

COMITÉ CONSULTATIF DE THERMOMÉTRIE

SESSION DE 1976



COMITÉ INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES

COMITÉ CONSULTATIF
DE THERMOMÉTRIE

11^e SESSION — 1976

(15-16 juin)



BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES

Pavillon de Breteuil, F-92310 SÈVRES, France

Dépositaire: OFFILIB, 48 rue Gay-Lussac, F-75005 Paris

ISBN 92-822-2017-8

NOTICE HISTORIQUE

Les organes de la Convention du Mètre

Le Bureau International, le Comité International et la Conférence Générale des Poids et Mesures

Le Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) 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 (43 520 m²) 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 qui interviennent dans les activités ci-dessus.

Le Bureau International fonctionne sous la surveillance exclusive du Comité International des Poids et Mesures (CIPM), placé lui-même sous l'autorité de la Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM).

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 d'adopter 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 rayonnements ionisants (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 rayonnements ionisants.

Une trentaine de physiciens ou techniciens travaillent dans les laboratoires du Bureau International; ils font des recherches métrologiques ainsi que des mesures dont les résultats sont consignés dans des certificats portant sur des étalons des grandeurs ci-dessus. Le budget annuel du Bureau International est de l'ordre de 5 000 000 de francs-or, soit environ 2 000 000 dollars U.S.

(1) Au 31 décembre 1976, quarante-quatre États sont membres de cette Convention : Afrique du Sud, Allemagne (Rép. Fédérale d'), Allemande (Rép. Démocratique), Amérique (É.-U. d'), Argentine (Rép.), Australie, Autriche, Belgique, Brésil, Bulgarie, Cameroun, Canada, Chili, Corée, Danemark, Dominicaine (Rép.), Égypte, Espagne, Finlande, France, Hongrie, Inde, Indonésie, Iran, Irlande, Italie, Japon, Mexique, Norvège, Pakistan, Pays-Bas, Pologne, Portugal, Roumanie, Royaume-Uni, Suède, Suisse, Tchécoslovaquie, Thaïlande, Turquie, U.R.S.S., Uruguay, Venezuela 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 CIPM*, 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, de membres individuels désignés également par le Comité International et d'un représentant du Bureau International. Ces Comités tiennent leurs sessions à des intervalles irréguliers; ils sont actuellement au nombre de sept:

1. Le *Comité Consultatif d'Électricité* (CCE), créé en 1927.
2. Le *Comité Consultatif de Photométrie et Radiométrie* (CCPR), nouveau nom donné en 1971 au *Comité Consultatif de Photonétrie* (CCP) créé en 1933 (de 1930 à 1933 le Comité précédent (CCE) s'est occupé des questions de photométrie).
3. Le *Comité Consultatif de Thermométrie* (CCT), créé en 1937.
 1. Le *Comité Consultatif pour la Définition du Mètre* (CCDM), créé en 1952
 5. Le *Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde* (CCDS), créé en 1956.
 6. Le *Comité Consultatif pour les Étalons de Mesure des Rayonnements Ionisants* (CEMRI), créé en 1958. En 1969, ce Comité Consultatif a institué quatre sections: Section I (Rayons X et γ , électrons), Section II (Mesure des radionucléides), Section III (Mesures neutroniques), Section IV (Étalons d'énergie α); cette dernière Section a été dissoute en 1975, son domaine d'activité étant confié à la Section II.
7. Le *Comité Consultatif des Unités* (CCU), créé en 1961.

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 multilingues).

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 (SI) dans le monde.

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.

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 organes de la Convention du Mètre.

Comité International des Poids et Mesures

Secrétaire
J. DE BOER

Vice-Président

Président
J. V. DUNWORTH

LISTE DES MEMBRES

DU

COMITÉ CONSULTATIF DE THERMOMÉTRIE

Président

II. PRESTON-THOMAS, Membre du Comité International des Poids et Mesures; Directeur Associé de la Division de Physique du Conseil National de Recherches, *Ottawa*.

Membres

AMT FÜR STANDARDISIERUNG, MESSWESEN UND WARENPRÜFUNG [ASMW], *Berlin*.

BUREAU NATIONAL DE MÉTROLOGIE, *Paris*: Institut National de Métrologie [INM] du Conservatoire National des Arts et Métiers [CNAM].

CONSEIL NATIONAL DE RECHERCHES [NRC], *Ottawa*.

INSTITUT DE MÉTROLOGIE D.I. MENDÉLÉEV [IMM], *Leningrad*.

INSTITUT DES MESURES PHYSICOTECHNIQUES ET RADIOTECHNIQUES [IMPR], *Moscou*.

ISTITUTO DI METROLOGIA G. COLONNETTI [IMGC], *Turin*.

KAMERLINGH ONNES LABORATORIUM [KOL], *Leiden*.

NATIONAL BUREAU OF STANDARDS [NBS], *Washington*.

NATIONAL MEASUREMENT LABORATORY [NML], *Chippendale* (Australie).

NATIONAL PHYSICAL LABORATORY [NPL], *Teddington* (Grande-Bretagne).

NATIONAL RESEARCH LABORATORY OF METROLOGY [NRLM], *Tokyo*.

PHYSIKALISCH-TECHNISCHE BUNDESANSTALT [PTB], *Braunschweig*.

J. DE BOER, Secrétaire du Comité International des Poids et Mesures;
Directeur, Instituut voor Theoretische Fysica, *Amsterdam*.

F. G. BRICKWEDDE, Professor of Physics, Pennsylvania State University,
Pennsylvania.

M. COLOMINA, Institut National de Chimie Physique Antonio de Gregorio
Rocasolano, *Madrid*.

J. SKAKALA, Directeur de recherche, Institut Métrologique Tchécoslo-
vaque, *Bratislava*.

C. A. SWENSON, Iowa State University, *Ames* (États-Unis d'Amérique).

Le directeur du Bureau International des Poids et Mesures [BIPM],
Sèvres.

ORDRE DU JOUR
de la 11^e session

1. Discussion de toutes les questions soulevées par la récente introduction de l'édition amendée de 1975 de l'EIPT-68.
 2. Autres questions résultant de la 10^e session du CCT.
 3. Discussion des rapports des Groupes de travail 1 à 5 :
 - a. GT1 : (Révision de l'EIPT-68).
 - b. GT2 : Points de référence secondaires et techniques de mesure pour $T \geq 30$ K.
 - c. GT3 : Températures thermodynamiques pour $T \geq 100$ K.
 - d. GT4 : Températures thermodynamiques pour $T < 100$ K.
 - e. GT5 : Thermomètres pratiques pour $T < 30$ K.
 4. Etat d'avancement des travaux en relation avec les points 2 à 5 de la Recommandation T 1 (1974) :
 - a. Points de référence secondaires entre 100 K et 400 K.
 - b. Extension du domaine du thermomètre à résistance de platine et du pyromètre optique.
 - c. Extension de l'EIPT-68 jusqu'à 2 mK.
 - d. Détermination des températures au-dessus de 4000 K.
 5. Rapports sur l'état d'avancement des comparaisons de thermomètres à résistance de platine et de thermomètres à résistance de germanium.
 6. Discussion des documents autres que les rapports des Groupes de travail.
 7. Propositions de publication (brochures sur les mesures de température) ou d'approbation (échelles de pression de vapeur de l'hélium) par le CCT.
 8. Composition et statut des Groupes de travail.
 9. Questions diverses.
- Publication des documents.
- Rapport et Recommandations du CCT au CIPM.
- Prochaine réunion du CCT.
-

RAPPORT

DU

COMITÉ CONSULTATIF DE THERMOMÉTRIE

(11^e Session — 1976)

AU

COMITÉ INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES

par M. DURIEUX, Rapporteur

Rapport abrégé

présenté à la 65^e session du CIPM

Le Comité Consultatif de Thermométrie (CCT) s'est réuni pour sa 11^e session au Bureau International des Poids et Mesures, à Sèvres, où il a tenu quatre séances les 15 et 16 juin 1976.

Étaient présents :

H. PRESTON-THOMAS, membre du CIPM, président du CCT.

Les délégués des laboratoires membres :

Amt für Standardisierung, Messwesen und Warenprüfung
[ASMW], Berlin (H. MAAS).

Conseil National de Recherches [NRC], Ottawa
(R.E. BEDFORD).

Bureau National de Métrologie, Paris : Institut
National de Métrologie [INM] du Conservatoire
National des Arts et Métiers [CNAM] (A. MOSER).

Institut des Mesures Physicotechniques et Radiotechni-
ques [IMPR], Moscou (D.N. ASTROV).

Istituto di Metrologia G. Colonnetti [IMGC], Turin
(L. CROVINI).

Kamerlingh Onnes Laboratorium [KOL], Leiden
(M. DURIEUX).

National Bureau of Standards [NBS], Washington
(R.P. HUDSON, H.J. KOSTKOWSKI).

National Measurement Laboratory [NML], Chippendale
(W.R.G. KEMP).

National Physical Laboratory [NPL], Teddington
(T.J. QUINN, P.B. COATES).

National Research Laboratory of Metrology [NRLM],
Tokyo (K. MITSUI).

Physikalisch-Technische Bundesanstalt [PTB], Braun-
schweig (W. THOMAS).

Les membres nominativement désignés :

J. SKAKALA (Bratislava).

C.A. SWENSON (Ames).

Le directeur du BIPM (J. TERRIEN).

Assistaient aussi à la session : P. GIACOMO, sous-
directeur du BIPM, J. BONHOURE et G. GIRARD (BIPM).

Excusés : J. de BOER (Amsterdam), F.G. BRICKWEDDE
(Pennsylvania), membres nominativement désignés.

Absents : Institut de Métrologie D.I. Mendéléev [IMM],
Leningrad ; M. COLOMINA (Madrid), membre nominativement
désigné.

I. RAPPORT SUR LA RÉUNION

Un compte rendu complet de cette réunion est publié dans
Comité Consultatif de Thermométrie, 11^e session, 1976.

Les points principaux qui ont été discutés et les conclu-
sions auxquelles on est parvenu sont :

1) Le CCT a approuvé le principe d'une nouvelle échelle provi-
soire pratique de température entre 0,5 K et 30 K (*voir ci-*
après la proposition pour une telle échelle).

2) Au cours des toutes dernières années, des mesures au ther-
momètre à gaz effectuées au NBS ont montré que l'Echelle
Internationale Pratique de Température de 1968 (EIP-68)
diffère nettement des températures thermodynamiques au-dessus
de 0 °C. Le Groupe de travail 3 du CCT a dressé une liste des
"meilleures estimations actuelles" de ces différences qui
paraîtra dans *Metrologia* sous les auspices du CCT. Cette liste
sera constamment remise à jour et constituera une base pour

déterminer les températures des points fixes de définition dans une EIPT ultérieure.

3) On a souvent besoin en chimie physique, en pharmacologie et en médecine de points de référence secondaires pour étalonner des appareils de mesure de température : ceci implique d'étudier et de choisir les meilleures valeurs des températures de ces points de référence secondaires. On a décidé que le CCT, ou le CCT en coopération avec d'autres organismes tels que l'UICPA, préparera et publiera des listes des meilleures valeurs des températures de ces points de référence secondaires. Cette tâche a été confiée au Groupe de travail 2 du CCT.

4) Constatant que dans tous les pays on a besoin de méthodes relativement peu onéreuses pour effectuer des mesures de température à un niveau d'exactitude modeste, le CCT va commencer à préparer une monographie sur les méthodes de ce type.

5) Le CCT pense que l'EIPT-68 devra être remplacée par une nouvelle échelle dans un avenir assez proche, vraisemblablement en 1983 ou 1987. En effet :

a) Des différences appréciables entre l'EIPT-68 et les températures thermodynamiques au-dessus de 0 °C ont été mises en évidence.

b) Le thermocouple Pt 10 % Rh/Pt devrait être éliminé comme instrument d'interpolation en raison de sa reproductibilité médiocre.

c) La dérivée première de l'équation de référence utilisée dans la définition de l'EIPT-68 présente des irrégularités notables au-dessous de 30 K.

d) Le domaine des températures couvert par l'EIPT devrait être étendu au-dessous de 13,8 K.

e) Le procédé d'interpolation pour le thermomètre à résistance de platine devrait être révisé.

Toutes ces questions ont été discutées au cours de la réunion. On a rédigé une recommandation au CIPM pour susciter des travaux, en particulier sur les points a et b ; il a été convenu de préparer le premier projet d'une nouvelle échelle pour la prochaine réunion du CCT.

6) Le CCT a pris connaissance des rapports sur la comparaison internationale, faite au NPL, de thermomètres à résistance de platine étalonnés dans l'EIPT-68 entre 13 K et 100 °C, ce rapport a fourni des données sur les différences entre les réalisations de l'EIPT-68 dans les divers laboratoires nationaux.

Un rapport a été également présenté au CCT sur la comparaison internationale, faite au NML, des échelles aux basses températures utilisant des thermomètres à germanium étalonnés. Les résultats de cette comparaison ont fourni les données nécessaires pour établir l'échelle proposée entre 0,5 K et 30 K.

7) On a discuté de la préparation des nouvelles échelles de température de l'hélium liquide, préparation qui avait été confiée au CCT comme il est indiqué dans le texte de l'EIPT-68. On pense que le CCT sera en mesure de proposer au CIPM de nouvelles échelles en 1978 et peut-être même en 1977. Ces échelles seront en accord étroit avec l'échelle provisoire proposée entre 0,5 K et 30 K.

Par suite des efforts faits par les différents Groupes de travail, les dernières sessions du CCT se sont avérées beaucoup plus efficaces et fructueuses. Ces cinq groupes, limités chacun à un maximum de quatre membres, accomplissent leur tâche entre deux sessions du CCT ; ils constituent pour les thermométristes de tous les pays des centres permanents de consultation ; ils soumettent des rapports tous les deux ans au CCT.

II. PROPOSITION POUR UNE ÉCHELLE PROVISOIRE DE TEMPÉRATURE DE 1976 ENTRE 0,5 ET 30 K

Des mesures faites avec des thermomètres magnétiques, des thermomètres acoustiques et des thermomètres à gaz ont montré que les échelles pratiques de température couramment utilisées au-dessous de 30 K s'écartent notablement de la température thermodynamique. Ces échelles pratiques de température sont :

L'"Echelle ⁴He 1958" entre 1 K et 5,2 K

(symbole des températures : T_{58})

L'"Echelle ³He 1962" entre 0,5 K et 3,3 K

(symbole des températures : T_{62})

L'Echelle Internationale Pratique de Température de 1968
au-dessus de 13,81 K (symbole des températures : T_{68}).

Les équations

$$T - T_{58} = 0,002 T$$

$$T - T_{62} = 0,002 T$$

donnent approximativement les différences de l'"Echelle ⁴He

1958" et de l'"Echelle ^3He 1962" par rapport aux températures thermodynamiques. Bien que les différences entre les températures dans l'EIPT-68 et les températures thermodynamiques, entre 13,81 K et 30 K, ne s'élèvent qu'à environ 5 mK, elles varient d'une façon assez irrégulière avec la température. Ces différences non seulement créent des difficultés dans les mesures exactes de température entre 0,5 K et 5,2 K et entre 13,81 K et 30 K, mais encore font qu'il est impossible d'obtenir entre 5,2 K et 13,81 K une échelle interpolée qui se raccorde aux échelles internationales et qui soit en même temps suffisamment en accord avec la température thermodynamique.

Ainsi, pour les expériences qui exigent une échelle de température lisse par rapport à la température thermodynamique, l'utilisation des échelles pratiques internationales existantes conduit à de grosses difficultés entre 0,5 K et 30 K.

A la suite d'une comparaison internationale des échelles de basses températures qui s'est récemment achevée au National Measurement Laboratory d'Australie, et de déterminations de températures thermodynamiques, une proposition a été présentée à la 11^e session du CCT pour une nouvelle échelle provisoire pratique de température dans le domaine de 1 K à 30 K. Nous donnons ci-dessous les grandes lignes de cette nouvelle échelle appelée "Echelle Provisoire de Température de 1976 entre 0,5 K et 30 K" (EPT-76) dont le symbole des températures est T_{76} . Le CCT recommande au CIPM d'approuver cette nouvelle échelle pour qu'elle soit utilisée sur le plan international.

Le CCT regrette de ne pas avoir eu le temps de présenter au CIPM cette nouvelle échelle sous sa forme définitive, mais il considère qu'il est urgent de promulguer cette échelle si l'on veut éviter la publication et l'utilisation d'un certain nombre d'échelles différentes.

*Grandes lignes de l'Échelle Provisoire de Température de 1976
entre 0,5 K et 30 K*

1. Obtention de l'Échelle

Depuis 1970 plusieurs laboratoires ont établi des échelles magnétiques de température, une échelle de température fondée sur un thermomètre acoustique (NBS) et, tout récemment, une échelle de température fondée sur des mesures au thermomètre à gaz (et des mesures d'isothermes) (NPL).

La plupart de ces échelles ont été comparées entre elles, à l'"Echelle ^4He 1958" et à l'EIPT-68 lors des comparaisons

d'échelles effectuées au NML.

Comme base pour l'EPT-76 nous avons choisi de nous référer à l'échelle magnétique T_{XAC} , qui a été utilisée pour la comparaison d'échelles faite au NML.

Les raisons de ce choix sont les suivantes :

1. En tant qu'échelle magnétique, T_{XAC} , est particulièrement lisse et elle va de 1 K à 35 K. (Parmi les diverses échelles magnétiques, T_{XAC} , est définie sur le domaine de température le plus large et c'est la seule qui soit, vers le bas, fondée sur le nitrate double de cérium et de magnésium pour lequel l'écart par rapport à la loi de Curie est très petit et bien connu).

2. L'échelle T_{XAC} , est en bon accord avec les déterminations de température thermodynamique au-dessous de 14 K et elle se raccorde bien à l'EIPT-68 à 27 K. Au-dessus de 14 K, l'échelle T_{XAC} , s'écarte peu et sans irrégularités des mesures récentes de températures thermodynamiques. (Comme les écarts entre les températures T_{76} et les températures thermodynamiques sont réguliers, les éventuels ajustements pourront être opérés sans nuire au caractère lisse de cette échelle).

Au-dessous de 3,2 K, l'EPT-76 est en accord avec les résultats obtenus récemment par le NPL au thermomètre magnétique jusqu'à 0,8 K et avec les calculs thermodynamiques de la pression de vapeur de ^4He liquide. Pour obtenir les températures T_{76} entre 0,8 K et 0,5 K, on supposera que l'on peut extrapoler proportionnellement à T les différences $T_{76} - T_{62}$ obtenues au-dessus de 0,8 K.

Des tableaux donneront les relations entre T_{76} et T_{62} , T_{58} ou T_{68} :

$T_{62} - T_{76}$	entre	0,5 K et 3,3 K
$T_{58} - T_{76}$	entre	1 K et 5,2 K
$T_{68} - T_{76}$	entre	13,81 K et 30 K.

Les valeurs des températures T_{76} seront données aux points de transition supraconducteurs du cadmium (0,5 K), du zinc (0,85 K), de l'aluminium (1,2 K), de l'indium (3,4 K) et du plomb (7,2 K), et au point triple du néon (24,5 K).

2. Réalisations de l'échelle

1) En utilisant un thermomètre magnétique pour lequel on a $X = A + B/(T + \Delta + \gamma/T)$, il faudrait déterminer les constantes A , B , Δ et γ par étalonnage aux températures de référence pour lesquelles T_{76} est spécifiée. (Les points d'étalonnage ne

doivent pas nécessairement être tous au-dessous de 30 K. On peut utiliser des points dans l'EIPT-68 au-dessus de 30 K puisque cette échelle se raccorde à l'EPT-76 de façon lisse ; naturellement, les critères de qualité du thermomètre magnétique seront alors plus rigoureux que lorsque toutes les températures d'étalonnage sont prises au-dessous de 30 K).

2) En utilisant un thermomètre à gaz ajusté sur l'EPT-76, par exemple à deux températures de référence, et des valeurs spécifiées pour les coefficients du viriel de l'hélium comme celles de Berry (Document CCT/76-27).

3) Dans les domaines de température pour lesquels T_{58} , T_{62} ou T_{68} sont définies, on peut réaliser l'EPT-76 en utilisant les différences entre ces températures et T_{76} .

4) On peut également obtenir l'EPT-76 directement à partir de thermomètres étalonnés par rapport à l'échelle T_{XAC} , (0,95 K - 30 K), par rapport à T_{NBS} 2-20 K (2 K - 20 K), ou par rapport à l'une des échelles magnétiques de l'IMPR (4,2 K - 20 K), du KOL (1,8 K - 30 K), du NML (1 K - 30 K) ou du NBS (2 K - 30 K). L'article sur les comparaisons d'échelles faites au NML (Document CCT/76-20) donne pour toutes ces échelles (à l'exception bien entendu de T_{XAC} , elle-même) les différences par rapport à T_{XAC} . L'échelle T_{XAC} est probablement identique à l'EPT-76 (si de petites différences entre ces deux échelles se manifestent, elles seront données). On peut également obtenir l'EPT-76 à partir de thermomètres étalonnés par rapport à l'échelle NPL-75 en utilisant les différences $T_{NPL-75} - T_{76}$ qui seront données.

(Septembre 1976)

RECOMMANDATION

du Comité Consultatif de Thermométrie
présentée
au Comité International des Poids et Mesures

RECOMMANDATION T 1 (1976) *

Le Comité Consultatif de Thermométrie,

1. considérant que les incertitudes des différences entre l'Echelle Internationale Pratique de Température de 1968 et la température thermodynamique sont d'une grandeur inacceptable, et que ces incertitudes devraient être amoindries dans une future Echelle Internationale Pratique de Température,

recommande que l'on effectue des recherches sur la mesure des températures thermodynamiques entre 20 K et 1064 °C.

2. considérant qu'une valeur exacte de la constante des gaz est nécessaire dans certaines mesures de la température thermodynamique, et qu'une détermination récente a donné une valeur sensiblement différente de celle qui était admise jusqu'à présent,

recommande que l'on effectue des mesures de la constante des gaz.

3. considérant qu'il est généralement reconnu que, dans la prochaine version de l'Echelle Internationale Pratique de Température, le thermocouple Pt 10 % Rh/Pt sera remplacé en tant qu'instrument d'interpolation par le thermomètre à résistance de platine ou le pyromètre optique,

recommande que l'on effectue des recherches afin de déterminer la température la mieux appropriée pour la jonction entre le domaine du thermomètre à résistance de platine et celui du pyromètre optique, et, en particulier, afin de réaliser des thermomètres à résistance de platine satisfaisants pour les hautes températures.

4. considérant qu'il existe dans tous les pays une demande substantielle pour des mesures de température qui ne sont pas les plus précises et les plus exactes,

* Les cinq points de cette Recommandation ont été approuvés par le Comité International des Poids et Mesures à sa 65^e session (septembre 1976).

recommande que l'on effectue des recherches pour trouver des méthodes simplifiées de réalisation de l'Echelle Internationale Pratique de Température de 1968.

5. considérant le besoin de mesures de plus en plus exactes aux températures élevées dans l'industrie, et considérant aussi les différences mineures qui subsistent concernant la température attribuée au point de congélation du platine,

recommande que l'on effectue des recherches sur des méthodes améliorées pour la diffusion de l'Echelle Internationale Pratique de Température de 1968 au-dessus de 2000 K, soit par des lampes à ruban de tungstène, soit par tout autre moyen approprié.

Compte rendu des séances de la 11^e session du CCT

Mr Durieux est désigné comme Rapporteur.

Le Président accueille tous les membres et les délégués, en particulier les nouveaux délégués Mr Coates du NPL, Mr Astrov de l'IMPR, Mr Maas de l'ASMW et Mr Swenson de l'Iowa State University qui assiste au Comité pour la première fois comme expert.

Le Comité approuve l'ordre du jour provisoire proposé par le Président.

Avant d'aborder le premier point de l'ordre du jour, le Président fait quelques remarques générales sur le fonctionnement des Groupes de travail et du CCT lui-même. Il remercie les membres des Groupes de travail pour les excellents rapports qu'ils ont présentés et souligne le fait que les Groupes de travail ont permis au CCT d'effectuer ses travaux avec une rapidité et une efficacité qui seraient autrement difficile à atteindre. Le domaine d'activité des Groupes de travail correspond dans l'ensemble à leur titre. Ils travaillent sous la direction et la responsabilité du CCT. Les Groupes de travail sont en mesure de recueillir des renseignements de façon permanente, durant les réunions du CCT et entre deux sessions, auprès des thermométristes du monde entier ; chaque Groupe de travail est suffisamment petit pour permettre de discuter convenablement les renseignements recueillis et pour prendre des décisions assez rapidement ; des rapports détaillés et des recommandations sont alors présentés au CCT. Cette procédure permet au CCT de concentrer ses efforts sur les principes plutôt que sur les détails, tout en conservant la pleine direction et le plein contrôle des travaux.

En ce qui concerne le CCT lui-même, le Président précise que ce Comité travaille pour le CIPM et lui présente des rapports. Si, par exemple, le CCT pense qu'une certaine échelle de température devrait être recommandée pour une utilisation mondiale soit à titre provisoire soit à titre plus permanent, il ne peut en général émettre lui-même une recom-

mandation ; il peut seulement demander au CIPM de le faire sauf, bien entendu, s'il a reçu au préalable du CIPM l'autorisation de faire une telle recommandation. Le Président mentionne ce point particulier car il se présentera plus loin, à propos de la recommandation d'une nouvelle échelle de température (voir section 3d).

Le Président termine ses remarques d'introduction en disant que l'essentiel du travail de la présente session consistera à discuter les rapports des Groupes de travail et à leur assigner de nouvelles tâches pour l'avenir.

1. DISCUSSION DES QUESTIONS SOULEVÉES PAR LA RÉCENTE INTRODUCTION DE L'ÉDITION AMENDÉE DE 1975 DE L'EIPT-68

Il n'y a aucune discussion sur ce point. Le Président espère que dans le monde entier les thermométristes seront prêts à accepter cette édition amendée. Il indique que le texte officiel français est publié dans *Comptes rendus de la 15^e Conférence Générale des Poids et Mesures, 1975*, et dans *Comité Consultatif de Thermométrie, 10^e session, 1974*, p. A 1-21 ; la version anglaise est publiée dans *Metrologia, 12, 1976*, p. 7.

2. AUTRE SUJET RÉSULTANT DE LA 10^e SESSION DU CCT

Le Président rappelle que lors de la 10^e session on avait établi un Rapport beaucoup plus détaillé que lors des sessions précédentes et que ce Rapport s'était révélé extrêmement utile ; il propose que l'on suive la même procédure pour la présente session.

3. DISCUSSION DES RAPPORTS DES GROUPES DE TRAVAIL 1 A 5

Le Président demande aux présidents des Groupes de travail de présenter leur rapport mais de limiter leurs remarques aux questions qui en ont résulté. Les membres du Comité qui auraient des questions sur ces rapports devraient les poser à cette occasion ; on verra alors si ces questions devront être traitées dans le cadre de ce point de l'ordre du jour ou dans le cadre d'un autre point de ce même ordre du jour.

a) *Rapport du Groupe de travail 1* (Préparation du remplacement de l'EIPT-68 ; H. Preston-Thomas (président), P. Dean,

B.N. Oleinik et H.H. Plumb).

Mr Preston-Thomas signale que le rapport est particulièrement court car, bien que le Groupe de travail 1 vienne d'achever une première étape avec l'introduction de la version amendée de 1975 de l'EIPT-68, rien de notable n'a encore été fait pour la seconde étape ; celle-ci comprend le remplacement ultérieur de l'EIPT-68 et dans la mesure du possible la préparation d'une monographie sur les renseignements complémentaires pour réaliser l'EIPT-68.

Le rapport du Groupe de travail 1 n'a soulevé aucune question ni commentaire, ni avant ni pendant la session.

b) *Rapport du Groupe de travail 2* (Révision des points de référence secondaires et recherches sur des techniques pratiques simplifiées de mesure de température ; L. Crovini (président), R.E. Bedford et A. Moser).

Mr Crovini rappelle que lors de la 10^e session du CCT, le Groupe de travail 2 avait été déchargé du domaine des températures inférieures à 30 K qui avait été confié aux Groupes de travail 4 et 5. Les points principaux du rapport du Groupe de travail 2 entrent dans le cadre d'autres points de l'ordre du jour et seront discutés à ce moment-là. Le rapport tient compte des récentes déterminations du point de congélation du platine faites à la PTB et à l'IMGC, mais non du résultat obtenu à l'Université d'Utrecht (Pays-Bas) (ce résultat était de $[1\ 767,85 \pm 0,5]$ °C, J. Besemer, thèse, Université d'Utrecht, et *Physica* (1976)). Mr Hudson indique que Evans et Furukawa (NBS) ont adressé à Mr Crovini quelques commentaires assez détaillés sur l'emploi du thermomètre à résistance de platine aux températures élevées en vue du remplacement du thermocouple par le thermomètre à résistance de platine ou par le pyromètre à rayonnement entre 630,74 °C et 1064,43 °C dans une future EIPT. Mr Crovini propose de discuter ce point ultérieurement (section 4b) ; Mr Hudson est d'accord.

c) *Rapport du Groupe de travail 3* (Détermination des températures thermodynamiques dans le domaine $T \geq 100$ K ; T.J. Quinn (président), L.A. Guildner et W. Thomas).

Mr Quinn indique qu'il n'a reçu aucun commentaire sur ce rapport. Le Groupe de travail 3 propose de publier dans *Metrologia* le tableau des différences entre l'EIPT-68 et les

températures thermodynamiques de 0 °C à 480 °C, tableau qui figure dans ce rapport ; Mr Quinn suggère qu'il en soit discuté ultérieurement (section 10).

d) *Rapport du Groupe de travail 4* (Détermination des températures thermodynamiques dans le domaine $T < 100$ K ; M. Durieux (président), D.N. Astrov, W.R.G. Kemp et C.A. Swenson).

Mr Durieux commente le document CCT/76-55 qui est un addendum au rapport de 1976 du Groupe de travail 4. Ce document fait suite à une réunion que le Groupe de travail (à l'exception de Mr Astrov) vient de tenir à Leiden juste avant la session du CCT. Le Groupe de travail 4 propose une nouvelle échelle provisoire pratique de température entre 0,5 K et 30 K, et a l'intention de proposer de nouvelles échelles de température de l'hélium liquide (c'est-à-dire de nouvelles relations entre la pression de vapeur et la température pour ^3He et ^4He liquides) en 1977 ou en 1978.

Lors de la dernière session du CCT, le Groupe de travail 4 avait fait part de ses plans pour une nouvelle échelle provisoire dans le domaine de 1 K à 30 K et pour le remplacement des échelles de l'hélium liquide qui existent actuellement. Le CCT avait approuvé ces plans. On pensait à l'époque que l'échelle provisoire pour le domaine de 1 K à 30 K serait prête à la fin de l'année 1974 et les nouvelles échelles de l'hélium liquide en 1976. Mais les résultats de plusieurs expériences importantes ont été disponibles beaucoup plus tard que prévu - en fait, le Groupe de travail 4 n'a reçu certains résultats que juste avant la présente session, entre autres ceux :

- des expériences sur les isothermes faites avec le thermomètre à gaz du NPL, expériences qui ont conduit à l'échelle NPL-75 (Document CCT/76-27 et communication privée),

- d'une détermination du point d'ébullition de ^4He faite à l'Université de Münster (R.F.A.) avec un thermomètre à bruit (Document CCT/76-2),

- des mesures des relations entre la pression de vapeur et la température de ^4He et de ^3He liquides entre 0,8 K et 3,2 K, faites au NPL avec un thermomètre magnétique utilisant le nitrate de cérium et de magnésium (Document CCT/76-31).

Parmi les autres résultats importants il y a ceux des comparaisons de thermomètres à germanium entre 1 K et 30 K faites au NML (Document CCT/76-20), des comparaisons de ther-

momètres à résistance de platine faites au NPL (Document CCT/76-41), et ceux du thermomètre à gaz du NML, du thermomètre magnétique du NBS et des thermomètres acoustiques du NBS et du NPL (Documents CCT/76-51, 15 et 29). Le Groupe de travail 4 demande au CCT d'approuver la nouvelle échelle provisoire pratique de température entre 0,5 K et 30 K dont les grandes lignes sont présentées dans le Document CCT/76-55. Etant donné le peu de temps dont il disposait, le Groupe de travail 4 n'a pas encore rédigé le document définitif de présentation détaillée de la nouvelle échelle, mais pense être en mesure de le faire avant la fin de cette année. Pour établir la nouvelle échelle, on a posé comme principe qu'elle devrait concorder aussi étroitement que possible avec les températures thermodynamiques, en particulier qu'elle devrait être lisse par rapport aux températures thermodynamiques et qu'elle devrait se raccorder sans irrégularité à l'EIPT-68 vers 28 K.

Le Groupe de travail 4 pense qu'il est urgent de promulguer cette nouvelle échelle aussitôt que possible. Les échelles actuelles recommandées sur le plan international (EIPT-68, "Echelle ^4He 1958" et "Echelle ^3He 1962") ne concordent ni avec les températures thermodynamiques, ni entre elles ; ainsi en utilisant l'"Echelle ^4He 1958" et l'EIPT-68 il est impossible de faire une interpolation raisonnable entre 4,2 K et 13,81 K. C'est pourquoi, si le CCT accepte la nouvelle échelle, le Groupe de travail 4 propose qu'elle soit recommandée et promulguée de la façon suivante :

1. Le CCT demande au CIPM l'autorisation de recommander cette échelle pour être utilisée sur le plan international, sur la base des grandes lignes données dans le Document CCT/76-55.
2. Si cette autorisation est donnée, le Groupe de travail 4 enverra à tous les membres du CCT un document dans lequel l'échelle sera présentée en détail ; après approbation, ce document sera publié dans *Metrologia*.

En ce qui concerne les nouvelles échelles de l'hélium liquide, le Groupe de travail 4 propose (Document CCT/76-55) de présenter les nouvelles échelles dans un document qui sera adressé, pour approbation, à tous les membres du CCT. Si cela peut être terminé assez tôt, le Groupe de travail 4 propose que le CCT se mette d'accord par correspondance pour présenter les échelles au CIPM en octobre 1977. Sinon, le CCT pourrait prendre une décision sur ces nouvelles échelles lors de sa

prochaine session. Après approbation par le CCT et le CIPM le document pourra être publié dans *Metrologia*.

Mr Hudson note que la nouvelle échelle diffère d'environ 5 mK à 27 K des récents résultats obtenus au NPL avec le thermomètre à gaz, c'est-à-dire de l'échelle NPL-75 ; il demande à Mr Quinn si cela sera gênant. Mr Quinn répond que l'on doit savoir ce qui risque d'être le plus gênant : ou bien que l'échelle diffère de l'échelle NPL-75 d'environ 5 mK, ou bien qu'elle ne se raccorde pas de façon lisse à l'EIPT-68 à 27 K. Il n'est pas possible d'échapper simultanément à ces deux inconvénients.

Avant de poursuivre la discussion sur l'échelle elle-même, le Président rappelle que le CCT a accepté comme règle générale que seuls les documents reçus au BIPM au moins deux mois avant la réunion peuvent être soumis à discussion. Toutefois, le Président pense que dans le cas présent on doit faire une exception et que l'on doit discuter la proposition du Groupe de travail 4 présentée dans le Document CCT/76-55. Le Président suggère que l'on supprime l'indice CCT de $T_{\text{CCT}/76}$ dans la proposition du Groupe de travail 4 : si le CIPM donne au CCT l'autorisation d'approuver une échelle, celle-ci sera alors publiée sous les auspices du CIPM.

Mr Thomas demande si le chevauchement de la nouvelle échelle sur l'EIPT-68 entre 13,81 K et 27 K ne risque pas d'être dangereux. Dans le passé on s'est efforcé, dans la mesure du possible, d'éviter de tels chevauchements. Pour le Président, précisément à cause de ce chevauchement, il est indispensable de donner dans la proposition quelques indications sur la nécessité de la nouvelle échelle. Les thermométristes qui travaillent aux basses températures ont un besoin urgent d'une échelle qui concorde étroitement avec les températures thermodynamiques ; ils sont suffisamment ennuyés avec les échelles officielles actuelles - on sait qu'elles s'écartent des températures thermodynamiques d'une façon qu'ils ne peuvent tolérer - pour se contenter d'une échelle temporaire, ou provisoire, en attendant que soit remplacée l'EIPT-68. On est bien conscient de la question soulevée par Mr Thomas, mais l'essentiel pour les thermométristes est d'avoir quelque chose. Si l'on ne recommande pas une échelle provisoire, chaque laboratoire risque d'établir sa propre échelle et on en aura alors non pas deux mais toute une collection.

Mr Quinn indique qu'il serait possible, afin de tenir compte de la remarque de Mr Thomas, d'établir une échelle provisoire de 0,5 K à 13,81 K ; on recommanderait ensuite des valeurs pour les différences par rapport à l'EIPT-68 entre 13,81 K et 27 K ou 30 K ; le résultat final pourrait être le même que dans la proposition du Groupe de travail 4. Mr Kemp et Mr Swenson répondent que les différences entre les réalisations de l'EIPT-68 dans les divers laboratoires nationaux font qu'il est très difficile de donner des valeurs exactes pour les différences entre la nouvelle échelle provisoire et l'EIPT-68.

Le Président et Mr Hudson proposent de remettre à plus tard (*voir* section 9a) la suite de la discussion sur la proposition du Groupe de travail 4 concernant l'échelle provisoire pratique de température entre 0,5 K et 30 K ; les membres auraient ainsi le temps de prendre connaissance du Document CCT/76-55. Ceci est accepté. Mr Thomas indique, en ce qui concerne le thermomètre à bruit de l'Université de Münster (Document CCT/76-12), que le Professeur Storm et ses collègues ont l'intention de déterminer le point d'ébullition de l'oxygène en 1977.

e) *Rapport du Groupe de travail 5* (Thermomètres pratiques aux températures inférieures à 30 K ; R.P. Hudson (président), K. Mitsui et R.L. Rusby).

Mr Hudson espère que l'exposé sur les thermomètres pratiques pour utilisation dans le domaine inférieur à 30 K, donné dans le rapport du Groupe de travail 5, servira de point de départ pour de plus amples discussions au sein du Groupe de travail et du CCT.

Le Président remercie Mr Hudson pour ce rapport. Mr Mitsui signale la possibilité d'utiliser des alliages dilués autres que le fer-rhodium pour les thermomètres à basses températures (Document CCT/76-44).

4. ÉTAT D'AVANCEMENT DES TRAVAUX RELATIFS AUX POINTS 2 À 5 DE LA RECOMMANDATION T 1 (1974) DU CCT AU CIPM

(Le point 1 de cette Recommandation demandait au CIPM d'accepter l'édition amendée de 1975 de l'EIPT-68).

a. *Points de référence secondaires entre 100 K et 400 K*

Le Président présente le sujet en disant que cette question a été soulevée par divers laboratoires et que, de toute évidence, un certain nombre d'entre eux y attache une importance considérable. Mr Quinn précise que des physico-chimistes ont très instamment attiré son attention sur le fait qu'ils ont vraiment besoin de points de référence secondaires beaucoup plus nombreux. Ceci est en discussion depuis des années au NPL et deux points de vue s'opposent ; certains pensent que pour mesurer des températures avec précision il faut avant tout un bon thermomètre étalonné ; d'autres, avec peut-être des vues plus pratiques, pensent que dans bien des cas il est utile d'avoir un matériau de référence dont on connaît bien le point de congélation : en le plaçant dans un endroit précis d'une installation, on peut étalonner l'ensemble y compris le système de mesure de température. Mr Quinn indique qu'il existe à l'UICPA une Sous-Commission qui s'occupe activement de dresser une liste de points de référence secondaires. Mr Crovini a été invité à assister à une réunion de cette Sous-Commission à Rome en septembre prochain. Mr Quinn ajoute que les chimistes estiment que des points de référence secondaires beaucoup plus nombreux sont nécessaires, non seulement dans le domaine de 100 K à 400 K, mais dans un domaine beaucoup plus large ; ils aimeraient connaître les mesures que compte prendre le CCT dans ce sens. Mr Hudson dit que l'expérience au NBS est identique à celle dont a fait état Mr Quinn. Très souvent, des instruments médiocres de mesure de température sont associés à des points de référence qui fournissent un contrôle valable de ces instruments ; c'est en particulier le cas dans les milieux médicaux. Mr Crovini signale l'utilisation, largement répandue en pharmacologie, d'analyses au moyen de déterminations de points de fusion. Pour tous les appareils utilisés pour des analyses de ce type on a besoin de substances de référence permettant un étalonnage, en général avec une exactitude d'environ 0,1 K. L'IMGC aide actuellement l'Istituto Superiore di Sanita Nazionale à mettre au point l'appareillage nécessaire et à sélectionner les matériaux de référence. Une des difficultés vient généralement de ce que l'on dispose tout au plus de 1 ou 2 grammes du matériau. Mr Crovini pense que la collaboration des métrologistes peut aider les chimistes et les pharmaciens à résoudre ces problèmes. Mr Moser signale les travaux faits à l'INM sur la réalisation du point triple du xénon (à environ 161 K) avec une précision supérieure à 1 mK (Documents CCT/76-24 et 26).

Le Président rappelle que la liste des points de référence secondaires dans l'EIPT-68 perpétue une tradition qui remonte au texte original de l'échelle de 1927 et constitue une tentative pour fournir le type d'aide dont on vient de parler. L'existence d'une liste de ce genre dans l'EIPT-68 est évidemment en contradiction avec l'esprit du reste de l'EIPT qui est d'établir une échelle unique reproductible avec la plus grande exactitude possible. La question des points de référence secondaires est peut-être liée à celle des mesures de la température à un moindre niveau de précision, question qui sera discutée plus loin (section 7). Il demande aux membres du Comité leurs avis sur l'alternative suivante : le CCT doit-il agir seul et étendre cette liste de points de référence secondaires jusqu'à un niveau convenu ou doit-il coordonner cette liste avec celles que publient d'autres organismes officiels ?

Mr Bedford souligne que ceux qui ne sont pas experts, font fréquemment la confusion. Ils pensent que l'EIPT-68 stipule que les températures des points de référence secondaires sont celles qui sont données dans le tableau de l'échelle, en d'autres termes qu'elles font partie intégrante de l'EIPT-68, ce qui n'est évidemment pas le cas.

Mr Kemp fait remarquer que les gens ont vraiment besoin de ces points de référence secondaires mais qu'ils souhaitent les avoir directement comme un étalon matériel et avoir la certitude que la température est celle qui est indiquée. Il demande si l'ensemble de la question ne devrait pas être confié à un autre organisme. Le Président rappelle que la question des étalons matériels de référence a été soumise au CIPM de façon indépendante il y a quelques années mais que peu de mesures ont été prises ; en effet, pour faire quelque chose de valable, il aurait fallu des ressources supérieures à celles dont dispose le BIPM. Le NBS est la plus importante source d'étalons matériels de référence ; depuis de nombreuses années il souhaite avoir davantage d'aide et de coopération de la part des autres pays dans cet effort coûteux pour rendre largement disponibles ces étalons matériels de référence, mais jusqu'ici il y a eu peu de coopération.

Mr Crovini signale que l'UICPA est actuellement en train de préparer un rapport sur les points de référence secondaires entre - 100 °C et 200 ou 300 °C avec des indications sur les fournisseurs des meilleurs matériaux. Il recommande que le Groupe de travail 2 établisse des contacts avec les organismes

qui diffusent des informations de ce genre afin d'éviter des erreurs.

Mr Quinn est d'avis que, jusqu'au remplacement de l'EIPT-68, le CCT n'a pas à prendre la décision d'y inclure ou non une nouvelle liste de points de référence secondaires. Il suggère de s'en remettre au Groupe de travail 2.

Le Président n'est pas certain que rien ne doit être fait officiellement par le CCT avant un remplacement de l'EIPT-68 : la brochure sur les méthodes de mesure des points secondaires que le CCT doit publier (*voir* section 7) risque bien de comporter un certain nombre de points de référence secondaires.

Le Président propose de soumettre le problème des points de référence secondaires au Groupe de travail 2 ; on demandera à celui-ci d'étudier le problème à la lumière de la discussion qui précède et de donner ses conclusions dans un futur rapport au CCT. Le Groupe de travail 2 devrait étudier les points de référence secondaires non seulement au-dessous de 400 K mais à toutes les températures. Le Comité est d'accord et le Groupe de travail 2 accepte cette tâche.

b. Extension des domaines du thermomètre à résistance de platine et du pyromètre optique

Le Président rappelle que cette question a fait l'objet de Recommandations du CCT au CIPM en 1971 (point 1) et en 1974 (point 3). Mr Bedford reprend les commentaires faits par Mr Evans (NBS) sur la formule proposée dans le rapport du Groupe de travail 2 pour le thermomètre à résistance de platine entre le point de glace et le point de l'argent. Il n'était pas sous-entendu dans ce rapport que la formule proposée était nécessairement la meilleure. Le Groupe de travail 2 avait pris comme idée directrice le souhait probablement général que le domaine du thermomètre à résistance de platine soit étendu au-dessus du point de l'antimoine et celui du pyromètre optique au-dessous du point de l'or. La formule en question suppose une jonction de ces deux domaines au point de l'argent. Une autre idée était que si la totalité du domaine du thermomètre à résistance de platine est couverte avec une seule formule d'interpolation, on évite des discontinuités dans ce domaine. Mr Evans a donné une formule différente de celle contenue dans le rapport du Groupe de travail 2 ; Mr Bedford trouve tout naturel que la formule de Mr Evans donne une meilleure interpolation entre le point de l'antimoine et le point de l'or

puisqu'on y utilise ces points comme points complémentaires d'étalonnage. Le Groupe de travail a pris note des commentaires de Mr Evans, mais, pour Mr Bedford, le choix final d'une formule d'interpolation pour le thermomètre à résistance de platine dépendra de la limite supérieure choisie et du fait que le domaine de température sera ou non scindé en plusieurs parties.

Le Président demande des avis sur la limite appropriée ou préférée pour la jonction entre le thermomètre à résistance de platine et le pyromètre optique, ainsi que sur l'éventualité de la complète disparition du thermocouple dans une future EIPT. Sur ce dernier point l'accord est général, mais la question de la température de la jonction conduit à une large discussion. Mr Kostkowski se réfère au Document CCT/76-16 du NBS : d'après l'expérience acquise, il convient de donner la préférence au thermomètre à résistance de platine sur le pyromètre photo-électrique monochromatique jusqu'au point de l'or, en raison de sa meilleure précision, de sa reproductibilité, de sa facilité d'emploi et de la généralisation possible de son emploi par ceux qui ont besoin de mesures de température de précision élevée. Dans ce Document il est recommandé que le CCT encourage l'emploi du thermomètre à résistance de platine afin d'étendre le nombre de ses utilisateurs. Si son utilisation est suffisamment répandue d'ici la promulgation d'une nouvelle échelle, comme le prévoit le Document en question, le thermomètre à résistance de platine pour les températures élevées devrait remplacer le thermocouple jusqu'au point de l'or.

Mr Quinn dit qu'il a envisagé l'extension vers le bas de l'échelle pyrométrique comme un moyen "d'aider le thermomètre à résistance de platine" ; si l'on disposait d'un thermomètre à résistance de platine utilisable jusqu'au point de l'or, il le préférerait nettement. Toutefois, au cours des années, les recherches ont toujours indiqué qu'il existe des difficultés avec le thermomètre à résistance de platine, difficultés en parties liées au phénomène de trempe et à la méthode de recuit mais aussi au fait que généralement on ne dispose pas d'un thermomètre convenable. C'est pour cette raison que l'on a envisagé l'extension de l'échelle pyrométrique aux températures inférieures au point de l'or. Mr Thomas rappelle que le CCT a recommandé dans le passé d'effectuer des recherches sur l'extension de l'échelle pyrométrique au-dessous du point de l'or ;

J. Bonhore au BIPM et H.J. Jung à la PTB ont commencé à travailler sur la question. En conséquence, Mr Thomas préfère ne pas décider maintenant si le thermomètre à résistance de platine doit être utilisé jusqu'au point de l'or, bien qu'il s'attende à ce que dans l'avenir ceci s'avère à la fois possible et souhaitable. Mr Kostkowski pense aussi qu'il est prématuré de prendre une décision maintenant, mais il fait remarquer que l'on peut obtenir avec un thermomètre à résistance de platine une précision et une reproductibilité de l'ordre de 10 mK jusqu'au point de l'or, ce qui n'est pas possible, ou du moins n'a pas encore été établi, avec le pyromètre optique. Il lui paraît plus vraisemblable que l'on parvienne à l'avenir à trouver dans le commerce un thermomètre à résistance pour températures élevées plutôt qu'un thermomètre à rayonnement d'exactitude comparable. Il pense qu'à l'heure actuelle il n'existe dans le commerce aucun pyromètre photoélectrique utilisable avec une précision supérieure à quelques centaines de millikelvins.

Pour Mr Bedford, réaliser une échelle avec un pyromètre optique comme instrument primaire d'interpolation n'implique pas nécessairement que le pyromètre puisse être trouvé dans le commerce.

Mr Kostkowski y voit cependant un avantage. Les utilisateurs de l'échelle qui recherchent la plus grande exactitude possible peuvent alors employer directement dans leurs expériences l'instrument d'interpolation qui définit l'échelle, comme ils le font maintenant avec le thermomètre à résistance de platine ; dans le cas contraire, des erreurs supplémentaires entrent en jeu. Mr Kostkowski a l'impression qu'à l'heure actuelle on ne peut pas obtenir mieux avec les pyromètres optiques dont on dispose qu'avec les thermocouples pour ce qui est de la précision et de la reproductibilité ; les métrologistes n'ont donc rien à gagner au remplacement du thermocouple par le pyromètre optique. La détermination des températures thermodynamiques est bien entendu une toute autre question et, pour cet usage, il est entièrement d'avis qu'il est souhaitable d'utiliser toutes les techniques prometteuses, y compris la pyrométrie optique.

Mr Hudson voit un point à éclaircir : dans quelle mesure le CCT doit-il se préoccuper de la disponibilité des instruments nécessaires pour réaliser une échelle ?

Le Président constate qu'actuellement il est assez diffi-

cile de se procurer des thermomètres à résistance de platine pour températures élevées ; de plus, il s'est avéré que, même pour un usage limité aux étalonnages dans un laboratoire de métrologie, ils seraient particulièrement onéreux en raison de leur brève durée de vie et de la nécessité de réétalonnages fréquents. Sur la question de la disponibilité des instruments, Mr Quinn remarque que, bien que l'on ne trouve pas dans le commerce de pyromètres photoélectriques comme ceux qui ont été construits dans divers laboratoires de métrologie, il est possible d'en faire fabriquer à la demande ; pour les thermomètres à résistance de platine pour températures élevées, au contraire, il semble très difficile d'en construire même dans des laboratoires nationaux de métrologie.

Mr Kostkowski se demande si on peut donner à l'heure actuelle une "recette" pour construire un pyromètre optique capable de donner une précision et une reproductibilité de l'ordre de 10 mK. Il croit que la pyrométrie optique avec une précision aussi élevée est très difficile en pratique et signale des différences de l'ordre de 1 K entre des déterminations du point du platine obtenues dans divers laboratoires avec des pyromètres optiques.

Le Président souligne que si le CCT doit envisager sérieusement la possibilité de remplacer l'EIPT-68 en 1983 (voir remarque de Mr Hudson, à la fin de la section 13), une ébauche de l'échelle devra figurer sous une forme ou sous une autre dans le rapport du Groupe de travail 1 de janvier 1978 ; auparavant, on devra établir une proposition pour la définition de l'échelle. Le projet pourra, bien entendu, être modifié sans difficulté jusqu'en 1982 mais la question ne peut rester pendante indéfiniment.

Mr Kemp demande de quelle exactitude on a besoin pour les mesures de température jusqu'au point de l'or. Mr Kostkowski pense qu'une exactitude de 10 mK jusqu'au point de l'or est un objectif raisonnable. Mr Coates demande à quelle périodicité il faut étalonner un thermomètre à résistance de platine pour atteindre cette exactitude. Mr Kostkowski suggère qu'il faut le faire toutes les 50 heures.

Mr Quinn dit que le NPL s'est renseigné sur les besoins de l'industrie entre 800 °C environ et 1400 °C. Quelques-uns des impératifs les plus forts quant à l'exactitude proviennent de l'industrie du verre où l'on a besoin d'une reproductibilité à long terme de 1 K à 1000 °C sur la ligne de production.

Ceci conduit vraisemblablement à viser un niveau d'exactitude de 50 mK dans les laboratoires nationaux.

Le Président estime que des recherches purement scientifiques peuvent exiger une exactitude plus élevée.

Mr Kemp rappelle qu'il y a 10 ans on suggérait 1 mK comme objectif idéal pour le thermomètre à résistance de platine aux températures élevées ; il pense que le fait d'avoir choisi un objectif trop élevé a considérablement contribué au progrès.

On est dans l'ensemble d'avis que les laboratoires devraient collaborer aux travaux de recherche sur les thermomètres à résistance de platine pour températures élevées et aux tentatives pour encourager la production industrielle de ces thermomètres.

Mr Mitsui signale que, récemment, la Société japonaise Chino Works Ltd. à Tokyo, a commencé à vendre des thermomètres à résistance de platine utilisables jusqu'à 1100 °C ($R_{0^{\circ}\text{C}} = 5$ ohms) avec une reproductibilité de ± 10 mK sur environ 50 heures d'utilisation.

Pour terminer, le Président fait remarquer que cette question sera à nouveau abordée lorsque le CCT discutera des nouvelles recommandations à faire au CIPM (section 15).

c. Extension de l'EIPT jusqu'à 2 mK

Mr Hudson rappelle que lorsque cette question a été discutée en 1974, on avait tendance à prendre 1 K comme limite inférieure de l'échelle. A l'époque il avait dit que l'on disposait d'un thermomètre magnétique satisfaisant, utilisant le nitrate double de cérium et de magnésium comme sel paramagnétique, et que l'on pourrait facilement s'en servir jusqu'à environ 2 mK. A l'heure actuelle il a le sentiment que l'on connaît beaucoup mieux le domaine des très basses températures et que l'on peut considérer ce domaine et celui des températures élevées d'une façon analogue. On a ainsi un domaine de température entre 1 K et 1000 °C pour lequel on fait des recommandations spécifiques pour réaliser une échelle pratique de température, tandis que, au-dessus de 1000 °C et au-dessous de 1 K, on recommande seulement l'utilisation d'une loi fondamentale particulière. De même que l'on utilise la loi du rayonnement au-dessus de 1000 °C, on pourrait aussi bien utiliser une loi appropriée, par exemple la loi de Curie dans des systèmes convenables, au-dessous de 1 K. De cette façon l'échelle

serait ouverte aux deux extrémités.

Mr Swenson est d'accord avec Mr Hudson mais propose 0,5 K plutôt que 1 K comme limite inférieure du domaine pour lequel on fait des recommandations spécifiques. En effet, l'échelle de température ^3He descend jusqu'à 0,5 K et il existe des points de référence supraconducteurs à 0,5 K (cadmium) et 0,8 K (zinc). On pourrait facilement penser à les utiliser comme base d'extrapolation vers les basses températures. Mr Hudson est d'accord.

Le Président accueille favorablement ces suggestions mais souligne que l'on devra se faire une opinion précise très rapidement, de préférence lorsque l'on préparera l'ébauche d'une nouvelle EIPT en 1978. Il lui semble nécessaire, au-dessous de 0,5 K et au-dessus de 1000 °C, d'indiquer les systèmes à utiliser de préférence. Mr Hudson fait une réserve : aux températures élevées on a seulement la loi du rayonnement pour définir une échelle, le thermocouple étant un instrument secondaire, mais aux basses températures on dispose de plusieurs types de thermomètres satisfaisants et la façon de spécifier un système qui serait préférable aux autres n'est pas évidente.

Mr Coates note que l'on doit avoir des valeurs définies des températures aux deux extrémités de l'échelle spécifiée.

Mr Kostkowski souligne que, au-dessus de 1000 °C et au moins jusqu'à 3000 °C, la loi du rayonnement est utilisée, avec un pyromètre optique comme appareil thermométrique, non seulement à cause de la loi fondamentale mais avant tout parce que cela fournit un instrument pratique. A cet égard l'analogie lui semble meilleure en prenant 0,5 K et 3000 °C ou 4000 °C comme limites inférieure et supérieure au-delà desquelles on ne spécifie aucun instrument. Mr Durieux a le sentiment que, lorsqu'on définira une nouvelle EIPT, celle-ci devrait de toute façon descendre à 0,5 K pour inclure l'échelle de température de ^3He . Au-dessous de cette température, on peut définir des points de référence supraconducteurs ou autres, mais il sera très difficile de spécifier avant 1983 (voir remarque de Mr Hudson à la fin de la section 13) un instrument précis pour réaliser une échelle pratique au-dessous de 0,5 K. Le Président remarque que les points de référence supraconducteurs pourraient être définis comme points de référence secondaires,

tandis que les mesures de température thermodynamique comme celles décrites par Mr Hudson fourniraient les déterminations primaires de température au-dessous de 0,5 K.

d. *Détermination des températures au-dessus de 4000 K*

Le Président rappelle que lors des deux dernières sessions du CCT on avait émis des recommandations tendant à stimuler les recherches sur la détermination des températures au-dessus de 4000 K, en raison de l'importance toujours accrue des températures des plasmas tant dans le domaine scientifique que dans le domaine industriel. En ce qui concerne la définition d'une échelle de température dans ce domaine, il souligne la suggestion de Mr Hudson de se référer aux lois thermodynamiques. Cependant, cela n'exclut ni la possibilité d'indiquer une préférence pour certains instruments de mesure des températures thermodynamiques, ni celle de recommander des échelles secondaires de température.

Mr Kostkowski indique que le NBS a eu pendant dix-huit ans environ un programme assez vaste de mesures de températures au-dessus de 4000 K, mais que ces travaux ont en grande partie été interrompus parce que l'industrie n'avait guère besoin de mesures de température dans ce domaine. La recherche scientifique à ces températures ne semble pas non plus avoir besoin d'une échelle pratique de température. Souvent, il n'y a pas équilibre thermodynamique local dans un plasma, donc pas de température significative. Mr Thomas pense que le Dr Wende (PTB) pourrait présenter un document sur ce sujet en 1978. Mr Quinn appuie la remarque de Mr Kostkowski. Au NPL l'opinion est que le problème consiste à connaître l'équilibre thermodynamique local et d'autres propriétés liées à ce qui se passe dans le plasma ; pouvoir disposer d'une échelle pratique vient beaucoup plus loin dans l'ordre des priorités. Mr Coates signale qu'au NPL on continue de travailler pour l'extension de l'EIPT vers ces hautes températures mais que la majeure partie du travail consiste à étudier l'état du plasma plutôt que l'échelle de température. Mr Kostkowski demande si quelqu'un a connaissance des besoins courants de l'industrie dans ce domaine de température. Mr Thomas rappelle que cette question a déjà été posée lors de la dernière session du CCT et que la réponse avait été négative. L'accord est général sur le fait que les milieux industriels ou scientifiques n'ont encore aucune exigence concernant les mesures de température au-dessus de 4000 K. En conséquence, le Président propose de ne faire

aucune recommandation concernant les recherches sur les mesures de température au-dessus de 4000 K.

5. RAPPORTS SUR L'ÉTAT D'AVANCEMENT DES COMPARAISONS DES THERMOMÈTRES À RÉSISTANCE DE PLATINE ET DES THERMOMÈTRES À GERMANIUM

Mr Quinn se rapporte au Document CCT/76-14 qui contient les résultats de la comparaison internationale de thermomètres à résistance de platine étalonnés dans l'EIPT-68 au-dessous de 100 °C. Les comparaisons ont montré, en plus de différences entre les réalisations de l'EIPT-68 aux points fixes, des différences significatives dans certains domaines de température entre leurs dérivées premières. Ces dernières différences sont parfois appelées différences dans la grandeur du degré. Elles s'élèvent à 11 mK par kelvin au-dessous de 20 K, ce qui est beaucoup trop pour des mesures précises de capacité thermique. Mr Swenson signale que ces considérations ont beaucoup influé sur la proposition du Groupe de travail 4 pour la nouvelle échelle provisoire lisse au-dessous de 30 K.

Mr Kemp se rapporte au Document CCT/76-20 qui donne les résultats de la comparaison internationale des échelles à basse température effectuée au NML par l'intermédiaire de thermomètres à germanium étalonnés. On a tenu compte de ces résultats dans la proposition du Groupe de travail 4 pour une échelle provisoire entre 0,5 K et 30 K. Mr Kemp ajoute que quelques comparaisons auront encore lieu en 1977 ; les laboratoires qui désireraient soit comparer leur échelle aux autres soit étalonner leurs thermomètres par rapport aux échelles disponibles, sont invités à profiter de cette occasion et à prendre contact avec le NML.

6. MONOGRAPHIE DONNANT DES RENSEIGNEMENTS COMPLÉMENTAIRES SUR LA RÉALISATION DE L'EIPT-68

On a proposé cette monographie à la dernière session du CCT pour tenir compte du fait que dans la dernière édition de l'EIPT-68 on a supprimé une partie de ces renseignements. On en a recommandé la publication sous forme d'une monographie séparée, car dans ce cas la remise à jour peut être faite de temps en temps sans entraîner le très gros effort et les

conséquences quasi juridiques qui caractérisent les modifications de l'EIPT elle-même.

Le Président propose qu'un projet de cette monographie fasse partie du rapport de 1978 du Groupe de travail 1. La monographie n'est pas destinée aux laboratoires nationaux mais à ceux qui veulent réaliser l'échelle ou l'utiliser avec la plus grande précision. A côté des renseignements sur la réalisation des points fixes, elle contiendra des renseignements sur le thermomètre à résistance de platine, le thermocouple et le pyromètre optique. Les modes d'emploi de tous ces instruments pour obtenir l'exactitude la plus élevée possible ne sont pas aussi largement connus qu'ils le devraient. Ceci contribue probablement à l'optimisme persistant de bien des thermométristes sur l'exactitude de leurs mesures de température.

Mr Kostkowski signale qu'un comité de l'ASTM (American Society for Testing and Materials) prépare une brochure sur la thermométrie par rayonnement, mais elle s'adressera aux utilisateurs qui font des mesures pratiques plutôt qu'à ceux qui ont besoin de l'exactitude la plus élevée possible. Le Président est favorable à la coopération avec d'autres groupes ou d'autres personnes et, si possible, à la reproduction de brochures existantes. Mr Hudson rappelle l'existence de la Monographie 126 du NBS, publiée en 1973, qui contient une discussion approfondie de l'utilisation des thermomètres à résistance de platine.

D'après l'expérience qu'il a acquise en préparant une brochure sur la radiométrie, pour faire le point sur les règles de l'art, Mr Kostkowski a l'impression qu'il faudrait beaucoup plus d'un ou deux ans pour écrire une monographie comme celle dont il est question. Le Président répond que si la monographie à écrire doit être complémentaire de l'EIPT-68, un projet doit être prêt en 1978 ; autrement l'époque envisagée pour le remplacement de l'échelle serait si proche que cela ne vaudrait pratiquement plus la peine. Il serait bien entendu possible d'écrire la monographie pour la future échelle, mais le Président est d'avis qu'il faudrait écrire quelque chose pour l'échelle actuelle, même si ce n'est pas entièrement satisfaisant.

A titre d'exemples, Mr Terrien cite les Monographies 1 et 2 du BIPM qui ont paru sous les auspices du Comité Consultatif pour les Etalons de Mesure des Rayonnements Ionisants.

Chaque monographie traite d'un sujet très limité. Le Président pense que l'on pourrait retenir le principe de scinder la monographie en plusieurs parties publiées séparément, chacune couvrant par exemple le domaine d'un instrument d'interpolation.

7. PUBLICATION D'UNE ÉCHELLE SECONDAIRE MOINS PRÉCISE
MAIS PLUS FACILE À RÉALISER
(MESURES SECONDAIRES DE TEMPÉRATURE)

Le Président rappelle que cette question a été soulevée à la session de 1971 ; partageant le sentiment général du CIPM sur les buts du BIPM, le CCT avait reconnu que les mesures à un niveau secondaire de précision correspondent à un besoin dans tous les pays et à la totalité des besoins pour certains d'entre eux. En conséquence, le CCT avait pris la décision de fournir des renseignements sur les mesures secondaires de température. Cette question intéresse à la fois les Groupes de travail 1 et 2.

Mr Crovini a l'impression que le domaine des mesures de température à un niveau secondaire d'exactitude est très large ; il demande où se trouve la démarcation avec les mesures primaires et combien d'applications on doit envisager. Comme exemple possible, le Président indique le chapitre "Mesure des températures" dans *Tools and Techniques in Physical Metallurgy* (Marcel Dekker, New-York, 1970) par R.E. Bedford, T.M. Dauphinee et H. Preston-Thomas.

Mr Crovini lui-même indique deux domaines d'intérêt qui concernent les mesures de température de niveau de précision secondaire : l'un est une échelle fondée sur les thermocouples entre approximativement le point du zinc et 1500 °C, l'autre est l'étalonnage plus exact des thermomètres médicaux. Mr Quinn pense qu'une échelle secondaire relativement peu précise mais pourtant utile, entre - 50 °C et 1600 °C, peut être fondée sur le thermocouple Pt 13 % Rh/Pt, pour lequel on a établi de nouvelles tables de référence il y a quelques années ; on acquiert actuellement la pratique correcte de ces nouveaux matériaux et de ces nouvelles tables. Mr Kemp signale que le NML est en train de mettre au point une méthode d'étalonnage pour des thermomètres à résistance de platine de second ordre. Ils sont peu onéreux et lorsqu'ils sont étalonnés aux points fixes de définition de l'EIPT-68, ils peuvent donner une exac-

titude de 0,1 K entre 90 K et 630 °C. Si l'on utilise des thermomètres à résistance de platine d'une qualité légèrement supérieure, qui sont encore bon marché, on peut par exemple obtenir une exactitude de quelques millikelvins entre 90 K et 273 K à partir d'étalonnages au point d'ébullition de l'oxygène et au point de glace seulement, en admettant une valeur moyenne pour β . Mr Hudson attire l'attention sur l'existence du thermomètre à résonance nucléaire quadrupolaire utilisant un sel approprié tel que le chlorate de potassium. On peut utiliser ce thermomètre entre environ 20 K et le point de fusion du matériau utilisé. Il présente l'avantage d'une relation universelle température-fréquence.

Le Président souligne que le Comité a au moins présenté quelques suggestions. Il demande à Mr Crovini si le Groupe de travail 2 veut bien préparer un document sur la question en liaison avec le Groupe de travail 1. Mr Crovini répond que le Groupe de travail 2 est évidemment prêt à cette coopération ; il ajoute que si le document doit également traiter des très basses températures, l'aide des Groupes de travail 4 et 5 sera également nécessaire.

Mr Crovini espère que la plupart des travaux du Groupe de travail 2 sur les points de référence secondaires pourront être achevés d'ici à la fin de 1976, bien que, évidemment, une remise à jour continue soit toujours nécessaire.

On convient que le Groupe de travail 2 essaiera de donner dans son rapport de janvier 1978 un état de l'avancement du document sur les mesures de température à un niveau secondaire d'exactitude plutôt qu'un premier projet.

8. COMPOSITION ET STATUT DES GROUPES DE TRAVAIL

Le Président propose de ne faire aucune modification fondamentale dans la composition des Groupes de travail de façon à ne pas perturber leur excellent fonctionnement. On avait fixé à quatre au maximum le nombre des membres d'un Groupe de travail. Mr Preston-Thomas propose que si le président change, il reste membre pour le moment et que l'on ne change pas plus de deux membres à la fois, et même de préférence pas plus d'un, sauf bien entendu si plusieurs membres ont abandonné la thermométrie.

Le Président demande des suggestions concernant la compo-

sition des Groupes de travail. Mr Quinn signale que Mr Dean n'a plus d'activité en thermométrie et souhaite par conséquent ne plus faire partie du Groupe de travail 1. Le CCT accepte ; le Président écrira au directeur du NPL pour libérer Mr Dean de ses fonctions de membre du Groupe de travail 1.

Poursuivant la discussion sur la composition des Groupes de travail, le Président signale que les laboratoires de Mr Maas (ASMW) et de Mr Skakala (Bratislava) ne sont représentés dans aucun Groupe de travail.

Il s'avère que Mr Maas et Mr Skakala sont tous deux compétents dans le domaine dont est chargé le Groupe de travail 2 ; ce Groupe de travail comprend déjà trois membres, on ne peut donc lui en adjoindre qu'un seul. Après quelque discussion, le Président propose que Mr Moser passe du Groupe de travail 2 au Groupe 3, et que Mr Maas et Mr Skakala se joignent au Groupe de travail 2. Le CCT est d'accord. Le Président et Mr Terrien prendront les dispositions officielles nécessaires. Aucun autre changement n'est suggéré, étant admis que Mme Orlova, qui a quitté l'IMPR, a été remplacée par Mr Astrov comme membre du Groupe de travail 4. On décide de ne pas changer les présidents.

Compte tenu de ces modifications, la composition des Groupe de travail sera la suivante (les noms des présidents sont soulignés) :

Groupe de travail 1 : H. Preston-Thomas (NRC), B.N. Oleinik (IMM), H. Plumb (NBS).

Groupe de travail 2 : L. Crovini (IMGC), R.E. Bedford (NRC), H. Maas (ASMW), J. Skakala (IMT, Bratislava).

Groupe de travail 3 : T.J. Quinn (NPL), L.A. Guildner (NBS), A. Moser (CNAM), W. Thomas (PTB).

Groupe de travail 4 : M. Durieux (KOL), D.N. Astrov (IMPR), W.R.G. Kemp (NML), C.A. Swenson (ISU).

Groupe de travail 5 : R.P. Hudson (NBS), K. Mitsui (NRLM), R.L. Rusby (NPL).

Concernant les attributions des Groupes de travail, Mr Kostkowski demande à quel Groupe de travail incombe la responsabilité de déterminer la jonction entre le domaine du thermomètre à résistance de platine et celui du pyromètre optique dans la future EIPT. Mr Bedford répond que le Groupe de travail 2 s'est préoccupé de la question dans le passé bien qu'elle ne

lui incombe pas à proprement parler (*voir* aussi le Rapport de la 10^e session du CCT, section 8a, Groupe de travail 2).

Mr Quinn indique que le Groupe de travail 3, d'après la définition de ses attributions, doit faire un rapport sur les températures thermodynamiques, mais qu'il a également l'intention de faire quelques recommandations sur la façon de définir la future EIPT. Mr Kostkowski fait remarquer que la question de la jonction du thermomètre à résistance de platine et du pyromètre optique ne pose pas seulement un problème d'accord avec les températures thermodynamiques ; si le Groupe de travail 3 devait s'occuper de cette question, il faudrait élargir sa mission.

Le Président apprécie les commentaires de Mr Kostkowski et dit qu'à l'origine l'idée était que les Groupes de travail 3 et 4 devaient être uniquement concernés par les déterminations des températures thermodynamiques. Ils devaient fournir ces données au Groupe de travail 1 et, en cas de besoin, également au Groupe de travail 2, mais il se peut qu'il faille élargir leurs attributions suffisamment pour y inclure ces tâches connexes. Mr Hudson appuie ce point de vue.

La répartition des tâches se fait de la façon suivante :

Groupe de travail 1 : Préparation du remplacement de l'EIPT-68 (sans changement depuis 1974).

Groupe de travail 2 : Révision des points de référence secondaires et recherches sur des techniques pratiques simplifiées de mesure des températures (sans changement depuis 1971).

Groupe de travail 3 : Détermination des températures thermodynamiques dans le domaine $T \geq 100$ K et leur incorporation dans les améliorations des échelles pratiques de température dans le même domaine (élargi depuis l'origine en 1971).

Groupe de travail 4 : Détermination des températures thermodynamiques dans le domaine $T < 100$ K et leur incorporation dans les améliorations des échelles pratiques de température dans le même domaine (élargi depuis l'origine en 1971).

Groupe de travail 5 : Thermomètres pratiques aux températures inférieures à 30 K (sans changement depuis 1974).

On décide de plus que les prochains rapports des Groupes de travail paraîtront en janvier 1978. Il faudra avant cette époque une certaine collaboration entre les Groupes de travail, puisque l'on envisage que la première ébauche d'une nouvelle EIPT figure dans le rapport du Groupe de travail 1. Mr Crovini et Mr Bedford signalent que le Groupe de travail 2 pense faire un court rapport sur les points de référence secondaires, en particulier sur la collaboration avec les autres organismes intéressés par ce domaine, au début de 1977, après la réunion de la commission de l'UICPA sur les points de référence secondaires ; Mr Crovini participera à cette réunion qui doit se tenir à Rome en septembre prochain.

9. DISCUSSION DU RAPPORT DU GROUPE DE TRAVAIL 4

(Suite du point 3d)

a. *Proposition d'une échelle provisoire de température entre 0,5 K et 30 K**

On discute maintenant l'addendum au rapport du Groupe de travail 4 (Document CCT/76-55) qui a été lu et discuté par quelques délégués en privé. Mr Astrov n'a pas pu participer à la réunion du Groupe de travail 4 à Leiden au cours de laquelle ce document a été rédigé ; il est d'accord sur son contenu. On a antérieurement décidé que la désignation $T_{\text{CCT/76}}$ deviendrait T_{76} . Sur une suggestion de Mr Quinn, le paragraphe 2 dans la section "Réalisation de l'Echelle" du Document CCT/76-55, devient : "En utilisant un thermomètre à gaz ajusté selon T_{76} , c'est-à-dire à deux températures de référence, et des valeurs spécifiées pour les coefficients du viriel de l'hélium comme celles de Berry (Document CCT/76-27)". (Mr Quinn rappelle que ce mode de réalisation de l'échelle ressemble étroitement à une proposition faite par Mr Barber il y a quelques années).

Le Président demande si le Comité est maintenant d'accord sur l'échelle proposée par le Groupe de travail 4 suivant les

* Cette échelle, appelée "Echelle provisoire de température de 1976 entre 0,5 K et 30 K" (EPT-76 ; symbole de la température : T_{76}) a été approuvée par le Comité International des Poids et Mesures à sa session de septembre 1976.

principes exposés dans le Document CCT/76-55. A une question de Mr Bedford sur la jonction de l'EPT-76 à l'EIPT-68 au voisinage de 27 K, Mr Swenson répond qu'il reste le problème de la dispersion sur 2 mK à 27,102 K (Document CCT/76-41) des réalisations de l'EIPT-68 dans les différents laboratoires ; une "échelle matérielle" définie par une série de thermomètres à germanium étalonnés, comme T_{XAC} , (Document CCT/76-55), est vraisemblablement plus précise que cela. Il signale également que la courbe en trait plein sur la figure du Document CCT/76-55 représente la température dans l'EIPT-68 telle que cette échelle est réalisée au NPL.

Revenant sur la question de la différence de 5 mK entre T_{76} et les températures obtenues par Berry au NPL à l'aide du thermomètre à gaz (section 3d), Mr Swenson signale que les différences entre T_{76} et les températures thermodynamiques marquent un progrès : elles ne sont vraisemblablement pas supérieures à 0,02 % entre 0,5 K et 30 K (alors qu'elles seraient d'environ 0,2 % si l'on utilisait T_{58} à la place de T_{76}). Le lissage par rapport aux températures thermodynamiques est probablement meilleur que 0,02 % (1 mK par 5 K), ce qui représente une amélioration par un facteur 10 par rapport à T_{58} . Sur une suggestion de Mr Kostkowski, le titre de l'échelle devient "Echelle provisoire de température de 1976 entre 0,5 K et 30 K".

Il n'y a plus de commentaires et le Comité est d'accord sur cette échelle ; on s'accorde aussi pour qu'elle soit proposée au CIPM comme échelle provisoire.

Le Président signale qu'il faut maintenant prendre une décision quant à la forme sous laquelle l'échelle sera soumise au CIPM. On pourrait utiliser à cet effet la section "Proposition pour une échelle provisoire pratique de température T_{76} entre 0,5 K et 30 K" du Document CCT/76-55, mais il faudrait expliciter les raisons de l'introduction de cette échelle, en particulier pour ce qui est du chevauchement sur la partie inférieure de l'EIPT-68. Il faudrait également expliquer pourquoi le CCT propose de promulguer l'échelle aussitôt que possible. Le Comité est d'accord là-dessus et l'on décide que le Groupe de travail 4, en collaboration avec le Président, préparera selon ces directives le document dans lequel l'Echelle Provisoire de Température de 1976 entre 0,5 K et 30 K sera soumise au CIPM.

En réponse à une question de Mr Hudson, le Président précise que ce document fera partie du Rapport de la 11^e session du CCT au CIPM. Ce rapport sera préparé par le Président et par le rapporteur et sera adressé aux membres du CCT pour approbation. Il est souhaitable que cette approbation soit envoyée rapidement pour que le rapport puisse être soumis au CIPM avant sa prochaine session (28 septembre - 1^{er} octobre 1976).

Mr Quinn pense que l'échelle détaillée qui paraîtra dans *Metrologia* (section 3d) ne devrait probablement pas différer beaucoup du projet soumis au CIPM. Mr Durieux et Mr Swenson répondent que le Groupe de travail 4 a laissé une petite marge de manoeuvre dans le Document CCT/76-55 qui, à quelques modifications près, constituera le document soumis au CIPM.

Mr Hudson est en principe d'accord avec l'idée d'une échelle provisoire mais il a le sentiment que, alors que le CCT attend depuis deux ans une proposition d'échelle provisoire qui servirait de base de réflexion et à la lumière de laquelle on pourrait même envisager des expériences complémentaires, tout ceci est maintenant impossible car l'échelle doit être prête en août. Il craint que le CCT n'aille trop vite et que ceci ne conduise même à une impasse. Une discussion assez longue s'ensuit au cours de laquelle on clarifie quelques points relatifs à l'historique de la proposition et de la procédure de mise en oeuvre de l'échelle.

Mr Swenson fait remarquer qu'au cours des deux dernières années de nombreux travaux ont été effectués et que, dans leur ensemble, ils convergent tous vers la même conclusion en ce qui concerne l'échelle. On en connaît les résultats préliminaires depuis environ deux ans. Il n'y a pas de résultats contradictoires ; par exemple, les travaux de Mangum et Bowers au NBS (Document CCT/76-15) confirment dans leur ensemble les conclusions du Groupe de travail 4 en ce qui concerne l'échelle. Pour le remplacement ultérieur de l'EIPT-68, la détermination des températures thermodynamiques avec le thermomètre à gaz au-dessus de 20 K doit être confirmée, mais pour le moment il semble justifié de raccorder cette échelle à l'EIPT-68 à 27 K. Attendre jusqu'à la session de 1977 du CIPM retarderait le tout d'un an et il est important de publier cette échelle dès que possible. Berry (NPL), par exemple, publiera prochainement ses résultats avec le thermomètre à gaz et cela conduira à une nouvelle échelle nationale (l'échelle NPL-75).

La même chose arrivera avec d'autres résultats qui seront publiés prochainement et il en résultera autant d'échelles différentes.

Mr Quinn appuie l'idée qu'il faut publier l'échelle provisoire dès que possible, car ce sera une étape très utile vers l'extension de l'EIPT-68. Les autres méthodes pour réaliser l'EPT-76 sont précisément les méthodes qui ont été discutées pour étendre l'EIPT-68 vers les basses températures ; approuver cette échelle permettrait d'éprouver ces méthodes et d'obtenir des renseignements sur la façon la plus utile d'étendre l'EIPT-68. Si le CCT remet à plus tard la recommandation de cette échelle, on arrivera alors presque à l'époque envisagée pour le changement de l'EIPT (*voir* remarque de Mr Hudson, à la fin de la section 13). D'ailleurs, le CCT s'était déjà mis d'accord il y a deux ans sur les principes de cette échelle.

Mr Hudson et Mr Swenson sont d'accord pour constater que tous les renseignements concordent. Le Président appuie le point de vue de Mr Swenson selon lequel l'introduction rapide de cette échelle est nécessaire.

Après ces explications on se met d'accord pour suivre le processus suggéré plus haut et présenter au CIPM, en septembre 1976, l'EPT-76 dans ses grandes lignes ; si le CIPM autorise le CCT à promulguer cette échelle, on la publiera dans *Metrologia* dès que possible.

Le Président suggère que tous les intéressés fassent parvenir leurs commentaires complémentaires sur cette échelle au Président du Groupe de travail 4, au plus tard en août 1976. Il est entendu que ces commentaires seront envoyés à tous les membres du CCT.

b. Les nouvelles échelles de l'hélium liquide

Mr Durieux rappelle la proposition du Groupe de travail 4 concernant les nouvelles échelles de pression de vapeur pour ^3He liquide entre 0,5 K et 3,3 K et pour ^4He liquide entre 1 K et 5,2 K (section 3d et Document CCT/76-55). Mr Swenson fait remarquer que les nouvelles échelles de l'hélium donneront les relations entre la pression de vapeur et la température de ^3He et ^4He sous forme analytique et qu'elles concorderont, vraisemblablement à mieux que 0,5 mK, avec les tables des différences $T_{62} - T_{76}$ et $T_{58} - T_{76}$ qui feront partie de la nouvelle échelle provisoire EPT-76.

Le Comité est d'accord avec ces propositions. Le Président rappelle qu'on avait fait spécifiquement référence à de nouvelles échelles de l'hélium dans l'édition amendée de l'EIPT-68 ; aussi la proposition qui vient d'être faite parachèvera-t-elle une des tâches qui avait été assignée au CCT.

10. PUBLICATION DES DIFFÉRENCES ENTRE L'EIPT-68 ET LES TEMPÉRATURES THERMODYNAMIQUES AU-DESSUS DE 0 °C

Mr Quinn et Mr Thomas proposent que l'article pour *Metrologia* comporte les phrases d'introduction suivantes :

"Depuis l'introduction de l'EIPT-68, de nouvelles recherches ont amené à la conclusion que, dans certains domaines de température, cette échelle s'écarte probablement de la température thermodynamique plus qu'on ne le pensait à l'époque où elle a été établie.

Lors de sa 11^e session, en juin 1976, le CCT est parvenu à la conclusion que, d'après les résultats expérimentaux disponibles, les meilleures estimations des différences au-dessus de 0 °C sont les suivantes :

Ces phrases seront immédiatement suivies des conclusions 1 (celle-ci comprend la table des différences $T - T_{68}$), 2, 3, 4 et 5 telles qu'elles figurent dans le Document CCT/76-2.

Mr Thomas souligne que la table des différences $T - T_{68}$ donne les meilleurs renseignements actuels. Mr Kostkowski demande si Mr Guildner (qui n'assiste pas à cette session) aura l'occasion de voir le manuscrit avant sa publication. Mr Quinn l'assure que oui.

Quelques remarques supplémentaires sont faites sur le contenu de ce document : Mr Swenson aimerait y ajouter une bibliographie et quelques paragraphes donnant les bases sur lesquelles se fondent les conclusions. Le Président suggère une référence à la publication prochaine dans *Metrologia* d'un résumé des rapports du Groupe de travail 3 ; il faut aussi un bref paragraphe donnant des précisions sur le groupe qui le publie et sur ses liens avec le CCT. Il est convenu que le Groupe de travail 3 publiera le document sur les différences $T - T_{68}$ comme on l'a proposé plus haut ; un paragraphe supplémentaire précisera les liens du Groupe de travail 3 avec le CCT et mentionnera la publication prochaine dans *Metrologia* d'un résumé des rapports de ce Groupe de travail. Ce dernier article sera envoyé à tous les membres du CCT pour approbation avant

publication. Une question de Mr Swenson sur le nombre des chiffres significatifs dans la 2^e conclusion de l'article du Groupe de travail 3 donne lieu à quelques discussions. On fera les corrections qui s'imposent.

Mr Hudson demande des explications sur une anomalie apparente : la table des différences est publiée sous les auspices du CCT, alors que la promulgation de l'EPT-76 est soumise à l'autorisation du CIPM. Le Président répond qu'à son avis cela vient de ce que le CCT a le pouvoir de publier une échelle avec les explications correspondantes, étant donné qu'il considère cette échelle comme la meilleure qui existe à un moment donné. Toutefois, si le CCT devait ensuite ajouter qu'en conséquence cette échelle est recommandée sur le plan international, le CCT outrepasserait alors (à moins qu'il n'y ait été spécialement autorisé) les pouvoirs qui lui sont conférés par le CIPM. La promulgation d'une échelle internationale doit être soumise à l'approbation du CIPM. Le Président pense que l'EPT-76 doit-être soumise au CIPM alors que la publication du Groupe de travail 3 n'a pas besoin de l'être, tout en admettant que la différence est faible. Mr Hudson ne voit toujours pas très bien cette différence. Il se demande s'il est vraiment nécessaire de faire recommander par le CIPM que l'EPT-76 soit utilisée sur le plan international et propose de présenter simplement cette échelle comme la meilleure échelle de l'avis du CCT. Cela résoudrait le problème de la date limite de son approbation par les membres du CCT et permettrait, à son avis, une approche plus rationnelle.

Mr Quinn ne voit aucun désavantage à demander l'approbation du CIPM. Comme avantage de cette approbation, il voit le fait que cette échelle risque moins d'être changée. Il aimerait qu'elle dure jusqu'au remplacement de l'EIPT-68. Mr Quinn, Mr Coates et le Président soulignent le fait que la table des différences, au contraire, devra être continuellement mise à jour. La discussion se termine par une question de Mr Kostkowski demandant quels seront les auteurs officiels de l'article du Groupe de travail 3. Le Président suggère que les membres du Groupe de travail 3 soient les auteurs, mais que dans la publication il apparaisse nettement que le document est publié avec l'accord de l'ensemble du CCT.

11. PUBLICATION DES RÉSUMÉS DES RAPPORTS DES GROUPES DE TRAVAIL
DANS *Metrologia*

Le Président fait remarquer que les précédents rapports du Groupe de travail 1 concernaient l'Édition amendée de l'EIPT-68, qui est maintenant publiée.

Mr Crovini propose de reporter la publication dans *Metrologia* d'un document du Groupe de travail 2 sur les points de référence secondaires jusqu'à ce que le Rapport du Groupe de travail 2 (section 4a) sur ce sujet ait paru.

La publication des rapports du Groupe de travail 3 a été discutée plus haut.

La publication dans *Metrologia* du document sur l'Echelle Provisoire de Température de 1976 entre 0,5 K et 30 K rend inutile la publication d'un extrait des rapports du Groupe de travail 4.

Il n'y a eu qu'un seul rapport du Groupe de travail 5 et Mr Hudson considère qu'une publication dans *Metrologia* serait encore prématurée.

12. DISCUSSION DES DOCUMENTS AUTRES QUE LES RAPPORTS
DES GROUPES DE TRAVAIL PRÉSENTÉS AU CCT

Mr Bedford commente les Documents CCT/76-32 et 40 sur les comparaisons du point triple de l'argon entre l'IMGC, l'INM et le BIPM, et les comparaisons des points triples de l'oxygène et de l'argon entre l'INM et le NRC, et le Document CCT/76-41 sur la comparaison internationale de thermomètres à résistance de platine faite au NPL. La comparaison internationale de cellules interchangeables a montré qu'il y a un excellent accord entre les réalisations des points triples dans les divers laboratoires. Une partie des différences trouvées au NPL est peut-être due à des modifications dans les thermomètres à résistance de platine. Mr Kemp est d'accord.

Mr Crovini signale les documents CCT/76-10 et 48 sur les nouvelles déterminations du point de congélation du platine faites à la PTB et à l'IMGC ; l'accord est excellent (section 3b).

13. DIVERS

— Mr Kemp souligne l'importance des comparaisons internationales, faites au NPL, de thermomètres à résistance de platine étalonnés dans l'EIPT-68 au-dessous de 100 °C ; il propose de continuer des comparaisons de ce type afin d'en tirer davantage de renseignements sur les différences entre les réalisations de l'EIPT-68 dans les divers laboratoires. Il ne voit pas d'autre moyen d'élucider les différences que l'on a trouvées entre ces réalisations, par exemple entre les réalisations du point d'ébullition du néon au NPL et au NML. Mr Kemp signale que le NML, pour sa part, s'offre à poursuivre les comparaisons de thermomètres à germanium (section 5). Mr Bedford a l'impression que, pour comparer les réalisations des points fixes, il vaut mieux faire circuler des cellules à point triple que des thermomètres. En réponse à la remarque de Mr Kemp, Mr Quinn indique qu'au NPL on est en train d'étalonner, dans l'échelle du thermomètre à gaz NPL-75, un important groupe de thermomètres à résistance de rhodium-fer. Il a l'impression que, par manque de personnel, il sera difficile de poursuivre les comparaisons de thermomètres à résistance de platine.

— Mr Quinn fait part d'une remarque faite au NPL : certaines personnes continuent à utiliser les expressions "degré Kelvin" et "°K" pour l'unité de température thermodynamique ou "deg" pour les différences de température, parce que cela est encore autorisé aux termes de la Résolution 3, point 4 et note 7, de la 13^e CGPM (1967-1968). Il propose que cette règle soit modifiée de façon à ne plus permettre d'employer ces expressions. L'ensemble du Comité est d'accord pour que le Président, qui assistera à la prochaine session du Comité Consultatif des Unités, attire l'attention de ce Comité sur l'opinion suivante : "Le CCT, considérant que cela fait neuf ans que le CIPM a introduit le symbole K pour l'unité de température thermodynamique (et de différences entre des températures thermodynamiques), est d'avis que l'emploi des symboles "°K" et "deg" ne devrait plus être autorisé".

— Mr Hudson évoque le fait que pendant cette session plusieurs allusions ont été faites au remplacement de l'EIPT-68 en 1983. Il a le sentiment que cela pourrait donner à croire que ce remplacement aura lieu en 1983. A son avis la date d'un remplacement devrait pour le moment rester dans le vague. Le Président est d'accord avec Mr Hudson que le CCT ne doit pas mettre l'accent sur cette date comme sur quelque chose de définitif.

Toutefois il a l'impression qu'il est important d'avoir prochainement une ébauche de la future échelle ; on pourra toujours ultérieurement la mettre à jour.

14. PUBLICATION DES DOCUMENTS PRÉSENTÉS AU CCT

Comme beaucoup de documents ont été soumis au CCT au moment de la réunion, ou juste avant, le Président rappelle les règles sur lesquelles on s'était mis d'accord lors de la précédente session du CCT. On les trouvera dans le Rapport de la 10^e session du CCT, sections 3b, c et d et 7. En particulier, il était convenu : que tous les documents devraient arriver au BIPM deux mois avant la date de la session, qu'ils ne devraient pas dépasser deux pages ou l'équivalent de 500 mots et que des exceptions possibles à ces règles seraient laissées à la discrétion du CCT.

Ceci conduit à une discussion détaillée pour savoir si l'on doit appliquer strictement ces règles ou si l'on doit les modifier. On n'a pu arriver à aucune conclusion nette. Finalement, le Comité s'accorde pour que le Président et le Rapporteur décident, en appliquant les règles et tout en ayant la possibilité de faire des exceptions, quels seront les documents publiés en annexe au Rapport du CCT.

15. RAPPORT ET RECOMMANDATIONS DU CCT AU CIPM

Le rapport au CIPM comportera :

1. Un rapport sur la 11^e session : ce sera un bref résumé du compte rendu de la réunion.
2. La demande d'autorisation pour promulguer dans un avenir proche l'"Échelle Provisoire de Température de 1976 entre 0,5 K et 30 K."
3. Une liste de recommandations pour les travaux futurs.

Le Président signale que le rapport au CIPM avec les recommandations sera envoyé pour approbation aux membres du CCT mais que des réponses très rapides sont nécessaires car le CIPM doit se réunir du 28 septembre au 1^{er} octobre 1976. Le compte rendu détaillé de la session du CCT sera envoyé ultérieurement puisqu'il n'y a aucune obligation à cet égard.

16. PROCHAINE RÉUNION DU CCT

Le Président est d'avis qu'un intervalle de deux ans entre deux réunions semble convenable au stade actuel des travaux du CCT et propose que la prochaine session se tienne en 1978. Ceci est convenu. La réunion aura lieu en mai ou en juin, de préférence en mai ; la date reste à préciser afin d'éviter le chevauchement avec la "Conference on Precision Electromagnetic Measurements" qui doit se réunir en mai 1978 à Ottawa et à laquelle doivent participer plusieurs membres du personnel du BIPM.

*
* *

Le Président remercie Mr Terrien et son personnel pour l'aide efficace qu'ils ont apportée comme de coutume au cours de la réunion. Mr Terrien saisit cette occasion pour féliciter le Président de l'excellent travail qu'il a fait en préparant et en présidant cette réunion du CCT.

Reçu en septembre 1976,
révisé le 13 décembre 1976.

ANNEXE T 1

**Documents de travail présentés
à la 11^e session du CCT**

Document

CCT/

- 76-1 Report 3 of Working Group 1 to the CCT (Voir Annexe T 2).
- 76-2 The third report to the CCT of Working Group 3.
- 76-2^{bis} Résumé du Document 76-2. Ce résumé a été établi après la session et contient deux articles à paraître dans *Metrologia*, 13, 1977 (Voir Annexe T 4).
- 76-3 Report 3 of Working Group 2 to the CCT.
- 76-3^{bis} Résumé du Document 76-3. Ce résumé a été établi après la session (Voir Annexe T 3).
- 76-4 Report No. 1 of Working Group 5.
- 76-4^{bis} Résumé du Document 76-4. Ce résumé a été établi après la session (Voir Annexe T 6).
- 76-5 The 1976 report of Working Group 4 to the CCT
- 76-5^{bis} Résumé du Document 76-5. Ce résumé a été établi après la session (Voir Annexe T 5).

Document

CCT/

- 76-6 The constant volume gas thermometer as an interpolation instrument below 20 K, by C.A. Swenson (Voir Annexe T 9).
- 76-7 KOL (Pays-Bas).- Differences between magnetic temperature scales between 1 K and 30 K, by J.E. van Dijk, C. van Rijn and M. Durieux (Voir Annexe T 12).
- 76-8 KOL (Pays-Bas).- Differences of IPTS-68 and the e-H₂ vapour pressure equation from a magnetic temperature scale between 13.81 K and 30 K, by C. van Rijn, J.E. van Dijk, H. ter Harmsel and M. Durieux (Voir Annexe T 13).
- 76-9 KOL (Pays-Bas).- The thermodynamic vapour pressure equation of liquid ⁴He below 2.15 K, by J.E. van Dijk, H. ter Harmsel and M. Durieux (Voir Annexe T 8).
- 76-10 PTB (Rép. Féd. d'Allemagne).- A new determination of the freezing point of platinum, by H. Kunz and J. Lohrengel (Voir Annexe T 25).
- 76-11 PTB (Rép. Féd. d'Allemagne).- Determination of the difference between the thermodynamic fixed-point temperatures of gold and silver by radiation thermometry, by H.J. Jung (Voir Annexe T 23).
- 76-12 University of Münster (Rép. Féd. d'Allemagne).- Measurement of the boiling point temperature of ⁴He by means of a noise thermometer, by H.H. Klein, G. Klempt and L. Storm (Voir Annexe T 7).
- 76-13 NBS (Etats-Unis d'Amérique).- Clinical fixed points - The melting point of gallium, by D.D. Thornton, G. Washington University and B.W. Mangum (Voir Annexe T 17).

Document

CCT/

- 76-14 NBS (Etats-Unis d'Amérique).- Present efforts in high temperature resistance thermometry at the NBS, by J.P. Evans (Voir Annexe T 20).
- 76-15 NBS (Etats-Unis d'Amérique).- Magnetic thermometry between 1 K and 20 K using neodymium ethylsulfate, by B.W. Mangum and W.J. Bowers (Voir Annexe T 10).
- 76-16 NBS (Etats-Unis d'Amérique).- Appraisal of interpolation instruments for a practical temperature scale from 630.74 °C to 1064.43 °C, by L.A. Guildner, H.J. Kostkowski and J.P. Evans (Voir Annexe T 21).
- 76-17 NBS (Etats-Unis d'Amérique).- The freezing point of aluminum as a fixed point for platinum resistance thermometry, by G.T. Furukawa, W.R. Bigge, J.L. Riddle and M.L. Reilly (Voir Annexe T 19).
- 76-18 NBS (Etats-Unis d'Amérique).- The triple point of mercury as a thermometric standard, by G.T. Furukawa and W.R. Bigge (Voir Annexe T 14).
- 76-19 NRC (Canada).- Current status of temperature scales from 630 °C to 1064 °C, by R.E. Bedford and C.K. Ma (Voir Annexe T 22).
- 76-20 NML (Australie).- An intercomparison of temperature scales in the range 1 to 30 K using germanium resistance thermometry, by L.M. Besley and W.R.G. Kemp (Voir Annexe T 11).
- 76-21 NPL (Royaume-Uni) et PTB (Rép. Féd. d'Allemagne).- Intercomparison of the realisation of the IPTS-68 in the range 1064 °C to 1700 °C with new pyrometers of NPL and PTB, by P.B. Coates and H. Kunz (Voir Annexe T 24).
- 76-22 NML (Australie).- Calibration in the IPTS 1968 from the oxygen boiling point to the zinc point, by J.J. Connolly and J.V. McAllan.

Document

CCT/

- 76-23 ASMW (Rép. Dém. Allemande).- Investigation of representation of the solidification temperature of gallium in the ASMW, by S. Lau and P. Schlott (Voir Annexe T 18).
- 76-24 INM (France).- Réalisation des points triples de l'oxygène, de l'argon et du xénon, par G. Bonnier et R. Malassis.
- 76-25 INM (France).- Mesures de températures dans un arc à plasma d'hydrogène, par P. Fieffé-Prévoist.
- 76-26 INM (France).- Le point triple du xénon, étalon de transfert, par R. Malassis.
- 76-27 NPL (Royaume-Uni).- Fixed point values on NPL-75 and virial coefficient data of ^4He , by K.H. Berry.
- 76-28 NPL (Royaume-Uni).- The IPTS-68 reference function and possible replacement deviation functions, by S.D. Ward.
- 76-29 NPL (Royaume-Uni).- The results of measurements with a low frequency acoustic thermometer at fixed points in the range 2-20 K, by A.R. Colclough.
- 76-30 NPL (Royaume-Uni).- A new determination of the gas constant by an acoustical method, by T.J. Quinn, A.R. Colclough, T.R.D. Chandler.
- 76-31 NPL (Royaume-Uni).- A CMN magnetic study of helium vapour pressures, by R.L. Rusby and C.A. Swenson.
- 76-32 IMGC (Italie), INM (France) et BIPM.- Point triple de l'argon. Comparaison entre l'IMGC, l'INM et le BIPM, par F. Pavese, G. Bonnier et J. Bonhoure.
- 76-33 NPL (Royaume-Uni).- Plasma temperature and radiation standard work in progress at NPL, by R.C. Preston.

Document

CCT/

- 76-34 IMGC (Italie).- The triple point of methane, par F. Pavese.
- 76-35 IMGC (Italie).- A new possibility for the IPTS definition above 20 K, par F. Pavese.
- 76-36 IMGC (Italie).- On the definition of the triple point temperature of gases, par F. Pavese.
- 76-37 IMPR (URSS).- Comparison of magnetic scales established in the PRMI and other national laboratories at the lead and indium superconducting transition points, by O.F. Pogorelova, G.A. Kytin, M.P. Orlova and D.N. Astrov.
- 76-38 IMPR (URSS).- Saturated vapour pressure of equilibrium hydrogen above 20 K, by Ya.E. Razhba, L.B. Belyansky, I.A. Razhba and D.N. Astrov.
- 76-39 IMPR (URSS).- Realization of the IPTS in the 18.7 to 273 K range using the triple point temperatures, by V.M. Khnykov, L.I. Rabukh, L.B. Belyansky, T.S. Pankiv, M.P. Orlova and D.N. Astrov.
- 76-40 NRC (Canada) et INM (France).- Comparaison des réalisations des points triples de l'oxygène et de l'argon, par J. Ancsin et G. Bonnier.
- 76-41 NPL (Royaume-Uni).- Comparison of low-temperature platinum resistance thermometers, by J.P. Compton and S.D. Ward (Voir Annexe T 15).
- 76-42 NRLM (Japon).- Calibration of a germanium resistance thermometer against vapor pressure of equilibrium hydrogen in the range 13.8 ~ 20.3 K, by H. Sakurai.
- 76-43 NRLM (Japon).- Realization of the triple point of argon, by T. Shiratori, M.M. Mehdi and K. Mitsui.

Document

CCT/

- 76-44 NRLM (Japon).- Platinum-cobalt resistance thermometer for low temperature use, by K. Mitsui and T. Shiratori.
- 76-45 NRLM (Japon).- Realization of the IPTS above 1337.48 K by means of a multiplicative comparator of spectral radiances, by S. Hattori and S. Takata.
- 76-46 NRLM (Japon).- A combined monochromatizing filter for precision optical pyrometry, by S. Takata.
- 76-47 NRLM (Japon).- Experimental evaluation of the ξ -function of an atmospheric argon plasma in the 10^4 K region, by I. Akamatsu and S. Takata.
- 76-48 IMGC (Italie).- The freezing point of platinum determined at IMGC, by T. Ricolfi and F. Lanza.
- 76-49 IMGC (Italie).- Noise thermometry at IMGC. Preliminary results, by L. Crovini and A. Actis.
- 76-50 NML (Australie).- The cadmium point as a monitor of calibration accuracy, by J.J. Connolly and J.V. McAllan.
- 76-51 NML (Australie).- Gas thermometry from 20 K to 30 K, by L.M. Besley and H.H. Plumb.
- 76-52 NML (Australie).- Four-point calibration of magnetic susceptibility thermometers, by L.M. Besley and W.R.G. Kemp.
- 76-53 NML (Australie).- Report on temperature measurement at the NML.
- 76-54 NML (Australie).- Calibration on the IPTS 1968 from the oxygen boiling point to the zinc point, by J.J. Connolly and J.V. McAllan (Voir Annexe T 16).

Document

-CCT/

- 76-55 Addendum to the 1976 Report of Working Group 4
(Voir Annexe T 5^{bis}).
- 76-56 NML (Australie).- Neon triple point. Krypton
triple point.
-

ANNEXE T 2

3^e Rapport du Groupe de travail 1*

(Révision de l'EIPT)

(Traduction du Document CCT/76-1)

Le second rapport de ce Groupe de travail était un projet de l'EIPT-68, édition amendée de 1975. Ce projet a servi de base à l'échelle amendée, qui a été adoptée depuis, successivement par le CCT, le CIPM et la 15^e CGPM. Elle paraîtra dans la version officielle, en français, dans les comptes rendus de ces organismes [1] et en anglais dans [2]. De nombreuses erreurs mineures de rédaction ont été relevées et corrigées à différentes reprises depuis la 10^e session du CCT, grâce à différents membres du CCT et du BIPM qui se sont intéressés de près à ce projet.

Avec ce qui précède on peut considérer comme achevée la tâche du Groupe de travail 1 concernant la définition de l'EIPT-68. A partir de maintenant ce Groupe de travail s'occupera essentiellement de préparer une nouvelle échelle qui pourrait être adoptée en 1983 ou 1987 [3].

Parmi les décisions à prendre concernant le remplacement de l'EIPT-68, figurent :

1) La limite inférieure de l'échelle. On est d'accord pour que l'échelle soit étendue vers le bas. La Recommandation 4

* Les membres de ce Groupe de travail sont MM. H. PRESTON-THOMAS, Président, Conseil National de Recherches (Canada), P. DEAN, National Physical Laboratory (Royaume-Uni), B.N. OLEINIK, Institut de Métrologie D.I. Mendéléiev (U.R.S.S.), H.H. PLUMB, National Bureau of Standards (U.S.A.).

Ce rapport a été communiqué aux membres du CCT en février 1976 et discuté à la 11^e session du CCT en juin 1976.

de la 10^e session du CCT [4] au CIPM suggère de fixer la limite inférieure à 2 mK. Ceci implique l'utilisation de procédés complémentaires d'interpolation comprenant, en totalité ou en partie : mesures magnétiques, mesures de la pression de vapeur de He, mesures de thermomètres à résistance de germanium, mesures au thermomètre à gaz, autres mesures de résistance et points fixes primaires. On se rappelle que le Groupe de travail 4 a proposé [5] que le CCT approuve en 1976 de nouvelles échelles de pression de vapeur de He.

2) La limite supérieure de l'échelle. La Recommandation 5 [6] demande d'envisager une extension au-dessus de la limite effective actuelle de 4000 K. Ici se pose la question non seulement des températures de plasma en général mais également des limites propres des tâches du CCT.

3) Les points convenables de jonction entre les thermomètres à résistance de platine, les thermocouples et les pyromètres optiques. D'autres groupes de travail sont concernés par cette question.

4) L'accord plus étroit entre la future EIPT et les températures thermodynamiques correspondantes. Ce point fait partie de la Résolution 7 de la 15^e Conférence Générale des Poids et Mesures. Ceci exclut la possibilité de conserver, par commodité, dans une nouvelle échelle, les valeurs numériques courantes pour certaines températures.

Un certain nombre des points ci-dessus sont, au premier chef, du ressort des autres groupes de travail. Il est probable qu'en juin 1976, en utilisant les rapports des autres groupes de travail, une première ébauche d'une nouvelle échelle pourrait être faite par le CCT. Le premier projet, encore très grossier, pourrait faire partie du rapport du Groupe de travail 1 en 1978, le second projet et le projet définitif pouvant être envisagés respectivement pour 1980 et 1982.

Deux points complémentaires sont susceptibles de faire l'objet de rapports ultérieurs du Groupe de travail 1.

1) En liaison avec le Groupe de travail 2, préparation et remise à jour périodique de la monographie proposée pour traiter des renseignements complémentaires concernant la réalisation de l'EIPT ; ces renseignements ont été supprimés dans l'édition de 1975 de l'EIPT-68 [7].

2) Approbation de la proposition et préparation d'une échelle secondaire moins précise mais plus facilement réalisable [8], qui répondrait aux besoins de nombreux thermométristes, et peut-être même à tous les besoins de certains pays, adhérents à la Convention du Mètre, moins avancés sur le plan scientifique.

(Janvier 1976)

BIBLIOGRAPHIE

1. *Comptes rendus des séances de la 15^e Conférence Générale des Poids et Mesures*, 1975, p. A 1 et *Comité Consultatif de Thermométrie*, 10^e session, 1974, p. A 1.
 2. *Metrologia*, 12, 1976, p. 7.
 3. *Comité Consultatif de Thermométrie*, 10^e session, 1974, p. T 35.
 4. *Ibid.*, p. T 38.
 5. *Ibid.*, p. T 11.
 6. *Ibid.*, pp. T 38 et T 19.
 7. *Ibid.*, p. T 36
 8. *Ibid.*, pp. T 6 et T 36.
-

ANNEXE T 3

Résumé du 3^e Rapport du Groupe de travail 2*

(Points fixes secondaires et échelles secondaires)

(Traduction du Document CCT/76-3 bis)

1. INTRODUCTION

Les paragraphes suivants résument le 3^e rapport du Groupe de travail 2 (GT 2) au Comité Consultatif de Thermométrie (CCT). La composition du GT 2 n'a pas été modifiée depuis la publication des précédents rapports.

2.- DÉTERMINATIONS EXPÉRIMENTALES DES POINTS DE RÉFÉRENCE SECONDAIRES

Dans un tableau en appendice on donne un complément à la "Liste des plus récentes déterminations des points de référence secondaires" qui a paru dans le résumé des deux premiers Rapports du GT 2 (*Comité Consultatif de Thermométrie*, 10^e session, 1974, p. T 45). Ce complément comprend deux parties : la première est une mise à jour des déterminations des points de référence, la deuxième concerne les nouvelles déterminations

* Les membres du Groupe de travail sont MM. L. CROVINI, président, Istituto di Metrologia G. Colonnetti (Italie), R.E. BEDFORD, Conseil National de Recherches (Canada), A. MOSER, Institut National de Métrologie du Conservatoire National des Arts et Métiers (France).

Le rapport complet (Document CCT/76-3) a été communiqué aux membres du CCT en mars 1976 et discuté à la 11^e session du CCT en juin 1976.

expérimentales des relations température-pression de vapeur pour les systèmes en équilibre liquide-vapeur et solide-vapeur de nombreuses substances. On a mentionné seulement les nouvelles déterminations qui ne figurent ni dans le résumé précédent ni dans le tableau VI de l'EIPT-68, édition amendée de 1975 (à l'exception des équations C.1 et D.1 à 3 de la deuxième partie, qui sont discutées dans la section 2-1).

2-1 Points de référence aux basses températures

En ce qui concerne les relations température-pression de vapeur, on tient à faire les commentaires particuliers suivants :

a) L'équation A.2* pour les phases liquide-vapeur de l'hydrogène en équilibre contient un terme résiduel systématique d'ajustement allant jusqu'à $\pm 0,5$ mK. On peut l'éliminer et ajuster les résultats expérimentaux dans les limites de la dispersion observée en ajoutant à l'équation un polynôme du cinquième degré [18].

b) Ancsin [20] confirme l'équation C.1 de Tiggelman [2] pour les phases solide-vapeur du néon à 1 mK près.

c) Ancsin [20] a obtenu des résultats très voisins de ceux de Tiggelman [2] pour les phases liquide-vapeur du néon en utilisant une équation de la même forme que l'équation D.3. Les résultats de Furukawa [3] (exprimés par l'équation D.2) en diffèrent légèrement (jusqu'à 1,5 mK). L'une ou l'autre de ces séries de résultats est préférable à l'équation D.1 de l'EIPT-68 qui est fondée sur les résultats de Grilly et qui diffère des autres de façon systématique de - 3 mK environ (à 24,5 K) à + 4 mK environ (à 30 K). Les résultats expérimentaux qui sont à la base de l'équation D.1 ont une dispersion expérimentale environ dix fois plus grande que celle de l'une ou l'autre des trois autres séries.

2-2 Points de référence dans le domaine de - 50 °C à 200 °C

On a estimé préférable d'avoir un grand nombre de points de référence entre - 50 °C et 200 °C, afin de réaliser des échelles de niveau secondaire fondées sur des thermistances ou d'autres dispositifs peu onéreux, qui présentent une bonne

* Par commodité pour le lecteur on utilise ici le même code de référence que dans la liste qui figure au précédent résumé (CCT, 10^e session, 1974, p. T 45).

reproductibilité individuelle mais des caractéristiques de température plus complexes. Il existe un besoin manifeste (qui a été exprimé par exemple en Europe, aux Etats-Unis, en Australie) de points fixes fiables et faciles à obtenir dans le sous-domaine de 0 °C à 100 °C, et en particulier au voisinage de 37 °C pour l'étalonnage de thermomètres médicaux électroniques. Le tableau I contient une liste de quelques points de référence éventuels dans ce sous-domaine avec leur température approximative. Le GT 2 signale que les laboratoires nationaux devraient entreprendre des études sur ces points fixes ou d'autres moins connus.

TABLEAU I

Points de référence utiles dans le domaine de 0 à 100 °C

	t_{68} (°C)
Point triple du phénoxybenzène *	26,88
Point de congélation du césium	29,7
Point de congélation du rubidium	38,8
Point triple du nitrotoluène *	51,54
Point de congélation de la paraffine	58
Point de congélation du potassium	63,6
Point triple du naphthalène *	80,27
Point de congélation du sodium	97,8

* Matériaux déjà distribués par certains organismes ou certaines sociétés pour cet usage.

Transformations solide-solide

Transition du sulfate de sodium décahydraté	32,28
Transition α - β du soufre	95,5

Transitions de Curie

(nécessitent encore d'autres recherches)

Gd	16
Sel de Rochelle **	24
MnPt ₃	25
CrS	30
GdMn ₂	30
Sel de Rochelle lourd **	35
NiFeInO ₄	40
MnAs	45
ZnFe ₂ O ₄	60
FeO, 5Li ₂ O, 5Cr ₂ O ₄	80

** Transitions ferroélectrique à antiferroélectrique.

Transformations liquide-liquide

Cholestérique à nématique
Nématique à isotrope
Toutes à étudier

2-3 Points de référence entre 631 et 1064 °C

L'exactitude de toute détermination dans ce domaine est essentiellement limitée par la médiocre reproductibilité du thermocouple étalon. Toutefois on peut dire que :

- a) d'après certaines recherches récentes, le point de congélation de l'aluminium est au moins aussi reproductible que celui de l'antimoine, à condition de prendre des précautions pour isoler le métal en fusion de l'oxygène et de la vapeur d'eau ;
- b) le point de fusion de l'eutectique cuivre-argent (779,6 °C) est le seul point de référence actuellement disponible au voisinage de 800 °C. On pourrait peut être améliorer sa reproductibilité (± 5 mK) en améliorant l'homogénéité du lingot avant la fusion [4] ;
- c) le point de congélation de l'argent a été redéterminé par rapport au point de congélation de l'or ($t_{\text{Au}} = 1064,43$ °C) au moyen de pyromètres à rayonnement monochromatique. La moyenne des résultats de quatre déterminations indépendantes [12,6,13, 14,15] est $t_{\text{Ag}} = 962,08$ °C.

Ces déterminations, ainsi que celle de Bongiovanni *et al.* [16], ont montré qu'on peut faire fonctionner en toute sécurité une cavité corps noir dans de l'argent en congélation pour réaliser un point de référence pour des pyromètres optiques. Les lingots d'argent destinés à cette détermination doivent être au préalable désoxydés à haute température et ensuite conservés dans un creuset en graphite sous atmosphère de gaz inerte de grande pureté renouvelée en permanence [16].

2-4 Points de référence aux températures élevées

2-4.1 Point de congélation du platine

On dispose de quatre résultats indépendants, tous de la même qualité en ce qui concerne la technique expérimentale :

- a) Quinn et Chandler (NPL) [1,6]
 $t_{\text{Pt}} = (1767,9 \pm 0,3)$ °C ;
- b) Jones et Tapping (NML) [5]
 $t_{\text{Pt}} = (1769,5 \pm 0,6)$ °C ;
- c) Kunz et Lohrengel (PTB) [24]
 $t_{\text{Pt}} = (1768,9_6 \pm 0,5)$ °C ;
- d) Ricolfi et Lanza (IMGC) [30]
 $t_{\text{Pt}} = (1769,0 \pm 0,4)$ °C.

Un examen critique des déterminations du NPL et du NML a montré que la réalisation de l'EIPT-68 au NPL est inférieure

de 0,4 °C à celle du NML au point du platine, mais on n'a trouvé aucune autre raison pour justifier la différence entre leurs résultats ; il subsiste donc une différence inexpliquée de 1,2 °C.

Pour l'instant, le GT 2 recommande $T_{Pt} = 2042 \pm 1$ K comme étant la meilleure estimation pour la température du point de congélation du platine.

2-4.2 Points de référence de température de rayonnement

La meilleure façon d'étalonner les pyromètres rapides à rayonnement utilisés pour mesurer des propriétés thermophysiques à température élevée par des techniques impulsives, est de le faire *in situ* par l'intermédiaire de points de référence appropriés. Il s'est avéré que des rubans convenablement utilisés de matériaux de grande pureté constituent, à la fusion, des points de référence de température de luminance qui sont reproductibles et ne dépendent pas de l'état de surface initial (Cezairliyan [9] et Cezairliyan *et al.* [10]). Ces températures de luminance sont fonction de la longueur d'onde. Les plus récentes déterminations sont données dans le tableau annexé.

Pour faire des étalonnages secondaires d'équipements optiques de mesure de température, on utilise, pour sa simplicité de réalisation, la température de luminance au point de fusion de métaux sélectionnés.

3.- THERMOMÈTRE A RÉSISTANCE DE PLATINE : 630-962 °C

Le GT 2 attire l'attention sur un document important concernant cette question, qui a été présenté à la Conférence Européenne sur les Mesures de Température (Teddington, avril 1975) par P. Marcarino et L. Crovini [17]. Ils suggèrent d'adopter une échelle provisoire fondée sur le thermomètre à résistance de platine jusqu'à 962,08 °C et sur l'échelle de rayonnement au-dessus de cette température. La température de 962,08 °C devrait être attribuée au point de congélation de l'argent. L'équation caractéristique du platine de 0 à 962,08 °C serait donnée par les équations suivantes

$$t = t' + 0,045 \left(\frac{t'}{100^\circ\text{C}} \right) \left(\frac{t'}{100^\circ\text{C}} - 1 \right) \left(\frac{t'}{419,58^\circ\text{C}} - 1 \right) \left(\frac{t'}{630,74^\circ\text{C}} - 1 \right) \left[1 - \varepsilon \left(\frac{t'}{1064,43^\circ\text{C}} \right)^{4,6} \right]$$

$$W(t') = 1 + At' + Bt'^2,$$

où l'on détermine les constantes A , B et ϵ par étalonnage aux points de vapeur (ou de l'étain), du zinc et de l'argent. Cette échelle est continue sur la totalité de son domaine et ne s'écarte pas de l'EIPT-68 de plus de ± 2 mK entre 450 et 630 °C. Au-dessous de 450 °C les différences sont bien inférieures à 1 mK. Au point de l'argent cette échelle du thermomètre à résistance de platine concorde avec l'échelle pyrométrique, fondée sur $t_{\text{Au}} = 1064,43$ °C, qui a été déterminée par plusieurs chercheurs (voir paragraphe 2-3). De plus, la moyenne de 21 thermomètres étalonnés d'après l'échelle extrapolée du thermomètre à résistance de platine concorde avec l'EIPT-68 au point de l'or, ce qui signifie que la discontinuité éventuelle de la dérivée première au point de l'argent est beaucoup plus petite que la discontinuité actuelle à 630,74 °C. La différence entre l'échelle proposée et l'EIPT-68 a une valeur maximale de 0,23 °C aux environs de 800 °C, ce qui est comparable à l'inexactitude du thermocouple étalon.

4.- THERMOMÈTRE À RÉSISTANCE DE PLATINE : 0°C-630°C

Il semble qu'il appartienne au GT 2 d'attirer l'attention sur les études détaillées que Berry [25,26] a faites sur l'effet de l'oxygène sur la résistance de thermomètres à résistance de platine soumis à des cycles thermiques.

Il a essentiellement trouvé que la résistance au point triple de l'eau (R_{PT}) subit de petites modifications réversibles dues à l'oxydation du platine quand le thermomètre passe d'environ 450 °C à des températures inférieures à 300 °C. Ceci pose un problème quant à la valeur de R (0°C) à utiliser pour W (t_{68}) à un moment donné dans la vie du thermomètre. Les incertitudes qui en résultent dans les températures mesurées peuvent atteindre plusieurs millikelvins dans la partie supérieure de ce domaine. On peut réduire de façon notable cette ambiguïté, si l'on mesure R (t_{68}) et R_{PT} toujours lorsque le thermomètre se trouve dans le même état d'oxydation. Dans la pratique cela signifie qu'il faut toujours mesurer R_{PT} aussitôt que possible après R (t_{68}).

Appendice

Liste des plus récentes déterminations des points de référence secondaires (Suite)*

1^{re} partie : Points fixes

Etat d'équilibre	T ₆₈ ou t ₆₈	Identi- fication	Incertitude** (K)	Auteurs (référence) (année)
P.T. hydrogène normal	13,958 K	N		Ancsin (18) (1977)
P.E. hydrogène normal	20,397	N		Ancsin (18) (1977)
Transition α - β oxygène solide	23,867	N	$\pm 0,003$	Ancsin (19) (1975)
P.T. néon naturel [a]	24,562 ₀	N		Ancsin (20) (1976)
Transition β - γ oxygène solide	43,800 ₇	N	$\pm 0,000 3$	Ancsin (20) (1976)
	43,801 5	N	$\pm 0,000 5$	Cowan <i>et al.</i> (22) (1976)
P.T. argon	83,797 4	N	$\pm 0,000 2$	Kemp <i>et al.</i> (23) (1976)
P.E. argon	87,294 1	N	$\pm 0,000 2$	Kemp <i>et al.</i> (23) (1976)
P.E. krypton	119,753	N	$\pm 0,020$	Bowman <i>et al.</i> (21) (1969)
P.E. xénon	165,059	N	$\pm 0,020$	Bowman <i>et al.</i> (21) (1969)
P.C. aluminium [b]	660,452 °C	N	$\pm 0,001_3$	Furukawa <i>et al.</i> (11) (1975)
TLF du fer à 653 nm	1397	N	± 6	Cezairliyan et McClure (28) (1975)
P.F. fer	1535	N	± 5	Cezairliyan et McClure (27) (1974)
TLF zirconium à 650 nm	1667	N	± 8	Cezairliyan et Righini (7) (1975)
P.C. platine	1769 [c]	EIPT-68	± 1	Quinn et Chandler (1) (1971) Quinn (6) (1974) Jones et Tapping (5) (1975)
	1768,9 ₆	N	$\pm 0,5$	Kunz et Lohrengel (24) (1975)
	1769,0	N	$\pm 0,4$	Ricolfi et Lanza (30) (1975)
	2042 K		± 1	Moyenne proposée
P.F. zirconium	1855 °C	N	± 8	Cezairliyan et Righini (7) (1975)
TLF niobium à 650 nm	2152	N	± 10	Cezairliyan (9) (1973)
	2157	N	± 8	Sheindlin <i>et al.</i> (29) (1972)
P.F. niobium	2469	N	± 9	Berezin <i>et al.</i> (8) (1972)

* Les notes [a], [b], [c] et l'explication des abréviations sont données à la fin du tableau, avant la bibliographie.

** Estimation donnée par les auteurs.

2^e partie : Relations température - pression de vapeur

$$(p_0 = 101\,325 \text{ Pa})$$

Etat d'équilibre

Auteurs

A. Phases liquide et vapeur de l'hydrogène en équilibre

$$2. \ln \left(\frac{p}{p_0} \right) = A + \frac{B}{T_{68}} + CT_{68}$$

où $A = 4,030\,610\,6$; $B = -101,803\,28 \text{ K}$;
 $C = 0,048\,778\,611 \text{ K}^{-1}$

Ancsin (18) (1977)

C. Phases solide et vapeur du néon ^[a]

$$1. \ln \left(\frac{p}{p_0} \right) = A + \frac{B}{T_{68}} + CT_{68} + DT_{68}^2$$

où $A = 10,275\,895$; $B = -261,182\,05 \text{ K}$;
 $C = -4,540\,82 \times 10^{-2} \text{ K}^{-1}$; $D = 10,352\,89 \times 10^{-4} \text{ K}^{-2}$

Tiggelman (2) (1973)

D. Phases liquide et vapeur du néon naturel ^[a]

$$1. \log_{10} \left(\frac{p}{p_0} \right) = A + \frac{B}{T_{68}} + CT_{68} + DT_{68}^2$$

où $A = 4,611\,52$; $B = -106,385\,1 \text{ K}$;
 $C = -0,036\,833\,1 \text{ K}^{-1}$; $D = 42,489\,2 \times 10^{-5} \text{ K}^{-2}$

figure dans l'EIPT-68 [c]

$$2. \ln p = A + \frac{B}{T} + C \ln T + DT + ET^2$$

où $A = 2074,411$; $B = -6618,952 \text{ K}$;
 $C = -748,942\,23$; $D = 29,231\,698 \text{ K}^{-1}$;
 $E = -0,190\,167\,6 \text{ K}^{-2}$; p est en Pa ;
 T est donnée dans l'échelle NBS-55

Furukawa (3) (1972)

$$3. \ln \left(\frac{p}{p_0} \right) = A + \frac{B}{T_{68}} + CT_{68} + DT_{68}^2$$

où $A = 10,153\,199$; $B = -240,780\,122 \text{ K}$;
 $C = -6,796\,944 \times 10^{-2} \text{ K}^{-1}$;
 $D = 7,802\,784 \times 10^{-4} \text{ K}^{-2}$

Tiggelman (2) (1973)

Notes

[a] Ces valeurs sont celles se rapportant à du néon de composition isotopique voisine de celle spécifiée dans la section III.6 de l'EIPT-68. Les températures du point triple et les équations de pression de vapeur pour ²⁰Ne et ²²Ne sont données par Furukawa (3).

[b] Cette valeur pour le point de congélation de l'aluminium n'est pas dans l'EIPT-68, mais résulte d'une extrapolation de la formule du thermomètre à résistance de platine établie au-dessous de 630 °C.

[c] EIPT-68, édition amendée de 1975.

Abréviations .- P.T. : point triple ; P.E. : point d'ébullition ; P.C. : point de congélation ; P.F. : point de fusion ; TLF : température de luminance à la fusion.

BIBLIOGRAPHIE *

1. QUINN (T.J.) et CHANDLER (T.R.D.), *Temperature*, 4, I, 1972, p. 295.
2. TIGGELMAN (J.L.), Ph. D. Thesis, Leiden, 1973.
3. FURUKAWA (G.T.), *Metrologia*, 8, 1972, p. 11.
4. CROVINI (L.), MARCARINO (P.), *Comité Consultatif de Thermométrie*, 10^e session, 1974, p. T 79.
5. JONES (T.P.) et TAPPING (J.), *Metrologia*, 12, 1976, p. 19.
6. QUINN (T.J.), *Metrologia*, 10, 1975, p. 115.
7. CEZAIIRLIYAN (A.) et RIGHINI (F.), *Revue Internationale des Hautes Températures et Réfractaires*, sous presse, 1975.
8. BEREZIN (B.Ya.), KENISARIN (M.M.) et CHEKHOVSKOI (V.Ya.), *High Temperatures - High Pressures*, 10, 1972, p. 1092.
9. CEZAIIRLIYAN (A.), *J. Res. NBS*, 77A, 1973, p. 333.
10. CEZAIIRLIYAN (A.), COSLOVI (L.), RIGHINI (F.) et ROSSO (A.), *Temperature Measurement 1975*, p. 287.
11. FURUKAWA (G.T.), BIGGE (W.R.), RIDDLE (J.L.) et REILLY (M.L.), *Temperature Measurement 1975*, p. 389.
12. QUINN (T.J.), CHANDLER (T.R.D.) et CHATTLE (M.V.), *Metrologia*, 9, 1973, p. 44.
13. BONHORE (J.), *Comité Consultatif de Thermométrie*, 10^e session, 1974, p. T 90, et *Metrologia*, 11, 1975, p. 141.
14. COSLOVI (L.), ROSSO (A.) et RUFFINO (G.), *Metrologia*, 11, 1975, p. 85.
15. JUNG (H.J.), *Temperature Measurement 1975*, p. 278.
16. BONGIOVANNI (G.), CROVINI (L.) et MARCARINO (P.), *Metrologia*, 11, 1975, p. 125.
17. MARCARINO (P.) et CROVINI (L.), *Temperature Measurement 1975*, p. 107.
18. ANCSIN (J.), *Metrologia*, 13, 1977, p. 79.
19. ANCSIN (J.), *Temperature Measurement 1975*, p. 57.
20. ANCSIN (J.), communication privée, à paraître, 1976.
21. BOWMAN (D.H.), AZIZ (R.A.) et LIM (C.C.), *Can. J. Phys.*, 47, 1969, p. 267.
22. COWAN (J.A.), KEMP (R.C.) et KEMP (W.R.G.), *Metrologia*, 12, 1976, p. 87.
23. KEMP (R.C.), KEMP (W.R.G.) et COWAN (J.A.), *Metrologia*, 12, 1976, p. 93.
24. KUNZ (H.) et LOHRENGEL (J.), *Jahresbericht PTB*, 1975, p. 190.
25. BERRY (R.J.), *Temperature Measurement 1975*, p. 99.
26. BERRY (R.J.), *Metrologia*, 10, 1974, p. 145.
27. CEZAIIRLIYAN (A.) et McCLURE (J.L.), *J. Res. NBS*, 78A, 1974, p. 1.

* Les différents volumes de "Temperature, Its Measurement and Control in Science and Industry" sont indiqués simplement sous la forme *Temperature*, 1, etc.

Le volume "Temperature Measurement 1975, Institute of Physics Conference Serie No. 26, Institute of Physics, London, 1975", est appelé simplement *Temperature Measurement 1975*, p. ...

28. CEZAIIRLIYAN (A.) et McCCLURE (J.L.), *J. Res. NBS*, 79A, 1975, p. 541.
 29. SHEINDLIN (A.E.), BEREZIN (B.Ya.) et CHEKHOVSKOI (V.Ya), *High Temperatures - High Pressures*, 4, 1972, p. 611.
 30. RICOLFI (T.) et LANZA (F.), document présenté à la Conférence Européenne sur les propriétés thermophysiques des solides aux températures élevées. A paraître dans *High Temperatures - High Pressures*.
-

**Résumé du 3^e Rapport
du Groupe de travail 3***

(Températures supérieures à 100 K)

(Traduction du Document CCT/76-2 bis)

I.- SUR LES DIFFÉRENCES ENTRE LES TEMPÉRATURES DANS L'EIPT-68
ET LES TEMPÉRATURES THERMODYNAMIQUES AU-DESSUS DE 0 °C

Lors de sa 9^e session en 1971, le Comité Consultatif de Thermométrie (CCT) a créé quatre Groupes de travail pour le conseiller et établir des recommandations sur les différents aspects de la thermométrie. Deux de ces Groupes de travail s'occupent des températures thermodynamiques : le Groupe de travail 3 (GT 3) dans le domaine des températures supérieures à 100 K et le Groupe de travail 4 dans le domaine des températures inférieures à 100 K. Le GT 3 a présenté trois rapports qui ont été discutés par le CCT [1,2]. Dans le troisième rapport, présenté à la 11^e session du CCT en juin 1976, nous arrivions à la conclusion qu'on avait rassemblé suffisamment d'informations pour permettre au CCT de se prononcer sur les différences qui existent vraisemblablement entre l'EIPT-68 et les températures thermodynamiques. Le GT 3 publie maintenant un état de la

* Ce résumé paraîtra sous forme de deux articles dans *Metrologia*, 13, 1977, sous la signature des membres de ce Groupe de travail, MM. T.J. QUINN, Président, National Physical Laboratory (Royaume-Uni), L.A. GUILDNER, National Bureau of Standards (U.S.A.), W. THOMAS, Physikalisch-Technische Bundesanstalt (R.F.A.).

Le rapport complet (Document CCT/76-2) a été communiqué aux membres du CCT en mars 1976 et discuté à la 11^e session du CCT en juin 1976.

situation, avec l'approbation du CCT [voir 2^e partie de ce Rapport]. Le CCT a également décidé de publier ci-après un bref résumé des trois rapports du GT 3 comme introduction.

Les éléments d'information disponibles sur les différences entre les températures dans l'EIPT-68 et la température thermodynamique se répartissent en trois catégories principales.

(a) De récentes mesures de température thermodynamique effectuées au National Bureau of Standards au moyen du thermomètre à gaz ont donné des preuves formelles dans le domaine de 0 °C à 460 °C.

(b) Dans un certain nombre de laboratoires des différences notables ont été constatées au moyen de mesures pyrométriques dans le domaine de 630 °C à 1064 °C.

(c) Les contradictions internes de l'EIPT-68 se manifestent sous forme de discontinuités dans la dérivée première de la résistance des thermomètres à résistance et de la force thermo-électrique des thermocouples par rapport à t_{68} , à 630,74 °C.

Nouvelles mesures de la température thermodynamique au NBS

Les résultats des mesures au thermomètre à gaz effectuées au NBS dans le domaine de 0 °C à 460 °C sont maintenant publiés [3]. Les différences trouvées entre l'EIPT-68 et les températures thermodynamiques sont indiquées sur la figure 1. Il semble que ces différences aient leur source dans les effets de sorption, dont l'importance était insoupçonnée dans les travaux antérieurs utilisant des thermomètres à gaz, travaux sur lesquels

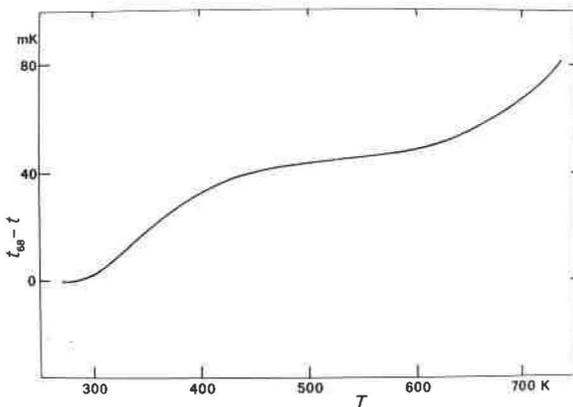


Fig. 1.- Différences entre les températures dans l'EIPT-68 et les températures thermodynamiques.

a été fondé l'essentiel de l'EIPT-68. Les recherches se poursuivent au NBS pour étendre le domaine des mesures vers les hautes températures.

Thermométrie radiométrique entre 630 °C et 1064 °C

Il existe maintenant dans ce domaine un grand nombre de preuves expérimentales qui démontrent que l'EIPT-68 n'est pas une aussi bonne représentation de la température thermodynamique qu'on le pensait à l'origine. En prenant comme température de référence la valeur admise dans l'EIPT-68 pour le point de l'or, un certain nombre de chercheurs ont mesuré l'intervalle entre le point de l'argent et celui de l'or par des techniques pyrométriques. Les résultats sont donnés dans le tableau I.

TABLEAU I

$$\Delta T = [T(\text{Au}) - T(\text{Ag})] - [T_{68}(\text{Au}) - T_{68}(\text{Ag})]$$

Auteur	Date	ΔT K	Incertitude (3 σ) K
Quinn, Chandler & Chattle [4]	1973	- 0,13	$\pm 0,2$
Bonhoure [5]	1975	- 0,19	$\pm 0,39$
Jung [6]	1975	- 0,13	$\pm 0,04$
Coslovi, Rosso & Ruffino [7]	1975	- 0,17	$\pm 0,18$

Comme nous estimons qu'une mesure directe entre la fusion et la congélation de lingots de métal conduit au résultat le plus digne de confiance, nous préférons prendre comme meilleure valeur actuelle de ΔT la moyenne, pondérée selon les propres estimations d'incertitude des auteurs, des mesures de Coslovi *et al.* et de Jung, à savoir $0,14 \text{ °C} \pm 0,05 \text{ °C}$.

Il ressort également des travaux de Bonhoure et de Quinn *et al.* que l'équation d'interpolation du thermocouple dans l'EIPT-68 ne donne pas une représentation correcte de la température thermodynamique entre 630 °C et le point de l'argent, et que $t - t_{68}$ atteint un maximum d'environ $0,5 \text{ °C}$ au voisinage de 800 °C .

D'après les travaux de Bonhoure il ne semble pas que l'intervalle point de l'antimoine - point de l'or de l'EIPT-68 soit erroné de façon significative. En attendant de nouvelles mesures de la température thermodynamique dans la région de 630 °C , il n'est pas encore possible de se prononcer sur la valeur la plus probable du point de l'or. Dans l'état actuel de

nos connaissances il ne semble pas que la valeur admise pour le point de l'or dans l'EIPT-68 s'écarte de plus de 0,5 °C par rapport à sa valeur thermodynamique.

Inhomogénéités des intervalles de l'EIPT-68

Des mesures faites en utilisant des thermocouples platine-rhodium/platine et des thermomètres à résistance de platine ont montré qu'il y a, à 630,74 °C, une discontinuité de la dérivée première par rapport à t_{68} de la résistance et de la force thermoélectrique [8]. C'est la température à laquelle on change d'instrument d'interpolation dans l'EIPT-68, pour passer du thermomètre à résistance de platine (de 13,81 K à 630,74 °C) au thermocouple platine 10 % rhodium/platine (de 630,74 °C à 1064,43 °C). L'importance de la discontinuité est d'environ 0,3 %. Les éléments dont on dispose à l'heure actuelle ne permettent pas d'identifier l'origine de la discontinuité. Il se peut qu'elle provienne d'erreurs dans les valeurs admises de t_{68} aux points fixes de définition de l'échelle, d'erreurs dans la forme des équations d'interpolation pour les deux instruments ou d'une combinaison des deux. L'extension attendue du domaine du thermomètre à gaz du NBS jusqu'à 630 °C, jointe aux recherches en cours et envisagées en thermométrie radiométrique, devrait permettre d'élucider cette question.

BIBLIOGRAPHIE

1. Comité Consultatif de Thermométrie, 10^e session, 1974, p. T 59.
2. Ce volume, Annexe T 1, Document CCT/76-2.
3. GUILDNER (L.A.) et EDSINGER (R.E.), *J. Res. NBS*, 80A, 1976, sous presse.
4. QUINN (T.J.), CHANDLER (T.R.D.) et CHATTLE (M.V.), *Metrologia*, 9, 1973, p. 44.
5. BONHOURE (J.), *Metrologia*, 11, 1975, p. 141.
6. JUNG (H.J.), Temperature Measurement 1975, Inst. Phys. Conf., Series 26, p. 278, Institute of Physics, London, 1975.
7. COSLOVI (L.), ROSSO (A.) et RUFFINO (G.), *Metrologia*, 11, 1975, p. 85.
8. BEDFORD (R.E.) *et al.*, Temperature, Its Measurement and Control in Science and Industry, Vol. 4, III, p. 1585, Instrument Society of America, Pittsburgh, 1972.

· II.- DIFFÉRENCES ENTRE LES TEMPÉRATURES DANS L'EIPT-68
ET LES TEMPÉRATURES THERMODYNAMIQUES AU-DESSUS DE 100 K

L'Echelle Internationale Pratique de Température de 1968 (EIPT-68) a été établie pour fournir un moyen reproductible et commode d'assurer et de comparer des mesures pratiques de température dans les domaines scientifiques et industriels. L'idée fondamentale qui a présidé à l'établissement de l'EIPT-68 était que cette échelle soit lisse par rapport à la température thermodynamique et que ses valeurs numériques soient très voisines des températures thermodynamiques. Toutefois, depuis que cette échelle a été établie et à la suite de nouveaux travaux expérimentaux, il est devenu évident que dans certains domaines de température l'EIPT-68 s'écarte nettement de la température thermodynamique. Ce fait a été reconnu dans l'édition amendée de 1975 de l'EIPT-68 par la suppression du tableau VII de l'édition originale. Ce tableau comportait une liste d'estimations de l'incertitude sur les températures thermodynamiques correspondant aux valeurs assignées aux points fixes de définition de l'EIPT-68. A la place, l'édition de 1975 contient dans l'annexe le texte suivant :

"Ces incertitudes avaient été évaluées sur la base des meilleures données dont on disposait au moment où l'EIPT-68 a été élaborée. Depuis lors, de nouveaux travaux ont montré que l'EIPT-68 s'écarte vraisemblablement de la température thermodynamique, au-dessus de 0,01 °C, à la fois aux points fixes de définition et entre ces points, de quantités supérieures aux incertitudes indiquées. Des estimations révisées de ces incertitudes seront donc publiées de temps en temps par le Comité Consultatif de Thermométrie."

Lors de sa 11^e session en juin 1976, et sur la base des résultats expérimentaux disponibles à l'époque (Voir la 1^{re} partie de ce Rapport) le CCT est arrivé à la conclusion que les meilleures estimations de ces différences au-dessus de 0 °C sont les suivantes :

1. Dans le domaine de 0 °C à 460 °C les différences entre les températures dans l'EIPT-68 et la température thermodynamique sont données dans le tableau ci-après :

t	$T - T_{68}$	t	$T - T_{68}$
0 °C	0 mK	260 °C	- 44,9 mK
20	- 1,4	280	- 45,7
40	- 6,3	300	- 46,7
60	- 12,6	320	- 48,1
80	- 19,2	340	- 50,0
100	- 25,2	360	- 52,6
120	- 30,4	380	- 56,0
140	- 34,7	400	- 60,4
160	- 37,9	420	- 65,9
180	- 40,4	440	- 72,6
200	- 42,1	460	- 80,6
220	- 43,3	480	- 89,9
240	- 44,2		

2. Les meilleures estimations de la température thermodynamique des points fixes de l'EIPT-68 dans ce domaine sont les suivantes :

Point d'ébullition de l'eau	$T = 373,125 \text{ K} \pm 0,003 \text{ K}$ $t = 99,975 \text{ °C} \pm 0,003 \text{ °C}$
Point de l'étain	$T = 505,074 \text{ K} \pm 0,004 \text{ K}$ $t = 231,924 \text{ °C} \pm 0,004 \text{ °C}$
Point du zinc	$T = 692,664 \text{ K} \pm 0,006 \text{ K}$ $t = 419,514 \text{ °C} \pm 0,006 \text{ °C}$

Les incertitudes indiquées représentent les estimations actuelles de l'incertitude totale (avec un taux de confiance de 99 %) fondées sur les meilleurs renseignements expérimentaux disponibles.

3. En attendant que de nouvelles mesures soient faites jusqu'à 630 °C, il n'est pas possible de tirer de conclusion en ce qui concerne l'écart par rapport à la température thermodynamique du point de l'or ; on peut seulement dire qu'un écart supérieur à 0,5 K semble peu probable.

4. D'après des mesures effectuées au pyromètre optique il paraît certain que l'intervalle de température thermodynamique compris entre le point de l'or et le point de l'argent est plus petit de $0,14 \text{ K} \pm 0,05 \text{ K}$ que celui qui est admis dans l'EIPT-68.

5. D'après des mesures effectuées au pyromètre optique et par d'autres méthodes, il paraît certain que l'équation d'interpolation du thermocouple utilisée pour définir l'EIPT-68 ne donne pas une bonne représentation de la température thermodynamique entre 630,74 °C et le point de l'argent et que vraisemblablement $t - t_{68}$ s'élève à environ 0,5 K au voisinage de 800 °C.

**Résumé du 3^e Rapport
du Groupe de travail 4***

(Températures inférieures à 100 K)

(Traduction du Document CCT/76-5 bis)

1. *Introduction*

Depuis les cinq documents énumérés dans le précédent Résumé des Rapports du Groupe de travail 4 (GT 4) [1], ce Groupe a présenté aux membres du CCT deux rapports** :

1. Rapport de 1976 du GT 4 (Document CCT/76-5).
2. Additif au Rapport de 1976 du GT 4 (Document CCT/76-55).

On indiquera dans le présent résumé les points principaux de ces deux documents. L'essentiel des récents travaux du GT 4 est la proposition faite au CCT d'une nouvelle échelle provisoire pratique de température pour le domaine de 0,5 K à 30 K. Le CCT a approuvé cette échelle et l'a soumise au CIPM sous le nom de "Echelle Provisoire de Température de 1976 entre 0,5 K et 30 K" (EPT-76) ; le CIPM l'a approuvée lors de sa session de septembre 1976.

* Les membres de ce Groupe de travail sont MM. DURIEUX, Président, Kamerlingh Onnes Laboratorium (Pays-Bas), W.R.G. KEMP, National Measurement Laboratory (Australie), C.A. SWENSON, Iowa State University (U.S.A.), D.N. ASTROV, Institut des Mesures Physicotechniques et Radiotechniques (U.R.S.S.).

** Communiqués aux membres du CCT respectivement en avril 1976 et juin 1976 ; ces deux rapports ont été discutés à la 11^e session du CCT en juin 1976.

2. *Comparaison internationale de thermomètres à résistance de germanium entre 1 K et 30 K*

Ces comparaisons, dont il a été longuement question dans le précédent résumé, ont été achevées et les résultats en ont été publiés dans *Metrologia* [2]. Grâce aux efforts du National Measurement Laboratory et à la coopération des nombreux autres laboratoires qui ont envoyé leurs thermomètres, la comparaison a été un succès ; on dispose maintenant d'une quantité importante d'informations sur les différences qui existent entre les échelles à basses températures des différents laboratoires et sur les réalisations de l'échelle internationale et des points de référence des divers instituts. Les résultats des comparaisons ont constitué la base qui a permis de proposer une échelle pratique de température susceptible d'être acceptée sur le plan international.

3. *Comparaison internationale de thermomètres à résistance de platine*

Ce travail, effectué par Ward et Compton au NPL, en est au stade final et les résultats complets seront bientôt publiés dans *Metrologia*. On a reçu et comparé des thermomètres à résistance de platine étalonnés d'après l'EIPT-68 dans de nombreux laboratoires. Dans l'ensemble, les différences entre les réalisations de l'EIPT-68 sont faibles, mais on a trouvé des différences de 2 mK, et dans quelques cas même davantage. (Un autre aspect intéressant est la récente comparaison des réalisations du point triple de l'argon dans trois laboratoires (Document CCT/76-32) et des points triples de l'oxygène et de l'argon dans deux laboratoires (Document CCT/76-40)).

4. *Mesures en cours de températures thermodynamiques entre 0,5 K et 100 K*

Ainsi qu'il est indiqué dans le rapport de mars 1976, ces mesures comprennent :

1. Mesures d'isothermes pV et mesures au thermomètre à gaz faites par K.H. Berry au NPL. Elles sont maintenant achevées. Elles ont donné l'échelle du thermomètre à gaz NPL-75 ; elles ont également fourni des indications sur les 2^e et 3^e coefficients du viriel de ⁴He entre 2,6 et 27 K. L'échelle a été transférée sur des thermomètres à résistance de rhodium-fer.

(Ces thermomètres, mis au point par R.L. Rusby au NPL, semblent être très stables, davantage même que les thermomètres à résistance de germanium.) L'échelle NPL-75 est la seule à fournir des données précises récentes sur des mesures de température thermodynamique entre 4 K et 30 K ; elle a joué un rôle important dans l'établissement de l'EPT-76.

Autant que nous le sachions, des thermomètres à gaz à volume constant, ayant pour but de réaliser une échelle (maintenant l'EPT-76) entre 4 K et 20 K, sont en cours d'installation à la PTB, au NRLM et au NML, en projet à l'ASMW.

Au KOL on poursuit à l'heure actuelle entre 3 K et 30 K des mesures fondamentales d'isothermes du type de celles qui ont été faites au NPL. On envisage d'étendre ces mesures de part et d'autre de ce domaine de température.

2. A la suite des travaux de Pickup (NPL) au thermomètre à bruit, travaux qui ont confirmé à $\pm 0,01$ K près la valeur admise dans l'EIPT-68 pour le point d'ébullition de l'oxygène, l'équipe de L. Storm à l'Université de Münster a donné ses résultats sur le thermomètre à bruit [3] : le point d'ébullition de ^4He a été trouvé à $(4,222\ 0 \pm 0,001)\text{K}$ ce qui est en excellent accord avec la valeur donnée par Berry (4,222 1 K). Les travaux sur le thermomètre à bruit se poursuivent à Münster ; on y dispose maintenant de résultats préliminaires jusqu'à 3 K.

3. Le thermomètre à bruit a apporté une contribution intéressante à la connaissance des températures thermodynamiques aux basses températures ; en effet le thermomètre acoustique, qui, seul avec le thermomètre à gaz, permet de déterminer les températures thermodynamiques, fait encore l'objet de multiples problèmes relatifs à l'interprétation théorique des résultats qui ne sont pas encore cohérents (Document CCT/76-29).

4. La compilation finale des résultats obtenus par Sherman au Los Alamos Scientific Laboratory au moyen du thermomètre à gaz à permittivité est en cours de publication dans *Metrologia*. D. Gugan à l'University of Bristol et A.R. Colclough au NPL ont entrepris de nouveaux travaux de thermométrie à gaz utilisant la permittivité et l'indice de réfraction. On n'a pas encore leurs résultats.

5. Au NPL on a travaillé sur le thermomètre magnétique entre 0,5 K et 3 K en utilisant le nitrate double de cérium et de magnésium comme sel paramagnétique. On y a fait des comparaisons

de l'échelle magnétique avec les échelles de pression de vapeur de l'hélium ; les résultats ont servi de base pour établir l'EPT-76 au-dessous de 2,6 K. De nouvelles installations de thermométrie magnétique jusqu'à 30 K ont été réalisées au NBS [4].

6. Les rapports de 1976 ont entre autres mentionné l'effort poursuivi par le NBS pour rechercher d'autres points de référence supraconducteurs au-dessus de 7,2 K (point du plomb) et au-dessous de 0,5 K (point du cadmium), sur l'utilisation des transitions α - β et β - γ dans l'oxygène solide comme points de référence et sur la réalisation des points triples du krypton et du xénon.

5. *L'échelle provisoire de température de 1976 entre 0,5 K et 30 K (EPT-76)*

Le rapport de mars 1976 décrit les travaux préparatoires pour établir une échelle provisoire de température entre 0,5 K et 30 K. Dans l'additif à ce rapport on a pu faire une proposition définitive qui a été approuvée par le CCT à sa 11^e session sous le nom "Echelle provisoire de température de 1976 entre 0,5 K et 30 K". Il était urgent que cette échelle soit établie : les écarts entre les échelles actuellement utilisées, l'"Echelle ⁴He 1958" et l'"Echelle ³He 1962", et les températures thermodynamiques, les irrégularités qui existent dans l'EIPT-68 au-dessous de 30 K et l'absence d'une échelle admise entre 4,2 K et 13,81 K avaient conduit plusieurs instituts à établir leur propre échelle de température dans ce domaine.

Les grandes lignes de cette échelle (EPT-76) sont données à l'Annexe T 5^{bis} du présent volume et dans le Rapport abrégé présenté à la 65^e session du CIPM (1976). Le CIPM a approuvé cette échelle dont le texte complet, avec des renseignements complémentaires concernant son obtention et sa réalisation, paraîtra dans *Metrologia* à l'automne.

L'EPT-76 est conçue pour être une échelle pratique de travail, lisse par rapport aux températures thermodynamiques, et exacte par rapport à ces mêmes températures à ± 1 mK près au-dessous de 4 K et à ± 5 mK près jusqu'à 30 K ; cette échelle rejoint de façon lisse l'EIPT-68 au voisinage de 30 K. Il est recommandé de l'utiliser jusqu'à l'adoption d'une nouvelle Echelle Internationale Pratique de Température.

6. Futures tâches du GT 4

Le GT 4 envisage dans les toutes prochaines années l'établissement de nouvelles échelles de pression de vapeur de l'hélium. On pense que ces nouvelles échelles de l'hélium seront cohérentes à ± 1 mK près avec l'EPT-76.

On pense que l'EIPT-68 sera remplacée en 1983, ou peut-être en 1987. On espère que d'ici là la thermométrie absolue entre 20 K et 90 K aura donné des résultats complémentaires qui permettront de déterminer la température thermodynamique des points de référence avec une exactitude plus grande (cela implique de vérifier les travaux du NPL sur les isothermes au-dessous de 27 K). Le thermomètre à gaz et le thermomètre magnétique, dont l'utilisation est recommandée entre 4 K et 14 K dans l'EPT-76, pourraient également servir à définir une future EIPT dans ce domaine ; cependant pour la dissémination pratique de l'échelle, une définition fondée sur des thermomètres à résistance étalonnés à quelques températures de référence serait plus commode.

BIBLIOGRAPHIE

1. *Comité Consultatif de Thermométrie*, 10^e session, 1974, p. T 69.
2. BESLEY (L.M.) et KEMP (W.R.G.), *Metrologia*, 13, 1977, p. 35.
3. Ce volume, Annexe T 7.
4. *Ibid.*, Annexe T 10.

Reçu le 30 mars 1977.

ANNEXE T 5 bis

**Additif au 3^e Rapport
du Groupe de travail 4**

(Traduction du Document CCT/76-55)

PROPOSITION POUR UNE ÉCHELLE PROVISOIRE PRATIQUE DE
TEMPÉRATURE ENTRE 0,5 K ET 30 K*

Des mesures faites avec des thermomètres magnétiques et avec un thermomètre à gaz ont montré que les échelles pratiques de température couramment utilisées au-dessous de 30 K (c'est-à-dire l'"Echelle ⁴He 1958" et l'EIPT-68) sont en désaccord entre elles et avec la température thermodynamique. Entre 5,2 K et 13,81 K, il n'existe aucune échelle pratique recommandée sur le plan international.

En conséquence, nous proposons au CCT une nouvelle échelle provisoire pratique de température, appelée "Echelle provisoire de température de 1976 entre 0,5 K et 30 K" (EPT-76). Pour obtenir l'EPT-76 on a pris pour principe que, dans la mesure du possible, cette échelle devait concorder avec la température thermodynamique, en particulier qu'elle devait être lisse par rapport à la température thermodynamique.

* *Note du BIPM.* Le Comité International des Poids et Mesures, lors de sa session de septembre 1976, a approuvé le principe de cette nouvelle échelle appelée "Echelle provisoire de température de 1976 entre 0,5 K et 30 K" (EPT-76) dont le symbole de la température est T_{76} .

On a adopté cette appellation dans la traduction de ce document.

De plus, nous avons admis que l'EPT-76 devait se relier de façon lisse à l'EIPT-68 à 27 K.

Obtention de l'échelle provisoire entre 0,5 K et 30 K

Depuis 1970, plusieurs laboratoires ont établi des échelles magnétiques de température, une échelle de température fondée sur le thermomètre acoustique (NBS) et, tout récemment, une échelle de température fondée sur des mesures au thermomètre à gaz (et des mesures d'isothermes) (NPL). La plupart de ces échelles ont été comparées entre elles, à l'"Echelle ^4He 1958" et à l'EIPT-68 lors des comparaisons d'échelles effectuées au NML.

Comme base pour l'EPT-76 nous avons choisi de prendre l'échelle magnétique T_{XAC} , qui a été utilisée pour la comparaison d'échelles faite au NML.

Les raisons de ce choix sont les suivantes :

1. En tant qu'échelle magnétique T_{XAC} , est particulièrement lisse et elle s'étend de 1 K à 35 K. (Parmi les diverses échelles magnétiques, T_{XAC} , est définie sur le domaine de température le plus large et c'est la seule qui soit, vers le bas, fondée sur le nitrate double de cérium et de magnésium pour lequel l'écart par rapport à la loi de Curie est très faible et bien connu).

2. L'échelle T_{XAC} , est en bon accord avec les déterminations de la température thermodynamique au-dessous de 14 K et elle se raccorde bien à l'EIPT-68 à 27 K. Au-dessus de 14 K, l'échelle T_{XAC} , s'écarte peu et sans irrégularités des mesures récentes de températures thermodynamiques. (Comme les écarts entre les températures T_{76} et les températures thermodynamiques sont réguliers, on pourra faire d'éventuels ajustements sans nuire au caractère lisse de cette nouvelle échelle).

La figure 1 donne une estimation des différences de T_{XAC} , par rapport à l'"Echelle ^4He 1958" (température T_{58}), à l'EIPT-68, à l'échelle NBS 2-20 K, à l'échelle NPL-75 du thermomètre à gaz (isotherme) et à la récente détermination du point d'ébullition de ^4He avec un thermomètre à bruit à Münster [1]. La figure montre le désaccord de l'échelle de pression de vapeur de l'hélium et de l'EIPT-68 avec la température thermodynamique, et le grand avantage de T_{XAC} , à cet égard.

Au-dessous de 3,2 K, l'EPT-76 est en accord avec les résultats obtenus récemment au NPL avec le thermomètre magnétique jusqu'à 0,8 K et avec les calculs thermodynamiques de la pres-

sion de vapeur de ^4He liquide. Pour obtenir les températures T_{76} entre 0,8 K et 0,5 K on supposera que l'on peut extrapoler proportionnellement à T les différences $T_{76} - T_{62}$ (T_{62} représentant les températures dans l'"Echelle ^3He 1962") obtenues au-dessus de 0,8 K.

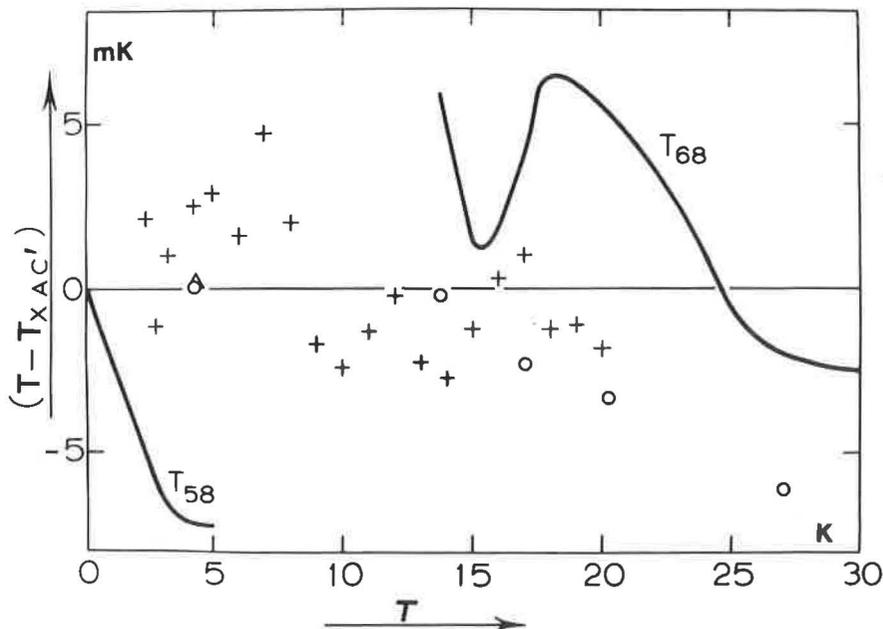


Fig. 1.- Différences entre diverses échelles à basses températures et l'échelle magnétique de température $T_{XAC'}$.

+ Echelle NBS 2-20

o Echelle du thermomètre à gaz NPL-75

Δ Thermomètre à bruit (point d'ébullition de ^4He)

Des tables donneront les relations entre T_{76} et $T_{62'}$, T_{58} ou T_{68} :

$T_{62} - T_{76}$ de 0,5 K à 0,3 K

$T_{58} - T_{76}$ de 1 K à 5,2 K

$T_{68} - T_{76}$ de 13,81 K à 30 K.

On donnera les valeurs des températures T_{76} aux points de transition des supraconducteurs : cadmium (0,5 K), zinc (0,85 K), aluminium (1,2 K), indium (3,4 K) et plomb (7,2 K), ainsi qu'au point triple du néon (24,5 K).

Réalisations de l'Echelle

1. On pourra utiliser un thermomètre magnétique pour lequel une loi telle que $X = A + B/(T + \Delta + \gamma/T)$ est valable. Il faudra déterminer les constantes A , B , Δ et γ par étalonnage aux températures de référence pour lesquelles T_{76} est spécifiée. (Il n'est pas nécessaire que les points d'étalonnage soient tous situés au-dessous de 30 K. On peut utiliser des points situés dans l'EIPT-68 au-dessus de 30 K puisque cette échelle se raccorde de façon lisse à l'EPT-76. Evidemment, dans ce cas les critères de qualité du thermomètre magnétique seront plus rigoureux que lorsque toutes les températures d'étalonnage sont prises au-dessous de 30 K).

2. On pourra utiliser un thermomètre à gaz ajusté sur l'EPT-76 à au moins deux températures de référence.

3. Dans les domaines de températures pour lesquels T_{58} , T_{62} ou T_{68} sont définies, on pourra réaliser l'EPT-76 en utilisant les différences entre ces températures et T_{76} .

4. Il sera également possible d'obtenir l'EPT-76 directement à partir de thermomètres étalonnés par rapport à l'échelle T_{XAC} (0,95 - 30 K), par rapport à T_{NBS} 2-20 K (2 - 20 K) ou par rapport à l'une des échelles magnétiques de l'IMPR (4,2 - 20 K), du KOL (1,8 - 30 K), du NML (1 - 30 K) et du NBS (2 - 30 K). Pour toutes ces échelles (à l'exception bien entendu de T_{XAC} , elle-même) on trouvera dans [2], au sujet des comparaisons d'échelles faites au NML, les différences par rapport à T_{XAC} . L'échelle T_{XAC} est probablement identique à l'EPT-76 (si de petites différences entre ces deux échelles apparaissent, on les donnera).

On pourra également obtenir l'EPT-76 à partir de thermomètres étalonnés dans l'échelle NPL-75, en utilisant les différences $T_{NPL-75} - T_{76}$ que l'on donnera.

Proposition pour la procédure à suivre pour introduire l'EPT-76

Le Groupe de travail 4 se propose de présenter l'EPT-76 dans un document qu'il adressera à tous les membres du CCT pour approbation avant publication dans *Metrologia*, de façon que cette échelle puisse être publiée sous les auspices du CCT. Nous espérons que ceci pourra être fait avant la fin de 1976. Le Groupe de travail 4 espère que le CCT pourra prendre, au cours de la présente session, la décision de demander au CIPM une telle autorisation.

(Comme nous pensons que le document sur l'EPT-76 destiné à *Metrologia* sera bientôt prêt, nous annulons la proposition que nous avons faite à l'Annexe 1, page 8 du rapport de mars 1976 du Groupe de travail 4 [3]).

LES NOUVELLES ÉCHELLES DE L'HÉLIUM LIQUIDE

L'EPT-76 fournira une base pour le calcul des nouvelles relations de pression de vapeur de ^4He et ^3He liquides. Au-dessous de 3,2 K, on utilisera la détermination de ces relations avec un thermomètre magnétique au nitrate double de cérium et de magnésium faite au NPL, ainsi que les calculs thermodynamiques de l'équation de pression de vapeur de ^4He au-dessous de 2 K (KOL). La relation de pression de vapeur de ^3He sera dérivée des résultats du NPL en collaboration avec R.H. Sherman et S.G. Sydorjak du Los Alamos Scientific Laboratory.

Le Groupe de travail 4 se propose de présenter les nouvelles échelles de l'hélium dans un document destiné à *Metrologia*. On enverra ce document à tous les membres du CCT pour approbation. Si cela peut être fait avant septembre 1977, nous proposons que le CCT se mette d'accord par correspondance pour présenter ces échelles au CIPM en 1977. Sinon, nous espérons que le CCT sera en mesure de prendre cette décision lors de sa prochaine session qui devrait avoir lieu en 1978.

BIBLIOGRAPHIE

1. Ce volume, Annexe T 7.
2. Ce volume, Annexe T 11.
3. Ce volume, Annexe T 1, document CCT/76-5.

Reçu le 15 juin 1976.

ANNEXE T 6

Résumé du 1^{er} Rapport du Groupe de travail 5*

(Thermomètres aux températures inférieures à 30 K)

(Traduction du Document CCT/76-4 bis)

Comme première tâche, le Groupe de travail 5 a entrepris de faire un relevé de l'état actuel du savoir-faire dans le domaine de la thermométrie aux basses températures ; il a aussi entrepris de donner une appréciation sur tous les thermomètres les plus utiles, avec des commentaires sur de nombreuses caractéristiques telles que la reproductibilité, la sensibilité, la facilité d'étalonnage, le coût, etc.

Après quelques discussions préliminaires on a décidé de préparer un tableau à double entrée donnant pour chacun des divers types de thermomètres et pour 16 caractéristiques de fonctionnement, une appréciation du type "bon", "moyen" ou "médiocre". On a appliqué une méthode de pondération pour préparer un "tableau des moyennes" qui traduise au mieux l'ensemble des opinions individuelles des trois membres. Les résultats relatifs à la sensibilité, que l'on ne pouvait pas résumer de cette façon, ont été présentés sous forme graphique.

Reçu le 22 novembre 1976.

* Les membres de ce Groupe de travail sont MM. R.P. HUDSON, Président, National Bureau of Standards (U.S.A.), K. MITSUI, National Research Laboratory of Metrology (Japon), R.L. RUSBY, National Physical Laboratory (Royaume-Uni).

Le rapport complet (Document CCT/76-4) a été communiqué aux membres du CCT en mars 1976 et discuté à la 11^e session du CCT en juin 1976.

Mesure de la température du point d'ébullition de ^4He au moyen d'un thermomètre à bruit

par H. H. KLEIN, G. KLEMPPT et L. STORM

Université de Münster (Rép. Féd. d'Allemagne)

(Traduction du Résumé du Document CCT/76-12)

On a construit un thermomètre à bruit fonctionnant selon une méthode de corrélation pour mesurer le point d'ébullition de ^4He . La figure 1 montre le schéma de l'installation.

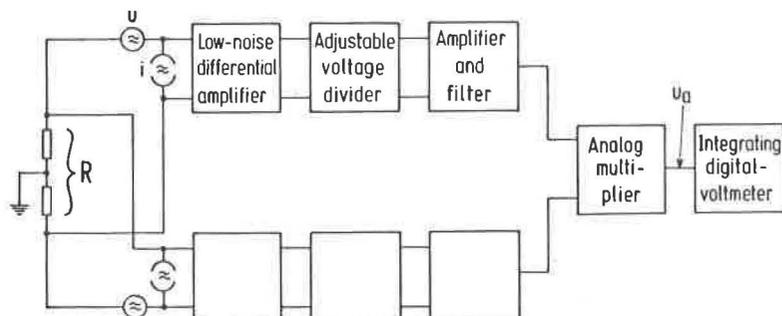


Fig. 1.- Schéma de l'installation du thermomètre à bruit.

Le bruit thermique de l'élément sensible R est reçu par deux préamplificateurs identiques, montés en parallèle, suivis d'un multiplicateur analogique ; on mesure la valeur moyenne $\langle u_a \rangle$ du produit. On peut tenir compte du bruit interne des préamplificateurs au moyen d'une source de tension équivalente u et d'une source de courant i .

D'après la théorie, la valeur de u_a est donnée par

$$(1) \quad \langle u_a \rangle = E \cdot [RT + AR^2]$$

E et A sont des constantes de l'appareil. E est déterminé par le gain des amplificateurs. Le terme AR^2 correspond essentiellement à la contribution des sources de courant i . Dans le cas d'un choix correct des paramètres, les sources de tension u ainsi que le bruit thermique des conducteurs ne contribuent pratiquement pas à $\langle u_a \rangle$.

Pour mesurer une basse température T_{He} , on met l'élément sensible dans le cryostat ($\langle u_a \rangle = u_{He}$, $R = R_{He}$), puis dans une cellule à point triple de l'eau à température T_{Tr} ($\langle u_a \rangle = u_{Tr}$, $R = R_{Tr}$). A la température du point triple, l'amplification est réduite par un facteur α (diviseur de tension), de telle sorte que l'amplificateur fonctionne dans les mêmes conditions pour les deux mesures. Le terme

$$(2) \quad F(R_{He}) = \frac{u_{He} \cdot R_{Tr}}{u_{Tr} \cdot R_{He}} \cdot \alpha \cdot T_{Tr} = T_{He} + A R_{He}$$

a été mesuré avec quatre résistances différentes à 104 274,1 Pa. La figure 2 donne les résultats des mesures (étoiles). L'équation linéaire (2) est confirmée dans les limites des erreurs statistiques (voir ci-dessous). On obtient T_{He} par extrapolation à $R_{He} = 0$. Un calcul par la méthode des moindres carrés donne $T_{He} = 4,252 7$ K avec $p = 104 274$ Pa.

Dans une autre série de mesures on a modifié les niveaux de bruit des préamplificateurs. Dans les limites d'erreur statistique, on obtient la même valeur pour T_{He} (points sur la figure 2).

Erreurs sur les mesures

On a calculé que l'erreur statistique due au temps d'intégration fini (50 000 s) était de $\pm 8 \times 10^{-5} \hat{=} \pm 0,34$ mK (taux de confiance 0,95).

On a vérifié la stabilité à long terme du thermomètre à bruit ; on a mesuré des variations à court terme de $\pm 5 \times 10^{-5} \hat{=} \pm 0,21$ mK ; toutefois on n'a décelé aucune dérive à long terme.

On a mesuré le facteur de réduction α à $\pm 1 \times 10^{-5} \hat{=} \pm 0,04$ mK près en courant continu. Le diviseur de tension est indépendant de la fréquence jusqu'à la limite supérieure des

filtres (16 kHz).

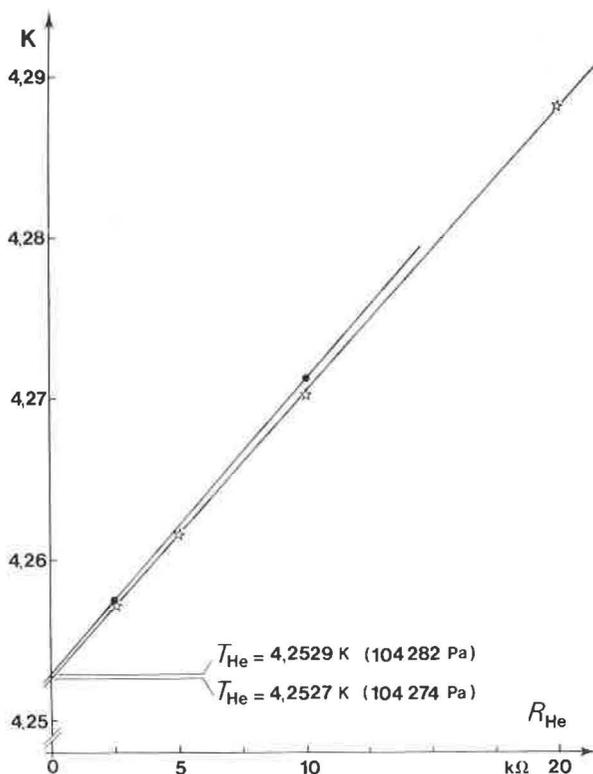


Fig. 2.- Détermination de la température du point d'ébullition de ^4He .

- \star 1^{re} série de mesures
- \bullet 2^e série de mesures

On a mesuré le rapport de résistance R_{Tr}/R_{He} à $\pm 1 \times 10^{-5}$ près en courant continu. Comme $R_{Tr} \approx R_{He}$, on peut aisément tenir compte du petit terme correctif en fréquence dû aux capacités parasites.

On a évalué les erreurs du multiplicateur dues au bruit des préamplificateurs à moins de $\pm 5 \times 10^{-5}$ quand R a sa valeur la plus faible.

Stabilité de la température : On avait placé le thermomètre à pression de vapeur et le thermomètre à bruit dans un bloc de cuivre pur ; on a maintenu constante la température de ce bloc à $\pm 0,11 \text{ mK}$ pendant la durée des mesures, au moyen d'un chauffage contrôlé électroniquement.

Mesures de la pression : On contrôlait de façon permanente la jauge de pression capacitive au moyen d'une balance de pression

Bell et Howell (précision : $\pm 1,5 \times 10^{-4} \triangleq \pm 0,16$ mK à 101 325 Pa). On déterminait expérimentalement la correction de pression de l'air, dont on a tenu compte.

Erreur statistique	0,34 mK
Stabilité à long terme du thermomètre à bruit	0,21 mK
Facteur de réduction	0,04 mK
Rapport de résistance	0,04 mK
Erreur de l'amplificateur	0,21 mK
Stabilité de la température	0,11 mK
Mesure de la pression	0,16 mK

$$\sqrt{\Sigma \epsilon^2} = 0,5 \text{ mK} \quad \Sigma |\epsilon| = 1,1 \text{ mK}$$

La température mesurée à 104 274 Pa est supérieure de 7,0 mK à la valeur calculée dans l'"Echelle ^4He 1958". Ceci conduit à la conclusion que la température thermodynamique du point d'ébullition normal de ^4He est

$$T = 4,222 \text{ O K} \pm 1 \text{ mK}$$

$$p = 101 \text{ 325 Pa (= 760 Torr)}.$$

Les auteurs remercient le Prof. Dr. U. Schley et le Prof. Dr. W. Thomas de la Physikalisch-Technische Bundesanstalt pour leurs suggestions et discussions nombreuses et profitables.

Document original reçu le 12 avril 1976,
résumé reçu le 27 août 1976.

Équation thermodynamique de la pression de vapeur de ${}^4\text{He}$ liquide au-dessous de 2,15 K

par J. E. VAN DIJK, H. TER HARMSEL et M. DURIEUX

Kamerlingh Onnes Laboratorium (Pays-Bas)

(Traduction du Document CCT/76-9)

On peut calculer la pression de vapeur de ${}^4\text{He}$ liquide à partir de l'équation thermodynamique :

$$\ln p = i_0 - L_0/RT + 5/2 \ln T - \frac{1}{RT} \int_0^T S_L dT + \frac{1}{RT} \int_0^p V_L dp + \epsilon \quad (1)$$

$$i_0 = \ln \{ (2\pi m)^{3/2} (R/N_A)^{5/2} h^{-3} \} \quad (2)$$

$$\epsilon = \ln \frac{pV}{RT} - \frac{2B}{V_g} - \frac{3C}{2V_g^2} \quad (3)$$

Le tableau I donne l'influence des petits termes correctifs dans l'équation 1.

Tableau I

*Importance des termes correctifs dans l'équation 1,
exprimés en millikelvins*

$-B/V_g - B/2V_g^2 - C/2V_g^2$ donne approximativement ϵ .

$T(K)$	$\frac{1}{RT} \int_0^T S_L dT$	$\frac{1}{RT} \int_0^p V_L dp$	$-B/V_g - B/2V_g^2$	$-C/2V_g^2$	Total
0,5	0,003	0	0	0	0,003
1,0	0,13	- 0,005	- 0,09	- 0,002	0,03
1,2	0,5	- 0,03	- 0,4	- 0,01	0,06
1,4	1,7	- 0,12	- 1,3	- 0,05	0,2
1,6	4,6	- 0,4	- 3,3	- 0,13	0,8
1,8	11,1	- 0,9	- 6,8	- 0,3	3,1
2,0	24,0	- 1,8	- 12,8	- 0,5	8,9
2,15	41,5	- 2,9	- 18,8	- 0,7	19,1

Le tableau II donne l'estimation grossière des incertitudes sur les termes correctifs et les incertitudes provenant des constantes physiques utilisées. L'incertitude totale sur les constantes intervenant dans i_0 (à l'exclusion de la constante des gaz R) est évaluée à 100×10^{-6} . Nous avons calculé la variation de $\ln p$ due à une variation de R égale à 160×10^{-6} . Nous avons admis une incertitude de 1 % sur la capacité thermique et le volume molaire du liquide. Pour l'incertitude sur B nous avons pris 3 % à 2,15 K, 6 % à 1,6 K et 15 % à 1 K. L'influence de C est totalement incertaine. Nous avons utilisé pour C une "moyenne raisonnable" de deux séries de résultats, la première étant calculée à partir des masses volumiques de la vapeur, elles-mêmes calculées à partir des données de chaleur latente [1], la seconde à partir des masses volumiques de la vapeur mesurées directement [2] (en utilisant pour les deux séries les mêmes valeurs de B).

Tableau II

Estimation des incertitudes dans le calcul thermodynamique de l'équation de pression de vapeur de ^4He , en millikelvins

$T(K)$	δi_0 (excl. δR)	δR	$\delta \int S_L dT$	$\delta \int V_L dp$	δB	δC
0,5	0	0	0	0	0	0
1,0	0	0,05	0	0	0	0
1,2	0	0,05	0	0	0,05	0
1,4	0	0,05	0	0	0,1	0,05
1,6	0	0,1	0,05	0	0,2	0,15
1,8	0,05	0,1	0,1	0	0,3	0,3
2,0	0,05	0,1	0,25	0	0,45	0,5
2,15	0,05	0,15	0,4	0,05	0,55	0,7

Il découle des tableaux I et II que l'influence des termes correctifs et des incertitudes sur ces termes croît rapidement au-dessus de 1,7 K.

Nous avons calculé au moyen d'un ordinateur la pression de vapeur pour L_0 égal à 59,50, 59,62 et 59,852 J/mol. Nous avons pris $i_0 = 1,584 45 + \ln(K^{-5/2})$ et $R = 8,314 41$ J/mol.K. Pour le calcul de $\int S_L dp$ nous sommes partis d'une nouvelle analyse des valeurs disponibles de la capacité thermique du liquide ; pour le calcul de $\int V_L dp$ nous avons utilisé essentiellement les données qui ont été utilisées pour T_{L55} . Pour B nous avons utilisé les valeurs de KKHM [3] ramenées aux valeurs de Berry [4] à 20 K et à 4 K : $B = B_{KKHM} + 1,33 - 31/T$ cm³/mol, et pour C nous avons utilisé la valeur de C indiquée ci-dessus, en utilisant B ainsi calculé.

La façon la plus exacte de déterminer L_0 est à l'heure actuelle d'ajuster L_0 de telle manière que l'équation thermodynamique de pression de vapeur rejoigne de façon lisse une échelle magnétique de température entre 1 K et 1,7 K. Ceci, parce que l'on n'a pas fait de mesure de la chaleur de vaporisation aux très basses températures et qu'il n'existe aucun résultat exact au thermomètre à gaz au-dessous de 2 K. A l'heure actuelle, une valeur acceptable de L_0 est 59,852 J/mol.K. Aux basses températures, l'"Echelle ^4He 1958" (T_{58}) est fondée sur $L_0 = 59,62$ J/mol.K. L'ancienne échelle T_{L55} de Leiden était fondé sur $L_0 = 59,50$ J/mol.K.

Avec ces données les calculs étaient exacts (par exemple on a recalculé les capacités thermiques du liquide pour chaque échelle de façon homogène). Les résultats sont donnés au tableau III ; $T_{59,50}$, $T_{59,62}$ et $T_{59,852}$ indiquent les températures dans les échelles calculées.

Tableau III

Différences, en millikelvins, entre les températures dans les échelles calculées et T_{L55} ou T_{58}

T	$T_{59,50} - T_{L55}$	$T_{59,62} - T_{58}$	$T_{59,852} - T_{58}$
0,25	0,06	0,06	0,96
0,5	0,12	0,11	1,81
0,75	0,15	0,15	2,45
1,0	0,19	0,20	3,07
1,2	0,21	0,22	3,50
1,4	0,14	0,14	3,79
1,6	0,00	0,02	4,02
1,8	- 0,10	- 0,03	4,28
2,0	- 0,25	- 0,06	4,54
2,1	- 0,39	- 0,12	4,61
2,15	- 0,44	- 0,14	4,65

BIBLIOGRAPHIE

1. TER HARMSEL (H.), VAN DIJK (H.) et DURIEUX (M.), *Physica*, 36, 1967, p. 620.
2. EL HADI (Z.E.H.A.) et DURIEUX (M.), *Physica*, 41, 1969, p. 305.
3. KILPATRICK (J.E.), KELLER (W.E.), HAMMEL (E.F.) et METROPOLIS (N.), *Phys. Rev.*, 94, 1954, p. 1103.
4. BERRY (K.H.), Thesis, Bristol, 1972.

Le thermomètre à gaz à volume constant comme instrument d'interpolation au-dessous de 20 K

par C. A. SWENSON

Iowa State University (États-Unis d'Amérique)

(Traduction du Document CCT/76-6)

En 1972, Barber a fait remarquer [1] que la relation que l'on admet généralement entre la température et le coefficient du viriel pour l'hélium gazeux ($B(T) = a + b/T$) se traduit par une relation à peu près linéaire entre la pression et la température, entre 4 K et 20 K, pour un thermomètre à gaz à volume constant de conception classique. L'intérêt de cette idée a été souligné par les récents travaux de Berry [2] sur le thermomètre à gaz ; Berry a confirmé cette relation linéaire, pour l'hélium, à $\pm 0,1 \text{ cm}^3/\text{mol}$ près, entre 4,2 et 20,3 K.

Il semblerait qu'un thermomètre à gaz à volume constant de conception classique présente plusieurs avantages sur le thermomètre magnétique comme instrument d'interpolation pour une EIPT entre le point d'ébullition de l'hélium et celui de l'hydrogène. D'abord, deux points d'étalonnage suffisent et l'échelle de température qui en résulte est intrinsèquement lisse. On peut définir "complètement" un thermomètre à gaz à volume constant d'après des données mécaniques, avec des défauts de linéarité faibles et facilement calculables. Dans le même ordre d'idées, on pourrait recalculer les échelles existantes du thermomètre à gaz à volume constant [3], échelles qui ont été établies en utilisant les valeurs admises pour les coefficients du viriel de l'hélium. On pourrait encaster

directement dans les parois du réservoir un certain nombre de thermomètres secondaires à résistance pour avoir un contact thermique excellent et l'ancrage thermique des conducteurs ne poserait aucun problème.

La proposition de Barber correspond à l'un des choix possibles pour des paramètres d'un tel instrument, mais les nombreuses variantes possibles reproduiraient toutes la même échelle. Son thermomètre à gaz et les dispositifs annexes sont analogues à ceux de Berry [2] : volume du réservoir $V_T = 1000 \text{ cm}^3$, diamètre intérieur du capillaire 1 mm, volume $v_R = 8 \text{ cm}^3$ à la température ambiante, pression de remplissage $32 \times 10^3 \text{ Pa}$ à 20 K (240 Torr, 12 Torr/K). L'équation thermométrique pour cet instrument est :

$$T = T_1 + [(T_2 - T_1)/(P_2 - P_1)] (P - P_1) + \Sigma \Delta T_i,$$

où les écarts ΔT_i par rapport au comportement linéaire sont nuls à T_1 et à T_2 . Barber [1] a montré que les seuls ΔT_i qui soient importants pour cet instrument sont ceux qui sont liés aux volumes à température ambiante et au capillaire, avec $\Delta T = -2 \text{ mK}$ à 12 K (les valeurs de Barber pour ces effets sont affectées d'un signe inexact). On peut calculer très facilement ces écarts ΔT_i , de préférence à partir de la répartition effective des températures le long du capillaire, pour une réalisation de l'échelle de température à $\pm 0,5 \text{ mK}$.

Les principales incertitudes systématiques non calculables dans un instrument d'interpolation de ce type sont faibles et sont liées aux coefficients du viriel de l'hélium. En conséquence, on doit préciser la pression de remplissage du système à 20 K qui spécifie le volume molaire, bien que les résultats de Berry [2] conduisent à penser que même le fait de doubler les pressions données par Barber n'introduirait que de faibles incertitudes (inférieures à 1 mK). En fait le volume V_T du réservoir n'est pas critique ; le choix de Barber a été dicté en partie par le grand volume v_R à la température ambiante qui est dû à l'emploi d'une jauge de pression à diaphragme. Comme le ΔT dû au volume externe varie grossièrement comme v_R/V_T , toute diminution de v_R (en utilisant un manomètre à mercure, par exemple [3]) pourrait être accompagnée d'une réduction de V_T . Cela pourrait présenter un avantage dans des expériences pour lesquelles une moindre précision est suffisante ($\pm 2 \text{ mK}$ au lieu de $\pm 0,5 \text{ mK}$) et pour lesquelles les incertitudes du manomètre à mercure ne sont pas gênantes.

Thermomètre magnétique entre 1 K et 20 K utilisant l'éthylsulfate de néodyme

par B. W. MANGUM et W. J. BOWERS

National Bureau of Standards (États-Unis d'Amérique)

(Traduction du Résumé du Document CCT/76-15)

Dans le cadre de nos recherches sur les thermomètres magnétiques dans le domaine de 1 à 30 K, nous avons étudié l'éthylsulfate de néodyme (NES). Bien qu'on ne l'ait pas utilisé antérieurement comme thermomètre magnétique dans ce domaine de température, il est particulièrement intéressant à étudier car ses interactions magnétiques sont faibles, n'atteignant un état ordonné qu'à une température inférieure à 20 mK [1].

L'état fondamental de l'éthylsulfate de néodyme est un doublet de Kramers, de spin effectif $S = \frac{1}{2}$, avec $g_{\parallel} = 3,535$ et $g_{\perp} = 2,072$ [2]. Ainsi, c'est un matériau paramagnétique raisonnablement fort dans lequel les effets hyperfins sont négligeables au-dessus de 1 K. Le premier état excité se situe à 150 cm^{-1} au-dessus du doublet de l'état fondamental [3], ce qui assure que les anomalies du champ cristallin sont suffisamment petites pour être négligeables au-dessous de 20 K.

Comme l'éthylsulfate de néodyme est magnétiquement très dilué et comme on n'a décelé aucun effet d'échange dans les déterminations de la capacité calorifique au voisinage de 1 K, on peut vraisemblablement attribuer tout passage à l'état ordonné aux seules interactions dipolaires. Mis à part le fait qu'elles provoquent l'apparition d'un état ordonné magnétique, les interactions dipolaires (et les interactions hyperfines)

entraînent des écarts par rapport au comportement idéal (loi de Curie), en particulier à la limite inférieure du domaine de température. En supposant qu'il existe seulement des interactions dipolaires et des effets nucléaires hyperfins, Meyer [1] a calculé la susceptibilité pour un échantillon d'éthylsulfate de néodyme de forme sphérique :

$$(1) \quad \chi_{\parallel} = 1,716 \times 10^{-3} T^{-1} (1 + 0,0133 T^{-1} - 0,000 224 T^{-2})$$

Nous avons mesuré la susceptibilité en courant alternatif d'un échantillon sphérique en équilibre thermique avec quatre résistances de germanium que l'on avait étalonnées dans l'échelle provisoire de température NBS 2-20 (1965) [4]. En utilisant un interféromètre à laser pour mesurer les déplacements du piston, Plumb et Cataland ont fait une mise à jour de l'échelle 2-20 (que nous appellerons "l'échelle à laser") ; nous disposons aussi de cette nouvelle échelle par l'intermédiaire de nos résistances de germanium. Les températures auxquelles on a mesuré la susceptibilité étaient à quelques millikelvins près égales aux températures auxquelles les résistances de germanium avaient été étalonnées. Ces températures étaient celles auxquelles on avait étudié les isothermes dans le thermomètre acoustique.

Nous avons fait une première analyse de nos résultats en utilisant l'équation :

$$(2) \quad N = N_{\infty} + A (T^{-1} + 0,013 3 T^{-2} - 0,000 224 T^{-3})$$

dans laquelle N_{∞} et A étaient déterminés en appliquant la méthode des moindres carrés aux données (N) du pont d'inductance mutuelle, fonction de T^{-1} soit dans l'échelle à laser, soit dans l'échelle 2-20, et dans lesquelles les coefficients de non-idéalité étaient calculés à partir des interactions dipolaires et des effets hyperfins seulement. D'après cette première analyse il semble que l'éthylsulfate de néodyme soit un bon thermomètre magnétique dans le domaine de 1 à 20 K et qu'il soit bien décrit par l'équation (2).

Ajuster les résultats de la susceptibilité de l'éthylsulfate de néodyme à l'équation

$$(3) \quad N = N_{\infty} + AT^{-1} + BT^{-2} + CT^{-3} + \dots$$

pour lisser l'échelle à laser ou l'échelle 2-20, donne des résultats qui concordent dans l'ensemble avec ceux que l'on obtient à partir de l'équation (2).

D'après nos premiers résultats, il semblerait que l'éthylsulfate de néodyme soit un bon thermomètre magnétique ; il semblerait aussi que l'échelle acoustique, aussi bien dans l'échelle à laser que dans l'échelle 2-20, présente des erreurs de quelques millikelvins à plusieurs températures et que l'échelle 2-20 comporte quelques erreurs systématiques.

BIBLIOGRAPHIE

1. MEYER (H.), *Phil. Mag.*, 2, 1957, p. 521.
2. BLEANEY (B.), SCOVIL (H.E.D.) et TRENAM (R.S.), *Proc. Roy. Soc.*, A223, 1954, p. 15.
3. GRUBER (J.B.) et SATTEN (R.A.), *J. Chem. Phys.*, 39, 1963, p. 1455.
4. PLUMB (H.) et CATALAND (G.), *Metrologia*, 2, 1966, p. 127.

Document original reçu le 12 avril 1976,
résumé reçu le 2 novembre 1976.

**Comparaison internationale d'échelles de température
dans le domaine de 1 à 30 K
au moyen de thermomètres à résistance de germanium***

par L. M. BESLEY et W. R. G. KEMP

National Measurement Laboratory ** (Australie)

(Traduction du Document CCT/76-20)

Abstract.— The current temperature scales for the region 1.1 to 30 K have been intercompared by means of 31 germanium resistance thermometers originating from eight national laboratories. The scales compared include the International Practical Temperature Scale of 1968, the helium vapour pressure scales and various national scales based on gas, acoustic and magnetic susceptibility thermometry. While the overall agreement between these scales is some 15 mK, the intercomparison reveals agreement of the order of 1 mK between the most recent scales based on magnetic susceptibility measurements and using common fixed points. The values of the superconductive transition temperatures of aluminium, indium and lead on each of the scales have been determined.

Résumé.— On a effectué une comparaison internationale des échelles actuelles de température dans le domaine de 1,1 à 30 K au moyen de 31 thermomètres à résistance de germanium provenant de huit laboratoires nationaux. Les échelles comparées comprenaient l'Echelle Internationale Pratique de Température de 1968, les échelles de pression de vapeur de l'hélium et diverses échelles nationales fondées sur le thermomètre à gaz, le thermomètre acoustique et le thermomètre à susceptibilité magnétique. Bien que l'accord général entre ces échelles soit d'environ 15 mK, la comparaison a montré qu'il existe un accord de l'ordre de 1 mK entre les plus récentes échelles fondées sur des mesures de susceptibilité magnétique et utilisant les points fixes habituels. On a déterminé les valeurs des températures des points de transition supraconducteurs de l'aluminium, de l'indium et du plomb dans chacune de ces échelles.

* Article paru en anglais dans *Metrologia*, 13, 1977, p. 35.

** Anciennement appelé National Standards Laboratory.

INTRODUCTION

A l'heure actuelle, la situation des déterminations de température thermodynamique inférieure à environ 30 K n'est pas satisfaisante en ce qui concerne les moyens utilisables dans la pratique. On peut obtenir les valeurs des températures supérieures à 13,81 K à partir de l'Echelle Internationale Pratique de Température de 1968 (E IPT-68) [1]. A l'époque où l'on a établi l'E IPT-68, on pensait que l'on pourrait obtenir les valeurs des températures entre 0,3 et 5,2 K à partir des pressions de vapeur de ^3He et ^4He [2 à 6] et ces échelles pratiques furent incorporées dans le texte de l'E IPT-68. Entre 5,2 et 13,81 K, aucune échelle pratique de ce genre n'a jamais été acceptée sur le plan international. De nombreux centres spécialisés en thermométrie de précision aux basses températures se sont préoccupés de combler cette lacune et ont établi leurs propres échelles fondées, les unes sur le thermomètre à gaz, les autres sur le thermomètre acoustique ou sur le thermomètre à susceptibilité magnétique. Quelques-unes de ces méthodes donnent des échelles qui s'appuient sur des températures de référence dont les valeurs sont fixées par définition, tandis que d'autres méthodes fournissent directement des valeurs de la température thermodynamique.

Pendant un certain temps on a craint que ces échelles nationales ne diffèrent entre elles de quantités assez grandes et, de fait, des comparaisons antérieures [7 à 18] avaient révélé qu'il existait entre elles des différences allant jusqu'à 20 mK. Dans le même temps, on a constaté que les échelles admises de pression de vapeur de l'hélium pouvaient être erronées d'une quantité égale à 8 mK environ à 4,2 K^{*} [8,9,12,14, 17,18].

De telles incohérences préoccupent les physiciens spécialistes des basses températures et créent d'énormes difficultés lorsqu'on veut évaluer et utiliser les résultats que l'on trouve dans les publications. Lors de sa 9^e session en 1971, le Comité Consultatif de Thermométrie (CCT) a conclu qu'une nouvelle comparaison extensive des échelles existantes devrait être effectuée sous ses auspices, en particulier parce que plusieurs

* Avant que cette comparaison ne soit achevée, la 15^e Conférence Générale des Poids et Mesures (Paris, mai 1975) a adopté une version amendée de l'E IPT-68. Dans cette version amendée, on a reconnu le bien-fondé des doutes émis au sujet des échelles de pression de vapeur de l'hélium et on a retiré du texte ces échelles pratiques.

laboratoires nationaux étaient en train de mettre au point de nouvelles échelles. On espérait qu'une telle comparaison internationale constituerait une base pour l'extension de l'Echelle Pratique Internationale vers 1 K. Le National Measurement Laboratory entreprit d'effectuer ces mesures. A l'époque on pensait rechercher une incertitude de 0,2 mK dans le domaine compris entre 1 et 30 K.

Les buts de cette comparaison internationale étaient en conséquence d'établir les différences entre les diverses échelles au-dessous de 30 K de façon aussi précise que possible, de comparer ces échelles avec les échelles pratiques de température courantes dans ce domaine, et surtout de donner au CCT des éléments qui lui permettent de prendre une décision pour l'extension de l'EIPT vers le bas. Les principaux instruments de cette comparaison devaient être des thermomètres à résistance de germanium stables ; on a suggéré que tous les thermomètres prenant part à cette comparaison seraient aussi étalonnés au NML aux températures des points de transition supraconducteurs du plomb (7,2 K), de l'indium (3,4 K) et de l'aluminium (1,18 K) réalisés dans le dispositif SRM 767 récemment mis au point par le National Bureau of Standards des Etats-Unis [19,20]. Pour chacun de ces points réalisés à l'aide de cet appareillage une reproductibilité meilleure que $\pm 0,4$ mK a été annoncée ; on pense que le point du plomb, en particulier, constituera une température de référence extrêmement utile.

Le CCT avait invité les laboratoires qui s'occupent de thermométrie aux basses températures à envoyer au NML des thermomètres à germanium en vue des études indiquées plus haut. Les comparaisons sont maintenant terminées et le présent article donne les résultats obtenus.

ÉCHELLES DE TEMPÉRATURE

Avant d'exposer les méthodes de comparaison utilisées et les résultats obtenus, il convient d'indiquer et de décrire les échelles de température dont il sera question dans cet article.

L'Echelle Internationale Pratique de Température de 1968 [1]

Dans le domaine inférieur à 30 K, l'EIPT-68 est définie

par cinq points fixes :

point triple de l'hydrogène en équilibre	13,81	K
hydrogène en équilibre à une pression de de 33330,6 Pa	17,042	K
point d'ébullition de l'hydrogène en équilibre	20,28	K
point d'ébullition du néon	27,102	K
point triple de l'oxygène	54,361	K

L'interpolation est faite en utilisant des thermomètres à résistance de platine étalonnés à ces points et en employant une fonction de référence définie avec précision ainsi que des fonctions écarts d'une forme spécifiée. A l'époque de la publication de l'EIPT-68, on pensait qu'au-dessous de 273,15 K, toute température donnée dans l'EIPT-68 ne s'écartait pas de la température thermodynamique de plus de 10 mK.

Les échelles de pression de vapeur de l'hélium

L'"Echelle ^4He 1958" [6] dont le symbole des températures est T_{58} et l'"Echelle ^3He 1962" [2 à 5] * dont le symbole des températures est T_{62} sont fondées sur des mesures de pression de vapeur entre 0,5 et 5,2 K et entre 0,3 et 3,3 K respectivement. On pensait que ces deux échelles concordait à 0,3 mK près dans la région où elles se superposent. Comme indiqué plus haut, des mesures récentes ont fait apparaître que ces échelles s'écartent de façon linéaire des températures thermodynamiques d'une quantité équivalant approximativement à 8 mK à 4,2 K.

Les échelles magnétiques de l'ISU

A l'Iowa State University (ISU) (Etats-Unis), Cetas et Swenson [9] ont déterminé la relation qui existe entre la température et la susceptibilité magnétique de plusieurs sels paramagnétiques et en ont tiré une série d'échelles magnétiques de température. La première, appelée ici $T_{X,ISU}$, est liée à l'échelle NBS-55 dans le domaine de 18 à 34 K. Une seconde échelle, $T_{X68,ISU}$, est liée à l'EIPT-68 dans le même domaine. Les différences entre $T_{X,ISU}$ et $T_{X68,ISU}$ rendent compte des différences entre NBS-55 et l'EIPT-68 (approximativement 10 mK à 20 K). Récemment, Durieux et Swenson [21] ont suggéré une troisième échelle T_{XAC} , définie par :

$$T_{XAC} = 1,000\ 3 \times (T_{X,ISU}).$$

* Pour simplifier la rédaction du texte qui suit, ces deux échelles seront désignées respectivement par T_{58} et T_{62} .

Cette échelle est un ajustement linéaire de $T_{X, ISU}$ tel que T_{XAC} , "lisse" de façon effective les résultats obtenus par Plumb et Cataland [13] avec le thermomètre acoustique et se maintienne proche des résultats obtenus par Berry [22,23] avec le thermomètre à gaz.

Juste avant que ne soit achevée la rédaction définitive de cet article, Swenson et Anderson (ISU) nous ont fait parvenir les résultats de leurs nouveaux calculs, effectués à partir des valeurs des susceptibilités sur lesquelles était fondée l'échelle $T_{X, ISU}$. En faisant à nouveau cette analyse, ils ont établi une nouvelle échelle $T_{X, ISU(1975)}$. Comme ils n'ont pas l'intention de publier une note spéciale sur cette révision, Anderson et Swenson ont rédigé la déclaration suivante et suggéré qu'elle figure dans cet article: " $T_{X, ISU(1975)}$ a été obtenue en augmentant l'échelle de température magnétique $T_{X, ISU}$ de Cetas et Swenson [9] uniformément de 0,03 %, soit 6,0 mK à 20 K, c'est-à-dire que l'on a multiplié par le facteur 1,000 3 le coefficient du terme dépendant de la température dans la relation de susceptibilité. Cette échelle représente les résultats de la susceptibilité comme le fait l'échelle d'origine; elle est plus satisfaisante en ce sens qu'elle correspond très étroitement à l'EIPT-68 au-dessus de 27 K. De plus, on a appliqué des corrections d'échauffement assez importantes aux premiers résultats du thermomètre à résistance de Cetas. Ces corrections permettent un passage plus précis de l'échelle magnétique aux autres thermomètres". Donc, hormis les corrections d'échauffement, T_{XAC} et $T_{X, ISU(1975)}$ devraient être identiques.

Les échelles magnétiques du KOL

Au Kamerlingh Onnes Laboratorium, Leiden (Pays-Bas) van Rijn et Durieux [14] ont établi une autre série d'échelles magnétiques. Les résultats obtenus en utilisant un sel de gadolinium et un sel de manganèse ont été analysés de trois manières différentes pour établir trois séries d'échelles. La première série d'échelles, $Gd_{T_m(I), KOL}$, $Mn_{T_m(I), KOL}$ et $\bar{T}_{m(I), KOL}$, est liée à T_{58} entre 1,7 et 4,2 K et à l'EIPT-68 à 20,28 K. Une seconde série, les échelles $T_{m(II), KOL}$, est liée à T_{58} et à l'EIPT-68 à 13,81 et 20,28 K; la dernière série, les échelles $T_{m(III), KOL}$, est liée à l'EIPT-68 à 13,81 et 20,28 K, un troisième paramètre d'ajustement ayant été choisi de telle sorte que les échelles s'écartent proportionnellement de T_{58} .

L'échelle magnétique du NML

Travaillant au National Measurement Laboratory, Sydney (Australie), Cetas a établi une échelle magnétique, appelée ici $T_{X,NML}$, dans le domaine de 1 à 83 K. C'est dans l'intervalle de 27 à 63 K que cette échelle concorde le mieux avec l'EIPT-68.

L'échelle magnétique de l'IMPR

Shkraba *et al.* [18] de l'Institut des Mesures Physico-techniques et Radiotechniques, Moscou (URSS) ont décrit l'établissement d'une échelle magnétique entre 2 et 30 K, appelée ici $T_{X,IMPR}$. C'est dans l'intervalle de 13,81 à 30 K que cette échelle concorde le mieux avec l'EIPT-68.

L'échelle du thermomètre à gaz de l'IMPR

A l'Institut des Mesures Physico-techniques et Radiotechniques, Moscou (URSS), Astrov, Orlova et Kytin [16] ont utilisé le thermomètre à gaz entre 4,2 et 20 K pour établir l'échelle $T_{g,IMPR}$. Cette échelle a été rattachée au point d'ébullition de l'hydrogène normal.

L'échelle du thermomètre à gaz du NML

Au National Measurement Laboratory, Sydney (Australie), Rogers *et al.* [8] ont établi une échelle du thermomètre à gaz entre 2 et 24 K ; cette échelle est reliée à NBS-55. Une seconde série de mesures faites par Tainsh [24] en utilisant une version améliorée du même appareil a, dans l'ensemble, confirmé les premiers résultats. Dans ce document cette échelle est appelée $T_{g,NML}$, alors que dans des documents antérieurs elle était appelée "échelle du thermomètre à gaz RTAS".

L'échelle provisoire de température NBS entre 2 et 20 K (1965)

Au National Bureau of Standards, Washington (USA), Plumb et Cataland [11-13] ont établi une échelle de température, appelée ici $T_{NBS2-20}$, fondée sur des mesures d'isothermes de la vitesse du son dans l'hélium gazeux en fonction de la pression. Cette méthode donne des températures thermodynamiques indépendamment de toute autre échelle.

Certaines des échelles mentionnées ci-dessus ont été déjà comparées entre elles :

Plumb et Cataland [13] ont comparé $T_{NBS2-20}$ à NBS-55 et T_{58} .

Rogers *et al.* [8] ont comparé $T_{g,NML}$ et $T_{NBS2-20}$.

- Astrov *et al.* [16] ont comparé $T_{g,IMPR}$ et $T_{NBS2-20}$.
- Kemp *et al.* [15] ont comparé $T_{g,NML}$, T_{58} , $T_{NBS2-20}$, $T_{X,ISU}$, l'EIPT-68 et $T_{g,IMPR}$.
- Van Rijn et Duřieux [14] ont comparé les échelles magnétiques du KOL avec l'EIPT-68, T_{58} et $T_{NBS2-20}$.
- Cetas et Swenson [9] et Swenson [10] ont établi des tables des différences entre $T_{X,ISU}$ et $T_{NBS2-20}$, l'EIPT-68 et T_{58} .
- Shkraba *et al.* [18] ont donné les différences entre $T_{X,IMPR}$ et $T_{g,IMPR}$, T_{58} et $T_{NBS2-20}$.
- Cetas [17] a comparé entre elles $T_{X,NML}$, $T_{X,ISU}$ et l'EIPT-68.

Toutes ces comparaisons ont été faites en utilisant des thermomètres à résistance de germanium.

LES THERMOMÈTRES

Pour la présente comparaison, on a encore utilisé des thermomètres à résistance de germanium comme instruments d'interpolation ; ce sont en effet les seuls thermomètres secondaires d'un usage courant dans ce domaine de température. Il existe une documentation considérable sur la stabilité, la sensibilité, l'utilisation de ces instruments (*voir* par exemple les articles généraux sur le sujet faits par Rubin [25] et Halverson et Johns [26]).

Pour cette série de comparaisons, on a estimé que le nombre idéal de thermomètres pour représenter chaque laboratoire serait de trois ; cela permettrait un contrôle convenable de toute modification éventuelle de la résistance d'un même thermomètre sans accroître la charge de la comparaison au-delà des limites du raisonnable. On a demandé à chaque laboratoire participant d'envoyer, lorsque cela était possible, des thermomètres ayant une bonne stabilité, une forte résistance d'isolement ($> 10^9$ ohms), et étalonnés par rapport à toutes les échelles de températures conservées par ce laboratoire. Les données d'étalonnage devaient être fournies sous forme de valeurs correspondantes résistance-température ou de relations mathématiques entre la résistance et la température pour chaque domaine.

On a reçu et comparé trente et un thermomètres à germanium provenant de huit laboratoires. Les laboratoires participants, les numéros d'identification de leurs thermomètres, et les données d'étalonnage fournies au NML avec les instruments étaient les suivants :

L'Institut National de Métrologie* du Conservatoire National des Arts et Métiers (INM-CNAM), Paris (France), a fourni trois thermomètres CryoCal N° 1047, 3667 et 3747, étalonnés par rapport à T_{58} en onze points entre 1,97 et 4,04 K.

L'Istituto di Metrologia G. Colonnetti (IMGC), Turin (Italie), a fourni trois thermomètres CryoCal N° 2551, 2863 et 2864. Chaque thermomètre était étalonné dans l'EIPT-68 à 13,81, 17,042, 20,28 et 27,102 K par comparaison à un thermomètre à résistance de platine étalonné à ces points au NBS.

L'Iowa State University (ISU), Ames (USA), a fourni deux thermomètres CryoCal N° 2262 et 2626 qui avaient été étalonnés par rapport à $T_{X, ISU}$ en 66 points entre 0,94 et 29,5 K. Deux thermomètres CryoCal N° 2241 et 2266 appartenant au NML ont été étalonnés à Ames de manière identique par rapport à $T_{X, ISU}$. On a reçu ultérieurement de l'ISU des valeurs d'étalonnage complémentaires par rapport à la nouvelle échelle $T_{X, ISU(1975)}$ pour chacun des thermomètres N°s 2247, 2241, 2262, 2266 et 2626 entre 0,94 et 35 K. Anderson et Swenson de l'ISU considèrent maintenant les résultats de $T_{X, ISU(1975)}$ comme la meilleure représentation des travaux de l'ISU en thermométrie magnétique et estiment que les premiers étalonnages par rapport à $T_{X, ISU}$ qu'ils ont fournis au NML et qui sont donnés ici n'ont qu'une valeur historique.

Le Kamerlingh Onnes Laboratorium (KOL), Leiden (Pays-Bas), a fourni quatre thermomètres Cryocal N°s 13, 762, 1058 et 1070. Leur étalonnage par rapport à l'échelle magnétique $Gd_{T_m(I)}$ entre 1,5 et 30 K a été donné sous forme de polynômes. Des renseignements détaillés étaient également fournis sur les différences entre l'échelle $Gd_{T_m(I)}$ et les autres échelles magnétiques du KOL, ainsi que les valeurs obtenues par le KOL pour les points de transition supraconducteurs de l'indium et du plomb dans ces échelles en utilisant les dispositifs SRM 767 du NBS.

Le National Bureau of Standards (NBS), Washington (USA), a fourni trois thermomètres CryoCal N°s 76, 78 et 2817 étalonnés

NDLR* L'Institut National de Métrologie du Conservatoire National des Arts et Métiers est un des laboratoires primaires du Bureau National de Métrologie (BNM).

par rapport à $T_{\text{NBS2-20}}$ en 19 points compris entre 2,32 et 18,94 K, par rapport à l'EIPT-68 à 13,81, 20,28 et 27,102 K, et aux points de transition supraconducteurs de l'indium et du plomb.

Le National Measurement Laboratory (NML), Sydney (Australie), laboratoire qui a effectué la comparaison internationale, a fourni dix thermomètres : CryoCal N^{OS} 2241, 2247, 2266, 2268, 2275, 2293 et 2295, Solitron N^{OS} 1732 et 1780, et Honeywell N^o 465. $T_{g,NML}$ était représentée par les thermomètres N^{OS} 2241, 2266, 2268, 2275, 1732, 1780 et 465, les étalonnages étant donnés sous forme de polynômes. $T_{X,ISU}$ était représentée par les thermomètres N^{OS} 2241, 2266 et 2247 tandis que les thermomètres N^{OS} 2247 et 2268 étaient également étalonnés par rapport à $T_{X,NML}$. Les deux thermomètres N^o 2293 et 2295 n'étaient pas étalonnés. Les étalonnages s'étendaient de 2 à 24 K dans $T_{g,NML}$, de 0,95 à 30 K dans $T_{X,ISU}$ et de 1 à 48 K dans $T_{X,NML}$.

Le Conseil National de Recherches (NRC), Ottawa (Canada) a fourni trois thermomètres non étalonnés CryoCal N^o 3822, 3823 et 3837.

L'Institut des Mesures Physicotechniques et Radiotechniques (IMPR), Moscou (URSS) a fourni trois thermomètres N^{OS} 409, 418 et 419 de fabrication soviétique, étalonnés par rapport à T_{58} en 58 points compris entre 1,4 et 4,2 K, par rapport à $T_{g,IMPR}$ en 34 points compris entre 4,2 et 20,3 K, et par rapport à l'EIPT-68 en 25 points compris entre 13,9 et 32 K. Des tables obtenues à partir des polynômes d'interpolation étaient données pour chaque thermomètre, dans chaque échelle. Des renseignements détaillés étaient fournis sur les différences entre $T_{g,IMPR}$ et $T_{X,IMPR}$ ainsi qu'entre l'EIPT-68 et $T_{X,IMPR}$ de telle sorte que l'on pouvait obtenir l'échelle magnétique sur la totalité du domaine compris entre 4,2 et 30 K.

En plus de ces 31 thermomètres à résistance de germanium, quatre thermomètres à résistance de platine appartenant au NML ont été inclus dans les comparaisons. Il s'agit des thermomètres Meyers N^{OS} 371 et 373, et Leeds and Northrup N^{OS} 1654278 et 1756761. Le N^o 373 avait été étalonné en 1956 au NBS par rapport à NBS-55 et le résultat ramené dans l'EIPT-68 au moyen des différences publiées entre ces deux échelles [7]. Les N^{OS} 1654278 et 1756761 avaient été étalonnés par comparaison avec le N^o 373. Le N^o 371 n'était pas étalonné. La réalisation de l'EIPT-68 effectuée avec ces thermomètres est désignée ici par T_{68} (NML 1).

De plus, les N^{OS} 373 et 1654278 avaient été comparés avec les deux thermomètres du NML N^{OS} 1731676 et 1705628 qui avaient fait partie des récentes comparaisons de thermomètres à résistance de platine effectuées au National Physical Laboratory (NPL) à Teddington (Royaume-Uni) [27] sous les auspices du CCT. Ainsi on disposait au NML d'un second étalonnage de ces deux thermomètres dans l'EIPT-68 s'appuyant sur les valeurs obtenues au NPL pour leur résistance aux points fixes. Cette dernière réalisation de l'EIPT-68 est désignée ici par T₆₈ (NML 2) et devrait concorder étroitement avec l'EIPT-68 telle qu'elle est établie au NPL.

CONDITIONS EXPÉRIMENTALES

Le cryostat utilisé pendant cette comparaison était semblable à celui qui a été décrit par Kemp *et al.* [15] dans une comparaison antérieure d'échelles faite au NML ; le montage est donné schématiquement à la figure 1.

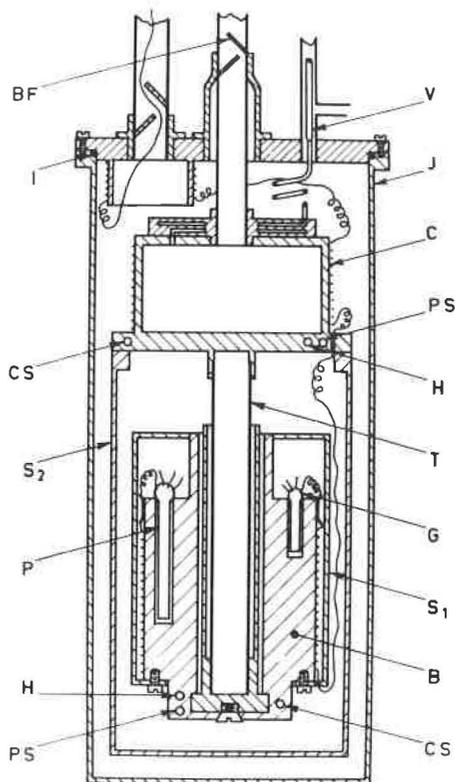


Fig. 1.- Cryostat de comparaison.

Les thermomètres à résistance de germanium (G) étaient introduits avec de la graisse Apiezon N dans des puits bien ajustés, ménagés dans un bloc de cuivre de grande pureté (B), en même temps qu'un ou plusieurs thermomètres à résistance de platine (P). Le bloc et les thermomètres étaient entourés d'un écran fendu (S_1) fixé à la base du bloc. Le bloc et l'écran constituaient la zone principale à température régulée.

Cet ensemble était relié à une chambre à hélium sous pression réduite (C) au moyen d'un tube en acier inoxydable à paroi mince (T) soudé à la base de la chambre à pression réduite et fixé par une grosse vis en cuivre à la base du bloc de comparaison. Un second écran (S_2) qui enveloppait complètement le premier était étroitement ajusté à la chambre de pompage. Cette protection extérieure et la chambre de pompage constituaient la deuxième zone à température régulée.

Une enceinte à vide (J) enveloppait l'ensemble du montage ; l'étanchéité était assurée à la partie supérieure au moyen d'un joint en fil d'indium (I). La connexion au système externe de vide poussé était faite par l'intermédiaire de tubes en acier inoxydable contenant des écrans en chicane (BF).

Tous les conducteurs électriques entrant dans le cryostat étaient rigidement fixés en trois points séparés à des ancrages thermiques. Le premier était un gros morceau de cuivre en contact thermique avec l'hélium liquide, le second était la chambre à hélium et le troisième était le corps du bloc de comparaison. Cette précaution permettait de s'assurer que les fuites thermiques venant de l'extérieur le long des conducteurs (de 0,1 mm de diamètre et 3 m de longueur) ne pouvaient affecter les thermomètres.

Comme on l'a indiqué plus haut, la régulation de la température du bloc était effectuée en deux étapes. La régulation de la chambre à hélium et du premier écran qui jouaient le rôle d'ancrage thermique pour la zone principale et le rôle de piège pour les fuites thermiques venant de l'extérieur, était effectuée de trois façons différentes selon la température. Pour les plus basses températures, de 1,1 K à 3 K, la chambre était remplie d'hélium liquide par l'intermédiaire d'une vanne ; on pompait ensuite en permanence l'hélium vaporisé. Entre 3 et 6 K, la chambre remplie d'hélium était reliée à un manostat qui maintenait la pression de vapeur de l'hélium à une valeur constante correspondant à une température comprise entre 2,6 et 4,2 K. Pour des mesures comparatives au-dessus de 6 K, la

chambre était vidée de l'hélium liquide et conservée sous vide pendant que la température était stabilisée à l'aide d'un dispositif électronique. Ce dispositif était d'un type mis au point au NML ; l'élément sensible était soit une résistance de platine miniature Rosemount de 100 ohms (PS) au-dessus de 25 K, soit une résistance de carbone Allen-Bradley de 10 ohms (CS) au-dessous de cette température ; une seconde résistance de carbone (H) était utilisée comme élément chauffant.

La température du bloc de comparaison proprement dit était toujours stabilisée à l'aide d'un dispositif électronique identique à celui décrit ci-dessus pour l'enceinte extérieure.

La stabilité de la température obtenue dans le bloc de comparaison grâce à ce double dispositif était excellente. Sur la totalité du domaine de comparaison, c'est-à-dire de 1,1 à 30 K, les températures demeuraient constantes à 0,1 mK près pendant la durée nécessaire aux mesures. On ne laissait pas la différence de température entre le bloc et la chambre dépasser 2 K et cette différence était généralement beaucoup plus petite, en particulier aux basses températures. Toutefois, on ne pouvait déceler aucune modification dans les températures relatives des thermomètres dans le bloc, lorsque le gradient thermique entre la chambre et le bloc était modifié d'environ 5 K, à la condition bien entendu que la température de la zone extérieure reste inférieure à celle de la zone intérieure. On ne pouvait pas non plus déceler de différence lorsque l'on changeait le mode de stabilisation de la chambre, par exemple lorsque l'on passait du manostat au dispositif électronique. Des essais au cours desquels on a modifié l'emplacement des résistances n'ont révélé aucune relation entre la température et la position d'un thermomètre dans le bloc. Le risque d'un gradient de température significatif à l'intérieur du bloc était donc quasiment nul.

On a effectué les mesures de résistance des thermomètres à résistance de germanium et de platine par la méthode potentiométrique en utilisant soit un comparateur à courant continu de Kuster (type N° 9930 de Guildline Instruments), soit un volt-mètre numérique (type N° 2501 de Yokogawa Electric Works). La différence de potentiel aux bornes de chaque thermomètre était comparée à celle aux bornes d'une résistance étalon montée en série avec le thermomètre. Les résistances étalons avaient des coefficients de température de seulement $1 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$; elles étaient conservées à température ambiante dans un environnement thermiquement isolé et leur température était mesurée à

$\pm 0,05$ °C près. Leur résistance a été comparée à celle de résistances étalons primaires au début et à la fin des comparaisons. Le courant qui alimentait les thermomètres était fourni par des accumulateurs au plomb à forte capacité, dont la dérive de tension pendant la durée d'une série de comparaisons était d'environ 1×10^{-6} par heure.

On a choisi les appareils et les méthodes de mesure de la résistance des thermomètres de façon à obtenir une précision équivalant à $0,1$ mK sur la totalité du domaine. Pour les thermomètres à résistance de germanium au-dessous de 14 K on a utilisé le voltmètre numérique qui donne une sensibilité de $0,1$ μ V. Les thermomètres à résistance de platine et la diminution de la sensibilité des thermomètres à résistance de germanium aux températures plus élevées nous ont obligés à utiliser le comparateur à courant continu, qui demande plus de temps (avec une précision d'environ 1×10^{-6} pour les thermomètres à résistance de germanium). Dans les limites de leur précision, les deux instruments ont donné des résultats identiques, sauf avec les thermomètres à résistance de germanium aux très basses températures (au-dessous d'environ 3 K). La comparaison des deux instruments avec les résultats donnés par un potentiomètre ordinaire en courant continu a montré que le comparateur donnait des résultats erronés. Cette erreur, qui correspond à des erreurs croissantes sur la température au fur et à mesure que celle-ci diminue, est due à une cause incertaine ; elle s'expliquerait peut-être par la petite quantité de bruit de courant alternatif que le comparateur introduit dans le circuit du thermomètre. Un signal supplémentaire de ce type pourrait provoquer un échauffement additionnel dans les thermomètres à germanium de résistance élevée. Toutefois, comme le voltmètre numérique pouvait facilement fournir la sensibilité requise à ces basses températures, on a évité ce problème-là avec le comparateur.

LES COMPARAISONS

En tout, on a fait dix groupes de comparaisons (R1 à R10). Le tableau I donne la liste des thermomètres inclus dans chaque groupe et quelques autres données. L'ordre dans lequel on a comparé les thermomètres reflète leur ordre d'arrivée au NML.

TABLEAU I

Détail des groupes de comparaison

N° du groupe	Date	Thermomètre	Laboratoire	Domaine de température	Nombre de points
R 1.	5 nov. 73	762	KOL	1,1 K	130
		1070	KOL	à	
		1058	KOL	34,0 K	
		13	KOL		
		465	NML		
		2247	NML		
		373	NML		
R 2	3 janv. 74	2551	IMGC	1,1 K	43
		2863	IMGC	à	
		2864	IMGC	20,2 K	
		1058	KOL		
		465	NML		
		2247	NML		
		373	NML		
R 2-B	30 janv. 74	2551	IMGC	13,8 K	11
		2863	IMGC	à	
		2864	IMGC	29,5 K	
		1058	KOL		
		762	KOL		
		2247	NML		
		1756761	NML		
R 3	6 mars 74	2551	IMGC	1,1 K	45
		1070	KOL	à	
		2293	NML	29,9 K	
		2295	NML		
		2247	NML		
		1756761	NML		
		R 4	4 avril 74	409	
418	IMPR			à	
419	IMPR			27,3 K	
1070	KOL				
465	NML				
2863	IMGC				
1756761	NML				
R 5	8 avril 74	409	IMPR	1,1 K	61
		418	IMPR	à	
		419	IMPR	25,0 K	
		1070	KOL		
		465	NML		
		2266	NML		
		1654278	NML		
R 6	3 juil. 74	1047	INM-CNAM	1,1 K	56
		3747	INM-CNAM	à	
		3667	INM-CNAM	33,8 K	
		2247	NML		
		465	NML		
		1058	KOL		
		1756761	NML		

N° du groupe	Date	Thermomètre	Laboratoire	Domaine de température	Nombre de points
R 7	1 août 74	2266	NML	1,1 K à	55
		2262	ISU		
		2241	NML	33,8 K	
		2626	ISU		
		2247	NML		
		1070	KOL		
		1756761	NML		
		1654278	NML		
R 8	3 sept. 74	3822	NRC	1,1 K à	53
		3823	NRC		
		3837	NRC	30,0 K	
		2266	NML		
		1070	KOL		
		2247	NML		
		1654278	NML		
R 9	8 oct. 74	76	NBS	1,3 K à	46
		2817	NBS		
		78	NBS	29,5 K	
		1070	KOL		
		418	IMPR		
		2247	NML		
		1654278	NML		
R 10	18 déc. 74	2241	NML	1,1 K à	51
		2247	NML		
		2268	NML	29,1 K	
		2275	NML		
		373	NML		
		1780	NML		
		1732	NML		

Dans tous les groupes, on a suivi le même mode opératoire. Après refroidissement jusqu'à environ 1 K, on a commencé les mesures à la température la plus basse pour laquelle la stabilisation pouvait être assurée dans les limites voulues. La température de l'ensemble était ensuite élevée par paliers appropriés. L'échelonnement des températures de comparaison suivait en général les recommandations du CCT, qui a suggéré que l'intervalle de température entre deux points successifs soit approximativement $0,1 T$. Un tel échelonnement présente l'avantage de faciliter l'ajustement habituel d'un polynôme en $\log T$ pour représenter les valeurs de $\log R$ relatives à un même thermomètre à résistance de germanium. Toutefois, en plus de ce schéma général d'échelonnement, on a comparé entre eux tous les thermomètres au voisinage de certaines températures particulières : le point d'ébullition de ${}^4\text{He}$, les points de transition supraconducteurs de l'indium et du plomb, les quatre points fixes les plus bas de l'EIPT-68 et les températures des points acoustiques de Plumb et Cataland [13] sur lesquels sont fondés beaucoup de travaux récents.

On a porté une attention particulière au problème des effets d'échauffement dans les thermomètres à résistance de germanium. Ces effets peuvent être tout à fait significatifs et on doit prendre soin d'en déceler l'ordre de grandeur pour soit les corriger, soit les éviter. C'est en particulier le cas aux températures supérieures à 20 K où la sensibilité des thermomètres à résistance de germanium a diminué au point qu'on doit utiliser des courants de mesure relativement intenses (par exemple 100 μ A) pour obtenir des résultats avec une précision convenable. Dans le cas présent, on a fait des mesures de résistance avec deux valeurs différentes du courant, en changeant de valeur une fois sur deux et on a calculé l'effet d'échauffement pour chaque thermomètre. On a ainsi une idée complète de l'importance de l'échauffement de tous les thermomètres. On trouvera ces renseignements à l'annexe 1. Pour éviter d'être obligé de spécifier les courants de mesure, et au cas où l'environnement immédiat dans les différents cryostats affecterait l'échauffement, on a extrapolé toutes les mesures de résistance à courant nul en supposant, ce qui est raisonnable, que l'échauffement est proportionnel à la puissance dissipée dans le thermomètre et par conséquent proportionnel au carré du courant utilisé. Aux points de comparaison intermédiaires pour lesquels on n'a fait aucune vérification de l'effet d'échauffement, on a déterminé la correction à courant nul par interpolation à partir des valeurs obtenues aux températures voisines.

On a choisi par conséquent le courant de mesure de façon à atteindre un compromis convenable entre deux buts contradictoires : augmenter au maximum la précision des mesures de résistance et réduire au minimum l'importance de l'effet d'échauffement. On trouvera au tableau II la liste des courants de mesure utilisés pour les différents domaines de température.

TABLEAU II

Courants de mesure employés pour les thermomètres à résistance de germanium

Domaine de température	Courant
1,1 - 2,0 K	0,5 μ A
2,0 - 3,0	1
3,0 - 4,2	2
4,2 - 6,0	5
6,0 - 7,5	7
7,5 - 10,0	10
10,0 - 13,0	30
13,0 - 15,0	50
15,0 - 20,0	70
20,0 - 30,0	100

RÉSULTATS

Il est difficile de présenter les résultats d'une série de mesures aussi importante d'une façon qui permette de faire facilement une comparaison entre une échelle et une autre. A cet égard la décision cruciale à prendre est celle du choix d'une échelle de référence pour les comparaisons. Une échelle de référence convenable doit couvrir le domaine de température considéré et doit être aussi lisse que possible par rapport aux températures thermodynamiques : il faut en effet, lorsqu'on lui compare les autres échelles, que leurs irrégularités puissent apparaître de façon évidente et ne risquent pas d'être interprétées comme le simple reflet des irrégularités de l'échelle de référence elle-même. Dans la présente étude, le choix a été aussi influencé par le désir de rechercher une échelle qui puisse servir de base de discussion pour une échelle de référence internationale dans ce domaine non couvert par les échelles pratiques actuelles.

Au fur et à mesure de l'analyse des résultats, il s'est avéré que les échelles fondées sur les thermomètres à susceptibilité magnétique étaient plus lisses l'une par rapport à l'autre que les échelles fondées sur le thermomètre à gaz ou le thermomètre acoustique ; elles s'écartaient entre elles d'une façon qui laissait à penser que les différences étaient essentiellement dues aux différences de leurs températures de référence. Il a semblé par conséquent naturel de choisir comme référence une échelle magnétique, et, parmi les échelles magnétiques disponibles, T_{XAC} présentait de nombreux avantages. Elle est définie sur la totalité du domaine exploré par la comparaison et elle a été ajustée pour bien concorder avec les plus récentes déterminations des températures thermodynamiques dans ce domaine. On l'a donc choisie comme base pour les comparaisons.*

* Comme il a été indiqué plus haut dans ce document, on a reçu au NML les valeurs pour l'échelle magnétique révisée de l'ISU, $T_{X, ISU}(1975)$, après l'achèvement de toutes les comparaisons et de la plus grande partie de leur analyse. A l'exception de petites corrections (inférieures à 1 mK) faites pour l'échauffement dans les thermomètres à germanium, $T_{X, ISU}(1975)$ est identique à T_{XAC} et devrait peut-être remplacer celle-ci dans ce document. Toutefois, comme c'est T_{XAC} que l'on a utilisée comme échelle de base dans l'importante correspondance entre le NML et les autres laboratoires, c'est elle qui a été retenue comme échelle de base dans ce document.

Dans chaque groupe de comparaisons on a inclu au moins un thermomètre représentant $T_{X,ISU}$, et donc T_{XAC} , ce qui permet une comparaison directe des diverses échelles avec T_{XAC} .

Les figures 2 et 3 donnent un aspect général des résultats de la comparaison, scindés en deux parties pour la commodité de présentation. La figure 2 montre les différences entre T_{XAC} et les autres échelles fondées sur le thermomètre magnétique ainsi que les deux échelles pratiques courantes, EIPT-68 et T_{58} . La figure 3 comprend les échelles du thermomètre à gaz et du thermomètre acoustique.

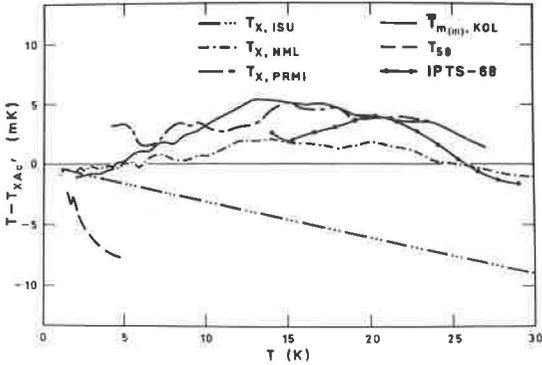


Fig. 2.- Comparaison des échelles pratiques et magnétiques de température à T_{XAC} .

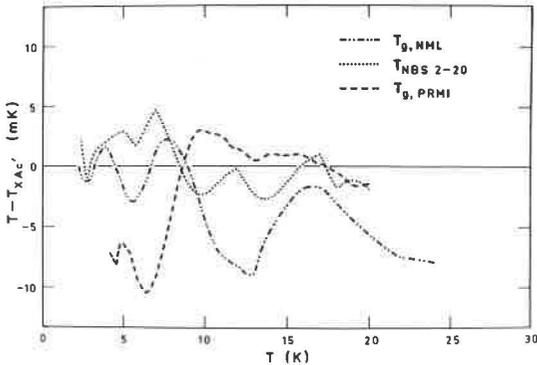


Fig. 3.- Comparaison des échelles du thermomètre acoustique et du thermomètre à gaz à T_{XAC} .

Les résultats présentés sur les figures 2 et 3 sont aussi donnés au tableau III, afin que l'on puisse faire des comparaisons précises entre les échelles.

La figure 4 montre la dispersion des récentes déterminations de la température thermodynamique par rapport à T_{XAC} .

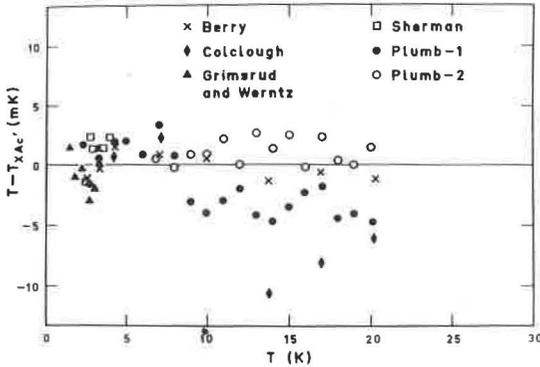


Fig. 4.- Comparaison des déterminations de températures thermodynamiques à T_{XAC} .

Les valeurs représentées proviennent des sources suivantes :

(a) Le thermomètre acoustique de Cataland et Plumb [13] (Plumb-1 sur la figure 4), situé par rapport à T_{XAC} , à partir des étalonnages de $T_{NBS2-20}$ effectués avec les thermomètres du NBS inclus dans ces comparaisons. La position exacte de ces points peut varier selon la valeur admise pour la constante R des gaz. A la demande de Plumb [28] on a modifié les points indiqués pour tenir compte de la nouvelle valeur de R ($8,315\ 73 \times 10^3 \text{ J}\cdot\text{kmol}^{-1}\text{K}^{-1}$, supérieure de 159×10^{-6} à la valeur précédemment admise) récemment déterminée au NPL [29]. Il convient de noter que T_{XAC} a été définie de façon à concorder très étroitement avec la série de points obtenus avec le thermomètre acoustique et calculés en utilisant l'ancienne valeur de la constante des gaz. Le passage à la nouvelle valeur de R fait que cet accord étroit n'existe plus.

(b) Les résultats les plus récents de Plumb au thermomètre acoustique, non encore publiés mais communiqués en détail au CCT, représentés dans ce travail par les valeurs de Plumb pour les différences entre les nouvelles et les anciennes séries de résultats. Plumb considère que les résultats les plus récents sont plus sûrs car l'appareillage utilisé a été amé-

TABLEAU III

Différences entre les échelles nationales et T_{XAc} , $T - T_{XAc}$, en mK

(K)	$Gd_{T_m(I)}$ KOL	$\bar{T}_M(III)$ KOL	$T_{X,NML}$	$T_{g,NML}$	$T_{NBS2-20}$	$T_{g,IMPR}$	$T_{X,IMPR}$	$T_{X,ISU}$	$T_{X,ISU(1975)}$
1,1			- 0,9					- 0,3	0,3
1,3			- 0,4					- 0,4	- 0,1
1,5	- 9,4		- 0,6					- 0,5	0,2
1,8	- 3,0		- 0,9					- 0,5	0,3
2,0	- 4,7	- 1,1	- 0,7					- 0,6	0,1
2,3	- 5,4	- 1,0	- 0,3	0	2,1			- 0,7	0
2,5	- 6,0	- 0,9	- 0,5	- 1,0				- 0,8	0
2,8	- 6,4	- 0,7	- 0,3	- 1,3	- 1,1			- 0,8	0,1
3,0	- 6,7	- 0,8	- 0,3	- 1,1				- 0,9	0,2
3,2	- 7,0	- 0,7	- 0,4	- 0,2	1,0			- 1,0	0,4
3,5	- 7,5	- 0,8	- 0,3	1,1				- 1,1	0,4
4,0	- 7,7	- 0,5	- 0,2	1,5				- 1,2	0,3
4,2	- 7,9	- 0,5	- 0,2	0,9	2,5	- 7,3	3,2	- 1,3	0,2
4,5	- 7,6	0,1	- 0,2	0		- 8,1	3,2	- 1,4	0
5,0	- 7,6	0,3	0,3	- 1,5	2,9	- 6,4	3,4	- 1,5	0
5,5	- 7,4	0,8	0,2	- 3,0		- 7,2	2,8	- 1,6	0,1
6,0	- 7,2	1,1	- 0,3	- 2,7	1,6	- 9,4	1,6	- 1,8	- 0,1
6,5	- 7,4	1,1	0,6	- 1,0		-10,5	1,6	- 2,0	- 0,1
7,0	- 6,6	1,8	0,9	0,7	4,7	- 9,4	1,8	- 2,1	0,1
7,5	- 6,7	1,9	0,8	2,1		- 6,9	2,5	- 2,3	0,1
8,0	- 6,8	1,7	0,5	2,2	2,0	- 3,4	3,2	- 2,4	0,2
8,5	- 5,4	2,2	0,4	1,2		- 0,6	3,5	- 2,6	0
9,0	- 5,9	2,6	0,5	0	- 1,7	1,2	3,2	- 2,7	0,1
9,5	- 5,7	2,8	0,7	- 2,0		2,9	3,6	- 2,9	- 0,1
0,0	- 5,0	3,3	0,7	- 4,0	- 2,4	2,9	3,1	- 3,0	- 0,3
1,0	- 4,0	4,0	1,2	- 7,1	- 1,3	2,5	2,7	- 3,3	- 0,4
2,0	- 3,0	4,7	1,9	- 8,4	- 0,2	1,4	3,1	- 3,6	- 0,1
3,0	- 2,4	5,4	2,1	- 8,9	- 2,2	0,5	3,3	- 3,9	0
4,0	- 1,8	5,3	2,1	- 5,3	- 2,7	0,9	4,5	- 4,2	0,1
5,0	- 0,9	5,0	1,9	- 3,2	- 1,2	0,9	5,1	- 4,5	0
6,0	- 0,1	4,9	1,8	- 1,8	0,3	0,9	4,6	- 4,8	- 0,2
7,0	1,0	5,0	1,6	- 1,7	1,0	0,3	4,5	- 5,1	- 0,1
8,0	1,8	4,7	1,3	- 2,9	- 1,7	- 0,4	4,6	- 5,4	- 0,4
9,0	2,3	4,0	1,5	- 4,3	- 1,1	- 1,7	3,8	- 5,7	- 0,5
0,0	3,9	4,0	1,8	- 5,5	- 1,8	- 1,5	3,8	- 6,0	- 0,5
2,0	5,8	3,6	1,4	- 7,4			3,9	- 6,6	- 0,6
4,0	8,7	3,4	0,3	- 7,8			3,4	- 7,2	- 0,6
7,0	12,4	1,5	- 0,4				1,5	- 8,1	- 0,3
0,0			- 1,0					- 9,0	0,1

lioré [28]. Là aussi, on a utilisé la nouvelle valeur du NPL pour la constante des gaz. Si l'on devait employer l'ancienne valeur de R , les températures acoustiques seraient supérieures de 3,2 mK à 20 K. Ces points sont indiqués par Plumb-2 à la figure 4.

(c) Les résultats publiés par Berry pour les isothermes de ^4He et le thermomètre à gaz. Ces points sont issus des communications faites par Berry au 5^e *Symposium sur la Température*, Washington, 1971 [22] (2,8 K, 3,4 K), en 1972 dans *Metrologia* [23] (4,2 K) et à la 3^e Conférence Européenne sur les mesures de température, Teddington, 1975 [30] (13,8 K, 17,0 K, 20,3 K). On les a situés sur la figure 4 à partir des différences données par Berry entre les températures déterminées au thermomètre à gaz et T_{58} ou l'EIPT-68. De plus, on a inclu deux des isothermes de Berry à 7,2 K et 9,9 K, situées par rapport à T_{XAc} , grâce à des résultats non publiés ; ces résultats ont été obtenus à la suite d'une comparaison de thermomètres à germanium et à rhodium-fer faite au NPL par Rusby et Swenson et nous ont été communiqués par Swenson.

(d) Les résultats sur les isothermes de ^3He obtenus par Sherman [31] (à paraître prochainement) communiqués par Durieux [21]. Ces points sont calculés par rapport à T_{58} .

(e) Les résultats acoustiques de ^3He et ^4He de Grimsrud et Werntz [32] calculés également par rapport à T_{58} .

(f) Les résultats acoustiques préliminaires de Colclough [33]. Ces points correspondent aux résultats communiqués en 1975 par Colclough aux thermométristes intéressés; ils ont été calculés en utilisant la nouvelle valeur (supérieure) pour la constante des gaz [29]. Ils sont portés sur la figure 4 d'après les différences données par Colclough entre ses résultats et ceux de Berry (thermomètre à gaz).

En conséquence, en rapprochant les figures 2, 3 et 4, le lecteur peut comparer l'une ou l'autre des échelles nationales aux déterminations thermodynamiques de température les plus récentes.

Les figures 5 à 14 rendent compte de l'accord observé entre les thermomètres étalonnés dans chacune des diverses échelles intéressées par la présente comparaison et donnent des indications sur la précision avec laquelle chacune des échelles a pu être reproduite au NML.

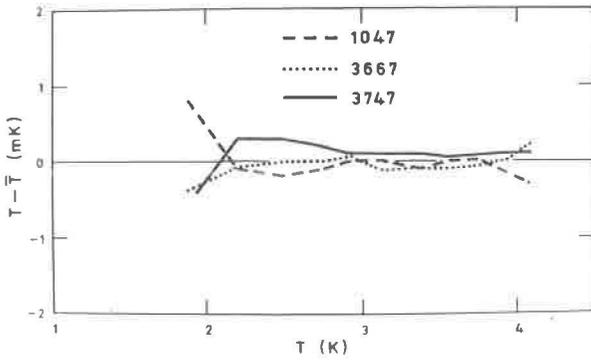


Fig. 5.- Accord entre les thermomètres étalonnés d'après INM-CNAM T_{58} .

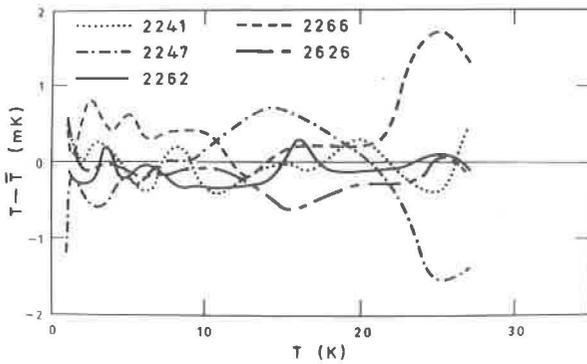


Fig. 6.- Accord entre les thermomètres étalonnés d'après $T_{X,ISU}$.

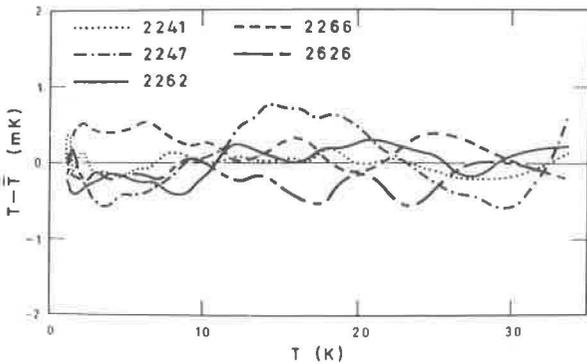


Fig. 7.- Accord entre les thermomètres étalonnés d'après $T_{X,ISU(1975)}$.

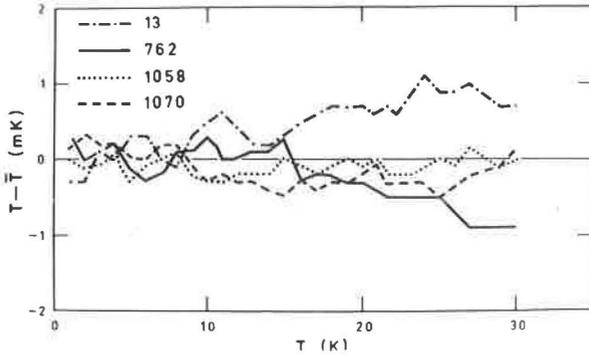


Fig. 8.- Accord entre les thermomètres étalonnés d'après $Gd_{T_m(I)(KOL)}$.

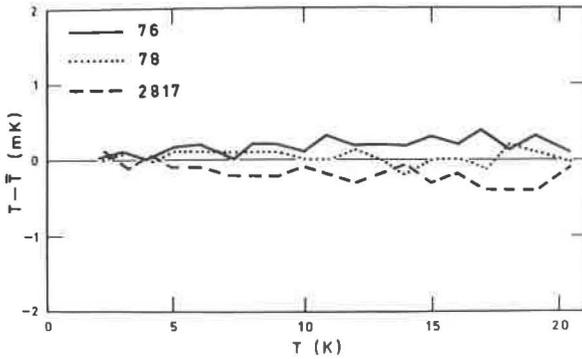


Fig. 9.- Accord entre les thermomètres étalonnés d'après $T_{NBS2-20}$.

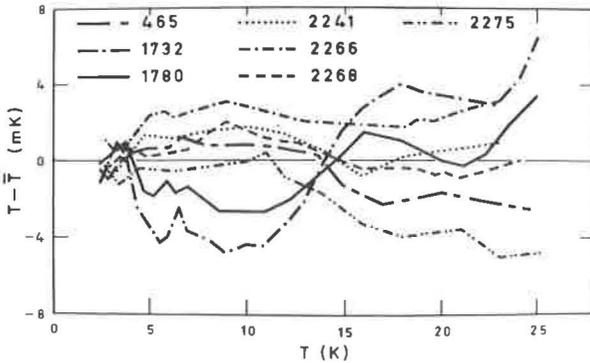


Fig. 10.- Accord entre les thermomètres étalonnés d'après $T_{B,NML}$.

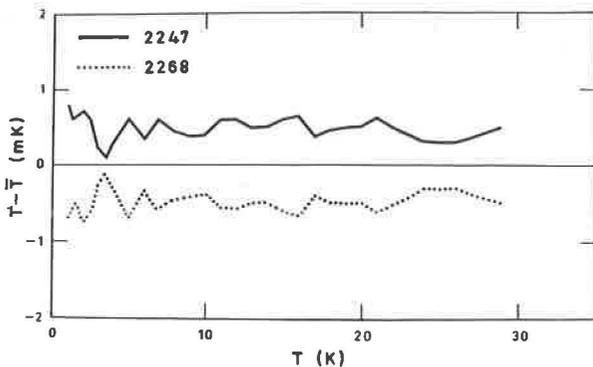


Fig. 11.- Accord entre les thermomètres étalonnés d'après $T_{X,NML}$.

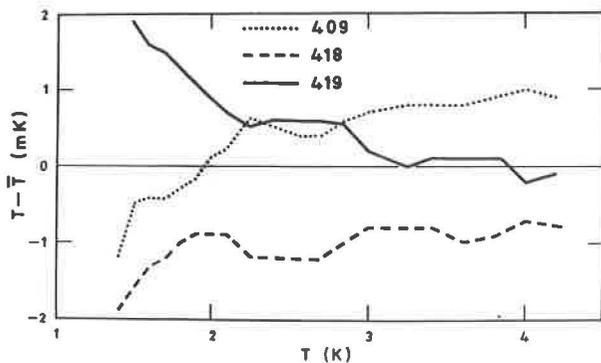


Fig. 12.- Accord entre les thermomètres étalonnés d'après IMPR T_{58} .

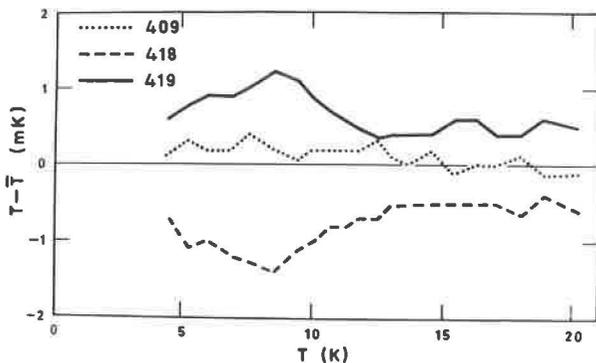


Fig. 13.- Accord entre les thermomètres étalonnés d'après $T_g, IMPR$.

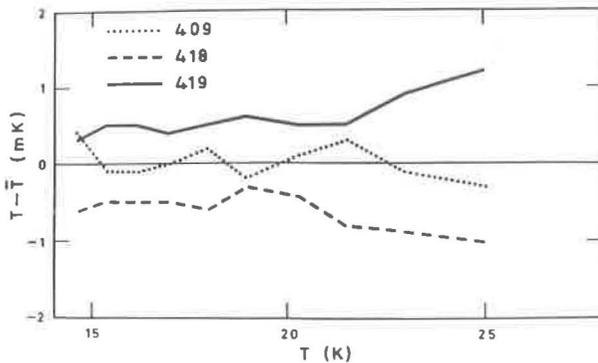


Fig. 14.- Accord entre les thermomètres étalonnés d'après l'EIPT-68 (IMPR)

A cet égard, aucune tentative n'a été faite pour sélectionner un thermomètre comme étant le "meilleur" pour chaque échelle ; on a utilisé la moyenne de tous les thermomètres représentant une échelle donnée comme la réalisation de cette échelle au NML. Par exemple, chaque fois que figure $T_{X, ISU}$ dans la suite de l'exposé, il s'agit de l'échelle représentée par la moyenne des cinq thermomètres 2241, 2247, 2262, 2266 et 2626 qui comporte une incertitude au moins équivalente à la dispersion des résultats sur la figure 6. La seule exception à cette "règle de la moyenne" est celle faite pour le thermomètre 465 du NML qui a présenté une variation inexplicée, mais bien étudiée, de sa résistance pendant les comparaisons du Groupe R 5. Comme la variation de la résistance était notable (équivalente à une variation de la température de 5 mK à 25 K), on n'a pas considéré comme valables les résultats obtenus avec le N° 465 dans les Groupes R 5 et R 6 et on ne s'est plus servi de ce thermomètre.

Situer avec précision la position des deux échelles pratiques EIPT-68 et T_{58} par rapport à T_{XAC} , a soulevé des problèmes particuliers ; on a, en effet, trouvé que la réalisation de chacune de ces échelles variait de façon significative d'un laboratoire à l'autre. Afin de déterminer les "meilleures" réalisations de l'EIPT-68 et de T_{58} pour les besoins de ces comparaisons, on a calculé, à l'aide des résultats des comparaisons, la différence entre T_{XAC} , et la réalisation de ces deux échelles par chaque laboratoire. On a alors considéré la moyenne de toutes ces différences comme déterminant la meilleure réalisation de T_{58} et de l'EIPT-68 pour notre comparaison.

Dans le cas de T_{58} , les thermomètres de l'IMPR comportaient un étalonnage adéquat ; il en était de même pour les thermomètres de l'INM-CNAM. La réalisation de l'ISU a été déduite des différences $T_{X,ISU} - T_{58}$ publiées par Swenson [10] ; on a obtenu les valeurs pour le KOL en supposant que l'échelle magnétique du KOL $Gd_{T_m(I)}$ est identique à T_{58} dans le domaine de 1,5 à 4,2 K [14] ; enfin, les valeurs pour le NBS ont été déduites des différences $T_{NBS2-20} - T_{58}$ publiées par Cataland et Plumb [12]. On ne disposait d'aucune réalisation de T_{58} en provenance du NML, du NRC ni de l'IMGC. La figure 15 montre la dispersion des résultats.

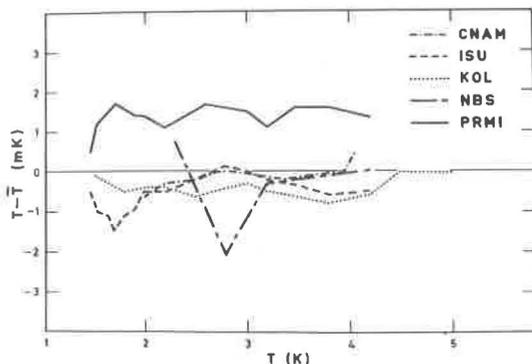


Fig. 15.- Comparaison des réalisations de T_{58} .

On a procédé de même pour représenter l'EIPT-68 sur la figure 2. Les thermomètres de l'IMPR et de l'IMGC comportaient des étalonnages directs et la réalisation du NML était représentée par les thermomètres à résistance de platine inclus dans les groupes de comparaisons. Les valeurs du KOL étaient obtenues en utilisant les différences $Gd_{T_m(I)} - \text{EIPT-68}$ publiées dans leurs grandes lignes par Van Rijn et Durieux [14] et communiquées en détail par Durieux [21], alors que la réalisation de l'ISU était obtenue à partir des différences $T_{X,ISU} - \text{EIPT-68}$ publiées par Swenson [10]. Les valeurs du NBS étaient obtenues en convertissant $T_{NBS2-20}$ en NBS-55 et en utilisant les différences publiées par Plumb et Cataland [13], puis en passant de NBS-55 à l'EIPT-68 au moyen des différences publiées par Bedford *et al.* [7]. On ne disposait d'aucune réalisation de l'EIPT-68 en provenance de l'INM-CNAM ni du NRC. La figure 16 présente la comparaison de ces réalisations, rapportées à leur moyenne.

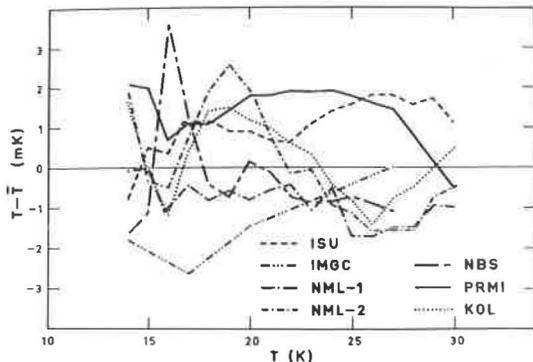


Fig. 16.- Comparaison des réalisations de l'EIPT-68.

Il ne faut pas perdre de vue que l'IMGC, l'ISU et le NML n'ont pas leur propre réalisation de l'EIPT-68 à ces températures mais ont recours à des thermomètres étalonnés au NBS (c'est le cas de l'IMGC, de l'ISU et du NML) et au NPL (pour le NML seulement). Toutefois, l'IMGC et le NML sont en train d'établir les points fixes de l'EIPT-68 dans cette région.

Pour permettre de comparer plus facilement les résultats de ces comparaisons avec ceux des comparaisons de thermomètres à résistance de platine faites par Compton et Ward [27] au NPL, la figure 17 donne la relation entre chacune des autres réalisations de l'EIPT-68 et celle du NPL telle qu'elle est donnée par T_{68} (NML 2).

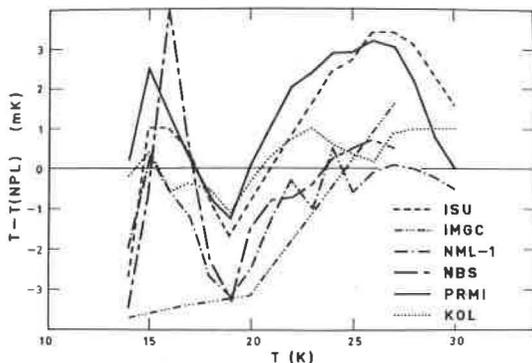


Fig. 17.- Comparaison des réalisations de l'EIPT-68 à celle du NPL.

Le tableau IV donne les valeurs trouvées pour chacune des échelles nationales aux températures des points fixes de l'EIPT-68 : 13,81, 17,042, 20,28 et 27,102 K. Les valeurs, utilisées comme référence, correspondaient à la moyenne des réalisations données à la figure 16.

TABLEAU IV

Valeurs des températures des points fixes de l'EIPT-68 dans les échelles nationales

Echelle	Point triple de e-H ₂	Point 17,042 K de e-H ₂	Point d'ébullition de e-H ₂	Point d'ébullition du néon
T _X , ISU	13,803 0	17,034 2	20,270 3	27,092 2
T _X , ISU(1975)	13,807 2	17,039 2	20,275 9	27,100 9
T _X , NML	13,809 2	17,040 9	20,278 2	27,100 5
Gd _T T _m (I), KOL	13,805 2	17,040 3	20,280 6	27,113 7
T _m (III), KOL	13,812 4	17,044 3	20,280 3	27,102 8
T _g , IMPR	13,807 9	17,039 6	20,274 9	-
T _X , IMPR	13,811 3	17,043 8	20,280 2	27,102 5
T _{NBS2-20}	13,804 5	17,040 3	20,274 6	-
T _g , NML	13,802 0	17,037 6	20,270 6	-
T _{XAc}	13,807 1	17,039 3	20,276 4	27,101 2
EIPT-68	13,81	17,042	20,28	27,102

POINTS DE TRANSITION SUPRACONDUCTEURS

On a mesuré la résistance de chacun des thermomètres participant à la comparaison aux températures des points de transition supraconducteurs du plomb, de l'indium, et, pour quelques thermomètres, de l'aluminium. On a utilisé deux dispositifs SRM 767 du NBS [19], portant les N^{os} 110 et 115, avec un système de mesure et un cryostat appropriés. Il y a eu des différences significatives entre les résultats obtenus avec les deux dispositifs ; par rapport au N^o 115, le N^o 110 donnait des températures moyennes de 0,7 mK supérieures, au point de l'indium, et de 0,2 mK inférieures, au point du plomb. Pour chaque thermomètre, on a utilisé la moyenne des résultats obtenus avec les deux dispositifs pour déterminer sa résistance à chaque transition. On a ensuite converti ces valeurs de résistance en températures dans une échelle particulière, en utilisant les caractéristiques d'étalonnage fournies. Pour obtenir une

"meilleure" valeur pour chacune des températures de transition dans une échelle donnée, on a déduit une valeur moyenne à partir de tous les thermomètres représentant cette échelle. Le tableau V donne un résumé des résultats obtenus.

TABLEAU V

Valeurs des températures des points de transition supraconducteurs dans les échelles nationales

Echelle	Plomb	Indium	Aluminium
$T_{X, ISU}$	7,197 7	3,413 5	1,178 9
$T_{X, NML}$	7,200 7	3,414 4	1,178 7
$T_{g, NML}$	7,201 2	3,415 3	
$Gd T_m(I), KOL$	7,193 2	3,407 4	
$T_m(III), KOL$	7,201 7	3,414 0	
$T_{g, IMPR}$	7,191 3		
$T_{X, IMPR}$	7,201 7		
$T_{NBS2-20}$	7,202 8	3,416 0	
$T_{XAc'}$	7,199 9	3,414 5	1,179 3
$T_{X, ISU(1975)}$	7,200 0	3,414 9	1,179 4

Des valeurs des températures des points de transition supraconducteurs du plomb et de l'indium ont été publiées par Schooley et Soulen [20] d'après l'échelle $T_{NBS2-20}$ par Cataland et Plumb [34] d'après leur thermomètre acoustique, par Durieux [21] d'après $Gd T_m(I)$ et par Astrov *et al.* [35] d'après $T_{X, IMPR}$ (point du plomb seulement). Leurs valeurs sont comparées à celles que l'on a obtenues dans ce travail au tableau VI, tant dans les échelles nationales que ramenées à une échelle commune $T_{XAc'}$.

L'accord entre le KOL et le NML qui apparaît dans le tableau VI(a) est excellent, 0,1 mK étant nettement inférieur à la reproductibilité apparente du dispositif du NBS. Il y a une différence de 0,9 mK entre les valeurs du NML et celles de l'IMPR au point du plomb dans $T_{X, IMPR}$. Les valeurs du NBS et celles du NML dans $T_{NBS2-20}$ diffèrent de 1,8 mK au point du plomb et de 0,7 mK au point de l'indium. Ces dernières divergences semblent se situer toutes les deux en dehors des limites de la reproductibilité attendue pour le SRM 767.

TABLEAU VI

Comparaison des températures des points de transition supraconducteurs avec celles d'autres chercheurs

(a) Dans les échelles nationales

Auteur	Echelle	Point	Valeur de la température	Valeur NML dans la même échelle
Schooley & Soulen	$T_{\text{NBS2-20}}$	Pb	7,201	7,202 8
		In	3,416 7	3,416 0
Durieux	$Gd_{T_m(I),KOL}$	Pb	7,193 2	7,193 2
		In	3,407 5	3,407 4
Astrov <i>et al.</i>	$T_{X,IMPR}$	Pb	7,202 6	7,201 7
Cataland & Plumb	T_{acoustic}	Pb	7,199 0	
		In	3,414 2	

(b) Dans l'échelle T_{XAc}

Auteur	Plomb	Indium
Schooley & Soulen	7,198	3,415 2
Durieux	7,199 9	3,414 6
Astrov <i>et al.</i>	7,200 8	
Besley & Kemp (présent travail)	7,199 9	3,414 5

DISCUSSION

Avant de discuter la signification des résultats ci-dessus, il serait sage de considérer l'importance des incertitudes contenues dans les résultats que nous avons obtenus. En premier lieu on estime mieux l'ordre de grandeur de l'incertitude due à la simple reproduction des diverses échelles au NML, en examinant les figures 5 à 14 qui montrent l'accord entre les thermomètres représentant la même échelle. Il convient de noter que tous ces graphiques ont la même échelle verticale, à l'exception de la figure 10 pour laquelle on a été obligé de réduire l'échelle.

La figure 5 montre que l'accord entre les trois thermomètres de l'INM-CNAM qui représentent la version de T_{58} de ce laboratoire est très bon sur leur domaine d'étalonnage, faisant apparaître un écart moyen de 0,1 mK par rapport à leur moyenne.

L'accord entre les thermomètres qui représentent $T_{X,ISU}$

(Fig. 6) est bon (écart moyen de 0,6 mK par rapport à la moyenne), à l'exception des thermomètres N° 2247 et 2266 qui présentent des écarts par rapport aux autres aux températures supérieures à 23 K. L'accord entre les thermomètres dans $T_{X,ISU(1975)}$ (Fig. 7) est nécessairement très semblable à ce qui est pour $T_{X,ISU}$, puisque ces deux échelles sont fondées sur des séries de résultats presque identiques. Les différences entre les deux graphiques sont dues seulement à des erreurs variables introduites par les différents polynômes d'interpolation utilisés et à l'élimination possible des effets d'échauffement dans l'échelle améliorée $T_{X,ISU(1975)}$.

Pour les thermomètres qui représentent les échelles magnétiques du KOL (Fig. 8), l'accord est satisfaisant, donnant un écart moyen de 0,4 mK par rapport à la moyenne. Le thermomètre N° 13 présente un écart systématique par rapport aux autres, au-dessus de 15 K.

L'accord entre les trois thermomètres du NBS est excellent, comme le montre la figure 9, où l'écart moyen par rapport à la moyenne est de 0,1 mK.

Les figures 10 et 11 donnent les résultats pour les deux échelles du NML. L'accord entre les deux thermomètres qui représentent $T_{X,NML}$ est acceptable (écart moyen par rapport à la moyenne de 0,5 mK), quoique un peu décevant car les deux thermomètres N°s 2268 et 2247 avaient été étalonnés directement par rapport au thermomètre magnétique. L'accord entre les thermomètres qui représentent $T_{g,NML}$ est moins satisfaisant car l'écart moyen par rapport à la moyenne est de 1,8 mK. Sur ces sept thermomètres, seul le N° 465 avait été étalonné directement par rapport au thermomètre à gaz. Les autres avaient tous été comparés avec le N° 465 à diverses reprises entre 1970 et 1972, en utilisant pour les mesures de résistance un appareil moins bon que celui qui a été utilisé pour le présent travail.

Sur les figures 12, 13 et 14, les thermomètres de l'IMPR présentent des écarts systématiques ; la relation $T_{419} > T_{409} > T_{418}$ tend à être vérifiée pour chacune des trois échelles T_{58} , $T_{g,IMPR}$ et T_{68} pour lesquelles des étalonnages avaient été fournis. (Aucune différence n'apparaît pour $T_{X,IMPR}$ puisque cette échelle a été dérivée directement de $T_{g,IMPR}$ et de $T_{68,IMPR}$ pour les besoins de la présente comparaison). Toutefois, bien que systématiques, les divergences sont encore seulement de l'ordre de ± 1 mK par rapport à la moyenne.

Il convient de souligner que ces graphiques ne sont pas sensés représenter la précision avec laquelle les échelles étaient établies dans leur laboratoire d'origine. La reproductibilité des échelles au NML comporte des facteurs éventuels tels que l'instabilité des thermomètres et les variations de leur résistance dues aux chocs mécaniques qu'ils peuvent avoir subis au cours de leur acheminement vers l'Australie, en dépit de toutes les précautions prises par tous les participants pour en diminuer les effets. De plus, des erreurs entre thermomètres pouvaient être introduites par les méthodes d'interpolation qui ont dû être utilisées dans certains cas, le tracé des courbes représentatives à partir des valeurs de la résistance du thermomètre à résistance de germanium étant un processus difficile, en particulier lorsque l'on dispose d'un petit nombre de points [36]. Compte tenu des difficultés inhérentes au transport d'un thermomètre étalonné d'un laboratoire à un autre, l'accord obtenu a été excellent. A l'exception de $T_{g,NML}$, mal définie, il semblerait que toutes les échelles comparées aient été réalisées au NML sur la totalité de leur domaine avec une précision de 1 mK, et dans certains cas l'accord est même bien meilleur.

L'incertitude introduite par les comparaisons elles-mêmes est mineure. L'excellent accord trouvé entre certains groupes de thermomètres (par exemple les thermomètres du NBS qui varient de seulement $\pm 0,3$ K sur la totalité du domaine de 2 à 20 K) plaident fortement contre l'existence de toute erreur importante provenant de l'appareillage et des techniques utilisés au NML. En outre, les mesures faites dans le cryostat de comparaison concordent vraiment très bien avec celles qui ont été faites aux points de transition supraconducteurs dans un autre cryostat de conception très différente. Sur 31 séries de mesures examinées pour les deux cryostats, un point seulement a présenté un écart supérieur à 0,3 mK et l'écart moyen était inférieur à 0,2 mK. Enfin, un contrôle de la reproductibilité des différences entre les échelles a été effectué à l'aide de deux thermomètres particuliers, les N^{OS} 2247 (NML) et 1070 (KOL) ; ces deux thermomètres ont été inclus dans cinq groupes différents de comparaisons, en variant autant que possible leurs positions relatives dans le bloc de comparaison. La figure 18 montre l'excellente homogénéité des résultats ainsi obtenus.

Il semble donc certain que nos techniques de comparaison

n'introduisent pas d'erreurs supérieures à $\pm 0,5$ mK, encore que la valeur la plus vraisemblable de l'incertitude ainsi introduite soit de $0,3$ mK.

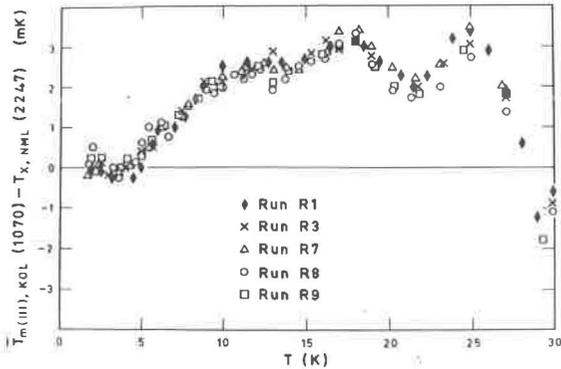


Fig. 18.- Reproductibilité des différences entre deux thermomètres.

Les différences beaucoup plus grandes qui apparaissent entre les échelles sur les figures 2 et 3 doivent par conséquent avoir leur origine ailleurs. Il est évident que deux facteurs jouent un rôle important à cet égard :

1. Les températures de référence différentes que l'on a utilisées pour définir les échelles et, dans une moindre mesure, les différences dans les réalisations de ces températures ;
2. des erreurs systématiques éventuelles et des incertitudes appréciables dans les mesures d'origine sur lesquelles ont été fondées les diverses échelles.

Pour les échelles magnétiques qui sont indiquées sur la figure 3, le premier facteur est presque certainement le plus important. L'exemple le plus évident est l'écart de $T_{X, ISU}$ par rapport aux autres échelles, parce qu'elle est liée à NBS-55 et non pas à l'EIPT-68, à l'inverse des autres échelles magnétiques. Même pour les échelles qui se rapportent à l'EIPT-68, les méthodes de définition des échelles sont différentes. $T_{X, NML}$ est plus proche de l'EIPT-68 sur le large domaine de 27 à 63 K, alors que $T_{X, IMPR}$ et $\bar{T}_m(III), KOL$ sont liées à l'EIPT-68 à 13,81 et à 20,28 K. En dépit des écarts introduits par ces différentes méthodes de définition, les quatre échelles magnétiques $T_{X, ISU}$, $T_{X, NML}$, $T_{X, IMPR}$ et $\bar{T}_m(III), KOL$ sont remarquablement lisses l'une par rapport à l'autre. La seule

anomalie semble se situer sur $T_{X,IMPR}$ au-dessous de 6 K et, même là, l'écart est inférieur à 3 mK*.

Ce caractère lisse laisse à penser que les mesures fondamentales de chaque échelle sont cohérentes entre elles à environ ± 1 mK près. Effectivement, si chaque échelle s'appuyait sur la même ou les mêmes températures de référence, il est probable que l'accord général serait de cet ordre. On pourrait opérer une normalisation de ce genre sans entreprendre d'autres mesures en analysant à nouveau les données brutes qui existent pour chaque échelle, après s'être mis d'accord sur un système commun de référence.

L'accord entre les échelles non magnétiques de la figure 4 est moins satisfaisant. L'accord entre ces échelles est d'un ordre de grandeur inférieur à celui des échelles magnétiques, bien que là encore une partie des divergences entre les deux échelles du thermomètre à gaz soit due aux températures différentes utilisées comme points de référence. L'échelle du thermomètre à gaz de l'IMPR s'écarte de façon nette des autres au-dessous de 8 K, tandis que l'échelle du thermomètre à gaz du NML est trop basse entre 10 et 15 K. En tant qu'échelles d'interpolation, elles sont bien entendu moins intéressantes, à l'heure actuelle, que les échelles magnétiques les plus précises.

Il faut maintenant envisager la question des échelles pratiques T_{58} et EIPT-68. Il y a évidemment un défaut de cohérence entre les échelles de pression de vapeur de l'hélium et les mesures de températures thermodynamiques plus élevées, ainsi que plusieurs auteurs l'ont déjà montré [par exemple 9, 14, 17] ; cet état de fait apparaît à nouveau très clairement sur la figure 3. En ce qui concerne l'EIPT-68 la situation n'est pas tout à fait aussi claire. Les figures 3 et 4 laissent à penser que l'échelle est trop haute par rapport aux températures thermodynamiques mais l'incertitude quant à sa position exacte, en liaison avec ces points et les autres échelles, provient des différences dans la réalisation de l'échelle par les divers laboratoires nationaux (voir Fig. 16, 17).

*D'après des renseignements reçus de l'IMPR depuis l'achèvement des comparaisons, il faudrait apporter une correction à $T_{X,IMPR}$. Cette correction est nulle jusqu'à 7 K et s'élève à 1,5 mK au voisinage de 4,2 K. La valeur de la correction est proportionnelle au défaut d'équilibrage des bobines d'inductance mutuelle et augmente de façon linéaire avec la susceptibilité.

La dispersion que l'on observe sur ces figures est grande, ce qui est troublant. Une part significative de la dispersion des résultats peut vraisemblablement être attribuée aux incertitudes inhérentes à la reproduction de ces réalisations au NML, mais, malgré tout, il subsiste des différences systématiques notables. Cette situation n'était pas entièrement inattendue. Les méthodes qu'il faut mettre en oeuvre pour établir certains points fixes de l'EIPT-68 d'une façon suffisamment précise et reproductible sont encore mal connues et certaines de ces méthodes, qui avaient été à l'origine recommandées dans le texte de l'EIPT-68, font encore l'objet d'un complément de recherches. La récente comparaison de thermomètres à résistance de platine entreprise par le NPL [27] a fait apparaître des divergences dans les différentes réalisations nationales de l'EIPT-68, du même ordre de grandeur que celles qui sont signalées ici. Malheureusement, il y a pour l'instant trop peu de mesures communes aux comparaisons faites au NML et au NPL pour permettre une comparaison critique des deux séries de résultats.

Quelques divergences assez faibles apparaissent également dans la réalisation des échelles de pression de vapeur de l'hélium (voir Fig. 15). La réalisation de l'IMPR semble uniformément supérieure de 1,5 mK sur l'ensemble du domaine*, bien que la forte divergence dans les résultats du NBS à 2,8 K disparaisse si l'on utilise à cette température la valeur de ($T_{\text{NBS2-20}} - T_{58}$) publiée par Gonano [37] au lieu de celle de Cataland et Plumb. L'accord entre le reste des résultats est excellent.

RÉSUMÉ ET CONCLUSION

On peut résumer de la façon suivante les principaux résultats de cette comparaison :

1. On a réalisé au NML chacune des échelles nationales étudiées dans ce travail, avec une précision de ± 1 mK, en utilisant des thermomètres à résistance de germanium et on a déterminé les différences entre ces échelles.

* D'après des renseignements reçus de l'IMPR depuis l'achèvement des comparaisons, un réétalonnage des thermomètres de l'IMPR dans T_{58} a révélé un décalage d'environ 1,5 mK par rapport au premier étalonnage.

2. Entre 1 et 30 K les diverses échelles nationales concordent entre elles et avec les plus récentes déterminations de la température thermodynamique à ± 15 mK près.

3. Les échelles fondées sur des mesures de susceptibilité magnétique sont, aussi bien l'une par rapport à l'autre que par rapport aux températures thermodynamiques, plus lisses que les échelles fondées sur le thermomètre à gaz et le thermomètre acoustique ; les différences entre les échelles magnétiques sont pour l'essentiel dues aux différences entre leurs modes de définition. Si l'on devait adopter un processus commun de rattachement de ces échelles à des points fixes, il est probable que l'homogénéité entre les échelles magnétiques serait de l'ordre de ± 1 mK.

4. Les échelles pratiques T_{58} et T_{62} fondées sur la pression de vapeur de l'hélium sont fausses. La divergence entre T_{58} et la valeur la plus probable de la température du point d'ébullition de ^4He liquide est de 7,4 mK.

5. L'échelle internationale EIPT-68 semble être trop élevée par rapport aux températures thermodynamiques au-dessous de 25 K et présente des irrégularités de l'ordre de ± 2 mK par rapport aux échelles magnétiques de température.

6. La réalisation de l'EIPT-68 et, dans une moindre mesure, celle de T_{58} varient de façon appréciable d'un laboratoire à l'autre ; il en résulte qu'il est difficile de faire une comparaison précise des résultats autrement que par transport effectif de thermomètres étalonnés.

Il n'est pas dans les buts de ce document de faire des recommandations quant à des modifications à apporter aux échelles internationales pratiques de température dans le domaine de 1 à 30 K. Toutefois, à la suite des résultats présentés dans ce travail, plusieurs points sont devenus évidents.

1 - Parmi les échelles étudiées dans ce travail, seules celles qui sont fondées sur des mesures de susceptibilité magnétique semblent avoir les qualités requises pour constituer la base d'une nouvelle échelle pratique couvrant tout ou partie du domaine de température compris entre 1 et 30 K.

2 - Il est difficile d'évaluer le degré de concordance entre les différentes échelles nationales faute d'un accord sur la méthode de rattachement de ces échelles à certains points fixes. Il faudrait établir dès que possible une méthode convenable pour rattacher ces échelles à une série convenue de

températures ; tous les laboratoires concernés par ce type de travail devraient adopter cette méthode.

3 - Les différences systématiques entre les diverses réalisations de l'échelle pratique actuelle, EIPT-68, doivent être éliminées pour l'essentiel avant que l'on puisse faire des recommandations sur les modifications qu'il convient de lui apporter. On espère que cette étude et la comparaison de thermomètres à résistance de platine faite au NPL aideront à atteindre ce but.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier un certain nombre de personnes pour l'aide qu'elles leur ont apportée. R.C. Kemp a effectué les mesures sur les points de transition supra-conducteurs et a fait des suggestions appréciées sur bien d'autres aspects de ce travail. P. Smart a construit les cryostats. C.P. Pickup a conçu et mis au point les dispositifs de régulation de température. J.G. Collins a apporté une aide appréciée à la préparation du manuscrit.

De plus, les auteurs ont une dette particulière à l'égard des membres des autres laboratoires nationaux qui ont participé à cette série de comparaisons. Nous tenons en particulier à remercier C.A. Swenson et M.S. Anderson de l'Iowa State University, M. Durieux du Kamerlingh Onnes Laboratorium, H.H. Plumb du National Bureau of Standards, F. Pavese de l'Istituto di Metrologia G. Colonnetti, D. Astrov de l'Institut des Mesures Physicotechniques et Radiotechniques, R.E. Bedford du Conseil National de Recherches, K. Berry, A. Colclough et T.J. Quinn du National Physical Laboratory, A. Moser et G. Bonnier de l'Institut National de Métrologie du Conservatoire National des Arts et Métiers pour leurs résultats d'étalonnage et leurs discussions sur le manuscrit.

Reçu le 16 avril 1976.

Echauffement des thermomètres à résistance de germanium

Les valeurs de l'échauffement pour tous les thermomètres inclus dans ces comparaisons sont situées dans la zone hachurée de la figure 19. L'unité de mesure utilisée sur ce graphique est le quotient de l'élévation de température dans le thermomètre par la puissance dissipée ($\text{mK} \cdot \mu\text{W}^{-1}$). Cette unité présente des avantages considérables pour comparer les effets d'échauffement de différents thermomètres et pour faire les corrections à courant nul pour un thermomètre donné.

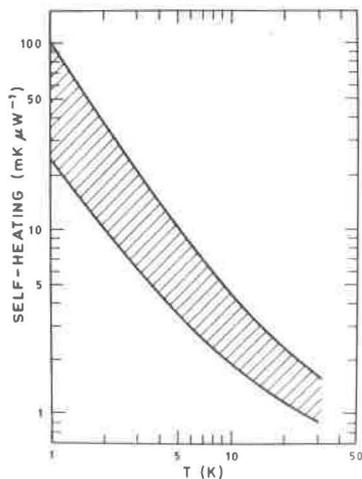


Fig. 19.- Echauffement des thermomètres à résistance de germanium (en $\text{mK} \cdot \mu\text{W}^{-1}$).

Toutefois, elle n'est pas particulièrement utile pour donner une idée de l'importance de cet effet pour un thermomètre donné dans les conditions habituelles de mesure.

On a par conséquent employé deux autres méthodes pour les figures 20 et 21. Sur la première, l'échauffement apparaît comme fonction de la température pour un courant de mesure tel que la chute de potentiel aux bornes du thermomètre soit de 4 mV.

Sur le second graphique, l'échauffement apparaît comme fonction de la température pour des courants de mesure spécifiés. Les deux graphiques sont établis d'après les résultats obtenus

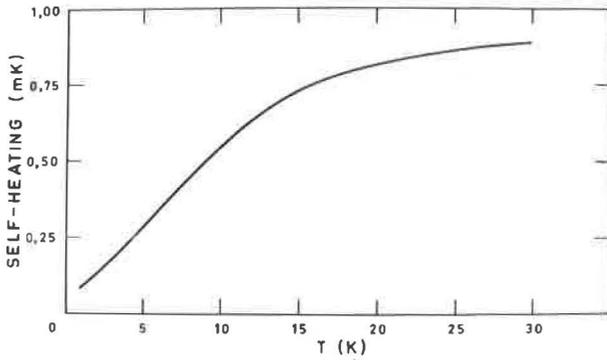


Fig. 20.- Echauffement d'un thermomètre à résistance de germanium donné pour une chute de potentiel aux bornes de ce thermomètre de 4 mV.

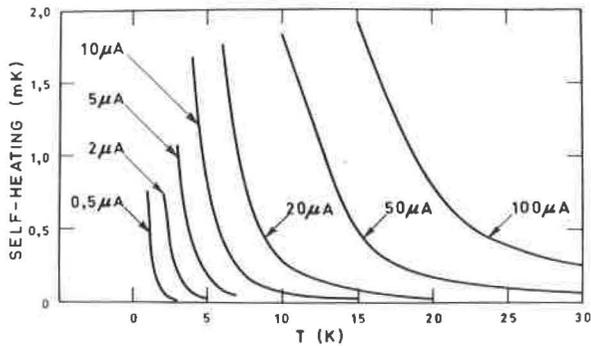


Fig. 21.- Echauffement d'un thermomètre à résistance de germanium donné pour différents courants.

avec un thermomètre ordinaire CryoCal, type CR 1000 ; la majorité des thermomètres qui ont pris part à la présente comparaison étaient de ce type. L'échauffement caractéristique de ce type de thermomètre se situe près de la limite supérieure de la zone hachurée sur la figure 19.

BIBLIOGRAPHIE *

1. *Comptes Rendus des séances de la 13^e Conférence Générale des Poids et Mesures* (1967-1968), p. A1 ; et *Metrologia*, 5, 1969, p. 35.
Une version amendée de cette Echelle a été adoptée en 1975 : *Comptes Rendus des séances de la 15^e Conférence Générale des Poids et Mesures*, 1975, p. A 1 ; *Metrologia*, 12, 1976, p. 7.
2. SYDORIAK (S.G.) et SHERMAN (R.H.), *J. Res. NBS*, 68A, 1964, p. 547.
3. SYDORIAK (S.G.), ROBERTS (T.R.) et SHERMAN (R.H.), *J. Res. NBS*, 68A, 1964, p. 559.
4. ROBERTS (T.R.), SHERMAN (R.H.) et SYDORIAK (S.G.), *J. Res. NBS*, 68A, 1964, p. 567.
5. SHERMAN (R.H.), SYDORIAK (S.G.) et ROBERTS (T.R.), *J. Res. NBS*, 68A, 1964, p. 579.
6. BRICKWEDDE (F.G.), VAN DIJK (H.), DURIEUX (M.), CLEMENT (J.R.) et LOGAN (J.K.), *J. Res. NBS*, 64A, 1960, p. 1.
7. BEDFORD (R.E.), DURIEUX (M.), MUIJLWIJK (R.) et BARBER (C.R.), *Metrologia*, 5, 1969, p. 47.
8. ROGERS (J.S.), TAINSH (R.J.), ANDERSON (M.S.) et SWENSON (C.A.), *Metrologia*, 4, 1968, p. 47.
9. CETAS (T.C.) et SWENSON (C.A.), *Metrologia*, 8, 1972, p. 46.
10. SWENSON (C.A.), *Metrologia*, 9, 1973, p. 99.
11. PLUMB (H.H.) et CATALAND (G.), *J. Res. NBS*, 69A, 1965, p. 375.
12. CATALAND (G.) et PLUMB (H.H.), *J. Res. NBS*, 69A, 1965, p. 531.
13. PLUMB (H.H.) et CATALAND (G.), *Metrologia*, 2, 1966, p. 127.
14. VAN RIJN (C.) et DURIEUX (M.), *Temperature*, Vol. 4, I, 1972, p. 73.
15. KEMP (W.R.G.), COLLINS (J.G.), PICKUP (C.P.) et MUIJLWIJK (R.), *Temperature*, Vol. 4, I, 1972, p. 85.
16. ASTROV (D.N.), ORLOVA (M.P.) et KYTIN (G.A.), *Metrologia*, 5, 1969, p. 111.
17. CETAS (T.C.), *Metrologia*, 12, 1976, p. 27.
18. SHKRABA (V.T.), PAVLOV (V.A.), KYTIN (G.A.), PAN'KIV (T.S.) et ASTROV (D.N.), *Izm. Tekhn.*, 17(7), 1974, p. 32 ; *Meas. Techn.*, 17, 1974, p. 1027.
19. SCHOOLEY (J.F.) et SOULEN (R.J.), *NBS Techn. Note 830*, 1974, p. 14.
20. SCHOOLEY (J.F.) et SOULEN (R.J.), *Instrumentation Technology*, 12(11), 1974, p. 35.
21. DURIEUX (M.), Communication privée.
22. BERRY (K.H.), *Temperature*, Vol. 4, I, 1972, p. 323.
23. BERRY (K.H.), *Metrologia*, 8, 1972, p. 125.
24. TAINSH (R.J.), à paraître.
25. RUBIN (L.G.), *Cryogenics*, 10, 1970, p. 14.

* Le volume "Temperature, Its Measurement and Control in Science and Industry", Instrument Society of America, Pittsburgh, 1972 est appelé simplement : Temperature, ...

Le volume "Temperature Measurement 1975, Institute of Physics Conference Series No. 26, Institute of Physics, London, 1975, est appelé simplement : Temperature Measurement 1975, p. ...

26. HALVERSON (G.) et JOHNS (D.A.), *Temperature*, Vol. 4, II, 1972, p. 803.
 27. COMPTON (J.P.) et WARD (S.D.), *Temperature Measurement* 1975, p. 91.
 28. PLUMB (H.H.), *Communication privée*.
 29. QUINN (T.J.), COLCLOUGH (A.R.) et CHANDLER (T.R.D.), *Phil. Trans. Roy. Soc. London*, 283 A, 1976, p. 367.
 30. BERRY (K.H.), *Temperature Measurement* 1975, p. 32.
 31. SHERMAN (R.H.), Non publié ; un compte rendu oral a été présenté au Fifth Symposium on Temperature, Washington (juin 1971).
 32. GRIMSRUD (D.T.) et WERTZ (J.H. Jr), *Phys. Rev.*, 157, 1967, p. 181.
 33. COLCLOUGH (A.R.), communication privée ; on trouvera des détails sur les méthodes et l'appareil dans *Temperature*, Vol. 4, I, 1972, p. 365.
 34. CATALAND (G.) et PLUMB (H.H.), *Metrologia*, 11, 1975, p. 161.
 35. ASTROV (D.N.), PAVLOV (V.A.), SHKRABA (V.T.), POGORELOVA (O.F.) et KYTIN (G.A.), Résumé du document S13 à présenter à l'European Conference on Temperature Measurement, Teddington (Avril 1975).
 36. VAN RIJN (C.), NIEUWENHUY-SMIT (M.C.), VAN DIJK (J.E.), TIGGELMAN (J.L.) et DURIEUX (M.), *Temperature*, Vol. 4, II, 1972, p. 815.
 37. GONANO (R.), *Temperature*, Vol. 4, I, 1972, p. 121.
-

Différences entre les échelles magnétiques de température entre 1 K et 30 K

par J. E. VAN DIJK, C. VAN RIJN et M. DURIEUX

Kamerlingh Onnes Laboratorium (Pays-Bas)

(Traduction du Document CCT/76-7)

Dans un document sur la comparaison des échelles aux basses températures faite au NML, Besley et Kemp [1] donnent les différences entre les échelles magnétiques de l'ISU ($T_{X,AC}$), du NPL ($T_{X,NML}$), de l'IMPR ($T_{X,IMPR}$) et du KOL ($T_m^{(3)}$) entre environ 1 K et 30 K. On a dit à plusieurs reprises [2] que les échelles magnétiques concordent extrêmement bien si l'on choisit les mêmes valeurs pour les températures de référence, à partir desquelles on obtient les constantes de l'équation $n = A + B/(T + \Delta + \gamma/T)$. C'est ce que l'on montre dans le tableau I, dans lequel on donne les différences entre les échelles magnétiques, lorsque l'on ramène toutes les échelles à quatre ou trois températures de référence égales. Pour recalculer ces échelles avec quatre températures de référence, nous avons employé l'équation $\delta T = a/T + b + cT + dT^2$, et pour les recalculer avec trois températures de référence l'équation $\delta T = e + fT + gT^2$.

BIBLIOGRAPHIE

1. BESLEY (L.M.) et KEMP (W.R.G.), *Metrologia*, 13, 1977, p. 35. Ce volume, Annexe T 11.
2. Rapports du Groupe de travail 4 de 1974 (*Comité Consultatif de Thermométrie*, 10^e session, 1974, p. T 69) et de 1976 (Document CCT/76-5).

Tableau I

Différences $T - T_{X, Ac}$, en mK, pour les échelles magnétiques ramenées aux mêmes températures de référence

T (K)	Réduites à 2,2, 4,2, 14 et 20 K		Réduites à 4,2, 7,2, 14 et 24,5 K			Réduites à 4,2, 7,2, et 24,5 K		
	$T_m(3)$	$T_{X,NML}$	$T_m(3)$	$T_{X,NML}$	$T_{X,IMPR}$	$T_m(3)$	$T_{X,NML}$	$T_{X,IMPR}$
1,1		- 1,6		- 0,5			0,8	
1,5		- 0,6		0,1			0,8	
2,0	- 0,2	- 0,3	0,4	0,1		1,5	0,5	
2,5	0,3	0	0,6	0,2		1,2	0,5	
3,0	0,4	0,2	0,5	0,3		0,8	0,4	
3,5	0,2	0,1	0,2	0,2		0,3	0,2	
4,0	0,1	0,1	0,2	0,1		0,2	0,1	
4,2	0	0	0	0	0	0	0	0
5,0	0,2	0,3	0,2	0,2	1,1	0,1	0,2	0,6
6,0	0,1	- 0,7	0,2	- 0,8	- 0,3	0,1	- 0,8	- 0,8
7,0	0	0,2	0,1	0,1	- 0,2	0,1	0,1	- 0,3
8,0	- 0,9	- 0,5	- 0,7	- 0,6	- 1,0	- 0,7	- 0,6	1,5
9,0	- 0,7	- 0,8	- 0,5	- 0,9	0,6	- 0,4	- 0,8	1,7
10	- 0,6	- 0,8	- 0,4	- 0,9	0,1	- 0,2	- 0,8	1,9
12	- 0,1	0	0,1	0	- 0,7	0,4	0,1	2,2
14	0	0	0	0	0	0,4	0,2	3,7
16	- 0,4	- 0,4	- 0,7	- 0,3	- 0,3	- 0,2	- 0,1	3,8
18	- 0,2	- 0,8	- 0,9	- 0,6	- 0,4	- 0,4	- 0,4	3,6
20	0	0	- 1,3	0,2	- 1,0	- 0,9	0,4	2,4
22	1,0	0	- 1,0	0,4	- 0,3	- 0,7	0,5	1,9
24	2,6	- 0,5	- 0,2	0	0,1	- 0,1	0	0,6
27	4,4	0,1	0,1	0,7	0,4	- 0,2	0,6	- 2,8
30		1,1		1,9			1,6	

Reçu le 12 avril 1976.

**Différences entre l'EIPT-68 ou l'équation
de pression de vapeur de e-H₂
et une échelle de température magnétique
entre 13,81 K et 30 K**

par C. VAN RIJN, J. E. VAN DIJK, H. TER HARMSEL et M. DURIEUX

Kamerlingh Onnes Laboratorium (Pays-Bas)

(Traduction du Document CCT/76-8)

En 1970, on a comparé T_{68} et les températures déduites de la pression de vapeur de l'hydrogène en équilibre avec notre échelle magnétique de température. On a donné des résultats provisoires dans l'article [1]. On n'a jamais publié de résultats complets. Maintenant que l'on connaît bien les différences entre les échelles magnétiques, on peut facilement recalculer les résultats dans les autres échelles. La figure 1 donne ces résultats ; T_{68} est la réalisation de l'EIPT-68 effectuée par le KOL, T_{e-H_2} est déduite de la pression de vapeur de e-H₂ en utilisant l'équation donnée dans l'EIPT-68 ; T_m est la température dans l'échelle magnétique du KOL appelée $T_{m(III)}$ dans [2]. Entre les points fixes, T_{68} dépend du thermomètre à résistance de platine qui est utilisé. Nous avons utilisé le thermomètre Tinsley 164956. D'après Tiggelman [3], entre 13,81 K et 30 K, ce thermomètre ne s'écarte pas de plus de 0,2 mK de la moyenne de 8 thermomètres à résistance de platine.

La figure 1 montre des irrégularités de T_{68} par rapport à T_m , l'amplitude totale étant de 5 mK et les pentes de $\pm 0,15$ % (0,3 % au voisinage de 14 K). T_{e-H_2} est plus lisse que T_{68} , l'amplitude totale de $T_{e-H_2} - T_m$ étant de 2,5 mK et les pentes de $\pm 0,08$ % (0,15 % au voisinage de 14 K).

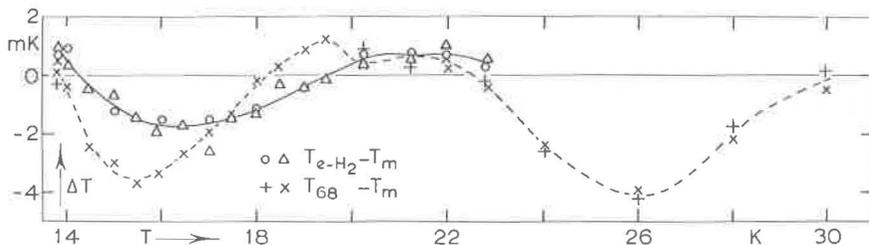


Fig. 1.- Différences entre les températures données dans l'EIPT-68 et celles déduites de la pression de vapeur de l'hydrogène en équilibre d'une part, et celles données dans l'échelle magnétique du KOL d'autre part.

Ces résultats ne sont pas surprenants. L'échelle magnétique est l'échelle la plus lisse parce que sa définition fait appel à quatre constantes seulement entre 2 K et 30 K. On s'attend à ce que l'équation de la pression de vapeur soit assez lisse : elle est d'origine thermodynamique et comporte quatre constantes entre 13,81 K et 30 K environ. Il ne faut pas s'attendre à ce que l'EIPT-68 soit aussi lisse.

Sur la figure 2 on donne les résultats obtenus avec, comme référence, l'échelle magnétique T_{xAc} , de l'ISU (température T_{xAc}) ; les différences $T_m - T_{xAc}$, proviennent de [2].

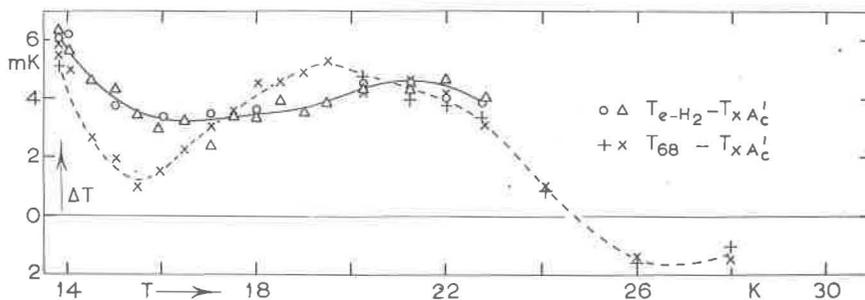


Fig. 2.- Différences entre les températures données dans l'EIPT-68 ou par la pression de vapeur de l'hydrogène en équilibre et celles données dans l'échelle magnétique de l'ISU.

Les irrégularités dans $T_{68} - T_{xAc}$ et $T_{e-H_2} - T_{xAc}$ sont semblables à celles de la figure 1, montrant la régularité des échelles magnétiques l'une par rapport à l'autre. (Les différences entre T_m et T_{xAc} sont presque essentiellement dues à l'utilisation de températures de référence différentes pour T_m et T_{xAc} , [4].)

En conclusion, nous pouvons dire que la fonction $W_{\text{CCT-68}}$ a besoin de quelques ajustements entre 13,81 K et 27 K. L'équation de la pression de vapeur de e-H₂ dans l'EIPT-68 est "meilleure" que l'EIPT-68 elle-même, mais elle pourrait être améliorée légèrement.

Pour la pression du point triple nous avons trouvé 7033,2 Pa (en moyenne), soit 3,1 Pa (équivalent à 0,74 mK) de plus que la pression à 13,81 K donnée par l'équation de l'EIPT-68 pour la pression de vapeur.

BIBLIOGRAPHIE

1. VAN RIJN (C.) et DURIEUX (M.), *Temperature, Its Measurement and Control in Science and Industry*, Vol. 4, I, p. 73, Instrument Society of America, Pittsburgh, 1972.
2. BESLEY (L.M.) et KEMP (W.R.G.), *Metrologia*, 13, 1977, p. 35.
3. TIGGELMAN (J.L.), Thesis, Leiden, 1973.
4. VAN DIJK (J.E.), VAN RIJN (C.) et DURIEUX (M.). Ce volume, Annexe T 12.

Reçu le 12 avril 1976.

ANNEXE T 14

Le point triple du mercure comme étalon thermométrique

par G. T. FURUKAWA et W. R. BIGGE

National Bureau of Standards (États-Unis d'Amérique)

(Traduction du Document CCT/76-18)

Abstract.— Mercury can readily be made purer than 99.9999 percent by chemical washing followed by multiple distillation. The range of the freezing points of mercury from three sources was found to be 0.1 mK. The total impurity of one of the samples, SRM-743, is estimated to be less than 20 parts per billion. The second sample was a part of the NBS "density standard" mercury. The third sample was a part of a large lot purified for manometry at the NBS. The triple point of mercury was found to be close to 234.308 3₂ K (-38.841 68 °C). The triple point of mercury is expected to be as reproducible as the triple point of water.

1. INTRODUCTION

On peut aisément purifier le mercure à mieux que 99,999 9 % par lavage chimique suivi de distillations multiples [1]. On est en train de mettre au point au National Bureau of Standards des méthodes pour réaliser commodément le point triple du mercure et déterminer sa reproductibilité. Des mesures préliminaires ont montré que la dispersion des points triples d'échantillons de mercure de trois provenances différentes est de 0,1 mK ; des mesures utilisant cinq thermomètres à résistance de platine montrent que le point triple du mercure est voisin de 234,308 3₂ K (-38,841 68 °C) dans l'EIPT-68.

2. ÉCHANTILLONS DE MERCURE

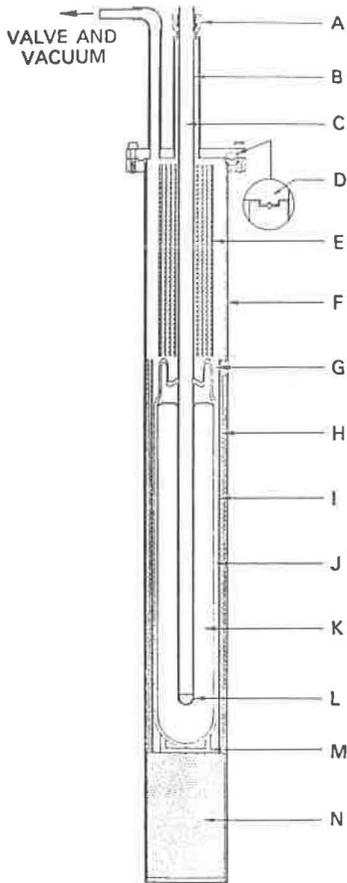
Le premier échantillon de mercure, référencé SRM-743, provient du National Bureau of Standards - Office of Standard Reference Materials (NBS-OSRM) ; on estime qu'au total son taux d'impureté est inférieur à 20×10^{-9} . Le second échantillon a été prélevé sur le stock "étalon de masse volumique" du NBS [2], purifié au NBS à partir de mercure "vierge" [3]. Le troisième échantillon provenait d'un lot important qui a été purifié pour des travaux de manométrie à la Section des Pressions du NBS.

3. CELLULES À MERCURE

A partir de chacun des trois échantillons de mercure on a préparé deux cellules à point de congélation. La figure 1 donne le schéma de construction des cellules en verre de borosilicate. Le puits thermométrique et son extension y sont figurés. Dans chacune des cellules on a introduit, par distillation sous vide, environ 2,1 kg de mercure et les cellules ont été scellées pour éviter toute modification de la composition originelle de l'échantillon de mercure. Les cellules en verre avaient été préalablement nettoyées en utilisant de l'acide nitrique (1 volume d'acide nitrique concentré pour 1 volume d'eau), rincées de nombreuses fois à l'eau distillée puis à la vapeur d'eau pendant huit heures, enfin recuites à 450 °C sous vide poussé ($\sim 1 \times 10^{-4}$ Pa).

4. MODE DE CONGÉLATION

On a procédé aux expériences de congélation avec la cellule à mercure placée à l'intérieur d'une éprouvette en acier inoxydable (fig. 1) immergée dans un bain réfrigérant constitué par un mélange de glace carbonique et d'alcool éthylique. La vitesse de congélation était contrôlée en ajustant la pression du gaz à l'intérieur de l'éprouvette. On a observé une surfusion du mercure d'environ 6 °C. Pour amorcer la congélation on a introduit une tige de verre, refroidie dans de l'azote liquide, dans le puits thermométrique contenant un peu d'alcool éthylique, lorsque le mercure était à environ 1 K au-dessous de son point de congélation.



- A : joint torique
- B : puits du thermomètre
- C : alcool éthylique dans le puits
- D : joint en indium
- E : isolation en papier de soie roulé
- F : éprouvette en acier inoxydable
- G : tubulure pour le nettoyage et le remplissage
- H : isolation en papier de soie enroulé autour de I pour le centrage
- I : feuille cylindrique en cuivre
- J : cellule en verre de borosilicate
- K : mercure
- L : coussin de protection du thermomètre en laine de silice
- M : support de la cellule
- N : isolation en laine de silicate d'alumine

Fig. 1.- Cellule à point triple du mercure à l'intérieur de l'éprouvette en acier inoxydable.

La figure 2 montre les courbes de congélation des échantillons de mercure. On attribue la petite anomalie (0,03 mK ou moins) à la chaleur de fusion de la glace dissoute dans l'alcool éthylique utilisé dans le puits thermométrique. En effet, lorsque la tige de verre refroidie dans l'azote liquide était introduite dans le puits thermométrique, on devait sans doute introduire un peu de glace condensée sur cette tige et provenant de l'humidité de l'air. Cette anomalie n'existait pas lorsque la congélation du mercure était amorcée en laissant couler un peu d'azote liquide dans un tube réfrigérant à double paroi introduit dans le puits thermométrique. La méthode qui semble à l'heure actuelle la plus convenable pour amorcer la congélation

consiste à plonger un tube en acier inoxydable à paroi mince à l'intérieur du puits thermométrique, la tige de verre refroidi dans de l'azote liquide étant introduite dans ce tube.

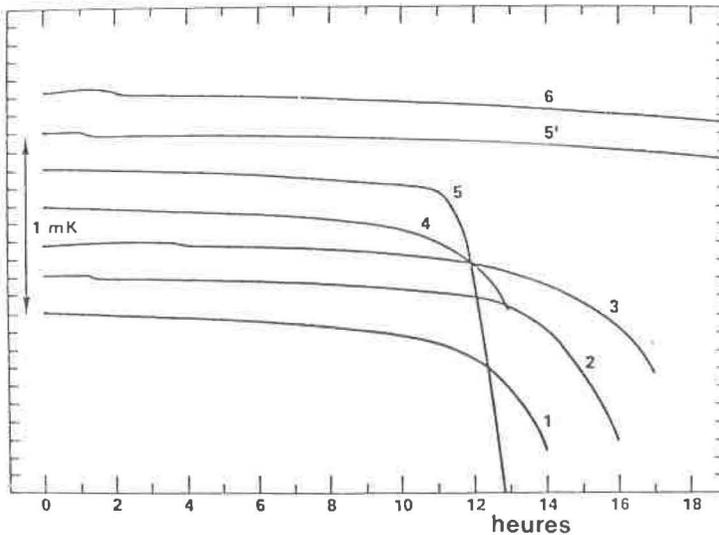


Fig. 2.- Courbes de congélation d'échantillons de mercure enregistrées environ quinze minutes après l'insertion du thermomètre à résistance de platine dans la cellule. On attribue la petite anomalie du début à la chaleur de dissolution de la glace dans l'alcool éthylique. Les courbes sont décalées dans le sens vertical pour faire apparaître les variations de température sur chaque courbe. Les nombres se rapportent aux numéros des cellules (voir Tableau I).
(Les courbes 5 et 5' ont été obtenues avec la même cellule).

La glace condensée est alors enlevée avec le tube. (Avant son introduction dans le puits thermométrique, le thermomètre à résistance de platine était refroidi dans un tube contenant de l'alcool éthylique immergé dans le bain réfrigérant. Entre le moment où l'on retire le thermomètre à résistance de platine du tube de pré-refroidissement et celui où on l'introduit dans le puits thermométrique, un peu d'eau atmosphérique peut se dissoudre dans l'alcool éthylique qui reste sur le thermomètre à résistance de platine. La température observée peut inclure une petite quantité de chaleur de dissolution de l'eau dans l'alcool éthylique du puits thermométrique.)

5. APPAREILLAGE DE MESURE DE LA TEMPÉRATURE

Pour comparer les points de congélation des cellules à mercure, on a utilisé un thermomètre à résistance de platine (n° 1805523) avec un connecteur BNC relié à un pont à courant alternatif conçu par Cutkosky [4]. Pour déterminer la température du point triple du mercure on a utilisé, avec un pont de Mueller, cinq thermomètres à résistance de platine étalonnés dans l'EIPT-68.

6. RÉSULTATS

La figure 2 donne les courbes de congélation pour les six cellules à mercure. Etant donné la très grande pureté des échantillons de mercure, la variation de la température de congélation en fonction de la quantité congelée était relativement faible. Sur une partie importante de la courbe de congélation la variation n'était pas supérieure à 0,1 mK. On attribue à l'effet mentionné plus haut de la chaleur de dissolution de la glace dans l'alcool éthylique, les températures de début de congélation légèrement supérieures pour les cellules 2, 3, 5' et 6. L'anomalie n'existait pas lorsqu'on n'introduisait pas de glace dans le puits thermométrique (voir la courbe des cellules 1, 4 et 5).

On a comparé les points de congélation des six cellules à mercure en examinant les valeurs de $R(\text{Hg})/R(\text{PT})$, rapport de la résistance du thermomètre au point de congélation du mercure à sa résistance au point triple de l'eau. On n'a pas apporté de corrections pour la profondeur d'immersion dans les cellules (25,5 cm pour les cellules à point triple du mercure, 27,0 cm pour la cellule à point triple de l'eau). On a extrapolé les valeurs des résistances à courant nul à partir de mesures faites à 1 et 2 mA. Le tableau I rassemble les résultats. On a trouvé que la dispersion des valeurs moyennes pour les différentes cellules était de 0,1 mK.

Pour déterminer la température du point triple du mercure dans l'EIPT-68, on a mesuré la température de congélation de l'une des cellules (cellule 2) en utilisant cinq thermomètres à résistance de platine. Les résultats sont donnés au tableau II. On a trouvé comme valeur moyenne pour la température du point triple du mercure $234,308 \text{ }_2^3 \text{ K}$ ($-38,841 \text{ }_8^6 \text{ }^\circ\text{C}$).

TABLEAU I

Comparaison des points de congélation des échantillons de mercure

Thermomètre à résistance platine n° 1805523 ;
 $x = [R(\text{Hg})/R(\text{PT}) - 0,844\ 170\ 000] \times 10^9$

Les valeurs entre parenthèses donnent les écarts et écarts-types en mK

Cellule (a)	1	2	3	4	5	6	
x (b)	5001	4909	5405	5270	5069	5242	
	4989	5490	5122	4832	5243	5369	
	4936	5880		5126			
		5627		5320			
				5167			
			5432				
Moyenne -----	4975	5476	5264	5191	5156	5306	
Ecart-type {	de x	35	411	200	207	123	90
	en mK	(0,01)	(0,10)	(0,05)	(0,05)	(0,03)	(0,02)
Δ (c) {	de x	- 253	+ 248	+ 36	- 37	- 72	+ 78
	en mK	(- 0,06)	(+ 0,06)	(+ 0,01)	(- 0,01)	(- 0,02)	(+ 0,02)

Moyenne des six cellules : $R(\text{Hg})/R(\text{PT}) = 0,844\ 175\ 228$

(a) cellules 1 et 2 : mercure "étalon de masse volumique"; cellules 3 et 4 ; mercure SRM-743 ; cellules 5 et 6 : mercure de la "Section des Pressions".

(b) les valeurs indiquées correspondent à des congélations différentes.

(c) Δ = (moyenne pour la cellule)-(moyenne pour les six cellules).

TABLEAU II

Température du point triple du mercure

Températures en kelvin observées sur la cellule N° 2
 avec cinq thermomètres à résistance de platine différents

Thermomètre	N° 1009927	N° 1803100	N° 1803104	N° 1810371	N° 1816135
Congélation 1	234,309 28	234,309 53	234,309 43	234,309,40	234,309 46
		59			
		234,309 56			
Congélation 2	234,309 27	234,309 54	234,309 43	234,309 38	234,309 50
		55			
		234,309,54			

Moyenne des 10 valeurs : 234,309 $\frac{4}{2}$ K
 Ecart-type : 0,10 mK
 Correction pour l'effet de pression
 (profondeur d'immersion 15,5 cm) : - 0,001 10 K
 Température du point triple : 234,308 $\frac{3}{2}$ K
 ou : - 38,841 $\frac{6}{8}$ °C

7. CONCLUSION

Le point triple du mercure est très reproductible et on pense que cette reproductibilité est comparable à celle du point triple de l'eau.

Ces résultats préliminaires ($-38,84168$ °C) sont très proches de la valeur donnée par Dengler [5], $-38,841$ °C.

8. RECHERCHES FUTURES

D'autres recherches sont en cours pour réaliser le point triple du mercure de façon plus commode. On comparera les températures de fusion et de congélation de plusieurs échantillons de mercure de grande pureté. On comparera la température du point triple du mercure contenu dans des cellules en acier inoxydable à celle du point triple du mercure contenu dans des cellules en verre de borosilicate.

Reçu le 12 avril 1976.

BIBLIOGRAPHIE

1. GORDON (C.L.) et WICHERS (E.), *Ann. New York Acad. Sci.*, 65, 1957, p. 369.
 2. COOK (A.H.), *Phil. Trans.*, A254, 1961, p. 125.
 3. WICHERS (E.), communication personnelle à COOK (A.H.), 9 Août 1960.
 4. CUTKOSKY (R.D.), *J. Res. NBS*, 74C, 1970, p. 15.
 5. DENGLER (C.O.), *ISA Trans.*, 2, 1963, p. 298.
-

Comparaison de thermomètres à résistance de platine aux basses températures

par J. P. COMPTON et S. D. WARD

National Physical Laboratory (Royaume-Uni)

(Traduction du Document CCT/76-41)

Introduction

Divers laboratoires nationaux d'étalonnage ont envoyé au NPL des thermomètres à résistance de platine à capsule de platine. Nous les avons tous comparés à un groupe étalon de trois thermomètres du NPL à 49 températures entre 13,81 et 273,15 K. On a également fait des mesures complémentaires à 4,2 et 373,15 K. On a déjà publié [1] une description du cryostat et de la technique expérimentale, ainsi que les premiers résultats. Nous avons maintenant terminé les mesures et l'on confirme que la réalisation des points fixes constitue la source essentielle de non-reproductibilité de l'EIPT-68. Nous avons l'intention de publier prochainement le détail complet des mesures.

On a reçu des thermomètres étalonnés des laboratoires suivants :

Kamerlingh Onnes Laboratorium (KOL), Pays-Bas (2 thermomètres),
Conseil National de Recherches (NRC), Canada (3 thermomètres),
National Measurement Laboratory (NML), Australie (2 thermomètres),
National Bureau of Standards (NBS), USA (3 thermomètres),
Institut de Métrologie G. Colonnetti (IMGC), Italie (1 thermomètre).

La plupart de ces laboratoires n'ont pas encore établi tous les points fixes de l'EIPT-68 et leurs étalonnages sont déduits, au moins en partie, de l'échelle NBS-55.

On a reçu des thermomètres non étalonnés des laboratoires suivants :

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), R.F.A. (3 thermomètres),
Amt für Standardisierung, Messwesen und Warenprüfung (ASMW), R.D.A.
(3 thermomètres)
National Research Laboratory of Metrology (NRLM), Japon (2 thermomètres),
Institut National de Métrologie (INM), France (1 thermomètre).

On espère que ces thermomètres seront étalonnés après coup par leur laboratoire d'origine. De plus, on a ajouté d'autres thermomètres du NPL quand il y avait de la place dans un cycle de comparaison. Il a fallu un total de cinq cycles pour inclure tous les thermomètres.

Erreurs dans la comparaison

On a évalué les erreurs d'après :

- (a) la répétabilité des étalons d'un cycle à l'autre,
- (b) des mesures répétées utilisant différents réfrigérants à 80 et 273,15 K,
- (c) la comparaison des mesures dans le cryostat à 273,15 K avec des mesures directes de R_0 utilisant une cellule à point triple.

A partir de là, on estime que l'incertitude sur les mesures (un écart-type) va de 0,1 mK pour les températures inférieures à 80 K à 0,4 mK pour 273 K.

Étalonnage aux points fixes à basses températures réalisés au NPL

Avant que les comparaisons ne débutent, on avait étalonné l'un des thermomètres étalons, N° 1728839, aux points fixes réalisés au NPL ; on a étalonné à nouveau ce thermomètre et un second étalon, N° 153374, après les comparaisons. L'accord entre les résultats était dans les limites de l'incertitude expérimentale de réalisation des points fixes du NPL. En général, on a préféré les valeurs obtenues après les comparaisons.

Étalonnage au point de vapeur

Les thermomètres étaient étalonnés dans un hypsomètre par comparaison à des thermomètres étalons à longue tige. Ceux-ci avaient été étalonnés d'une part directement au point de vapeur et d'autre part aux points de congélation de l'étain et du zinc. La divergence d'environ 1 mK, à 100 °C, dont on a rendu compte précédemment, a été confirmée et tous les résultats sont donnés par référence au point de vapeur.

Différences entre les points fixes

On donne au tableau 1 les différences observées entre les réalisations des points fixes faites au NPL et celles faites ailleurs. Les nombres positifs indiquent que la réalisation des points fixes du NPL donne une température plus basse.

Tableau 1

*Comparaison des réalisations des points fixes par rapport à celles du NPL
(différence des températures en mK)*

Un chiffre positif indique que la réalisation des points fixes du NPL donne une température plus basse.

Labo- ratoire	Thermomètre	13,81	17,042	20,28	27,102	54,361	90,188	373,15
KOL	LN (1)	- 0,8	+ 0,1	- 0,6	- 1,3	- 0,2	+ 0,9	
NRC	1722203	+ 0,9	- 2,7	+ 1,0	- 1,2	- 0,5	- 0,7	+ 0,5
	1158062 } (2)	+ 1,8	- 2,4	+ 1,1	- 1,2	- 0,2	- 0,6	+ 1,0
	1158066 } (2)	- 5,4	- 6,4	- 1,1	- 2,2	- 0,7	- 1,2	- 1,0
	1158066 (3)	- 2,5	- 1,9	- 0,6				
NML	1731676 } (4)	+ 5,1	- 0,4	+ 0,9	- 1,5	- 0,3	- 2,7	
	1750628 } (4)	+ 3,1	+ 1,0	+ 2,0	- 1,2	- 0,2	- 2,2	+ 0,5
	1731676 } (5)				- 2,2	- 0,3	- 0,4	- 3,0
	1750628 } (5)						- 0,1	+ 3,0
NBS	1812279 } (4)	+ 4,0	+ 1,4	+ 1,6	- 1,2	- 0,6	- 3,1	- 1,0
	1812282 } (4)	+ 4,1	+ 1,4	+ 1,7	- 1,2	- 0,5	- 3,1	- 1,0
	1812284 } (4)	+ 4,0	+ 1,5	+ 1,8	- 1,2	- 0,6	- 3,0	- 1,0
IMGC	646 (4)	+ 0,3	- 1,7	+ 0,5	- 1,8	- 0,9	- 3,7	
	646 (6)					+ 0,2		- 1,0
Incertitude dans les points fixes du NPL		0,3	0,4	0,4	0,3	0,1	0,3	1,0
Incertitude d'une comparaison		0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,5

- 1) étalonnage à partir des points fixes du KOL ;
- 2) étalonnage à partir du thermomètre étalonné dans l'échelle NBS-55 jusqu'à 27,102 K, puis points fixes du NRC ;
- 3) points fixes du NRC ;
- 4) étalonnage avec un thermomètre étalonné dans l'échelle NBS-55 ;
- 5) points fixes du NML ;
- 6) points fixes de l'IMGC.

Dans les cas où la référence d'étalonnage n'était pas uniquement le laboratoire d'origine, on donne également des détails sur la réalisation des points fixes propre au laboratoire lui-même.

Cetas [2] a récemment comparé les deux thermomètres du NML entre 13,81 et 90,188 K et nos résultats concordent étroitement avec

Reproductibilité de l'échelle

a) En tenant compte des différences entre points fixes

Avec un échantillonnage aussi réduit de thermomètres étalonnés, en particulier avec un nombre différent de thermomètres provenant de chaque laboratoire, tout traitement statistique est difficile. Nous avons simplement calculé, à chaque température, la différence maximale entre les températures indiquées par deux thermomètres (figure 1) ; tous les thermomètres portés au tableau 1 plus trois thermomètres du NPL ont été associés deux à deux dans toutes les combinaisons possibles.

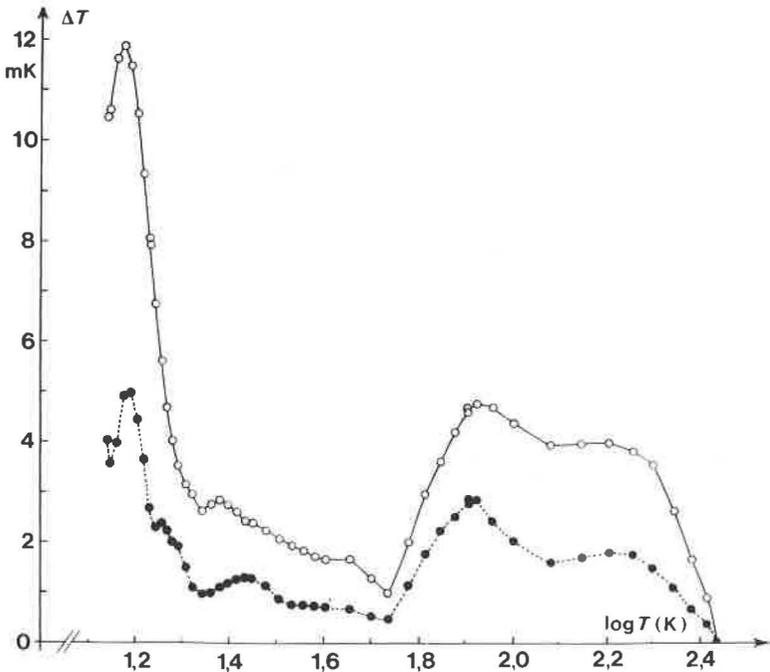


Fig. 1.- Différence maximale entre les indications de deux thermomètres, pris parmi toutes les combinaisons deux à deux possibles de 13 thermomètres, en fonction de $\log T$, lorsqu'on utilise leur étalonnage d'origine (trait plein). La valeur au-dessous de laquelle se situent les deux-tiers des différences est également indiquée (trait pointillé).

Nous avons également déterminé la valeur au-dessous de laquelle se situent les deux tiers des différences (courbe en pointillé sur la figure 1). Nous avons l'impression que cette dernière valeur caractérise la reproductibilité numérique de l'EIPT-68 telle qu'elle est actuellement, sans perdre de vue l'incertitude due au faible nombre des thermomètres.

b) *Reproductibilité intrinsèque*

La figure 2 donne un graphique comparable pour 28 thermomètres, y compris ceux du tableau 1, pour lesquels les étalonnages sont fondés sur une seule série de points fixes, par commodité ceux du NPL. Les résultats sont légèrement supérieurs à ceux qui ont été trouvés par Tiggelman et Durieux [3] ; ils reflètent probablement un échantillonnage plus large et une variation plus grande du coefficient alpha.

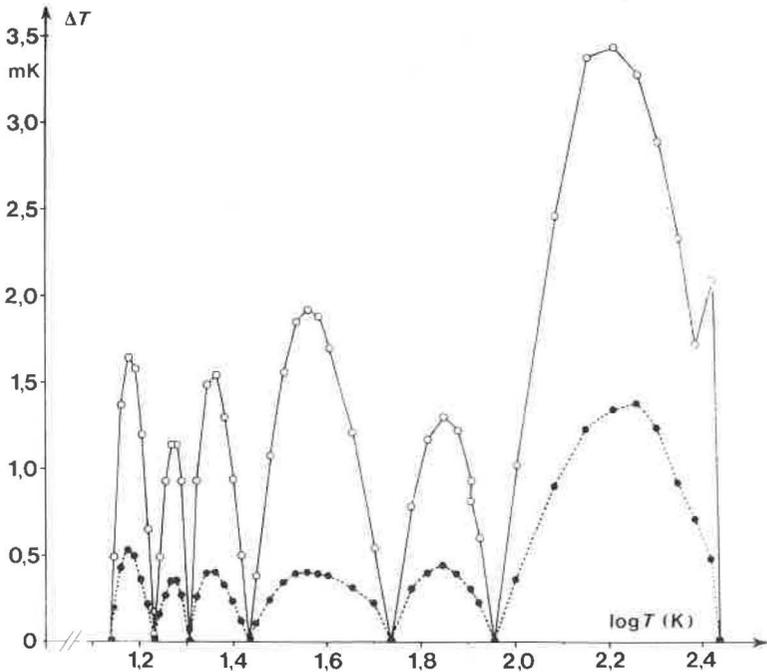


Fig. 2.- Différences maximales (trait plein) et limite supérieure des deux tiers des différences (trait pointillé) en fonction de $\log T$ pour 28 thermomètres, tous étalonnés pour concorder aux points fixes.

D'après les figures 1 et 2 il est évident que la non-reproductibilité de l'EIPT-68 provient essentiellement des différences entre les réalisations des points fixes d'un laboratoire à l'autre.

Variation de la grandeur du kelvin pratique

Pour terminer, nous avons calculé la variation de la grandeur du kelvin pratique, telle qu'elle résulte de la variation des différences entre la température indiquée par un thermomètre et un autre. Nous trouvons que lorsque l'on étalonne

la variation maximale dépasse 2 mK/K à 14 K pour tomber à moins de 0,4 mK/K au-dessus de 20 K. En utilisant les étalonnages d'origine pour 13 thermomètres, la variation maximale est d'environ 11 mK/K au-dessous de 20 K ; elle tombe à nouveau au-dessous de 0,4 mK/K au-dessus de 20 K. Ainsi, à l'heure actuelle, au-dessous de 20 K, l'EIPT-68 ne satisfait pas à la condition suggérée par Preston-Thomas et Bedford [4] selon laquelle la variation maximale doit être inférieure à 0,5 mK/K pour que l'échelle soit lisse en ce qui concerne les mesures de chaleur massique.

Reçu le 15 juin 1976.

BIBLIOGRAPHIE

1. COMPTON (J.P.) et WARD (S.D.), *Temperature Measurement 1975*, Inst. Phys., Conf. Ser. 26, p. 91, Institute of Physics, London, 1975.
 2. CETAS (T.C.), *Metrologia*, 12, 1976, p. 27.
 3. TIGGELMAN (J.L.) et DURIEUX (M.), *Temperature, Its Measurement and Control in Science and Industry*, Vol. 4, II, p. 857, Instrument Society of America, Pittsburgh, 1972.
 4. PRESTON-THOMAS (H.) et BEDFORD (R.E.), *Metrologia*, 4, 1968, p. 14.
-

Étalonnages dans l'EIPT-68 entre le point d'ébullition de l'oxygène et le point de congélation du zinc

par J. J. CONNOLLY et J. V. McALLAN

National Measurement Laboratory (Australie)

(Traduction du Document CCT/76-54)

Méthodes d'étalonnage de routine

Au National Measurement Laboratory, nous sommes en train de modifier nos méthodes d'étalonnage pour faire face à l'accroissement du nombre d'étalonnages ; nous avons pris contact avec de nombreux grands laboratoires nationaux pour comparer leurs méthodes, dans l'espoir d'arriver à un consensus sur les procédures les plus appropriées. Ces renseignements sont résumés aux tableaux I et II. Le lien éventuel entre les différences de méthode et les petites différences systématiques entre les laboratoires est discuté ci-après.

Au départ, lorsque les points fixes utilisés pour les étalonnages de thermomètres à résistance sont étudiés par un laboratoire spécialisé dans les mesures de températures, on prend un soin extrême au cours des mesures. En revanche, pour des étalonnages de routine, on ne consacre pas autant d'attention (ni de temps) aux mesures ; on utilise une méthode simplifiée qui est supposée donner un étalonnage dans l'EIPT-68 dans les limites de l'exactitude requise. Généralement, on mesure les thermomètres à résistance de platine aux températures de points fixes appropriés de l'EIPT, quelquefois par une mesure directe comme celle du point du zinc et quelquefois par comparaison (au point d'ébullition de l'eau ou du soufre par exemple) avec un thermomètre étalonné.

L'évaluation de l'exactitude est fondée essentiellement sur la reproductibilité des points fixes dans les études initiales faites par le laboratoire et l'on ne tient guère compte de l'effet des modifications ultérieures des thermomètres sur la température mesurée. Au NML, on effectue des mesures au point du cadmium au cours des étalonnages de routine pour avoir une indication du comportement général du thermomètre à étudier. Des détails sur cette opération sont donnés dans un autre document (Document CCT/76-50).

L'Echelle Internationale Pratique de Température (1968) [1] autorise certaines variantes dans les méthodes d'étalonnage : par exemple, on peut choisir entre le point de l'étain et le point d'ébullition de l'eau, et les méthodes de recuit ne sont pas précisées, à cause des besoins variés des utilisateurs. Au niveau le plus élevé de précision, les effets mineurs ne seront plus négligeables. Par exemple, les modifications du cycle thermique, stimulées par l'oxygène, signalées par Berry [2, 3], indiquent qu'un thermomètre maintenu pendant de longues périodes entre 100 et 232 °C (point d'ébullition de l'eau et point de l'étain), est dans un état légèrement différent de l'état de complet recuit que l'on obtient en le maintenant au-dessus du point du zinc (420 °C). Aussi est-il souhaitable que, dans la mesure du possible, un laboratoire d'étalonnage utilise toujours la même méthode et que le client soit informé de l'état du thermomètre à la fin de l'étalonnage.

Recuit

Dans nos échanges de correspondance, la plupart des laboratoires ont confirmé l'observation de Berry [3] : la résistance d'un thermomètre au point de glace (R_0) augmente légèrement, après le point d'ébullition de l'eau ou le point de l'étain, de l'équivalent de quelques dixièmes de millikelvin ; les laboratoires qui font les points du zinc ou du soufre après celui de l'étain indiquent que dans ce cas R_0 reprend sa valeur de complet recuit. Ces laboratoires n'ont pas fait de recherches sur ces variations ; elles restent dans les limites des critères de stabilité pour les étalonnages de routine.

Le NBS ou le NML renvoie les thermomètres "à longue tige" dans l'état qui suit le point de l'étain ; tous les autres laboratoires les renvoient dans l'état qui suit le point du zinc. La plupart des mesures de précision se font dans le domaine de - 50 à + 200 °C et il paraît vraisemblable que les thermomètres provenant de tous les laboratoires, à l'exception

du NBS et du NML, dérivent légèrement par rapport à leurs valeurs d'étalonnage lorsqu'on les utilise pour la première fois entre 100 et 200 °C [2,3]. Par ailleurs, si un utilisateur recuit un thermomètre pour annuler les effets des vibrations dues au transport, les thermomètres provenant du NBS ou du NML sont ramenés à l'état qui suit le point du zinc et leurs caractéristiques se modifient légèrement.

Comme l'a signalé Berry, R_{100}/R_0 ne change pas de façon notable aussi longtemps que le thermomètre se trouve dans le même état, à la fois pour les mesures au point d'ébullition de l'eau et au point triple de l'eau ; cela implique que, dans la mesure où l'on utilise la valeur de R_0 appropriée, on peut négliger ces effets stimulés par l'oxygène. La pratique du NBS d'utiliser la valeur de R_0 obtenue immédiatement après chaque point est probablement la meilleure façon de tenir compte de tels effets qui varient avec le temps aux températures supérieures à 100 °C ; en effet, on ne fait pas de mesures tant que l'équilibre thermique n'est pas atteint et généralement on ramène le thermomètre à la température ambiante dès que la mesure est achevée. La plupart des laboratoires sont d'avis qu'il vaut mieux utiliser la moyenne des valeurs de R_0 avant et après chaque point fixe ou chaque étalonnage complet, car cela permet de tenir un peu compte des dérives dues aux écrouissements accidentels et aux recuits partiels, en particulier au-dessus de 420 °C.

Détermination du α des thermomètres du type capsule

L'EIPT emploie la valeur de R_{100}/R_0 dans ses équations au-dessous de 0 °C. Certains laboratoires utilisent le point d'ébullition de l'eau, mais ceux qui utilisent le point de l'étain doivent interpoler à 100 °C pour tenir compte du terme de courbure (soit δ , soit β dans les formules de l'EIPT). Pour les thermomètres du type capsule, il existe un doute sur la conductivité de l'isolant en verre au-dessus de 400 °C et sur leur état de recuit s'ils sont maintenus pendant un certain temps au-dessus de 300 °C. La PTB mesure le terme de courbure pour chaque thermomètre en utilisant le point du cadmium (321 °C) et prend le risque de faibles modifications du recuit, mais les autres laboratoires font une estimation savante du terme de courbure.

Le NML a utilisé la valeur de δ qui assure la continuité de la fonction de référence de l'EIPT à 0 °C (Tableau II de

obtenues au NBS sur plusieurs années [4]. Toutefois, les mesures du NBS sont relatives à des thermomètres à longue tige et la valeur de l'EIPT est celle d'un thermomètre particulier du type capsule [5] ; il n'est pas évident qu'il faille utiliser cette valeur pour les thermomètres de fabrication courante de ce type. Les mesures faites au NML ont montré un petit écart systématique des thermomètres du type capsule par rapport à la valeur de l'EIPT, mais le nombre de thermomètres disponibles est faible et l'exactitude des méthodes de comparaison n'est pas suffisante pour donner un résultat concluant.

Conclusion

Il peut exister de petites différences systématiques, de l'ordre de 1 mK, entre les étalonnages effectués par les laboratoires, par suite des différences entre les méthodes choisies (voir tableaux I et II), même si l'on peut réaliser les points fixes primaires à 0,1 mK près. Comme chaque laboratoire a de très bonnes raisons pour choisir sa méthode, il ne semble pas que l'EIPT-68 puisse être diffusée avec une plus grande exactitude qu'elle ne l'est actuellement.

Remerciements

Nous tenons à remercier nos collègues des divers laboratoires nationaux d'étalonnage pour l'aide qu'ils nous ont apportée en nous communiquant les détails de leurs méthodes expérimentales.

Reçu le 15 juin 1976.

BIBLIOGRAPHIE

1. The International Practical Temperature Scale of 1968, *Metrologia*, 5, 1969, p. 35 et Echelle Internationale Pratique de Température de 1968, *Comptes Rendus des Séances de la 13^e Conférence Générale des Poids et Mesures*, 1967-1968, p. A 1.
2. BERRY (R.J.), *Metrologia*, 10, 1974, p. 145.
3. BERRY (R.J.), Temperature Measurement 1975, Inst. Phys., Conf. Ser. 26, p. 99, Institute of Physics, London, 1975.
4. RIDDLE (J.L.), FURUKAWA (G.T.) et PLUMB (H.H.), *Monographie NBS*, N°126, 1973, p. 107.
5. BEDFORD (R.E.), PRESTON-THOMAS (H.), DURIEUX (M.) et MUIJLWIJK (R.), *Metrologia*, 5, 1969, p. 45.

TABLEAU I

Thermomètres à longue tige *

Température de recuit	NML Australie	NRC Canada	IMGC Italie	NRIM Japon	NPL Royaume-Uni	NBS U.S.A.	PTB R.F.A.
Durée du recuit	1 h	1 h	450 ou 650 °C puis 450 °C	500 ou 650 °C	t_{\max} de travail ou 630 puis 500 °C	480 °C	t_{\max} de travail ou 650 puis 450 °C
Stabilité requise de R_0	0,5 mK	<0,1 mK/h à 450°C	1/2 h à chaque	1 h	2 h puis 1 h	4 h	2 h à chaque
Recuit répété	oui	oui	non	oui	oui	non	oui
Refroidissement	four jusqu'à 350 °C		four jusqu'à 450 °C	four jusqu'à $t < 500$ °C	four jusqu'à 500 °C	0,8 mK	four refroidi
Limite de variation de R_0 en cours d'étalonnage	1,0 mK	variable suivant exactitude	avec long recuit 0,5 mK	0,5 mK	1 mK		1 mK
Répétition du recuit et de l'étalonnage	oui	non	oui	oui	oui	oui	oui
Ordre des étalonnages	(PT - Zn) 2 (PT - Cd) 2 (PT - Sn) 2 (PT - PEO) 2 PT	PT - Sn - PT - Zn - PT - PEO - PT	PT - Sn - PT - Zn - PT	PT - Sn PT - Zn PT - PEO PT	PT - PEH ₂ O PT - PES PT - PEO PT	PT - Zn PT - Sn PT - PEO PT	PT - 3 PEH ₂ O ou 2 Sn PT - 2 Zn PT - 3 PEO PT
Exactitude indiquée	1 mK si Cd à l'intérieur de 1 mK	1 mK < 450 °C 2 mK < 550 °C	Sn & Zn < 0,5 mK si $R_0 < 0,2$ mK	varie avec le type de thermomètre	0-200 °C : 1 mK 200-400 : 2 mK 400-600 : 3 mK PEO : 3 mK	0,2 mK à PT 1 mK à Sn & Zn 2-3 mK à PEO	PT \sim 1 mK PEH ₂ O & Zn: 2 à 3 mK PEO : 5 mK
Durée d'immersion dans un point fixe	jusqu'à 4 h dans Sn & Zn	40 min dans Sn et Zn	30 à 60 min	3 h dans Sn et Zn	> 40 min	20 min	Jusqu'à 3 h dans Sn ou Zn 2 h dans PEH ₂ O
Comparaisons aux points d'ébullition	Bloc (PEO)	Bloc (PEO)	Bloc (PEO)	Bloc (PEO) mieux par manomètre	Chaudières pas de manomètres	Bloc (PEO)	Chaudières pas de manomètres
R_0 pour les points fixes	α	α	α	α	α	α	β

 α - Moyenne de R_0 mesuré avant et après chaque point β - Moyenne de R_0 mesuré avant et après chaque groupe de points α - R_0 mesuré après chaque point

* Abréviations : voir après Tableau II

TABLEAU II
Thermomètre à résistance de platine du type capsule

	NML Australie	NRC Canada	IMGC Italie	NRLM Japon	NPL Royaume-Uni	NBS U.S.A.	PTB R.F.A.
Température maximale	232 °C	100 °C	232 ou 100 °C (dépend de la construction)	100 °C	100 °C	232 °C	321 °C
Détermination de α à partir de	Sn	PEH ₂ O + manomètre ou cryostat de comparaison	Sn ou cryostat de comparaison	PEH ₂ O (sans manomètre)	PEH ₂ O (sans manomètre)	Sn	Sn ou PEH ₂ O (sans manomètre)
δ	Valeur fonction EIPT 6 à 8 h	non nécessaire	Valeur fonction EIPT 30 à 60 min	non nécessaire	non nécessaire	Valeur fonction EIPT	A partir de Cd
Durée au point le plus élevé				3 h	40 min	20 min	6 h

Abbreviations : PT : point triple de l'eau
 PEO : point d'ébullition de l'oxygène
 PEH₂O : point d'ébullition de l'eau
 PES : point d'ébullition du soufre
 Sn : point de congélation de l'étain
 Zn : point de congélation du zinc
 Cd : point de congélation du cadmium

Points fixes médicaux Point de fusion du gallium

par D. D. THORNTON

National Bureau of Standards and George Washington University

et B. W. MANGUM

National Bureau of Standards (États-Unis d'Amérique)

(Traduction du Document CCT/76-13)

Abstract.— There is a special need for a reliable, simple, and economical system of temperature reference points between 0 °C and 100 °C. This need arises from an increasingly wide usage of electronic thermometers, which use thermistor sensors. The complete temperature characteristics of thermistors and the possibility of calibration drift make it important to be able to quickly calibrate them at several points in the temperature range of interest. The need for high accuracy in temperature measurement is particularly acute in clinical laboratories where thermistors are used as temperature sensors in automated enzyme analyzers. We propose to document a set of liquid-solid phase transitions to be used as fixed points. In this paper we demonstrate that the melting point of 7 N's pure gallium, at 29.772 °C, is reproducible to a millikelvin and that small (20 grams) samples can be used to calibrate thermistors to this accuracy and any thermometer to an accuracy of 10 mK or better in a temperature controlled bath.

Il existe un besoin particulier d'un système fiable, simple et économique de points de température de référence (points fixes) dans le domaine de 0 °C à 100 °C. Ce besoin est lié à l'utilisation de plus en plus répandue de thermomètres électroniques qui utilisent des thermistances comme éléments sensibles. Bien que certaines thermistances aient une reproductibilité individuelle assez bonne, la complexité de leurs caractéristiques en fonction de la température et l'éventualité d'une dérive significative des valeurs d'étalonnage font qu'il est important de pouvoir étalonner ou réétalonner rapidement ces thermomètres en plusieurs points de leur domaine de température. La nécessité d'avoir une grande *exactitude* dans les mesures de

température est particulièrement aiguë dans les laboratoires médicaux où l'on utilise des thermistances comme éléments thermométriques dans des dispositifs automatisés d'analyse d'enzymes, pour lesquels l'exactitude des mesures et des contrôles de température est fondamentale. En médecine, la popularité des thermomètres médicaux électroniques rend nécessaire un point d'étalonnage à 37 °C.

Nous avons abordé ce problème d'une façon très prudente. Il suffit d'une simple étude rapide de l'histoire de la thermométrie pour constater que les points triples et les changements d'état liquide-solide de substances très pures fournissent des transitions nettes et reproductibles, dont la chaleur latente permet, de façon particulièrement simple, de définir et de maintenir une température constante. En conséquence, nous avons entrepris de mettre en évidence et d'étudier une série de changements d'état liquide-solide dans le domaine de 0 °C à 100 °C. Evidemment ce sont le point triple de l'eau et le point de glace qui constituent les points de référence à l'extrémité inférieure (0 °C) de cette échelle. Pour étalonner la plupart des thermomètres électroniques en particulier, il est à la fois simple et économique d'obtenir le point de glace avec la précision et l'exactitude désirées.

Comme le gallium fond à 30 °C et comme on peut se le procurer avec une grande pureté (7 N^{*}), nous avons fait une étude approfondie de son équilibre liquide-solide. Nous nous sommes procuré dans le commerce trois types de gallium de pureté différente (3N, 5N et 7N). Nous avons mis des échantillons de dix et vingt grammes dans des ampoules en verre et en polyéthylène. Ces dernières se sont avérées plus commodes, car il fallait prendre beaucoup de soin pour éviter de casser les ampoules en verre en congelant les échantillons. La plupart des échantillons ont été préparés à partir de gallium dans l'état où nous nous l'étions procuré ; les ampoules ont été scellées sous argon, bien que quelques échantillons de pureté 5 N aient été contaminés par de l'huile minérale et par l'air.

Le gallium liquide présente une nette tendance à demeurer en surfusion bien au-dessous de son point de congélation ; ceci

* Cette écriture signifie que la pureté est représentée par un nombre de sept 9 après la virgule : 0,999 999 9. Il en est de même des puretés 39 et 59 : 0,999 et 0,999 99.

constitue la principale difficulté pour obtenir un bon point de congélation. En fait, avec nos échantillons de 20 grammes, les températures apparentes de congélation présentaient une dispersion de plusieurs centièmes de kelvin, pour un même échantillon. En revanche les caractéristiques de fusion étaient très reproductibles. Toutes les fusions des échantillons de pureté 5 N étaient reproductibles avec des résultats homogènes dans les limites de résolution de l'instrument, c'est-à-dire généralement ± 1 mK. Apparemment, la contamination par l'huile et l'oxygène a relativement peu d'effet sur la température de fusion. On voit l'effet des impuretés métalliques en comparant le comportement des échantillons de pureté 3 N, 5 N et 7 N. En diminuant les impuretés on obtient des paliers de fusion plus longs et plus plats (température plus constante) comme le fait apparaître la figure 1. Les températures de fusion sont :

pureté 3 N : 29,762 °C
" 5 N : 29,769 °C
" 7 N : 29,772 °C

Nous avons étudié la reproductibilité générale de ces résultats en comparant des échantillons de gallium provenant de différents lots et de différents fournisseurs.

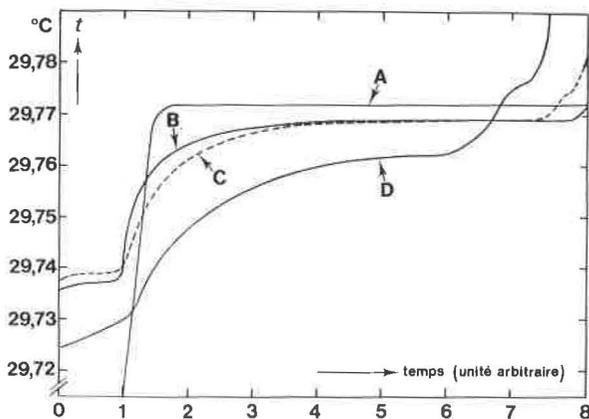


Fig. 1.- Courbes de fusion du gallium

A : échantillon de pureté 7 N + argon
B : " " 5 N + air
C : " " 5 N + argon
D : " " 3 N + argon

Nous devons signaler que nous avons obtenu ces résultats de fusion en utilisant des échantillons polycristallins qui se congelaient rapidement et en les agitant de temps en temps en

cours de congélation. Les plus gros cristallites que l'on ait observés dans ces échantillons avaient des dimensions de l'ordre de 1 ou 2 millimètres ; généralement ils étaient beaucoup plus petits. On a observé que la fusion de monocristaux de gallium pur semble s'opérer en quatre phases distinctes, chaque phase ayant sa propre température de fusion. La différence entre ces températures étant de l'ordre de 20 mK, cet effet peut être très gênant. Comme nous n'avons constaté jusqu'ici aucune trace de cet effet avec les échantillons polycristallins, nous essayons de déterminer quelles méthodes donneraient des échantillons monocristallins suffisamment gros pour produire l'effet en question.

Enfin, nous avons mis au point une méthode très simple permettant d'étalonner n'importe quel thermomètre au point de fusion du gallium avec une exactitude de 10 mK ou mieux, en utilisant ces petites ampoules de gallium plongées dans un bain thermorégulé. Cette méthode est la suivante : 1) le gallium est d'abord porté à une température d'équilibre légèrement inférieure à la température de fusion , 2) le bain est alors porté à une température supérieure à la température de fusion et on procède à une "fusion" , 3) la thermistance dans l'ampoule de gallium est transférée de l'ampoule vers le bain , et 4) la température du bain est ajustée à la température de fusion telle qu'elle est indiquée par cet élément sensible.

Nous avons l'intention de poursuivre ce programme par l'étude des points de fusion et de congélation d'alliages eutectiques, de métaux alcalins et de certains composés organiques.

Reçu le 12 avril 1976.

Recherches sur la réalisation de la température de congélation du gallium

par S. LAU et P. SCHLOTT

Amt für Standardisierung, Messwesen und Warenprüfung (Rép. Dém. Allemande)

(Traduction du Document CCT/76-23)

On a fait des recherches sur la réalisation de la température de congélation du gallium comme point fixe secondaire.

A cet effet on a fait fondre du gallium de grande pureté (99,999 5 %) dans un creuset en polyéthylène de 250 cm³. Afin de protéger le gallium de la contamination et le thermomètre de tout risque, on a scellé à l'une des extrémités un tube en polyéthylène de 10 mm de diamètre plongeant dans le gallium en fusion. Pendant la congélation le creuset en polyéthylène est enfermé dans un vase de Dewar. Le thermomètre à résistance est placé dans le tube protecteur en polyéthylène ; pour assurer un meilleur contact thermique celui-ci est partiellement rempli d'eau. Comme le creuset n'a que 140 mm de profondeur, la partie émergente du thermomètre est maintenue, au moyen d'une enveloppe thermorégulée, à une température d'environ 0,2 K inférieure à la température de congélation du gallium.

La variation de la température d'équilibre du gallium en cours de congélation est inférieure à 1 mK sur une durée de 24 à 48 heures.

On a déterminé la température de congélation avec quatre thermomètres à résistance de platine différents ; deux d'entre eux avaient une résistance nominale $R_0 \approx 10 \Omega$, les deux autres $R_0 \approx 25 \Omega$. On avait étalonné les thermomètres à l'ASMW dans

dans l'EIPT-68.

La mesure de la résistance des thermomètres a été effectuée soit au moyen d'un potentiomètre de précision à courant continu, type R 348, soit au moyen d'un pont de Smith, type III.

Les dispositifs de mesure permettent de déterminer les variations de température avec une reproductibilité de 0,1 mK.

Le tableau ci-après donne les valeurs obtenues avec les quatre thermomètres pour la température de congélation t_{Ga} du gallium.

N° du thermomètre	t_{Ga} (°C)	N	s (mK)
82	29,769 ₈	9	0,83
87	29,769 ₇	11	1,25
207 364	29,769 ₆	8	0,77
218 057	29,769 ₈	1	-
Valeur moyenne	29,769 ₇	-	0,95

Pour déterminer ces valeurs on a fait fondre et congeler le métal quinze fois. Comme on n'a pas fait des mesures avec tous les thermomètres lors de chaque congélation - il n'y a que le thermomètre N° 218 067 qui a servi de contrôle - on indique le nombre N de séries de mesure, à partir desquelles on a calculé une valeur moyenne de t_{Ga} . Une série de mesures comportait 5 à 8 mesures de la résistance électrique d'un thermomètre pendant une congélation.

La valeur s est l'écart-type qui résulte des N valeurs de mesure du thermomètre correspondant.

L'écart-type des résultats individuels de toutes les séries de mesure est $s = 0,95$ mK. La température de congélation t_{Ga} du métal étudié est, avec un taux de confiance de 95 %,

$$t = (29,769_7 \pm 0,000 6) \text{ } ^\circ\text{C}$$

dans l'EIPT-68 telle qu'elle est réalisée à l'ASMW.

Reçu le 21 avril 1976.

Le point de congélation de l'aluminium comme point fixe pour le thermomètre à résistance de platine

par G. T. FURUKAWA, W. R. BIGGE, J. L. RIDDLE et M. L. REILLY

National Bureau of Standards (États-Unis d'Amérique)

(Traduction du Document CCT/76-17)

Abstract.— The range of the freezing points for five aluminum specimens was found to be 0.51 mK. The equation $W(t') = 1 + At' + Bt'^2$ was extrapolated to the aluminum point. The range of the values of $t'(Al)$ computed for five platinum resistance thermometers (SPRT) was 3.3 mK. The enhancement of the reproducibility of SPRT temperature scales by applying the aluminum point is described. An equation suitable for a SPRT scale that includes the aluminum point is :

$$W(t^*) = 1 + At^* + Bt^{*2} + Dt^{*2} (t^* - 231.9292 \text{ }^\circ\text{C})(t^* - 419.58 \text{ }^\circ\text{C}).$$

1. INTRODUCTION

Entre le point du zinc (419,58 °C) et 630,74 °C l'Echelle Internationale Pratique de Température de 1968 (EIP-68) est réalisée par extrapolation suivant l'équation :

$R(t')/R(0 \text{ }^\circ\text{C}) = 1 + At' + Bt'^2$ pour le thermomètre étalon à résistance de platine. On obtient les constantes de l'équation par étalonnage au point triple de l'eau, au point d'ébullition de l'eau ou au point de congélation de l'étain, et au point de congélation du zinc. Toute erreur d'étalonnage à ces points fixes se répercute en s'amplifiant au fur et à mesure de l'extrapolation vers la limite supérieure du domaine de température. Pour une erreur positive d'une unité dans l'étalonnage au point d'ébullition de l'eau, de congélation de l'étain ou de congélation du zinc, les erreurs correspondantes sur la valeur de la température calculée à 630,74 °C sont respectivement de - 5,0

- 3,5 et + 3,4 unités. Un point fixe à la limite supérieure du domaine de température réduirait les erreurs qui sont introduites de cette façon. Les résultats de nos recherches montrent que le point de l'aluminium constituerait un choix approprié ; de plus, ce serait un point fixe utile pour l'extension de l'échelle du thermomètre à résistance de platine vers les températures supérieures.

2. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

Dans une précédente publication [1] nous avons rendu compte de travaux sur la reproductibilité du point de congélation d'échantillons d'aluminium provenant de deux lots différents (de pureté nominale 99,999 %), mesuré au moyen d'un thermomètre étalon à résistance de platine. La dispersion des points de congélation de cinq des six échantillons correspondait à 0,51 mK ; le point de congélation du sixième échantillon s'écartait de -1,31 mK de la moyenne des points de congélation des cinq autres. Il se peut que le sixième échantillon ait été contaminé pendant le montage de la cellule à point de congélation ou que l'échantillon originel n'ait pas été homogène. Dans une publication ultérieure [2] nous avons donné, pour six thermomètres à résistance de platine, les valeurs de $t'(Al)$ obtenues en extrapolant l'équation du second degré de l'EIPT-68 jusqu'aux valeurs observées de $W(Al)$. La dispersion des valeurs de $t'(Al)$ obtenues avec cinq des thermomètres à résistance de platine était de 3,3 mK ; la valeur de $t'(Al)$ obtenue avec le sixième thermomètre était supérieure de 9,1 mK à la moyenne des valeurs obtenues avec les cinq autres. Ces résultats concordent à 10 mK près avec la valeur donnée par J.V. McAllan et M.M. Ammar [3]. Par conséquent, différents thermomètres à résistance de platine peuvent concorder étroitement entre eux au point de l'aluminium.

3. CONCLUSION

L'équation ci-après convient pour une échelle du thermomètre à résistance de platine qui inclut le point de l'aluminium :

$$(1) \quad W(t^*) = 1 + At^* + Bt^{*2} + Dt^{*3} \quad (t^* - 231,9292 \text{ }^\circ\text{C}) (t^* - 419,58 \text{ }^\circ\text{C}).$$

Les coefficients A et B de l'équation (1) sont les mêmes que ceux

de l'équation du second degré de l'EIPT-68 lorsqu'on les obtient par étalonnage au point triple de l'eau et aux points de congélation de l'étain et du zinc. On peut obtenir la valeur de t^* au point de l'aluminium d'après les résultats d'extrapolation de l'équation du second degré pour un groupe de thermomètres types à résistance de platine. Pour un thermomètre donné l'ordre de grandeur du coefficient D , et par conséquent les différences numériques entre t' et t^* , dépend de la façon dont $W(\text{Al})$ observé et $t^*(\text{Al})$ admis concordent avec l'équation du second degré de l'EIPT-68. Une valeur anormalement forte de D (normalement inférieure à $2 \times 10^{-15} \text{ }^\circ\text{C}^{-4}$) laisserait à penser qu'il y a des erreurs d'étalonnage. On peut établir une équation pour représenter les différences entre t^* et t_{68} . [Il conviendrait de modifier convenablement l'équation (1) pour tout changement futur des valeurs assignées aux températures des points de l'étain et du zinc].

On a étudié les effets d'erreurs correspondant à $+1 \text{ }^\circ\text{C}$ dans la détermination de $W(t^*)$ à l'un des points de l'étain du zinc ou de l'aluminium. La figure 1 résume l'influence, en fonction de la température, d'une erreur d'étalonnage à l'un de ces points fixes.

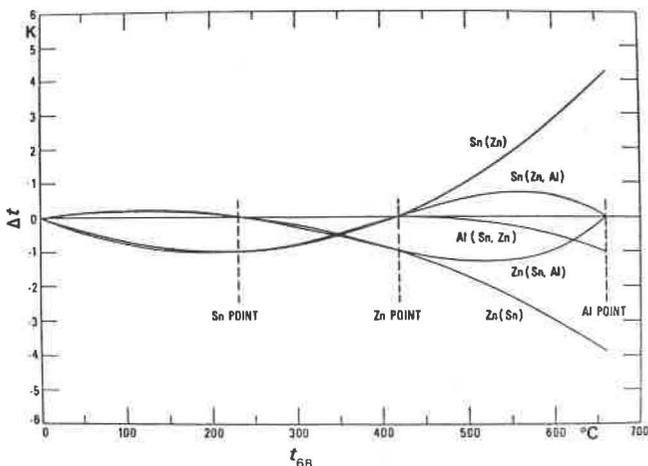


Fig. 1.- Erreur résultant d'une erreur d'étalonnage au point de l'étain, du zinc ou de l'aluminium, pour un thermomètre à résistance de platine.

Les courbes donnent, en fonction de la température, l'erreur résultant d'une erreur d'étalonnage sur $R(t)/R(0^\circ\text{C})$, correspondant à $1 \text{ }^\circ\text{C}$ à l'un des points fixes (étain, zinc ou aluminium). Le point fixe sur lequel l'erreur a été faite est indiqué sur la courbe ; les points fixes pour lesquels on suppose que l'erreur est nulle sont indiqués entre parenthèses.

On compare les effets d'une erreur d'étalonnage dans le cas de l'équation du second degré de l'EIPT-68 et dans le cas de la nouvelle équation (1). Lorsque le point de l'aluminium est utilisé dans l'échelle du thermomètre à résistance de platine, les effets de l'erreur d'étalonnage aux points de l'étain et du zinc sont atténués. Les effets d'une erreur d'étalonnage au point de l'aluminium diminuent vers les basses températures : au-dessous du point du zinc, l'erreur est atténuée d'un facteur 50 ou 100.

4. TRAVAUX FUTURS

On envisage de faire dans l'avenir des mesures du point de congélation sur des échantillons d'aluminium de plus grande pureté. Le $R(0\text{ }^{\circ}\text{C})$ des thermomètres à résistance de platine utilisés lors des précédentes mesures n'était que de 0,25 ohm. On utilisera lors des travaux futurs des thermomètres ayant un $R(0\text{ }^{\circ}\text{C})$ de 2,5 ohms (*voir ce volume, Annexe T 20*). On pense que les nouveaux thermomètres permettront des mesures d'une précision plus élevée.

Reçu le 12 avril 1976.

BIBLIOGRAPHIE

1. FURUKAWA (G.T.), *J. Res. NBS*, 78A, 1974, p. 477.
 2. FURUKAWA (G.T.), BIGGE (W.R.), RIDDLE (J.L.) et REILLY (M.L.), *Temperature Measurement 1975*, Inst. Phys. Conf. Series 26, p. 389, Institute of Physics, London, 1975.
 3. McALLAN (J.V.) et AMMAR (M.M.), *Temperature, Its Measurement and Control in Science and Industry*, Vol. 4, I, p. 275, Instrument Society of America, Pittsburgh, 1972.
-

Travaux en cours au NBS sur les thermomètres à résistance aux températures élevées

par J. P. EVANS

National Bureau of Standards (États-Unis d'Amérique)

(Traduction du Document GCT/76-14)

Abstract.— Work now in progress or planned for the near future at the National Bureau of Standards is aimed at developing superior platinum resistance thermometers for use at high temperatures and at encouraging their commercial production. Present efforts are concentrated on the design and construction of thermometers having a resistance at 0 °C of 2.5 ohm and intended for use up to at least 700 °C. This report describes some of the features of the thermometer construction, including the use of laser machining to make silica glass supporting parts.

Au cours des dernières années on a montré que les thermomètres à résistance de platine peuvent constituer une meilleure échelle pratique de température que l'EIPT-68 dans le domaine compris entre 630 °C et le point de l'or. L'utilité d'une telle échelle serait encore accrue en éliminant, ou tout au moins en réduisant, certains défauts connus des thermomètres à résistance pour les températures élevées utilisés dans le passé [1-3]. Bien que peu graves, ces défauts deviennent importants eu égard à la grande précision dont ces thermomètres sont intrinsèquement capables. Ils comprennent les erreurs de "perte par la tige" (c'est-à-dire les erreurs dues à une mauvaise immersion) et l'instabilité du thermomètre. L'utilisation d'un courant de mesure alternatif a également fait apparaître d'éventuels défauts d'isolement des supports de la résistance du thermomètre, et cela a soulevé le problème de l'influence de la fréquence sur la résistance mesurée [4-5].

Des recherches pour tenter de résoudre certains de ces problèmes sont actuellement en cours ou sont envisagées dans un proche avenir au National Bureau of Standards. On pense et on espère que ces recherches aboutiront à la construction de thermomètres ayant effectivement des performances supérieures ; ces thermomètres seraient ainsi plus largement utilisés dans les laboratoires d'étalonnage et par tous ceux qui doivent faire des mesures de température très précises jusqu'au point de l'or. On espère en outre, comme résultat complémentaire de ces travaux, la mise au point de techniques améliorées de fabrication des thermomètres à résistance pour les hautes températures, ce qui encouragera leur production commerciale.

A l'heure actuelle, les efforts portent sur la conception, la construction et l'essai de thermomètres spéciaux à résistance destinés à être utilisés jusqu'à 700 °C au moins. On a besoin de ces thermomètres en liaison avec les travaux sur la thermométrie à gaz au NBS et pour contrôler le point de l'aluminium du NBS. Le but recherché est de fabriquer des thermomètres qui soient stables sur de longues périodes, qui donnent lieu à de très faibles erreurs dues aux pertes par la tige et permettent de faire des déterminations faciles et précises de leur résistance tant en courant alternatif qu'en courant continu. On pense que l'expérience et les connaissances acquises ainsi seront précieuses pour la conception et la construction de thermomètres destinés à être utilisés même à des températures plus élevées.

Le thermomètre décrit ici comporte une résistance en fil de platine de grande pureté, de 0,12 mm de diamètre, montée sur un support en forme de croix. La résistance a environ 35 mm de longueur et une résistance nominale de 2,5 ohms à 0 °C. Les quatre fils de connection sont en platine de 0,25 mm de diamètre montés et séparés avec des gaines et des disques isolants. Le thermomètre est scellé dans un tube de 7 mm environ de diamètre extérieur et d'environ 800 mm de longueur.

Toutes les parties du thermomètre destinées au montage, à l'isolation et à la protection, sont en verre de quartz. Pour cet usage on a choisi un type de quartz naturel fondu, parce qu'il est réputé avoir un point de ramolissement plus élevé et une viscosité plus grande que les autres types de verre de silice. Ce verre est caractérisé par l'absence de bande d'absorption à 2,72 μm , dénotant qu'il ne contient pas d'ions oxhydrile. (On suppose que la présence d'oxhydrile abaisse le

point de ramollissement et active la dévitrification du verre de silice.) Ce matériau est fréquemment utilisé dans la fabrication industrielle des semi-conducteurs ; on le trouve sous différentes formes telles que gaine, tige et ruban ; et on peut se le procurer dans une qualité relativement pure (en général 4×10^{-6} de fer et 50×10^{-6} d'impuretés diverses).

La figure 1 montre certains des composants en verre de quartz. Ces composants sont découpés au laser dans des feuilles de 0,4 mm d'épaisseur. Les ailettes sont ajustées pour constituer le support en croix ; les extrémités de celles-ci sont fondues pour les maintenir en place. Si l'on veut, on peut souder à l'une des extrémités le disque facultatif (B). Les encoches dans le support sont disposées de façon à constituer un "filetage" en double hélice dans lequel s'enroule la résistance. Après avoir monté le support en croix, toutes les arêtes, y compris les arêtes des encoches, sont passées à la flamme pour supprimer les aspérités et n'avoir que des surfaces lisses.

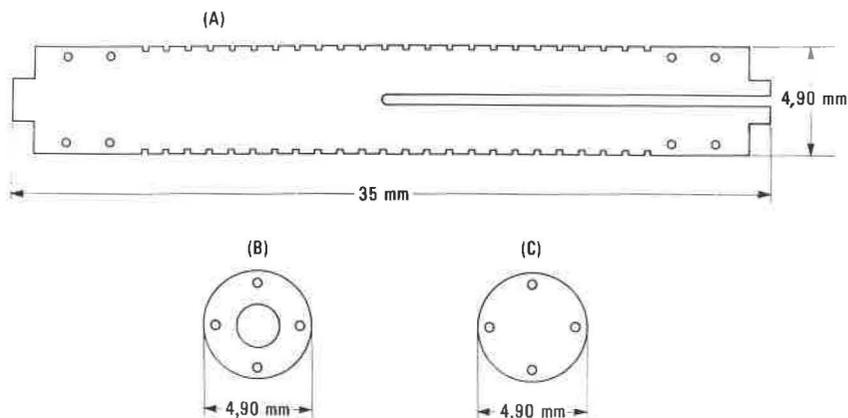


Fig. 1.- Parties d'un thermomètre à résistance pour haute température. Toutes les parties ci-dessus sont usinées à l'aide d'un laser à partir de feuilles de quartz fondu de 0,4 mm d'épaisseur.

- A.- Support en croix, 2 pièces par thermomètre. Les encoches ont 0,25 mm de largeur et 0,23 mm de profondeur, leurs centres étant espacés de 1,00 mm.
- B.- Disque, 1 disque facultatif par thermomètre. C.- Disque support des conducteurs, au minimum 15 pièces par thermomètre.

Sur la figure 1 ne sont pas indiqués les gaines d'isolement des conducteurs ni le tube extérieur de protection. Les gaines ont

un trou central de 0,5 mm de diamètre et une épaisseur de paroi réduite au minimum (environ 0,25 mm) ; on fait une sélection pour avoir un tube de protection rond et droit avec un diamètre intérieur de 5,00 mm.

Le principe de construction utilisé pour ces thermomètres n'a jusqu'ici posé aucun problème insurmontable et il présente plusieurs aspects pratiques. Le découpage au laser, effectué par une société commerciale, a donné des composants ayant d'étroites tolérances dimensionnelles (inférieures à 0,02 mm). Le procédé est facilement automatisé et il s'est avéré que le coût du découpage au laser est inférieur à la moitié du coût du rodage ou du façonnage par ultrasons. Compte tenu de la configuration choisie, on n'a besoin que d'un seul type d'ailette. Le polissage et la soudure des composants en verre de quartz sont facilement exécutés avec un petit chalumeau oxyhydrique. Et finalement, alors que les ailettes non montées sont quelque peu fragiles, lorsqu'elles sont assemblées et soudées le bâti final en croix est suffisamment robuste pour supporter une manipulation normale pendant la construction du thermomètre. Tous ces détails devraient présenter quelque intérêt pour ceux qui ont à fabriquer des thermomètres, en particulier pour les industriels.

On consacre une attention particulière à la propreté dans la construction des thermomètres. Les composants en quartz fondu subissent un nettoyage aux ultrasons, qui comporte des rinçages dans des solutions d'acide fluorhydrique à 10 % et, avant leur assemblage, ils sont recuits à 1100 °C dans un flux d'oxygène pendant au moins une heure pour oxyder et enlever les impuretés résiduelles. Avant d'être scellé, le thermomètre est relié à une installation de vide ultra propre pendant environ 100 heures. Pendant ce temps le thermomètre est chauffé à 450 °C. On le remplit ensuite avec de l'argon de grande pureté contenant 1 % d'oxygène de grande pureté et on le scelle hermétiquement. Ces différentes étapes sont destinées à établir et à maintenir un environnement propre pour la résistance en fil de platine.

On adapte au thermomètre terminé un capuchon spécial pour le raccordement des conducteurs électriques extérieurs pour l'utilisation en courant alternatif ou d'autres conducteurs pour l'utilisation en courant continu. Afin d'annuler les réflexions totales internes, on donne un fini mat à la surface externe du tube de protection en quartz fondu.

Bien qu'au moment de la rédaction de cet article on n'ait pas encore fait d'essais sur les thermomètres décrits ci-dessus, on s'attend à ce que les objectifs visés soient atteints. Le nettoyage complet devrait contribuer à améliorer la stabilité du thermomètre. De même, le support des fils de résistance, grâce à des surfaces lisses qui ne leur imposeront pas de contrainte ni d'abrasion, devrait contribuer à la stabilité. L'effet de perte par la tige dans les thermomètres devrait être faible car 1) la conduction de chaleur à partir de la résistance est réduite du fait de l'utilisation de fils conducteurs de petit diamètre et de gaines à conducteurs à paroi mince, et 2) la conduction de chaleur vers la résistance et les conducteurs est améliorée en maintenant les fils près de la paroi du tube protecteur. Ceci a pu être obtenu en imposant des tolérances dimensionnelles étroites, réalisables de façon économique grâce à l'utilisation d'une technique courante de découpe au laser des composants en verre de quartz. On doit arriver à déterminer avec précision la résistance nominale de 2,5 ohms à 0 °C avec un appareillage normal en courant continu et l'on pense que le montage en double hélice de la résistance permettra de réduire les effets indésirables en courant alternatif. On a l'intention de vérifier toutes ces prévisions en effectuant des essais approfondis. On publiera les résultats de ces essais, ainsi que les spécifications détaillées de la construction de ce thermomètre.

On utilisera ces thermomètres d'abord jusqu'à 700 °C environ, mais on pense pouvoir les porter même à des températures plus élevées. On envisage des expériences pour déterminer la limite supérieure d'utilisation. Cette limite supérieure sera probablement dictée, en grande partie, par un accroissement de l'instabilité du thermomètre aux températures élevées et par un accroissement des pertes électriques dans les parties isolantes. Ces deux problèmes peuvent être en partie résolus en utilisant un fil de résistance de diamètre supérieur afin d'obtenir une plus faible valeur de la résistance, ce qui peut aisément se faire grâce à la conception actuelle. De toute façon, l'expérience acquise avec les thermomètres décrits plus haut devrait aider à ouvrir la voie vers la fabrication de thermomètres à résistance de platine, destinés à être utilisés jusqu'au point de l'or, meilleurs que ceux dont on a disposé jusqu'à présent.

BIBLIOGRAPHIE

1. EVANS (J.P.) et WOOD (S.D.), *Metrologia*, 7, 1971, p. 108.
2. EVANS (J.P.), *Temperature, Its Measurement and Control in Science and Industry*, Vol. 4, II, p. 899, Instrument Society of America, Pittsburgh, 1972.
3. MARCARINO (P.) et CROVINI (L.), *Temperature Measurement 1975*, Inst. Phys., Conf. Ser. 26, p. 107, Institute of Physics, London, 1975.
4. WOOD (S.D.), *NBS Technical Note 764*, 1973.
5. FURUKAWA (G.T.), *J. Res. NBS*, 78A, 1974, p. 477.

Reçu le 12 avril 1976.

**Étude comparative des instruments d'interpolation
pour une échelle pratique de température
entre 630,74 °C et 1 064,43 °C**

par L. A. GUILDNER, H. J. KOSTKOWSKI et J. P. EVANS

National Bureau of Standards (États-Unis d'Amérique)

(Traduction du Document CCT/76-16)

Abstract.— The uncertainties of realizing the IPTS-68 between 630.74 and 1064.43 °C are large (from 100 to 300 mK) because of limitations of the Pt-10 % Rh/Pt thermocouple as an interpolating instrument.

There is sufficient experimental evidence to conclude that an important reduction of uncertainty can be attained by replacing the thermocouple as the standard instrument with a platinum resistance thermometer. It has already been demonstrated that resistance thermometers, immediately after calibration, can determine value of temperature in this range with a total uncertainty (3σ + systematics) of about 10 mK, and after exposure to high temperatures for 125 h, with a total uncertainty of about 70 mK.

A proposed alternative, a scale based on blackbody radiation using a photoelectric spectral pyrometer as the interpolating instrument, is estimated to be more precise and accurate than the present scale realized by using thermocouples. However, the experimental demonstration to date has been very limited. The smallest reported uncertainty at the temperature of the gold point on such a scale when starting at the silver point is 40 mK and when starting at the antimony point is 160 mK. There are other serious problems and limitations in adopting a photoelectric pyrometer scale below the gold point. Among these are the unavailability of suitable commercial photoelectric pyrometers, the high level of technical proficiency required for making such measurements and the scarcity of adequately trained people, and the difficulties of transferring and applying such a radiation temperature scale.

Thus from the standpoint of reproducibility, ease and economy of use, and the extent to which such a scale would be used broadly by technical workers, the platinum resistance thermometer has significant advantages over the photoelectric spectral pyrometer. If it were used now in the range 630.74 to 1064.43 °C, the platinum resistance thermometer could yield values of temperature that would not differ significantly from the realization of the present scale when these values are derived from an already established equation. We recommend that the CCT encourage such use as a means of

broadening the acceptance of this instrument. If its use becomes broad enough by the time that a new scale is formulated, as we estimate, the high temperature platinum resistance thermometer should replace the thermocouple for the new IPTS up to the temperature of the gold point.

1. Introduction

Depuis l'adoption de la première Echelle Internationale de Température, on a publié des articles prônant le remplacement du thermocouple Pt-10 % Rh/Pt comme instrument étalon dans le domaine de température de 630 °C jusqu'au point de l'or. Dès le début, on avait suggéré que le thermomètre à résistance de platine lui serait préférable. Plus récemment, on a proposé des méthodes sans contact comportant la mesure du rayonnement d'un corps noir approprié au moyen d'un pyromètre photoélectrique monochromatique.

Le présent article a pour but d'exposer les caractéristiques de ces trois instruments et de comparer leurs aptitudes en tant qu'instruments étalons entre 630 °C et 1064 °C.

2. Critères

L'Echelle Internationale de Température a été adoptée en 1927 afin d'établir, sur le plan international, une échelle de température de laboratoire ; elle fut conçue pour être bien déterminée, reproductible avec facilité et avec exactitude. Ceux qui ont établi cette échelle voulaient qu'elle concorde avec les températures thermodynamiques aussi étroitement que possible dans l'état des connaissances de l'époque. Ces objectifs sont également indiqués dans la première révision importante de l'échelle, en 1948.

Peut-être parce que ces objectifs semblent évidents, le texte de l'EIPT-68 n'est pas aussi explicite. Toutefois, ces mêmes objectifs demeurent valables pour toute extension et amélioration des échelles à venir. La reproductibilité d'un thermomètre (telle qu'on peut l'évaluer par la précision et la stabilité à long terme) est la caractéristique la plus importante à rechercher dans un instrument étalon. Notre plan de présentation de la reproductibilité et des autres facteurs significatifs pour chaque instrument est le suivant :

- A. Reproductibilité d'un même instrument et accord avec d'autres thermomètres du même type.
- B. Facilité et économie d'emploi du point de vue de :
 - a. l'utilisation pratique,
 - b. l'appareillage,
 - c. la compétence technique requise.

- C. Utilisation générale, c'est-à-dire dans quelle mesure ce thermomètre est-il ou risque-t-il d'être bientôt largement utilisé par les techniciens.
- D. Conséquences sur la continuité des fonctions définissant l'échelle et de leurs dérivées ; concordance avec les températures thermodynamiques.

3. Le thermocouple Pt-10 % Rh/Pt

La longue expérience sur le thermocouple Pt-10 % Rh/Pt comme instrument étalon de l'LIPT dans le domaine de 630,74 à 1064,43 °C fournit d'amples renseignements quant à sa fiabilité. On peut citer comme faisant autorité en la matière les faits suivants :

Jones [1] a publié une étude des exactitudes d'étalonnage et d'utilisation de ces thermocouples. Dans le domaine de 630,74 à 1064,43 °C, il conclut que l'incertitude sur la moyenne de cinq déterminations de la température à un point d'étalonnage est, avec un taux de confiance de 99 %, de $\pm 1 \mu\text{V}$ soit environ $\pm 0,1 \text{ K}$. L'incertitude sur une seule détermination "dépourvue d'erreur systématique" est de $\pm 0,2 \text{ K}$. McLaren et Murdock [2] ont publié les premiers résultats d'une étude que l'on peut effectivement considérer comme une étude des erreurs systématiques. D'après leurs travaux, il est clair que l'on peut rarement considérer une mesure comme dépourvue d'erreurs systématiques ; elles s'élèvent presque toujours à au moins 2 ou 3 μV (0,2 ou 0,3 K) et souvent à plus.

Des trois appareils considérés, le thermocouple Pt-10 % Rh /Pt est le plus facile d'emploi. Ses faibles dimensions et sa souplesse permettent des mesures de température que l'on ne pourrait faire avec aucun des deux autres instruments. On peut fabriquer le thermocouple lui-même assez aisément (et à peu de frais). En raison des limitations de ses propres performances, divers potentiomètres et les voltmètres électroniques de la meilleure qualité conviennent pour mesurer sa force électromotrice sans augmenter de façon significative l'incertitude du résultat. Un technicien peut s'adapter très rapidement à faire les mesures.

En ce qui concerne son utilisation générale, on utilise le thermocouple Pt-10 % Rh/Pt et on l'utilisera probablement à l'avenir de façon beaucoup plus courante qu'aucun des deux autres types de thermomètres envisagés comme éventuels instruments étalons.

Les températures dans l'Echelle Internationale Pratique diffèrent nettement des températures thermodynamiques dans le domaine de 630,74 à 1064,43 °C [3,4], et il y a des discontinuités de la dérivée dt_{68}/dt à chaque extrémité. On pourrait apporter des modifications à l'équation d'interpolation du thermocouple pour réduire tous les écarts au niveau de l'incertitude des mesures qui établissent la relation entre la température de l'échelle internationale et la température thermodynamique.

4. Le thermomètre à résistance de platine pour les températures élevées

L'étude la plus complète des caractéristiques des thermomètres à résistance de platine pour les températures élevées a été publiée par Evans et Wood [5]. Ils ont étudié les changements de résistance de neuf thermomètres étalons (0,25 ohm à 0 °C) aux températures d'étalonnage des points de congélation de l'or, de l'argent, de l'antimoine, du zinc et de l'étain ainsi qu'au point triple de l'eau. Ils ont relié la résistance des thermomètres à la température en définissant une échelle de température arbitraire telle que la résistance réduite, $W(t_x) = R(t_x)/R(0\text{ °C})$ était exprimée sous forme d'une équation du second degré en t_x : $W(t_x) = A_x + B_x t_x + C_x t_x^2$. Ils ont évalué les coefficients de l'équation au moyen de trois étalonnages du thermomètre aux températures des points de congélation de l'antimoine, de l'argent et de l'or. Ils ont établi la relation entre t_x et t_{68} dans le domaine de température compris entre 630,74 et 1064,43 °C à partir de mesures de comparaison ; puis ils ont évalué la stabilité des caractéristiques du thermomètre en calculant les valeurs de t_x , à la température des points fixes, à l'aide des coefficients déterminés auparavant. Ils ont trouvé que l'"écart-type résiduel" (c'est-à-dire l'imprécision des mesures répétées avec un même thermomètre pour un seul étalonnage dans le domaine de température) était d'environ 2 mK. De plus, l'écart-type de t_x déterminé avec un seul thermomètre par rapport à la moyenne des valeurs déterminées avec tous les thermomètres était évalué à environ 3,5 mK, soit seulement le double. Les caractéristiques des thermomètres dérivait avec la durée d'exposition aux températures élevées (125 h à diverses températures entre 630 °C et 1064 °C), et avec le nombre de cycles de température à partir de la température ambiante (50 fois). Pour la dernière réalisation du point de l'or, la moyenne des neuf valeurs de la température, toujours calculées

avec les mêmes constantes, avait changé de 20 mK et la valeur fournie par chacun des thermomètres isolément différait de la moyenne avec un écart-type de 17 mK.

Un article publié par Curtis et Thomas [6] donne des renseignements sur la stabilité de la résistance au point triple et de $W(100\text{ }^{\circ}\text{C}) = R(100\text{ }^{\circ}\text{C})/R(0\text{ }^{\circ}\text{C})$ selon la durée d'exposition à des températures voisines du point de l'or. Ces indications ont été utilisées pour en déduire la stabilité au point de l'or sur 4000 à 5000 heures, mais aucune mesure directe dans ces conditions n'a été effectuée au point de l'or.

Samada et Mochizuki [7] ont rendu compte d'autres recherches sur la stabilité au point de l'or en observant seulement la résistance au point triple et le $W(100\text{ }^{\circ}\text{C})$. Eux aussi ont conclu que la stabilité au point de l'or est bonne.

Des recherches faites par Chattle [8] avec cinq thermomètres étalonnés aux températures de tous les points fixes, c'est-à-dire le point triple de l'eau et les points de congélation de l'étain, du zinc, de l'antimoine, de l'argent et de l'or, ont conduit à la conclusion que ces thermomètres ont une reproductibilité à court terme aux points fixes de $\pm 10\text{ mK}$ (1 écart-type).

Marcarino et Crovini [9] ont étudié le comportement de sept thermomètres à résistance de platine jusqu'au point de l'or. Ils ont observé des variations de la résistance réduite à la température du point de l'argent correspondant à 10 ou 20 mK, pour des cycles répétés à partir de la température ambiante ; ils ont conclu que les caractéristiques des thermomètres présentaient des dérives beaucoup plus grandes après exposition à la température du point de l'or. En revanche, Evans et Wood ont observé des modifications identiques (et faibles) des thermomètres tant à la température du point de l'argent qu'à celle du point de l'or.

En ce qui concerne la facilité et l'économie d'emploi, le thermomètre à résistance de platine pour températures élevées présente les caractéristiques typiques de n'importe quel thermomètre à résistance de platine, c'est-à-dire qu'il est fragile, qu'il demande une profondeur d'immersion convenable, etc. Comme c'est un instrument travaillant par contact thermique, il est nécessaire d'avoir un accès direct à l'objet dont on doit mesurer la température. Les appareils dont on a besoin pour mesurer la résistance sont parmi les meilleurs instruments de

leur genre, que ce soit en courant alternatif ou en courant continu, et que ce soit des ponts ou des potentiomètres. Ils sont coûteux mais on les trouve dans le commerce et ils peuvent fournir l'exactitude demandée. Utiliser au mieux les possibilités du thermomètre demande une haute compétence technique, mais n'exige pas le niveau de compétence nécessaire pour la recherche individuelle.

Des thermomètres à résistance de platine pour températures élevées ont été construits selon plusieurs types de conception, mais ils s'avèrent comparables quant à la stabilité lorsque les différences de structure sont rationnelles. Anderson [10] attribue les limites de stabilité aux propriétés intrinsèques du platine. Il est évident d'après le nombre des publications (toutes n'ont pas été indiquées), et d'après ce que nous savons, que de tels instruments ont été utilisés dans la plupart des grands laboratoires nationaux d'étalonnage à un moment ou à un autre, et il y a eu dans le passé un début de production industrielle.

Le remplacement du thermocouple Pt-10 % Rh/Pt par le thermomètre à résistance de platine peut garantir, avec une équation d'interpolation valable, que la température dans l'échelle pratique, et au moins sa dérivée première par rapport à la température thermodynamique, seront continues à 630,74 °C. De plus, l'écart entre t_{68} et l'échelle arbitraire du thermomètre à résistance, fondée sur une simple équation d'interpolation du deuxième degré et sur les températures des points de congélation de l'antimoine, de l'argent et de l'or, comme l'ont établi Evans et Wood, concorde de façon acceptable avec l'écart entre l'échelle pyrométrique et t_{68} publié par Bonhoure [4]. Ce dernier fait laisse à penser qu'une représentation analytique relativement simple de la résistance du thermomètre peut conduire à des valeurs de température proches des valeurs des températures thermodynamiques, mais il faudrait améliorer les détails de l'équation pour obtenir la continuité des dérivées tant à 630,74 qu'à 1064,43 °C.

Réciproquement, en ajoutant à l'équation du second degré les différences mesurées par rapport à t_{68} , Evans et Wood ont tiré une équation qui permettrait d'introduire le thermomètre à résistance de platine comme instrument d'interpolation de l'EIPT-68 dans le domaine de 630,74 à 1064,43 °C, sans introduire de changements significatifs dans les valeurs des températures.

des déterminations pyrométriques, on doit considérer cet accord comme fortuit compte tenu des imprécisions indiquées.

Les recherches sur la mise au point de pyromètre photo-électriques ont constitué à la PTB, au cours des vingt dernières années, une part importante du programme de travail sur les étalons. En utilisant leur instrument le plus perfectionné, qui fonctionne à une longueur d'onde de 660 nm, Kunz et Kaufmann [15] ont parlé d'une "résolution de température" de 4 mK à 1235 K, de 50 mK à 1100 K et de 500 mK à 1000 K. Les auteurs considèrent qu'à une longueur d'onde de 702 nm, avec un diamètre de champ passant de 0,73 mm à 2,0 mm et une constante de temps passant de 3 s à 10 s, l'instrument donnera une résolution de 10 mK. Leur "incertitude estimée" actuelle dans la réalisation de l'EIPT est de 40 mK à 1337 K.

Si l'on adoptait le pyromètre comme instrument étalon entre 630 °C et le point de l'or, l'échelle de température pourrait être répandue et utilisée de deux façons. L'une consisterait à transférer l'échelle pyrométrique directement du laboratoire d'étalonnage à l'utilisateur au moyen de pyromètres ou de sources de rayonnement étalonnées, de telle sorte que l'utilisateur pourrait faire des mesures de température en utilisant des techniques pyrométriques. L'autre façon consisterait à faire étalonner par le laboratoire des thermomètres travaillant par contact thermique, par comparaison avec le pyromètre étalon. Dans ce cas, l'utilisateur pourrait faire des mesures de température au moyen de ces thermomètres dont on mesurerait la résistance ou la force électromotrice. Il convient de considérer la facilité et l'économie d'emploi d'une échelle de température pyrométrique extrêmement exacte au-dessous du point de l'or, en fonction de ces deux façons de répandre l'échelle et de faire des mesures.

Dans le premier cas, le problème fondamental vient du pyromètre lui-même. Les pyromètres photoélectriques qui permettent d'obtenir la précision et l'exactitude dont il a été question précédemment, sont des instruments volumineux et complexes. Ils ne se prêtent pas à des transports d'un laboratoire à l'autre. Les meilleurs pyromètres photoélectriques transportables, dont on dispose couramment, ont été conçus pour fonctionner essentiellement au point de l'or et au-dessus. Leur imprécision (1 écart-type) et leur incertitude sont respectivement d'au moins 100 mK et 500 mK. Une amélioration si-

5. *Le pyromètre photoélectrique monochromatique*

Quelques publications récentes donnent les meilleures informations sur l'exactitude accessible avec le pyromètre photoélectrique, dans l'état actuel du savoir-faire, au-dessous de la température du point de l'or. Entre autres, Jung [12] a donné des résultats avec la plus haute précision et la plus haute exactitude. En déterminant la différence entre les températures thermodynamiques des points de l'argent et de l'or avec un pyromètre photoélectrique monochromatique à des longueurs d'onde effectives moyennes de 546 nm et 650 nm, il a estimé son imprécision (3σ) à 10 mK et son incertitude systématique à 40 mK. Ce même intervalle de température a également été mesuré avec un pyromètre photoélectrique monochromatique à une longueur d'onde effective moyenne de 1 μ m par Coslovi, Rosso et Ruffino [13] avec une imprécision évaluée (1σ) à 59 mK. Les auteurs estiment que l'écart-type dans la définition du point de l'argent avec leur pyromètre infrarouge est de 40 mK.

L'imprécision et l'incertitude totale sont plus grandes dans d'autres publications. Quinn, Chandler et Chattle [3a] ont mesuré des valeurs de températures dans l'intervalle compris entre 725 et 1064,43 °C, par rapport à la valeur assignée à la température du point de l'or (1337,58 K), au moyen d'un pyromètre photoélectrique monochromatique fonctionnant à une longueur d'onde effective de 662 nm. Ils ont estimé les incertitudes de ces déterminations à 100 mK au-dessus de 790 °C, et à davantage pour des températures inférieures. Ces incertitudes comprennent l'écart-type de certaines des mesures impliquées, plus les estimations que font les auteurs de certaines erreurs systématiques. En utilisant également un pyromètre photoélectrique, Bonhoure [4] a déterminé récemment les températures des points de congélation de l'argent et de l'or par rapport à la valeur assignée à la température du point de congélation de l'antimoine (903,89 K ; 630,74 °C). Son instrument fonctionnait à des longueurs d'onde effectives moyennes voisines de 1 μ m et les valeurs des températures des points de l'argent et de l'or ont été données avec des écarts-types respectifs de 130 mK et 160 mK.

Ces quatre mesures pyrométriques de l'intervalle de température entre les points de l'argent et de l'or [12,13,3a,4] divergeaient au maximum de 60 mK. Toutefois, du point de vue

celle du point de l'or semble impossible pour des instruments transportables dans l'état actuel de la technique.

A défaut de pyromètres transportables convenables il faudrait répandre l'échelle au moyen d'une source de rayonnement étalonnée. Des lampes à vide à ruban de tungstène constituent actuellement le meilleur moyen dont on dispose pour opérer un tel transfert. L'incertitude d'un transfert au point de l'or, en utilisant les meilleures lampes à vide, est d'au moins 50 mK, comme l'a montré la comparaison de l'EIPT-68 au-dessus de 1064,43 °C faite entre le NBS, le NPL, le NML et la PTB [11]. On ne peut s'attendre qu'à voir croître, au fur et à mesure que la température décroît, les incertitudes résultant de l'utilisation des lampes à vide comme instruments de transfert. Comme autre solution, on pourrait utiliser un corps noir et un thermomètre à résistance de platine pour transférer une échelle de température pyrométrique, mais les corps noirs de bonne qualité sont des appareils volumineux et fragiles qui ne se prêtent pas à des transports d'un laboratoire à l'autre. (De plus, dans ce cas, l'échelle est alors fondée sur le thermomètre à résistance de platine comme instrument étalon.) Ainsi, à l'heure actuelle, il ne serait pas possible à un laboratoire national de répandre une échelle pyrométrique avec des sources de rayonnement sans ajouter au moins encore 50 mK à l'incertitude des mesures finales de température.

Toujours dans ce premier cas, un autre problème est la nécessité de disposer d'un corps noir de haute qualité chaque fois que l'on désire mesurer une température. Ces appareils doivent avoir une forte émissivité et une bonne uniformité de température, et être compatibles avec le pyromètre pour ce qui concerne l'ouverture et les dimensions de l'objectif. Il serait souvent difficile de satisfaire à ces impératifs dans la pratique.

Enfin, il est extrêmement difficile d'effectuer des mesures pyrométriques avec l'exactitude requise ici et il existe peu de personnes, mis à part un petit nombre de chercheurs, qui possèdent les qualifications nécessaires pour faire ces mesures. A cause de tout cela et des autres facteurs dont il a été question plus haut, il faudrait probablement de nombreuses années avant que les mesures pyrométriques, avec une incertitude de 50 mK par exemple, puissent être largement utilisées par les techniciens.

La seconde façon de répandre une échelle pyrométrique

consiste à la transférer par comparaison à des thermomètres travaillant par contact thermique, thermomètres que les utilisateurs peuvent ensuite employer pour mesurer des températures dans cette échelle. L'objection principale à cette façon de faire vient de la difficulté intrinsèque d'étalonner avec exactitude un thermomètre travaillant par contact thermique avec un appareil à rayonnement. Il faut mettre le thermomètre en équilibre thermique avec un radiateur à température uniforme et dont l'émissivité spectrale devrait être d'environ 0,999 9. Ce processus nécessite un équipement complexe et coûteux et des mesures qui prennent du temps ; c'est une activité qui tient davantage de la recherche fondamentale que de l'étalonnage de routine. De plus, si on emploie un thermomètre travaillant par contact thermique pour transférer l'échelle et faire des mesures de température, il y a un certain nombre d'avantages à définir l'échelle directement en fonction du thermomètre plutôt que du pyromètre.

Le dernier point à envisager pour l'utilisation du pyromètre photoélectrique comme instrument d'interpolation dans une échelle pratique de température au-dessous du point de l'or est celui de la continuité de cette échelle et de sa relation avec l'échelle au-dessous de 630 °C. L'utilisation du pyromètre à la place du thermocouple comme instrument d'interpolation et l'emploi de la relation de Planck comme équation d'interpolation assure la continuité de l'échelle et de ses dérivées par rapport aux températures thermodynamiques sur tout le domaine des températures supérieures à 630,74 °C. Toutefois, afin que la continuité de l'échelle subsiste à la température de jonction entre le thermomètre à résistance de platine et le pyromètre, il est essentiel que le pyromètre soit étalonné à cette température par comparaison au thermomètre à résistance de platine comme on le fait actuellement pour le thermocouple Pt-10 % Rh/Pt, ou que les deux instruments soient étalonnés à la température d'un point fixe de définition choisi pour la jonction. L'autre solution serait que le point de l'or, ou tout autre point fixe ayant une température supérieure à celles du domaine du thermomètre à résistance, soit utilisé comme point fixe de définition de l'échelle du pyromètre, et que le point le plus élevé dans l'échelle du thermomètre à résistance de platine soit déterminé avec le pyromètre ; cette solution réduirait sans raison l'échelle du thermomètre et serait par conséquent totalement inacceptable.

Bien que le pyromètre photoélectrique ne convienne pas très bien comme instrument d'interpolation pour une échelle pratique entre 630 et 1064 °C, c'est le seul instrument dont on dispose couramment pour déterminer des températures thermodynamiques au-dessus de celles que l'on peut mesurer avec exactitude au thermomètre à gaz. On n'a pas déterminé de température de raccordement ni d'intervalle de température dans lequel les deux instruments sont compétitifs. Toutefois, les récentes mesures pyrométriques de l'intervalle de température thermodynamique entre les points de l'argent et de l'or sont suffisamment exactes pour faire apparaître des différences significatives entre la température internationale et la température thermodynamique. En conséquence, il faut encourager de nouvelles mesures au-dessous du point de l'or ; les résultats devraient être fournis avec des descriptions détaillées donnant les caractéristiques de ces mesures, pour que l'on puisse en faire une étude critique.

6. Conclusions

Les incertitudes sur la réalisation de l'EIPT-68 entre 630,74 et 1064,43 °C sont grandes (de 100 à 300 mK) à cause des limites du thermocouple Pt-10 % Rh/Pt comme instrument d'interpolation.

Il existe suffisamment de preuves expérimentales pour conclure que l'on peut réduire de façon importante cette incertitude en remplaçant le thermocouple par le thermomètre à résistance de platine comme instrument étalon. On a déjà démontré que les thermomètres à résistance, immédiatement après étalonnage, peuvent déterminer des valeurs de température dans ce domaine avec une incertitude globale (3σ + erreurs systématiques) d'environ 10 mK, et après exposition pendant 125 h à des températures élevées, avec une incertitude globale d'environ 70 mK.

On estime qu'une autre solution proposée, à savoir l'échelle fondée sur le rayonnement du corps noir en utilisant un pyromètre photoélectrique monochromatique comme instrument d'interpolation, est plus précise et exacte que l'échelle actuelle réalisée en utilisant des thermocouples. Toutefois, jusqu'ici les expériences probantes sont très limitées. L'incertitude la plus faible qui ait été donnée à la température du point de l'or dans une telle échelle est de 40 mK lorsque l'on part du point de l'argent et de 160 mK lorsque l'on part

du point de l'antimoine. Il existe d'autres problèmes et d'autres limitations graves dans l'adoption d'une échelle basée sur le pyromètre photoélectrique au-dessous du point de l'or. Entre autres, on ne trouve pas dans le commerce de pyromètres photoélectriques convenables, la réalisation de telles mesures exige un haut niveau de compétence technique et les gens possédant cette qualification sont rares ; enfin il est difficile de transférer et d'utiliser une telle échelle de température de rayonnement.

Comme le thermomètre à résistance de platine aux températures élevées risque de constituer à l'avenir le meilleur choix comme instrument étalon pour le domaine de 630,74 °C à 1064,43 °C, les travaux ont repris au NBS sur le thermomètre à résistance de platine. On poursuit de nouvelles recherches sur le comportement des thermomètres de ce type ; pour encourager leur utilisation plus courante, on cherche à concevoir des thermomètres dont on puisse facilement assurer la fabrication industrielle et à mettre sur pied des installations d'étalonnage au service des utilisateurs. Dans la mesure où les études techniques fondamentales sont déjà largement diffusées, on peut penser que l'utilisation du thermomètre à résistance de platine pour les températures élevées pourra rapidement s'étendre.

Ainsi du point de vue de la reproductibilité, de la facilité et de l'économie d'emploi et compte tenu de la large utilisation que les techniciens feraient d'une telle échelle, le thermomètre à résistance de platine présente de nets avantages sur le pyromètre photoélectrique monochromatique.

S'il était maintenant utilisé dans le domaine de 630,74 à 1064,43 °C, le thermomètre à résistance de platine donnerait des valeurs de température qui ne s'écarteraient pas de façon significative de la réalisation actuelle de l'échelle lorsque ces valeurs sont obtenues à partir d'une équation déjà établie. Nous recommandons que le CCT encourage son emploi comme un moyen de faire accepter plus largement cet instrument. Si son emploi s'accroît suffisamment d'ici la publication d'une nouvelle échelle, ce que nous croyons, le thermomètre à résistance de platine aux températures élevées devrait remplacer le thermocouple dans la nouvelle EIPT jusqu'à la température du point de l'or.

BIBLIOGRAPHIE

1. JONES (T.P.), *Metrologia*, 4, 1968, p. 80.
2. McLAREN (E.A.) et MURDOCK (E.J.), *Temperature**, III, p. 1543.
- 3a. QUINN (T.J.), CHANDLER (T.R.D.) et CHATTLE (M.V.), *Metrologia*, 9, 1973, p. 44.
- 3b. QUINN (T.J.), *Metrologia*, 10, 1974, p. 115.
4. BONHOURE (J.), *Metrologia*, 11, 1975, p. 141.
5. EVANS (J.P.) et WOOD (S.D.), *Metrologia*, 7, 1971, p. 108.
6. CURTIS (D.J.) et THOMAS (G.J.), *Metrologia*, 4, 1968, p. 184.
7. SAMADA (S.) et MOCHIZUKI (T.), *Temperature**, II, p. 919.
8. CHATTLE (M.V.), *Temperature**, II, p. 907.
9. MARCARINO (P.) et CROVINI (L.), *Temperature Measurement 1975*⁺, p. 107.
10. ANDERSON (R.L.), *Temperature**, II, p. 927.
11. LEE (R.D.), KOSTKOWSKI (H.J.), QUINN (T.J.), CHANDLER (P.R.), JONES (T.P.), TAPPING (J.) et KUNZ (H.), *Temperature**, I, p. 377.
12. JUNG (H.J.), *Temperature Measurement 1975*⁺, p. 278.
13. COSLOVI (L.), ROSSO (A.) et RUFFINO (G.), *Metrologia*, 11, 1975, p. 85.
14. COATES (P.B.), *Temperature Measurement 1975*⁺, p. 238.
15. KUNZ (H.) et KAUFMANN (H.J.), *Temperature Measurement 1975*⁺, p. 244.

* *Temperature, Its Measurement and Control in Science and Industry*, Vol. 4, Instrument Society of America, Pittsburgh, 1972.

⁺ *Temperature Measurement 1975*, Institute of Physics Conference Series 26, Institute of Physics, London, 1975.

Situation actuelle des échelles de température de 630 °C à 1 064 °C

par R. E. BEDFORD et C. K. MA

Conseil National de Recherches (Canada)

(Traduction du Résumé du Document CCT/76-19)

Plusieurs documents récents [1-11] ont présenté des résultats reliant l'EIPT-68 à d'éventuelles échelles pratiques de température fondées sur le thermomètre à résistance de platine (TRP) et aux températures thermodynamiques, dans le domaine de 630 °C à 1064 °C. Comme la plupart de ces résultats sont donnés sous des formes qui ne sont pas directement comparables, nous les avons ramenés à une même base. Les résultats sont donnés sur la figure 1. Nous attirons l'attention sur les points suivants :

1. Au-dessous de 630 °C toutes les équations de forme quadratique des thermomètres à résistance de platine (H₂O, Zn, Au) (dont une seule est figurée) concordent à quelques millikelvins près (voir également [5]).

2. Les équations quadratiques des thermomètres à résistance de platine (Sb, Ag, Au) d'Evans et Wood [1] et de Quinn *et al.* [3] concordent à mieux que $\pm 0,03$ °C de 630 °C à 900 °C, et sont également en accord étroit avec le point unique de Marcarino et Crovini [5,6] au voisinage de 800 °C. Au-dessus de 900 °C l'écart est plus grand, plus de 0,1 °C à 1000 °C, mais ces différences restent dans les limites d'exactitude de reproductibilité de l'EIPT dans ce domaine.

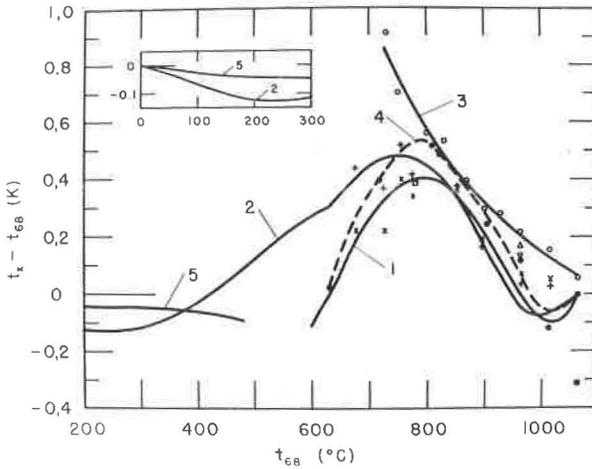


Fig. 1.- Différences entre t_{68} et les diverses autres échelles de température.

Courbe 1 : équation quadratique du TRP (Sb,Ag,Au) - t_{68} (Evans et Wood [1]).

Courbe 2 : équation quadratique du TRP (H_2O ,Zn,Au) - t_{68} (Evans [2]).

X : équation quadratique du TRP (Sb,Ag,Au) - t_{68} (Quinn *et al.* [3,4], après être ramené à la même base).

+ : équation quadratique du TRP (H_2O ,Zn,Au) - t_{68} (Quinn *et al.* [3,4], après être ramené à la même base).

□ : équation quadratique du TRP (Sb,Ag,Au) - t_{68} (calculée d'après les résultats de Marcarino et Crovini [5,6]).

Courbe 3 (cercles blancs) : $t - t_{68}$ (Quinn *et al.* [3]).

Courbe 4 (cercles noirs) : $t - t_{68}$ (Bonhoure [7] après avoir pris le point de congélation de Au comme référence).

Δ : $t - t_{68}$ (Coslovi *et al.* [8]).

∇ : $t - t_{68}$ (Jung [9]).

Courbe 5 : $t - t_{68}$ (Guildner et Edsinger [10]).

■ : $t - t_{68}$ (Blevin et Brown [11]).

3. Au-dessus de 800 °C les valeurs de $(t - t_{68})$ de Quinn *et al.* [3] et de Bonhoure [7] concordent à mieux que l'incertitude de réalisation de t_{68} . Au-dessous de 800 °C ces mesures divergent rapidement, mais c'est dans cette région que Quinn *et al.* signalent un accroissement de l'incertitude et une diminution de la sensibilité. Si l'on considère les résultats de Guildner et Edsinger [10] aux basses températures, nous pensons que les valeurs de Bonhoure sont plus proches de la vérité.

4. Les valeurs de $(t - t_{68})$ au point de congélation de

l'argent mesurées par Quinn *et al.* [3] et par Bonhoure [7] avec des thermocouples et non avec un lingot d'argent concordant étroitement avec celles qui ont été mesurées optiquement par Coslovi *et al.* [8] et par Jung [9] en utilisant des simulateurs de corps noir immergés dans le métal en congélation.

5. Il convient de noter que si la valeur de Blevin et Brown [11] pour le point de congélation de l'or est utilisée dans les mesures pyrométriques, la valeur de $(t_{Au} - t_{Ag})$ est augmentée de 0,05 °C.

McLaren [12] a suggéré que la forme des courbes au-dessus de 630 °C (figure 1) est due à la sensibilité du niveau de Fermi, dans les alliages PtRh, aux modifications du réseau associées à l'accroissement de compacité du soluté et aux effets des défauts physiques (par exemple lacunes) ou chimiques (par exemple Rh_2O_3) sur le pouvoir thermoélectrique de Pt10Rh. Si tel est le cas, il prévoit que des thermocouples utilisant un autre alliage de PtRh se comporteraient de façon différente et donneraient des échelles de température encore différentes de t_{68} . Nous avons étudié cela et obtenu les résultats indiqués sur la figure 2. Dans chaque cas le thermocouple (de composition diverse) a été étalonné aux points de congélation de Sb, Ag et Au et on a fait des comparaisons avec le thermocouple de référence en Pt10Rh/Pt (10/0) à des températures intermédiaires. La courbe 1 reproduit le résultat d'Evans et Wood avec un thermomètre à résistance de platine à titre de comparaison. La courbe 2 pour 13/0 est tirée des résultats de Bedford [13] ; la courbe 3 est la moyenne de quatre thermocouples 40/20 (très faible sensibilité). Bien que les différences des courbes 2 et 3 par rapport à t_{68} soient inférieures à l'imprécision expérimentale, chaque thermocouple dans chaque cycle de mesures a conduit à la même courbure. Les thermocouples 40/10 (courbe 4), 20/5 (courbe 5), 20/0 (courbe 6) et 40/0 (courbe 7) ont donné des échelles nettement différentes, tant de t_{68} que de celle du thermomètre à résistance de platine.

Nous avons pu montrer mathématiquement que les courbes 3 à 7 sur la figure 2 sont cohérentes entre elles ; ces calculs laissent à penser que la forme de la courbe 3 et les ordres de grandeur correspondants sont réels ; ils confirment les positions relatives des courbes 6 et 7 trouvées de façon expérimentale. Il est extrêmement vraisemblable que 30/0 se comporte comme 40/0 et 20/0 et que 30/6 se comporte comme 20/5.

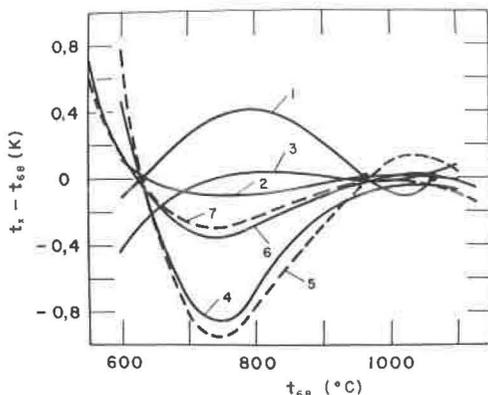


Fig. 2.- Différences entre t_{68} et des échelles semblables obtenues au moyen de thermocouples utilisant un autre alliage platine-rhodium et d'un thermomètre à résistance de platine.

- Courbe 1 : équation du TRP (Sb,Ag,Au) - t_{68} (Evans et Wood [1]).
- Courbe 2 : 13/0 - t_{68} (Bedford [13]).
- Courbe 3 : 40/20 - t_{68}
- Courbe 4 : 40/10 - t_{68}
- Courbe 5 : 20/5 - t_{68}
- Courbe 6 : 20/0 - t_{68}
- Courbe 7 : 40/0 - t_{68}

Nous remercions le Dr T.J. Quinn pour nous avoir communiqué ses résultats expérimentaux et Mr E.H. McLaren pour les discussions relatives à ses résultats non publiés.

BIBLIOGRAPHIE

1. EVANS (J.P.) et WOOD (S.D.), *Metrologia*, 7, 1971, p. 108.
2. EVANS (J.P.), *Temperature, Its Measurement and Control in Science and Industry*, Vol. 4, II, p. 899, Instrument Society of America, Pittsburgh, 1972.
3. QUINN (T.J.), CHANDLER (T.R.D.) et CHATTLE (M.V.), *Metrologia*, 9, 1973, p. 44.
4. QUINN (T.J.), communication privée, mars 1976 (voir aussi CHATTLE (M.V.), *Temperature, Its Measurement and Control in Science and Industry*, Vol. 4, II, p. 907, Instrument Society of America, Pittsburgh, 1972.
5. MARCARINO (P.) et CROVINI (L.), *Temperature Measurement 1975*, Inst. Phys., Conf. Ser. 26, p. 107, Institute of Physics, London, 1975.
6. CROVINI (L.) et MARCARINO (P.), *Comité Consultatif de Thermométrie*, 10^e session, 1974, p. T 79.
7. BONHOURE (J.), *Metrologia*, 11, 1975, p. 141.
8. COSLOVI (L.), ROSSO (A.) et RUFFINO (G.), *Metrologia*, 11, 1975, p. 85.

9. JUNG (H.J.), Temperature Measurement 1975, Inst. Phys., Conf. Ser. 26, p. 278, Institute of Physics, London, 1975.
10. GUILDNER (L.A.) et EDSINGER (R.E.), Ce volume, Annexe T 1, document CCT/76-2.
11. BLEVIN (W.R.) et BROWN (W.J.), *Metrologia*, 7, 1971, p. 15.
12. McLAREN (E.H.), communication privée, 1976 (voir aussi McLAREN (E.H.) et MURDOCK (E.G.), Temperature, Its Measurement and Control in Science and Industry, Vol. 4, III, p. 1543, Instrument Society of America, Pittsburgh, 1972.
13. BEDFORD (R.E.), Temperature, Its Measurement and Control in Science and Industry, Vol. 4, I, p. 15, Instrument Society of America, Pittsburgh, 1972.

Document original reçu le 16 avril 1976,
résumé reçu le 4 octobre 1976.

**Détermination de la différence
entre les températures thermodynamiques des points fixes
de l'or et de l'argent
par thermométrie radiométrique**

par H. J. JUNG

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (Rép. Féd. d'Allemagne)

(Traduction du Résumé du Document CCT/76-11)

On a trouvé que l'intervalle entre la température thermodynamique du point de l'or et celle du point de l'argent était de $0,133 \pm 0,04$ K inférieur à l'intervalle entre les valeurs assignées par l'EIPT-68.

On a utilisé comme méthode une comparaison photoélectrique directe des luminances énergétiques spectrales de deux corps noirs en graphite. On a immergé l'un des corps noirs dans de l'or en fusion et l'autre dans de l'argent en fusion. Les paliers de fusion ou de congélation de l'or et de l'argent ont été réalisés simultanément. Pendant ces réalisations on a observé alternativement les deux cavités. On a utilisé quatre filtres interférentiels dont les bandes passantes correspondent à des longueurs d'onde nominales comprises entre 654 nm et 546 nm et des largeurs à mi-hauteur comprises entre 40 nm et 10,5 nm. Le récepteur était un photomultiplicateur S 20 (EMI 9558) dont la réponse était très linéaire. On a obtenu le rapport des luminances L_{Au}/L_{Ag} sous forme d'un rapport de courants photoélectriques.

* Résumé d'un article publié par le même auteur dans :

A partir de ce rapport on a calculé par ordinateur

$$\Delta T = [T(\text{Au}) - T(\text{Ag})] - [T_{68}(\text{Au}) - T_{68}(\text{Ag})]$$

d'après la loi de Planck en utilisant comme valeurs de référence

$T_{\text{Ag}} = 1235,08 \text{ K}$ et $c_2 = 0,014 388 \text{ m}\cdot\text{K}$ comme spécifié dans l'EIPT-68.

Pour obtenir le résultat final on a fait une moyenne à partir des valeurs de $\Delta T = - 0,139 \text{ K}$ et $\Delta T = - 0,128 \text{ K}$ obtenues avec deux paires différentes d'échantillons. L'incertitude statistique de $\pm 0,01 \text{ K}$ (taux de confiance donné par 3σ) est donnée par la dispersion observée avec une paire d'échantillons. Les incertitudes systématiques sont rassemblées dans le tableau ci-après.

Estimation des incertitudes systématiques

i	Incertitude due à	Estimation X_i (mK)
1	Non-linéarité résiduelle	4
2	Contaminations, gradients de température fonction du temps (d'après le domaine de fusion)	12 (Au)
3	- Id. -	16 (Ag)
4	Longueur d'onde effective	12
5	Diffraction ; lumière parasite due à l'imperfection des surfaces optiques	4
6	Constante de rayonnement $\Delta c_2/c_2 = \pm 31 \times 10^{-6}$ (voir Codata 1973)	4
7	Transmission différente des fours due aux réfractions dans les gaz chauds ; différence de réponse gauche-droite de l'ensemble optique	30

Incertitude systématique totale $\left(\sum_{i=1}^7 X_i^2 \right)^{1/2} = 39 \text{ mK}$

Ce travail donne l'incertitude systématique la plus faible et est en très bon accord avec les moyennes pondérée et non pondérée calculées à partir des données publiées par 6 auteurs (J. Bonhoure, *Bull. d'Information du BNM*, N° 22, octobre 1975). Il sera étendu vers les basses températures.

On se servira comme récepteurs de diodes au silicium à faible bruit, utilisées en mode photovoltaïque et en courant continu, à une longueur d'onde d'environ 970 nm.

Des mesures de rayonnement préliminaires indiquent une résolution de 10 mK au point de congélation du zinc et de 1 mK au point de congélation de l'aluminium.

Document original reçu le 12 avril 1976,
résumé reçu le 16 août 1976.

**Comparaison de la réalisation de l'EIPT-68
dans le domaine de 1 064 °C à 1 700 °C
avec les nouveaux pyromètres du NPL et de la PTB**

par P. B. COATES

National Physical Laboratory (Royaume-Uni)

et H. KUNZ

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (Rép. Féd. d'Allemagne)

(Traduction du Document CCT/76-21)

Il y a cinq ans, la lampe à ruban de tungstène dans le vide N° C502 a circulé entre quatre laboratoires nationaux d'étalonnage dans le cadre d'une comparaison internationale des échelles de température réalisées et conservées dans ces laboratoires [1]. On en était arrivé à la conclusion que les échelles concordaient dans les limites de la somme des incertitudes estimées par 2 des laboratoires pris deux à deux et que l'on pouvait étalonner et utiliser des lampes à ruban dans le vide entre 1064 °C et 1700 °C avec des incertitudes de quelques dixièmes de kelvin. Au cours de 1975, on a utilisé la même lampe pour comparer les échelles pyrométriques de la PTB et du NPL, dans le cadre d'un programme de redétermination du point de congélation du platine. Les résultats sont présentés ici ; ils sont le reflet de l'état d'avancement de la pyrométrie photoélectrique au cours de cette période.

Le pyromètre utilisé au NPL lors de la première comparaison comportait un disque à secteur tournant ; il a été modifié pour employer une méthode de comptage de photons. Le système optique est demeuré inchangé, mais on n'a plus besoin du disque à secteurs pour mesurer les rapports d'intensité [2].

Le pyromètre photoélectrique PP 60 utilisé à la PTB lors de la première comparaison a été remplacé par un pyromètre nouvellement mis au point PP 71 destiné à fonctionner en liaison avec un ordinateur. Les différences essentielles entre ces deux pyromètres ont été décrites en détail [3].

Vers la fin de 1974 on a établi au NPL avec la lampe C502 une échelle allant de 1064 °C à 1700 °C. Comme la différence entre les valeurs mesurées du point du platine était à l'époque supérieure à 1 °C, l'échelle (référéncée NPL(1) dans le tableau ci-après) n'a pas été établie avec un grand soin et on a indiqué une incertitude estimée de $\pm 0,3$ °C à 1700 °C.

Pendant que la lampe était à la PTB, on se trouva en mesure au NPL de réaliser une échelle plus précise que NPL(1) et ceci pour deux raisons. D'abord, lorsqu'on utilise la technique du comptage de photons, un paramètre important est l'erreur statistique ; en prenant davantage de temps pour établir l'échelle il était possible d'obtenir une amélioration significative à cet égard. De plus, le filtre interférentiel utilisé pour NPL(1) avait été remplacé par un autre filtre de qualité supérieure, dont la transmission en dehors de la bande passante était partout inférieure à 1×10^{-5} , et dont on connaissait la longueur d'onde centrale à mieux que 0,02 nm près.

Une comparaison de ces trois échelles montre que les différences moyennes entre elles sont d'environ 0,05 °C. Entre les deux échelles les plus précises (2) et (3) il apparaît, sur l'ensemble du domaine considéré, une différence systématique d'environ 0,03 °C. Ces chiffres laissent à penser qu'une petite amélioration de l'exactitude de la réalisation de l'EIPT-68 est probablement intervenue en 1975 par rapport à la comparaison de 1971 (voir la dernière colonne du tableau I). Il est également évident que les lampes modernes à ruban dans le vide sont parfaitement appropriées comme étalons pyrométriques. Bien que C502 serve normalement d'étalon de travail au NPL, les variations de son étalonnage à toute température entre 1063 °C et 1700 °C étaient inférieures à 0,5 °C au cours de la période comprise entre les deux comparaisons.

On poursuit les travaux décrits ici pour couvrir le domaine de températures compris entre 700 °C et 1064 °C ainsi que le domaine compris entre 1700 °C et 2200 °C en utilisant dans ce dernier cas une lampe à ruban améliorée remplie de gaz.

Pour tout ce qui touche à la succession de toutes les comparaisons pyrométriques, il existe une récente publication particulièrement intéressante [4].

Tableau I

Courant (A)	Température de luminance en °C				$t_{PTB} - t_{NPL}$	
	NPL (1)	PTB (3)	NPL (2)	NPL (moyenne)	1975	1971
6,018 1	1064,43	1064,44	1064,41	1064,42	+ 0,02	- 0,10
6,645 8	1130,00	1130,14	1130,09	1130,04	+ 0,10	- 0,02
7,364 8	1200,00	1200,07	1200,02	1200,01	+ 0,06	0,00
8,467,0	1300,00	1299,95	1299,93	1299,96	- 0,01	- 0,04
9,645 0	1400,00	1399,99	1399,93	1399,96	+ 0,03	- 0,13
10,888 0	1500,00	1500,07	1500,07	1500,04	+ 0,03	0,00
12,188 5	1600,00	1600,04	1600,06	1600,03	+ 0,01	+ 0,06
13,542 9	1700,00	1699,98	1699,92	1699,96	+ 0,02	+ 0,09

Conditions :

- a) Correction faite pour l'effet des dimensions de la source
- b) Longueur d'onde dans le vide 661,18 nm
- c) Température de base 21,5 °C.

BIBLIOGRAPHIE

1. LEE (R.D.), KOSTKOWSKI (H.J.), QUINN (T.J.), CHANDLER (T.R.D.), JONES (T.P.), TAPPING (J.) et KUNZ (H.), *Temperature, Its Measurement and Control in Science and Industry, Vol. 4, I, p. 377, Instrument Society of America, Pittsburgh, 1972.*
2. COATES (P.B.), *Temperature Measurement 1975, Inst. Phys., Conf. Ser. 26, p. 238, Institute of Physics, London 1975.*
3. KUNZ (H.) et KAUFMANN (H.J.), *Ibid.*, p. 244.
4. JONES (T.P.) et TAPPING (J.), *Metrologia*, 12, 1976, p. 41.

Reçu le 20 avril 1976.

Nouvelle détermination du point de congélation du platine

par H. KUNZ et J. LOHRENGEL

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (Rép. Féd. d'Allemagne)

(Traduction du Résumé du Document CCT/76-10)

On a obtenu une nouvelle valeur du point de congélation du platine à partir des mesures faites avec le pyromètre photoélectrique linéaire PP 71 de la PTB, décrit par Kunz et Kaufmann [1]. Une comparaison (voir tableau I) du résultat avec les valeurs connues [2, 3] fait apparaître des différences notables.

Afin de tenter d'expliquer ces différences, on a modifié, à la PTB, 7 conditions de mesure par rapport à celles dans lesquelles ont opéré les autres laboratoires [4].

La valeur de la PTB figurant dans le tableau I est la moyenne des températures mesurées de fusion et de congélation du deuxième des deux lingots de platine utilisés. Pendant la seconde série* de mesures le petit diaphragme en platine-rhodium de la cavité rayonnante a été remplacé par un autre en alumine et, de plus, tous les thermocouples de contrôle en platine-rhodium, avec leur protection métallique, ont été enlevés du tube en fonctionnement. On a fait cela pour empêcher la formation de particules de métal ou de vapeur d'oxyde métalli-

* Les valeurs de la première série sont incluses dans les nombres mis entre parenthèses.

que qui pourrait entraîner des pertes par absorption ou diffusion dans le faisceau lumineux. Des expériences ont montré qu'au cours des deux séries il est peu vraisemblable que l'"effet de grandeur de source" soit supérieur à 0,08 K. Les valeurs de la seconde série de mesures étaient supérieures de 0,16 K à celles de la première série. En tenant compte d'un écart-type σ de 0,01 K cette différence semble sûre, alors que la différence de 0,03 K entre les températures de fusion et de congélation (mesures du NPL : 0,12 K) pourrait indiquer une influence du four ou seulement de faibles traces d'une contamination ultérieure du platine. On suppose que le rapport plus faible des intensités de rayonnement dans la première série de mesures a été faussé par des pertes dues à l'absorption ou à la diffusion. Pour cette raison on n'a pas tenu compte des valeurs de la première série de mesures. On suppose que l'incertitude de $\pm 0,5$ K dans la détermination du point du platine, telle qu'elle est indiquée dans l'EIPT-68, est aussi élevée parce que nous avons à l'heure actuelle une connaissance insuffisante des éventuelles différences de transmission entre les chemins optiques dans les deux fours utilisés pour réaliser le point de l'or et le point du platine.

Le résultat obtenu est en accord avec la valeur du NML dans les limites de l'incertitude estimée des mesures : 0,5 K. Toutefois, il semble souhaitable de faire d'autres recherches pour réduire l'incertitude des mesures.

Elucider les sources éventuelles d'erreur serait d'une importance générale pour la thermométrie par rayonnement, en particulier si l'on tient compte du fait que les échelles de température des laboratoires, comparées à l'aide de lampes à filament de tungstène à $T_C = 2042$ K, concordent à mieux que 0,4 K près [5] et qu'à cette température l'accord, en particulier entre la PTB et le NPL, se fait à mieux que 0,1 K (voir document CCT/76-21, Annexe T 24).

Dans le rapport annuel imprimé de la PTB [4], on trouvera un schéma de la géométrie du dispositif et les résultats des mesures à la PTB. Des détails complémentaires seront donnés ailleurs.

TABLEAU I

Laboratoire (année de la mesure)	Nombre de lingots	Nombre de transitions de phase	Longueur d'onde (nm)	Température T_{Pt} (K)
Mesures avec des pyromètres visuels à filament disparaissant				
NBS (1931)	-	-	~ 655	2 045,0 ± 1
NPL (1934)	-	-	~ 655	2 044,8 ± 2,5
PTR (1934)	-	-	~ 655	2 045,3 ± 1
Mesures avec des spectropyromètres photoélectriques				
NPL (1970/71)	3	13	662(684)	2 041,07 ± 0,3
NML (1973/74)	1	25	~ 655,8	2 042,65 ± 0,6
PTB (1975)	1(2)	8(16)	661,1 et 701,8	2 042,11 ± 0,5

BIBLIOGRAPHIE

1. KUNZ (H.) et KAUFMANN (H.J.), Temperature Measurement 1975, Inst. Phys., Conf. Ser. No. 26, p. 244, Institute of Physics, London, 1975.
2. QUINN (T.J.), CHANDLER (T.R.D.), Temperature, Its Measurements and Control in Science and Industry, Vol. 4, I, p. 295, Instrument Society of America, Pittsburgh, 1972.
3. JONES (T.P.) et TAPPING (J.), *Metrologia*, 12, 1976, p. 19.
4. KUNZ (H.) et LOHRENGEL (J.), Jahresbericht PTB, 1975, p. 64 et p. 190.
5. LEE (R.D.) *et al.*, Temperature, Its Measurements and Control in Science and Industry, Vol. 4, I, p. 377, Instrument Society of America, Pittsburgh, 1972.

Document original reçu le 12 avril 1976,
Résumé reçu le 16 août 1976.



TABLE DES MATIÈRES

COMITÉ CONSULTATIF DE THERMOMÉTRIE 11^e Session (1976)

	Pages
Notice historique sur les organes de la Convention du Mètre	v
Liste des membres	vii
Ordre du jour	x
Rapport au Comité International des Poids et Mesures, par M. Durieux	T 1
Rapport abrégé présenté à la 65 ^e session du CIPM	2
Rapport sur la réunion (Principaux points discutés et conclusions)	2
Proposition pour une Échelle provisoire de température de 1976 entre 0,5 et 30 K	4
<i>Recommandation</i> T 1 (1976)	8
Compte rendu des séances de la 11 ^e session du CCT	10
1. Discussion des questions soulevées par la récente introduction de l'édition amendée de 1975 de l'EIPM-68	11
2. Autre sujet résultant de la 10 ^e session du CCT (L'établissement d'un rapport détaillé est maintenu)	11
3. Discussion des rapports des Groupes de travail 1 à 5	11
a) Rapport du Groupe de travail 1 (Préparation du remplacement de l'EIPM-68)	11
b) Rapport du Groupe de travail 2 (Révision des points de référence secondaires et recherches sur des techniques pratiques simplifiées de mesure de température)	12
c) Rapport du Groupe de travail 3 (Détermination des températures thermodynamiques dans le domaine $T \geq 100$ K)	12
d) Rapport du Groupe de travail 4 (Détermination des températures thermodynamiques dans le domaine $T < 100$ K)	13
e) Rapport du Groupe de travail 5 (Thermomètres pratiques aux températures inférieures à 30 K)	16

4. État d'avancement des travaux faisant suite aux points 2 à 5 de la Recommandation T 1 (1974) faite au CIPM	16
a) Points de référence secondaires entre 100 K et 400 K	17
b) Extension du domaine du thermomètre à résistance de platine et du pyromètre optique	19
c) Extension de l'EIPT jusqu'à 2 mK	23
d) Détermination des températures supérieures à 4 000 K	25
5. Rapports sur l'état d'avancement des comparaisons des thermomètres à résistance de platine et des thermomètres à germanium	26
6. Monographie donnant des renseignements complémentaires sur la réalisation de l'EIPT-68 (Échange de vues sur ce projet)	26
7. Publication d'une échelle secondaire moins précise mais plus facile à réaliser (mesures secondaires de température) (Échange de vues pour la préparation de ce document)	28
8. Composition et statut des Groupes de travail	29
9. Discussion du rapport du Groupe de travail 4 (suite du point 3d)	32
a) Proposition d'une échelle provisoire de température entre 0,5 K et 30 K	32
b) Les nouvelles échelles de l'hélium liquide	35
10. Publication des différences entre l'EIPT-68 et les températures thermodynamiques au-dessus de 0 °C	36
11. Publication de résumés des rapports des Groupes de travail dans <i>Metrologia</i>	38
12. Discussion des documents autres que les rapports des Groupes de travail, présentés au CCT	38
13. Divers (Comparaisons internationales; « degré Kelvin », °K et « deg »; remplacement de l'EIPT-68)	39
14. Publication des documents présentés au CCT	40
15. Rapport et Recommandation du CCT au CIPM	40
16. Prochaine réunion du CCT	41

Annexes

T 1. Documents de travail présentés à la 11 ^e session du CCT	42
T 2. 3 ^e Rapport du Groupe de travail 1 (Révision de l'EIPT)	49
T 3. Résumé du 3 ^e Rapport du Groupe de travail 2 (Points fixes secondaires et échelles secondaires)	52
T 4. Résumé du 3 ^e Rapport du Groupe de travail 3 (Températures supérieures à 100 K):	
I. Sur les différences entre les températures dans l'EIPT-68 et les températures thermodynamiques au-dessus de 0 °C	62
II. Différences entre les températures dans l'EIPT-68 et les températures thermodynamiques au-dessus de 100 K	66
T 5. Résumé du 3 ^e Rapport du Groupe de travail 4 (Températures inférieures à 100 K)	68
T 5 bis Additif au 3 ^e Rapport du Groupe de travail 4:	
I. Proposition pour une échelle provisoire pratique de température entre 0,5 K et 30 K	73
II. Les nouvelles échelles de l'hélium liquide	77
T 6. Résumé du 1 ^{er} Rapport du Groupe de travail 5 (Thermomètres aux températures inférieures à 30 K)	78

T 7.	Université de Münster (Rép. Féd. d'Allemagne). — <i>Mesure de la température du point d'ébullition de ^4He au moyen d'un thermomètre à bruit</i> , par H. H. Klein, F. Klempt et L. Storm (Résumé)	79
T 8.	KOL (Pays-Bas). — <i>Équation thermodynamique de la pression de vapeur de ^4He liquide au-dessous de 2,15 K</i> , par J. E. Van Dijk, H. ter Harmsel et M. Durieux	83
T 9.	Iowa State University (États-Unis d'Amérique). — <i>Le thermomètre à gaz à volume constant comme instrument d'interpolation au-dessous de 20 K</i> , par C. A. Swenson	86
T 10.	NBS (États-Unis d'Amérique). — <i>Thermomètre magnétique entre 1 K et 20 K utilisant l'éthylsulfate de néodyme</i> , par B. W. Mangum et W. J. Bowers (Résumé)	89
T 11.	NML (Australie). — <i>Comparaison internationale d'échelles de température dans le domaine de 1 à 30 K au moyen de thermomètres à résistance de germanium</i> , par L. M. Besley et W. R. G. Kemp	92
T 12.	KOL (Pays-Bas). — <i>Différences entre les échelles magnétiques de température entre 1 K et 30 K</i> , par J. E. Van Dijk, C. Van Rijn et M. Durieux.	133
T 13.	KOL (Pays-Bas). — <i>Différences entre l'EIPT-68 ou l'équation de pression de vapeur de $e\text{-H}_2$ et une échelle de température magnétique entre 13,81 K et 30 K</i> , par C. Van Rijn, J. E. Van Dijk, H. ter Harmsel et M. Durieux.	135
T 14.	NBS (États-Unis d'Amérique). — <i>Le point triple du mercure comme étalon thermométrique</i> , par G. T. Furukawa et W. R. Bigge	138
T 15.	NPL (Royaume-Uni). — <i>Comparaison de thermomètres à résistance de platine aux basses températures</i> , par J. P. Compton et S. D. Ward	145
T 16.	NML (Australie). — <i>Étalonnages dans l'EIPT-68 entre le point d'ébullition de l'oxygène et le point de congélation du zinc</i> , par J. J. Connolly et J. V. McAllan	151
T 17.	NBS et George Washington University (États-Unis d'Amérique). — <i>Points fixes médicaux. Point de fusion du gallium</i> , par D. D. Thornton et B. W. Mangum	157
T 18.	ASMW (Rép. Dém. Allemande). — <i>Recherches sur la réalisation de la température de congélation du gallium</i> , par S. Lau et P. Schlott	161
T 19.	NBS (États-Unis d'Amérique). — <i>Le point de congélation de l'aluminium comme point fixe pour le thermomètre à résistance de platine</i> , par G. T. Furukawa, W. R. Bigge, J. L. Riddle et M. L. Reilly	163
T 20.	NBS (États-Unis d'Amérique). — <i>Travaux en cours au NBS sur les thermomètres à résistance aux températures élevées</i> , par J. P. Evans ...	167
T 21.	NBS (États-Unis d'Amérique). — <i>Étude comparative des instruments d'interpolation pour une échelle pratique de température entre 630,74 °C et 1 064,43 °C</i> , par L. A. Guildner, H. J. Kostkowski et J. P. Evans ...	173
T 22.	NRC (Canada). — <i>Situation actuelle des échelles de température de 630 °C à 1 064 °C</i> , par R. E. Bedford et C. K. Ma (Résumé)	186
T 23.	PTB (Rép. Féd. d'Allemagne). — <i>Détermination de la différence entre les températures thermodynamiques des points fixes de l'or et de l'argent par thermométrie radiométrique</i> , par J. H. Jung (Résumé)	191
T 24.	NPL (Royaume-Uni) et PTB (Rép. Féd. d'Allemagne). — <i>Comparaison de la réalisation de l'EIPT-68 dans le domaine de 1 064 °C à 1 700 °C avec les nouveaux pyromètres du NPL et de la PTB</i> , par P. B. Coates et H. Kunz	194
T 25.	PTB (Rép. Féd. d'Allemagne). — <i>Nouvelle détermination du point de congélation du platine</i> , par H. Kunz et J. Lohrengel (Résumé)	197



IMPRIMERIE DURAND
28600 LUISANT (FRANCE)

Dépôt légal, Imprimeur, 1977, n° 2866
ISBN 92-822-2047-8

ACHEVÉ D'IMPRIMER LE 10-20-1977

Imprimé en France