NATIONAL DE RECHERCHES [N. R. C.], *Ottawa* (H. PRESTON-THOMAS, Head, Heat and Solid State Physics Section, Division of Applied Physics; R. E. BEDFORD).

NATIONAL STANDARDS LABORATORY [N. S. L.], *Chippendale* (A. F. A. HARPER, Senior Principal Research Officer, Division of Physics).

- CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET MÉTIERS [C. N. A. M.], *Paris*
(A. MOSER, Physicien principal à la Section de Thermométrie du
Laboratoire National d'Essais).
- NATIONAL RESEARCH LABORATORY OF METROLOGY [N. R. L. M.], *Tokyo*
(S. TAKATA).
- KAMERLINGH ONNES LABORATORIUM [K. O. L.], *Leiden* (H. VAN DIJK,
Conservateur pour la Thermométrie; M. DURIEUX, Chef de la Section
Thermométrie).
- NATIONAL PHYSICAL LABORATORY [N. P. L.], *Teddington* (C. R. BARBER,
Division of Quantum Metrology).
- INSTITUT DE MÉTROLOGIE D. I. MENDÉLÉEV [I. M. M.], *Leningrad*
(B. N. OLEINIK, Sous-Directeur; Mme M. P. ORLOVA, Chef du Labora-
toire de Thermométrie, Institut des Mesures Physicotechniques et
Radiotechniques, *Moscou*).
- J. DE BOER, Directeur de l'Institut voor Theoretische Fysica,
Amsterdam-C.
- M. COLOMINA, Chef de la Division de Thermométrie, Institut National
de Chimie Physique « Antonio de Gregorio Rocasolano », *Madrid*.
- Le Directeur du BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES
[B. I. P. M.], *Sèvres* (J. TERRIEN).

Invités

- J. A. HALL, Bureau International des Poids et Mesures, *Sèvres*.
- C. A. SWENSON, Department of Physics, Iowa State University, *Ames*,
Iowa 50 010.
-

ORDRE DU JOUR DE LA SESSION

1. Échelle Internationale Pratique de Température « provisoire 1967 ».
 - a. Décision sur une politique et un programme de révision de l'E.I.P.T. avec un calendrier pour l'achèvement de cette révision.
 - b. Mesures récentes au thermomètre à gaz. Révision de la table 1966 des différences de température (thermodynamique — E.I.P.T.) de 90,18 à 273,16 °K.
 - c. Jonction de l'« Échelle provisoire » à 0 °C avec l'E.I.P.T. au-dessus de 0 °C.
 - d. Températures thermodynamiques des points fixes entre 14 et 273,16 °K.
 - e. Méthodes de réalisation des points fixes pour l'étalonnage des thermomètres jusqu'à 273,16 °K.
 - f. Projet de l'Échelle provisoire.
 - g. Projet d'un rapport au Comité International des Poids et Mesures sur la révision de l'E.I.P.T.
 2. Proposition d'extension de l'E.I.P.T. dans la région de l'hélium liquide.
 3. Extension de l'E.I.P.T. de 14 à 5 °K.
 4. a. Thermomètres à résistance de germanium en tant qu'étalons pour la thermométrie au-dessous de 20 °K; b. Échange et comparaison de thermomètres à résistance de germanium étalonnés par les laboratoires nationaux.
 5. Récente détermination des températures thermodynamiques au-dessus de 0 °C. Révision de la table 1966 des différences de température (thermodynamique — E.I.P.T.).
 6. Récents progrès relatifs au thermomètre à résistance de platine comme étalon pour l'E.I.P.T. au-dessus de 630 °C.
 7. L'échelle de température de rayonnement.
 - a. Rapports sur les mesures faites avec les lampes à corps noir du N.P.L.
 - b. Meilleure valeur actuelle pour la seconde constante de rayonnement c_2 .
 - c. Discussion sur la proposition du N.R.C. d'étendre au-dessus de 1 063 °C l'usage du thermocouple à alliage platine-rhodium comme étalon pour l'E.I.P.T.
 8. Recommandations U 2 et U 7 du Comité Consultatif des Unités.
 9. Rédaction d'un rapport au C.I.P.M. sur les paragraphes 2 à 8 de l'ordre du jour.
 10. Publication des documents présentés.
 11. Questions diverses.
-

8^e SESSION (1967)

RAPPORT

AU

COMITÉ INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES

Par J. A. HALL*, Rapporteur

Le Comité Consultatif de Thermométrie a tenu sa 8^e session les 6 et 7 septembre 1967 dans des locaux du Department of Commerce à Washington, et les 11, 13 et 14 septembre à la Division de Physique Appliquée du Conseil National de Recherches à Ottawa. En relation avec ces réunions eurent également lieu des visites des laboratoires du National Bureau of Standards à Washington et à Gaithersburg, ainsi que de ceux du Conseil National de Recherches à Ottawa.

Étaient présents: Mr BRICKWEDDE (président), MM. BARBER, BEDFORD, DE BOER, COLOMINA, DURIEUX, VAN DIJK, HALL, HARPER, HUDSON, GUILDNER, A. MOSER, H. MOSER, OLENIK, Mme ORLOVA, MM. PLUMB, PRESTON-THOMAS, RIDDLE, TAKATA et TERRIEN.

Mr SWENSON a assisté aux réunions de Washington.

Empêché: Mr RICHTER (D.A.M.W.).

Mr Hall est nommé rapporteur.

La session s'ouvre sur le rappel du décès en mars 1967 du Prof. G. Bozza, dont la perte est vivement ressentie par le Comité Consultatif.

Mr de Boer souligne que, bien qu'il ne soit pas possible de mettre en application cette année les recommandations que devra adopter le Comité Consultatif, le Comité International des Poids et Mesures a besoin de recommandations nettes et claires. Le Comité International pourrait

(*) Le Bureau International des Poids et Mesures a appris avec un profond regret le décès de J. A. Hall survenu à Londres le 4 janvier 1968.

en effet demander à la 13^e Conférence Générale des Poids et Mesures, en octobre 1967, les pouvoirs pour mettre en vigueur ultérieurement une nouvelle Échelle Internationale Pratique de Température dès qu'elle serait mise au point.

Extension de l'Échelle Internationale Pratique de Température (E.I.P.T.) au-dessous de 90 °K

Le Président rappelle les conclusions auxquelles les Groupes de travail I et II sont parvenus lors de leurs réunions à Leningrad et à Moscou en septembre 1966 (1), et en particulier que la tâche de préparer une modification du texte actuel de l'E.I.P.T. avait été laissée à Mr Barber aidé de collaborateurs qu'il devait choisir. Mr Barber dit qu'avec MM. van Dijk et Durieux il avait essayé de traduire les vœux du Comité Consultatif en préparant une « Échelle provisoire », qui est une révision complète, mais qui ne change pas les valeurs des températures au-dessus de 0 °C; l'essentiel des propositions est résumé dans l'Annexe 2. Une révision de l'ensemble du texte a été choisie comme étant le processus le plus simple, bien que cela ne soit peut-être pas exactement ce qu'avait demandé le Comité Consultatif. Ultérieurement Mr van Dijk a proposé une modification (Annexe 5). La proposition de cette Échelle provisoire a été adressée aux membres du Comité Consultatif et a provoqué un certain nombre de commentaires qui sont résumés dans l'Annexe 4. Le point essentiel de ces commentaires était l'opposition du N.B.S. et du N.R.C., qui reprochaient à l'Échelle provisoire proposée de ne pas offrir une reproductibilité aussi bonne que les diverses échelles nationales, qui sont fondées sur des groupes de thermomètres directement comparés au thermomètre à gaz, au lieu de l'être sur une série de points fixes.

Mr Preston-Thomas résume les arguments pour et contre les deux solutions (Annexe 6). Il pense que la pente de l'Échelle est plus importante que ses écarts par rapport à la température thermodynamique. L'Échelle provisoire est à peu près satisfaisante au-dessus de 20 °K, mais son emploi ne permet pas une aussi bonne reproductibilité que les échelles nationales actuelles; il préférerait donc conserver le statu quo et reporter l'adoption d'une nouvelle Échelle à une époque future où les travaux seront plus avancés.

Mr Hudson se rallie fermement à ce point de vue. Il pense que les opinions ont évolué depuis un an: on reconnaît maintenant la valeur

(1) Le rapport définitif des réunions de ces deux Groupes de travail a été adressé aux membres du Comité Consultatif de Thermométrie le 9 mars 1967. Ce rapport — dont on trouvera un résumé succinct dans *Metrologia*, 3, 1967, p. 29-31, corrigendum, *Ibid.*, p. 87 — n'est pas reproduit en annexe de ce compte rendu; les questions qui étaient à l'ordre du jour des réunions de 1966 des Groupes de travail I et II ont en effet été discutées à nouveau à cette 8^e session du Comité Consultatif et ont conduit aux conclusions exposées dans ce 8^e Rapport du Comité Consultatif de Thermométrie.

des mesures acoustiques, tandis qu'on découvre des incertitudes dans les mesures fondées sur la tension de vapeur de l'hydrogène.

Mme Orlova estime au contraire qu'il est important d'avoir une nouvelle Échelle dès maintenant. Elle pense que la limite inférieure doit être 20 °K; au-dessous de cette température le thermomètre à germanium est plus commode.

Mr Hall suggère que l'on maintienne l'Échelle existante jusqu'à 90 °K avec les corrections qui ont déjà été publiées. Mr Preston-Thomas approuve cette position, mais Mr Harper n'est pas favorable à l'emploi de corrections. La plupart des non-spécialistes croient que l'E.I.P.T. est l'approximation la plus voisine de la température thermodynamique, comme cela est d'ailleurs indiqué dans son texte.

Mr Harper approuve entièrement la proposition de Mr H. Moser de changer la valeur des points fixes, notamment aux températures supérieures à 0 °C et jusqu'au point de l'or (Annexe 3). Mr de Boer est fermement du même avis car, le plus souvent, les auteurs n'indiquent pas comment a été obtenue l'échelle qu'ils emploient; il préfère donc que l'on mette à jour l'Échelle Internationale assez fréquemment, plutôt que de publier des tables de corrections.

Mr Harper remarque que Mr Preston-Thomas a omis de mentionner un point important: bien des pays n'ont pas d'échelle nationale, on ne doit donc pas considérer seulement la dégradation de la reproductibilité par rapport à celle des échelles nationales de quelques grands laboratoires, mais également tenir compte de la dégradation supplémentaire due à la diffusion de ces échelles dans les autres laboratoires du monde. Il propose que l'on continue à étudier le projet d'E.I.P.T. et les meilleures façons de le modifier. Il suggère de prendre comme base la proposition de Barber, van Dijk et Durieux et d'y ajouter celle de H. Moser.

Mr Preston-Thomas pense qu'il faut encore une autre année d'étude. Procéder à des changements fréquents risquerait d'amener des confusions et, à son avis, ceux qui se servent de l'Échelle ont principalement besoin d'une reproductibilité maintenue pendant un certain nombre d'années.

Mr Barber fait remarquer que les laboratoires qui conservent une échelle nationale peuvent dériver de celle-ci l'Échelle Internationale en employant des techniques de comparaison, sans avoir besoin de réaliser directement les points fixes. Il convient de distinguer la reproductibilité sur le plan international et dans un seul pays. Il lui semble qu'un sentiment d'insécurité naît d'une situation où l'on se trouve entièrement dépendant d'un groupe donné de thermomètres pour réaliser l'Échelle. MM. Preston-Thomas et Hudson ne croient toutefois pas au risque de la perte d'une telle échelle.

En réponse à une question de Mr Barber, Mr Preston-Thomas dit que les mesures de chaleur massique sont faites avec une précision de 0,1 % et que l'on peut déceler des différences de 0,01 %. Nous devons donc avoir une Échelle donnant au moins 0,1 %, et même mieux, en prévision des progrès futurs. Mr de Boer remarque que si le calcul de l'entropie

ne nécessite que la température elle-même, les chaleurs massiques dépendent de la dérivée de la température, ce qui impose des exigences plus sévères sur l'échelle de température.

Mr Hudson estime que la seule analyse complète de l'Échelle provisoire proposée est celle que Mr Preston-Thomas a présentée (Annexe 6); tous les autres commentaires sont purement qualitatifs.

On discute ensuite en détail les points pour et contre l'adoption de l'Échelle provisoire. Mr Harper dit que nous devons mettre au point cette Échelle provisoire, en reconnaissant le fait que les échelles nationales, convenablement corrigées, en sont des représentations. Les échelles nationales seront comprises dans les limites d'incertitude de l'Échelle Internationale. Mr Barber considère que l'on doit maintenant décider si l'on adopte une Échelle fondée sur des points fixes ou une Échelle fondée sur un groupe de thermomètres (« a wire scale »). Selon toute vraisemblance la situation ne sera pas différente dans trois ans. Mr Hall remarque que, dans d'autres domaines de température, il est de pratique courante d'employer des étalons de travail étalonnés d'après l'étalon primaire de façon à réaliser l'Échelle Internationale, et que les échelles nationales peuvent être considérées comme des étalons de travail dans le cas présent.

Le Président dit qu'au-dessous de 90 °K le choix est à faire entre 1°) une E.I.P.T. fondée sur des points fixes et des procédés d'interpolation entre ceux-ci, les incertitudes entre les points fixes étant de l'ordre de $\pm 0,01$ deg, ou 2°) une E.I.P.T. fondée sur les échelles de quatre laboratoires, échelles qui ne sont pas reproductibles à $\pm 0,01$ deg, complétées par la table CCT-64. Mr Terrien remarque que si les quatre échelles sont différentes, il faut alors faire un changement; il pense qu'il est peut-être préférable que le changement se fasse selon 1°). Mr Hudson indique que dans la pratique on emploierait la table CCT-64.

Il est finalement décidé d'adopter l'Échelle provisoire au-dessous de 90 °K, modifiée si nécessaire. Il est reconnu que les laboratoires qui possèdent une échelle nationale peuvent l'employer, après l'avoir amenée à coïncider avec la table CCT-64, ou toute modification acceptée de celle-ci, comme moyen pour réaliser l'Échelle provisoire et pour maintenir la bonne reproductibilité de leur échelle nationale (voir la Recommandation T 2, point 2, p. T 25).

On discute ensuite pour savoir si la limite inférieure de l'Échelle doit être le point d'ébullition ou le point triple de l'hydrogène. Mme Orlova et Mr Hudson préfèrent s'en tenir au point d'ébullition plutôt que de descendre dans un domaine où l'incertitude est plus grande. Mr Riddle dit que l'on a besoin d'une échelle dans cette région, quel qu'en soit le nom, et Mr Preston-Thomas préfère, pour des raisons pratiques, descendre aussi bas que possible. En conclusion, le Comité Consultatif s'accorde pour étendre l'Échelle jusqu'à 13,81 °K.

Mr Swenson rend compte de l'étalonnage de plusieurs thermomètres à résistance de germanium dans le domaine de 2 à 20 °K d'après le ther-

momètre à gaz à volume constant du N.S.L. (Annexe 14). La conception et la réalisation de ce thermomètre à gaz ont fait l'objet de grands soins de façon à réduire les erreurs systématiques; ce thermomètre a été étalonné en partant de l'échelle du thermomètre à résistance de platine du N.B.S. (1955) entre 16 et 30 °K. Deux des thermomètres à germanium ont été ensuite envoyés au Ames Laboratory (Iowa State University) et l'un d'eux a été envoyé au N.B.S. pour être étalonné d'après l'échelle provisoire du thermomètre acoustique du N.B.S. (1965) et l'« Échelle ⁴He 1958 » (T_{58}).

La principale incertitude systématique dans ces mesures au thermomètre à gaz vient du choix des résultats servant à calculer les coefficients du viriel nécessaires pour faire la correction au gaz réel. On a choisi les valeurs de Kilpatrick, Keller et Hammel (Annexe 14, réf. 1) tout en sachant qu'un autre choix pourrait introduire un changement dans cette correction atteignant jusqu'à 5 %, ou une erreur de l'ordre de 0,002 à 0,003 deg aux températures voisines de 4 °K.

Deux conclusions essentielles ont été atteintes : 1° les résultats obtenus au thermomètre à gaz indiquent que l'Échelle ⁴He 1958 donne à 4 °K des températures qui sont de $0,008 \pm 0,003$ deg plus basses que la température thermodynamique (thermomètre à gaz du N.S.L.) si, au voisinage de 20 °K, l'échelle du thermomètre à résistance de platine est considérée comme en accord avec les résultats des mesures acoustiques; 2° les étalonnages de thermomètres au germanium par comparaison au thermomètre à gaz sont en accord avec les étalonnages acoustiques du N.B.S. à $\pm 0,005$ deg à toutes les températures si les températures d'étalonnage sont majorées de 0,025 % (0,005 deg à 20 °K).

Le choix des deuxièmes coefficients du viriel est contesté par Mr van Dijk, qui souligne que les coefficients du viriel MR-5 de Kilpatrick *et al.* sont calculés au-dessus de 4 °K, sans tenir compte des résultats expérimentaux pour les températures supérieures. Mr Swenson dit qu'employer, par exemple, les deuxièmes coefficients du viriel donnés par Keesom aurait seulement pour effet de diminuer de 0,002 deg les valeurs du N.S.L. pour les tensions de vapeur de l'hélium liquide aux environs de 4 °K. Les récents résultats des mesures acoustiques pour l'hélium, tant à l'University of Minnesota (Annexe 14, réf. 3) qu'au N.B.S., font penser que les coefficients du viriel à 4 °K, aussi bien ceux de Keesom que ceux de Kilpatrick *et al.* (qui concordent à cette température), sont trop faibles de 5 à 10 %. Ceci aurait pour effet d'augmenter le point d'ébullition de l'hélium liquide de plusieurs millidegrés dans la thermométrie à gaz, au N.S.L. et à l'Iowa State University. La raison de l'écart entre les déterminations P - V - T et acoustique des coefficients du viriel n'est pas connue, quoique les valeurs nettement inférieures, tant pour la température que pour le deuxième coefficient du viriel, trouvées dans les déterminations P - V avec un thermomètre à gaz réel, comparées à celles des déterminations acoustiques, fassent penser qu'il existe une erreur

Mr Barber insiste sur le besoin d'obtenir des valeurs précises du deuxième coefficient du viriel dans les déterminations du point d'ébullition de l'hélium avec le thermomètre à gaz à volume constant. Il fait remarquer qu'un nouveau calcul des récentes déterminations de cette température sur la base d'un groupe commun des deuxièmes coefficients du viriel (Kilpatrick *et al.* MR-5) a donné comme résultat un point d'ébullition de l'hélium qui est supérieur de 0,006 deg au moins à celui qui a été retenu pour l'établissement de la table T_{58} .

Mr Swenson indique que les résultats de récents travaux sur la thermométrie à gaz effectués à l'Argonne National Laboratory par Osborne, Flotow et Schreiner (*Rev. Sci. Instr.*, **38**, 1967, p. 159) ne confirment pas cette conclusion de Barber; ils concordent en fait avec la détermination au N.S.L. de la tension de vapeur de l'hélium liquide aux environs de 4 °K si, comme cela est suggéré par les résultats des mesures acoustiques, les deuxièmes coefficients du viriel sont augmentés en gros de 5 % dans cette région.

Aucune conclusion n'ayant pu être obtenue sur les écarts entre T_{58} et la température thermodynamique, le Comité Consultatif a reconnu la nécessité de nouvelles déterminations précises du deuxième coefficient du viriel de ^4He entre 2 °K et 20 °K. En particulier, la question s'est posée de savoir s'il y avait ou non une raison fondamentale pour qu'il existe un écart entre les déterminations P - V et acoustique, tant pour la température que pour les coefficients du viriel.

Mme Orlova rend compte (Annexe 15) de la comparaison des échelles de température provisoires (1955) de l'I.M.P.R. et du N.B.S. qui montre des écarts inférieurs à $\pm 0,01$ deg entre 4 °K et 20 °K. On pense qu'un accord comparable existe entre les étalonnages au thermomètre à gaz du N.B.S. (étalonnage N.B.S. et Annexe 14).

Les possibilités d'établir l'E.I.P.T. dans ce domaine sont ensuite discutées, mais aucune décision n'est atteinte compte tenu de la nécessité d'avoir des valeurs plus précises pour le deuxième coefficient du viriel de l'hélium et d'avoir effectué des recherches approfondies sur les moyens d'exprimer un tel étalonnage soit d'après les points fixes, soit avec des thermomètres de référence tels que des thermomètres au germanium. Les travaux en cours et qui sont mentionnés comprennent des déterminations isothermiques P - V pour l'hélium au K.O.L. (Durieux), la thermométrie à gaz à volume constant au N.P.L. (Barber) et la thermométrie magnétique à l'I.S.U. (Swenson).

Un échange de thermomètres à résistance de germanium fut convenu comme suit: Mme Orlova a apporté à la réunion trois thermomètres du N.B.S. et deux de l'I.M.P.R. Les thermomètres du N.B.S. ont été comparés à des thermomètres de l'I.M.P.R. qui avaient été étalonnés d'après le thermomètre à gaz de l'I.M.P.R. Les thermomètres du N.B.S. iront ensuite au K.O.L., puis au N.S.L. Les deux thermomètres de l'I.M.P.R. seront mesurés au N.B.S., puis envoyés au N.S.L.

Mr Plumb décrit les travaux qu'il a effectués avec G. Cataland sur

la courbe de tension de vapeur de l'hydrogène liquide et suggère que d'autres laboratoires s'intéressent aux pressions des points triples. Mr Barber dit que le N.P.L. et le K.O.L. sont d'accord sur la température du point triple mais pas sur la pression.

Sur la question du statut des échelles ^4He et ^3He , Mr Durieux suggère qu'elles figurent en annexe du nouveau texte de l'E.I.P.T. comme étant les échelles recommandées pour un emploi général; Mr Barber remarque que cette façon de faire surmontera la difficulté du fait que l'on suspecte ces échelles de n'être pas exactes. Mr Terrien estime que ces deux échelles ne peuvent être incluses dans l'E.I.P.T. car elles ne constituent pas la meilleure approximation possible de l'échelle thermodynamique, mais que l'on peut les considérer comme des échelles de référence. Mr Plumb considère qu'elles doivent figurer en annexe avec leurs limites d'erreur, ce qui indiquerait leur faiblesse; Mr Hudson pense que les limites d'erreur ne devraient pas avoir la même valeur en plus et en moins, et que seule la limite positive devrait être indiquée.

Températures des points fixes

Le Comité Consultatif a discuté les valeurs à adopter pour les différents points fixes et s'est accordé pour inclure une estimation des incertitudes en chaque point (écarts possibles entre l'Échelle pratique et la température thermodynamique), à la suite d'une suggestion faite par le N.R.L.M. dans un commentaire écrit sur l'échelle provisoire proposée.

Pour le *point de congélation de l'or* on propose la valeur

$$t_{\text{Au}} = 1\,064,43\text{ }^{\circ}\text{C},$$

le maintien ou la suppression du second chiffre après la virgule donnant lieu à discussion. En conclusion, on s'accorde pour le maintenir puisque l'incertitude (fixée à 0,2 deg) sera mentionnée et évitera une méprise sur l'exactitude réelle.

Pour le *point de congélation de l'argent* on adopte

$$t_{\text{Ag}} = 961,93 \pm 0,2\text{ }^{\circ}\text{C},$$

plusieurs déterminations donnant la différence entre les points de l'or et de l'argent comme proche de 102,5 deg.

Pour le *point de congélation de l'antimoine*, on a tenu compte des trois valeurs suivantes exprimées dans l'E.I.P.T. 1948: 630,534 °C (Istituto Termometrico Italiano), 630,553 °C (N.R.C.), 630,54 °C (N.S.L.), dont la moyenne est 630,542 °C. La valeur de la P.T.B. (630,48 °C) n'a pas été retenue, car elle a été obtenue avec un échantillon d'antimoine moins pur que les autres; on a seulement tenu compte de cette détermination comme d'une mesure de la différence entre l'E.I.P.T. (1948) et l'échelle

thermodynamique. Cela conduit à adopter la valeur

$$t_{sb} = 630,71 \pm 0,05 \text{ } ^\circ\text{C (therm).}$$

Pour le *point de congélation du zinc* on adopte

$$t_{zn} = 419,58 \pm 0,03 \text{ } ^\circ\text{C.}$$

Des mesures au thermomètre à gaz, couvrant le domaine de $-183 \text{ } ^\circ\text{C}$ à $+100 \text{ } ^\circ\text{C}$, sont en cours au N.R.C. Ces mesures sont en bon accord avec les résultats de Beattie dans le domaine de $0 \text{ } ^\circ\text{C}$ à $50 \text{ } ^\circ\text{C}$. Une détermination du point d'ébullition de l'eau, qui a été achevée pendant la durée de la session, a donné $99,999 \text{ } 5 \text{ } ^\circ\text{C}$. En conséquence, le Comité Consultatif décide d'adopter la valeur $373,15 \pm 0,003 \text{ } ^\circ\text{K}$ pour le *point d'ébullition de l'eau*.

En discutant la valeur à attribuer au *point d'ébullition de l'oxygène*, le Comité Consultatif s'est référé aux valeurs indiquées dans le rapport du Groupe de travail II réuni à Moscou en 1966. Mr Barber fait remarquer que, lorsque de nouvelles valeurs diffèrent nettement des anciennes, il convient de rejeter ces dernières; il est très important d'arriver à la valeur exacte, puisque les points fixes inférieurs en dépendent. MM. Preston-Thomas et Barber soulignent que toutes les valeurs ont augmenté depuis 1966 et que la valeur primitive de l'I.M.P.R. devrait aussi être augmentée. Mr Harper propose d'adopter $90,19 \text{ } ^\circ\text{K}$, mais Mme Orlova et Mr van Dijk préfèrent $90,18 \text{ } ^\circ\text{K}$. Mr Hall rappelle que le rapport de la réunion de Moscou indique que le Groupe de travail II a accepté $90,18 \text{ } ^\circ\text{K}$ « tout en reconnaissant qu'il sera peut-être nécessaire de changer cette valeur à une date ultérieure ».

Le Comité Consultatif s'accorde finalement pour adopter la valeur $90,188 \pm 0,01 \text{ } ^\circ\text{K}$ pour le point d'ébullition de l'oxygène.

Pour le *point d'ébullition de l'hydrogène en équilibre*, on examine les valeurs suivantes, en tenant compte de la correction nécessaire pour la valeur $90,188 \text{ } ^\circ\text{K}$ adoptée ci-dessus pour le point d'ébullition de l'oxygène :

| | | |
|----------------------------|-------------------------|--|
| Heuse <i>et al.</i> (1931) | 20,264 $^\circ\text{K}$ | } fondé sur $T_0 = 273,15 \text{ } ^\circ\text{K}$ |
| Keesom <i>et al.</i> | 20,265 | |
| Woolley <i>et al.</i> | 20,277 | |
| Moessen (1954) | 20,259 | |
| Borovik (1954) | 20,280 | |
| Barber (1963) | 20,274 | (20,268 avec les coefficients du viriel de Plumb) |
| Plumb (acoustique, 1966) | 20,285 | |

La moyenne de toutes ces valeurs est $20,272 \text{ } ^\circ\text{K}$, ou $20,274 \text{ } ^\circ\text{K}$ si l'on ne tient pas compte de la faible valeur obtenue par Moessen. La moyenne des trois dernières valeurs est $20,279 \text{ } ^\circ\text{K}$. Mr Durieux préfé-

rerait adopter 20,274 °K mais accepterait 20,279 °K. On discute pour savoir si la valeur de Moessen doit être laissée de côté; Mr Barber dit qu'il la rejetterait car elle est bien inférieure aux autres valeurs obtenues au thermomètre à gaz, mais Mr Durieux souligne que cette valeur n'est pas plus basse que celle de Borovik n'est élevée. A ce point de la discussion le Comité Consultatif penche pour la valeur $20,275 \pm 0,01$ °K. Plus tard, une commission composée de MM. Barber, Durieux et Plumb a examiné les données relatives à la tension de vapeur de l'hydrogène; dans ses conclusions cette commission exprime une nette préférence pour la valeur 20,280 °K, valeur que le Comité Consultatif adopte, après discussion, pour le point d'ébullition de H₂ en équilibre.

Mr Barber propose qu'une courbe moyenne de la tension de vapeur en fonction de la température, en accord avec les données existantes et conforme à la théorie, soit employée. Mr Durieux est chargé de préparer cette courbe.

Pour le *point triple de l'hydrogène en équilibre*, les valeurs mentionnées à la réunion de Moscou sont corrigées pour un point d'ébullition de l'oxygène de 90,188 °K; les nouvelles valeurs sont alors :

| | | | |
|--------|---|-----------|-------------|
| K.O.L. | { | 13,807 °K | |
| | | 13,803 | |
| N.P.L. | | 13,817 | |
| N.B.S. | | 13,812 | (inchangée) |

La valeur moyenne $13,810 \pm 0,01$ °K est adoptée par le Comité Consultatif.

Les valeurs suivantes sont données pour la pression du point triple :

| | | |
|--------|------------------------|--------------|
| N.P.L. | 7 059 N/m ² | (52,95 mmHg) |
| N.B.S. | 7 018 — | (52,64 —) |
| K.O.L. | 7 030 — | (52,73 —) |

0,001 deg correspondant à 4 N/m² (0,03 mmHg).

La valeur 54,356 °K acceptée à la réunion de Moscou pour le *point triple de l'oxygène* devient $54,361 \pm 0,01$ °K pour tenir compte de la valeur révisée du point d'ébullition.

L'Échelle Internationale Pratique de Température au-dessus de 90 °K

Dans le domaine de 90 °K à 273 °K, Mr H. Moser suggère que l'on continue à employer l'équation de Callendar-Van Dusen modifiée pour tenir compte des nouvelles valeurs des points fixes. Mr Barber considère que le problème est de savoir sur quelles bases on doit corriger cette équation pour qu'elle donne des résultats conformes à la température thermodynamique. Il préférerait ne prendre que les résultats du N.R.C. et ne considérer les autres mesures que comme des confirmations complé-

moindre. Mr Harper préférerait l'emploi d'une table avec une formule d'interpolation comme dans le domaine inférieur à 90 °K. Une commission a étudié cette question et elle a conclu qu'entre 90,188 °K et 273,15 °K l'E.I.P.T. doit être définie d'après la thermométrie à résistance de platine et en se servant d'une table de référence des rapports $R_t/R_{0\text{.}0\text{C}}$ en fonction de la température.

Aux températures supérieures à 0 °C, Mr H. Moser indique qu'en ajoutant un terme supplémentaire à l'équation de Callendar pour le thermomètre à résistance, on peut reproduire avec une bonne approximation l'échelle thermodynamique telle qu'elle est représentée par la courbe des différences déjà publiée (2). L'équation révisée est

$$t = \frac{1}{\alpha} \left(\frac{R_t}{R_0} - 1 \right) + \delta \frac{t}{100} \left(\frac{t}{100} - 1 \right) + \gamma \frac{t}{100} \left(\frac{t}{100} - 1 \right) \left(\frac{t}{t_{zn}} - 1 \right) \left(\frac{t}{t_{sb}} - 1 \right);$$

son application serait valable entre — 50 °C et 800 °C, mais il n'en propose pas l'emploi au-dessus du point de l'antimoine pour le moment. La valeur de γ est environ 0,042 degré et l'effet du troisième terme dans cette équation est suffisamment petit pour qu'une valeur fixe soit acceptable.

Multiplier le terme γ par le facteur $\left[1 - \varepsilon \left(\frac{t}{t_{Au}} \right)^5 \right]$ avec une valeur d'environ 0,57 pour ε a un effet négligeable au-dessous de 630,5 °C, mais permet d'étendre la validité de l'équation jusqu'au point de l'or.

Mr Harper est d'avis qu'en principe une table serait préférable, comme aux basses températures. Mr van Dijk remarque qu'un autre terme pourrait être ajouté si nécessaire et Mr de Boer estime qu'une table établie par un ordinateur serait plus régulière et donnerait une meilleure approximation. Mr Barber constate que l'équation proposée ne tient pas compte d'autres points fixes, tels que le point du cadmium, qui sont bien connus, et Mr Swenson dit qu'on pourrait compenser les résultats par la méthode des moindres carrés avec des constantes différentes. Mr Preston-Thomas n'est pas favorable à l'emploi de méthodes d'interpolation différentes au-dessus et au-dessous de 0 °C. Mr Harper constate que deux thèses sont en présence; il considère que le Comité Consultatif pourrait ajourner son choix entre les deux, mais qu'il doit bien affirmer sa décision de principe de modifier l'Échelle de façon à l'amener en concordance aussi étroite que possible avec l'échelle thermodynamique. Ce principe est adopté (*Recommandation T 1*).

Le choix du mode de définition de l'Échelle entre 0 °C et le point de l'antimoine ayant été remis en discussion à une séance ultérieure, le Comité Consultatif s'accorde pour employer l'équation de Callendar modifiée par Moser, avec une valeur unique pour γ . Mr Harper fait toutefois remarquer que l'emploi de cette équation modifiée ne doit pas

(2) Voir l'Annexe 17, reçue après la session du Comité Consultatif.

entraver une amélioration de l'Échelle si, à l'avenir, il s'avérait que le terme ajouté ne permet pas d'obtenir une concordance suffisamment précise avec l'échelle thermodynamique. Le Président propose que MM. Barber et Preston-Thomas déterminent la meilleure valeur à donner à γ pour obtenir la meilleure approximation à tous les points fixes, y compris le point du zinc. Mr de Boer ajoute que l'on peut déterminer γ de façon à faire coïncider la pente à 0 °C avec celle qui est obtenue pour l'Échelle au-dessous de ce point.

La question de substituer le point de congélation de l'étain au point d'ébullition de l'eau est discutée; Mr Barber suggère que cette proposition soit incorporée dans le texte de l'Échelle de la même façon que cela avait été fait en 1960 pour la substitution du point du zinc au point du soufre. D'après Mr Preston-Thomas un tel changement n'introduirait une modification dans l'Échelle que de 0,000 1 deg entre 0 °C et 100 °C.

Le Comité Consultatif discute ensuite de la possibilité de substituer le thermomètre à résistance au thermocouple au-dessus du point de l'antimoine. Mr H. Moser propose que l'on conserve le thermocouple; le thermomètre à résistance donnerait peut-être une meilleure reproductibilité, mais non pas un meilleur accord avec l'échelle thermodynamique. Mr H. Moser ne pense pas avoir de résultats expérimentaux complémentaires avant six mois. Mr Barber déclare qu'il lui sera impossible de préparer le projet de l'Échelle et d'effectuer des travaux expérimentaux. Mr Hall suggère alors que l'on pourrait peut-être publier en 1972, par exemple, une nouvelle édition de l'Échelle de 1968 en y incorporant l'extension de l'emploi du thermomètre à résistance.

Mr Plumb et Mme Orlova considèrent qu'il est prématuré d'effectuer le changement.

Mr Harper aurait été de cet avis il y a six mois, mais les travaux récents effectués au Japon montrent que l'instabilité de thermomètres à résistance convenables aux températures élevées est, ou sera, surmontée; bien que les résultats expérimentaux soient encore insuffisants, il serait regrettable de manquer l'occasion d'effectuer le changement. Il suggère donc que le Comité Consultatif fasse d'abord les amendements concernant l'emploi des thermocouples (nouvelles valeurs des points fixes, etc.) et qu'il examine aussitôt après la révision de l'Échelle sur la base du thermomètre à résistance.

Mr Hall appuie ce point de vue et cite les travaux de Mr Evans qui ont été exposés aux membres du Comité Consultatif au cours de la visite des laboratoires du N.B.S. à Gaithersburg; ces travaux montrent que le thermomètre à résistance utilisé avec une formule d'interpolation quadratique entre les points de congélation de l'antimoine, de l'argent et de l'or, peut donner une bonne approximation des températures thermodynamiques.

Mr Barber remarque que si le thermocouple est conservé, le thermomètre à résistance pourra le supplanter facilement à n'importe quel moment; il appuie en conséquence la proposition de Mr Moser.

Mr de Boer se déclare d'accord; le Comité Consultatif devrait d'abord approuver les changements dans les valeurs des points fixes et, si cela apparaît réalisable en 1968, adopter le thermomètre à résistance comme instrument d'interpolation au-dessus du point de l'antimoine (voir la *Recommandation T 2*, points 1 et 5).

Valeur de c_2

Mr Terrien indique que la Commission des masses atomiques et constantes associées de l'Union Internationale de Physique Pure et Appliquée (U.I.P.P.A.) étudie la question d'une révision des constantes physiques, et en particulier de la valeur de c_2 . Cette Commission, qui s'est réunie fin août 1967 à Winnipeg, ne pense pas pouvoir recommander une nouvelle valeur de c_2 avant environ un an. Pour le moment, le Comité Consultatif ne peut qu'adopter la meilleure valeur actuelle (voir la *Recommandation T 2*, point 6).

Lampes à corps noir du N.P.L.

Mr Barber rend compte des résultats obtenus jusqu'à maintenant sur les lampes à corps noir du N.P.L. Ces résultats (Annexe 11) montrent qu'un net changement dans l'étalonnage (plus de 2 deg) est intervenu au cours du circuit Teddington, Leningrad, Braunschweig, Teddington. Les lampes furent soumises à un nouveau chauffage à Teddington, qui provoqua un petit changement; elles furent ensuite renvoyées à Braunschweig et aucun nouveau changement n'est intervenu. Les résultats des mesures à Leningrad n'ont pas encore été communiqués au Comité Consultatif ni à Mr Barber. Des mesures effectuées sur d'autres lampes envoyées au N.S.L. (par avion, aux soins du pilote) concordent avec celles faites au N.P.L. à 0,2 deg (Annexe 13).

Mr Terrien constate que ces résultats montrent de nouveau l'importance du moyen de transport utilisé pour certains étalons, en particulier pour les étalons photométriques. Ces comparaisons seront poursuivies dès que les causes du changement auront été élucidées.

Recommandations à présenter au Comité International des Poids et Mesures

Le Comité Consultatif met au point la rédaction définitive des deux recommandations à présenter au Comité International; ces recommandations (voir p. T 25) sont adoptées à l'unanimité. Il examine ensuite les moyens d'appliquer ces recommandations et décide de confier la préparation du projet complet du texte de l'E.I.P.T. à un comité de rédaction comprenant MM. Barber (président), Durieux, Hall et Preston-Thomas, avec Mr Terrien *ex officio*. Un projet pourra être préparé en novembre 1967 et sera prêt à être distribué au commencement de janvier 1968. Six semaines seront laissées pour faire des commentaires et le document pourra être soumis au C.I.P.M. avant juin 1968.

Le Comité Consultatif laisse également à ce comité de rédaction le soin de décider quels seront les documents à publier en annexe du compte rendu de cette session.

Le Comité Consultatif discute ensuite sur des points particuliers qui devront être traités par le comité de rédaction :

Mr Barber rappelle qu'il faudra choisir des formules d'interpolation au-dessus de 273 °K (Annexe 5). Mr Preston-Thomas considère que les points à 14,17 °K et à 20 °K peuvent ne pas suffire dans cette région et que l'on pourrait en ajouter, si nécessaire. Mr Harper remarque que l'on pourrait s'inspirer de l'Annexe 5 pour faire les modifications qui apparaîtraient souhaitables d'après l'analyse faite par Mr Preston-Thomas. Mme Orlova dit que cela ne sera pas facile et Mr Preston-Thomas souligne que la difficulté vient de ce que l'on n'avait connaissance que d'un seul étalonnage de l'I.M.P.R. et qu'il serait intéressant que Mme Orlova puisse fournir d'autres étalonnages très prochainement.

Pour le domaine de 90 à 273 °K, Mr van Dijk propose d'utiliser la formule (1) donnée dans l'Annexe 5 :

$$\Delta W = a_1 t + b_1 t(t - 100) + c_1 t^3 (t - 100)$$

avec b_1 égal à zéro et c_1 déterminé par étalonnage au point d'ébullition de l'oxygène. MM. Barber et Preston-Thomas ont fait confiance aux travaux de van Dijk. Mme Orlova ayant attiré l'attention sur les travaux de l'I.M.P.R. (Annexe 8), Mr Barber répond qu'ils seront également considérés ainsi que tous les autres résultats complémentaires que Mme Orlova pourra fournir pour vérifier la formule. Mr Hall considère que si ce processus échouait il faudrait donner au comité de rédaction des pouvoirs discrétionnaires.

Mr Preston-Thomas demande s'il faut rejeter la valeur 1,392 0 pour R_{100}/R_0 dans ce domaine de température. Mr Barber estime illogique de ne pas employer 1,392 5 sur toute l'étendue de l'Échelle et le Comité Consultatif s'accorde pour que « R_{100}/R_0 ne soit pas inférieur à 1,392 50 ».

Sur la question de spécifier $W_{4,2}$ ou $W_{13,8}$ pour le platine, le Comité Consultatif s'accorde à ne pas spécifier $W_{13,8}$; mais une valeur pour $W_{4,2}$ est-elle nécessaire? Mr Hudson pense que seul α est nécessaire. Mr van Dijk considère que $(W - W_{\text{idéal}})_{13,8} / (W - W_{\text{idéal}})_{90,188} > 1,2$ peut être un critère. L'inhomogénéité du fil peut conduire à une valeur anormalement basse de $W_{4,2}$ et Mr van Dijk suggère que le critère $(1 - W_{O_2})/\alpha = 192,60 \pm 0,02$ peut éviter cet écueil. Mr Riddle estime que ceci n'a pas été suffisamment prouvé, et Mme Orlova préfère conserver $W_{4,2}$. Mr Hudson maintient sa proposition, mais demande aux laboratoires nationaux de donner des valeurs de $W_{4,2}$ chaque fois que cela est possible. Le Comité Consultatif approuve cette dernière proposition.

Mr Harper demande que les valeurs du point triple et du point d'ébullition du néon soient comprises parmi les points fixes secondaires.

La question concernant la spécification de la longueur d'onde à employer dans le pyromètre optique étalon est discutée. Le Comité

Consultatif est d'accord pour estimer que cette spécification n'est pas nécessaire actuellement, du fait que les nouvelles valeurs du point de l'or et de c_2 sont très proches des valeurs réelles. Cela pourra cependant être mentionné en note dans le texte de l'Échelle.

Unités de température : noms et symboles.

Définition du kelvin

Le Comité Consultatif examine les propositions contenues dans les Recommandations U 2 et U 7 du Comité Consultatif des Unités (C.C.U., 1967) concernant le nom et le symbole de l'unité de température thermodynamique, l'emploi du même nom pour désigner un intervalle de température et une définition explicite du kelvin.

Mr Harper fait remarquer que dans certains pays il est illégal d'employer d'autres unités que celles du SI; en conséquence, si l'on accepte les propositions du C.C.U., il sera illégal d'employer le symbole « deg ».

Sur la Recommandation U 2 proposant pour l'unité de température thermodynamique le nom « kelvin » et le symbole « K » (au lieu de « degré kelvin » et « °K »), le Comité Consultatif est d'accord mais demande que soit autorisé, à titre temporaire, l'emploi de °K, de degré et de ses traductions dans les autres langues. Le Comité Consultatif est d'accord à l'unanimité pour que les mêmes symboles, c'est-à-dire K ou °C, soient employés pour exprimer une température et une différence (ou un intervalle) de température.

La définition de l'unité de température thermodynamique (kelvin) proposée dans la Recommandation U 7 est acceptée à l'unanimité.

Mr Oleinik exprime les remerciements du Comité Consultatif à ses hôtes et au président.

Le Président croit savoir que cette session est vraisemblablement la dernière à laquelle participent MM. van Dijk et H. Moser, et il les remercie pour l'importante collaboration qu'ils ont apportée au Comité Consultatif depuis de nombreuses années. Mr Moser exprime à son tour ses remerciements.

(Septembre 1967)

Recommandations
du Comité Consultatif de Thermométrie
présentées
au Comité International des Poids et Mesures

RECOMMANDATION T 1 ⁽³⁾

Le Comité Consultatif de Thermométrie recommande que soit accepté le principe de la révision de l'Échelle Internationale Pratique de Température de façon à la faire concorder le mieux possible avec l'échelle thermodynamique, et à l'étendre jusqu'à 13,810 °K. De l'avis du Comité Consultatif un projet définitif destiné à être soumis au Comité International des Poids et Mesures sera prêt en juin 1968.

RECOMMANDATION T 2

Le Comité Consultatif de Thermométrie (C.C.T.) s'accorde à fonder l'Échelle Internationale Pratique de Température (E.I.P.T.) révisée et étendue, sur les principes suivants :

1° Les valeurs des températures des points fixes de définition doivent être :

| | | | |
|---|-----------|---|----|
| <i>Point triple de l'hydrogène en équilibre</i> | 13,810 | } | °K |
| <i>Point d'ébullition de l'hydrogène en équilibre</i> | 20,280 | | |
| <i>Point triple de l'oxygène</i> | 54,361 | | |
| <i>Point d'ébullition de l'oxygène</i> | 90,188 | | |
| <i>Point triple de l'eau</i> | { 273,16* | } | °C |
| | { 0,01* | | |
| <i>Point d'ébullition de l'eau</i> | 100,000 | | |
| <i>Point de congélation du zinc</i> | 419,58 | | |
| <i>Point de congélation de l'argent</i> | 961,93 | | |
| <i>Point de congélation de l'or</i> | 1 064,43 | | |

(*) Par définition.

2° Entre 13,810 °K et 90,188 °K, l'E.I.P.T. doit être l'Échelle provisoire proposée par le Groupe de travail II du C.C.T. à sa réunion de septembre 1966, modifiée si nécessaire. Il a été reconnu que les laboratoires qui ont des échelles nationales peuvent les employer, après les avoir fait concorder avec la table

⁽³⁾ *Note ajoutée aux épreuves. Par sa Résolution 8, la 13^e Conférence Générale des Poids et Mesures (octobre 1967) a donné pouvoir au Comité International des Poids et Mesures pour prendre les décisions nécessaires afin que soit mise en vigueur dès que possible une nouvelle Échelle Internationale Pratique de Température.*

A sa 57^e session (octobre 1968) le Comité International a adopté le texte de l'« Échelle Internationale Pratique de Température de 1968 » ; ce texte est publié à l'Annexe 18 et dans les Comptes rendus de la 13^e Conférence Générale.

CCT-64, ou ses modifications acceptées, comme moyen de réaliser l'E.I.P.T. et de maintenir la bonne reproductibilité de ces échelles nationales.

3° Entre 90,188 °K et 273,15 °K, l'E.I.P.T. doit être définie d'après la thermométrie à résistance de platine et en se servant d'une table de référence des rapports de résistance $R_t/R_{0°C}$ en fonction de la température. La table doit être fondée sur les résultats obtenus au moyen du thermomètre à gaz au Conseil National de Recherches (Ottawa) qui sont confirmés par les résultats de mesures similaires effectuées au Kamerlingh Onnes Laboratorium (Leiden), au National Physical Laboratory (Teddington) et à l'Institut des Mesures Physicotechniques et Radiotechniques de l'U.R.S.S. (Moscou).

4° Entre 0 °C et le point de congélation de l'antimoine, l'E.I.P.T. doit être définie d'après la thermométrie à résistance de platine en se servant de l'équation de « Callendar-Moser », avec une valeur convenue de γ dans cette équation, R_0 , α et δ étant déterminés par étalonnage au point triple et au point d'ébullition de l'eau et au point de congélation du zinc. Il a été reconnu que le même étalonnage est obtenu en employant le point triple de l'eau et les points de congélation de l'étain et du zinc avec la valeur convenable assignée au point de congélation de l'étain.

5° Entre le point de congélation de l'antimoine et 1 064,43 °C, l'E.I.P.T. doit être définie comme l'E.I.P.T. de 1948 en utilisant les nouvelles valeurs récemment adoptées pour les points de congélation de l'argent et de l'or, et la valeur pour le point de congélation de l'antimoine déterminée dans l'échelle du thermomètre à résistance de platine conformément au point 4° ci-dessus, jusqu'à ce que de nouvelles expériences permettent d'étendre l'échelle du thermomètre à résistance au-delà.

6° Au-dessus du point de congélation de l'or l'E.I.P.T. doit être définie comme l'E.I.P.T. de 1948, mais avec la valeur 0,014 388 mètre-degré pour c_2 et 1 064,43 °C pour le point de l'or. Toutefois, si une nouvelle valeur de c_2 est recommandée pour l'usage général par l'Union Internationale de Physique Pure et Appliquée avant que l'Échelle soit publiée, cette valeur devra être adoptée pour l'E.I.P.T.

ANNEXE 1

Liste des documents présentés à la 8^e session du C.C.T.

Document
N°

- 2A. Rapport du Groupe de travail I, (septembre 1966).
- 2B. Rapport du Groupe de travail II, (septembre 1966).

Projet d'Échelle de Température

National Physical Laboratory (Royaume-Uni)

- 3. Lettre de C.R. Barber du 22 février 1967 aux membres du C.C.T. et texte du Projet d'Échelle Internationale Pratique de Température provisoire.
Voir à l'Annexe 2, p. T 32, la partie essentielle de cette lettre.

National Research Laboratory of Metrology (Japon)

- 4. Commentaires sur le document N° 3, (avril 1967).

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (Allemagne)

- 5. Commentaires sur le document N° 3, (mai 1967).
Voir Annexe 3, p. T 35.

National Bureau of Standards (États-Unis)

- 6. Commentaires sur le document N° 3, (mai 1967).
- 7. Commentaires sur le document N° 3, (juillet 1967).

Conseil National de Recherches (Canada)

- 8. Commentaires sur le document N° 3, (mai 1967).
- 9. Commentaires sur le document N° 3, (juin 1967).

Bureau International des Poids et Mesures

- 10. Commentaires sur le document N° 3, (avril 1967).

Document

N°

Kamerlingh Onnes Laboratorium (Pays-Bas)

11. Lettre de H. van Dijk, (juin 1967).

*Institut des Mesures Physicotechniques et Radiotechniques
(U.R.S.S.)*

12. Commentaires sur le document N° 3, (juin 1967).

National Physical Laboratory (Royaume-Uni)

13. Lettre de C. R. Barber et résumé des commentaires des membres du C.C.T. sur le Projet d'Échelle Internationale Pratique de Température provisoire (document N° 3).

Voir à l'Annexe 4, p. T 38, le résumé de ces commentaires.

Kamerlingh Onnes Laboratorium (Pays-Bas)

14. 1967 Draft for the International Practical Scale of Temperature, by H. van Dijk.

Voir l'Annexe 5, p. T 40, qui ne reprend que la partie de l'Échelle intéressant le domaine 273,15 °K à 13,809 °K.

15. Lettre de H. van Dijk à H. Preston-Thomas, (juillet 1967).

16. Lettre de H. van Dijk à Mme M. P. Orlova, (juillet 1967).

National Bureau of Standards (États-Unis)

22. Commentaires sur le document N° 13, (août 1967).

Kamerlingh Onnes Laboratorium (Pays-Bas)

23. Lettre de H. van Dijk à R. P. Hudson, (août 1967).

Conseil National de Recherches (Canada)

25. A partial evaluation of the Barber-van Dijk Provisional Temperature Scale and a Proposal for an interim International Temperature Scale between 11 °K and 90 °K, by H. Preston-Thomas and R. E. Bedford.

Voir à l'Annexe 6, p. T 42, le résumé de ce document.

Domaine de — 183 à 1 063 °C

a. De 0 à — 183 °C

National Research Laboratory of Metrology (Japon)

36. Low temperature gas thermometry in N.R.L.M., by T. Mochizuki, K. Mitsui, M. Takahashi and T. Shiratori.

Voir Annexe 7, p. T 48.

Document

N°

*Institut des Mesures Physicotechniques et Radiotechniques
(U.R.S.S.)*

32. Improvement of the P.R.M.I. Scale for the temperature region between 90 °K and 273.15 °K, by M. P. Orlova, L. B. Belyansky, D. N. Astrov and D. I. Charevskaia.

30. Comparison of the N.P.L., P.R.M.I., N.R.C. scales for the temperature region between 90 °K and 273 °K, by M. P. Orlova, L. B. Belyansky, D. N. Astrov, D. I. Charevskaia and V. V. Getmanskaia.

Voir Annexe 8, p. T 54.

Kamerlingh Onnes Laboratorium (Pays-Bas)

19. Comparison of platinum resistance thermometers between 63 and 373.15 °K, by H. van Dijk.

Conseil National de Recherches (Canada)

26. Gas thermometry at N.R.C., by H. Preston-Thomas.

b. De 0 à 1 063 °C

Istituto Termometrico Italiano (Italie)

34. Freezing point of antimony, by L. Crovini.

Voir Annexe 9, T 56.

35. Freezing point of the copper-silver eutectic alloy, by L. Crovini.

National Research Laboratory of Metrology (Japon)

37. Thermométrie des hautes températures à l'aide du thermomètre à résistance de platine. IV, par S. Nakaya, H. Uchiyama et T. Saino.

38. A platinum resistance thermometer of 25 ohm coil for use up to 1 000 °C, by T. Mochizuki and S. Sawada.

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (Allemagne)

21. Différence entre l'Échelle Internationale Pratique de Température de 1948 et l'échelle thermodynamique au-dessus du point de congélation de l'étain d'après de nouvelles mesures au thermomètre à gaz, par H. Moser, J. Otto et W. Thomas.

Aoyama Gakuin University (Japon)

40. Thermal expansion of fused quartz, by J. Oishi and T. Kimura.

Voir Annexe 10, p. T 60.

Document
N°

Pyrométrie

National Physical Laboratory (Royaume-Uni)

33. Stability of black-body lamps V3 and V4.
Voir Annexe 11, p. T 64.

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (Allemagne)

41. Preliminary report on measurements of the gold point reproducibility by black-body lamps; calibration of two black-body lamps at the gold point temperature.
Voir Annexe 12, p. T 66.

National Standards Laboratory (Australie)

29. Variation of radiance temperatures within blackbody sources, by T. P. Jones and J. Tapping.
Voir Annexe 13, p. T 69.

National Research Laboratory of Metrology (Japon)

39. Effective emissivity of cavity radiators. Precise analysis by the successive substitution method, by S. Takata and H. Yamamoto.
Cette théorie sera publiée en détail dans *J. of Illum. Eng. Inst. of Japan* (sous presse).

Domaine de 20 à 90 °K

Kamerlingh Onnes Laboratorium (Pays-Bas)

17. Comparison of different methods for the interpolation of reduced resistance differences of platinum thermometers between 91 °K and 12 °K, by R. Muijlwijk, M. Durieux and H. van Dijk.
18. The differences between the scale defined with the CCT-64 table and the scale T_{66} between 13.8 °K and 92 °K, by R. Muijlwijk and M. Durieux.

Domaine des basses températures

National Standards Laboratory (Australie)

Iowa State University (États-Unis)

20. Comparison between gas thermometer, acoustic and platinum resistance temperature scales between 2 and 20 °K, by J. S. Rogers and R. J. Tainsh, M. S. Anderson and C. A. Swenson.
Publié dans *Metrologia*, 4, 1968, p. 47.
20A. Ce document est le résumé du précédent.
Voir Annexe 14, p. T 75.

Document

N°

National Bureau of Standards (États-Unis)

27. Liquid hydrogen vapor pressure thermometry, by G. Cataland and H. H. Plumb.

Institut des Mesures Physicotechniques et Radiotechniques (U.R.S.S.)

31. Comparison of the P.R.M.I. and N.B.S. provisional thermodynamic temperature scales, by G. A. Kytin, K. I. Kurilenok, M. P. Orlova, D. N. Astrov and D. I. Charevskaia.

Voir Annexe 15, p. T 81.

Kamerlingh Onnes Laboratorium (Pays-Bas)

28. Reproducibility of germanium resistance thermometers at 4.2 and 20.3 °K by C. van Rijn, J. L. Tiggelman and M. Durieux.

Voir Annexe 16, p. T 85.

Unités

Bureau International des Poids et Mesures

1. Unité de température thermodynamique: nom, symbole, définition.
24. Projets de résolutions pour la 13^e Conférence Générale des Poids et Mesures (octobre 1967) et commentaires s'y rapportant.
-

ANNEXE 2

Projet d'une Échelle Internationale Pratique de Température « provisoire 1967 » établi par C. R. Barber, H. van Dijk et M. Durieux

Le projet, dont les principaux changements par rapport à l'Échelle Internationale Pratique de Température de 1948 (édition amendée de 1960) sont indiqués dans cette annexe, comportait également pour l'Échelle au-dessous de 273,15 °K les propositions adoptées par le Groupe de travail II à sa réunion de Moscou en septembre 1966. Ces propositions ont été publiées dans *Metrologia*, 3, 1967, p. 85; voir aussi l'Annexe 5, p. T 40.

Les principales modifications au texte de l'E.I.P.T., édition amendée de 1960, sont l'extension de l'Échelle au-dessous du point d'ébullition de l'oxygène et une nouvelle définition de la partie de l'Échelle comprise entre 0 °C et - 182,97 °C (273,15 °K et 90,18 °K). Ces modifications entraînant de nombreuses additions au reste du texte, en particulier au chapitre « III. Recommandations », il a été décidé de rédiger complètement un nouveau texte couvrant la totalité de l'Échelle et de l'appeler « Échelle Internationale Pratique de Température provisoire de 1967 ». Cette décision a permis d'inclure certaines améliorations recommandées de la technique, mais aucun changement n'a été fait qui affecte la définition de l'Échelle au-dessus de 0 °C.

En conséquence, on propose que l'E.I.P.T. provisoire de 1967 soit promulguée par le C.I.P.M. pour être utilisée concurremment avec l'Échelle de 1948 afin de donner une échelle descendant jusqu'à 13,809 °K.

En dehors des changements nécessaires dans la nomenclature, le texte diffère de celui de 1960 sur les points suivants :

1° La première partie concerne la définition de l'Échelle entre 13,809 °K et 273,15 °K.

2° Les points suivants ont été ajoutés au Tableau I (Points fixes de définition) :

point triple de e-H₂

point d'ébullition de e-H₂

point triple de O₂

point de congélation du zinc substitué au point d'ébullition du soufre.

3° Division de l'échelle en deux parties principales :

A. De 13,809 °K à 273,15 °K, les températures étant exprimées en $T_{\text{int } 1967}$.

B. Au-dessus de 273,15 °K, les températures étant exprimées en $t_{\text{int } 1967}$.

4° Pour la partie A, la spécification du thermomètre à résistance de platine est telle que W_{100} ne soit pas inférieur à 1,392 5 et $W_{4,2}$ pas supérieur à 8×10^{-4} .

Si un thermomètre doit être employé au-dessus de 90,19 °K seulement, W_{100} n'est pas inférieur à 1,392 0 comme pour la partie B.

5° Chapitre « III. Recommandations » :

a. Complément d'explications au sujet des erreurs dues aux pertes par rayonnement dans l'enveloppe du thermomètre à résistance.

b. Addition de la description du thermomètre à résistance de platine du type capsule.

c. Suppression de la référence à l'étalonnage du thermocouple entre 630,3 et 630,7 °C puisqu'il est maintenant définitivement recommandé d'employer le point de l'antimoine.

d. Point triple de l'eau : addition de la référence aux effets de la lumière du jour et de la lumière artificielle sur les lectures des thermomètres à résistance dans les cellules à point triple.

e. Description de la réalisation du point triple et du point d'ébullition de l'hydrogène en équilibre, y compris la relation tension de vapeur-température.

f. Description de la réalisation du point triple et du point d'ébullition de l'oxygène; nouvelle équation pour la relation tension de vapeur-température.

g. Suppression de la description de la réalisation du point d'ébullition du soufre.

h. Description de la réalisation du point de congélation de l'antimoine.

6° Chapitre « IV. Renseignements supplémentaires » :

a. Introduction dans le Tableau II (Repères secondaires) des points suivants :

point triple de l'azote

point d'ébullition de l'azote et équation tension de vapeur-température

point d'ébullition du soufre.

Les valeurs du point de sublimation de CO_2 et du point de congélation du mercure sont modifiées de façon à être en accord avec l'E.I.P.T. provisoire 1967.

Modification des points de congélation suivants qui passent :

In de 156,61 à 156,611 °C

Sn de 231,91 à 231,913 °C

Pb de 327,3 à 327,426 °C.

b. Paragraphe sur la relation entre l'E.I.P.T. 1948 et l'E.I.P.T. provisoire 1967, remplaçant le paragraphe IV.3 du texte de 1960.

c. Suppression du Tableau III du texte de 1960 qui est remplacé par la discussion de la nomenclature au début de ce projet.

d. Le tableau III de ce projet donne les valeurs

$$T - T_{\text{int } 1967} \quad \text{et} \quad t - t_{\text{int } 1948}$$

7° L'appendice donne les échelles de température pour l'utilisation pratique dans le domaine de 5,2 °K à 0,2 °K.

(22 février 1967)

ANNEXE 3

Commentaires sur le projet d'une Échelle Internationale Pratique de Température « provisoire 1967 »

Par H. MOSER

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (Allemagne)

I. COMMENTAIRES FONDAMENTAUX

1. Il a toujours été de règle que l'Échelle Internationale Pratique de Température (E.I.P.T.) soit changée de temps en temps de façon à la faire mieux coïncider avec l'échelle thermodynamique selon les progrès des techniques de mesure. Jusqu'à maintenant, chaque E.I.P.T. a été « provisoire » sans que cela ait été explicitement mentionné, et dans le futur nous n'aurons pas non plus d'échelle définitive.

2. A mon avis, il y a lieu de changer l'E.I.P.T. lorsque, en raison de l'état de la technique des mesures, des différences assez importantes avec l'échelle thermodynamique ont été constatées par différents observateurs et lorsqu'on peut s'attendre à ce que les changements ultérieurs soient nettement plus faibles. C'est actuellement le cas dans le domaine des températures élevées. Il n'y a, par exemple, aucun doute que la température du point de l'or doit être augmentée de plus de 1 degré et que les changements ultérieurs ne pourront être que de l'ordre du dixième de degré. Faut-il renoncer à des progrès importants parce que l'on doit s'attendre à des progrès beaucoup plus petits? Et la pyrométrie optique doit-elle également reposer à l'avenir sur une base incorrecte? On a fait l'objection qu'il fallait attendre jusqu'à ce que le thermocouple platine — platine rhodié puisse être remplacé par le thermomètre à résistance de platine. Mais il en résultera seulement de petits changements en comparaison de ceux qui devraient être faits dès maintenant.

Il n'est pas non plus satisfaisant de conserver pour les points fixes fondamentaux d'une échelle internationale des valeurs que l'on sait différer des meilleures valeurs actuelles. En maintenant de telles valeurs périmées dans la documentation, elles seraient considérées à tort comme les meilleures par les non-spécialistes.

3. Il est douteux qu'il soit utile et nécessaire pour le moment d'abandonner la définition actuelle de l'E.I.P.T. entre le point de l'oxygène et le point de glace et de la remplacer par une table des résistances réduites. A mon avis, on devrait s'en tenir au système existant depuis 1927 jusqu'à ce que l'on sache que le changement dans tout le domaine de -183 °C à $1\,064$ °C soit opportun. Une table pourrait être utile au-dessous du point de l'oxygène.

II. PROPOSITIONS

Nos propositions pour une E.I.P.T. 1967 dans le domaine au-dessus du point de l'oxygène peuvent être résumées en quelques mots; le Comité Consultatif de Thermométrie pourrait recommander à la prochaine Conférence Générale des Poids et Mesures :

1° de remplacer les valeurs actuelles des points du zinc (en remplacement de celui du soufre), de l'argent et de l'or par les nouvelles valeurs $419,58$ °C, $961,9$ °C et $1\,064,4$ °C, et d'attribuer à la constante c_2 la nouvelle valeur $0,014\,388$ mètre-degré; (ces valeurs peuvent être discutées à la prochaine réunion du C.C.T.);

2° d'accepter une table de corrections pour le domaine de -182 °C à 420 °C, qui contienne les écarts entre l'E.I.P.T. 1967 et l'échelle thermodynamique selon l'état actuel des études;

3° de ne pas modifier les autres recommandations à moins qu'un platine encore plus pur soit prescrit pour le thermomètre à résistance.

III. — Si l'on accepte les propositions faites au point II, la nouvelle E.I.P.T. ne différera pas, selon nos connaissances actuelles, de l'échelle thermodynamique. Les corrections indiquées au point II. 2° n'excéderont pas quelques centièmes de degré. Cela n'aurait aucun sens de donner des corrections pour le domaine au-dessus de 420 °C, car les écarts éventuels, qui pourraient être encore décelés, resteront dans les limites d'erreur des mesures faites avec le thermomètre à gaz, le couple thermoélectrique ou le pyromètre optique. La température du point de l'antimoine dans la nouvelle échelle ($630,67$ °C) est en bon accord avec l'observation ($630,65$ °C). On peut s'attendre que les changements ultérieurs d'une telle E.I.P.T. seront nettement plus faibles.

En résumé, ma proposition est donc de faire un changement important maintenant, sans attendre des changements nettement plus petits.

(17 mai 1967)

Appendice

Si, dans l'E.I.P.T. 1948 les températures des points du zinc, de l'argent et de l'or sont remplacées par les nouvelles valeurs 419,58 °C, 961,9 °C et 1 064,4 °C, il en résultera les écarts suivants :

| t (°C) | $t_{\text{int } 67} - t_{\text{int } 48}$ (deg) | $t_{\text{therm}} - t_{\text{int } 67}$ (deg) | Incertitude estimée |
|-------------|--|--|------------------------|
| - 183 | 0,000 | 0,00 ₀ | ± 0,005 à ± 0,01 |
| - 150 | + 0,007 | - 0,03 ₁ | |
| - 100 | + 0,008 | + 0,02 ₈ | |
| - 50 | + 0,004 | + 0,02 ₅ | |
| 0 | 0,000 | 0,00 ₀ | |
| + 50 | - 0,001 | - 0,01 ₁ | |
| + 100 | 0,000 | - 0,00 ₆ | |
| + 150 | + 0,004 | + 0,00 ₃ | |
| + 200 | + 0,011 | + 0,01 ₅ | |
| + 250 | + 0,021 | + 0,03 ₆ | |
| + 300 | + 0,034 | + 0,04 ₇ | |
| + 350 | + 0,049 | + 0,03 ₉ | |
| + 400 | + 0,067 | + 0,00 ₆ | |
| + 420 | + 0,075 | 0,00 ₀ | |
| + 450 | + 0,088 | - 0,00 ₃ | |
| + 500 | + 0,112 | - 0,00 ₃ | |
| + 550 | + 0,138 | - 0,00 ₆ | |
| + 600 | + 0,168 | - 0,01 ₂ | |
| + 630 | + 0,187 | - 0,01 ₇ | |
| + 650 | + 0,22 | + 0,06 | ± 0,1 à ± 0,2 |
| + 700 | + 0,36 | + 0,07 | |
| + 800 | + 0,64 | + 0,06 | |
| + 900 | + 0,92 | + 0,05 | |
| + 1 000 | + 1,21 | + 0,03 | |
| + 1 063 | + 1,40 | 0,00 | |

8. Le N.R.C. rejette la proposition pour les raisons suivantes :
 - a. L'Échelle n'est pas aussi reproductible que les échelles que l'on peut déduire des échelles nationales. Les formules d'interpolation ne sont pas suffisamment précises.
 - b. Les laboratoires nationaux ne sont pas en mesure de mettre en œuvre la nouvelle Échelle.
 - c. Les points triple et d'ébullition de l'oxygène, les points triple et d'ébullition de e-H₂ ne sont pas suffisamment bien connus.
9. L'I.M.P.R. est d'accord en principe, mais critique la méthode d'approche de la façon suivante :
 - a. L'Échelle « provisoire » devrait être limitée pour le moment au domaine de 20 à 90 °K. La table $T = f(W)$ devrait être employée comme base, mais devrait être recalculée pour tenir compte de la révision des valeurs des points fixes faite depuis que la Table CCT-64 a été établie.
 - b. Suggère qu'une table $T = f(W)$ soit calculée pour le domaine de 0 à - 183 °C sur la base d'une comparaison des échelles nationales du N.P.L., du N.R.C. et de l'I.M.P.R. en employant le même platine « moyen » que celui qui a été utilisé pour la partie inférieure de la Table CCT-64.
 - c. Préconise l'emploi des thermomètres à germanium pour réaliser une échelle dans le domaine de 12 à 20 °K.
 - d. Souligne le fait que le procédé d'interpolation fondé sur la méthode de Nernst-Matthiessen est très simple et conduit à une précision de 5 millidegrés dans le domaine de température entre le point triple et le point d'ébullition de l'oxygène. La même méthode pourrait être employée pour le domaine de 90 à 273 °K lorsqu'une table appropriée de $T = f(W)$ sera établie.

(Juillet 1967)

ANNEXE 5

Proposition de modification au projet d'une Échelle Internationale Pratique de Température « provisoire 1967 »

Par H. VAN DIJK

Kamerlingh Onnes Laboratorium (Pays-Bas)

Températures entre 273,15 °K et 13,809 °K

Un thermomètre étalon à résistance de platine devant être utilisé au-dessous de 90,18 °K devra être construit de telle sorte que $W(373,15 \text{ °K})$ ne soit pas inférieur à 1,392 5. Pour les thermomètres étalons destinés à être utilisés au-dessus de 90,18 °K, $W(373,15 \text{ °K})$ ne devra pas être inférieur à 1,392 0. On emploie généralement deux types de thermomètres étalons à résistance de platine: le type à longue tige et le type à capsule. Le thermomètre à longue tige, utilisé entre 630,5 °C et - 182,97 °C, doit être étalonné (c'est-à-dire que sa résistance doit être mesurée) à 419,505 °C, 100 °C, 0,01 °C et - 182,97 °C. Le thermomètre à résistance de platine du type à capsule, utilisé au-dessous de 0 °C, doit être étalonné à 373,15 °K, 273,16 °K, 90,18 °K, 54,356 °K, 20,268 °K, 17,070 7 °K et 13,809 °K.

La température $T_{\text{int } 1967}$ est définie entre 273,15 °K et 13,809 °K par la relation $W(T_{\text{int}}) = W_{\text{CCT-64}}(T_{\text{int}}) + \Delta W(T_{\text{int}})$, où $W(T_{\text{int}})$ est la résistance réduite d'un thermomètre étalon à résistance de platine et $W_{\text{CCT-64}}(T_{\text{int}})$ est la résistance réduite telle qu'elle est donnée dans la Table CCT-64 (« Table Moyenne Normale CCT-64 $T = f(W)$ pour le domaine des températures de 12 à 273,15 °K », publiée sous les auspices du Comité International des Poids et Mesures).

Les valeurs des écarts $\Delta W(T_{\text{int}})$ aux points fixes sont obtenues à partir des valeurs mesurées de $W(T_{\text{int}})$ et des valeurs correspondantes de $W_{\text{CCT-64}}(T_{\text{int}})$. Ces valeurs de $W_{\text{CCT-64}}(T_{\text{int}})$ sont données au tableau I.

TABLEAU I
Valeurs de $W_{\text{CCT-64}}$ aux points fixes

| | |
|---|---|
| $W(373,15 \text{ °K}) = 1\,392\,597 \times 10^{-6}$ | $W(20,268 \text{ °K}) = 4\,479,3 \times 10^{-6}$ |
| $W(90,18 \text{ °K}) = 243\,842,5 \times 10^{-6}$ | $W(17,070\,7 \text{ °K}) = 2\,647,9_5 \times 10^{-6}$ |
| $W(54,356 \text{ °K}) = 91\,983,9 \times 10^{-6}$ | $W(13,809 \text{ °K}) = 1\,407,8 \times 10^{-6}$ |

Pour trouver $\Delta W(T_{\text{int}})$ aux valeurs intermédiaires on utilise des formules d'interpolation. Le domaine compris entre 273,15 °K et 13,809 °K est divisé en quatre régions contiguës; dans chacune d'elles $\Delta W(T_{\text{int}})$ est défini par un polynôme en T_{int} . Les coefficients des polynômes sont déterminés, en général, d'après les valeurs de $W(T_{\text{int}})$ aux points fixes et d'après la condition que $dW(T_{\text{int}})/dT_{\text{int}}$ doit être continue à la jonction de deux domaines consécutifs.

a. Entre 273,15 °K et 90,18 °K les écarts sont représentés par la relation

$$(1) \quad \Delta W(T_{\text{int } 1967}) = a_1 t + b_1 t(t - 100) + c_1 t^2(t - 100)$$

où $t = t_{\text{int } 1967} = T_{\text{int } 1967} - 273,15$ et $a_1 = [W(100 \text{ °C}) - 1,392\,597]/100$.

Pour les thermomètres (à longue tige) utilisés entre 630,5 °K et -182,97 °C, $b_1 = B + 5,853\,6 \times 10^{-7}$, $c_1 = C + 4,333 \times 10^{-12}$; les constantes B et C peuvent être calculées de la façon habituelle d'après les valeurs mesurées de $R(T)$ à 444,60 °C (ou 419,505 °C), 100 °C, 0,01 °C et -182,97 °C. Pour les thermomètres (à capsule) pour lesquels α n'est pas inférieur à 0,003 925 et qui sont utilisés entre 100 °C et -182,97 °C et au-dessous de 90,18 °K, on peut prendre $b_1 = 0$ et c_1 peut être calculé d'après les écarts mesurés à 100 °C et à -182,97 °C.

b. Entre 90,18 °K et 54,356 °K les écarts sont représentés par la relation

$$(2) \quad \Delta W(T_{\text{int}}) = a_2 + b_2 T_{\text{int}} + c_2 T_{\text{int}}^2,$$

où les constantes sont déterminées d'après les valeurs mesurées de $\Delta W(90,18 \text{ °K})$, $\Delta W(54,356 \text{ °K})$ et d'après la valeur de $d\Delta W(T_{\text{int}})/dT$ à 90,18 °K, déduite de l'équation (1).

c. Entre 54,356 °K et 20,268 °K les écarts sont représentés par la relation

$$(3) \quad \Delta W(T_{\text{int}}) = a_3 + b_3 T_{\text{int}} + c_3 T_{\text{int}}^2 + d_3 T_{\text{int}}^3.$$

Les constantes sont déterminées d'après les valeurs mesurées de $\Delta W(54,356 \text{ °K})$, $\Delta W(20,268 \text{ °K})$ et d'après les valeurs de $d\Delta W(T_{\text{int}})/dT$ à ces températures, déduites des équations (2) et (4).

d. Entre 20,268 °K et 13,809 °K les écarts sont représentés par la relation

$$(4) \quad \Delta W(T_{\text{int}}) = a_4 + b_4 T_{\text{int}} + c_4 T_{\text{int}}^2.$$

Les constantes sont déterminées d'après les valeurs mesurées de $\Delta W(T_{\text{int}})$ à 20,268 °K, 17,070 7 °K et 13,809 °K.

(Juillet 1967)

ANNEXE 6

Examen critique de l'Échelle provisoire de température de Barber et van Dijk et proposition d'une Échelle internationale provisoire de température entre 11 °K et 90 °K

Par H. PRESTON-THOMAS et R. E. BEDFORD

Conseil National de Recherches (Canada)

Le projet d'Échelle provisoire de température établi par Barber, van Dijk et Durieux [1] diffère numériquement de l'Échelle Internationale Pratique de Température (E.I.P.T.) au-dessous de 273,15 °K. Dans ce domaine, l'Échelle provisoire rattache la relation expérimentale résistance réduite-température des thermomètres à résistance de platine à la Table CCT-64 au moyen de huit températures d'étalonnage définies et de quatre formules simples d'interpolation (cubiques ou quadratiques). La Table CCT-64 [2] donne les valeurs d'une fonction analytique (résistance réduite-température) établie d'après les déterminations expérimentales de l'échelle thermodynamique dans cinq laboratoires.

Contrairement à l'usage courant consistant à combiner l'E.I.P.T. et l'une des échelles nationales ⁽¹⁾, l'Échelle provisoire permet des mesures jusqu'à 14 °K dans une même échelle; elle est plus proche de l'échelle thermodynamique au-dessous de 273 °K et c'est une échelle complètement définie, que l'on peut reconstituer sans se référer à un thermomètre prototype.

Les avantages ci-dessus de l'Échelle provisoire sont appréciables. Ils sont toutefois assortis de limitations et d'incertitudes qu'il convient d'estimer avec soin avant que l'Échelle provisoire soit internationalement adoptée.

Parmi ces limitations, qui ont déjà été indiquées [3], il convient de citer une légère (mais significative) différence avec les déterminations expérimentales initiales de l'échelle thermodynamique, une « non-unicité » de

⁽¹⁾ L'une des quatre échelles sur lesquelles est fondé le domaine de 12 °K à 90 °K de la Table CCT-64.

l'Échelle provisoire, nettement plus marquée que celle des échelles nationales qu'elle est destinée à remplacer, et un écart délibérément admis avec l'échelle thermodynamique dans le domaine de 230 °K à 273 °K ⁽²⁾.

Il semble qu'une évaluation exacte des avantages et des inconvénients de l'Échelle provisoire nécessite un travail expérimental. Certaines contributions à ce travail ont été analysées dans la version complète de ce rapport présentée au C.C.T. [4].

Les résultats de cette analyse ⁽³⁾ servent de base à l'examen suivant de la proposition de Barber-van Dijk.

On s'accorde en général sur l'urgence qu'il y a à donner une approbation officielle à une échelle de température qui puisse être acceptée internationalement et qui s'étende au-dessous de la limite inférieure de l'actuelle E.I.P.T. L'emploi d'une seule échelle approuvée supprimerait la nécessité qu'il y a actuellement de ramener les résultats expérimentaux de l'une à l'autre des différentes échelles « nationales » et supprimerait aussi toute tentation nationaliste (si toutefois elle existe) de faire proliférer d'autres échelles de température dans des laboratoires qui n'ont pas encore la leur.

L'Échelle provisoire a été établie pour répondre à ces besoins et la question se pose de savoir si son adoption doit être recommandée sous sa forme actuelle (1968), où s'il faut la considérer comme une base valable pour de nouvelles recherches et études du genre de celles dont il est rendu compte au C.C.T. [4] et dans [5]. Dans ce dernier cas, une autre échelle provisoire de température fournirait l'extension nécessaire au-dessous de l'actuelle E.I.P.T. pour environ deux ans, en attendant l'extension et la modification de l'E.I.P.T. Un certain nombre d'arguments favorables ou défavorables à l'adoption immédiate de l'Échelle provisoire ont été récemment communiqués aux membres du C.C.T.

Notre intention n'est pas de reprendre ces arguments en détail ici; ils peuvent être résumés comme suit.

a. Arguments en faveur de l'adoption immédiate de l'Échelle provisoire :

1. L'Échelle provisoire satisfait le besoin le plus urgent en ce qui concerne la température en fournissant une extension importante au-dessous (jusqu'à 14 °K) de la limite inférieure actuelle (90 °K) de l'E.I.P.T.
2. Bien qu'il soit reconnu que l'Échelle provisoire n'est pas très reproductible entre 14 °K et 54 °K, elle l'est toutefois suffisam-

⁽²⁾ Cet écart permet une jonction raisonnablement douce de l'Échelle provisoire immédiatement au-dessous du point de glace et de l'E.I.P.T. immédiatement au-dessus. On aurait pu introduire un écart équivalent immédiatement au-dessous de 90 °K, laissant ainsi la totalité de l'E.I.P.T. inchangée. Il a toutefois paru désirable de réduire la différence entre l'E.I.P.T. et l'échelle thermodynamique dans la région s'étendant de 0 °K à 273 °K, mais (naturellement) il n'a pas semblé nécessaire de faire de telles corrections, qui seraient aussi assez grandes, au-dessus de 0 °C. (Toutefois, il faut s'attendre à devoir faire ces corrections plus tard, car les raisons d'améliorer le domaine de 90 °K à 0 °C ne sont vraisemblablement pas plus urgentes que celles d'améliorer le domaine au-dessus de 0 °C; une troisième version pour le domaine de — 40 °C à 0 °C sera alors nécessaire).

⁽³⁾ On a publié l'essentiel de cette analyse, ainsi qu'une discussion générale des conditions requises d'une échelle pratique de température pour les températures basses et moyennes [5].

ment en regard des besoins actuels et pourra être ultérieurement améliorée quelque peu en imposant des critères de qualité plus stricts aux thermomètres à résistance employés pour la réaliser.

3. De même, la différence entre l'Échelle provisoire et l'échelle thermodynamique dans le domaine de 14 °K à 273 °K, bien que certainement décelable, est suffisamment faible pour satisfaire pratiquement tous les besoins expérimentaux actuels concernant seulement les valeurs des températures et la plupart des besoins expérimentaux concernant la grandeur du degré. Ces erreurs, tant sur la température que sur la grandeur du degré, sont en tout cas pour le domaine de 90 °K à 273 °K bien inférieures à ce qu'elles sont avec l'E.I.P.T.
4. L'Échelle provisoire fournit non seulement une échelle au-dessous de 90 °K, mais elle apporte à l'E.I.P.T. des améliorations numériques considérables dans le domaine de 90 °K à 273 °K et résout certaines ambiguïtés de l'E.I.P.T. (sans la modifier numériquement) aux températures plus élevées. Cela constitue donc un premier pas important vers le remplacement de l'E.I.P.T. actuelle, ce qui est, depuis de nombreuses années, considéré comme l'une des tâches essentielles du C.C.T. En fait, puisque l'Échelle provisoire élimine les défauts les plus évidents de l'E.I.P.T. actuelle, on peut dire qu'elle laisse un délai considérable avant qu'il soit nécessaire d'apporter de nouvelles modifications numériques aux domaines des températures élevées de l'E.I.P.T.

b. Les arguments pour reporter à plus tard l'adoption de l'Échelle provisoire, dans l'attente de nouveaux résultats et de modifications éventuelles, sont en gros les suivants :

1. Que l'adoption de l'Échelle provisoire soit souhaitable ou non pour d'autres raisons, ce n'est pas l'absence d'autres moyens d'étendre l'échelle de température au-dessous de 90 °K qui la rend immédiatement nécessaire. Provisoirement, l'adoption de corrections convenues pour passer des différentes échelles nationales à la Table CCT-64 (ou tout autre table comparable) serait certainement un procédé plus facile que la mise en pratique de l'Échelle provisoire dans ce domaine.
2. La reproductibilité de la température et de la grandeur du degré, tant à température constante qu'en fonction de la température, de l'Échelle provisoire peut être satisfaisante pour les besoins actuels. Cela n'est vrai toutefois que de façon marginale et, avant d'être adoptée, l'Échelle provisoire devrait être améliorée à un point tel qu'elle puisse satisfaire les demandes de reproductibilité de niveaux supérieurs qui risquent de survenir dans un proche avenir. Il est troublant de remarquer que la reproductibilité de la température et de la grandeur du degré est au moins d'un ordre de grandeur moins bonne, dans le domaine de 14 °K à 54 °K, que celle que l'on obtient entre 0 °C et 420 °C ou entre 1,5 °K et 5 °K.

3. Les différences entre l'Échelle provisoire et l'échelle thermodynamique sont petites mais décelables; elles atteignent dès maintenant, pour les travaux de haute précision, un niveau expérimentalement significatif. Cela est dû en partie aux imperfections des expressions analytiques employées pour établir la Table CCT-64, et en partie à la concordance de cette Table avec l'E.I.P.T. à 0 °C. Un remplacement et une extension officiels de l'E.I.P.T. (ce à quoi reviendrait l'adoption de l'Échelle provisoire) ne doivent pas introduire de telles erreurs si celles-ci peuvent être évitées (ce qui est le cas au-dessous de 90 °K), ou bien si l'on peut penser qu'elles sont temporaires et sujettes à une correction numérique ultérieure (comme c'est le cas entre - 40 °C et 0 °C).
4. Le besoin d'une prochaine modification de l'E.I.P.T. pour son domaine actuel est reconnu, mais il n'est pas évident qu'il soit avantageux d'effectuer cette modification en plusieurs fois. Il serait encore plus désavantageux qu'une partie déjà modifiée (- 40 °C à 0 °C) doive faire par la suite l'objet d'un nouveau changement. D'un autre côté, si l'on n'a pas l'intention de modifier l'E.I.P.T. au-dessus de 0 °C (parce que les avantages de l'uniformité l'emportent sur ceux de l'exactitude thermodynamique) le même argument restreindrait vraisemblablement la partie de l'Échelle provisoire ayant des valeurs numériques nouvelles au domaine de température inférieur à 90 °K.
5. Les changements numériques dans l'E.I.P.T. (*) doivent être faits aussi rarement que possible. Des changements fréquents entraînent des confusions inutiles pour les non-spécialistes; ils peuvent même faire que ceux-ci utilisent à leur insu des thermomètres étalonnés dans des échelles différentes; ils diminuent le crédit de l'E.I.P.T. et favorisent le retour à l'emploi d'échelles nationales ou autres. L'histoire de l'E.I.P.T. à cet égard est excellente puisqu'il n'y a eu que deux éditions, celle de 1927 et celle de 1948. A partir de maintenant, une troisième édition est aisément justifiable mais elle devrait être établie pour durer, si possible, environ deux décennies. Si ce point de vue est accepté, il s'ensuit que l'Échelle provisoire ne devrait être adoptée en 1968 que si l'on n'a pas l'intention de modifier ultérieurement l'E.I.P.T. au-dessus de 0 °C. Si tel est le cas, comme on l'a dit plus haut, l'argument en faveur d'une modification de l'E.I.P.T. entre 90 °K et 0 °C semble être en vérité très faible.

(Il convient d'ajouter, évidemment, qu'un certain nombre

(*) Par l'expression « changement numérique dans l'E.I.P.T. » on entend ici tout changement décelable d'une valeur à une autre dans l'E.I.P.T. d'une température thermodynamique donnée. En conséquence, nous ne comprenons pas les extensions de l'E.I.P.T., le remplacement d'un point fixe par un autre ou d'un instrument par un autre, ni un perfectionnement qui améliore la reproductibilité dans l'E.I.P.T. d'une température thermodynamique précise, lorsque aucune des modifications envisagées n'est accompagnée par un changement numérique tel que défini ci-dessus.

de personnes, parmi lesquelles, pensons-nous, des membres du C.C.T., ne partagent pas notre point de vue que les changements de l'E.I.P.T. doivent être rares. Il est également possible de penser qu'une opération hybride constitue nominalemeut une modification unique de l'E.I.P.T., mais entreprise en deux étapes et finalement désignée comme, disons, l'E.I.P.T. 1970. A notre avis, il est préférable dans un cas pareil de différer les changements numériques (comme définis plus haut) de la première étape de telle sorte que toutes les modifications soient introduites en même temps. Cela aurait l'effet le moins défavorable sur ceux qui font des mesures précises de température).

Le poids qui doit être attribué aux différents points mentionnés ci-dessus (ainsi qu'à d'autres points que nous avons sans doute oubliés) est une question de jugement personnel. Toutefois, pour certains de ces points, ce jugement est influencé par le genre d'analyses quantitatives que nous avons essayé de faire pour la version complète de ce rapport, et qui pourraient être étendues avec profit à un plus grand nombre de thermomètres et à d'autres facteurs affectant l'Échelle provisoire.

Le facteur le plus critique est peut-être le degré de reproductibilité, tant de la température que de la grandeur du degré, qui est souhaitable et réalisable dans la prochaine édition de l'E.I.P.T. Notre opinion est que nous devons essayer d'obtenir une amélioration par rapport à la reproductibilité que l'on a avec l'E.I.P.T. actuelle de façon à se rapprocher davantage de la reproductibilité des échelles nationales actuelles. On peut atteindre ce but par les moyens suivants: emploi de points fixes supplémentaires, choix d'autres formules d'interpolation, restrictions concernant les caractéristiques des thermomètres, ou restriction, vraisemblablement à 20 °K, de la limite inférieure de l'E.I.P.T. définie par le thermomètre à résistance de platine ⁽⁵⁾. Il semble probable que l'on puisse ainsi mettre au point une échelle valable, étroitement liée à la version actuelle de l'Échelle provisoire.

Toute amélioration et tout nouveau changement de valeur de l'Échelle provisoire prendra du temps, et nécessitera ainsi l'adoption entre temps d'une échelle acceptable pour le domaine au-dessous de 90 °K. Comme on l'a fait remarquer dans le passé, tant au N.R.C. qu'au N.B.S., les relations connues entre les échelles nationales permettent de passer de chacune d'elles à une autre, à la Table CCT-64 ou à quelque forme modifiée de la Table CCT-64. On pourrait ainsi s'accorder facilement pour choisir une échelle particulière comme échelle internationale et tous les thermomètres pourraient être étalonnés dans cette échelle sans modifier les méthodes expérimentales extrêmement précises actuellement employées. (La possibilité d'une dérive significative des échelles nationales avec le temps existe,

⁽⁵⁾ La fixation de la limite inférieure à 20 °K n'exclurait pas la possibilité de recommander certain type d'échelle secondaire du thermomètre à résistance de platine descendant jusqu'à, disons, 11 °K, ni l'emploi de points complémentaires d'étalonnage utilisant la tension de vapeur de l'hydrogène pour réaliser les reproductibilités convenables pour une échelle primaire descendant jusqu'à 14 °K. Dans ce dernier cas, toutefois, l'échelle prend rapidement les caractéristiques d'une échelle à tension de vapeur de l'hydrogène avec le thermomètre à résistance de platine jouant le rôle de thermomètre secondaire étalonné en fonction de celle-ci.

mais elle est très faible. A cet égard, une récente vérification de quatre thermomètres qui ont maintenu le point de l'oxygène au N.R.C. pendant cinq ans n'a pas révélé de dérive relative excédant 0,000 2 °K).

Quelle que soit la nouvelle échelle qui sera publiée, l'Échelle provisoire, une nouvelle édition de l'E.I.P.T., ou une échelle reliée aux échelles nationales actuelles, cette nouvelle échelle sera probablement rattachée à la Table CCT-64, ou au moins aux travaux expérimentaux sur lesquels est fondée la Table CCT-64. C'est encore une question d'opinion de savoir si les « erreurs d'ajustement » et, en particulier, les variations de la grandeur du degré (rapporté à ses données de base expérimentales) de cette Table sont assez grandes pour valoir la peine d'être réduites ou non. Si l'usage d'une échelle fondée sur la Table CCT-64 était déjà répandu, tout changement entraînerait inévitablement une certaine confusion parmi les usagers et il pourrait être inopportun d'y toucher. Toutefois, en dépit de son âge relativement grand (trois ans), ce n'est pas le cas et il semble raisonnable de préférer une version de cette table en concordance plus étroite avec ses sources expérimentales. Une nouvelle version de la Table CCT-64 peut être adoptée maintenant sans grand inconvénient et sans conséquences désagréables; c'est la solution que nous préférons voir adopter ⁽⁶⁾.

En résumé, nous préférons par conséquent ne pas adopter l'Échelle provisoire proposée par Barber et van Dijk, mais adopter à la place comme solution provisoire une échelle rattachée aux échelles nationales actuelles et fondée sur la Table CCT-64 modifiée; quelques premiers pas vers une telle échelle sont exposés dans l'Annexe B de la version complète de ce rapport [4] et dans [5].

En même temps nous aimerions que l'on continue de perfectionner l'Échelle provisoire en vue de son introduction dans une future édition de l'E.I.P.T., dans laquelle seraient également introduites toutes les modifications numériques souhaitables au-dessus de 0 °C.

(25 janvier 1968)

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Ce volume, Annexe 2, p. T 32.
- [2] Table CCT-64, $T = f(W)$ pour le domaine des températures 12-273,15 °K, 1964.
- [3] Cf. Annexe 1, Document N° 8.
- [4] Cf. Annexe 1, Document N° 25.
- [5] PRESTON-THOMAS (H.) et BEDFORD (R. E.), *Metrologia*, 4, 1968, p. 14.

⁽⁶⁾ On peut, évidemment, envisager séparément d'une part le choix entre la version actuelle et une nouvelle version de la Table CCT-64, d'autre part la question de l'adoption de l'Échelle provisoire puisque celle-ci pourrait tout aussi bien inclure l'une ou l'autre version.

Thermométrie à gaz aux basses températures au N.R.L.M.

Par T. MOCHIZUKI, K. MITSUI, M. TAKAHASHI et T. SHIRATORI

National Research Laboratory of Metrology (Japan)

Abstract. — This paper gives a brief description of the apparatus and the experimental results obtained for the boiling point of oxygen which lead to the value $T_{O_2} = 90.194\ 8\ ^\circ\text{K}$.

Résumé. — On donne une brève description de l'appareillage et des résultats expérimentaux obtenus pour le point d'ébullition de l'oxygène qui conduisent à la valeur $T_{O_2} = 90,194\ 8\ ^\circ\text{K}$.

I. LE THERMOMÈTRE A GAZ

On a construit un thermomètre à hélium du type à volume constant; sa caractéristique la plus marquante réside dans la méthode employée pour la détermination de la correction d'espace nuisible. La figure 1 donne un

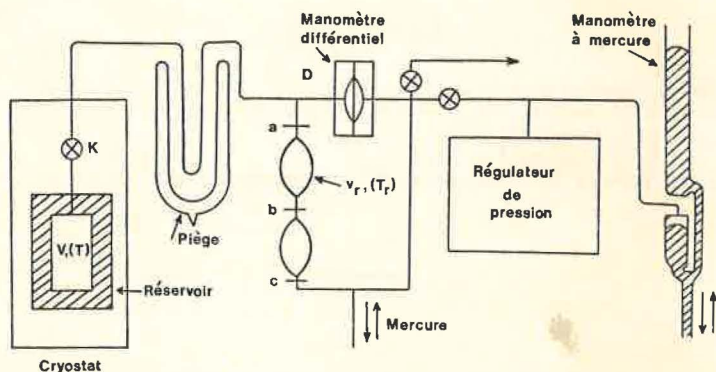


Fig. 1. — Schéma du thermomètre à gaz du N.R.L.M.

schéma de l'appareillage du thermomètre à gaz. Le réservoir à gaz V , placé dans un cryostat, est maintenu à une température de référence T_0 ou à une température T (à mesurer) pendant la mesure de la pression et la déter-

mination de la correction d'espace nuisible. La pression p_0 ou p du gaz dans le réservoir V est transmise par un capillaire à un manomètre différentiel à membrane D. La pression sur la face opposée de D est réglée manuellement et amenée à l'équilibre avec le côté réservoir (indiqué par D), puis mesurée avec un manomètre à mercure. Le capillaire est aussi relié à un réservoir en verre v_r au moyen de tubes en verre de faible section. Une partie du capillaire, en forme de U, est refroidie à l'azote liquide; cette partie sert ainsi de piège pour empêcher la vapeur de mercure de diffuser dans V et en même temps supprimer les autres vapeurs condensables du système. Le manomètre à mercure consiste en un siphon de verre (30 mm de diamètre) dans lequel la température du mercure est automatiquement maintenue égale à la température ambiante à 0,01 degré près. Le manomètre différentiel est capable de détecter une différence de pression de 0,07 N/m² (5×10^{-4} mmHg), ce qui correspond à une différence de température de $\pm 0,000 15$ °K pour la détermination du point d'ébullition de l'oxygène lorsque la pression à 0 °C est d'environ 1 atmosphère. Une vanne K spécialement conçue est placée juste au-dessus de V; son volume, d'environ 0,1 cm³, est suffisamment reproductible au cours de mesures répétées.

La méthode de mesure est la suivante: K est ouverte et le niveau du mercure en v_r est établi au repère « a ». On mesure alors p_0 , en maintenant la température du réservoir V suffisamment stable à la température de référence T_0 . Ensuite, on ferme K et l'on mesure la pression p'_0 du gaz dans l'espace nuisible, en maintenant le niveau du mercure au repère « a ». Finalement, le gaz de l'espace nuisible est détendu dans v_r en abaissant le mercure jusqu'au repère « b »; on mesure alors la pression p'' et la température T_{r0} du volume v_r de gaz, K étant maintenue fermée. On obtient de la même manière les valeurs de p , p' , p'' et T_r pour la température T (à mesurer). D'après ces valeurs observées, on calcule la température T de V au moyen de l'équation

$$T = T_0 \frac{p}{p_0} \frac{V}{V_0} (1 + \epsilon_D)^{-1} (1 + \epsilon_B),$$

où

$$\epsilon_D = \frac{T_0}{T_{r0}} \frac{v_r}{V_0} \frac{p'_0}{p_0} - \frac{p}{p_0} \frac{T_0}{T_r} \frac{v_r}{V_0} \frac{p''}{p''},$$

$$\epsilon_B = \frac{p_0}{RT_0} \left[B_0 - \left(\frac{p}{p_0} \frac{T_0}{T} \right)^2 \frac{V}{V_0} B \right].$$

Dans cette équation V est le volume de V, B et R sont respectivement le second coefficient du viriel de l'hélium et la constante universelle des gaz; ϵ_D est la correction pour l'espace nuisible calculée dans l'hypothèse d'un gaz parfait; ϵ_B est la correction pour tenir compte du fait que le gaz dans V n'est pas parfait. La correction due au fait que le gaz de l'espace nuisible n'est pas parfait peut être négligée dans le cas présent. Le rapport V/V_0 doit être déterminé en mesurant le coefficient de dilatation thermique du réservoir.

II. DÉTERMINATION DU POINT DE L'OXYGÈNE

On a employé pour le thermomètre à gaz un réservoir de 100 cm³, en cuivre OFHC et on a placé un thermomètre à résistance de platine du type

à capsule dans un puits ménagé dans la paroi du réservoir. Le thermomètre a été étalonné au point triple de l'eau et au point d'ébullition de l'oxygène; la précision de ce dernier point a été estimée à $\pm 0,001$ °K ou mieux [1] (1).

Afin d'obtenir une valeur de V/V_0 on a mesuré, au moyen d'un interféromètre de Fizeau, le coefficient de dilatation thermique du réservoir sur des échantillons prélevés sur le même morceau de cuivre que celui qui a servi pour construire le réservoir et recuits dans les mêmes conditions. Des mesures ont été faites entre 273,15 et 90,18 °K sur deux échantillons de dimensions différentes (5,8 et 7,6 mm de longueur) en utilisant deux longueurs d'onde, la radiation 0,589 6 μm du sodium et la radiation 0,546 1 μm du mercure. Les résultats sont indiqués à la figure 2 où une mesure est

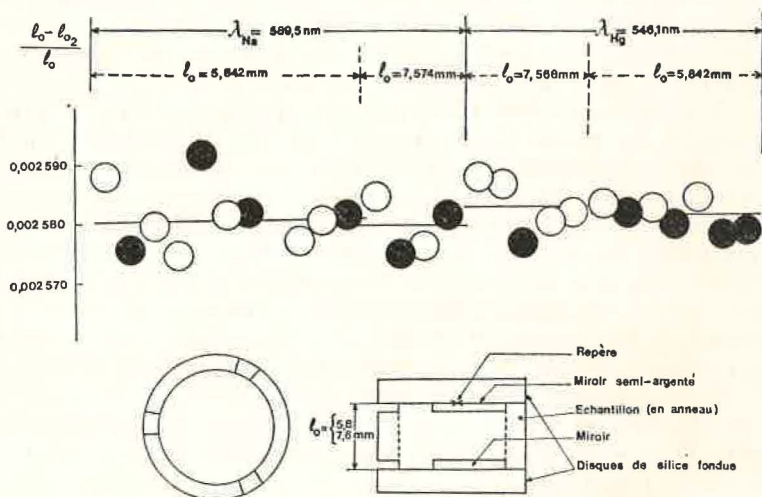


Fig. 2. — Mesure du coefficient de dilatation du réservoir du thermomètre à gaz.

obtenue en comptant les franges d'interférence qui défilent devant un repère en croix gravé sur un miroir semi-argenté lorsque la température de l'échantillon varie de 273,15 à 90,18 °K (○) ou vice versa (●). Il n'y a aucune différence significative entre les résultats obtenus pour les deux échantillons de dimensions différentes et pour les deux longueurs d'onde utilisées. La dilatation linéaire $(l_0 - l)/l_0$ entre 273,15 et 90,18 °K a été trouvée égale à $2,5811 \times 10^{-3}$, avec un écart-type sur la moyenne de $\pm 8,4 \times 10^{-7}$.

Trois séries de mesures du point d'ébullition de l'oxygène ont été effectuées depuis août 1966 (fig. 3). Le résultat de la première série, qui a été présenté en 1966 comme résultat préliminaire à la réunion du Groupe de travail du Comité Consultatif de Thermométrie, est indiqué ici seulement à

(1) L'ordre de grandeur de la précision dans la réalisation du point de l'oxygène au N.R.L.M. peut être estimé au moyen de l'essai suivant. Nous avons mesuré le point de l'oxygène au moyen de deux thermomètres qui avaient été étalonnés d'après l'échelle du N.P.L. (la valeur assignée au point de l'oxygène était 90,18 °K). Par rapport aux valeurs du N.P.L. (90,18 °K), les lectures des thermomètres étaient supérieures de 0,003 2 deg pour un thermomètre et de 0,004 5 deg pour l'autre.

titre de comparaison et il n'en est pas tenu compte dans l'établissement de la valeur du point de l'oxygène. Entre la première et la deuxième série il y a une certaine amélioration de l'écart-type des résultats (mais peu de changement dans la valeur moyenne); on pense que cette amélioration est due au perfectionnement apporté à l'appareillage et au procédé de mesure.

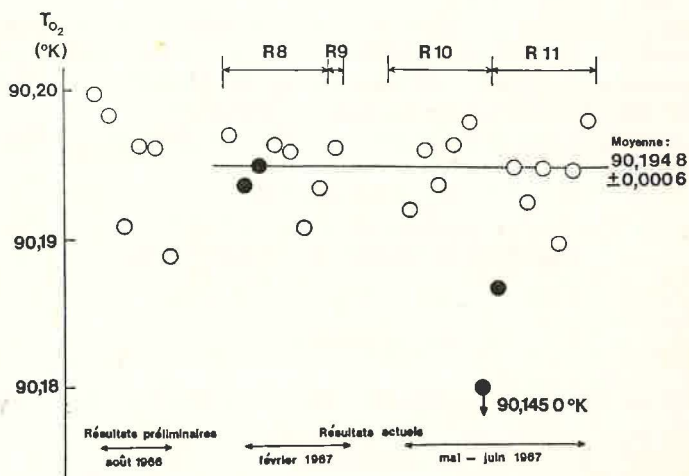


Fig. 3. — Résultats de la mesure du point d'ébullition de l'oxygène (T_{O_2}).

- Piège à la température de N_2 liquide;
- Piège à la température ambiante.

Dans la deuxième et la troisième série, plusieurs mesures ont été faites avec le même remplissage d'hélium. Normalement, le piège était maintenu sans interruption à la température de l'azote liquide pendant toute la durée du remplissage, tandis que le réservoir subissait des cycles de température entre 0 °C et le point de l'oxygène et demeurait quelquefois à la température ambiante. Dans le cas d'une interruption du refroidissement du piège, la mesure suivante n'était faite qu'après un refroidissement continu du piège d'au moins 50 heures. Dans la figure 3, les quatre cercles noirs correspondent à des mesures exceptionnelles pour lesquelles la mesure de p_0 était faite en maintenant le piège à la température ambiante. Pour deux mesures avec le remplissage R8 les valeurs obtenues pour T_{O_2} ne semblent pas avoir été affectées par un changement de la température du piège, mais la dernière mesure faite avec le remplissage R10 donne une valeur très basse de T_{O_2} ; la première mesure faite avec le remplissage R11 donne aussi une valeur de T_{O_2} assez basse.

On peut dire que pour le même gaz qui donnait des valeurs de T_{O_2} anormalement basses avec le piège à la température ambiante, on obtenait des valeurs de T_{O_2} normales avec le piège à la température de l'azote liquide (tant avant qu'après l'expérience avec le piège maintenu à la température ambiante). Ce fait suggère que le piège supprime une contamination possible du gaz dans le système (certains produits qui s'évaporent au-dessous de 0 °C et se condensent au point de l'oxygène). Toutefois, il vaudrait mieux

que l'on ne trouve pas de différence entre les valeurs de T_{O_2} obtenues à différentes températures du piège. Avec l'appareillage actuel, cette condition n'a pas toujours été atteinte (probablement à cause de la désorption de gaz non purs) mais, comme on l'a dit plus haut, on considère que les valeurs de T_{O_2} obtenues avec le piège maintenu à la température de l'azote liquide sont exemptes de l'erreur systématique due à la contamination du gaz par des vapeurs condensables.

La deuxième et la troisième série ont été effectuées en utilisant de l'hélium de plus grande pureté (99,999 pour cent) que pour la première série. Toutefois, les valeurs moyennes pour les différents gaz montrent à peine une différence à laquelle on pouvait s'attendre ⁽²⁾.

La valeur moyenne et les écarts-types des deuxième et troisième séries sont les suivants :

$$T_{O_2} = 90,194\ 8\ ^\circ\text{K}$$

$$\text{écart-type d'une mesure } \pm 0,002\ 5\ ^\circ\text{K}$$

$$\text{écart-type de la moyenne } \pm 0,000\ 6\ ^\circ\text{K}$$

III. DISCUSSION

Le tableau I donne une estimation des erreurs possibles dans la présente valeur de T_{O_2} .

TABLEAU I

| Facteurs | Erreur maximale ($^\circ\text{K}$) |
|--|--|
| Manométrie | $\left\{ \begin{array}{l} + 0 \\ - 0,003 \end{array} \right.$ |
| Correction du viriel pour l'espace nuisible négligée | $\left\{ \begin{array}{l} + 0,000\ 2 \\ - 0 \end{array} \right.$ |
| Détermination de v_f/V_0 | |
| Dilatation thermique du réservoir | $\pm 0,000\ 5$ |

La plus grande incertitude est dans la détermination du rapport p/p_0 ; on l'a estimée en comparant le manomètre employé pour le présent travail et le baromètre interférentiel à tube en U [2] qui sert de manomètre étalon primaire au N.R.L.M.; le domaine de mesure de ce baromètre s'étend de 0 à 106 700 N/m² (0 à 800 mmHg) et sa précision est de $\pm 0,32\ \text{N/m}^2$ (2,4 μmHg) pour 1 atmosphère. La comparaison a été faite en reliant les deux manomètres, dont la différence de hauteur était de 4 m, avec un tube de cuivre de 10 mm de diamètre et de 20 m de longueur rempli d'hélium. On a trouvé entre les deux manomètres une différence systématique, qui conduit à une correction de + 0,003 $^\circ\text{K}$ pour la valeur de T_{O_2} en supposant que la lecture du manomètre étalon, lors de la comparaison, est correcte; on n'a toutefois pas tenu compte de cette correction dans la présente valeur de T_{O_2} , car son étude complète n'est pas achevée.

⁽²⁾ La valeur moyenne obtenue au cours de la première série, présentée au Groupe de travail (1966), est fondée sur une valeur du coefficient de dilatation du réservoir différente de celle qui a été employée dans le présent calcul. Pour ce document on a recalculé les valeurs en se servant des mêmes constantes.

Il est difficile d'estimer le nombre et la grandeur des autres erreurs systématiques. Parmi celles-ci, on pense que l'erreur due à l'existence de vapeurs condensables est faible, comme on l'a dit plus haut. Afin d'étudier les erreurs systématiques qui n'ont pas été mesurées directement, on procède en ce moment à d'autres expériences en utilisant des réservoirs, des capillaires et des vannes (K) différents.

(Septembre 1967)

BIBLIOGRAPHIE

- [1] MOCHIZUKI (T.), SWAWADA (S.) et TAKAHASHI (M.), *Comité Consultatif de Thermométrie*, 7^e session, 1964, p. T 34.
 - [2] OHYAMA (I.), KOIZUMI (K.) et KANEDA (R.), *Comité Consultatif de Thermométrie*, 5^e session, 1958, p. T 220.
KANEDA (R.), SUDO (S.) et NISHIBATA (K.), *Bull. N.R.L.M.*, séries n° 9, 1964, p. 24.
-

Comparaison des échelles du N.P.L., de l'I.M.P.R. et du N.R.C. entre 90 et 273 °K

Par M. P. ORLOVA

Institut des Mesures Physicotechniques et Radiotechniques (U.R.S.S.)

On a procédé en 1967 à une comparaison de thermomètres à résistance de platine étalonnés d'après les échelles du N.P.L., de l'I.M.P.R. et du N.R.C.

Les mesures ont été effectuées de la façon habituelle dans un cryostat adiabatique. Les températures ont été calculées pour 61 points expérimentaux dans les échelles de l'I.M.P.R. et du N.P.L., selon les spécifications des thermomètres, en tenant compte des différences entre les valeurs des températures. Les résultats de cette comparaison sont donnés à la figure 1.

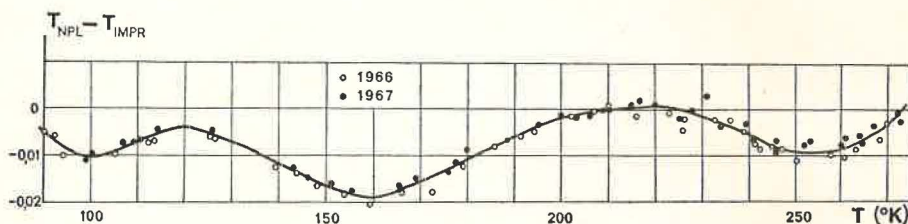


Fig. 1.

La figure 2 donne les résultats de la comparaison indirecte des échelles de l'I.M.P.R., du N.P.L., du K.O.L. et du N.R.C. faite à l'aide de l'E.I.P.T.

Malheureusement, les thermomètres fournis par le N.R.C. n'étaient pas étalonnés d'après l'échelle de température du N.R.C. mais d'après l'E.I.P.T. Pour cette raison nos comparaisons entre les échelles de l'I.M.P.R. et du N.R.C. n'ont pu être achevées. Nous n'avons pu effectuer que la partie expérimentale de ces travaux.

Après avoir réalisé une définition plus précise de l'échelle de température de l'I.M.P.R. entre 90 °K et 273 °K [1], on a recalculé les résultats de la comparaison entre les échelles du N.P.L. et de l'I.M.P.R. faite en 1966 [2]

pour 45 points expérimentaux. Ces résultats sont également portés à la figure 1.

Les différences systématiques entre les deux séries de mesures sont dans les limites de l'exactitude des mesures.

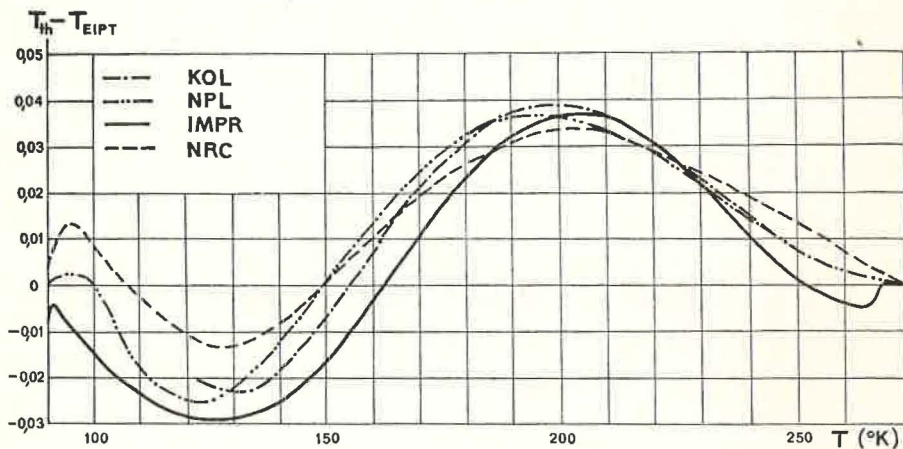


Fig. 2.

Les différences entre les échelles du N.P.L. et de l'I.M.P.R. ne dépassent pas 0,01 deg pour tout le domaine de température, sauf dans la région comprise entre 140 $^{\circ}K$ et 180 $^{\circ}K$ pour laquelle les différences atteignent 0,02 deg. Au point d'ébullition de l'oxygène les deux échelles diffèrent de 0,005 degré.

(Septembre 1967)

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Amélioration de l'échelle de l'I.M.P.R. 1967 (non publié).
- [2] Document N° 19 présenté à la Réunion des Groupes de travail du C.C.T., septembre 1966.

ANNEXE 9

Point de congélation de l'antimoine

Par L. CROVINI

Istituto Termometrico Italiano (Italie)

A l'Istituto Termometrico Italiano on a obtenu une reproductibilité satisfaisante du point de congélation de l'antimoine au moyen d'une technique très simple.

On a fait fondre 1 kg d'antimoine de très grande pureté ($> 99,999\ 9\ \%$) dans un creuset de graphite de grande pureté ($> 99,999\ 5\ \%$), qui avait été purifié auparavant dans une atmosphère de chlore à environ $1\ 300\ ^\circ\text{C}$.

La profondeur d'immersion du thermomètre dans le métal est de 18 cm. Le diamètre du puits contenant le thermomètre est d'environ 9 mm. Le creuset est enfermé dans un récipient en Vycor rempli de gaz sec ($95\ \%\ \text{N}_2 + 5\ \%\ \text{H}_2$).

La congélation est effectuée dans un four dans lequel un bloc de cuivre entoure le creuset; un chauffage auxiliaire situé au-dessus maintient les déperditions de chaleur par le haut dans des limites raisonnables.

Le métal en fusion est refroidi jusqu'à ce que la température dans le puits du thermomètre soit inférieure de 1 ou 2 degrés à celle du point de congélation. Quand la puissance du four est réglée de manière à obtenir une température bien constante et uniforme à l'intérieur du puits du thermomètre, on retire le thermomètre et l'on insuffle un gaz ($95\ \%\ \text{N}_2 + 5\ \%\ \text{H}_2$) dans le puits au moyen d'un tuyau ayant une rangée de très petits orifices vers l'extrémité: on maintient un débit de 20 l/min pendant environ 3 minutes.

Par suite du net refroidissement appliqué de façon presque symétrique la germination produit un manchon de métal solide autour du puits et l'on observe un palier de congélation très constant.

Les figures 1 *a* et *b* donnent deux exemples de courbes de congélation: l'une (*a*) est obtenue avec un thermocouple étalon et l'autre (*b*) avec un thermomètre à résistance de platine; cette dernière montre un palier constant à mieux que 2×10^{-4} deg.

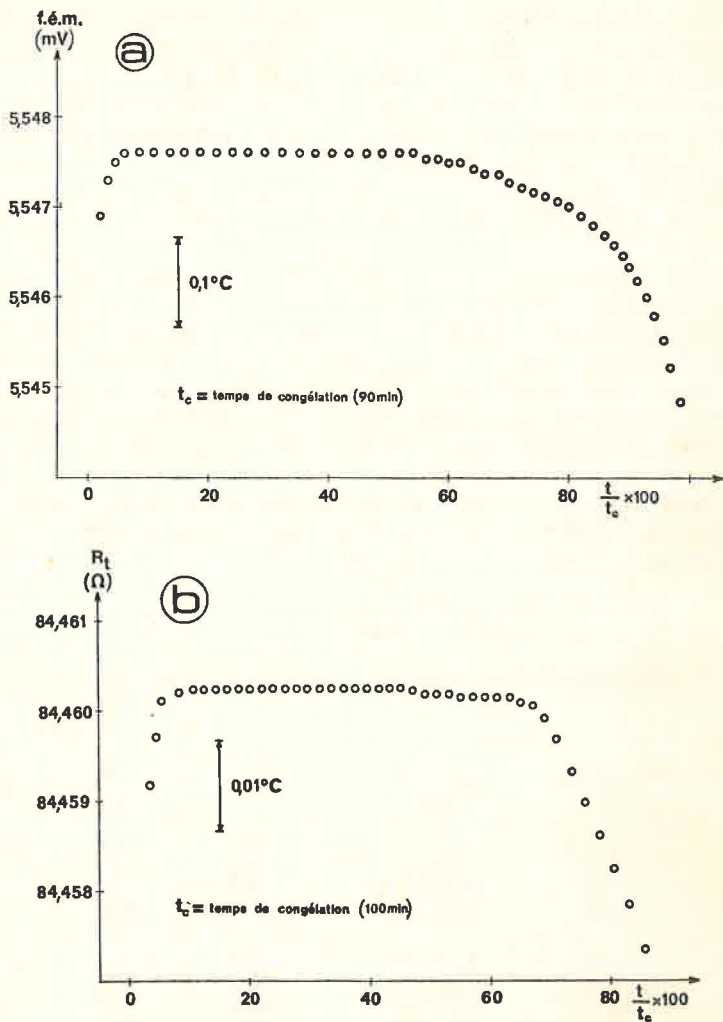


Fig. 1. a et b. — Exemples de courbes de congélation de l'antimoine obtenues avec un thermocouple étalon (a) et un thermomètre à résistance de platine (b).

TABLEAU I

Détermination du point de congélation de l'antimoine en employant deux techniques de germination différentes

| Technique de germination | Thermomètre | $R_t - R_0$ (Ω) | R_t/R_0 |
|--------------------------|-------------|-----------------|-------------|
| McLaren | { Ca 1 | 58,689 41 | (*) |
| | { TP 27 | 3,186 625 | 3,278 950 8 |
| Proposée | { Ca 1 | 58,689 71 | (*) |
| | { TP 27 | 3,186 632 | 3,278 948 1 |

(*) Ce thermomètre ne donne pas une stabilité satisfaisante de R_t/R_0 .

On a comparé la méthode que nous proposons à celle de McLaren [1] et les résultats les plus significatifs sont indiqués dans le tableau I; on ne peut déceler entre eux aucune différence systématique.

On a déterminé le point de congélation de l'antimoine par les deux méthodes en employant deux thermomètres à résistance de platine (Ca 1 et TP 27), chacun avec un pont différent.

Le premier thermomètre (Ca 1, Cambridge), du type Barber, avait une résistance de $25,5 \Omega$ à 0°C et une valeur initiale de α de $3,9237 \times 10^{-3} \text{ deg}^{-1}$. On mesurait la résistance avec un pont de Smith III à six décades, fabriqué par Tinsley, qui permet une sensibilité supérieure à $10^{-5} \Omega$ et une précision des mesures de température meilleure que 10^{-3} deg [2].

Le second thermomètre (TP 27) a été construit à l'Istituto Termometrico Italiano; sa résistance est d'environ $1,4 \Omega$ à 0°C et $\alpha = 3,9249 \times 10^{-3} \text{ deg}^{-1}$. La résistance était mesurée au moyen d'un pont de Mueller G4, fabriqué par Leeds and Northrup, qui permet une sensibilité de $10^{-6} \Omega$ et une précision des mesures de température meilleure que 10^{-3} deg avec le thermomètre TP 27.

Les deux thermomètres ont leur tige noircie et sont étalonnés au point triple de l'eau et aux points de congélation de l'étain et du zinc, en prenant pour le point de l'étain la valeur $231,913^\circ\text{C}$.

TABLEAU II

Détermination du point de congélation de l'antimoine

| Dates | Thermomètre | $R_t - R_0$ (Ω) | R_t/R_0 | t_{sb}^* | |
|---------|-------------|-----------------------------|-------------|-------------------------------------|-----------------------------------|
| | | | | $R_t - R_0$ ($^\circ\text{C}$) | R_t/R_0 ($^\circ\text{C}$) |
| 25/1/67 | Ca 1 | 58,690 27 | 3,277 498 7 | 630,539 ₂ | 630,525 ₃ |
| 10/4/67 | Ca 1 | 58,689 71 | 362 9 | 534 ₀ | 547 ₄ |
| 12/4/67 | Ca 1 | 58,689 22 | 329 3 | 528 ₁ | 537 ₁ |
| 13/4/67 | Ca 1 | 58,689 61 | 333 4 | 532 ₇ | 538 ₄ |
| 10/4/67 | TP 27 | 3,186 634 | 3,278 952 2 | 630,534 ₈ | 630,535 ₇ |
| 11/4/67 | TP 27 | 3,186 626 | 950 8 | 533 ₀ | 535 ₃ |
| 12/4/67 | TP 27 | 3,186 630 | 944 1 | 534 ₁ | 533 ₂ |

(*) La pression est maintenue à $98\,700 \pm 700 \text{ N/m}^2$ ($740 \pm 5 \text{ mmHg}$).

Les résultats obtenus sont donnés au tableau II. Deux paramètres $R_t - R_0$ et R_t/R_0 sont introduits. Pour le thermomètre Ca 1, seule la différence des résistances reste constante de telle sorte qu'il convient de considérer comme plus précises les températures données par l'équation originale de Callendar. Le thermomètre TP 27 montre que $R_t - R_0$ et R_t/R_0 sont équivalents aux erreurs expérimentales près.

La valeur moyenne des deux déterminations semble ainsi satisfaisante. La valeur moyenne mesurée par Ca 1 est $t'_{\text{sb}} = 630,533_5^\circ\text{C}$ avec un écart-type de $4,5 \times 10^{-3} \text{ deg}$; celle de TP 27 est $t''_{\text{sb}} = 630,534_3^\circ\text{C}$ avec un écart-type de $0,8 \times 10^{-3} \text{ deg}$.

Nous admettons comme température du point de congélation de l'anti-

moine la moyenne pondérée de ces deux valeurs, les poids attribués étant les inverses des écarts-types. On a ainsi :

$$t_{sb} = 630,534_2 \text{ } ^\circ\text{C.}$$

(Septembre 1967)

BIBLIOGRAPHIE

- [1] McLAREN (E. H.) et MURDOCK (E. G.), *Comité Consultatif de Thermométrie*, 7^e session, 1964, Annexe 1, document N° 17.
- [2] CAMPANARO (P.), CROVINI (L.) et SARTORI (S.), *Elettrotecnica*, 53, 1966, p. 336.



ANNEXE 10

Dilatation thermique du quartz fondu Rapport définitif

Par J. OISHI et T. KIMURA

Aoyama Gakuin University (Japon)

INTRODUCTION

Les auteurs ont procédé à des expériences sur la dilatation thermique du quartz fondu jusqu'à 1 065 °C en relation avec les études de thermométrie à gaz aux températures élevées. Un échantillon de quartz fondu ayant la forme d'un tube de 40 cm de longueur était placé sur deux supports en porcelaine de telle sorte qu'il reposait dans l'axe d'un four tubulaire de 80 cm de long, de 3 cm de diamètre intérieur et 40 cm de diamètre extérieur. Des fenêtres de visée de 1 cm de diamètre étaient ménagées en face des traits, distants de 30 cm, gravés au diamant sur l'échantillon; ces traits étaient éclairés par deux lampes à vapeur de mercure et leur position pouvait être repérée avec une précision d'environ 1 μm à l'aide des microscopes montés sur un support en invar en utilisant une lumière de longueur d'onde 0,435 8 μm ; cette précision n'était pas altérée aux températures élevées.

Quelques résultats expérimentaux ont déjà été donnés en 1964 [1]. On a par la suite décelé quelques imperfections de construction du comparateur. Avec un comparateur provisoire, conçu pour éliminer toute erreur due à un défaut de construction, on a effectué quelques observations dont les résultats ont été présentés à la réunion de 1966 du Groupe de travail du Comité Consultatif de Thermométrie [2]. Nous avons ensuite construit un nouveau comparateur exempt d'imperfections avec lequel nous avons effectué les observations définitives qui viennent d'être terminées.

NOUVEAU COMPARETEUR

Le nouveau comparateur est pourvu de deux microscopes d'observation, distants de 30 cm, montés sur une barre carrée en invar de 6 cm de côté et 90 cm de long dont la température moyenne est déterminée au moyen de

trois thermocouples cuivre-constantan insérés à chaque extrémité et au milieu. La barre en invar reposait sur un banc de manière que les tubes des microscopes soient aussi courts que possible.

RÉSULTATS DES MESURES

Afin d'obtenir un résultat précis, il a été nécessaire de respecter les conditions suivantes au cours des expériences :

- 1° recuire l'échantillon pendant 20 heures à 1 100 °C;
- 2° refroidir l'échantillon à raison de 25 deg par heure jusqu'à 800 °C;
- 3° faire les mesures 3 heures après que l'échantillon est amené à la température élevée à mesurer et 4 ou 5 jours après que l'échantillon est ramené à la température ambiante.

Les échantillons qui ont servi aux observations sont classés [3] comme l'indique le tableau I dans lequel le quartz fondu de type I est obtenu par fusion électrique de cristaux de quartz pulvérisés, le type II par fusion de cristaux de quartz à la flamme et le quartz fondu synthétique de type III est obtenu par hydrolyse en phase vapeur de composés purs du silicium. Les échantillons étaient des tubes de 40 cm de long, 8 mm de diamètre extérieur et 0,5 à 1,0 mm d'épaisseur. Dans le tableau I, la désignation 1,0 A par exemple concerne l'échantillon A ayant une épaisseur de paroi de 1,0 mm.

TABLEAU I

Classification des échantillons de quartz fondu

| Fabricant | Type | Nom commercial | Désignation de l'échantillon |
|--|------|--------------------------------|--------------------------------|
| Toshiba Denko Ltd (Japon) | II | | T-1,0 A T-1,0 B |
| Nippon Sekiei Garasu Ltd (Japon) . . . | II | | N-1,0 |
| Kimmon Manufacturing Ltd (Japon) . . | II | | K-1,0 |
| Thermal Syndicate Ltd (Royaume-Uni). | I | Vitreosil, qualité courante | TS(n)-0,7 |
| Ibid. | II | Vitreosil 066 | TS(066)-0,5 A TS(066)-0,5 B |
| Ibid. | III | Spectrosil | TS(S)-1,0 |

Pour chaque échantillon on a effectué une série d'observations à la température ambiante, à 1 065 °C, 1 000 °C, 960 °C et de nouveau à la température ambiante.

Le tableau II donne les valeurs du coefficient moyen de dilatation linéique entre 15 et 960 °C (α_{15}^{960}), entre 15 et 1 000 °C (α_{15}^{1000}) et entre 15 et 1 065 °C (α_{15}^{1065}), en utilisant la moyenne des valeurs à la température ambiante avant et après le chauffage et celles aux températures élevées. La valeur de α a été déterminée avec un écart-type de 0,6 à $0,8 \times 10^{-8}$ deg⁻¹ pour les échantillons du type II et de $0,5 \times 10^{-8}$ pour ceux du type I. Pour le type II l'écart-type de la moyenne de tous les échantillons portés au tableau II était d'environ 1×10^{-8} .

TABLEAU II

Coefficient moyen de dilatation linéique du quartz fondu

| Type | Échantillon | $\alpha_{15}^{960} \times 10^8$ | $\alpha_{15}^{1000} \times 10^8$ | $\alpha_{15}^{1065} \times 10^8$ |
|------|---------------|---------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| II | T-1,0 A | 45,2 | 45,3 | 45,6 |
| | T-1,0 B | 45,6 | 45,8 | 46,1 |
| | K-1,0 | 46,2 | 46,4 | 47,0 |
| | N-1,0 | 44,1 | 44,5 | 44,9 |
| | TS(066)-0,5 A | 45,2 | 45,0 | 45,1 |
| | TS(066)-0,5 B | 45,0 | 45,1 | 45,3 |
| | Moyenne | 45,2 | 45,3 | 45,7 |
| I | TS(n)-0,7 | 43,8 | 44,8 | 46,5 |

La figure 1 donne les valeurs de α_{15}^t , coefficient moyen de dilatation entre 15 °C et t ($300 \text{ °C} \leq t \leq 1\,065 \text{ °C}$), déterminé tous les 100 degrés jusqu'à 1 000 °C sur des échantillons provenant des trois types. Parmi ces échantillons, TS(S), du type III, a présenté une courbure au cours du chauffage à une température inférieure à 1 000 °C et les mesures furent interrompues à 960 °C.

On pense que le coefficient moyen de dilatation α_{15}^t ($t \approx 1\,000 \text{ °C}$) peut être déterminé avec une précision d'environ $0,4 \times 10^{-8}$ (soit 1 %) par la méthode du comparateur employée par les auteurs. L'écart-type de 0,6 à $0,8 \times 10^{-8}$ pour les échantillons du type II serait dû à une incertitude dans le comportement thermique de ces échantillons.

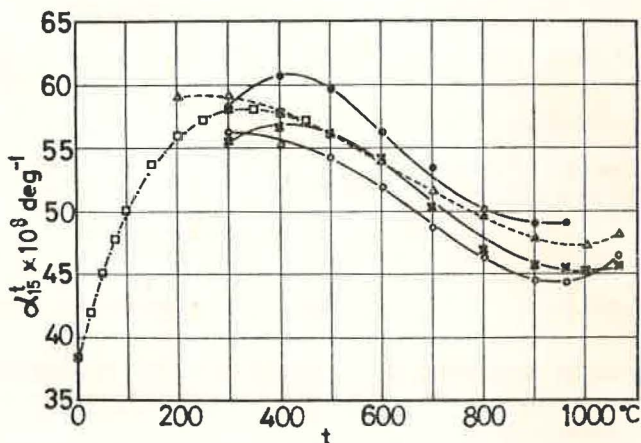


Fig. 1. — Coefficient moyen de dilatation linéique α_{15}^t ($300 \text{ °C} \leq t \leq 1\,065 \text{ °C}$) du quartz fondu.

Comme le montre la figure 1, les courbes de α_{15}^t en fonction de t sont semblables pour tous les échantillons des divers types, bien que la différence entre les échantillons atteigne au maximum 4×10^{-8} . Ces résultats sont pratiquement en accord avec celui de Otto et Thomas [4] et semblent

également prolonger ceux qu'avaient obtenus Beattie *et al.* [5] bien que la précision dans la détermination de α devienne plus faible au fur et à mesure que la température diminue.

(27 juillet 1967)

BIBLIOGRAPHIE

- [1] OISHI (J.) et KIMURA (T.), *Comité Consultatif de Thermométrie*, 7^e session, 1964, p. T 60.
- [2] OISHI (J.) et KIMURA (T.), Document N° 23 présenté au Groupe de travail du C.C.T., septembre 1966.
- [3] HETHERINGTON (G.), *Comité Consultatif de Thermométrie*, 7^e session, 1964, p. T 64.
- [4] OTTO (J.) et THOMAS (W.), *Z. f. Phys.*, **175**, 1963, p. 337.
- [5] BEATTIE (J. A.) *et al.*, *Proc. Am. Acad. Arts Sci.*, **74**, 1941, p. 371.

ANNEXE 11

Stabilité des lampes à corps noir V3 et V4

National Physical Laboratory (Royaume-Uni)

Après leur mesure à la P.T.B., les lampes à corps noir V3 et V4 du N.P.L. ont été rapportées au N.P.L. le 29 août 1967. Les 29 et 30 août des mesures de contrôle au point de l'or furent faites par comparaison avec d'autres lampes à corps noir conservées au N.P.L. On a trouvé que depuis les mesures initiales faites en septembre 1966 la température, pour un courant donné dans la lampe, avait augmenté des quantités suivantes :

Changement dans l'étalonnage des lampes V3 et V4 au point de l'or

| | Étalonnage 1967 — Étalonnage 1966 (degré) | |
|--|--|-----|
| | V3 | V4 |
| Au retour au N.P.L. | 2,6 | 3,0 |
| Après 5 min à 1 770 °C | 2,2 | 2,5 |
| Après un nouveau chauffage à 1 770 °C | aucun autre changement | |

Entre ces deux étalonnages les lampes ont été transportées à l'I.M.M., Leningrad, en septembre 1966, puis à la P.T.B., Braunschweig, en mai 1967 et rapportées ensuite au N.P.L. en août 1967. Étant donné l'instabilité observée, les lampes ont été maintenant renvoyées à la P.T.B. pour que de nouveaux contrôles de stabilité après transport soient effectués ⁽¹⁾.

(Septembre 1967)

⁽¹⁾ Note ajoutée aux épreuves. Ultérieurement, la situation concernant les essais de stabilité des lampes a été établie comme suit :

| Transports | Changements observés durant les transports (degré) | |
|-----------------------------------|--|------------|
| | V3 | V4 |
| Teddington-Leningrad | 0 | 0 ± 0,1 °C |
| Leningrad-Braunschweig | 2,6 | 3,0 |
| Braunschweig-Teddington | 0 | 0 |
| Teddington-Braunschweig | 0 | 0 |

Note du B.I.P.M.

1. Le rapport sur l'étalonnage des lampes V3 et V4 effectué à l'I.M.M., Leningrad, a été communiqué aux membres du Comité Consultatif en novembre 1967, après la 8^e session.

Les lampes V3 et V4 ont été comparées à des lampes étalons de l'I.M.M.; la lampe V4 a été étalonnée en outre dans un four à corps noir dans lequel était réalisé un point de congélation de l'or. De plus, les lampes V3, V4 et les lampes étalons de l'I.M.M. ont été comparées entre elles. Les intensités de courant déduites de ces mesures sont les suivantes :

| | V3 | V4 |
|--|-----------------------------|------------------------------|
| Comparaison aux lampes étalons de l'I.M.M. (I_1) | 12,136 2 A | 12,526 8 A |
| Comparaison au corps noir au point de l'or (I_2) | — | 12,531 8 |
| Comparaisons des lampes NPL entre elles déduites des comparaisons aux lampes étalons (I_3) | 12,136 5 | 12,526 4 |
| Moyenne $\frac{1}{3} (I_1 + I_2 + I_3)$ | 12,136 4 | 12,528 3 |
| Étalonnage des lampes au N.P.L. | 12,133 2 | 12,532 8 |
| Différence IMM — NPL | { + 0,003 2 A + 0,21 deg | { — 0,004 5 A — 0,027 deg |

2. Voir à l'Annexe 12 le rapport sur l'étalonnage de ces lampes effectué à la P.T.B.

Rapport préliminaire sur l'étude des lampes à corps noir V3 et V4 au point de l'or

Par H. KUNZ

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (Allemagne)

Les deux lampes à corps noir V3 et V4 du N.P.L., apportées à la main de Leningrad, n'étant arrivées à la P.T.B. que le 30 mai 1967, nous ne pouvons présenter qu'un rapport préliminaire.

Les premières mesures furent faites avec le pyromètre photoélectrique décrit en [1, 2] dans les conditions suivantes en tenant compte des instructions données par Quinn [3]:

a) Le diaphragme de champ du système optique délimitait une aire de $0,3 \times 0,3 \text{ mm}^2$ sur l'ouverture de 1 mm de diamètre du tube-corps noir.

b) Le rapport d/a de la distance entre la lentille du pyromètre et le tube au diamètre apparent du diaphragme de la lentille était de 10.

c) Le filtre interférentiel avait une longueur d'onde effective de 658,7 nm.

d) Le pyromètre était étalonné par rapport à un corps noir, comme décrit en [4]. Les dimensions de la cavité cylindrique étaient: longueur = 32 mm, diamètre = 6 mm, diamètre de l'ouverture = 1 mm. L'épaisseur du lingot d'or entourant la cavité était de 7,4 mm et la masse totale d'or de 317 g.

Résultats des mesures photoélectriques

| Lampe N° | Intensité du courant | Température | Écart avec le point de l'or |
|----------|-------------------------|-------------|--------------------------------|
| V3 | 12,131 4 A | 1 064,7 °C | + 1,7 deg C |
| V4 | 12,530 3 A | 1 064,9 °C | + 1,9 deg C |

En raison des écarts trouvés avec le point de l'or, ces résultats nous amenèrent à effectuer les essais suivants.

1° *Comparaison au moyen du pyromètre visuel étalon de la P.T.B.* — Comme le rapport d/a avec ce pyromètre est de 20, les intensités du courant furent corrigées selon la courbe de corrections de Quinn. Les pyromètres

visuel et photoélectrique avaient été étalonnés par rapport au même corps noir. Les valeurs suivantes se rapportent également à la longueur d'onde effective de 658,7 nm.

Résultats des mesures visuelles

| Lampe N° | Intensité du courant | Température | Écart avec le point de l'or |
|----------|----------------------|-------------|-----------------------------|
| V3 | 12,148 0 A | 1 064,6 °C | + 1,6 deg C |
| V4 | 12,552 8 A | 1 065,1 °C | + 2,1 deg C |

2° Comparaison du pyromètre photoélectrique avec deux thermocouples. — Deux thermocouples Pt/PtRh (10%) avec des fils de 0,5 mm de diamètre furent immergés de 420 mm dans un corps noir du type décrit par Quinn [5].

Les tubes de protection et d'isolation, en alumine, avaient des diamètres de 4 et 2 et de 1,2 et 0,8 mm. Les deux thermocouples avaient été étalonnés en les immergeant de 160 mm dans de l'or fondu.

Les mesures ont montré que la température du corps noir indiquée par les thermocouples était de 0,2 à 0,4 deg C inférieure aux valeurs obtenues photoélectriquement. Ces différences sont compatibles avec les incertitudes auxquelles il faut s'attendre avec cette méthode.

Eu égard au peu de temps dont nous disposions pour ces mesures il n'a pas été possible de faire d'autres essais, en particulier des étalonnages avec une plus grande quantité d'or et des corps noirs en graphite. Notre plus grand corps noir s'est cassé au cours de l'étude. Nous répéterons ces étalonnages et ces mesures avec un champ de vision plus grand, comme celui qui est employé par Quinn, avant de donner un rapport définitif.

Les figures 1 et 2 donnent d'autres informations relatives aux conditions de mesure avec les lampes à corps noir. La figure 1 indique les répartitions

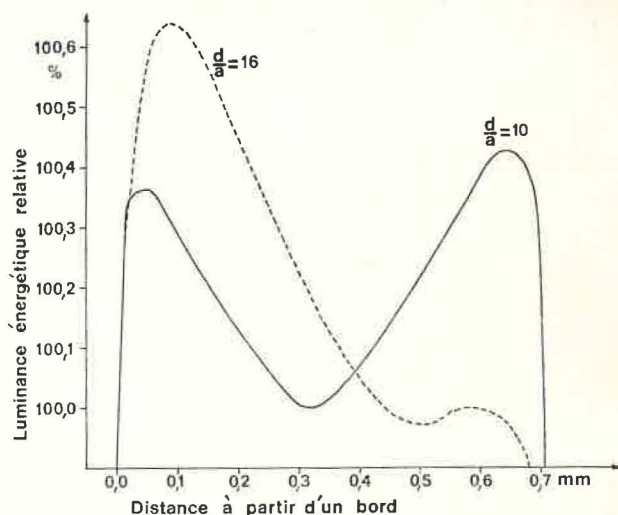


Fig. 1. — Luminance énergétique relative de la lampe à corps noir V3; (diamètre du champ de mesure : 0,27 mm).

de la luminance énergétique dans le plan de l'ouverture de la cavité pour deux valeurs du rapport d/a ; la figure 2 représente les variations de la

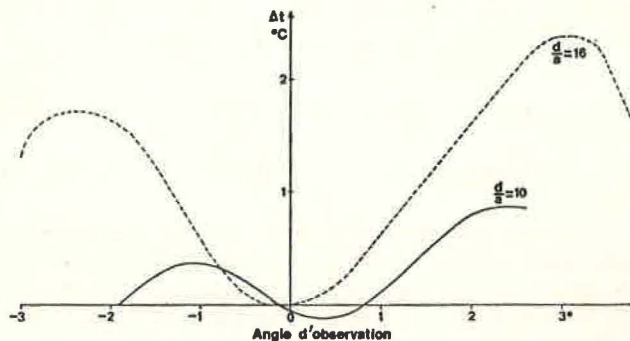


Fig. 2. — Variation de la température apparente de la lampe à corps noir V3 en fonction de l'angle d'observation et pour deux valeurs de d/a ; (lampe à 1 063 °C; diamètre du champ de mesure: 0,27 mm).

température apparente en fonction de l'angle d'observation et pour deux ouvertures, la température étant dans les deux cas de 1 063 °C.

(25 août 1967)

BIBLIOGRAPHIE

- [1] KUNZ (H.), *Comité Consultatif de Thermométrie*, 7^e session, 1964, p. T 79.
- [2] KUNZ (H.), Diss. Techn. Hochschule, Hanovre, août 1967.
- [3] QUINN (T. J.) et BARBER (C.R.), *Metrologia*, 3, 1967, p. 19, et instructions supplémentaires accompagnant les lampes.
- [4] TINGWALDT (C.) et KUNZ (H.), *Optik*, 15, 1958, p. 333.
- [5] QUINN (T. J.), *J. Sci. Instr.*, 44, 1967, p. 221.

ANNEXE 13

Variation de la température de luminance de sources à corps noir

Par T. P. JONES et J. TAPPING

National Standards Laboratory (Australie)

Abstract. — Details are given of the variation of radiance temperature with change of position for two vacuum blackbody sources of the type developed by Quinn and Barber. The radiance temperature gradients over the wire plugs are sufficiently large to require corrections with pyrometers of differing optical systems. The size and shape of the area of plugs viewed must be taken into account as well as the angle of acceptance of the pyrometer. The large difference between the temperature distributions of the two sources investigated indicates that correction terms must be determined for each source.

Résumé. — On donne les détails sur la variation de la température de luminance en fonction du changement de position pour deux sources à corps noir dans le vide du modèle mis au point par Quinn et Barber. Les gradients de la température de luminance sur les tampons sont suffisamment grands pour nécessiter des corrections avec des pyromètres de systèmes optiques différents. Les dimensions et la forme de la surface observée des tampons doivent être prises en considération ainsi que l'ouverture du pyromètre. La grande différence entre les répartitions de température des deux sources étudiées montre que les termes correctifs doivent être déterminés pour chaque source.

I. INTRODUCTION

Quinn et Barber [1] ont mis au point une source à corps noir ayant la stabilité souhaitée pour être utilisée en pyrométrie photoélectrique. La source se compose d'une enveloppe en verre contenant un tube de tungstène de 45 mm de long, 2 mm de diamètre, avec une ouverture de 1 mm près de chaque extrémité; à l'intérieur du tube, à environ 20 mm de l'ouverture avant, est placé un tampon constitué par un faisceau de fils de tungstène. Quinn et Barber ont donné une variation typique de la température de luminance avec l'angle de visée compté à partir de l'axe optique (voir figure 4).

Des détails sur la variation de la température de luminance avec le changement de position sont donnés ci-dessous pour deux sources à corps noir dans le vide de ce type, ainsi qu'une discussion de l'influence de ces

II. DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL ET RÉSULTATS

On a placé une lentille additionnelle devant le pyromètre photoélectrique du N.S.L. [2] pour que le rapport entre le diamètre du diaphragme d'entrée et la distance au foyer soit de $1/15$. Les dimensions de la fente vibrante ont été ramenées de $0,215 \text{ cm} \times 0,0285 \text{ cm}$ à $0,140 \text{ cm} \times 0,0285 \text{ cm}$ pour permettre de faire les mesures en éliminant le rayonnement provenant des parois cylindriques lorsque le pyromètre est parfaitement orienté et au point sur l'ouverture (voir figure 1). Le photomultiplicateur reçoit

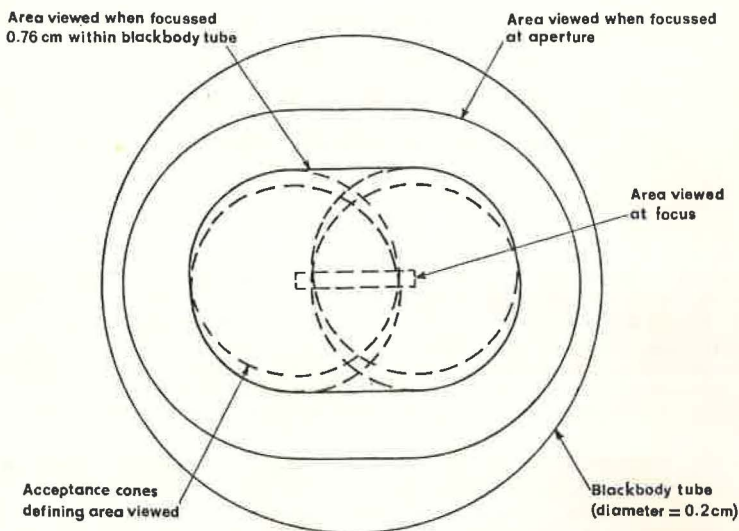


Fig. 1. — Parties visibles du tampon de fils de tungstène situé à 20 mm de l'ouverture pour différentes mises au point en utilisant le pyromètre photoélectrique du N.S.L.

alors le rayonnement qui passe par un rectangle de $0,048 \text{ cm} \times 0,0098 \text{ cm}$ dans le plan focal du pyromètre. Les mesures ont été effectuées sur deux lampes à vide, N^{os} 100/5 et 100/7, en déplaçant les lampes horizontalement et verticalement à angle droit avec l'axe optique du pyromètre, longitudinalement le long de cet axe, et par rotation autour des axes horizontal et vertical passant par le centre de l'ouverture de chaque lampe et se coupant sur l'axe optique. Les variations de la température de luminance, pour une longueur d'onde de 656 nm, ont été mesurées à 1 500 °C et 1 200 °C.

Les figures 2 et 3 montrent les variations typiques de la température de luminance des deux lampes pour les rotations autour des axes vertical et horizontal. Ces rotations sont telles que le rayonnement provient aussi bien des parois que du tampon. La figure 4 donne le résultat d'une étude plus détaillée relative à l'intérieur du tampon de chaque lampe. Les variations de la température de luminance selon que le pyromètre est au point sur l'ouverture ou pour des plans à l'intérieur de la source, sont indiquées à la figure 5.

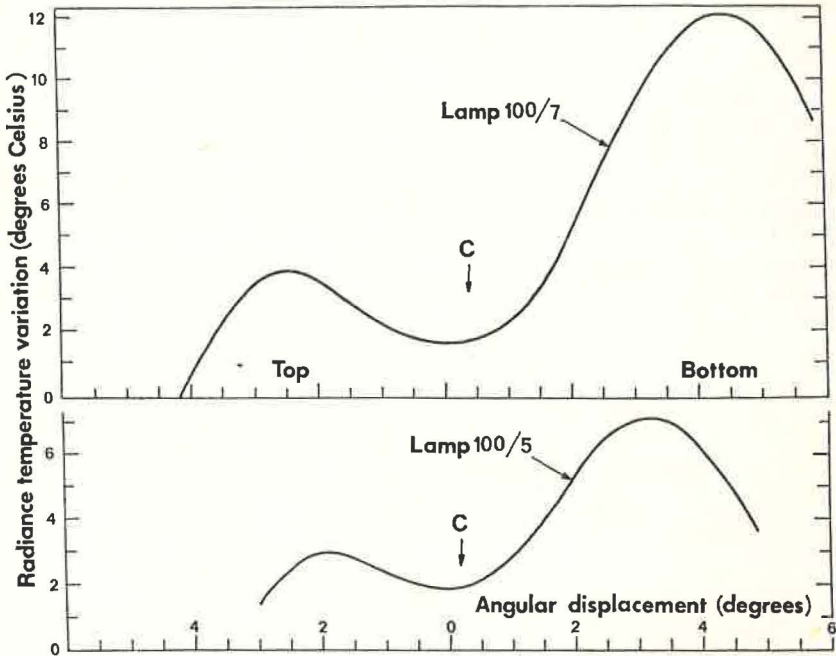


Fig. 2. — Variation de la température de luminance pour une rotation autour d'un axe horizontal ($t = 1\,500\text{ }^{\circ}\text{C}$).

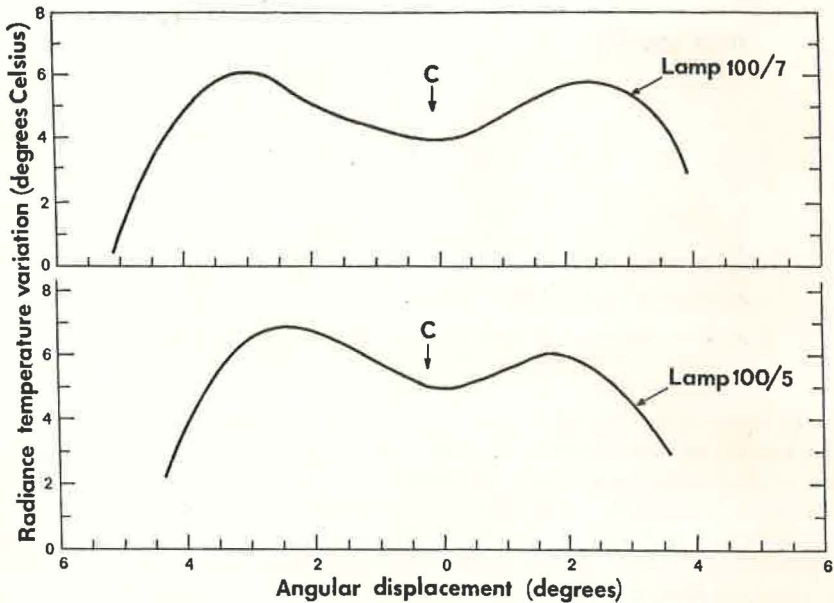


Fig. 3. — Variation de la température de luminance pour une rotation autour d'un axe vertical ($t = 1\,500\text{ }^{\circ}\text{C}$).

III. DISCUSSION

Les figures 2 et 3 indiquent, en accord avec Quinn et Barber, que les parois du tube sont plus chaudes que le tampon. La figure 2 montre que le bas du tube est plus chaud que le haut, probablement à cause du joint plié situé en bas. Il semble que cette asymétrie éloigne le point le plus froid du tampon (ou le point de plus faible luminance) du centre du tampon, marqué C sur les figures 2 et 3. Cet éloignement du centre est différent pour les deux lampes étudiées.

Les courbes de la figure 4, qui montrent pour chaque lampe la variation

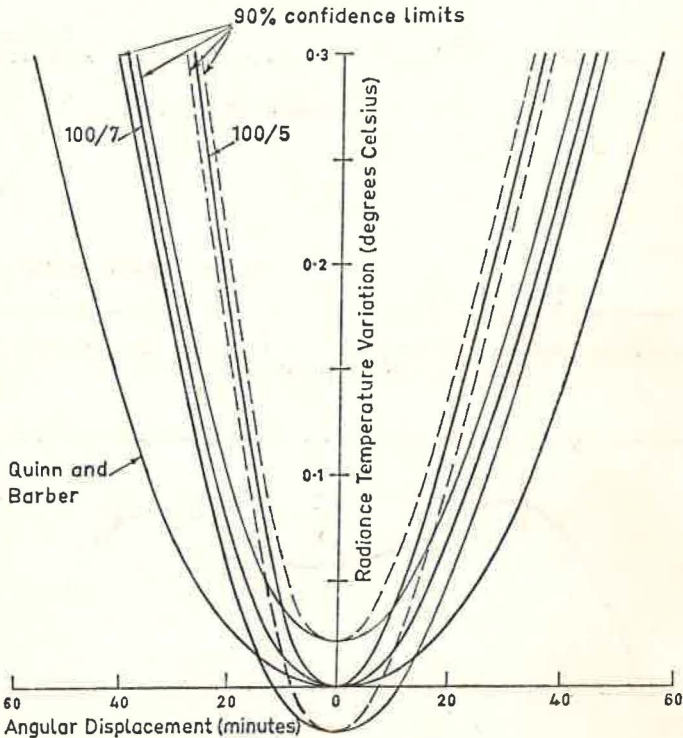


Fig. 4. — Variation de la température de luminance pour une rotation autour d'un axe horizontal ($t = 1\,500\text{ }^{\circ}\text{C}$).

de la température de luminance avec l'angle de rotation autour de l'axe horizontal, sont les mêmes, dans les limites de précision des mesures, que les courbes correspondantes obtenues par déplacement rectiligne vertical des lampes. Ainsi, la température de luminance d'une source à corps noir ne varie pas si la même région du tampon est observée sous des angles légèrement différents. La variation avec la rotation autour d'un axe vertical et avec un déplacement transversal horizontal de la source à $1\,500\text{ }^{\circ}\text{C}$ est semblable à celle de la figure 4. A $1\,200\text{ }^{\circ}\text{C}$ tout changement dans la position donne des courbes semblables à celles de la figure 4, mais les gradients

de la température de luminance dans le tampon sont plus faibles qu'à 1 500 °C.

Les résultats de plus de 50 observations ont été combinés pour obtenir les courbes de la figure 4 de façon à réduire leur dispersion. La courbe moyenne a été déterminée visuellement et les limites pour un degré de confiance de 90 % ont été estimées à partir de l'ensemble des courbes. Les rotations pour trois positions longitudinales (mise au point sur l'ouverture, et à 0,25 cm et 0,76 cm à l'intérieur de l'ouverture) sont comprises dans l'estimation de ces limites. Les courbes montrent un accord acceptable avec celle qui est donnée par Quinn et Barber, mais elles indiquent que les répartitions de la température de luminance ne sont pas les mêmes pour différentes lampes. Cela est plus apparent quand on compare les variations de la température de luminance avec la position longitudinale (voir figure 5).

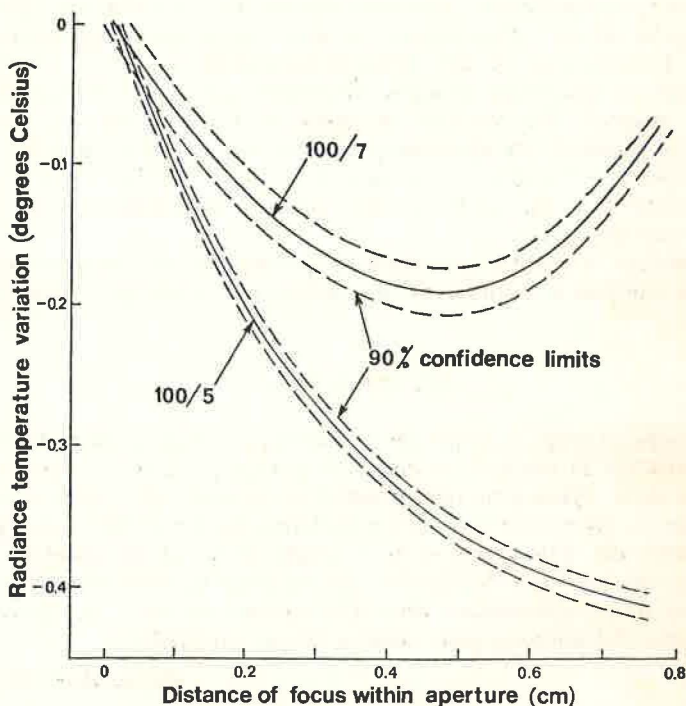


Fig. 5. — Variation de la température de luminance en fonction de la position longitudinale ($t = 1\,500\text{ °C}$).

Les formes et les dimensions de la surface des sources à corps noir dont on forme une image dans les pyromètres photoélectriques de différents laboratoires d'étalonnage sont différentes. Par exemple, les fentes définissant les champs optiques sont :

| | | |
|--------|--------------|-------------------------|
| N.S.L. | horizontale, | 0,028 5 cm × 0,140 cm |
| N.B.S. | horizontale, | 0,08 cm × 0,24 cm [3] |
| I.M.M. | verticale, | 0,03 cm de largeur [4]. |

Les variations de la température de luminance dans la région du tampon interne peuvent conduire à des températures de luminance différentes avec des pyromètres dont les cônes d'ouverture, de même angle solide, ont des formes différentes. La limitation de l'étendue géométrique par l'ouverture de la lampe intervient quand la mise au point du pyromètre du N.S.L. est faite à 0,78 cm à l'intérieur du tube-corps noir, ce qui définit la partie visible minimale du tampon.

La figure 1 indique la forme de la surface lorsque chaque point de la fente reçoit un cône à base circulaire de rayons provenant du tampon. Bien que cette surface minimale du tampon soit trop grande pour faire des évaluations quantitatives précises de l'influence de petits changements dans la forme des parties des tampons utilisés, les variations obtenues indiquent que ces changements de forme peuvent produire des différences significatives de la température de luminance. Il faudrait étudier l'importance de ces différences pour déterminer des termes correctifs applicables aux différentes formes, en se servant d'un pyromètre pour lequel les changements de la forme de l'image peuvent être obtenus facilement.

La figure 5 montre les grandes différences que l'on peut obtenir entre plusieurs sources. Ces résultats indiquent qu'il n'y a pas de corrections simples qui puissent être appliquées à toutes les lampes. Le seul moyen de tenir compte des changements de la surface est d'étalonner chaque source dans la partie de la surface du tampon qui sera vraisemblablement utilisée dans les étalonnages.

En général, il semble nécessaire de préciser en détail la forme et la région du tampon d'où provient le rayonnement ainsi que l'étendue géométrique.

IV. CONCLUSION

Les lampes à corps noir ont des gradients de température de luminance appréciables sur le tampon de fils. Si l'on veut profiter pleinement de la sensibilité de la pyrométrie photoélectrique, on doit déterminer les corrections pour des pyromètres ayant des systèmes optiques différents. On doit tenir compte des dimensions et de la forme de la surface observée sur le tampon de fils, ainsi que de l'étendue géométrique du pyromètre. Comme la répartition de la température varie d'une lampe à l'autre, ces corrections devront être déterminées pour chaque lampe employée.

(Septembre 1967)

BIBLIOGRAPHIE

- [1] QUINN (T. J.) et BARBER (C. R.), *Metrologia*, **3**, 1967, p. 19.
- [2] MIDDLEHURST (J.) et JONES (T. P.), *J. Sci. Instr.*, **38**, 1961, p. 202.
- [3] LEE (R. D.), *Metrologia*, **2**, 1966, p. 150.
- [4] KANDYBA (V. V.) et KOVALEVSKI, *Dokl. Akad. Nauk, U.R.S.S.*, **108**, 1956, p. 633.

ANNEXE 14

Comparaison entre les échelles de température définies par les thermomètres à gaz, acoustique et à résistance de platine entre 2 et 20 °K ⁽¹⁾

Par J. S. ROGERS et R. J. TAINSH

National Standards Laboratory (Australie)

et M. S. ANDERSON et C. A. SWENSON

Iowa State University (États-Unis d'Amérique)

Trois laboratoires indépendants : le National Standards Laboratory (Australie), le National Bureau of Standards (États-Unis) et le Ames Laboratory, U.S. Atomic Energy Commission, Iowa State University (États-Unis) ont pris part à la détermination de la relation résistance-température ($R-T$) de deux thermomètres à germanium. Les résultats montrent non seulement le haut degré de reproductibilité de tels thermomètres, mais sont également en accord avec la thermométrie acoustique pour faire penser que le point d'ébullition de l'hélium tel qu'il est donné par l'Échelle de température à tension de vapeur de ^4He (T_{58}) est trop bas de $8 (\pm 3)$ mdeg. Les mesures ont été effectuées comme suit :

1. *National Standards Laboratory (N.S.L.)*. — Un thermomètre à gaz à volume constant a été employé pour déterminer la relation $R-T$ pour deux thermomètres à germanium (fabriqués par Minneapolis Honeywell), GR 803 et GR 618, avec une précision de ± 3 mdeg dans le domaine de température de 2 à 20 °K. Toutes les précautions ont été prises, aussi bien dans la construction du thermomètre à gaz que dans les mesures, pour réduire les erreurs systématiques et expérimentales significatives (*fig. 1* et *2*). Un thermomètre à résistance de platine étalonné au N.B.S. [échelle NBS-PTR (1955)] a été employé pour établir les températures de référence d'après lesquelles les constantes d'étalonnage du thermomètre à gaz ont été déterminées, et ainsi les températures dans le domaine de 2 à 20 °K sont exprimées en fonction de cette échelle PTR. Les seconds coefficients

(¹) Pour plus de détails voir l'article publié en anglais dans *Metrologia*, 4, 1968, pp. 47-59.

du viriel employés étaient ceux de Kilpatrick, Keller et Hammel [1], désignés par MR-5.

Dans le domaine de 2 à 4,2 °K les valeurs des températures ainsi obtenues furent aussi comparées aux températures correspondantes données par T_{68} en se servant du réservoir à tension de vapeur représenté à la figure 1.

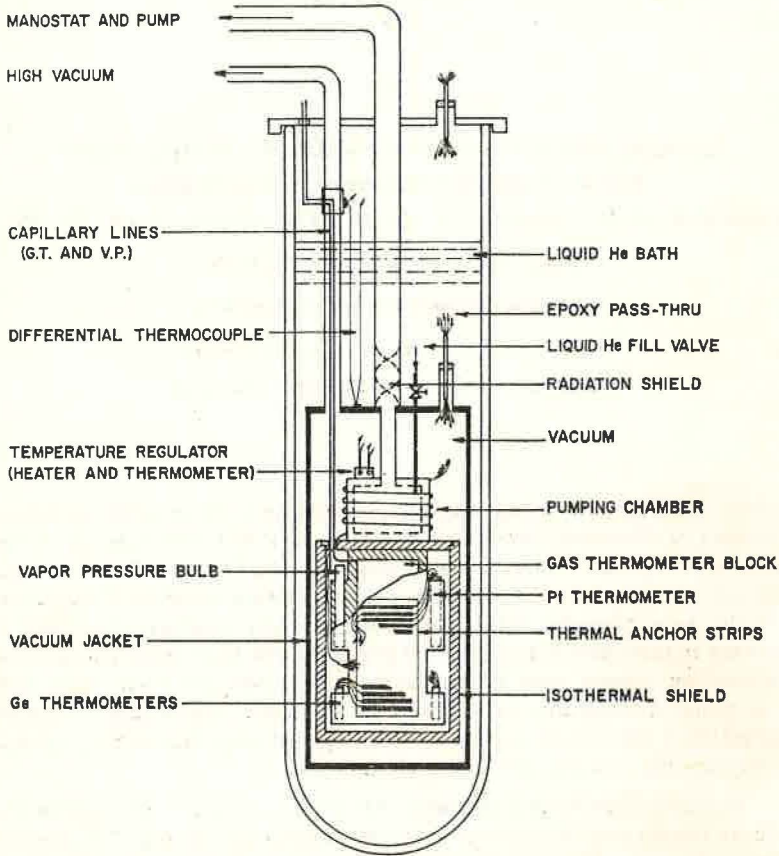


Fig. 1. — Thermomètre à gaz à volume constant du N.S.L. Les parties hachurées sont en cuivre. Le thermomètre à gaz lui-même a été construit pour être indépendant de la chambre de pompage et de l'écran de protection contre le rayonnement.

2. *National Bureau of Standards (N.B.S.).* — La relation $R-T$ pour le thermomètre GR 803 a été déterminée avec une précision de ± 3 mdeg dans le domaine de 2,3 à 20 °K par une méthode directe de comparaison en utilisant comme étalons de température deux thermomètres à germanium étalonnés auparavant d'après le thermomètre acoustique du N.B.S. [2]. Dans ce cas, les températures ont été exprimées dans l'échelle 1965 (provisoire) du thermomètre acoustique du N.B.S.

3. *Iowa State University (I.S.U.).* — La comparaison des relations $R-T$ des deux thermomètres GR 803 et GR 618 a été faite par rapport à deux

thermomètres à résistance de platine étalonnés au N.B.S. [échelle NBS-PTR (1955)] dans le domaine de 12 à 30 °K (fig. 3). Cela a fourni une vérification de la précision des techniques expérimentales, de la stabilité des thermomètres à germanium et à résistance de platine, et de la cohérence des étalon-

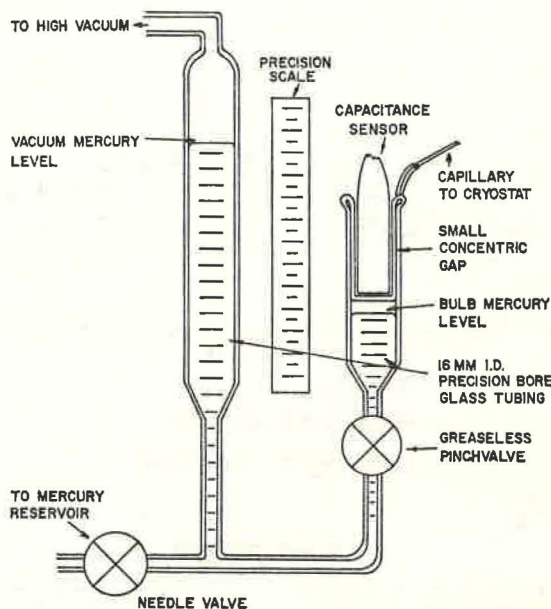


Fig. 2. — Schéma du manomètre utilisé pour les mesures au thermomètre à gaz du N.S.L.

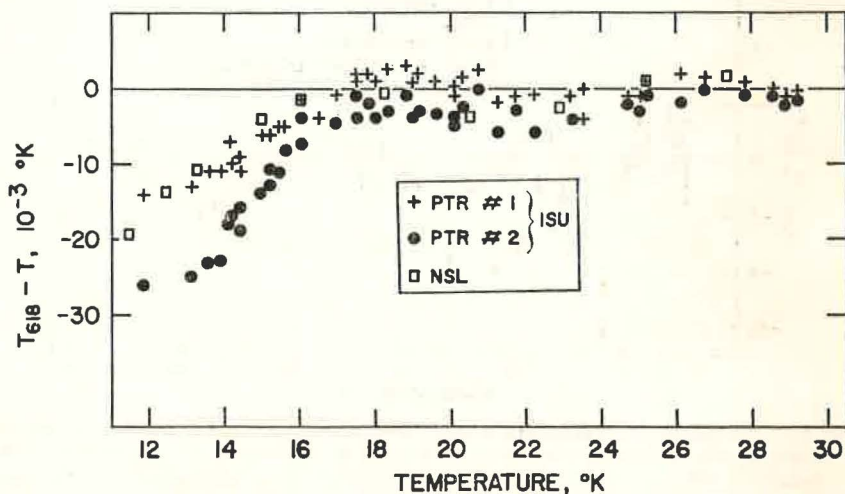


Fig. 3. — Écart de diverses mesures au thermomètre à résistance de platine (PTR) par rapport à l'échelle lissée établie par le N.S.L. et l'I.S.U. (au-dessus de 16 °K)

nages par le N.B.S. des thermomètres à résistance de platine employés. De plus, les températures dans l'échelle T_{58} ont été mesurées avec un thermomètre à tension de vapeur de l'hélium entre 2,5 et 5,1 °K. Les résultats obtenus dans le domaine de 2,5 à 4,2 °K, comparés à ceux du N.S.L., confirment la stabilité des thermomètres à germanium (fig. 4).

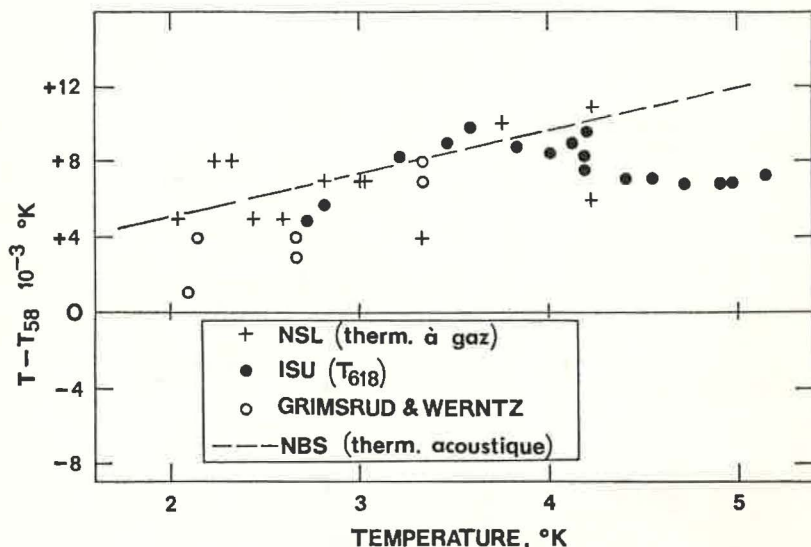


Fig. 4. — Écart entre diverses déterminations de température et les températures calculées à partir de l'Échelle ^4He 1958 (T_{58}).

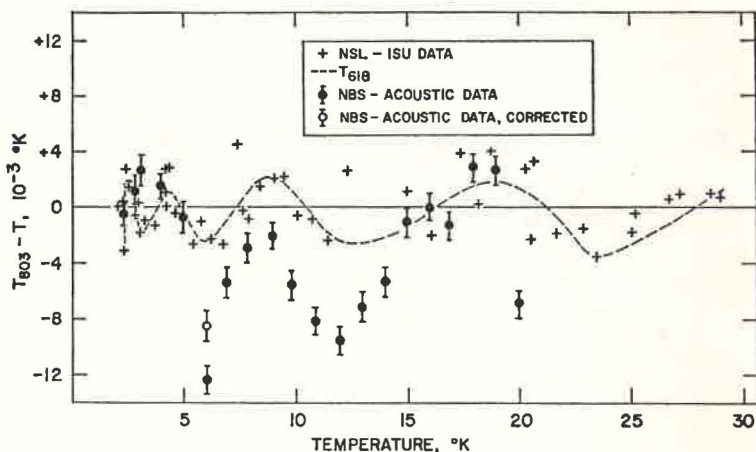


Fig. 5. — Écart entre les résultats obtenus avec le thermomètre GR 803 et la courbe lissée calculée à l'aide de l'équation (1) à partir de ces résultats. La courbe en tirets indique la différence entre les températures qui seraient calculées à partir des courbes lissées pour chacun des thermomètres GR 803 et GR 618 quand les thermomètres sont à la même température. Les résultats de l'étalonnage du thermomètre GR 803 au moyen du thermomètre acoustique du N.B.S. sont indiqués comme des écarts par rapport à la relation établie lors de l'étalonnage de ce thermomètre au N.S.L.

Représentation des résultats. — En raison de la répartition aléatoire des points d'étalonnage, on ne peut effectuer une comparaison des résultats que si ceux-ci sont exprimés sous une forme analytique. Aucune relation R - T simple n'existe pour les thermomètres à germanium, mais une représentation polynômiale de la forme

$$(1) \quad \log_e T = \sum_{n=0}^N A_n (\log_e R)^n \quad (N = 6 \text{ à } 10)$$

permet une interpolation entre les points d'étalonnage quand A_n est déterminé par la méthode des moindres carrés. L'écart quadratique moyen de l'ajustement polynômial pour les étalonnages combinés du N.S.L. (thermomètre à gaz) et de l'I.S.U. (échelle PTR) entre 2,3 et 30 °K est de ± 3 mdeg pour une équation du dixième ordre.

Discussion. — Les résultats obtenus avec le thermomètre à gaz du N.S.L. indiquent que les températures telles qu'elles sont données dans l'Échelle ^4He 1958 se révèlent être 8 ± 3 mdeg trop basses entre 3 et 5 °K. Ces résultats sont en bon accord avec les travaux antérieurs de thermométrie acoustique du N.B.S. [2] et également avec les travaux acoustiques plus récents de Grimsrud et Werntz [3] (*fig. 4*). Toutefois, comme les différences mesurées aux températures supérieures excèdent la valeur estimée de l'incertitude combinée des deux étalonnages, on suppose que l'échelle acoustique du N.B.S. et l'échelle NBS-PTR sont quelque peu en désaccord [2]. Il est possible d'améliorer l'accord entre l'échelle du N.S.L. et l'échelle acoustique du N.B.S. jusqu'à ± 5 mdeg (ce qui est dans les limites des

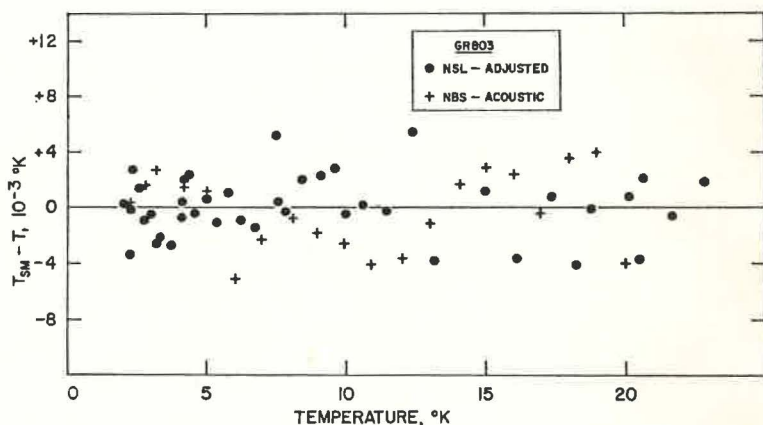


Fig. 6. — Écarts des résultats du N.S.L. (augmentés de 0,025 %) et des résultats obtenus avec le thermomètre acoustique du N.B.S., par rapport à une représentation de l'ensemble de ces résultats au moyen de l'équation (1).

erreurs expérimentales combinées) si l'on suppose que les températures déduites de l'échelle NBS-PTR (1955) entre 16 et 30 °K (sur lesquelles sont fondées les températures mesurées au thermomètre à gaz du N.S.L.) sont 0,025 pour cent trop basses (*fig. 6*).

Conclusions

1. Les résultats de ces recherches confirment que les thermomètres à germanium permettent de comparer d'une façon extrêmement sensible et reproductible des échelles de température établies entre 2 et 20 °K.

2. On peut interpréter les résultats obtenus au thermomètre à gaz du N.S.L. comme une confirmation de l'échelle acoustique du N.B.S. si l'on suppose qu'il existe un écart de l'ordre de 0,025 pour cent (5 mdeg à 20 °K) entre l'échelle thermodynamique réelle et l'échelle NBS-PTR (1955) dans le domaine de 16 à 30 °K.

3. Les résultats du thermomètre à gaz du N.S.L. concordent avec les résultats acoustiques du N.B.S. pour indiquer que les températures dans l'Échelle ⁴He 1958 sont trop basses d'environ 8 mdeg dans la région de 4 °K.

(Septembre 1967)

BIBLIOGRAPHIE

- [1] KILPATRICK (J. E.), KELLER (W. E.) et HAMMEL (E. F.), *Phys. Rev.*, **97**, 1955, p. 9.
 - [2] PLUMB (H.) et CATALAND (G.), *Metrologia*, **2**, 1966, p. 127.
 - [3] GRIMSRUD (D. T.) et WERNTZ (J. H.), *Phys. Rev.*, **157**, 1967, p. 181.
-

**Comparaison des échelles provisoires de température
thermodynamique de l'I.M.P.R. et du N.B.S.
entre 4,2 et 20,3 °K**

Par G. A. KYTIN, K. I. KURILENOK, M. P. ORLOVA, D. N. ASTROV,
D. I. CHAREVSKAIA

Institut des Mesures Physicotechniques et Radiotechniques (U.R.S.S.)

Nous avons effectué dans notre laboratoire une comparaison de deux échelles thermodynamiques entre 4,2 et 20,3 °K : l'échelle NBS P-2-20 [1] et l'échelle de l'IMPR [2] déterminées par deux méthodes différentes. L'échelle NBS P-2-20 (1965) a été définie par rapport à un thermomètre acoustique, alors que l'échelle IMPR a été déterminée au moyen d'un thermomètre à gaz.

La comparaison des deux échelles a été réalisée au moyen de thermomètres à résistance de germanium étalonnés dans les deux échelles en question. Les thermomètres N^{os} 76, 78 et 79 ont été étalonnés dans l'échelle NBS P-2-20 (1965); ils furent comparés au thermomètre étalon qui avait été étalonné au préalable par rapport au thermomètre acoustique du N.B.S. Le thermomètre N^o 17 a été étalonné dans l'échelle IMPR; il avait été placé dans le bloc de travail du thermomètre à gaz lorsque cette échelle fut établie et, par conséquent, il constitue l'étalon IMPR entre 4,2 et 20 °K.

Les thermomètres du N.B.S. N^{os} 76, 78 et 79 sont des thermomètres à résistance de germanium du type Cryocal normal et destinés à l'usage courant; leurs résistances au point d'ébullition de l'hélium sont respectivement de 2 624 Ω, 2 466 Ω et 2 505 Ω. Le thermomètre de l'I.M.P.R. N^o 17 est un thermomètre à résistance de germanium conçu à l'I.M.P.R. [3]; sa résistance au point d'ébullition de l'hélium est de 219,327 Ω.

Une comparaison directe en 76 points a été faite entre ces quatre thermomètres montés dans un seul et même bloc de travail du cryostat. Les résultats de la comparaison dans le bain d'hélium en ébullition sont donnés au tableau I. Les résultats entre 4,2 et 20,4 °K sont donnés aux figures 1 et 2.

TABLEAU I

| Points | T_{17} (°K) | $T_{79} - T_{17}$ (deg) | $T_{78} - T_{17}$ (deg) | $T_{76} - T_{17}$ (deg) |
|--------|------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 51 | 4,215 1 | + 5,0 × 10 ⁻³ | + 3,0 × 10 ⁻³ | + 4,2 × 10 ⁻³ |
| 56 | 4,218 4 | + 3,5 | + 1,5 | + 2,7 |
| 50 | 4,219 9 | + 4,6 | + 2,8 | + 3,8 |
| 1 | 4,222 4 | + 5,6 | + 2,8 | + 3,6 |
| 2 | 4,223 7 | + 4,0 | + 2,6 | + 3,7 |

Les points expérimentaux ont été obtenus par trois méthodes différentes :

a. Un cryostat adiabatique, où l'on maintient une température plus élevée que celle du bain. Cette température était obtenue en chauffant un écran de protection entourant le bloc de comparaison à la même température que ce bloc. On maintient un vide poussé dans l'enceinte à vide pendant toute la durée d'une mesure.

b. Un cryostat à vide, dans lequel une température plus élevée que celle du bain était obtenue et maintenue à l'aide d'un chauffage du bloc de comparaison placé dans un vide poussé. L'écran de protection n'avait qu'un rôle passif.

c. Un cryostat à vide, dans lequel le bloc de comparaison est séparé du bain par une enceinte à vide remplie d'hélium pour permettre un échange de chaleur avec le bain environnant. La température du bain était stabilisée par un régulateur à tension de vapeur d'un réfrigérant.

La stabilité de la température à chaque point de mesure était au moins aussi bonne que ± 2 millidegrés. La figure 1 montre un accord très satisfaisant entre les points obtenus sous différentes conditions.

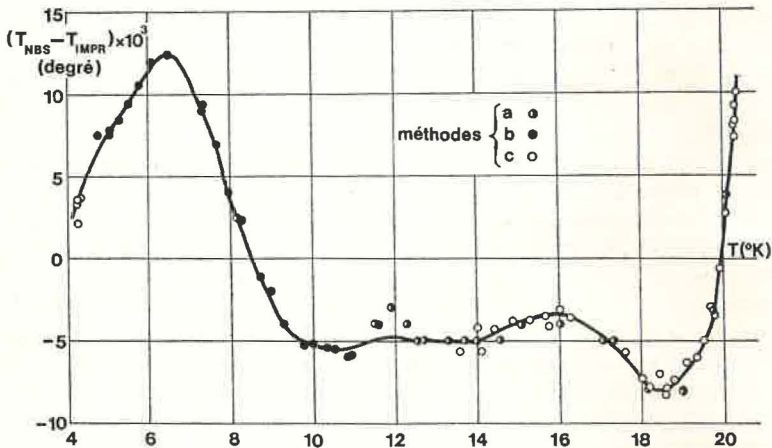


Fig. 1.

Pour les thermomètres du N.B.S., les intensités du courant de mesure étaient les mêmes que celles qui avaient été employées pour leur étalonnage original. Le thermomètre de l'I.M.P.R. a été utilisé avec les mêmes intensités de courant qu'au cours de la détermination de l'échelle de l'I.M.P.R.

Les températures dans l'échelle du N.B.S. ont été calculées au moyen

des tables d'étalonnage $R(T)$ établies au N.B.S. Pour le thermomètre N° 17, on a déterminé ses températures dans l'échelle de l'I.M.P.R. à l'aide de la table $W(T)$.

Les résultats des comparaisons entre les thermomètres N° 76 et N° 78 du N.B.S. et le thermomètre N° 17 de l'I.M.P.R. sont indiqués à la figure 1. Les résultats concernant les thermomètres N°s 76 et 78 sont en accord à mieux que 1 millidegré.

Les écarts entre les échelles sur le domaine assez large s'étendant de 9 à 18 °K excèdent à peine l'erreur de détermination ($\pm 0,005$ deg) de l'échelle IMPR. Entre 4,2 et 8 °K et entre 18 et 19,5 °K l'écart atteint 0,01 deg. Cette valeur semble être la différence réelle entre les deux échelles. Dans un petit intervalle au-dessus de 20 °K la différence entre les échelles s'accroît nettement (jusqu'à 0,01 deg). Comme le dernier point d'étalonnage des thermomètres du N.B.S. était 20,048 °K, l'extrapolation au moyen d'un polynôme est vraisemblablement la cause de cet accroissement, car le polynôme a été employé au-delà de ses limites d'application, ce qui peut entraîner des erreurs importantes.

En ce qui concerne le thermomètre N° 79, les résultats obtenus avec deux appareillages différents s'écartent de façon significative. Pour une des séries de mesures au-dessus de 10 °K les résultats du thermomètre N° 79 diffèrent beaucoup de ceux des thermomètres N°s 76 et 78. La figure 2

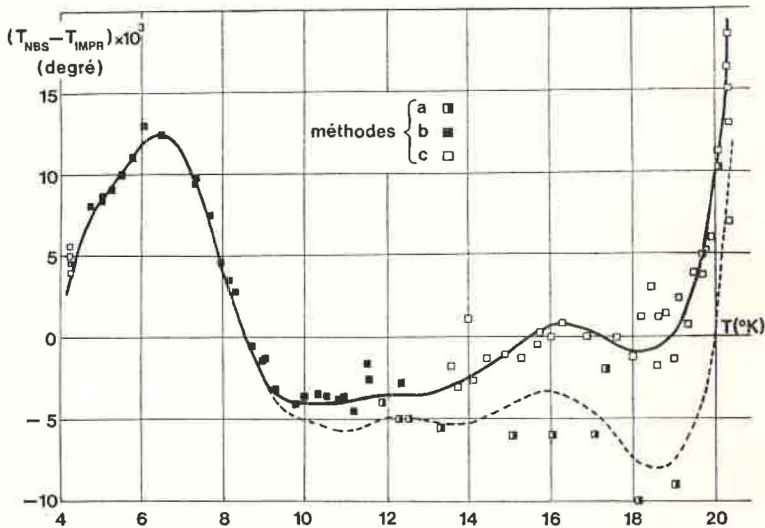


Fig. 2.

montre la différence entre les échelles telle qu'elle résulte de la comparaison entre les thermomètres N° 79 (N.B.S.) et N° 17 (I.M.P.R.). La courbe en pointillé est une courbe lissée des différences représentées à la figure 1.

On peut ainsi constater qu'entre les points d'ébullition de l'hélium et de l'hydrogène, les différences entre les échelles du N.B.S. et de l'I.M.P.R. ne dépassent pas $\pm 0,01$ deg, la précision de la détermination des deux échelles étant $\pm 0,005$ degré.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] PLUMB (H. H) et CATALAND (G.), *J. Res. N.B.S.*, **69-A**, 1965, p. 375; *Technical News Release*, May 1965, p. 3198.
 - [2] ASTROV (D. N), ORLOVA (M. P.) et KYTIN (G. A.), Document N° 13 présenté au Groupe de travail du C.C.T., septembre 1966.
 - [3] ORLOVA (M. P.), ASTROV (D. N.), MEDVEDEVA (L. A.), *Prib. Tekh. Exp.*, N° 5, 1964, p. 231.
-

Reproductibilité des thermomètres à résistance de germanium à 4,2 et 20,3 °K

Par C. VAN RIJN, J. L. TIGGELMAN et M. DURIEUX

Kamerlingh Onnes Laboratorium (Pays-Bas)

Six thermomètres à résistance de germanium provenant de trois sources différentes : Honeywell, type II, Compagnie Générale d'Électricité (C.G.E., Marcoussis, France) et Texas Instruments Corp., ont servi à l'étude de la reproductibilité sur ce genre de thermomètre aux basses températures. La reproductibilité des indications de ces six thermomètres (deux de chaque constructeur) a été déterminée au point d'ébullition de l'hélium liquide (4,2 °K) et au point d'ébullition du parahydrogène liquide (20,3 °K).

Les thermomètres étaient insérés dans des trous percés dans un bloc de cuivre. Le bloc était placé à l'intérieur d'un récipient cylindrique en laiton qui était lui-même placé dans un cryostat. Une cavité, pratiquée dans le bloc de cuivre, servait de réservoir à un thermomètre à tension de vapeur. Un écran de cuivre entre le bloc et le cylindre assurait l'uniformité de température dans le bloc de cuivre. En plus des thermomètres à germanium, on a inséré dans le bloc de cuivre deux thermomètres à résistance de platine.

La résistance en courant continu des thermomètres était mesurée à l'aide d'un potentiomètre. La température correspondante était déterminée d'après la tension de vapeur de l'hélium, ou du parahydrogène, condensé dans le thermomètre à tension de vapeur. On obtenait le parahydrogène en convertissant de l'hydrogène pur commercial liquéfié (75 % ortho, 25 % para) au moyen d'un catalyseur, dans un appareillage séparé.

Les résultats des mesures sont représentés par les graphiques des figures 1 à 7, sur lesquelles les variations de résistance sont exprimées par les variations de température (Δt) correspondantes.

Les points reliés en traits pleins se rapportent à un cycle de refroidissement des thermomètres. Entre deux séries les thermomètres étaient chauffés une fois à la température ambiante, sauf pendant la période du 5 septembre au 20 octobre au cours de laquelle ils furent soumis à six cycles de température entre 20 et 300 °K. Ils ne furent soumis à aucun cycle de température

avant les expériences. Entre le 4 novembre et le 27 janvier tous les thermomètres furent enlevés de l'appareil et insérés à nouveau pour voir si cela avait un effet sur la reproductibilité.

D'après les graphiques, on peut voir qu'à 20,3 °K pour les thermomètres Honeywell (B et C) et les thermomètres C.G.E. (D, E) la dispersion générale

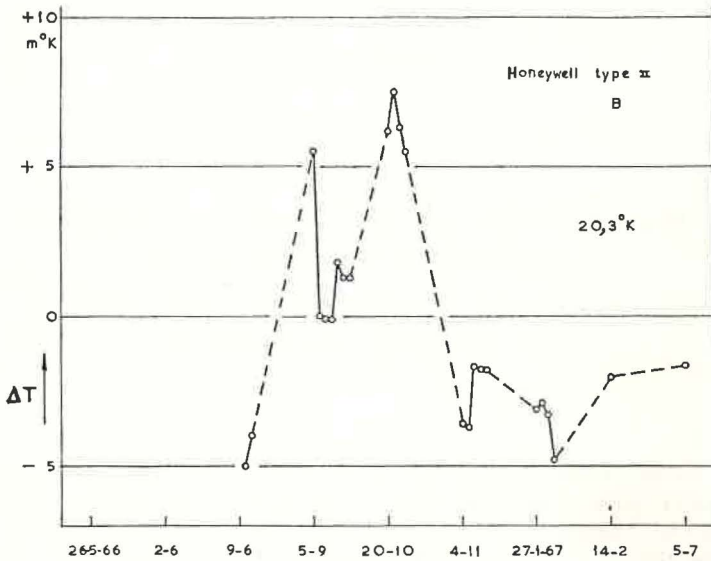


Fig. 1.

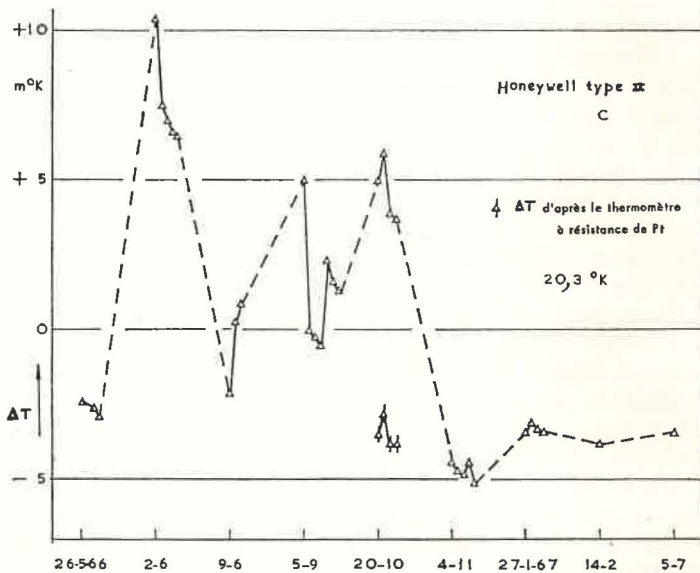


Fig. 2.

des points de la première et des quatre dernières séries (21-5, 4-11 au 5-7) est de $\pm 1,5$ m°K. Le fait d'avoir retiré et remis les thermomètres n'a pas eu d'effet appréciable. Les résultats de la seconde à la cinquième séries sont systématiquement différents; pour chacune de ces séries Δt est le même pour les quatre thermomètres à quelques millidegrés près, à l'exception de la série du 9 juin pour B et du 2 juin pour C. On peut trouver une explication plausible à ces écarts en considérant la composition de l'hydrogène converti, condensé dans le thermomètre à tension de vapeur. Dans la première et les quatre dernières séries, qui montrent une reproductibilité satisfaisante des quatre thermomètres, l'hydrogène était condensé dans le thermomètre à tension de vapeur dans les quelques heures qui suivaient la conversion. Dans les autres séries, l'hydrogène était conservé temporairement dans des récipients en verre à la température ambiante, pendant une période variant de un à sept jours, avant d'être condensé. Si l'on suppose que l'hydrogène conservé à la température ambiante se convertit,

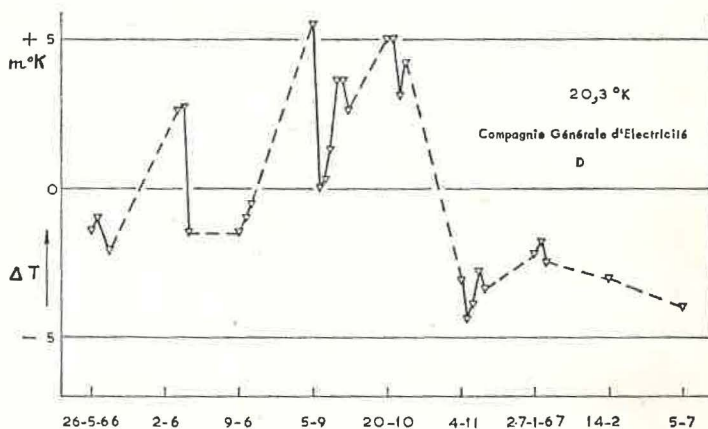


Fig. 3.

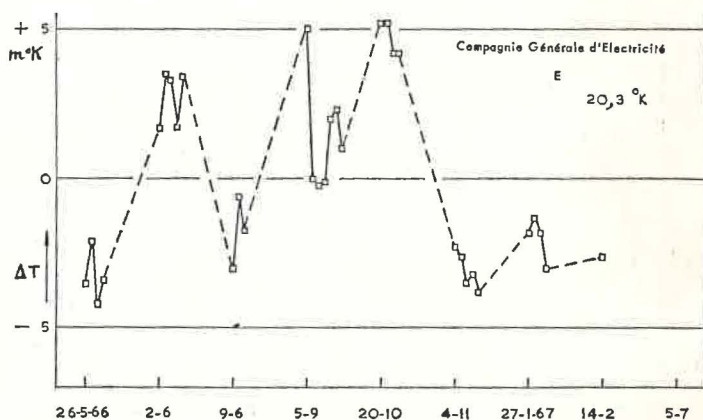


Fig. 4.

Δt doit augmenter, ainsi qu'on l'a constaté. Cette supposition est étayée par le fait que si l'on calcule Δt en se servant de la température déterminée par un des thermomètres à résistance de platine plutôt que de la température trouvée d'après la tension de vapeur, les écarts disparaissent. Les points ainsi obtenus sont également indiqués sur la figure 2.

L'un des thermomètres Texas Instruments (F) a montré une dérive de résistance équivalant à 0,01 °K sur la durée totale de l'expérience. L'autre thermomètre (G) a varié de 0,1 °K (notez l'échelle différente sur le graphique).

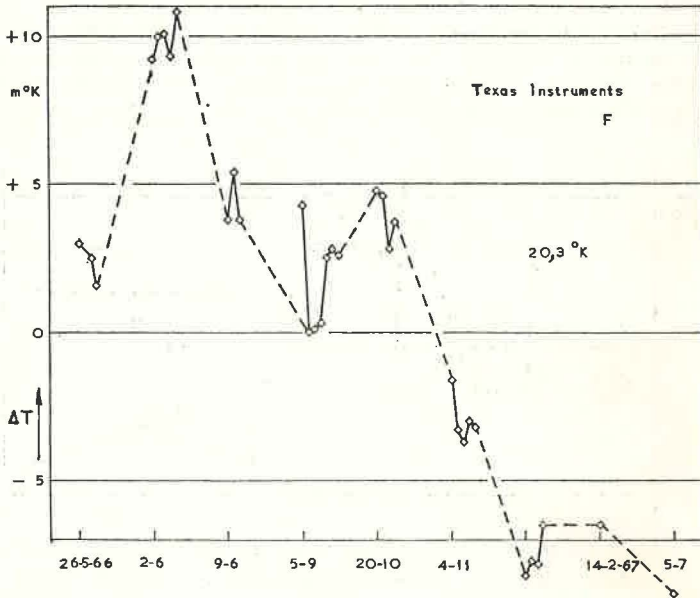


Fig. 5.

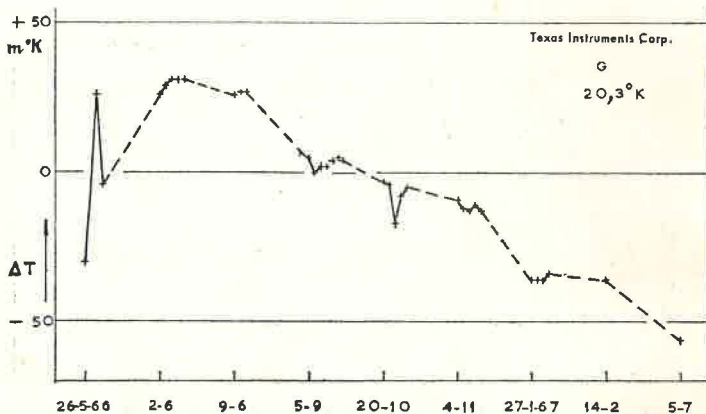


Fig. 6.

A 4,2 °K la dispersion des résultats pour les thermomètres C, D et E varie entre 0,7 m°K (D) et 1,5 m°K (C); au cours de la dernière mesure sur E on s'est aperçu que l'un des conducteurs n'était plus en contact avec le

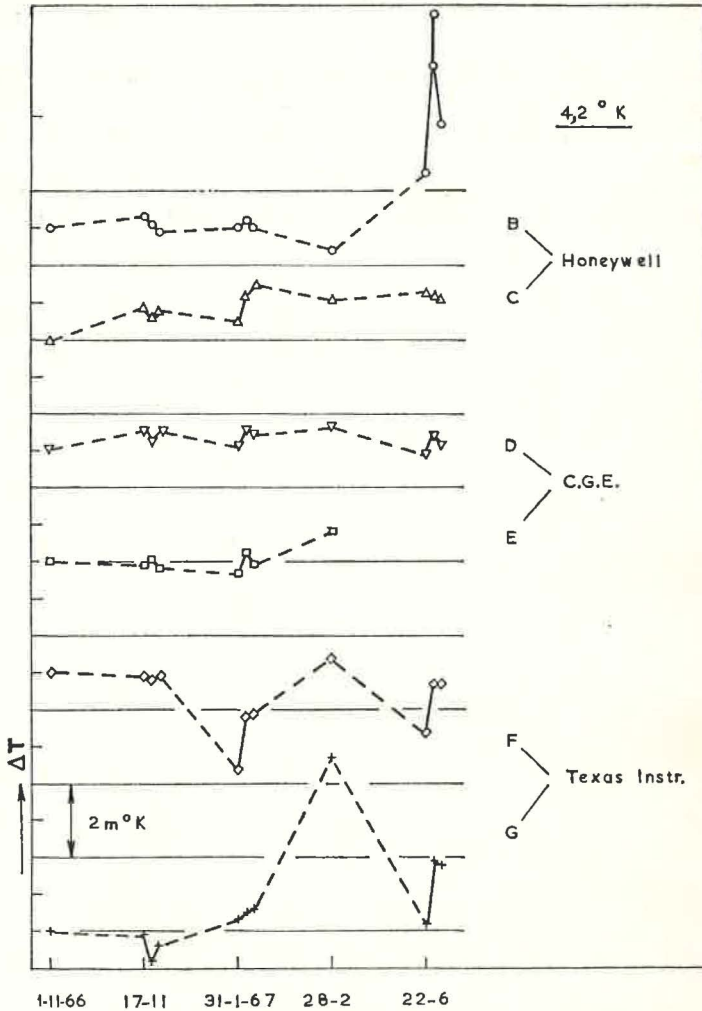


Fig. 7.

crystal de germanium. Le thermomètre B a donné une reproductibilité comparable, sauf au cours de la dernière série (22 juin) durant laquelle il a montré une stabilité médiocre. Dans quelques autres circonstances ce thermomètre était moins stable. Les thermomètres F et G ont montré, entre la plus haute et la plus basse résistance mesurée, des différences respectivement équivalentes à 3,0 et 5,5 m°K. En comparant ces valeurs avec celles qui ont été obtenues à 20,3 °K, il apparaît que l'évolution des thermomètres a un effet plus grand aux températures plus élevées. On a

mesuré l'effet Joule dû au passage du courant dans les thermomètres; on a obtenu :

| | B, C | D, E | F, G | |
|---------|-------|-------|-------|-------------------------------|
| 4,2 °K | 0,014 | 0,002 | 0,004 | m°K par (1 μA) ² |
| 20,3 °K | 0,8 | 0,1 | 0,2 | m°K par (100 μA) ² |

Après étude de la reproductibilité, on a comparé les thermomètres à des températures comprises entre 1,5 et 24 °K. Entre 1,5 et 4,2 °K et entre 14 et 24 °K on les a étalonnés d'après la tension de vapeur de l'hélium et de l'hydrogène.

Après cette étude on envisage d'étalonner un ou deux thermomètres par comparaison à un thermomètre magnétique entre 1,5 et 24 °K.

(Septembre 1967)

**Formule empirique pour la relation
entre la résistance électrique du platine et la température
dans le domaine de 0 °C à 1 064,43 °C**

Par H. MOSER

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (Allemagne)

Abstract. — It is shown that temperature values measured with a platinum resistance thermometer and calculated after equations (1) and (2) with the constants $\gamma = 0,045$ and $n = 3$ agree with the thermodynamic values within the present uncertainty of these values in the whole temperature range from 0 °C to 1 064.43 °C. In equation (1) only the constant ε has to be determined by calibration at the gold point.

Résumé. — On montre que les valeurs des températures mesurées avec un thermomètre à résistance de platine et calculées d'après les équations (1) et (2) avec les constantes $\gamma = 0,045$ et $n = 3$ concordent avec les valeurs thermodynamiques dans les limites d'incertitude actuelles de ces valeurs dans tout le domaine compris entre 0 °C et 1 064,43 °C. Dans l'équation (1) seule la constante ε doit être déterminée par un étalonnage au point de l'or.

Il est de règle que l'on révisé de temps en temps l'Échelle Internationale Pratique de Température (E.I.P.T.) pour la faire concorder plus étroitement avec l'échelle thermodynamique selon les progrès des techniques de mesure. De plus il est probable — toutefois pas encore lors de la prochaine révision de l'E.I.P.T. en 1968 — que l'on remplacera le thermocouple Pt/Pt-Rh par le thermomètre à résistance de platine pour le domaine de température compris entre 0° et 1 064 °C. Cependant, il convient d'étudier déjà de quelle façon la formule quadratique actuelle pour la relation entre la résistance du platine et la température doit être modifiée ou complétée de façon à obtenir un assez bon accord avec l'échelle thermodynamique dans tout le domaine compris entre 0 °C et 1 064,43 °C (point de l'or).

I. FORMULES EMPIRIQUES

Le but peut être atteint si la corrélation entre la valeur numérique t_p de la température dans une échelle Celsius « à platine » et la résistance

réduite $R_t/R_0 = W(t_p)$ est déterminée par les équations suivantes :

$$(1) \quad t_p = t'_p + \gamma \cdot \frac{t'_p}{t_{100}} \left(\frac{t'_p}{t_{100}} - 1 \right) \left(\frac{t'_p}{t_{zn}} - 1 \right) \left(\frac{t'_p}{t_{sb}} - 1 \right) \left[1 - \varepsilon \left(\frac{t'_p}{t_{Au}} \right)^n \right],$$

où t'_p doit être déterminé d'après l'équation de Callendar :

$$(2) \quad t'_p = \frac{W(t_p) - 1}{\alpha} + \delta \frac{t'_p}{t_{100}} \left(\frac{t'_p}{t_{100}} - 1 \right).$$

Pour t_{100} , t_{zn} , t_{sb} et t_{Au} il faut utiliser les meilleures valeurs numériques actuelles t_c pour la température thermodynamique t en °C ($t = t_c$ °C) des points fixes indiqués en indice, c'est-à-dire : 100,00 (point d'ébullition de l'eau), 419,58, 630,74 et 1 064,43 respectivement.

On peut obtenir les constantes α et δ de l'équation (2) de la façon habituelle, en faisant un étalonnage au point d'ébullition de l'eau et au point de congélation du zinc où le terme γ disparaît. Le fait que ce terme disparaisse également pour $t'_p = t_{sb}$ est seulement accidentel. Dans l'avenir, lorsque l'on disposera de mesures thermodynamiques plus exactes, il sera peut-être nécessaire d'introduire dans l'équation (1) une autre valeur numérique à la place de t_{sb} (par exemple 640).

On peut déterminer la constante γ de l'équation (1) d'après la pente de la courbe $W(t_p) - t_p$ au point de glace à l'aide de l'équation

$$(3) \quad \left(\frac{dW(t_p)}{dt_p} \right)_{t_p=0} = \alpha \left(1 + \frac{\delta}{100} \right) \left(1 + \frac{\gamma}{100} \right),$$

dans laquelle $dW(t_p)/dt_p$ doit approcher le mieux possible la valeur $dW(t_c)/dt_c$ mesurée thermodynamiquement au point de glace et doit avoir la même valeur au moins pour les échelles « platine » au-dessous et au-dessus du point de glace. A l'heure actuelle, il semble que cette condition soit le mieux réalisée avec la valeur $\gamma = 0,045 0$, qui est seulement valable pour un platine particulier et qui peut changer avec le progrès dans la technique des mesures thermodynamiques. Étant donné la petitesse de la correction due à γ , une valeur conventionnelle fixée est suffisante.

On peut déterminer la constante ε en étalonnant le thermomètre à résistance de platine au point de l'or pour lequel $t_p = t_{Au}$ et il faut calculer t'_p selon l'équation (2). Dans le cas où $\varepsilon = 0$, les équations (1) et (2) donnent pour les températures t_p des valeurs qui concordent avec les valeurs thermodynamiques t_c entre 0 °C et environ 780 °C dans les limites d'incertitude actuelles des mesures au thermomètre à gaz. On a en conséquence proposé d'utiliser ces équations (avec $\varepsilon = 0$) comme base de la nouvelle E.I.P.T. 1968 (valeur de la température t_{68}) dans le domaine compris entre le point de glace et le point de l'antimoine, de telle sorte que dans ce cas t_p égale t_{68} . Il est alors particulièrement intéressant de savoir si l'on peut obtenir un accord suffisant avec la température thermodynamique au moyen des équations (1) et (2) au-dessus du point de l'antimoine et jusqu'au point de l'or sans négliger le terme ε , et quelle est la valeur numérique convenable pour l'exposant n .

II. ÉTUDE DES ÉQUATIONS ENTRE 630,74 ET 1 064,43 °C

Une étude est possible aux points de congélation de Al, Ag-Cu (eutectique), Ag et Au, dont les valeurs ont été mesurées tant dans l'échelle thermodynamique que dans l'échelle « platine » définie par les équations (1) et (2). Des mesures récentes [1] ont donné les valeurs numériques t_c suivantes pour la température thermodynamique Celsius de ces points : $t_{Al} = 660,47$, $t_{Ag-Cu} = 779,11$, $t_{Ag} = 961,93$, $t_{Au} = 1 064,43$.

Dans l'échelle « platine », la valeur numérique $t'_p = 660,42$ a été calculée avec l'équation (2) pour Al d'après des mesures faites à la P.T.B. de sorte que $(t_c - t'_p)_{Al} = + 0,05$. Pour les autres points fixes, les résultats suivants obtenus au thermomètre à résistance de platine proviennent de trois laboratoires nationaux différents (tableau I).

TABLEAU I

| Laboratoire | Thermomètre N° | W_{100} | W_{Zn} | W_{Ag-Cu} | W_{Ag} | W_{Au} |
|-----------------|----------------|-----------|------------|-------------|----------|----------|
| I.M.M.[2] | 6 | 1,391 81 | 2,565 10 | 3,740 47 | 4,277 53 | 4,561 53 |
| | 8 | 1,391 01 | 2,562 08 | 3,735 38 | 4,271 13 | 4,554 93 |
| | 11 | 1,392 46 | 2,567 74 | 3,744 95 | 4,282 34 | 4,567 04 |
| N.R.L.M. [3] | 6452 | 1,392 66 | 2,568 79 | | 4,286 05 | 4,571 30 |
| | 651 | 1,392 69 | 2,568 84 | | 4,286 26 | 4,571 58 |
| | 653 | 1,392 67 | 2,568 76 | | 4,286 11 | 4,571 38 |
| P.T.B.* | N 52 | 1,371 63 | 2,651 67** | 3,739 78 | 4,277 11 | 4,561 30 |

* Non encore publié.

** Point du soufre.

D'après le tableau I, on a calculé la valeur numérique t'_p et les différences $t_c - t'_p$ (tableau II).

TABLEAU II

| Laboratoire | Thermomètre N° | Ag-Cu | | Ag | | Au | |
|----------------|----------------|--------|---------------------|--------|---------------------|----------|---------------------|
| | | t'_p | $t_c - t'_p$ | t'_p | $t_c - t'_p$ | t'_p | $t_c - t'_p$ |
| I.M.M. | 6 | 778,78 | + 0,33 | 960,59 | + 1,34 | 1 062,49 | + 1,94 |
| | 8 | 778,72 | + 0,39 | 960,31 | + 1,62 | 1 062,49 | + 2,19 |
| | 11 | 778,70 | + 0,41 | 960,28 | + 1,65 | 1 062,22 | + 2,21 |
| N.R.L.M. | 6452 | | | 960,45 | + 1,48 | 1 062,41 | + 2,02 |
| | 651 | | | 960,58 | + 1,35 | 1 062,61 | + 1,82 |
| | 653 | | | 960,59 | + 1,34 | 1 062,41 | + 2,02 |
| P.T.B. | N 52 | 778,70 | + 0,41 | 960,51 | + 1,42 | 1 062,41 | + 2,02 |
| Moyennes | | | + 0,38 ₅ | | + 1,45 ₇ | | + 2,00 ₄ |

En utilisant les trois valeurs moyennes du tableau II pour $t_c - t'_p$, on obtient les valeurs suivantes pour les trois constantes de l'équation (1) quand $t_p = t_c$: $\gamma = 0,049$, $\varepsilon = 0,62$ et $n = 2,8$. En utilisant seulement les

valeurs moyennes pour Ag et Au, on peut calculer les valeurs suivantes pour des exposants n entiers :

TABLEAU III

| | $n = 1$ | $n = 2$ | $n = 3$ | $n = 4$ | $n = 5$ |
|------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| γ | 0,097 | 0,060 | 0,047 | 0,041 | 0,038 |
| ε | 0,81 | 0,69 | 0,61 | 0,55 | 0,51 |
| $(t_p - t'_p)_{Ag-Cu}$ | 0,42 ₀ | 0,40 ₀ | 0,38 ₃ | 0,36 ₈ | 0,35 ₆ |

Les deux méthodes de calcul montrent que, dans l'état actuel de la thermométrie à gaz, on peut espérer obtenir le meilleur accord avec l'échelle thermodynamique pour $n = 3$; il est remarquable aussi que, dans ce cas, on retrouve en première approximation pour la constante γ aux températures élevées la même valeur que celle qui résulte de l'équation (3) au point de glace (0,045).

Dans le tableau IV, on a indiqué pour chaque thermomètre les valeurs $(t_p - t'_p)$ pour les points de congélation de Ag-Cu et de Ag qui résultent de l'équation (1) quand $\gamma = 0,045\ 0$ et $n = 3$, la constante ε étant déterminée au point de l'or.

TABLEAU IV

$\gamma = 0,045\ 0, n = 3$

| Thermo- mètre N° | ε | Ag-Cu | | | Ag | | |
|------------------------|---------------|---------------------|----------------------|-------------------------|---------------------|----------------------|-------------------------|
| | | $t_c - t'_p$ obs | $t_p - t'_p$ calc | $t_c - t_p$ obs-calc | $t_c - t'_p$ obs | $t_p - t'_p$ calc | $t_c - t_p$ obs-calc |
| 6 | 0,601 | + 0,33 | + 0,36 | - 0,03 | + 1,34 | + 1,40 | - 0,06 |
| 8 | 0,549 | + 0,39 | + 0,37 | + 0,02 | + 1,62 | + 1,50 | + 0,12 |
| 11 | 0,545 | + 0,41 | + 0,38 | + 0,03 | + 1,65 | + 1,50 | + 0,15 |
| 6452 | 0,584 | | | | + 1,48 | + 1,43 | + 0,05 |
| 651 | 0,626 | | | | + 1,35 | + 1,35 | 0,00 |
| 653 | 0,624 | | | | + 1,34 | + 1,36 | - 0,02 |
| N 52 | 0,584 | + 0,41 | + 0,37 | + 0,04 | + 1,42 | + 1,43 | - 0,01 |
| Moyennes..... | | | | + 0,01 ₆ | | | + 0,03 ₃ |

Comme le montre le tableau IV, les différences entre les valeurs observées et calculées restent dans chaque cas dans les limites d'incertitude actuelles du thermomètre à gaz et du thermomètre à résistance de platine. Toute valeur entière autre que $n = 3$ associée à une valeur de γ proche de 0,045 donnerait un accord moins bon.

A la 8^e session du Comité Consultatif de Thermométrie (C.C.T.), l'auteur a proposé la valeur $n = 5$ avec $\gamma = 0,042$, en se fondant sur une estimation grossière. En décembre 1967, S. Takata *et al.* ont pensé — probablement à cause d'une transcription inexacte de l'équation (1) dans le rapport préliminaire du C.C.T. — qu'une formule simplifiée avec $n = 1$ et $\gamma = 0,046$ était suffisante. Dans le premier cas, les valeurs moyennes de $t_c - t'_p$ seraient de - 0,01 pour Ag-Cu et de - 0,10 pour Ag, valeurs qui restent encore dans

les limites d'incertitude des valeurs thermodynamiques, tandis que dans le second cas les écarts sont quelque peu supérieurs (+ 0,09 pour Ag-Cu et + 0,27 pour Ag).

III. ÉTUDE DES ÉQUATIONS ENTRE 0 °C ET 1 064,43 °C

Le tableau V donne une comparaison des meilleures valeurs numériques (t_c) de la température thermodynamique en °C, des différences avec l'E.I.P.T. 1948 ($t_c - t_{48}$), et les valeurs de $t_c - t_p$ déduites des équations (1) et (2) avec $\gamma = 0,045$ et $n = 3$, ainsi que les incertitudes estimées U des valeurs thermodynamiques.

TABLEAU V

| Point fixe | t_c (°C) | $t_c - t_{48}$ | $t_c - t'_p$ | $t_c - t_p$ ($\epsilon = 0,588$) | $t_c - t_p$ ($\epsilon = 0,000$) | U |
|------------------------|------------|----------------|----------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------|
| H ₂ O | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | ± 0,000 |
| | 50,000 | - 0,012* | - 0,010 ₇ | - 0,001 ₆ | - 0,001 ₆ | ± 0,005 |
| H ₂ O | 100,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | ± 0,005 |
| (point ébull.) | | | | | | |
| Sn | 231,953 | + 0,037 | + 0,021 | - 0,01 ₈ | - 0,01 ₈ | ± 0,03 |
| Cd | 321,114 | + 0,080 | + 0,042 | + 0,00 ₆ | + 0,00 ₅ | ± 0,03 |
| Zn | 419,580 | + 0,075 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | ± 0,03 |
| S | 444,684 | + 0,084 | - 0,003 | - 0,00 ₉ | - 0,00 ₉ | ± 0,03 |
| (point ébull.) | | | | | | |
| Sb | 630,74 | + 0,17 | - 0,03 ₂ | - 0,03 ₂ | - 0,03 ₂ | ± 0,06 |
| Al | 660,47 | + 0,28** | + 0,05 ₄ | + 0,01 ₅ | + 0,00 ₉ | ± 0,06 |
| Ag-Cu | 779,11 | Valeurs | + 0,038 ₅ | + 0,01 ₇ | (- 0,09) | ± 0,15 |
| Ag | 961,93 | moyennes du | + 1,45 ₇ | + 0,03 ₃ | (- 1,05) | ± 0,2 |
| Au | 1 064,43 | Tableau II | + 2,00 ₃ | 0,000 | (- 2,82) | ± 0,2 |

* Valeur de Beattie.

** Mesurée avec le thermomètre à résistance de platine.

On peut voir d'après le tableau V que les différences ($t_c - t_p$) entre l'échelle « platine » — définie par les équations (1) et (2) — et l'échelle thermodynamique dans tout le domaine compris entre 0 °C et 1 064 °C restent nettement à l'intérieur des incertitudes de mesure des valeurs thermodynamiques. Même si les incertitudes, que l'on peut estimer un peu trop élevées — du fait que des erreurs systématiques éventuelles sont prises en considération — sont réduites aux 2/3, il y a encore un bon accord. On peut en dire autant pour l'équation simplifiée (1) avec $\epsilon = 0$ pour le domaine compris entre 0 °C et 780 °C environ.

(22 avril 1968)

BIBLIOGRAPHIE

- [1] MOSER (H.), OTTO (J.) et THOMAS (W.), *Z. Phys.*, **206**, 1967, p. 223.
- [2] *Procès-Verbaux C.I.P.M.*, **24**, 1954, p. T 122.
- [3] *Cf. Annexe 1, Document N° 37.*

ANNEXE 18

Échelle Internationale Pratique de Température de 1968 (*)

TABLE DES MATIÈRES

| | Pages |
|---|-------|
| I. Introduction | A 3 |
| II. Définition de l'Échelle Internationale Pratique de Température de 1968 (E.I.P.T.-68) . | 3 |
| 1. Principe de l'E.I.P.T.-68 et points fixes de définition | 3 |
| 2. Définition de la Température Internationale Pratique de 1968 dans les différents domaines de température | 4 |
| a. Domaine de 13,81 K à 273,15 K | 4 |
| b. Domaine de 0 °C (273,15 K) à 630,74 °C | 5 |
| c. Domaine de 630,74 °C à 1 064,43 °C | 5 |
| d. Domaine des températures supérieures à 1 337,58 K (1 064,43 °C) | 6 |
| III. Renseignements complémentaires | 6 |
| 1. Thermomètre à résistance étalon | 6 |
| 2. Thermocouple étalon | 8 |
| 3. Pression | 8 |
| 4. Point triple de l'eau | 8 |
| 5. Point triple, point 17,042 K et point d'ébullition de l'hydrogène en équilibre ... | 9 |
| 6. Point d'ébullition du néon | 10 |
| 7. Point triple et point d'ébullition de l'oxygène..... | 11 |
| 8. Point d'ébullition de l'eau..... | 11 |
| 9. Points de congélation de l'étain et du zinc | 11 |
| 10. Points de congélation de l'argent et de l'or | 12 |
| 11. Points de référence secondaires | 13 |
| ANNEXE I. Historique de la mise au point des Échelles Internationales de Température ; différences entre l'E.I.P.T.-68 et l'E.I.P.T.-48 | 14 |
| ANNEXE II. Échelles pratiques de température à employer dans le domaine compris entre 0,2 K et 5,2 K..... | 15 |
| TABLEAU I. Points fixes de définition de l'E.I.P.T.-68 | 17 |
| TABLEAU II. Fonction de référence $W_{\text{CGT-68}}(T_{68})$ pour les thermomètres à résistance de platine dans le domaine compris entre 13,81 K et 273,15 K | 18 |

(*) Le texte en anglais de cette Échelle est publié dans *Metrologia*, 5, n° 2, 1969.

| | | |
|---------------|--|----|
| TABLEAU III. | Valeurs de $W_{\text{CCT-68}}(T_{68})$, selon l'équation donnée au tableau II, pour des valeurs entières de T_{68} | 19 |
| TABLEAU IV. | Valeurs de $W_{\text{CCT-68}}(T_{68})$, selon les données portées au tableau II, aux températures des points fixes | 20 |
| TABLEAU V. | Influence de la pression sur la température de congélation des métaux .. | 20 |
| TABLEAU VI. | Points de référence secondaires | 21 |
| TABLEAU VII. | Incertitudes estimées sur les valeurs assignées aux points fixes de définition par rapport à leur température thermodynamique..... | 23 |
| TABLEAU VIII. | Différences approximatives entre les valeurs de température données par l'E.I.P.T. de 1968 et l'E.I.P.T. de 1948 | 24 |

I. INTRODUCTION

La température de base est la température thermodynamique, symbole T , dont l'unité est le kelvin, symbole K. Le kelvin est la fraction $1/273,16$ de la température thermodynamique du point triple de l'eau ⁽¹⁾.

La température Celsius, symbole t , est définie par

$$(1) \quad t = T - T_0$$

où $T_0 = 273,15$ K. L'unité employée pour exprimer une température Celsius est le degré Celsius, symbole °C, qui est égal au kelvin. On exprime une différence de température en kelvins; on peut également l'exprimer en degrés Celsius.

L'Échelle Internationale Pratique de Température de 1968 (E.I.P.T.-68) a été choisie de telle façon que la température mesurée dans cette Échelle soit une étroite approximation de la température thermodynamique, les différences demeurant dans les limites de l'exactitude actuelle des mesures.

Dans l'Échelle Internationale Pratique de Température de 1968 on distingue la Température Kelvin Internationale Pratique avec le symbole T_{68} et la Température Celsius Internationale Pratique avec le symbole t_{68} ; la relation entre T_{68} et t_{68} est

$$(2) \quad t_{68} = T_{68} - 273,15 \text{ K.}$$

Les unités de T_{68} et t_{68} sont le kelvin, symbole K, et le degré Celsius, symbole °C, comme dans le cas de la température thermodynamique T et de la température Celsius t .

Le Comité International des Poids et Mesures a adopté l'Échelle Internationale Pratique de Température de 1968 lors de sa session d'octobre 1968, conformément aux pouvoirs que lui avait conférés la Treizième Conférence Générale des Poids et Mesures par sa Résolution 8. Cette Échelle remplace l'Échelle Internationale Pratique de Température de 1948 (édition amendée de 1960).

II. DÉFINITION DE L'ÉCHELLE INTERNATIONALE PRATIQUE DE TEMPÉRATURE DE 1968 (E.I.P.T.-68) (2)

1. Principe de l'E.I.P.T.-68 et points fixes de définition

L'E.I.P.T.-68 est fondée sur les valeurs des températures assignées à un certain nombre d'états d'équilibre reproductibles (points fixes de définition) et sur des instruments spécifiés étalonnés à ces températures. L'interpolation entre les températures des points fixes est réalisée au moyen de formules servant à établir la relation entre les indications de ces instruments et les valeurs de la Température Internationale Pratique.

(1) Treizième Conférence Générale des Poids et Mesures (1967), Résolutions 3 et 4.

(2) Dans ce document on emploie en général les températures Kelvin au-dessous de 0 °C et les températures Celsius au-dessus de 0 °C. Cela permet d'éviter l'emploi de valeurs négatives

On établit les points fixes de définition en réalisant des états d'équilibre spécifiés entre phases de substances pures. On trouvera dans le Tableau I (p. A 17) ces états d'équilibre et les valeurs de la Température Internationale Pratique qui leur sont assignées.

Entre 13,81 K et 630,74 °C c'est le thermomètre à résistance de platine qui est employé comme instrument étalon. L'élément résistant du thermomètre doit être en platine pur, recuit, exempt de toute contrainte. La résistance réduite $W(T_{68})$, définie par

$$(3) \quad W(T_{68}) = R(T_{68})/R(273,15 \text{ K})$$

où R est la résistance, ne doit pas être inférieure à 1,392 50 à $T_{68} = 373,15 \text{ K}$. Au-dessous de 0 °C la relation résistance-température du thermomètre est obtenue à l'aide d'une fonction de référence et de fonctions écarts spécifiées. Entre 0 °C et 630,74 °C deux polynômes fournissent la relation résistance-température.

Entre 630,74 °C et 1 064,43 °C l'instrument étalon est le thermocouple platine rhodié (10 % de rhodium)/platine, dont la relation force électromotrice-température est représentée par une équation du second degré.

Au-dessus de 1 337,58 K (1 064,43 °C) on définit la Température Internationale Pratique de 1968 au moyen de la loi du rayonnement de Planck avec 1 337,58 K comme température de référence et 0,014 388 mètre-kelvin comme valeur de c_2 .

2. Définition de la Température Internationale Pratique de 1968 dans les différents domaines de température

a. Domaine de 13,81 K à 273,15 K

Entre 13,81 K et 273,15 K la température T_{68} est définie par la relation

$$(4) \quad W(T_{68}) = W_{\text{CCT-68}}(T_{68}) + \Delta W(T_{68}),$$

où $W(T_{68})$ est la résistance réduite du thermomètre à résistance de platine et $W_{\text{CCT-68}}(T_{68})$ est la résistance réduite donnée par la fonction de référence indiquée au Tableau II (p. A 18) ⁽³⁾. Les écarts $\Delta W(T_{68})$ aux températures des points fixes de définition sont obtenus à partir des valeurs mesurées de $W(T_{68})$ et des valeurs correspondantes de $W_{\text{CCT-68}}(T_{68})$ (voir Tableau IV, p. A 20). Pour trouver $\Delta W(T_{68})$ aux températures intermédiaires, on emploie des formules d'interpolation. L'intervalle entre 13,81 K et 273,15 K est divisé en quatre régions; dans chacune d'elles $\Delta W(T_{68})$ est défini par un polynôme en T_{68} , dont les coefficients sont déterminés d'après les valeurs de $\Delta W(T_{68})$ aux points fixes et par la condition qu'il n'y ait pas de discontinuité de $d\Delta W(T_{68})/dT_{68}$ au passage d'une région à la région voisine.

Entre 13,81 K et 20,28 K la fonction écart est

$$(5) \quad \Delta W(T_{68}) = A_1 + B_1 T_{68} + C_1 T_{68}^2 + D_1 T_{68}^3.$$

Les coefficients de cette fonction sont déterminés d'après les écarts mesurés au point triple de l'hydrogène en équilibre, à la température de 17,042 K et au point d'ébullition de l'hydrogène en équilibre et d'après la dérivée de la fonction écart au point d'ébullition de l'hydrogène en équilibre, telle qu'elle résulte de l'équation (6).

⁽³⁾ Pour la relation entre l'E.I.P.T.-68 et les « échelles nationales » dont elle a été en partie déduite, voir l'Annexe I, p. A 14.

Entre 20,28 K et 54,361 K la fonction écart est

$$(6) \quad \Delta W(T_{68}) = A_2 + B_2 T_{68} + C_2 T_{68}^2 + D_2 T_{68}^3.$$

Les coefficients de cette fonction sont déterminés d'après les écarts mesurés au point d'ébullition de l'hydrogène en équilibre, au point d'ébullition du néon et au point triple de l'oxygène et d'après la dérivée de la fonction écart au point triple de l'oxygène, telle qu'elle résulte de l'équation (7).

Entre 54,361 K et 90,188 K la fonction écart est

$$(7) \quad \Delta W(T_{68}) = A_3 + B_3 T_{68} + C_3 T_{68}^2.$$

Les coefficients de cette fonction sont déterminés d'après les écarts mesurés au point triple et au point d'ébullition de l'oxygène et d'après la dérivée de la fonction écart au point d'ébullition de l'oxygène, telle qu'elle résulte de l'équation (8).

Entre 90,188 K et 273,15 K la fonction écart est

$$(8) \quad \Delta W(T_{68}) = A_4 t_{68} + C_4 t_{68}^2 (t_{68} - 100 \text{ } ^\circ\text{C}).$$

Dans cette relation $t_{68} = T_{68} - 273,15 \text{ K}$; les coefficients sont déterminés d'après les écarts mesurés au point d'ébullition de l'oxygène et au point d'ébullition de l'eau (4).

b. Domaine de 0 °C (273,15 K) à 630,74 °C

Entre 0 °C et 630,74 °C la température t_{68} est définie par la relation

$$(9) \quad t_{68} = t' + 0,045 \left(\frac{t'}{100 \text{ } ^\circ\text{C}} \right) \left(\frac{t'}{100 \text{ } ^\circ\text{C}} - 1 \right) \left(\frac{t'}{419,58 \text{ } ^\circ\text{C}} - 1 \right) \left(\frac{t'}{630,74 \text{ } ^\circ\text{C}} - 1 \right) ^\circ\text{C},$$

dans laquelle t' est défini par l'équation

$$(10a) \quad t' = \frac{1}{\alpha} [W(t') - 1] + \delta \left(\frac{t'}{100 \text{ } ^\circ\text{C}} \right) \left(\frac{t'}{100 \text{ } ^\circ\text{C}} - 1 \right),$$

avec $W(t') = \frac{R(t')}{R(0 \text{ } ^\circ\text{C})}$. Les constantes $R(0 \text{ } ^\circ\text{C})$, α et δ sont déterminées d'après des mesures de la résistance au point triple de l'eau, au point d'ébullition de l'eau (ou au point de congélation de l'étain, voir la note (2) au Tableau I, p. A 17) et au point de congélation du zinc.

L'équation (10a) est équivalente à l'équation

$$(10b) \quad W(t') = 1 + At' + Bt'^2,$$

dans laquelle $A = \alpha(1 + \delta/100 \text{ } ^\circ\text{C})$ et $B = -10^{-4} \alpha \delta \text{ } ^\circ\text{C}^{-2}$.

c. Domaine de 630,74 °C à 1 064,43 °C

Entre 630,74 °C et 1 064,43 °C la température t_{68} est définie par l'équation

$$(11) \quad E(t_{68}) = a + bt_{68} + ct_{68}^2,$$

dans laquelle $E(t_{68})$ est la force électromotrice d'un thermocouple étalon platine rhodié (10 % de rhodium)/platine, quand une soudure est à la température $t_{68} = 0 \text{ } ^\circ\text{C}$ et l'autre à la température t_{68} . Les coefficients a , b et c sont calculés d'après les valeurs de E à $630,74 \text{ } ^\circ\text{C} \pm 0,2 \text{ } ^\circ\text{C}$ (température déterminée au moyen

(4) Si l'on emploie comme point fixe le point de congélation de l'étain (voir la note (2) au Tableau I, p. A 17) au lieu du point d'ébullition de l'eau, on doit calculer $W(100 \text{ } ^\circ\text{C})$ pour

d'un thermomètre à résistance de platine) et aux points de congélation de l'argent et de l'or.

Les fils du thermocouple étalon doivent être recuits et la pureté du fil de platine doit être telle que la résistance réduite $W(100\text{ }^{\circ}\text{C})$ ne soit pas inférieure à 1,392 0. Le fil de platine rhodié doit contenir nominalelement en masse 10 % de rhodium et 90 % de platine. Le thermocouple doit être tel que les forces électromotrices $E(630,74\text{ }^{\circ}\text{C})$, $E(\text{Ag})$ et $E(\text{Au})$ satisfassent aux relations suivantes :

$$(12) \quad E(\text{Au}) = 10\,300\ \mu\text{V} \pm 50\ \mu\text{V}$$

$$(13) \quad E(\text{Au}) - E(\text{Ag}) = 1\,183\ \mu\text{V} + 0,158 [E(\text{Au}) - 10\,300\ \mu\text{V}] \pm 4\ \mu\text{V}$$

$$(14) \quad E(\text{Au}) - E(630,74\text{ }^{\circ}\text{C}) = 4\,766\ \mu\text{V} + 0,631 [E(\text{Au}) - 10\,300\ \mu\text{V}] \pm 8\ \mu\text{V}$$

d. *Domaine des températures supérieures à 1 337,58 K (1 064,43 °C)*

Au-dessus de 1 337,58 K (1 064,43 °C) la température T_{68} est définie par l'équation

$$(15) \quad \frac{L_{\lambda}(T_{68})}{L_{\lambda}(T_{68}(\text{Au}))} = \frac{\exp \left[\frac{c_2}{\lambda T_{68}(\text{Au})} \right] - 1}{\exp \left[\frac{c_2}{\lambda T_{68}} \right] - 1},$$

dans laquelle $L_{\lambda}(T_{68})$ et $L_{\lambda}(T_{68}(\text{Au}))$ sont les densités spectrales de la luminance énergétique du rayonnement d'un corps noir à la longueur d'onde λ ⁽⁵⁾, à la température T_{68} et au point de congélation de l'or, $T_{68}(\text{Au})$; $c_2 = 0,014\,388$ mètre.kelvin.

III. RENSEIGNEMENTS COMPLÉMENTAIRES

Les appareils, les méthodes et les modes opératoires décrits dans ce chapitre sont représentatifs d'une bonne pratique à l'époque actuelle.

1. *Thermomètre à résistance étalon*

Un thermomètre à résistance de platine doit être conçu et construit de façon que l'élément résistant à quatre bornes soit aussi dépourvu que possible de contrainte et le demeure pendant son utilisation. Des éléments résistants satisfaisants ont été faits avec des fils de platine d'un diamètre uniforme compris entre 0,05 et 0,5 mm, un court tronçon au moins de chaque conducteur aboutissant à la résistance étant également en platine. On emploie couramment une valeur de $R(0\text{ }^{\circ}\text{C})$ d'environ 25 Ω et l'intensité du courant de mesure pour un tel thermomètre est normalement de 1 ou 2 mA. Toutes les parties constitutives du thermomètre proches de l'élément résistant doivent être propres et ne doivent pas réagir avec le platine. Pendant la construction du thermomètre il est recommandé d'y faire le vide lorsqu'il est à environ 450 °C, puis d'y introduire un gaz sec et de le sceller hermétiquement. Il est souhaitable que le gaz de remplissage contienne de l'oxygène pour que les traces d'impuretés du platine demeurent sous forme d'oxydes. Après achèvement du thermomètre, l'élément résistant doit être recuit à une température supérieure à la plus haute température à laquelle il doit être utilisé et en tout cas au moins égale à 450 °C.

La résistance d'isolement du support de l'élément résistant et des conducteurs doit être suffisamment élevée pour éviter un shunt appréciable de l'élément. Il convient par exemple d'éviter la condensation de vapeur d'eau entre les conduc-

⁽⁵⁾ Comme $T_{68}(\text{Au})$ est proche de la température thermodynamique du point de congélation de l'or et c_2 est proche de la seconde constante de rayonnement de l'équation de Planck, il n'est pas nécessaire de spécifier la valeur de la longueur d'onde à employer dans les mesures (voir *Metrologia*, 3, 1967, p. 28).

teurs aux basses températures et les fuites intrinsèques des isolateurs aux températures élevées. Les isolateurs sont généralement fabriqués en mica, en silice ou en alumine; ces matériaux offrent normalement un isolement intrinsèque convenable jusqu'à 500 °C. Toutefois, au fur et à mesure que la température approche de 630 °C le problème devient plus critique et des erreurs de 1 mK ou plus peuvent facilement survenir. Dans le cas du mica, une difficulté supplémentaire vient de ce que des quantités non négligeables d'eau peuvent être libérées lorsqu'il est exposé à des températures supérieures à 450 °C et la résistance d'isolement se détériorera rapidement si l'humidité n'est pas éliminée par des pompes périodiques ou au moyen d'un desséchant.

Pour assurer une stabilité convenable de la résistance et des coefficients thermiques de la résistivité, l'élément résistant du thermomètre étalon à résistance de platine doit être maintenu, dans la mesure du possible, dans un état de recuit. Un accroissement de résistivité peut se manifester aussi bien en raison de l'écrasement accidentel qui résulte de la manipulation normale du thermomètre, qu'en raison d'un refroidissement rapide lorsqu'un thermomètre passe d'une température supérieure à 500 °C à la température ambiante. Cette dernière augmentation de la résistance est due à l'effet de trempe des défauts lacunaires concentrés, en équilibre métastable, et demeure tant que le thermomètre reste en dessous de 200 °C. La totalité de la résistance (supplémentaire) due à la trempe et la plus grande partie de celle qui est due à l'écrasement peuvent être supprimées par un recuit de 30 minutes à 500 °C.

Des erreurs appréciables peuvent être dues à des pertes par rayonnement par réflexion totale dans les parties constitutives du thermomètre, en particulier si celles-ci sont en silice. De telles pertes dans la gaine, mais non dans les parties constitutives internes, peuvent être supprimées en noircissant la surface externe de la gaine (par exemple avec une suspension de graphite colloïdal) ou par sablage de la surface pour obtenir un fini mat.

On doit essayer le thermomètre après son achèvement afin de contrôler que la profondeur d'immersion est suffisante pour éviter des erreurs par conduction thermique. Une façon efficace d'effectuer ce contrôle est de s'assurer que le gradient apparent de température au point de congélation d'un métal est en accord avec celui auquel il faut s'attendre en raison de l'effet de la pression hydrostatique (voir Tableau V, p. A 20).

Pour des températures inférieures à 90 K, il est courant d'utiliser un petit thermomètre à résistance de platine, n'ayant généralement pas plus de 5 mm de diamètre et 60 mm de longueur, que l'on peut plonger entièrement dans une zone de température uniforme, la conduction thermique le long des conducteurs étant supprimée en attachant ceux-ci à un anneau de garde approprié. Afin de réaliser un bon contact thermique entre l'élément résistant et son entourage, l'élément est placé dans une gaine mince, généralement en platine, d'environ 0,25 mm d'épaisseur, remplie d'hélium.

Un critère utile pour juger de l'efficacité du recuit et de la fidélité du thermomètre est la constance de sa résistance à une température de référence. A cette fin on emploie généralement les températures du point triple de l'eau (273,16 K) et du point d'ébullition de l'hélium (4,215 K). La première est commode pour la plupart des thermomètres destinés aux températures élevées, tandis que la seconde est non seulement facilement obtenue pour des thermomètres placés dans un appareillage cryogénique, mais présente en outre l'avantage que la résistance des thermomètres y est relativement insensible aux variations de température. Dans la pratique, on constate que pour les thermomètres de fabrication commerciale destinés aux températures élevées les variations de résistance au point triple de l'eau ne doivent pas dépasser $4 \times 10^{-6} R(0\text{ °C})$ (équivalent à $\approx 1\text{ mK}$ au-dessus de 40 K) et qu'elles n'excèdent pas $5 \times 10^{-7} R(0\text{ °C})$ sur une

période raisonnable d'utilisation pour les thermomètres vraiment les meilleurs, quand ceux-ci sont manipulés avec un soin extrême. Pour les thermomètres employés seulement à des températures de 100 °C ou moins, les variations ne doivent pas excéder $5 \times 10^{-7} R(0 \text{ °C})$.

La petite élévation de température des thermomètres due au courant de mesure peut être déterminée par des mesures à deux intensités de courant différentes.

2. Thermocouple étalon

On fabrique des thermocouples étalons satisfaisants avec des fils d'un diamètre uniforme compris entre 0,35 et 0,65 mm. Les fils du thermocouple doivent être complètement recuits de façon à assurer la constance de la force électromotrice durant l'emploi. A cette fin, il est nécessaire de chauffer le fil de platine à une température d'au moins 1 100 °C et le fil de platine rhodié à 1 450 °C. Si le recuit est effectué avant que les fils soient montés sur leurs isolateurs, le thermocouple achevé doit être à nouveau chauffé à une température d'au moins 1 100 °C jusqu'à ce que sa force électromotrice se soit stabilisée et que les défauts locaux d'homogénéité causés par les contraintes aient disparu. Lorsque cela a été effectué correctement, la force électromotrice du thermocouple ne doit pas varier avec les changements des gradients de température le long des fils; elle ne doit pas changer par exemple lorsqu'on augmente la profondeur d'immersion dans une enceinte à température uniforme.

3. Pression

Dans la pratique, on détermine généralement les pressions au moyen d'une colonne de mercure. La masse volumique moyenne du mercure pur, à la température t_{68} , dans une colonne barométrique qui équilibre la pression p à mesurer, est donnée avec une approximation suffisante entre 0 °C et 40 °C, dans le domaine des pressions utilisées dans ces mesures, par la relation :

$$(16) \quad \rho\left(t_{68}, \frac{p}{2}\right) = \frac{\rho(20 \text{ °C}, p_0)}{[1 + A(t_{68} - 20 \text{ °C}) + B(t_{68} - 20 \text{ °C})^2] \times \left[1 - \chi\left(\frac{p}{2} - p_0\right)\right]}$$

où $A = 18\,115 \times 10^{-8} \text{ °C}^{-1}$

$B = 0,8 \times 10^{-8} \text{ °C}^{-2}$

$\chi = 4 \times 10^{-11} \text{ N}^{-1} \text{ m}^2$

$\rho(20 \text{ °C}, p_0) = 13\,545,87 \text{ kg/m}^3$ est la masse volumique du mercure pur à $t_{68} = 20 \text{ °C}$ sous la pression $p_0 = 1$ atmosphère normale ($101\,325 \text{ N/m}^2$).

On peut obtenir une valeur suffisamment exacte de l'accélération locale due à la pesanteur en se servant du Système de Potsdam et en appliquant une correction de $-14 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ (-14 milligals) ⁽⁶⁾.

Les pressions hydrostatiques à l'intérieur des enceintes à point fixe ont une influence, faible mais significative, sur la température (voir Tableau V, p. A 20).

4. Point triple de l'eau

On peut réaliser la température du point triple de l'eau dans des ampoules de verre scellées contenant seulement de l'eau d'une grande pureté, dont la composition isotopique est essentiellement celle de l'eau des océans. Ces ampoules sont munies d'un puits axial pour le thermomètre, et l'on obtient la température

⁽⁶⁾ Par sa Résolution 1 (1968), le Comité International des Poids et Mesures a décidé que « pour les besoins métrologiques, la valeur de l'accélération due à la pesanteur à Potsdam, ... soit prise égale à $9,812\,60 \text{ m/s}^2$ et non plus

du point triple partout où la glace est en équilibre avec une surface liquide-vapeur. A une profondeur h au-dessous de la surface liquide-vapeur, la température d'équilibre t_{08} entre la glace et l'eau liquide est donnée par

$$(17) \quad t_{08} = A + Bh$$

où $A = 0,01$ °C et $B = -7 \times 10^{-4}$ m⁻¹ °C. La méthode recommandée pour la préparation d'une cellule à point triple consiste à former une épaisse couche de glace autour du puits du thermomètre en refroidissant de l'intérieur, puis à faire fondre une partie suffisante de cette couche de glace, également à partir de l'intérieur, pour produire une nouvelle surface de contact eau-glace au voisinage du puits. Au cours des premières heures qui suivent la préparation de la cellule, la température mesurée dans le puits du thermomètre s'élève assez rapidement de quelques dix-millièmes de kelvin pour se stabiliser après un à trois jours. Ce changement initial de température est probablement dû à la croissance des cristaux de glace ou à la lente disparition des tensions dans ces cristaux. Une cellule préparée de cette façon et conservée dans un bain de glace est capable de maintenir une température constante à 0,000 1 K près pendant plusieurs mois. Même avec des cellules de provenances diverses, lorsqu'elles sont utilisées de cette façon, les différences de température obtenues ne doivent en aucun cas dépasser 0,000 2 K. Une augmentation significative de la température du thermomètre au-dessus de la température du point triple peut être due à la lumière artificielle ou solaire tombant sur la cellule recouverte de glace; il est en conséquence recommandé que les mesures soient faites en protégeant convenablement la cellule contre ce rayonnement.

Les variations de la composition isotopique de l'eau naturelle sont telles qu'elles entraînent des différences décelables dans la température du point triple. L'eau des océans contient environ 0,016 mole de deutérium (²H) pour 100 moles d'hydrogène (¹H), et 0,04 mole de ¹⁷O et 0,2 mole de ¹⁸O pour 100 moles de ¹⁶O. Cette proportion d'isotopes lourds est pratiquement la plus élevée que l'on trouve dans l'eau naturelle. Les eaux continentales superficielles contiennent normalement environ 0,015 mole de ²H pour 100 moles de ¹H; l'eau provenant des neiges polaires ne contient parfois que 0,01 mole de ²H pour 100 moles de ¹H.

Les opérations de purification de l'eau peuvent modifier légèrement sa composition isotopique, et la composition isotopique à une surface de contact eau-glace dépend quelque peu de la technique de congélation.

Une augmentation de 0,001 mole de ²H pour 100 moles de ¹H correspond à une augmentation de la température du point triple de 0,000 04 K; c'est la différence entre les températures des points triples obtenus avec l'eau des océans et avec l'eau que l'on trouve normalement à la surface des continents. La plus grande différence entre les températures du point triple des eaux naturelles est 0,000 25 K.

5. Point triple, point 17,042 K et point d'ébullition de l'hydrogène en équilibre

L'hydrogène a deux variétés moléculaires, désignées par les préfixes *ortho* et *para*, dues à des orientations relatives différentes des deux spins nucléaires dans la molécule diatomique. La composition ortho-para en équilibre dépend de la température. A la température ambiante elle est de 75 % d'orthohydrogène et de 25 % de parahydrogène (« hydrogène normal »). Lors de la liquéfaction, la composition change lentement avec le temps et il y a des changements correspondants dans les propriétés physiques. Au point d'ébullition, la composition en équilibre est de 0,21 % d'orthohydrogène et de 99,79 % de parahydrogène et la température est plus basse que celle de l'hydrogène normal d'environ 0,12 K. L'expression « hydrogène en équilibre » signifie dans ce document que l'hydrogène

a sa composition ortho-para en équilibre à la température considérée. Afin d'éviter dans la réalisation de ces points fixes des erreurs dues à une composition indéterminée, il est conseillé d'utiliser de l'hydrogène en équilibre converti par l'emploi d'un catalyseur tel que l'hydroxyde ferrique. Il convient d'utiliser de l'hydrogène de très grande pureté chimique, que l'on peut obtenir par diffusion à travers le palladium.

La température d'équilibre entre les phases solide, liquide et vapeur de l'hydrogène peut être réalisée en utilisant une quantité suffisante d'hydrogène liquide avec un catalyseur dans une cavité ménagée dans un bloc de cuivre, dans lequel on a immergé des thermomètres à résistance de platine, le bloc de cuivre étant entouré d'un espace vide. La température du bloc est abaissée jusqu'à ce que l'hydrogène soit solidifié; on laisse alors la température s'élever lentement et l'on observe le passage au point triple. Le palier de la courbe de la température en fonction du temps peut être constant à 0,000 1 K près pendant 30 minutes ou plus.

On réalise normalement la température d'équilibre entre l'hydrogène liquide et gazeux par la méthode statique. Dans cette méthode, une cavité dans un bloc de métal de conductivité thermique élevée est maintenue à une température voisine du point d'ébullition par immersion dans de l'hydrogène liquide. Afin d'éviter des gradients de température dus à la pression hydrostatique, l'hydrogène liquide n'est en contact qu'avec le haut du bloc, la partie inférieure étant isolée par un espace vide. La cavité contient une petite quantité d'hydrogène liquide très pur avec un peu de catalyseur. La pression de la vapeur est transmise au moyen d'un mince tube à faible conduction thermique, relié à un manomètre situé à l'extérieur de l'enceinte. On doit prendre des précautions pour éviter tout rayonnement direct le long de ce tube jusque dans la cavité et s'assurer qu'en chacun de ses points le tube est à une température supérieure à celle de la surface de l'hydrogène liquide dans la cavité. On fait des comparaisons entre le thermomètre à tension de vapeur ainsi constitué et les thermomètres à résistance de platine introduits dans des trous de diamètre juste suffisant dans le bloc de métal entourant la cavité.

On peut vérifier la validité des mesures en constatant que les valeurs obtenues sont indépendantes du rapport du volume de l'hydrogène liquide au volume de la vapeur dans la cavité.

Pour le domaine de 13,81 K à 23 K, l'équation suivante donne la température T_{68} en fonction de la tension de vapeur de l'hydrogène en équilibre, avec une exactitude de quelques millikelvins

$$(18) \quad \lg \frac{p}{p_0} = A + \frac{B}{T_{68}} + CT_{68} + DT_{68}^2$$

$$\begin{aligned} \text{où} \quad A &= 1,711\ 466 & B &= -44,010\ 46\ \text{K} \\ C &= 0,023\ 590\ 9\ \text{K}^{-1} & D &= -0,000\ 048\ 017\ \text{K}^{-2} \\ p_0 &= 101\ 325\ \text{N/m}^2 \end{aligned}$$

6. Point d'ébullition du néon

On peut réaliser le point d'ébullition du néon d'une manière semblable à celle qui a été décrite pour l'hydrogène. La composition isotopique normale du néon est de 0,002 6 mole de ^{21}Ne et 0,088 mole de ^{22}Ne pour 0,909 mole de ^{20}Ne .

Pour le domaine de 27 K à 27,2 K l'équation suivante donne la température T_{68} en fonction de la tension de vapeur du néon, avec une exactitude de $\pm 0,000\ 2\ \text{K}$

$$(19) \quad T_{68} = \left[27,102 + 3,314\ 4 \left(\frac{p}{p_0} - 1 \right) - 1,24 \left(\frac{p}{p_0} - 1 \right)^2 + 0,74 \left(\frac{p}{p_0} - 1 \right)^3 \right] \text{K}$$

7. Point triple et point d'ébullition de l'oxygène

On peut réaliser le point triple et le point d'ébullition de l'oxygène d'une manière semblable à celle qui a été décrite pour l'hydrogène. On doit veiller particulièrement à la pureté de l'oxygène employé dans le thermomètre à tension de vapeur. L'oxygène est suffisamment pur quand le point d'ébullition normal demeure constant pendant qu'on élimine successivement des portions de vapeur.

Pour le domaine de 90,1 K à 90,3 K, l'équation suivante donne la température T_{68} en fonction de la tension de vapeur de l'oxygène avec une exactitude de $\pm 0,000$ 1 K

$$(20) \quad T_{68} = \left[90,188 + 9,5648 \left(\frac{p}{p_0} - 1 \right) - 3,69 \left(\frac{p}{p_0} - 1 \right)^2 + 2,22 \left(\frac{p}{p_0} - 1 \right)^3 \right] \text{K}$$

8. Point d'ébullition de l'eau

On réalise généralement la température d'équilibre entre l'eau liquide et sa vapeur par la méthode dynamique, le thermomètre étant placé dans la vapeur saturante. Pour un étalonnage précis, il est préférable d'employer des systèmes fermés dans lesquels la chaudière et le manomètre sont reliés à un manostat rempli d'air ou de préférence d'hélium.

La chaudière doit être construite de façon à éviter toute contamination de l'eau. Le thermomètre doit être protégé du rayonnement émis par les corps qui sont à des températures différentes de la température du point d'ébullition. Si l'on a obtenu la température d'équilibre, la température observée (réduite à une pression constante) doit être indépendante du temps écoulé, des variations dans le débit de chaleur fourni au liquide, et de la profondeur d'immersion du thermomètre.

Une modification de la proportion de deutérium dans l'eau entraîne une modification du point d'ébullition de l'eau dans le même sens que pour le point triple, mais trois fois plus faible.

Pour le domaine de 99,9 °C à 100,1 °C, l'équation suivante donne la température t_{68} en fonction de la tension de vapeur de l'eau avec une exactitude de $\pm 0,000$ 1 K

$$(21) \quad t_{68} = \left[100 + 28,0216 \left(\frac{p}{p_0} - 1 \right) - 11,642 \left(\frac{p}{p_0} - 1 \right)^2 + 7,1 \left(\frac{p}{p_0} - 1 \right)^3 \right] \text{°C}$$

9. Points de congélation de l'étain et du zinc

On peut réaliser des températures très reproductibles en observant le palier de la courbe de la température en fonction du temps pendant la congélation lente de métaux très purs.

On peut opérer la fusion et la congélation de l'étain et du zinc dans un creuset de graphite artificiel très pur (99,999 % en masse), d'environ 5 cm de diamètre, muni d'un puits axial pour thermomètre. La profondeur d'immersion du thermomètre dans le métal doit être suffisante pour éliminer l'influence de la conduction thermique le long des conducteurs du thermomètre sur la température de l'élément sensible. Il est commode de placer le creuset et le lingot de métal sous atmosphère inerte dans un tube de pyrex ou de silice que l'on chauffe dans un four à bloc métallique.

Dans la détermination des points de congélation on procède de façon à être sûr que l'élément sensible du thermomètre se trouve en contact aussi étroit que possible et en équilibre thermique avec une surface de contact solide-liquide; peu après le début de la formation de cristaux (germination) il doit y avoir soit une enveloppe solide complète s'épaississant à partir de la paroi du creuset, soit un manchon solide complet se formant sur le puits du thermomètre.

La température d'équilibre entre le métal solide et liquide varie légèrement avec la pression. Les grandeurs de ces variations sont données au Tableau V, p. A 20.

Lorsqu'on le refroidit à partir de l'état liquide, l'étain de très grande pureté (99,999 9 % en masse) reste généralement à l'état surfondu jusqu'à une température inférieure de 20 K à 30 K à son point de congélation. La technique suivante s'est révélée efficace pour provoquer la germination sans refroidissement excessif du four. En partant d'une température supérieure de quelques kelvins au point de congélation, le four est refroidi lentement à environ 0,1 K par minute jusqu'à ce que le métal fondu atteigne la température du liquidus; le récipient, contenant le métal fondu et un thermomètre à résistance de contrôle, est alors retiré jusqu'à l'entrée du four ou même complètement hors du four. Dans l'un et l'autre cas, le métal se refroidit rapidement; lorsqu'on décèle l'augmentation rapide de température qui indique la germination générale, on remet rapidement le récipient contenant le métal dans le four que l'on continue à refroidir lentement. Pendant que la solidification se poursuit lentement, on obtient alors une courbe de refroidissement caractéristique d'un métal de très grande pureté, présentant un palier qui est reproductible pour un même échantillon de métal à $\pm 0,000 1$ K pour des durées qui dépendent de la vitesse de refroidissement du four.

Le zinc de très grande pureté (99,999 9 % en masse) est traité d'une manière quelque peu différente, car il ne donne pas de surfusion excessive. Le métal en fusion ayant atteint la température du liquidus, une mince couche de métal solide se forme autour du puits central lorsque, après avoir enlevé le thermomètre et l'avoir ramené à la température ambiante, on le remet en place, ou bien lorsqu'on introduit une tige en silice à la place du thermomètre pendant trente secondes environ avant de le replacer.

Un critère pour vérifier que la pureté d'un échantillon de zinc ou d'étain est satisfaisante est que son domaine de fusion n'est pas supérieur à 0,001 K.

10. *Points de congélation de l'argent et de l'or*

On peut réaliser les températures d'équilibre entre les phases solide et liquide de l'argent et de l'or dans des creusets fermés en graphite artificiel très pur, en matière céramique ou en silice vitreuse. Si l'on emploie du graphite, il est conseillé de mettre le creuset à l'abri de l'air pour éviter l'oxydation. L'argent fondu doit être protégé de façon à empêcher que l'oxygène ne s'y dissolve, ce qui aurait pour effet d'abaisser le point de congélation.

Le lingot de métal doit être chauffé à une température uniforme, supérieure de quelques kelvins au point de fusion du métal et ensuite refroidi lentement. Le thermocouple à étalonner, monté dans un tube de protection en matériau réfractaire approprié, avec des isolateurs réfractaires séparant les deux fils, est plongé dans le métal en fusion qu'on laisse alors se congeler. La profondeur d'immersion du thermocouple dans le métal doit être suffisante pour éliminer l'influence de la conduction thermique le long des fils du thermocouple.

On peut vérifier que la température d'équilibre est obtenue d'après les critères suivants: la force électromotrice du thermocouple doit être indépendante des petites variations de la profondeur d'immersion dans le métal au cours des congélations successives, et doit demeurer constante pendant au moins cinq minutes au cours d'une même congélation.

Un corps noir au point de congélation de l'or est nécessaire pour établir la température de référence des mesures par pyrométrie optique. Pour réaliser un tel corps noir, le creuset contenant l'or doit être agencé de façon qu'il constitue une enceinte à température uniforme plongée dans l'or. On réalise plus facilement une enceinte corps noir si le matériau employé pour sa construction possède déjà une forte émissivité; aussi le graphite est-il tout à fait approprié à cet usage.

11. *Points de référence secondaires*

En plus des points fixes de définition de l'E.I.P.T.-68 donnés au Tableau I, p. A 17, on dispose d'autres points de référence. On trouve au Tableau VI, p. A 21, quelques-uns de ces points avec leur température dans l'E.I.P.T.-68. Sauf lorsqu'il s'agit des points triples et des équations température-tension de vapeur, chaque température est celle d'un système en équilibre sous la pression de 1 atmosphère normale.

ANNEXE I

Historique de la mise au point des Échelles Internationales de Température; différences entre l'E.I.P.T.-68 et l'E.I.P.T.-48

En 1927 on a adopté l'Échelle Internationale de Température pour surmonter les difficultés pratiques de la réalisation directe des températures thermodynamiques par la thermométrie à gaz et pour unifier les échelles nationales de température existantes. C'est la Septième Conférence Générale des Poids et Mesures qui a introduit cette Échelle dans le but de fournir une échelle pratique de température, reproductible avec facilité et avec précision et aussi proche que possible de la température thermodynamique.

L'Échelle Internationale de Température a été révisée en 1948. Les procédés expérimentaux de réalisation demeuraient à peu près sans changements, mais on apportait à la définition de l'Échelle deux modifications entraînant des changements appréciables dans les valeurs numériques assignées aux températures mesurées. Le changement de la valeur de la température du point de congélation de l'argent de 960,5 °C à 960,8 °C modifiait les températures mesurées avec le thermocouple étalon (domaine de 630 °C à 1 063 °C); la différence maximale était d'environ 0,4 K vers 800 °C. L'adoption de la valeur 0,014 38 mètre·kelvin au lieu de 0,014 32 mètre·kelvin pour la constante de rayonnement c_2 modifiait toutes les températures supérieures au point de congélation de l'or, tandis que l'emploi de la formule du rayonnement de Planck, à la place de la formule de Wien, affectait les températures très élevées. Les températures supérieures au point de congélation de l'or étaient diminuées, par exemple de 2,2 K à 1 500 °C et de 6 K à 2 000 °C. A l'occasion de cette même révision et afin d'assurer l'uniformité internationale de la nomenclature, la Neuvième Conférence Générale des Poids et Mesures décida d'abandonner les mots « centigrade » et « centésimal » en faveur du nom « Celsius ». Ainsi le symbole °C prit désormais la signification « degré Celsius ».

La Onzième Conférence Générale des Poids et Mesures adopta une version modifiée de l'Échelle de 1948 sous le nouveau titre « Échelle Internationale Pratique de Température de 1948 (édition amendée de 1960) », les valeurs numériques des températures restant les mêmes qu'en 1948. La nouvelle édition comportait la nouvelle définition du kelvin donnée en fixant la température thermodynamique du point triple de l'eau à 273,16 K (Dixième Conférence Générale des Poids et Mesures 1954, Résolution 3). On a également reconnu à cette époque que l'E.I.P.T. ne représentait plus la température thermodynamique aussi étroitement que possible et le texte comportait un chapitre sur les différences entre elles. L'E.I.P.T.-68 a été conçue pour ramener ces différences dans les limites de l'exactitude avec laquelle on connaît les températures thermodynamiques (voir Tableau VII, p. A 23) et pour étendre l'Échelle vers les basses températures.

L'E.I.P.T.-68 diffère de l'E.I.P.T.-48 par les points suivants. La limite inférieure de l'Échelle est maintenant 13,81 K au lieu de 90,18 K. Les valeurs assignées aux points fixes de définition sont modifiées là où c'est nécessaire pour qu'elles coïncident aussi bien que possible avec les températures thermodynamiques, les seuls points demeurant inchangés étant le point triple de l'eau, qui est fixé de façon permanente par définition, et le point d'ébullition de l'eau. Les instruments d'interpolation sont les mêmes qu'auparavant, mais le thermomètre étalon à résistance de platine doit maintenant avoir une résistance réduite $W(100\text{ }^{\circ}\text{C})$ d'au moins 1,392 5 au lieu de 1,392 0. Dans le domaine de température compris entre 90,188 K et 273,15 K on ne se sert plus pour l'interpolation de l'équation de Callendar-Van Dusen; à sa place, on emploie la fonction de référence $W_{\text{CCT-68}}(T_{68})$. Au-dessus de 0 $^{\circ}\text{C}$, l'équation de Callendar est modifiée de telle sorte que les valeurs interpolées des températures soient plus étroitement conformes aux valeurs de la température thermodynamique. Enfin, on a introduit la valeur la plus récente de c_2 , soit 0,014 388 mètre-kelvin, dans l'équation de Planck pour déterminer les températures supérieures au point de congélation de l'or. Les conséquences de tous ces changements sont résumées au Tableau VIII, p. A 24, qui donne les différences entre les valeurs des températures dans l'E.I.P.T.-68 et dans l'E.I.P.T.-48.

Dans le domaine de 13,81 K à 90,188 K, l'E.I.P.T.-68 est fondée sur la moyenne de quatre « échelles nationales » et sur les « meilleures » températures choisies pour les points fixes de définition. Ces échelles nationales sont chacune définies au moyen de thermomètres à résistance de platine étalonnés d'après le thermomètre à gaz et sont très bien reproductibles.

Les différences entre l'E.I.P.T.-68 et les échelles nationales sont publiées dans *Metrologia*, 5, n° 2, 1969. Cela permet l'emploi de ces échelles nationales et de ces différences pour donner une approximation étroite de l'E.I.P.T.-68.

Dans le texte de la présente définition de l'E.I.P.T.-68, on s'est conformé à la décision de la Treizième Conférence Générale des Poids et Mesures d'indiquer l'unité de température thermodynamique par le nom « kelvin », symbole K, et d'indiquer un intervalle de température par la même unité et le même symbole ou par « degré Celsius » ou « $^{\circ}\text{C}$ ».

ANNEXE II

Échelles pratiques de température à employer dans le domaine compris entre 0,2 K et 5,2 K

Les températures peuvent être déduites des tensions de vapeur mesurées de ^4He et ^3He . Les limites supérieures d'emploi correspondent aux points critiques de ces gaz (5,2 K pour ^4He et 3,3 K pour ^3He) et la limite inférieure par le fait que la tension de vapeur devient trop basse pour les mesures pratiques. L'« Échelle ^4He 1958 » et l'« Échelle ^3He 1962 » sont les échelles recommandées (?) dans lesquelles les températures sont respectivement indiquées par T_{58} et T_{62} .

L'« Échelle ^4He 1958 », recommandée en 1958 par le Comité International des Poids et Mesures, est définie par une table des tensions de vapeur de ^4He en

(?) Des mesures thermodynamiques récentes par une méthode acoustique donnent des températures supérieures à celles des échelles à tension de vapeur de l'hélium; au point d'ébullition de ^4He la différence est environ 0,008 K.

fonction de la température (*Comité Consultatif de Thermométrie*, 5^e session, 1958, p. T 192 et *Procès-Verbaux C.I.P.M.*, 26-A, 1958, p. T 192) ⁽⁸⁾.

L'« Échelle ³He 1962 », recommandée en 1962 par le Comité International des Poids et Mesures, est définie par une équation donnant la tension de vapeur de ³He en fonction de la température (*Comité Consultatif de Thermométrie*, 6^e session, 1962, p. 184) ⁽⁹⁾.

Dans le domaine de température compris entre 0,9 K et la température critique de ³He, on pense que les températures T_{68} et T_{62} sont en accord à mieux que 0,3 mK.

⁽⁸⁾ On trouvera une version détaillée de cette table ainsi que des renseignements complémentaires dans *Journal of Research, National Bureau of Standards* (Washington), 64A, 1960, p. 1.

⁽⁹⁾ On trouvera une table des valeurs ainsi que des renseignements sur la mesure des tensions de vapeur dans *Journal of Research, National Bureau of Standards* (Washington), 68A, 1964, p. 547, 559, 567 et 579.

TABLEAU I

Points fixes de définition de l'E.I.P.T.-68 (1)

| État d'équilibre | Valeur assignée de la Température Internationale Pratique | |
|---|--|--------------|
| | T_{68} | t_{68} |
| Équilibre entre les phases solide, liquide et vapeur de l'hydrogène en équilibre (point triple de l'hydrogène en équilibre) | 13,81 K | — 259,34 °C |
| Équilibre entre les phases liquide et vapeur de l'hydrogène en équilibre à une pression de 33 330,6 N/m ² (25/76 atmosphère normale) | 17,042 K | — 256,108 °C |
| Équilibre entre les phases liquide et vapeur de l'hydrogène en équilibre (point d'ébullition de l'hydrogène en équilibre) | 20,28 K | — 252,87 °C |
| Équilibre entre les phases liquide et vapeur du néon (point d'ébullition du néon) | 27,102 K | — 246,048 °C |
| Équilibre entre les phases solide, liquide et vapeur de l'oxygène (point triple de l'oxygène) | 54,361 K | — 218,789 °C |
| Équilibre entre les phases liquide et vapeur de l'oxygène (point d'ébullition de l'oxygène) | 90,188 K | — 182,962 °C |
| Équilibre entre les phases solide, liquide et vapeur de l'eau (point triple de l'eau) (2) | 273,16 K | 0,01 °C |
| Équilibre entre les phases liquide et vapeur de l'eau (point d'ébullition de l'eau) (2) (3) | 373,15 K | 100 °C |
| Équilibre entre les phases solide et liquide du zinc (point de congélation du zinc) | 692,73 K | 419,58 °C |
| Équilibre entre les phases solide et liquide de l'argent (point de congélation de l'argent) | 1 235,08 K | 961,93 °C |
| Équilibre entre les phases solide et liquide de l'or (point de congélation de l'or) | 1 337,58 K | 1 064,43 °C |

(1) Sauf pour les points triples et pour un point de l'hydrogène en équilibre (17,042 K) les valeurs assignées des températures le sont pour des états d'équilibre sous la pression $p_0 = 1$ atmosphère normale (101 325 N/m²).

Dans la réalisation de ces points fixes, de petits écarts avec les températures assignées risquent de se rencontrer; ils sont dus à une profondeur différente d'immersion des thermomètres ou au fait que la pression prescrite n'a pu être exactement obtenue. Si l'on tient compte de ces petites différences de température, la précision de la réalisation de l'Échelle ne sera pas altérée. On trouvera les ordres de grandeur de ces différences à la section III.

(2) A la place du point d'ébullition de l'eau on peut utiliser l'état d'équilibre entre les phases solide et liquide de l'étain (point de congélation de l'étain) dont la valeur assignée est $t_{68} = 231,968$ 1 °C.

(3) L'eau utilisée doit avoir la composition isotopique de l'eau des océans, voir section III. 4.

TABLEAU II

Fonction de référence $W_{\text{CCT-68}}(T_{68})$ pour les thermomètres à résistance de platine dans le domaine compris entre 13,81 K et 273,15 K ⁽¹⁾

$$(22) \quad T_{68} = \left[A_0 + \sum_{i=1}^{20} A_i [\ln W_{\text{CCT-68}}(T_{68})]^i \right] \text{K}$$

Coefficients A_i

| i | A_i | i | A_i |
|----|---------------------------------------|----|--|
| 0 | 0,273 15 | 11 | 0,767 976 358 170 845 8 $\times 10^{-3}$ |
| 1 | 0,250 846 209 678 803 3 $\times 10^3$ | 12 | 0,213 689 459 382 850 0 $\times 10^{-3}$ |
| 2 | 0,135 099 869 964 999 7 $\times 10^3$ | 13 | 0,459 843 348 928 069 3 |
| 3 | 0,527 856 759 008 517 2 $\times 10^3$ | 14 | 0,763 614 629 231 648 0 $\times 10^{-1}$ |
| 4 | 0,276 768 548 854 105 2 $\times 10^2$ | 15 | 0,969 328 620 373 121 3 $\times 10^{-2}$ |
| 5 | 0,391 053 205 376 683 7 $\times 10^2$ | 16 | 0,923 069 154 007 007 5 $\times 10^{-3}$ |
| 6 | 0,655 613 230 578 069 3 $\times 10^2$ | 17 | 0,638 116 590 952 653 8 $\times 10^{-4}$ |
| 7 | 0,808 035 868 559 866 7 $\times 10^2$ | 18 | 0,302 293 237 874 619 2 $\times 10^{-5}$ |
| 8 | 0,705 242 118 234 052 0 $\times 10^2$ | 19 | 0,877 551 391 303 760 2 $\times 10^{-7}$ |
| 9 | 0,447 847 589 638 965 7 $\times 10^2$ | 20 | 0,117 702 613 125 477 4 $\times 10^{-8}$ |
| 10 | 0,212 525 653 556 057 8 $\times 10^2$ | | |

La fonction de référence $W_{\text{CCT-68}}(T_{68})$ est continue à $T_{68} = 273,15$ K dans ses dérivées première et seconde avec la fonction $W(t_{68})$ donnée par les équations (9) et (10) pour

$$\alpha = 3,925\,966\,8 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \quad \text{et} \quad \delta = 1,496\,334 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

⁽¹⁾ On peut se procurer auprès du Bureau International des Poids et Mesures une table de cette fonction de référence, suffisamment détaillée pour permettre des interpolations avec une précision de 0,000 1 K. On trouvera au Tableau III un extrait de cette table.

TABLEAU III

Valeurs de $W_{\text{CCR-68}}(T_{68})$, selon l'équation donnée au Tableau II,
pour des valeurs entières de T_{68}

| T_{68} | $W_{\text{CCR-68}}(T_{68})$ | T_{68} | $W_{\text{CCR-68}}(T_{68})$ | T_{68} | $W_{\text{CCR-68}}(T_{68})$ | T_{68} | $W_{\text{CCR-68}}(T_{68})$ |
|----------|-----------------------------|----------|-----------------------------|----------|-----------------------------|----------|-----------------------------|
| 13 | 0,001 230 61 | | | | | | |
| 14 | 0,001 459 73 | | | | | | |
| 15 | 0,001 745 41 | 80 | 0,199 582 12 | 145 | 0,477 696 82 | 210 | 0,745 730 26 |
| 16 | 0,002 094 74 | 81 | 0,203 917 14 | 146 | 0,481 884 59 | 211 | 0,749 798 41 |
| 17 | 0,002 515 12 | 82 | 0,208 254 45 | 147 | 0,486 069 85 | 212 | 0,753 865 18 |
| 18 | 0,003 014 28 | 83 | 0,212 593 44 | 148 | 0,490 252 74 | 213 | 0,757 930 43 |
| 19 | 0,003 599 62 | 84 | 0,216 933 88 | 149 | 0,494 433 19 | 214 | 0,761 994 30 |
| 20 | 0,004 277 80 | 85 | 0,221 275 23 | 150 | 0,498 611 35 | 215 | 0,766 056 72 |
| 21 | 0,005 054 95 | 86 | 0,225 617 12 | 151 | 0,502 787 07 | 216 | 0,770 117 70 |
| 22 | 0,005 936 68 | 87 | 0,229 959 16 | 152 | 0,506 960 58 | 217 | 0,774 177 30 |
| 23 | 0,006 928 04 | 88 | 0,234 301 05 | 153 | 0,511 131 72 | 218 | 0,778 235 45 |
| 24 | 0,008 033 16 | 89 | 0,238 642 48 | 154 | 0,515 300 65 | 219 | 0,782 292 23 |
| 25 | 0,009 255 04 | 90 | 0,242 983 15 | 155 | 0,519 467 37 | 220 | 0,786 347 56 |
| 26 | 0,010 595 85 | 91 | 0,247 322 90 | 156 | 0,523 631 80 | 221 | 0,790 401 51 |
| 27 | 0,012 056 90 | 92 | 0,251 661 28 | 157 | 0,527 794 09 | 222 | 0,794 454 09 |
| 28 | 0,013 639 01 | 93 | 0,255 998 36 | 158 | 0,531 954 17 | 223 | 0,798 505 23 |
| 29 | 0,015 342 61 | 94 | 0,260 333 69 | 159 | 0,536 112 11 | 224 | 0,802 555 06 |
| 30 | 0,017 167 68 | 95 | 0,264 667 18 | 160 | 0,540 267 92 | 225 | 0,806 603 52 |
| 31 | 0,019 113 63 | 96 | 0,268 998 70 | 161 | 0,544 421 67 | 226 | 0,810 650 54 |
| 32 | 0,021 179 44 | 97 | 0,273 328 07 | 162 | 0,548 573 36 | 227 | 0,814 696 25 |
| 33 | 0,023 363 43 | 98 | 0,277 655 16 | 163 | 0,552 722 91 | 228 | 0,818 740 59 |
| 34 | 0,025 663 35 | 99 | 0,281 979 88 | 164 | 0,556 870 48 | 229 | 0,822 783 64 |
| 35 | 0,028 076 45 | 100 | 0,286 302 01 | 165 | 0,561 016 06 | 230 | 0,826 825 31 |
| 36 | 0,030 599 53 | 101 | 0,290 621 54 | 166 | 0,565 159 58 | 231 | 0,830 865 61 |
| 37 | 0,033 229 16 | 102 | 0,294 938 41 | 167 | 0,569 301 12 | 232 | 0,834 904 61 |
| 38 | 0,035 961 55 | 103 | 0,299 252 45 | 168 | 0,573 440 76 | 233 | 0,838 942 24 |
| 39 | 0,038 793 05 | 104 | 0,303 563 59 | 169 | 0,577 578 48 | 234 | 0,842 978 57 |
| 40 | 0,041 719 68 | 105 | 0,307 871 83 | 170 | 0,581 714 23 | 235 | 0,847 013 53 |
| 41 | 0,044 737 60 | 106 | 0,312 177 10 | 171 | 0,585 848 06 | 236 | 0,851 047 26 |
| 42 | 0,047 842 92 | 107 | 0,316 479 39 | 172 | 0,589 979 99 | 237 | 0,855 079 63 |
| 43 | 0,051 031 78 | 108 | 0,320 778 56 | 173 | 0,594 110 08 | 238 | 0,859 110 69 |
| 44 | 0,054 300 36 | 109 | 0,325 074 67 | 174 | 0,598 238 35 | 239 | 0,863 140 46 |
| 45 | 0,057 644 86 | 110 | 0,329 367 65 | 175 | 0,602 364 78 | 240 | 0,867 168 94 |
| 46 | 0,061 061 61 | 111 | 0,333 657 51 | 176 | 0,606 489 31 | 241 | 0,871 196 11 |
| 47 | 0,064 546 79 | 112 | 0,337 944 16 | 177 | 0,610 612 08 | 242 | 0,875 221 99 |
| 48 | 0,068 096 90 | 113 | 0,342 227 68 | 178 | 0,614 733 10 | 243 | 0,879 246 57 |
| 49 | 0,071 708 35 | 114 | 0,346 508 00 | 179 | 0,618 852 29 | 244 | 0,883 269 94 |
| 50 | 0,075 377 56 | 115 | 0,350 785 19 | 180 | 0,622 969 72 | 245 | 0,887 292 00 |
| 51 | 0,079 101 23 | 116 | 0,355 059 10 | 181 | 0,627 085 40 | 246 | 0,891 312 69 |
| 52 | 0,082 875 95 | 117 | 0,359 329 89 | 182 | 0,631 199 39 | 247 | 0,895 332 24 |
| 53 | 0,086 698 59 | 118 | 0,363 597 54 | 183 | 0,635 311 64 | 248 | 0,899 350 49 |
| 54 | 0,090 566 00 | 119 | 0,367 861 99 | 184 | 0,639 422 13 | 249 | 0,903 367 44 |
| 55 | 0,094 475 15 | 120 | 0,372 123 31 | 185 | 0,643 530 94 | 250 | 0,907 383 09 |
| 56 | 0,098 423 36 | 121 | 0,376 381 51 | 186 | 0,647 638 07 | 251 | 0,911 397 53 |
| 57 | 0,102 407 74 | 122 | 0,380 636 57 | 187 | 0,651 743 52 | 252 | 0,915 410 74 |
| 58 | 0,106 425 83 | 123 | 0,384 888 51 | 188 | 0,655 847 30 | 253 | 0,919 422 74 |
| 59 | 0,110 475 06 | 124 | 0,389 137 32 | 189 | 0,659 949 47 | 254 | 0,923 433 43 |
| 60 | 0,114 553 12 | 125 | 0,393 383 16 | 190 | 0,664 049 96 | 255 | 0,927 442 83 |
| 61 | 0,118 657 89 | 126 | 0,397 625 94 | 191 | 0,668 148 86 | 256 | 0,931 451 01 |
| 62 | 0,122 787 22 | 127 | 0,401 865 67 | 192 | 0,672 246 07 | 257 | 0,935 458 05 |
| 63 | 0,126 939 14 | 128 | 0,406 102 42 | 193 | 0,676 341 76 | 258 | 0,939 463 71 |
| 64 | 0,131 111 89 | 129 | 0,410 336 28 | 194 | 0,680 435 77 | 259 | 0,943 468 22 |
| 65 | 0,135 303 63 | 130 | 0,414 567 09 | 195 | 0,684 528 25 | 260 | 0,947 471 52 |
| 66 | 0,139 512 84 | 131 | 0,418 795 07 | 196 | 0,688 619 13 | 261 | 0,951 473 52 |
| 67 | 0,143 738 00 | 132 | 0,423 020 15 | 197 | 0,692 708 41 | 262 | 0,955 474 30 |
| 68 | 0,147 977 73 | 133 | 0,427 242 33 | 198 | 0,696 796 17 | 263 | 0,959 473 85 |
| 69 | 0,152 230 58 | 134 | 0,431 461 69 | 199 | 0,700 882 32 | 264 | 0,963 472 19 |
| 70 | 0,156 495 41 | 135 | 0,435 678 31 | 200 | 0,704 966 94 | 265 | 0,967 469 31 |
| 71 | 0,160 771 08 | 136 | 0,439 892 10 | 201 | 0,709 050 04 | 266 | 0,971 465 13 |
| 72 | 0,165 056 43 | 137 | 0,444 103 22 | 202 | 0,713 131 61 | 267 | 0,975 459 80 |
| 73 | 0,169 350 49 | 138 | 0,448 311 59 | 203 | 0,717 211 74 | 268 | 0,979 453 25 |
| 74 | 0,173 652 40 | 139 | 0,452 517 30 | 204 | 0,721 290 26 | 269 | 0,983 445 41 |
| 75 | 0,177 961 17 | 140 | 0,456 720 33 | 205 | 0,725 367 33 | 270 | 0,987 436 42 |
| 76 | 0,182 276 05 | 141 | 0,460 920 77 | 206 | 0,729 442 88 | 271 | 0,991 426 14 |
| 77 | 0,186 596 28 | 142 | 0,465 118 61 | 207 | 0,733 516 90 | 272 | 0,995 414 71 |
| 78 | 0,190 921 07 | 143 | 0,469 313 87 | 208 | 0,737 589 47 | 273 | 0,999 401 99 |
| 79 | 0,195 249 92 | 144 | 0,473 506 60 | 209 | 0,741 660 59 | | |
| 80 | 0,199 582 12 | 145 | 0,477 696 82 | 210 | 0,745 730 26 | | |

TABLEAU IV

Valeurs de $W_{\text{GCT-68}}(T_{68})$, selon les données portées au Tableau II, aux températures des points fixes

| Point fixe | T_{68} | t_{68} | $W_{\text{GCT-68}}$ |
|--|-------------|--------------|---------------------|
| Point triple de l'hydrogène en équilibre | 13,81 K | — 259,34 °C | 0,001 412 06 |
| Point 17,042 K de l'hydrogène en équilibre | 17,042 K | — 256,108 °C | 0,002 534 44 |
| Point d'ébullition de l'hydrogène en équilibre | 20,28 K | — 252,87 °C | 0,004 485 17 |
| Point d'ébullition du néon | 27,102 K | — 246,048 °C | 0,012 212 72 |
| Point triple de l'oxygène | 54,361 K | — 218,789 °C | 0,091 972 52 |
| Point d'ébullition de l'oxygène | 90,188 K | — 182,962 °C | 0,243 799 09 |
| | 273,15 K | 0 °C | 1 |
| Point d'ébullition de l'eau | 373,15 K | 100 °C | 1,392 596 68 |
| Point de congélation de l'étain | 505,118 1 K | 231,968 1 °C | 1,892 570 86 |

TABLEAU V

Influence de la pression sur la température de congélation des métaux

| Métal | Point de congélation sous 1 atmosphère normale | Coefficient de pression | |
|-----------------|--|-------------------------|----------------------------------|
| | | kelvin par atmosphère | kelvin par centimètre de liquide |
| Mercure | — 38,862 °C | + 0,005 4 | + 0,000 071 |
| Indium | 156,634 °C | + 0,004 9 | + 0,000 033 |
| Étain | 231,968 1 °C | + 0,003 3 | + 0,000 022 |
| Bismuth | 271,442 °C | — 0,003 5 | — 0,000 034 |
| Cadmium | 321,108 °C | + 0,006 2 | + 0,000 048 |
| Plomb | 327,502 °C | + 0,008 0 | + 0,000 082 |
| Zinc | 419,58 °C | + 0,004 3 | + 0,000 027 |
| Antimoine | 630,74 °C | + 0,000 85 | + 0,000 005 |

TABLEAU VI
Points de référence secondaires

| État d'équilibre | Température Internationale Pratique | |
|---|--|--------------|
| | T_{68} | t_{68} |
| Équilibre entre les phases solide, liquide et vapeur de l'hydrogène normal (point triple de l'hydrogène normal) | 13,956 K | — 259,194 °C |
| Équilibre entre les phases liquide et vapeur de l'hydrogène normal (point d'ébullition de l'hydrogène normal) | 20,397 K | — 252,753 °C |

$$(23) \quad \lg \frac{P}{P_0} = A + \frac{B}{T_{68}} + CT_{68} + DT_{68}^2$$

$$A = 1,734\ 791 \quad B = -44,623\ 68\ \text{K}$$

$$C = 0,023\ 186\ 9\ \text{K}^{-1} \quad D = -0,000\ 048\ 017\ \text{K}^{-2}$$

pour le domaine de température compris entre 13,956 K et 30 K.

| | | |
|---|----------|--------------|
| Équilibre entre les phases solide, liquide et vapeur du néon (point triple du néon) | 24,555 K | — 248,595 °C |
|---|----------|--------------|

Équilibre entre les phases liquide et vapeur du néon

$$(24) \quad \lg \frac{P}{P_0} = A + \frac{B}{T_{68}} + CT_{68} + DT_{68}^2$$

$$A = 4,611\ 52 \quad B = -106,385\ 1\ \text{K}$$

$$C = -0,036\ 833\ 1\ \text{K}^{-1} \quad D = 4,248\ 92 \times 10^{-4}\ \text{K}^{-2}$$

pour le domaine de température compris entre 24,555 K et 40 K.

| | | |
|---|----------|--------------|
| Équilibre entre les phases solide, liquide et vapeur de l'azote (point triple de l'azote) | 63,148 K | — 210,002 °C |
|---|----------|--------------|

| | | |
|---|----------|--------------|
| Équilibre entre les phases liquide et vapeur de l'azote (point d'ébullition de l'azote) | 77,348 K | — 195,802 °C |
|---|----------|--------------|

$$(25) \quad \lg \frac{P}{P_0} = A + \frac{B}{T_{68}} + C \lg \frac{T_{68}}{T_0} + DT_{68} + ET_{68}^2$$

$$A = 5,893\ 139 \quad B = -404,131\ 05\ \text{K}$$

$$C = -2,374\ 9 \quad D = -0,014\ 250\ 5\ \text{K}^{-1}$$

$$E = 72,534\ 2 \times 10^{-6}\ \text{K}^{-2}$$

pour le domaine de température compris entre 63,148 K et 84 K.

Équilibre entre les phases liquide et vapeur de l'oxygène

$$(26) \quad \lg \frac{P}{P_0} = A + \frac{B}{T_{68}} + C \lg \frac{T_{68}}{T_0} + DT_{68} + ET_{68}^2$$

$$A = 5,961\ 546 \quad B = -467,455\ 76\ \text{K}$$

$$C = -1,664\ 512 \quad D = -0,013\ 213\ 01\ \text{K}^{-1}$$

$$E = 50,804\ 1 \times 10^{-6}\ \text{K}^{-2}$$

pour le domaine de température compris entre 54,361 K et 94 K.

| | | |
|--|-----------|-------------|
| Équilibre entre les phases solide et vapeur de l'anhydride carbonique (point de sublimation de l'anhydride carbonique) | 194,674 K | — 78,476 °C |
|--|-----------|-------------|

$$(27) \quad T_{68} = \left[194,674 + 12,264 \left(\frac{P}{P_0} - 1 \right) - 9,15 \left(\frac{P}{P_0} - 1 \right)^2 \right] \text{K}$$

pour le domaine de température compris entre 194 K et

TABLEAU VI (suite)

| État d'équilibre | Température Internationale Pratique | |
|---|-------------------------------------|-------------|
| | T_{68} | t_{68} |
| Équilibre entre les phases solide et liquide du mercure (point de congélation du mercure) ⁽¹⁾ | 234,288 K | — 38,862 °C |
| Équilibre entre la glace et l'eau saturée d'air (point de congélation de l'eau) | 273,15 K | 0 °C |
| Équilibre entre les phases solide, liquide et vapeur du phénoxybenzène (oxyde de diphenyle) (point triple du phénoxybenzène) | 300,02 K | 26,87 °C |
| Équilibre entre les phases solide, liquide et vapeur de l'acide benzoïque (point triple de l'acide benzoïque) | 395,52 K | 122,37 °C |
| Équilibre entre les phases solide et liquide de l'indium (point de congélation de l'indium) ⁽¹⁾ | 429,784 K | 156,634 °C |
| Équilibre entre les phases solide et liquide du bismuth (point de congélation du bismuth) ⁽¹⁾ | 544,592 K | 271,442 °C |
| Équilibre entre les phases solide et liquide du cadmium (point de congélation du cadmium) ⁽¹⁾ | 594,258 K | 321,108 °C |
| Équilibre entre les phases solide et liquide du plomb (point de congélation du plomb) ⁽¹⁾ | 600,652 K | 327,502 °C |
| Équilibre entre les phases liquide et vapeur du mercure (point d'ébullition du mercure) | 629,81 K | 356,66 °C |
| (28) $t_{68} = \left[356,66 + 55,552 \left(\frac{p}{p_0} - 1 \right) - 23,03 \left(\frac{p}{p_0} - 1 \right)^2 + 14,0 \left(\frac{p}{p_0} - 1 \right)^3 \right]$ °C | | |
| pour $p = 90 \times 10^3 \text{ N/m}^2$ à $104 \times 10^3 \text{ N/m}^2$. | | |
| Équilibre entre les phases liquide et vapeur du soufre (point d'ébullition du soufre) | 717,824 K | 444,674 °C |
| (29) $t_{68} = \left[444,674 + 69,010 \left(\frac{p}{p_0} - 1 \right) - 27,48 \left(\frac{p}{p_0} - 1 \right)^2 + 19,14 \left(\frac{p}{p_0} - 1 \right)^3 \right]$ °C | | |
| pour $p = 90 \times 10^3 \text{ N/m}^2$ à $104 \times 10^3 \text{ N/m}^2$. | | |
| Équilibre entre les phases solide et liquide de l'eutectique cuivre-aluminium | 821,38 K | 548,23 °C |
| Équilibre entre les phases solide et liquide de l'antimoine (point de congélation de l'antimoine) ⁽¹⁾ | 903,89 K | 630,74 °C |
| Équilibre entre les phases solide et liquide de l'aluminium (point de congélation de l'aluminium) | 933,52 K | 660,37 °C |
| Équilibre entre les phases solide et liquide du cuivre (point de congélation du cuivre) | 1 357,6 K | 1 084,5 °C |
| Équilibre entre les phases solide et liquide du nickel (point de congélation du nickel) | 1 728 K | 1 455 °C |
| Équilibre entre les phases solide et liquide du cobalt (point de congélation du cobalt) | 1 767 K | 1 494 °C |
| Équilibre entre les phases solide et liquide du palladium (point de congélation du palladium) | 1 827 K | 1 554 °C |

⁽¹⁾ Voir Tableau V pour l'influence des variations de pression sur ces points de congélation.

TABLEAU VI (suite)

| État d'équilibre | Température Internationale Pratique | |
|--|-------------------------------------|----------|
| | T_{68} | t_{68} |
| Équilibre entre les phases solide et liquide du platine (point de congélation du platine)..... | 2 045 K | 1 772 °C |
| Équilibre entre les phases solide et liquide du rhodium (point de congélation du rhodium) | 2 236 K | 1 963 °C |
| Équilibre entre les phases solide et liquide de l'iridium (point de congélation de l'iridium) | 2 720 K | 2 447 °C |
| Équilibre entre les phases solide et liquide du tungstène (température de fusion du tungstène) | 3 660 K | 3 387 °C |

TABLEAU VII

Incertitudes estimées sur les valeurs assignées aux points fixes de définition par rapport à leur température thermodynamique

| Point fixe de définition | Valeur assignée | | Incertitude estimée |
|--|-----------------|----|----------------------|
| Point triple de l'hydrogène en équilibre | 13,81 | K | 0,01 K |
| Point 17,042 K de l'hydrogène en équilibre..... | 17,042 | K | 0,01 K |
| Point d'ébullition de l'hydrogène en équilibre | 20,28 | K | 0,01 K |
| Point d'ébullition du néon | 27,102 | K | 0,01 K |
| Point triple de l'oxygène | 54,361 | K | 0,01 K |
| Point d'ébullition de l'oxygène | 90,188 | K | 0,01 K |
| Point triple de l'eau | 273,16 | K | exact par définition |
| Point d'ébullition de l'eau | 100 | °C | 0,005 K |
| Point de congélation de l'étain | 231,968 1 | °C | 0,015 K |
| Point de congélation du zinc | 419,58 | °C | 0,03 K |
| Point de congélation de l'argent | 961,93 | °C | 0,2 K |
| Point de congélation de l'or | 1 064,43 | °C | 0,2 K |

TABLEAU VIII

Différences approximatives ($t_{88} - t_{48}$), en kelvins, entre les valeurs de température données par l'E.I.P.T. de 1968 et l'E.I.P.T. de 1948

| t_{88} °C | 0 | -10 | -20 | -30 | -40 | -50 | -60 | -70 | -80 | -90 | -100 |
|-------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| + 0,022 | + 0,013 | + 0,003 | - 0,006 | - 0,013 | - 0,013 | - 0,013 | - 0,005 | + 0,007 | + 0,012 | | |
| 0,000 | + 0,006 | + 0,012 | + 0,018 | + 0,024 | + 0,029 | + 0,032 | + 0,034 | + 0,034 | + 0,033 | + 0,029 | + 0,022 |
| t_{88} °C | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 |
| 0,000 | - 0,004 | - 0,007 | - 0,009 | - 0,010 | - 0,010 | - 0,010 | - 0,010 | - 0,008 | - 0,006 | - 0,003 | 0,000 |
| 0,000 | + 0,004 | + 0,007 | + 0,012 | + 0,016 | + 0,020 | + 0,025 | + 0,025 | + 0,029 | + 0,034 | + 0,038 | + 0,043 |
| 0,043 | 0,047 | 0,051 | 0,054 | 0,058 | 0,061 | 0,064 | 0,064 | 0,067 | 0,069 | 0,071 | 0,073 |
| 0,073 | 0,074 | 0,075 | 0,076 | 0,077 | 0,077 | 0,077 | 0,077 | 0,077 | 0,077 | 0,076 | 0,076 |
| 0,076 | 0,075 | 0,075 | 0,075 | 0,074 | 0,074 | 0,074 | 0,074 | 0,075 | 0,076 | 0,077 | 0,079 |
| 0,079 | 0,082 | 0,085 | 0,089 | 0,094 | 0,100 | 0,108 | 0,108 | 0,116 | 0,126 | 0,137 | 0,150 |
| 0,150 | 0,165 | 0,182 | 0,200 | 0,23 | 0,25 | 0,28 | 0,28 | 0,31 | 0,34 | 0,36 | 0,39 |
| 0,39 | 0,42 | 0,45 | 0,47 | 0,50 | 0,53 | 0,56 | 0,56 | 0,58 | 0,61 | 0,64 | 0,67 |
| 0,67 | 0,70 | 0,72 | 0,75 | 0,78 | 0,81 | 0,84 | 0,84 | 0,87 | 0,89 | 0,92 | 0,95 |
| 0,95 | 0,98 | 1,01 | 1,04 | 1,07 | 1,10 | 1,12 | 1,12 | 1,15 | 1,18 | 1,21 | 1,24 |
| 1,24 | 1,27 | 1,30 | 1,33 | 1,36 | 1,39 | 1,42 | 1,42 | 1,44 | | | |
| t_{88} °C | 0 | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 | 900 | 1 000 |
| 1 000 | 1,5 | 1,7 | 1,8 | 1,8 | 2,0 | 2,2 | 2,4 | 2,6 | 2,8 | 3,0 | 3,2 |
| 2 000 | 3,5 | 3,7 | 4,0 | 4,0 | 4,2 | 4,5 | 4,8 | 5,0 | 5,3 | 5,6 | 5,9 |
| 3 000 | 6,2 | 6,5 | 6,9 | 6,9 | 7,2 | 7,5 | 7,9 | 8,2 | 8,6 | 9,0 | 9,3 |

TABLE DES MATIÈRES

COMITÉ CONSULTATIF DE THERMOMÉTRIE

8^e Session (1967)

| | Pages |
|---|-------|
| | T |
| Avertissement historique | 5 |
| Liste des membres | 7 |
| Ordre du jour | 10 |
| Rapport au Comité International des Poids et Mesures, par J. A. Hall. | |
| Ouverture de la session. Rappel du décès en mars 1967 de G. Bozza | 11 |
| Extension de l'Échelle Internationale Pratique de Température au-dessous de 90 °K (Discussion du projet d'« Échelle provisoire ». Travaux dans le domaine de 2 à 20 °K. Échange prévu de thermomètres à résistance de germanium) ... | 12 |
| Températures des points fixes (Discussion sur les valeurs à adopter pour les points de congélation de Au, Ag, Sb, Zn, les points d'ébullition de H ₂ O, O ₂ , e-H ₂ , les points triples de O ₂ et e-H ₂) | 17 |
| L'Échelle Internationale Pratique de Température au-dessus de 90 °K (Discussion sur la méthode d'interpolation (table ou formule) à adopter; adoption de l'équation de Callendar modifiée par Moser. Possibilité d'utiliser le point de congélation de Sn à la place du point d'ébullition de H ₂ O. Échange de vues sur la proposition de remplacer le thermocouple par le thermomètre à résistance de platine au-dessus du point de congélation de Sb) | 19 |
| Valeur de c_2 (Adoption de la meilleure valeur actuelle : 0,014 388 mètre · degré) . | 22 |
| Lampes à corps noir du N.P.L. (Résultats des comparaisons et des mesures effectuées sur ce type de lampe dans divers laboratoires) | 22 |
| Recommandations à présenter au C.I.P.M. (Mise au point du texte des recommandations et moyens pour leur mise en application; création d'un comité de rédaction pour préparer un projet de l'E.I.P.T. et discussion sur quelques directives données à ce comité) | 22 |
| Unités de température: noms et symboles; définition du kelvin (Examen des propositions présentées par le Comité Consultatif des Unités: le C.C.T. adopte le nom « kelvin » (K) pour l'unité de température thermodynamique, les symboles K et °C pour exprimer une température et une différence (ou un intervalle) de température, et la définition proposée pour l'unité de température thermodynamique) | 24 |

Recommandations présentées au Comité International des Poids et Mesures :

| | |
|---|----|
| <i>Recommandation T 1 (Adoption du principe de la révision de l'E.I.P.T.) . . .</i> | 25 |
| <i>Recommandation T 2 (Principes sur lesquels devra être fondée et révisée l'E.I.P.T. de 13,810 °K à 273,15 °K, de 0 °C à 1 064,43 °C, et au-dessus de 1 064,43 °C)</i> | 25 |

Annexes

| | |
|---|---------|
| 1. <i>Liste des documents présentés à la 8^e session du Comité Consultatif de Thermométrie</i> | 27 |
| 2. <i>Projet d'une Échelle Internationale Pratique de Température « provisoire 1967 » établi par C.R. Barber, H. van Dijk et M. Durieux</i> | 32 |
| 3. P.T.B. (Allemagne). — <i>Commentaires sur le projet d'une Échelle Internationale Pratique de Température « provisoire 1967 », par H. Moser</i> | 35 |
| 4. <i>Résumé des commentaires des membres du C.C.T. sur le projet d'une Échelle Internationale Pratique de Température « provisoire 1967 »</i> | 38 |
| 5. K.O.L. (Pays-Bas). — <i>Proposition de modification au projet d'une Échelle Internationale Pratique de Température « provisoire 1967 », par H. van Dijk</i> | 40 |
| 6. N.R.C. (Canada). — <i>Examen critique de l'Échelle provisoire de température de Barber et van Dijk et proposition d'une Échelle internationale provisoire de température entre 11 °K et 90 °K, par H. Preston-Thomas et R.E. Bedford</i> | 42 |
| 7. N.R.L.M. (Japon). — <i>Thermométrie à gaz aux basses températures au N.R.L.M., par T. Mochizuki, K. Mitsui, M. Takahashi et T. Shiratori</i> | 48 |
| 8. I.M.P.R. (U.R.S.S.). — <i>Comparaison des échelles du N.P.L., de l'I.M.P.R. et du N.R.C. entre 90 et 273 °K, par M. P. Orlova</i> | 54 |
| 9. Istituto Termometrico Italiano (Italie). — <i>Point de congélation de l'antimoine, par L. Crovini</i> | 56 |
| 10. Aoyama Gakuin University (Japon). — <i>Dilatation thermique du quartz fondu; rapport définitif, par J. Oishi et T. Kimura</i> | 60 |
| 11. N.P.L. (Royaume-Uni). — <i>Stabilité des lampes à corps noir V3 et V4</i> | 64 |
| 12. P.T.B. (Allemagne). — <i>Rapport préliminaire sur l'étude des lampes à corps noir V3 et V4 au point de l'or, par H. Kunz</i> | 66 |
| 13. N.S.L. (Australie). — <i>Variation de la température de luminance de sources à corps noir, par T. P. Jones et J. Tapping</i> | 69 |
| 14. N.S.L. (Australie), Iowa State University (États-Unis d'Amérique). — <i>Comparaison entre les échelles de température définies par les thermomètres à gaz, acoustique et à résistance de platine entre 2 et 20 °K, par J. S. Rogers et R. J. Tainsh, et M. S. Anderson et C. A. Swenson</i> | 75 |
| 15. I.M.P.R. (U.R.S.S.). — <i>Comparaison des échelles provisoires de température thermodynamique de l'I.M.P.R. et du N.B.S. entre 4,2 et 20,3 °K, par G. A. Kytin, K. I. Kurilenok, M. P. Orlova, D. N. Astrov, D. I. Charevskaja</i> | 81 |
| 16. K.O.L. (Pays-Bas). — <i>Reproductibilité des thermomètres à résistance de germanium à 4,2 et 20,3 °K, par C. van Rijn, J. L. Tiggelman et M. Durieux</i> | 85 |
| 17. P.T.B. (Allemagne). — <i>Formule empirique pour la relation entre la résistance électrique du platine et la température dans le domaine de 0 °C à 1 064,43 °C, par H. Moser</i> | 91 |
| 18. <i>Échelle Internationale Pratique de Température de 1968</i> | 97 (A1) |

IMPRIMERIE DURAND

28-LUISANT (FRANCE)

Dépôt légal, Imprimeur, 1969, n° 810
Dépôt légal, Éditeur, 1969, n° 5

ACHEVÉ D'IMPRIMER LE 15-5-1969

Imprimé en France