

COMITÉ CONSULTATIF DE THERMOMÉTRIE

SESSION DE 1978

COMITÉ INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES

COMITÉ CONSULTATIF
DE THERMOMÉTRIE

12^e SESSION — 1978
(9-10 mai)



BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES

Pavillon de Breteuil, F-92310 SÈVRES, France

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

ISBN 92-822-2057-5

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. La dotation du Bureau International pour l'année 1978 est de l'ordre de 6 000 000 de francs-or, soit environ 2 400 000 dollars U.S.

(1) Au 31 décembre 1978, quarante-cinq 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, Chine (Rép. Pop. de), Corée (Rép. de), 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 Photométrie* (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.
4. 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 1964.

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

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

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

<i>Secrétaire</i>	<i>Vice-Président</i>	<i>Président</i>
J. DE BOER	P. HONTI	J. V. DUNWORTH

LISTE DES MEMBRES

DU

COMITÉ CONSULTATIF DE THERMOMÉTRIE

Président

H. 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], *Lindfield* (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 12^e session

1. Approbation du compte rendu des séances de la 11^e session du CCT (1976).
2. Questions soulevées par la 11^e session du CCT :
 - a. Publication de la liste des points de référence secondaires (GT2).
 - b. Publication des différences entre l'EIPT-68 et les températures thermodynamiques au-dessus de 0 °C (GT3).
 - c. Échelle provisoire de température de 1976 entre 0,5 K et 30 K, EPT-76 (GT4) (Discussion préliminaire).
 - d. Divers.
3. Discussion des rapports des Groupes de travail 1 à 5 :
 - a. GT1 : Préparation du remplacement de l'EIPT-68.
 - b. GT2 : Révision des points de référence secondaires et recherches sur des techniques pratiques simplifiées de mesure des températures.
 - c. GT3 : 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.
 - d. GT4 : 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.
 - e. GT5 : Thermomètres pratiques aux températures inférieures à 30 K.
4. Discussion sur la réunion du GT2 avec la sous-commission I.4.1 de l'UICPA (le 8 mai au BIPM) sur les points de référence secondaires et les matériaux de référence.
5. État d'avancement des travaux en relation avec les points 1 à 5 de la Recommandation T 1 (1976) :
 - a. Mesure des températures thermodynamiques entre 20 K et 1064 °C.
 - b. Mesure de la constante des gaz.
 - c. Recherches sur la détermination de la température pour la jonction des domaines du thermomètre à résistance de platine et du pyromètre optique et sur les thermomètres à résistance de platine aux températures élevées.
 - d. Recherches sur des méthodes simplifiées de réalisation de l'EIPT-68.
 - e. Recherches sur la dissémination de l'EIPT-68 au-dessus de 2000 K au moyen de lampes à ruban de tungstène ou par tout autre moyen approprié.

6. Discussion de trois points soulevés par les rapports du GT1 et du GT 2 :
 - a. Monographie sur les renseignements complémentaires pour la réalisation de l'EIPT-68.
 - b. Projet d'échelle pour une future révision de l'EIPT-68.
 - c. Sanction officielle de réalisations secondaires de l'EIPT-68.
 7. Échelle Provisoire de Température de 1976 entre 0,5 K et 30 K (EPT-76).
 8. Programmes futurs et composition des Groupes de travail :
 - a. Programmes futurs.
 - b. Composition.
 9. Discussion des documents présentés à la 12^e session du CCT.
 10. Questions diverses :
 - a. Travaux thermométriques futurs du BIPM.
 - b. Rapport et Recommandation du CCT au CIPM.
 - c. Prochaine session du CCT.
-

RAPPORT
DU
COMITÉ CONSULTATIF DE THERMOMÉTRIE
(12^e Session — 1978)
AU
COMITÉ INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES
par M. DURIEUX, Rapporteur

Rapport abrégé
présenté à la 67^e session du CIPM

Le Comité Consultatif de Thermométrie (CCT) s'est réuni pour sa 12^e session au Bureau International des Poids et Mesures, à Sèvres, où il a tenu quatre séances les 9 et 10 mai 1978*.

Etaient 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 Radiotechniques
[IMPR], Moscou (D.N. ASTROV).

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

* Un compte rendu détaillé de cette session est publié dans *Comité Consultatif de Thermométrie*, 12^e session, 1978.

Kamerlingh Onnes Laboratorium [KOL], Leiden
(M. DURIEUX).
National Bureau of Standards [NBS], Washington
(R.P. HUDSON, J.F. SCHOOLEY).
National Measurement Laboratory [NML], Lindfield
(W.R.G. KEMP).
National Physical Laboratory [NPL], Teddington
(P.B. COATES, R.L. RUSBY).
National Research Laboratory of Metrology [NRLM],
Tokyo (K. MITSUI).
Physikalisch-Technische Bundesanstalt [PTB],
Braunschweig (W. THOMAS).

Les membres nominativement désignés :

F.G. BRICKWEDDE (Pennsylvania).
J. SKAKALA (Bratislava).
C.A. SWENSON (Ames).

Le directeur du BIPM (P. GIACOMO).

Invité : Institut National de Métrologie, Pékin
(LING SHAN-KANG).

Assistaient aussi à la session : J. TERRIEN, directeur
honoraire du BIPM, T.J. QUINN, sous-directeur du BIPM,
J. BONHOURE et G. GIRARD (BIPM).

Absents : Institut de Métrologie D.I. Mendéléév [IMM],
Leningrad ; J. de BOER (Amsterdam) et M. COLOMINA
(Madrid), membres nominativement désignés.

Les points principaux qui ont été discutés au cours de la
session sont résumés ci-après, avec les conclusions auxquelles
est parvenu le CCT.

1. *Echelle Provisoire de Température de 1976 entre 0,5 K
et 30 K (EPT-76)*

Le CCT a adopté le texte définitif de cette Echelle dont
le CIPM avait approuvé les grandes lignes en 1976 et autorisé
sa promulgation par le CCT. Le texte de l'EPT-76 (*voir* p. T7)
sera disponible comme publication séparée du BIPM dont des
exemplaires seront distribués à la 15^e Conférence Internatio-
nale sur la Physique des basses températures (Grenoble, France,
août 1978) ; cela favorisera une diffusion rapide de l'EPT-76
parmi les utilisateurs possibles de cette échelle.

2. *Echelle Internationale Pratique de Température (EIPT)*

Un calendrier provisoire a été établi pour permettre au CCT de proposer une nouvelle version de l'EIPT en 1986. Les principes à retenir pour cette nouvelle version ont été discutés ; les points suivants ont été considérés comme importants :

a) Le remplacement du thermocouple, qui définit l'EIPT-68 dans le domaine de température compris entre 630,74 °C et 1 064,43 °C, par le thermomètre à résistance de platine ou, si ce n'est pas possible dans tout cet intervalle, par le pyromètre optique dans la partie supérieure de ce domaine.

b) La précision exigée de la nouvelle échelle et, en conséquence, l'introduction de nouvelles formules d'interpolation pour le thermomètre à résistance de platine.

c) L'introduction de l'EPT-76 dans la nouvelle échelle.

d) L'extension possible de la nouvelle échelle jusqu'à 0,01 K.

3. *Monographie complémentaire à l'EIPT*

Le CCT a jugé nécessaire la préparation d'une monographie destinée à expliquer et compléter l'EIPT-68, ainsi que sa version future.

Les utilisateurs ont besoin d'informations qui fassent autorité sur la réalisation de l'EIPT ; des propositions précises ont été faites pour mettre de telles informations à leur disposition.

4. *Points de référence secondaires et réalisations secondaires de l'EIPT*

Une nouvelle liste des points de référence secondaires a été publiée sous les auspices du CCT. On constate un besoin général d'un grand nombre de points de référence, particulièrement dans le domaine de température entre - 50 °C et + 300 °C. Une coopération entre le CCT et l'Union Internationale de Chimie Pure et Appliquée sera établie à ce sujet. Le CCT recommandera seulement les points de référence qui peuvent être réalisés avec une haute précision et pour lesquels la température dans l'EIPT-68 est déterminée.

De nombreux laboratoires n'ont pas les moyens de réaliser l'EIPT-68 ou n'ont pas besoin de la haute précision qu'elle fournit. Le CCT a reconnu qu'il faudrait donner des directives officielles concernant des réalisations simplifiées de l'échelle ; il n'a toutefois pas pris de décision quant à la façon dont ces directives devraient être données.

5. *Comparaisons internationales*

a) Une comparaison internationale d'échelles de thermomètres à résistance de platine pour hautes températures et d'échelles de pyromètres optiques, entre 630 °C et 1 064 °C, est en cours d'organisation.

b) Il a été décidé de procéder à une comparaison internationale de réalisations de l'EIPT-68 au-dessous de 0 °C en utilisant des cellules scellées à point triple (on dispose de telles cellules pour environ neuf corps purs).

6. *Groupes de travail*

Les cinq Groupes de travail du CCT ont fourni dans leurs rapports des renseignements très utiles sur les différents points précédents ; ce travail d'information devra être poursuivi dans le futur.

(Août 1978)

R E C O M M A N D A T I O N
du Comité Consultatif de Thermométrie
présentée
au Comité International des Poids et Mesures

Préambule

Le Comité Consultatif de Thermométrie désire réaffirmer l'importance de sa Recommandation T 1 (1976) présentée au Comité International des Poids et Mesures en septembre 1976.

A sa 12^e session (1978), et afin de faciliter l'élaboration d'une nouvelle Echelle Internationale Pratique de Température (EIPT), le Comité Consultatif de Thermométrie appuie fortement l'élaboration ou la continuation de programmes de recherche dans les domaines mentionnés dans la Recommandation suivante.

RECOMMANDATION T 1 (1978)

Le Comité Consultatif de Thermométrie,

1. *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 des recherches soient effectuées en vue

- a) d'améliorer le thermomètre à résistance de platine pour qu'il soit satisfaisant à toutes les températures jusqu'à la température de jonction entre le domaine du thermomètre à résistance de platine et celui du pyromètre optique ;*
- b) de déterminer la température la mieux appropriée pour cette jonction.*

2. *considérant qu'une valeur exacte de la constante des gaz est nécessaire dans certaines mesures de la température thermodynamique, et que l'incertitude de la valeur de cette constante est au moins de un dix-millième,*

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

3. considérant qu'il existe dans tous les pays un besoin réel pour des mesures de température qui ne sont pas les plus précises et les plus exactes,

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

4. 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 réduites dans une future Echelle Internationale Pratique de Température,

recommande que l'on effectue des recherches sur la mesure des températures thermodynamiques entre 14 K et 1 064 K et, en particulier, entre 14 K et 90 K et entre 400 °C et 700 °C.

ÉCHELLE PROVISOIRE DE TEMPÉRATURE DE 1976
ENTRE 0,5 K et 30 K*

Il est devenu de plus en plus évident que les échelles à pression de vapeur de l'hélium utilisées couramment [1,2] et l'extrémité inférieure de l'Echelle Internationale Pratique de Température de 1968 (E IPT-68) [3] s'écartent nettement de la température thermodynamique et, de plus, qu'elles ne sont pas cohérentes entre elles. Le Comité Consultatif de Thermométrie (CCT) a pris connaissance et discuté de ces problèmes posés par les échelles internationales pratiques de température actuellement utilisées. En 1976, le CCT a donc proposé au Comité International des Poids et Mesures (CIPM) que soit recommandée pour être utilisée sur le plan international, une nouvelle échelle provisoire pratique de température entre 0,5 K et 30 K jusqu'à ce que l'on puisse adopter une nouvelle Echelle Internationale Pratique de Température [4]. Le CIPM a autorisé le CCT à publier l'"Echelle Provisoire de Température de 1976 entre 0,5 K et 30 K" (EPT-76)⁽¹⁾ lorsqu'elle serait sous sa forme définitive [5,6]. Cette échelle est décrite ci-après.

*

*Ce document a été préparé par les membres du Groupe de travail 4 près du Comité Consultatif de Thermométrie : M. DURIEUX, président, Kamerlingh Onnes Laboratorium (Pays-Bas), W.R.G. KEMP, National Measurement Laboratory (Australie), C.A. SWENSON, Iowa State University (USA), D.N. ASTROV, Institut des Mesures Physicotechniques et Radio-techniques (URSS).

On peut obtenir auprès du BIPM, F-92310 Sèvres, France, le texte français et sa traduction anglaise. La version anglaise sera publiée dans *Metrologia* au début de 1979.

(1) Les températures dans cette échelle sont désignées par le symbole T_{76} .

En élaborant l'EPT-76 on a cherché à ce que les différences entre les températures T_{76} et T soient lisses⁽²⁾, qu'elle se raccorde sans discontinuité à l'EIPT-68 à 27,1 K et qu'elle soit en accord avec la température thermodynamique T aussi étroitement que le permettent ces deux conditions.

L'EPT-76 est fondée sur les valeurs des températures assignées aux points fixes de définition donnés au tableau I. Ces points fixes ont été déterminés pour être autant que possible en conformité avec les buts recherchés et en utilisant les résultats récents obtenus en thermométrie. On peut réaliser l'EPT-76 par interpolation entre les points fixes, mais contrairement à ce qu'il en est pour l'EIPT-68, différentes méthodes d'interpolation sont permises, et l'on peut aussi obtenir des valeurs de T_{76} à partir de certaines échelles de laboratoire existantes.

Les méthodes admises pour réaliser l'EPT-76 en tout ou partie sont :

- a) utilisation d'un instrument thermodynamique d'interpolation, tel qu'un thermomètre à gaz ou un thermomètre magnétique, étalonné à un ou plusieurs points fixes du tableau I ;
- b) pour les températures supérieures à 13,81 K, utilisation de l'EIPT-68 avec les différences données au tableau II ;
- c) pour les températures inférieures à 5 K, utilisation des échelles à pression de vapeur de l'hélium, l'"Echelle ^4He 1958" ou l'"Echelle ^3He 1962", avec les différences données au tableau III ;
- d) utilisation de toute échelle de laboratoire pour laquelle les différences par rapport à l'EPT-76 sont données aux tableaux IV, V, VI.

Les différentes méthodes employées pour réaliser l'EPT-76 peuvent, par suite d'un manque de cohérence interne,

(2) Le terme "lisse" implique que les discontinuités des valeurs des dérivées seconde et d'ordre supérieur de T_{76} par rapport à T soient petites. Lors d'une mesure de capacité thermique, par exemple, la déformation qui paraît due au caractère non lisse de l'échelle de température doit être inférieure à 0,001. Ce même critère de caractère lisse doit s'appliquer aux étalonnages des thermomètres qui couvrent le domaine de température voisin de 27,1 K où l'EPT-76 et l'EIPT-68 se rejoignent.

introduire de légères ambiguïtés entre les réalisations. Elles ne seraient pas acceptables pour une Echelle Internationale Pratique de Température, mais on considère que les avantages tirés de l'introduction de l'EPT-76 comme échelle de travail, compensent largement cet inconvénient. L'EPT-76 ne remplace pas l'EIPT-68 dans la région où ces deux échelles se recouvrent, entre 13,81 K et 30 K, mais on choisira de l'utiliser dans les applications pour lesquelles le caractère lisse par rapport à la température thermodynamique est nécessaire.

Les tableaux IV, V et VI font référence à des échelles qui sont discutées par Ward et Compton [7] à la suite des comparaisons de thermomètres à résistance de platine et par Besley et Kemp [8] à la suite des comparaisons de thermomètres à résistance de germanium ; ces comparaisons ont été faites sous les auspices du CCT. En particulier, l'échelle T_{XAC} , de Besley et Kemp est reliée à l'EPT-76 par :

$$T_{XAC} - T_{76} = 2,5 \times 10^{-6} T^2/K.$$

Des renseignements complémentaires sur les origines, l'élaboration, la réalisation et l'exactitude estimée de l'EPT-76 sont donnés par ailleurs [9].

(Avril 1978)

TABLEAU I

Points fixes de définition de l'EPT-76

Points fixes	Valeur attribuée à la température T_{76} (K)
Point de transition supraconducteur* du cadmium	0,519
Point de transition supraconducteur du zinc	0,851
Point de transition supraconducteur de l'aluminium	1,179 6
Point de transition supraconducteur de l'indium	3,414 5
Point d'ébullition de ^4He (a)	4,222 1
Point de transition supraconducteur du plomb	7,199 9
Point triple de l'hydrogène en équilibre (b)	13,804 4
Point d'ébullition de l'hydrogène en équilibre à une pression de 33 330,6 Pa (25/76 atmosphère normale) (b)	17,037 3
Point d'ébullition de l'hydrogène en équilibre (a,b)	20,273 4
Point triple du néon (c)	24,559 1
Point d'ébullition du néon (a,b,c)	27,102

* Point de transition supraconducteur : c'est la transition entre l'état supraconducteur et l'état normal dans un champ magnétique nul, telle qu'elle est fournie par le dispositif SRM 767 du NBS.

(a) Point d'ébullition sous une pression $p_0 = 101\,325$ Pa (1 atmosphère normale).

(b) Ce sont les quatre points fixes de définition situés dans la partie basse de l'EIPt-68. Les valeurs des températures attribuées à ces points dans l'EPT-76 sont différentes de celles qui figurent dans l'EIPt-68.

L'expression "hydrogène en équilibre" signifie que l'hydrogène a sa composition ortho-para d'équilibre à la température considérée.

(c) Les deux points du néon s'entendent pour du néon ayant la composition isotopique normale de 2,7 mmol de ^{21}Ne et 92 mmol de ^{22}Ne pour 0,905 mol de ^{20}Ne [3].

TABLEAU II

Différences entre l'EPT-76 (T_{76}) et l'EIPT-68 (T_{68})

T_{68} (K)	$T_{68}-T_{76}$ (mK)	T_{68} (K)	$T_{68}-T_{76}$ (mK)	T_{68} (K)	$T_{68}-T_{76}$ (mK)
13,81	5,6	19,0	7,4	24,5	2,1
14,0	4,6	19,5	7,3	25,0	1,6
14,5	3,0	20,0	6,9	25,5	1,1
15,0	2,0	20,5	6,4	26,0	0,7
15,5	2,2	21,0	5,8	26,5	0,3
16,0	2,6	21,5	5,3	27,0	0,0
16,5	3,6	22,0	4,8	27,1	0,0
17,0	4,6	22,5	4,2	28,0	0,0
17,5	5,6	23,0	3,7	29,0	0,0
18,0	6,5	23,5	3,2	30,0	0,0
18,5	7,2	24,0	2,7		

TABLEAU III

*Différences entre l'EPT-76 (T_{76})
et les échelles à pression de vapeur d'hélium
("Echelle ^4He 1958" (T_{58})
et "Echelle ^3He 1962" (T_{62}))*

T_{pv} (K)	$T_{pv}-T_{76}$ (mK)	T_{pv} (K)	$T_{pv}-T_{76}$ (mK)	T_{58} (K)	$T_{58}-T_{76}$ (mK)
0,5	- 1,9	1,8	- 3,9	3,4	- 6,8
0,6	- 2,1	2,0	- 4,1	3,6	- 7,0
0,8	- 2,5	2,2	- 4,4	3,8	- 7,0
1,0	- 2,9	2,4	- 4,9	4,0	- 7,1
1,2	- 3,2	2,6	- 5,4	4,2	- 7,1
1,4	- 3,5	2,8	- 5,9	4,5	- 7,1
1,6	- 3,7	3,0	- 6,3	5,0	- 7,1
		3,2	- 6,6		

T_{pv} correspond, de 0,5 K à 3,2 K, à une moyenne de T_{62} et de T_{58} .

TABLEAU IV

*Différences entre l'échelle provisoire
de température de 1965
du NBS entre 2 et 20 K ($T_{\text{NBS 2-20}}$)
et l'EPT-76 (T_{76})*

$T_{\text{NBS 2-20}}$ (K)	$T_{\text{NBS 2-20}} - T_{76}$ (mK)	$T_{\text{NBS 2-20}}$ (K)	$T_{\text{NBS 2-20}} - T_{76}$ (mK)
2,3	2,1	11,0	- 1,0
2,8	- 1,1	12,0	0,2
3,2	1,0	13,0	- 1,8
4,2	2,5	14,0	- 2,2
5,0	3,0	15,0	- 0,6
6,0	1,7	16,0	0,9
7,0	4,8	17,0	1,7
8,0	2,2	18,0	- 0,9
9,0	- 1,5	19,0	- 0,2
10,0	- 2,1	20,0	- 0,8(+7(b))

(a) Ces températures sont très proches des températures effectives (points acoustiques) auxquelles l'échelle NBS 2-20 est définie.

(b) Avec $T_{\text{NBS 2-20}}$ telle qu'elle est donnée dans les premiers étalonnages du NBS.

TABLEAU V

*Différences entre les échelles magnétiques de l'ISU,
du KOL, du NML, de l'IMPR, du NPL,
l'échelle du thermomètre à gaz NPL-75
et l'EPT-76*

Les coefficients sont donnés pour la relation

$$T_i - T_{76} = a + bT_i + cT_i^2 + d/T_i,$$

où T_i représente les températures dans les échelles des différents laboratoires.

Laboratoire	Echelle*	a (10 ⁻³ K)	b (10 ⁻³)	c (10 ⁻³ /K)	d (10 ⁻³ K ²)	Domaine (K)
ISU	T _{XAc}	0	0	0,002 5	0	1,1 à 30
KOL	T _m (III)	- 8,0	1,5	- 0,041 3	8,3	2 à 27
NML	T _{XNML}	- 1,5	0,41	- 0,010 9	0	1,1 à 30
NML	T _{MAS}	- 1,5	0,49	- 0,012 5	0	1,1 à 30
IMPR	T _{XIMPR}	0	0,51	- 0,012 5	0	4,2 à 27
NPL	T _{X1}	0	0	0	0	0,5 à 3,1
NPL	T _{NPL-75}	0	0	- 0,005 6	0	2,6 à 27,1

* Ces échelles sont discutées dans la référence [9].

TABLEAU VI

*Différences entre la version NBS de l'EIP-68 ($T_{\text{NBS-68}}$)
et l'EPT-76 (T_{76})*

$T_{\text{NBS-68}}$ (K)	$T_{\text{NBS-68}} - T_{76}$ (mK)	$T_{\text{NBS-68}}$ (K)	$T_{\text{NBS-68}} - T_{76}$ (mK)	$T_{\text{NBS-68}}$ (K)	$T_{\text{NBS-68}} - T_{76}$ (mK)
13,8	1,7	19,0	4,9	24,5	2,9
14,0	1,8	19,5	4,9	25,0	2,5
14,5	2,1	20,0	4,9	25,5	2,1
15,0	2,0	20,5	4,8	26,0	1,7
15,5	2,2	21,0	4,7	26,5	1,3
16,0	2,4	21,5	4,6	27,0	1,1
16,5	3,0	22,0	4,5	27,5	1,1
17,0	3,5	22,5	4,2	28,0	1,1
17,5	3,9	23,0	4,0	29,0	1,1
18,0	4,4	23,5	3,7	30,0	1,0
18,5	4,8	24,0	3,4		

BIBLIOGRAPHIE

1. BRICKWEDDE (F.G.), VAN DIJK (H.), DURIEUX (M.), CLEMENT (J.R.) and LOGAN (J.K.), *J. Res. NBS*, 64A, 1960, p. 1.
 2. SHERMAN (R.H.), SYDORIAK (S.G.) and ROBERTS (T.R.), *J. Res. NBS*, 68A, 1964, p. 579.
 3. *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. *Metrologia*, 12, 1976, p. 7.
 4. *Comité Consultatif de Thermométrie*, 11^e session, 1976, p. T 1.
 5. *Procès-Verbaux CIPM*, 44, 1976, p. 11.
 6. TERRIEN (J.), *Metrologia*, 13, 1977, p. 53.
 7. COMPTON (J.P.) and WARD (S.D.), *Temperature Measurement 1975*, Institute of Physics Conference Serie No. 26, Institute of Physics, London, 1975, p. 91. A paraître aussi dans *Metrologia* par WARD (S.D.) and COMPTON (J.P.).
 8. BESLEY (L.M.) and KEMP (W.R.G.), *Metrologia*, 13, 1977, p. 35.
 9. DURIEUX (M.), ASTROV (D.N.), KEMP (W.R.G.) and SWENSON (C.A.), à paraître dans *Metrologia*.
-

Compte rendu des séances de la 12^e session du CCT

L'anglais est choisi comme langue de travail ; Mr Durieux est nommé Rapporteur.

Le Président souhaite la bienvenue à tous les membres et délégués, en particulier aux nouveaux délégués, Mr Schooley (NBS) et Mr Rusby (NPL), ainsi qu'à Mr Ling Shan-Kang (et son interprète Mr Yu Ta Tung) qui représente pour la première fois, en tant qu'observateur, le laboratoire de thermométrie du National Institute for Metrology (Pékin). Bien qu'il ne soit plus directeur du BIPM, Mr Terrien assiste à la réunion. Mr Giacomo et Mr Quinn y assistent en tant que directeur et sous-directeur du BIPM.

Avant de passer à l'ordre du jour, le Président fait quelques remarques générales sur le rôle et la tâche du CCT. Le CCT présente un rapport au CIPM et ne peut que faire des recommandations au CIPM, à moins que le CIPM ne lui délègue d'autres pouvoirs. Un exemple de cette dernière procédure est la délégation faite au CCT d'autoriser et de publier l'EPT-76 (Échelle Provisoire de Température de 1976 entre 0,5 K et 30 K). Émettre des recommandations est toutefois extrêmement important, car le CIPM les approuve presque toujours ; par ailleurs, il n'agit en fait qu'à la suite d'une recommandation. Parmi les tâches futures du CCT, le Président mentionne la révision de l'EIPT-68 dont on peut penser qu'elle conduira à une nouvelle échelle en 1987, la recommandation de réalisations secondaires de l'EIPT-68 et l'élaboration de méthodes recommandées pour les mesures de température.

Le Comité approuve ensuite l'ordre du jour provisoire proposé par le Président, avec un changement mineur dans l'ordre des sujets, pour permettre toute discussion nécessaire avec une

* Dans ce rapport, on a parfois regroupé les discussions relatives à un même sujet apparaissant sous différents points de l'ordre du jour.

sous-commission de l'UICPA, et aussi avec un point complémentaire, proposé par Mr Terrien, sur les suggestions pour l'extension des travaux de thermométrie au BIPM.

1. APPROBATION DU COMPTE RENDU DES SÉANCES
DE LA 11^e SESSION DU CCT

Le compte rendu de la 11^e session du CCT est approuvé.

2. QUESTIONS SOULEVÉES PAR LA 11^e SESSION DU CCT

a. *Publication de la liste des points de référence secondaires*

Mr Crovini, président du GT2, indique qu'une liste complétée des points de référence secondaires a été publiée par le GT2 dans *Metrologia*, 13, 1977, p. 197. La liste attribue des valeurs à un grand nombre de températures de changement de phase, y compris toutes celles du tableau VI de l'EIPT-68 ; on indique aussi l'origine de ces valeurs.

Le GT2 n'a pas été en mesure d'indiquer l'exactitude de chaque valeur ; cela est pourtant une question très importante. En général, au-dessous de 1000 K, les points de référence secondaires sont exacts à mieux que 0,01 K et entre 1000 K et 1400 K à mieux que 0,1 K. Au-dessus de 1400 K, l'inexactitude atteint 10 K pour la température la plus élevée (point de fusion du tungstène à 3695 K).

b. *Publication des différences entre l'EIPT-68 et les températures thermodynamiques au-dessus de 0 °C*

Mr Quinn, président du GT3, indique que les différences $T - T_{68}$ entre 0 °C et 460 °C sur lesquelles le CCT s'était mis d'accord lors de sa précédente session et la documentation se rapportant à ces différences ont été publiées par le GT3 dans *Metrologia*, 13, 1977, pp. 177 et 175.

c. *Échelle provisoire de température de 1976 entre 0,5 K et 30 K (EPT-76) - Discussion préliminaire*

Mr Durieux, président du GT4, indique qu'un projet de l'EPT-76 a été envoyé par le GT4 aux membres du CCT, en décembre 1977. Il remercie les membres pour leurs commentaires, portant tous, d'ailleurs, davantage sur le texte que sur les principes ou les valeurs des températures de l'échelle. Lors d'une récente réunion de ce Groupe de travail il a été décidé,

cependant, de scinder le projet en deux documents, l'un présentant l'EPT-76 et l'autre son contexte, son obtention et son emploi. Le GT4 compte demander, au cours de la présente session, l'approbation du premier document (Document CCT/78-40) et l'autorisation de publier le second document (qui contiendra essentiellement les renseignements du chapitre III du projet diffusé) lorsqu'il sera prêt. Le Président donne son accord à cette procédure et demande au CCT de se tenir prêt à discuter le document 40 le lendemain). Il souligne l'avantage d'avoir tous les renseignements complémentaires dans un document séparé qui peut être remis à jour de temps en temps.

d. *Divers*

Mr Hudson, président du GT5, rappelle que lors de la 11^e session du CCT, il avait demandé que tous les renseignements qui concernent les groupes de travail leur soient régulièrement communiqués. Le GT5 n'a reçu que peu d'informations et Mr Hudson renouvelle sa demande, qui est appuyée par le Président.

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

a) *Rapport du Groupe de travail 1* (Préparation du remplacement de l'EIPT-68 ; H. Preston-Thomas (président), B.N. Oleinik et H.H. Plumb).

Mr Preston-Thomas, en tant que président du GT1, n'a rien à ajouter au rapport du GT1 mais pose la question du calendrier pour la révision de l'EIPT-68. La date précédemment envisagée de 1983 semble maintenant prématurée. Toutefois, on devrait pouvoir soumettre la nouvelle EIPT à la CGPM lors de sa réunion en 1987 ; dans ce cas, l'échelle devrait être présentée au CIPM en 1986. On peut alors envisager pour le CCT le calendrier suivant :

- 1980 : Adoption des principes de la nouvelle échelle (par exemple température de la jonction entre le domaine du thermomètre à résistance de platine et celui du pyromètre optique).
- 1982 : Plan de l'échelle prêt pour discussion.
- 1984 : Texte final de l'échelle prêt pour discussion.
- 1986 : Approbation du texte à soumettre au CIPM.

Mr Bedford remarque que, avec ce plan de travail, il est nécessaire, à cette session, de discuter d'une manière approfondie des principes de l'échelle. Dans ce contexte, Mr Thomas demande quel est l'état d'avancement, au NBS, des travaux sur les thermomètres à résistance de platine aux températures élevées.

Mr Hudson répond que les résultats étaient excellents jusqu'à récemment mais qu'un lot récent de thermomètres a été défectueux. Mr Schooley ajoute que les thermomètres sont stables à 1 mK près environ à 660 °C, mais que des instabilités de 10 à 30 mK, dont on ne connaît pas encore les causes, apparaissent au refroidissement (en particulier après un refroidissement rapide à partir de 1100 °C environ). Mr Quinn demande si ces instabilités s'ajoutent aux problèmes des défauts cristallins et Mr Bedford demande si l'on peut les éliminer par un recuit. Mr Schooley ne sait pas.

Mr Mitsui indique que le plan de travail proposé convient au NRLM. Il espère avoir, avant 1980, les résultats d'une comparaison de l'échelle du thermomètre à résistance de platine et de l'échelle du pyromètre optique entre 600 °C et le point de l'or. Des thermomètres à résistance de platine de plusieurs types prendront part à ces comparaisons.

b) *Rapport du Groupe de travail 2* (Révision des points de référence secondaires et recherches sur des techniques pratiques simplifiées de mesure des températures ; L. Crovini (président), R.E. Bedford, H. Maas et J. Skakala).

Mr Crovini résume le rapport du GT2. En premier lieu, on explique dans ce rapport le rôle des points de référence secondaires associés à une EIPT parce que certains utilisateurs ont par erreur considéré les points de référence secondaires comme faisant partie de l'EIPT et les ont utilisés comme les points fixes de définition. On peut utiliser les points de référence secondaires pour : des réalisations à un niveau secondaire de l'EIPT, des étalonnages de thermomètres de second ordre, des réalisations d'autres unités, des vérifications internes ou des comparaisons de réalisations de l'EIPT, des étalonnages *in situ* d'instruments. En ce qui concerne les points de référence secondaires, le GT2 propose (voir rapport du GT2) que leur liste, jointe à une future EIPT, ne comporte que les points hautement reproductibles (ou les équations de pression de vapeur) qui répondent à des critères assez rigoureux. Il convient de laisser à d'autres organisations (telles

que l'UICPA) le soin de faire la liste des points qui ne répondent pas à ces spécifications (points de référence tertiaires). La liste des points de référence secondaires ainsi que les conseils relatifs à leur emploi, devront faire partie des renseignements complémentaires dont le texte fera l'objet d'une publication séparée de celle de l'EIPT.

En ce qui concerne les échelles de niveau secondaire, le rapport du GT2 donne un certain nombre d'exemples et recommande que ces échelles fassent l'objet d'une publication distincte, à la fois du texte d'une nouvelle EIPT et des renseignements complémentaires. Une troisième publication empêcherait toute confusion de ces échelles avec l'EIPT. Mr Crovini demande l'opinion du CCT sur ces échelles.

Le Président remercie le GT2 pour son rapport particulièrement bien préparé et demande s'il y a des commentaires.

Mr Schooley fait remarquer que, dans l'industrie, de nombreux laboratoires utilisent des réalisations secondaires de l'EIPT et il souligne qu'ils ont besoin de conseils officiels. Dans ce contexte, on a discuté au NBS, sans arriver à une conclusion unanime, pour savoir si et comment les points de référence secondaires et les échelles de niveau secondaire devraient être incorporés à une nouvelle EIPT.

Mr Terrien dit que, dans le domaine des mesures de longueur, la CGPM a demandé au CIPM de recommander des étalons secondaires. De la même façon, le CIPM pourrait recommander des étalons secondaires pour les mesures de température. Mr Coates suggère que si les laboratoires nationaux fournissaient des instruments étalonnés dans l'EIPT ainsi que cela est indiqué dans le rapport du GT2 (point 4.2.1), cela apporterait toute l'aide nécessaire. Mr Quinn fait remarquer que les échelles de niveau secondaire sont en réalité des réalisations du second niveau de l'EIPT. Il préfère que l'on ne définisse ni ne recommande aucune de ces échelles, mais que l'on donne des conseils pour des réalisations secondaires de l'EIPT, comme par exemple sur la façon d'utiliser les tables de thermocouples approuvées par la Commission Électrotechnique Internationale (CEI).

Mr Schooley souligne à nouveau le besoin de points de référence secondaires et d'échelles de niveau secondaire officiels parce qu'aux États-Unis l'étalonnage des appareils utilisés par les laboratoires industriels pour leurs réalisations secondaires de l'EIPT est très long et très coûteux.

Mr Coates dit que le NPL a un point de vue diamétralement opposé et s'en tient à sa première suggestion. Il souligne qu'il existe au Royaume-Uni un programme bien établi pour la diffusion de l'EIPT-68 au moyen de thermomètres étalonnés par comparaison aux instruments d'interpolation étalons de l'EIPT-68. Les laboratoires du British Calibration Service qui assurent ces étalonnages ont leurs thermomètres étalons vérifiés régulièrement avec l'aide du NPL. On dispose ainsi d'une méthode peu onéreuse de se référer aux étalons nationaux.

Mr Hudson, essayant de rendre la discussion plus explicite, demande si, par exemple, le CCT devrait donner sa caution aux tables de thermocouples dont il a été question ou à des renseignements tels que ceux qui sont donnés dans la "NBS Monograph 125" et s'il conviendrait éventuellement de constituer un nouveau groupe de travail pour étudier ces questions.

Mr Quinn exprime à nouveau qu'à son avis on ne doit donner que des directives sur la façon d'utiliser les tables de thermocouples.

Mr Crovini rappelle le paragraphe 4.2.3 du rapport du GT2 dans lequel est décrite une échelle de niveau secondaire entre 0 °C et 1800 °C fondée sur les thermocouples.

c) *Rapport du 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 ; T.J. Quinn (président), L.A. Guildner, A. Moser et W. Thomas).

Mr Quinn indique qu'à l'époque où a été rédigé le rapport du GT3 on ne disposait d'aucun nouveau résultat expérimental pour étendre la liste des valeurs de $(T - T_{68})$ aux températures supérieures à 460 °C. On a eu, par la suite, les résultats du thermomètre à bruit de l'IMGC entre 630 °C et 962 °C (Document 78-6) , ces résultats seront inclus dans le rapport définitif.

Mr Quinn demande alors l'opinion du CCT sur la déclaration contenue dans le rapport du GT3 : "L'échelle qui remplacera l'actuelle EIPT-68 entre 630,74 °C et 1064,43 °C devait permettre de mesurer les températures de telle façon que l'écart-type d'une mesure ne dépasse pas 20 mK environ". Ceci conduit à une longue discussion sur les thermomètres à résistance de platine aux températures élevées.

Mr Crovini pense qu'une exactitude de 10 à 20 mK au point de l'or constitue un but raisonnable mais il répugne à spécifier un écart-type parce que les erreurs systématiques sont

plus importantes que les erreurs aléatoires. Mr Coates est d'accord sur ce point et attire l'attention sur les dérives systématiques des thermomètres. Mr Schooley indique que, pour l'instant, on ne connaît pas encore la reproductibilité des thermomètres du NBS au point de l'or. Mr Quinn propose que l'on constitue une petite commission pour prendre une décision sur l'ordre de grandeur de l'exactitude dont on a besoin pour les thermomètres à résistance de platine aux températures élevées. Mr Hudson met en garde le Comité contre le fait de demander une exactitude meilleure que ce qui est nécessaire. Le Président fait allusion au prix élevé des thermomètres. Sur une question de Mr Thomas, Mr Hudson dit que le NBS est encore opposé, pour le moment, à une extension du domaine du pyromètre optique aux températures inférieures au point de l'or et reste optimiste en ce qui concerne la mise au point de thermomètres à résistance de platine appropriés pour remplacer le thermocouple dans tout son domaine.

Mr Bedford demande où en est la comparaison des échelles entre 630,74 °C et 1064,43 °C mentionnée dans le rapport du GT3. Mr Quinn répond que ce projet a été retardé par suite de difficultés avec les nouveaux thermomètres à résistance de platine du NBS que l'on doit utiliser pour ces comparaisons.

Parlant du thermomètre japonais à résistance de platine aux températures élevées, Mr Mitsui indique que des progrès ont été faits dans la mise au point d'un thermomètre commercial ; on dispose à l'heure actuelle d'un thermomètre fabriqué à titre d'essai. Mr Mitsui signale le problème des impuretés (métaux alcalins) dans la silice fondue (le matériau brut provient vraisemblablement du Brésil) qui est préjudiciable à la stabilité à long terme des thermomètres.

Pour finir, le Président demande à Mr Quinn de constituer la petite commission chargée de faire une recommandation sur l'exactitude nécessaire, dans la future EIPT, entre 630 °C et le point de l'or. Le lendemain, le Comité accepte la déclaration suivante préparée par la commission de Mr Quinn :
L'échelle qui remplacera l'actuelle EIPT-68 entre 630 °C et 1064 °C devra avoir une reproductibilité meilleure que 0,04 K aux points fixes et entre ceux-ci. Cette reproductibilité devra inclure les effets de dérive sur une durée raisonnable, ainsi que l'effet d'immersion et la variation entre les instruments des différents fabricants.

d) *Rapport du 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 ; M. Durieux (président), D.N. Astrov, W.R.G. Kemp et C.A. Swenson).

Le rapport du GT4 consistait en un document, mentionné au point 2c, présentant l'EPT-76 avec les renseignements complémentaires ; ce sujet sera discuté plus loin (voir point 7).

Mr Durieux fait remarquer qu'entre 0,5 K et 30 K on dispose maintenant de résultats de mesures de température thermodynamique faites avec des thermomètres à gaz, à bruit, acoustiques ou magnétiques avec une exactitude de 1 mK. De nouvelles mesures avec des thermomètres à gaz entre 20 K (ou 4 K) et 100 K sont en cours au NML et au KOL, et avec un thermomètre à indice de réfraction entre 90 K et 373 K au NPL. Ainsi, en 1984, lorsqu'un texte de la nouvelle EIPT devra être prêt, on disposera de suffisamment de données sur les températures thermodynamiques entre 0,5 K et 100 K. En ce qui concerne les instruments d'interpolation, de nouvelles méthodes d'interpolation ont déjà été proposées pour le thermomètre à résistance de platine au-dessus de 13,81 K. Pour étalonner les thermomètres à résistance de rhodium-fer ou de germanium, il n'y a pas encore assez de points de référence entre 13,81 K et la température de l'hélium liquide ; c'est là un problème très important qu'il faut résoudre.

Mr Rusby demande si le GT4 a l'intention de donner prochainement de nouvelles équations ou de nouvelles tables de la pression de vapeur de ^4He et de ^3He . (Dans l'EPT-76 on ne donne que des tables des différences $T_{76} - T_{58}$ et $T_{76} - T_{62}$).

Mr Swenson et Mr Durieux répondent que l'on préparera de nouvelles équations ou de nouvelles tables mais qu'elles seront cohérentes avec l'EPT-76 et ne constitueront donc pas de nouvelles échelles de température. L'EPT-76 devrait demeurer valable jusqu'en 1987.

Mr Rusby attire l'attention sur la difficulté, lorsqu'on établira ces nouvelles équations et ces nouvelles tables, qu'il peut s'avérer nécessaire ou souhaitable de s'écarter légèrement des tables des différences contenues dans l'EPT-76.

Mr Hudson demande si l'EPT-76 et les nouvelles équations de pression de vapeur de l'hélium seront disponibles pour la 15^e Conférence internationale sur la physique à basse tempé-

rature (août 1978). L'EPT-76 sera disponible (voir point 7) mais les équations de pression de vapeur ne le seront pas.

Pour terminer, Mr Durieux indique que le GT4 a reçu, juste avant la session du CCT, une lettre dans laquelle Mr Pavese de l'IMGC propose une comparaison internationale des réalisations de l'EIPT-68 en faisant circuler un groupe de cellules à point triple scellées. L'IMGC pourrait :

1. organiser la circulation des cellules,
2. fournir certaines cellules pour la comparaison (sont immédiatement disponibles les points triples du méthane, de l'éthane, de l'argon, de l'oxygène, du néon, du deutérium-n et, dans quelques mois, du dioxyde de carbone, du deutérium-e et de l'hydrogène-e),
3. vérifier les cellules à comparer par rapport à d'autres cellules et à des thermomètres étalonnés à l'IMGC, et
4. rassembler et traiter les résultats.

Mr Crovini appuie la proposition de Mr Pavese et, avec Mr Quinn, attire l'attention sur la nécessité de normaliser la dimension des cellules afin qu'elles puissent rentrer dans les cryostats de tous les laboratoires participants. Le Président appuie aussi la proposition et il est convenu que l'IMGC prendra l'initiative de ces comparaisons.

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

Mr Hudson donne un bref compte rendu du rapport résumant les progrès dans les domaines du thermomètre à résistance de germanium, du thermomètre à résistance de rhodium-fer, du thermomètre à gaz à volume constant et du thermomètre à sel magnétique. Dans le précédent rapport du GT5, on avait sélectionné ces quatre thermomètres pour une étude plus approfondie. Mr Hudson fait remarquer que son exposé sur les thermomètres à résistance de germanium va être remis à jour avec les nouveaux contrôles de stabilité faits au NML (Document CCT/78-33). En ce qui concerne le thermomètre à résistance de rhodium-fer, il accueille favorablement la proposition du NML d'entreprendre aussi des essais de cycles thermiques sur ces thermomètres, et appelle les commentaires de ceux qui ont reçu des thermomètres du NPL.

Dans le rapport, on recense les qualités comme instruments d'interpolation des quatre thermomètres parce que l'extension

future de l'EIPT vers les basses températures conduira à choisir un instrument d'interpolation.

Le rapport ne recommande pas de méthode d'interpolation pour la nouvelle EIPT. Toutefois, on fait les remarques suivantes :

a) quelle que soit la façon dont l'EIPT sera définie au-dessous de 30 K, son utilisation quotidienne se fera surtout au moyen du thermomètre à résistance de germanium ;

b) une définition de l'échelle par rapport au thermomètre à gaz à volume constant ou au thermomètre à sel magnétique impliquerait un stade supplémentaire entre la réalisation des points fixes et la disponibilité de l'échelle ;

c) une définition par rapport au thermomètre à résistance rhodium-fer, qui semble avoir une stabilité extrêmement bonne et pour lequel l'étalonnage semble être moins complexe que pour le thermomètre à résistance de germanium, offrirait une réalisation directe sous une forme susceptible d'être acceptée par les laboratoires d'étalonnage secondaire, un peu comme le thermomètre à résistance de platine le permet aujourd'hui ;

d) davantage de points fixes seraient toutefois nécessaires et le rapport mentionne les travaux faits au NBS sur le point du niobium.

La façon dont on peut résoudre au mieux tous ces problèmes n'est nullement évidente.

Mr Mitsui demande où en sont, au NBS, les travaux sur le thermomètre à quadrupole nucléaire. Mr Hudson répond que Mr Utton, qui travaillait sur ce thermomètre, a quitté le NBS et que les recherches sont arrêtées. Mr Rusby indique qu'il a reçu des commentaires de la part du NRLM, de l'ISU et du KOL sur les thermomètres à résistance de rhodium-fer fournis à ces laboratoires (les résultats du KOL confirment une stabilité de $\pm 0,1$ mK pour les deux thermomètres).

Mr Durieux demande si l'on pourrait faire quelque chose pour améliorer la stabilité des thermomètres à résistance de germanium. Les efforts importants que les laboratoires nationaux dépensent en travaillant avec des thermomètres instables et les problèmes que ceux-ci posent aux utilisateurs contrastent avec le peu de travaux de recherches visant à améliorer les thermomètres. Mr Mitsui indique que les nouveaux thermomètres japonais (voir rapport du GT5, paragraphe A.1.c) n'ont pas encore été suffisamment étudiés. Mr Swenson attire l'attention sur le fait que les dérives d'étalonnage des thermo-

mètres à résistance de germanium sont, en général, régulières et dans bien des cas n'excèdent pas 0,01 %, de telle sorte que l'on peut utiliser les thermomètres à résistance de germanium dans de nombreuses expériences, par exemple en calorimétrie, mais pas en métrologie.

4. DISCUSSION SUR LA RÉUNION DU GT2 AVEC LA
SOUS-COMMISSION I.4.1 DE L'UICPA
(points de référence secondaires et
matériaux de référence)

Mr Quinn, qui a présidé cette réunion le 8 mai au BIPM, en résume les résultats. Les matériaux de référence (essentiellement des points de fusion ou des points triples de substances organiques) sont largement utilisés par les chimistes pour étalonner les thermomètres à mercure et pour les étalonnages *in situ* d'instruments à un peu mieux que 0,1 K près entre - 50 °C et 300 °C. Les chimistes souhaitent disposer d'un grand nombre de points de ce genre avec une exactitude d'environ 0,02 K. On a attiré l'attention de la sous-commission sur la distinction entre les matériaux de référence et les étalons matériels de référence ; la sous-commission a admis cette distinction. Elle organise un programme pour la caractérisation détaillée des matériaux de référence dans ce domaine des températures, et suggère que le CCT cautionne ce travail.

Dans la large discussion qui s'ensuit au sein du CCT, une certaine hésitation se fait jour pour cautionner la proposition de la sous-commission, car, ainsi que l'expriment le Président et Mr Coates, cela constituerait un engagement officiel du CCT dans le domaine des étalons matériels de référence et dans les mesures de température de faible exactitude. Après plus ample discussion, le CCT conclut que le procès-verbal mentionnera l'intérêt porté au programme proposé par la sous-commission I.4.1 de l'UICPA, sous la forme suivante : "Le CCT est heureux de constater que de nouveaux travaux sont en cours pour déterminer plus exactement les points de fusion ou les points triples de substances organiques dans le domaine de - 50 °C à 300 °C et compte éventuellement inclure certaines de ces substances dans la liste des points de référence secondaires recommandés par le CCT". Le CCT accepte la proposition du Président d'envoyer à la

sous-commission de l'UICPA un extrait des procès-verbaux comportant cette phrase afin d'exprimer l'intérêt qu'il porte aux travaux d'un autre groupe. Le président appuie pleinement la suggestion de Mr Terrien que dans la lettre d'accompagnement à la sous-commission on ajoute que le CCT se félicite de sa coopération accrue avec l'UICPA.

5. ÉTAT D'AVANCEMENT DES TRAVAUX EN RELATION
AVEC LES POINTS 1 à 5 DE LA RECOMMANDATION T1(1976)

Le Président propose que l'on discute brièvement des points de cette Recommandation pour voir ce qu'il en est advenu depuis 1976.

a. *Mesure des températures thermodynamiques entre 20 K et 1064 °C*

Seul Mr Kemp tient à ajouter au point 3c que les résultats provisoires obtenus au NML avec le thermomètre à bruit jusqu'à 100 °C semblent être en accord avec les résultats de L.A. Guildner.

L'exactitude visée est d'environ 3 mK à 100 °C et celle que l'on a obtenue jusqu'à maintenant est de 5 ou 6 mK.

b. *Mesure de la constante des gaz*

Mr Quinn fait remarquer que depuis la publication de la détermination faite au NPL de la constante des gaz par la méthode acoustique (qui a donné une valeur de 159×10^{-6} supérieure à la valeur classique de Batuecas, $8,314 41 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ *) on a découvert une erreur systématique ; on est en train de recalculer les résultats et il est très vraisemblable que, dans les limites d'incertitude, ils seront maintenant en accord avec la valeur classique de la constante des gaz.

Sur une question de Mr Thomas sur les thermomètres acoustiques aux basses températures, MM. Kemp, Quinn et Rusby indiquent qu'une valeur de la constante des gaz qui serait de 54×10^{-6} plus élevée que celle de Batuecas donnerait le meilleur accord moyen entre les résultats obtenus par Colclough entre 20 K et 4 K avec le thermomètre acoustique et les résultats obtenus par Berry avec le thermomètre à gaz (voir Document CCT/78-39).

* Comité Consultatif de Thermométrie, 11^e session, 1976, Annexe 1, document 76-30.

Mr Mitsui dit qu'au NRLM on est en train de mesurer la constante de Stefan-Boltzmann en déterminant le rayonnement total au point du zinc (dont on connaît bien la température thermodynamique). On estime que l'on peut déterminer cette constante avec une incertitude de 160×10^{-6} , ce qui donnerait une incertitude de 40×10^{-6} pour la valeur calculée de la constante des gaz. Les résultats préliminaires seront disponibles cette année et on espère qu'en améliorant l'installation on pourra ultérieurement atteindre une exactitude plus grande.

Mr Quinn ajoute que des mesures de rayonnement total sont également en cours au NPL. Mr Hudson signale que deux expériences de détermination de la constante des gaz sont envisagées au NBS : l'une utilisant des résonateurs acoustiques et l'autre, par L.A. Guildner, utilisant la méthode classique. D'après les calculs de Guildner, cette dernière méthode devrait donner une exactitude de 10×10^{-6} pour la constante des gaz.

c. *Recherches sur la détermination de la température pour la jonction des domaines du thermomètre à résistance de platine et du pyromètre optique et sur les thermomètres à résistance de platine aux températures élevées*

Aucune remarque à apporter au point 3c.

d. *Recherches sur des méthodes simplifiées de réalisation de l'EIPT-68*

La discussion qui a lieu porte entièrement sur la question, posée énergiquement par Mr Crovini, de savoir quelle est l'opinion du CCT sur l'approbation des échelles de niveau secondaire. Pour résumer, le Président dit qu'il préfère parler de "réalisation secondaires de l'EIPT" afin d'éviter de mettre le CCT dans l'obligation d'approuver deux échelles (l'EIPT et une échelle secondaire) (voir également la discussion au point 3b). Il a le sentiment que l'approbation par le CCT de telles réalisations secondaires constitue un moyen tout à fait approprié pour empêcher la prolifération des réalisations secondaires. Réitérant la question de Mr Crovini, Mr Bedford demande au CCT de donner au GT2 des directives sur ces questions. Toutefois, la réponse est reportée jusqu'à la discussion du point 6c.

- e. *Recherches sur la dissémination de l'EIPT-68 au-dessus de 2000 K au moyen de lampes à ruban de tungstène ou par tout autre moyen approprié*

Mr Bedford fait remarquer qu'aucun document du CCT ne traite de ce sujet. Mr Coates dit que très peu de progrès ont été faits dans ce domaine ; il n'y a que la mise au point au NBS de lampes stabilisées. Le Président rappelle que ce point de la Recommandation T1 (1976) avait été inclus car on s'attendait à ce que l'industrie s'intéresse de plus en plus aux températures élevées et le CCT allait au-devant de ces besoins.

Mr Thomas demande si l'on a des renseignements sur le point de congélation du platine ; il fait allusion au problème soulevé par la grande différence entre la valeur du NSL (1769,5 °C) et celle du NPL (1767,9 °C). Mr Crovini et Mr Quinn répondent que la valeur de la PTB (1768,96 °C) et celle de l'IMGC (1769,0 °C) sont très proches l'une de l'autre et situées entre les valeurs du NSL et du NPL. On ne connaît pas les causes de ces différences ; par manque de moyens, l'étude de ces problèmes n'est poursuivie ni au NML ni au NPL.

Commentant une remarque sur le fait que "les mesures qui présentent le meilleur accord sont employées pour décider de la meilleure valeur", Mr Hudson conseille d'être toujours attentif à ce que des recherches semblables peuvent facilement être entachées d'erreurs systématiques semblables. Ainsi, il est possible qu'une valeur éloignée soit la plus exacte !

6. DISCUSSION DE TROIS POINTS SOULEVÉS PAR LES RAPPORTS DU GT1 ET DU GT2

- a. *Monographie sur les renseignements complémentaires pour la réalisation de l'EIPT-68*

Le Président revient sur l'avantage d'avoir les renseignements complémentaires, non dans le texte de l'EIPT-68 elle-même, mais dans un document séparé (*voir* rapport du GT1). La question qui se pose alors est de savoir comment préparer un tel document qui couvre une gamme considérable de méthodes et la totalité du domaine de l'EIPT. Toutefois, comme le fait remarquer Mr Quinn, la question a été discutée lors des deux précédentes sessions du CCT et il faut faire quelque chose.

Mr Terrien dit que ce document pourrait être une monographie du BIPM comme cela a été fait pour des documents

comparables publiés sous les auspices du Comité Consultatif pour les Étalons de Mesure des Rayonnements Ionisants.*

Le Président fait remarquer qu'un groupe comprenant trois auteurs serait sans doute le plus efficace pour rédiger ce document, mais Mr Quinn signale qu'étant donné la diversité du sujet, il est vraisemblablement nécessaire d'avoir davantage d'auteurs et un responsable énergique pour l'ensemble du texte. Mr Schooley suggère que l'on invite des spécialistes dans chacun des domaines de température et pour chacun des instruments à rédiger effectivement le texte et qu'un comité de rédaction soit chargé d'assurer la cohérence du document. Mr Bedford pense que la suggestion de Mr Schooley correspond sans doute à la seule façon de faire le travail. Le Président estime que le document devrait comporter de 60 à 100 pages.

Mr Schooley dit que la rédaction de documents utiles pose un plus grand problème que leur édition, mais le Président et Mr Quinn soulignent que le Comité de rédaction doit pouvoir, si nécessaire, modifier le travail d'un auteur ou même le refuser.

Pour faire avancer la préparation d'un tel document, Mr Kemp dit que le NML propose de se charger du domaine compris entre 10 K et 100 K.

D'après son expérience à l'IMGC, Mr Crovini dit que les renseignements complémentaires en eux-mêmes ne peuvent jamais être suffisants pour permettre à quelqu'un de réaliser l'Échelle. Il faut avoir recours à un grand nombre de publications.

Mr Quinn dit que pour éviter un travail considérable de rédaction, une autre possibilité consisterait à prendre une collection de récentes publications décrivant, par exemple, la réalisation du point d'ébullition de l'hydrogène, accompagnées de commentaires. Les commentaires devraient être rédigés par un expert. Les tirés à part de ces publications et les commentaires constitueraient une somme de renseignements que l'on pourrait mettre à jour régulièrement.

Après quelques autres remarques, le Président remercie Mr Kemp de sa proposition. Il en discutera avec Mr Kemp et verra s'il est possible de couvrir aussi d'autres domaines de températures. Le CCT pourrait peut-être, lors de sa prochaine réunion, recevoir un rapport de Mr Kemp.

* *Comité Consultatif de Thermométrie*, 11^e session, 1976, p. T 27.

b. *Projet d'échelle pour une future révision de l'EIPT-68*

Le Président fait remarquer que, le projet d'échelle devant être prêt pour 1982 et les principes de la nouvelle échelle devant être fixés en 1980, il vaudrait mieux que ces principes, plutôt que le projet d'échelle, fassent l'objet de la présente discussion (voir point 3a). Certains de ces principes sont assez évidents : élimination du thermocouple et adjonction de quelque chose semblable à l'EPT-76 à l'extrémité inférieure de l'échelle. Il appelle les commentaires du CCT sur les autres modifications à apporter à l'EIPT-76.

Mr Hudson souhaite une formulation plus simple de l'échelle du thermomètre à résistance de platine aux basses températures.

Mr Kemp préconise l'emploi d'un ajustement par la méthode des moindres carrés aux points de référence, sacrifiant la reproductibilité exacte en ces points pour gagner en reproductibilité entre eux.

Mr Bedford se demande si la simplicité "numérique" est un point important dans notre ère des ordinateurs.

Mr Coates fait remarquer que la méthode d'interpolation compliquée utilisée dans l'EIPT-68 est sans doute en partie due aux irrégularités de la fonction de référence. Il pense que la résistance du platine devrait être une fonction plus simple de la température thermodynamique. Mr Rusby fait remarquer qu'en utilisant entre 13,81 K et 27 K l'échelle NPL-75 qui est plus lisse, l'ajustement nécessaire n'est pas extrêmement simplifié. Il ajoute que, lorsqu'on disposera de nouveaux résultats sur les températures thermodynamiques au-dessus de 27 K, il peut arriver qu'on ne puisse pas beaucoup simplifier la fonction de référence, bien qu'il soit presque certain qu'un polynôme du 20^e degré, comme celui qui est utilisé dans l'EIPT-68, soit inutilement compliqué.

Le Président demande quelle doit être la reproductibilité de la nouvelle EIPT. Mr Hudson demande ce qu'a donné la comparaison internationale de thermomètres à résistance de platine faite au NPL, en ce qui concerne la reproductibilité de l'EIPT-68.

Faisant allusion à une publication de Ward et Compton qui paraîtra dans *Metrologia*, Mr Rusby dit que lorsque les résultats sont ramenés à un ensemble commun de points de référence, deux tiers des thermomètres concordent à 1 mK près

sur le domaine de 14 K à 273 K, sauf au voisinage de 150 K. La totalité des thermomètres concordent à 3 mK près. Avec une interpolation différente utilisant les points de référence de l'EIPT-68, l'accord au voisinage de 150 K est aussi à 1 mK près (pour les deux tiers des thermomètres).

Avec cette méthode d'interpolation, on peut améliorer la reproductibilité d'un facteur deux ou trois sur toute l'étendue du domaine.

Mr Crovini fait remarquer que la reproductibilité de l'EIPT-68 au-dessus de 0 °C est d'environ 2 mK jusqu'à 500 °C avec seulement trois points d'étalonnage ; avec seulement un point d'étalonnage supplémentaire, elle serait peut-être de 10 mK ou 20 mK jusqu'au point de l'argent. Il ajoute que l'on pourrait envisager de sacrifier l'exactitude thermodynamique de l'échelle si cela pouvait permettre de simplifier la méthode d'étalonnage. Le Président dit que le CIPM a constamment considéré que l'EIPT doit concorder étroitement avec les températures thermodynamiques (plutôt que demeurer inchangée dans le temps). Mr Quinn demande si on a des renseignements sur la reproductibilité de l'EIPT-68 entre les points de référence, de 0 °C et 600 °C, comparables à ceux que l'on a au-dessous de 0 °C. Mr Bedford mentionne une publication de E. McLaren qui date de plusieurs années déjà. Le Président dit que les thermomètres devraient sans doute être soumis à des spécifications telles que la reproductibilité jusqu'au point du zinc ne s'écarte pas trop des 0,2 mK que l'on peut obtenir aux points de référence. Mr Bedford n'est pas aussi affirmatif sur la reproductibilité de 0,2 mK.

Mr Hudson suggère que l'on exige une reproductibilité de 0,2 mK, mais le Président dit que cela ne manquerait pas de conduire à des complications pour les critères relatifs aux thermomètres et pour les méthodes d'interpolation. Mr Rusby souligne que les comparaisons faites au NPL ont montré que les réalisations des points fixes dans les différents laboratoires ne concordent que dans quelques cas à 0,2 mK près ; on observe des différences de 1 mK et parfois même jusqu'à 4 mK. Mr Bedford avance qu'une reproductibilité de 1 mK entre 20 K et 500 °C constituerait un but plus réaliste. Pour Mr Kemp cela n'est pas assez bon pour le domaine compris entre 0 °C et 100 °C.

Mr Bedford fait remarquer qu'il existe une différence fondamentale entre la méthode d'interpolation simple de

l'EIPT-68 et la méthode proposée par le NRC et d'autres, à laquelle Mr Rusby a fait allusion plus haut, en ce que cette dernière méthode exige l'étalonnage du thermomètre sur le domaine complet, c'est-à-dire jusqu'au point d'ébullition de l'hélium, même si l'on n'utilise le thermomètre que jusqu'à, disons, 90 K. Mr Crovini ajoute que l'on ne peut pas étalonner les thermomètres à longue tige au-dessous de 90 K. Mr Bedford suggère que l'on devrait autoriser plusieurs méthodes d'étalonnage.

Mr Mitsui suggère que l'on devrait viser une reproductibilité de 0,2 mK dans le domaine compris entre - 100 °C et + 100 °C, domaine dans lequel, dans la pratique, on demande la plus grande précision. Il fait remarquer que cela risque de rendre souhaitable d'avoir deux points fixes supplémentaires. Il souhaite également que la nouvelle échelle ait des valeurs de dW/dT et d^2W/dT^2 continues à 0 °C.

Mr Schooley recommande, et le Président est d'accord, que les cellules à point triple scellées constituent les dispositifs essentiels pour réaliser les points de référence. On discute un peu pour savoir si, à l'avenir, on pourrait utiliser des cellules fabriquées industriellement, comme c'est le cas pour les cellules à point triple de l'eau.

Mr Rusby indique qu'une récente comparaison faite au NPL entre un point triple de l'argon, préparé de façon habituelle, et une cellule à point triple fabriquée à l'IMGC n'a donné qu'une différence de 0,2 mK. Mr Schooley souligne que réaliser un point fixe comme le point d'ébullition de l'hydrogène ou du néon constitue un gros travail de recherche et que c'est la raison pour laquelle le NBS n'a jamais réalisé l'EIPT-68. Le Président fait remarquer que la question de savoir combien de laboratoires réaliseront l'échelle est extrêmement pertinente. Il doit y avoir un compromis entre l'exactitude de l'échelle et le travail et le coût nécessaires à sa réalisation. A cet égard, l'utilisation de cellules scellées peut apporter une grande aide.

Mr Rusby souhaite que la future EIPT soit conçue de façon que l'on puisse calculer les températures à partir des résistances réduites mesurées, sans itération.

Un résumé des propositions qui précèdent concernant les principes de la nouvelle EIPT est distribué ultérieurement en séance :

1. Remplacement du thermocouple par le thermomètre à résistance de platine ou le pyromètre optique.

2. Extension de l'échelle vers les basses températures ; l'EPT-76 doit y être incluse d'une certaine façon.
3. Définition plus simple de l'échelle du thermomètre à résistance de platine au-dessous de 0 °C.
4. Dans le domaine de 100 K à 400 °C, où l'on a particulièrement besoin d'une grande exactitude, une reproductibilité de 0,2 mK est demandée.
5. Éviter les discontinuités de dW/dT et de d^2W/dT^2 à 0 °C.
6. On doit continuer à utiliser le thermomètre à résistance de platine jusqu'à 13,81 K (Mr Rusby).
7. Les cellules à point triple scellées doivent constituer les dispositifs essentiels pour réaliser l'échelle au-dessous de 0 °C (Mr Schooley).
8. Il ne devra pas être nécessaire de procéder par itération pour déduire les températures des résistances réduites des thermomètres à résistance de platine (Mr Rusby).
9. La fonction de référence du thermomètre à résistance de platine doit-elle être définie par rapport à $R/R_{\text{point triple}}$?
10. Faut-il étendre l'échelle au-dessous de 0,5 K ?
11. Peut-on admettre plusieurs définitions de l'échelle dans certains domaines ?
12. Les travaux du NBS en thermométrie à gaz seront-ils achevés jusqu'au point de l'or ou faudra-t-il s'en remettre aux thermomètres à rayonnement et aux thermomètres à bruit au-dessous d'environ 460 °C ?
13. De nouvelles mesures de températures thermodynamiques dans le domaine de 100 K à 273 K sont-elles souhaitables ou bien les résultats obtenus par le NRC avec le thermomètre à gaz, sur lesquels se fonde l'EIPT-68 dans ce domaine, suffisent-ils ?

Dans la suite de la discussion, Mr Coates et Mr Kemp font remarquer (en ce qui concerne le point 13) que les mesures de températures thermodynamiques sont nécessaires jusqu'à environ 10 K.

En ce qui concerne le point 10, Mr Schooley pense qu'il faut étendre l'échelle aux températures inférieures à 0,5 K parce que les réfrigérateurs à dilution de ^3He dans ^4He se répandent de plus en plus et de nombreuses personnes auront besoin d'une échelle pratique fondée sur la thermométrie à

résistance jusqu'à 10 mK. Mr Mitsui pense également que 10 mK constituerait pour l'échelle une limite inférieure raisonnable. Mr Coates fait remarquer que dans ce cas il est tout à fait possible que le Royaume-Uni aille rejoindre les autres pays sous-développés, comme les États-Unis qui ne sont pas en mesure de réaliser l'EIPT dans sa totalité.

A propos du point 11, Mr Rusby, se référant au rapport du GT5, dit qu'il n'est pas question de proposer en même temps le thermomètre à résistance de platine et le thermomètre à résistance de rhodium-fer pour le même domaine de température. Mr Bedford fait remarquer qu'il sera pratiquement inévitable d'avoir plusieurs définitions (si l'on adopte la méthode des moindres carrés pour l'interpolation avec les thermomètres à résistance de platine au-dessous de 0 °C) pour éviter d'avoir à étalonner tous les thermomètres jusqu'au point d'ébullition de l'hélium. Mr Schooley fait remarquer que l'on peut différer la décision relative à la limite inférieure du thermomètre à résistance de platine (point 6) jusqu'à ce que l'on ait complètement étudié l'utilité relative des autres instruments.

Mr Kemp souligne qu'il convient de faire davantage de comparaisons entre les cellules à point triple scellées (point 7) et les points triples de réalisation habituelle.

Mr Swenson fait remarquer qu'on doit étudier les différences entre les résultats des mesures de résistance en courant alternatif et en courant continu, faites avec les thermomètres à résistance ; les résultats dont on dispose couramment font apparaître, entre les deux méthodes, des différences qui varient avec la température. Mr Hudson attire l'attention sur les travaux faits au NBS sur le point triple du gallium (voir aussi point 9). A la fin de la discussion, le Président indique que toutes les propositions seront soigneusement étudiées par le GT1, et que celui-ci espère en recevoir d'autres par écrit.

c. Sanction officielle de réalisations secondaires de l'EIPT-68

Le Président demande si quelqu'un désire faire des commentaires.

Mr Bedford répète ce que Mr Crovini et lui-même ont dit précédemment (voir paragraphe 3b) : lors des deux précédentes sessions du CCT, on a discuté pour savoir si le CCT devait sanctionner officiellement des réalisations secondaires de l'EIPT. Le GT2 a été chargé d'étudier ces questions. Le Groupe de travail a formulé son avis et aimerait entendre celui du

CCT : le CCT doit-il ou non sanctionner officiellement une réalisation secondaire de l'échelle? De même, le GT2 aimerait avoir l'avis du CCT sur la nécessité d'inclure dans l'échelle la liste des points de référence secondaires et sur la façon de le faire.

Mr Schooley demande si certains points de référence secondaires peuvent être réalisés avec suffisamment d'exactitude pour pouvoir aider dans certains cas à réaliser l'EIPT alors que d'autres points de référence secondaires n'apportent rien pour cette réalisation. Mr Quinn et Mr Coates répondent que bien entendu, en principe, aucun point de référence secondaire ne peut aider à réaliser l'EIPT.

Mr Thomas n'est pas d'accord avec l'indication assez vague concernant l'exactitude des points de référence secondaires donnée dans le tableau 6 du texte de l'EIPT-68.

Au terme d'une discussion prolongée, il ne ressort aucune idée claire de ce que devrait faire le CCT.

D'un côté il y a le point de vue pratique avancé par Mr Schooley et sur lequel Mr Kemp est en partie d'accord : on ne doit pas avoir une trop grande dévotion au texte, ou à l'esthétique, d'une EIPT donnée (c'est-à-dire officielle) mais on doit encourager de meilleures mesures de température en recommandant des points de référence secondaires ou d'autres moyens pour des réalisations moins exactes de l'EIPT. L'autre point de vue, défendu par Mr Coates, est que le CCT doit prendre garde de ne pas être amené à approuver une échelle de niveau secondaire en plus de l'EIPT. En outre, il y a le point de vue avancé par Mr Quinn : lorsqu'on a besoin de mesurer des températures dans l'industrie, on ne fait appel ni aux laboratoires nationaux ni au texte de l'EIPT, mais on utilise des spécifications nationales ou internationales pour les instruments industriels de mesure de la température, telles que les tables de thermocouples et de thermomètres à résistance de platine de la Commission Électrotechnique Internationale (CEI).

Le Président suggère de scinder la question en deux points : premièrement, le CCT doit-il approuver une réalisation secondaire de l'EIPT, et deuxièmement, le CCT doit-il approuver des échelles secondaires ("approuver" signifie ici que le CCT recommande au CIPM de les approuver)? A nouveau, Mr Coates est opposé aux deux points. Mr Quinn dit qu'il faudrait éviter l'expression "échelle secondaire". A son avis, la question n'est pas de savoir si le CCT approuve, par exemple, les tables

de thermocouples de la CEI (comme échelle secondaire ou sous une autre forme) mais s'il approuve une méthode qui se fonde sur ces tables. La recommandation d'une méthode de ce genre pourrait être à peu près ceci : "L'utilisation des tables de la CEI pour les thermocouples Pt 10 % Rh/Pt et l'étalonnage des thermocouples, disons à 0 °C, aux points du zinc, de l'argent et de l'or, permettront de réaliser l'EIPT avec une incertitude de, par exemple, 0,2 K". A une question de Mr Bedford demandant si une recommandation de ce genre ferait partie du texte de l'échelle, Mr Quinn répond qu'il n'en serait rien. Questionné par Mr Schooley, Mr Quinn suggère que, de toute façon, pour commencer, il ne faut recommander qu'un seul type de thermocouples et, qu'à son avis, ce devrait être le type R (Pt 13 % Rh/Pt) plutôt que le type S (Pt 10 % Rh/Pt).

Mr Coates fait remarquer qu'il existe un accord général selon lequel le CCT devrait donner des conseils pour l'utilisation de réalisations secondaires de l'EIPT. Toutefois, il n'y a pas encore accord sur la façon dont cela doit être fait.

Mr Giacomo indique différentes façons dont le CCT peut exprimer son opinion. Dans le cas d'une EIPT, le CCT fait une recommandation au CIPM et, pour terminer, on demande l'approbation de la CGPM. Dans le cas de l'EPT-76, on demande seulement l'approbation du CIPM. Une opinion exprimée sous les auspices du CCT, par exemple au moyen d'une publication dans *Metrologia*, pourrait aider de nombreux utilisateurs. Si le CCT souhaite exprimer une très forte approbation, on peut rechercher la sanction de la CGPM. Si le CCT ne souhaite pas prendre de position officielle, il peut demander à certains de ses membres de publier une information appropriée dans *Metrologia*. Ce sont là différentes possibilités de formalisme entre lesquelles le CCT peut choisir.

Le Président est d'accord avec l'exposé de Mr Giacomo et propose que le CCT donne son opinion au sujet de deux exemples de mesure de température au niveau secondaire : les méthodes fondées sur les tables de thermocouples et les procédés simplifiés d'interpolation pour les thermomètres à résistance de platine.

Mr Schooley suggère que l'on donne dans le texte de la nouvelle EIPT des commentaires explicites qui permettront aux laboratoires de métrologie de réaliser l'échelle avec des incertitudes satisfaisantes et dans des domaines limités de température. Une telle interprétation de l'EIPT serait d'une grande aide pour le NBS et pour divers laboratoires secondaires. A une question du Président, Mr Schooley répond qu'il ne

souhaite pas exprimer une opinion sur l'opportunité de faire figurer explicitement une réalisation de niveau secondaire dans le texte de l'EIPT.

A la demande du Président, Mr Crovini dit que le GT2 aimerait avoir quelques directives de la part du CCT et savoir sur quelle réalisation de niveau secondaire il doit concentrer son effort, étant donné qu'il est impossible de développer diverses options. Mr Schooley suggère qu'un choix tout à fait convenable serait l'utilisation des thermocouples pour une réalisation secondaire de l'échelle (rapport du GT2, section 4.2.3), en particulier parce que le thermocouple sera éliminé comme instrument d'interpolation de l'EIPT, mais demeurera encore d'utilisation courante. Mr Coates dit qu'il serait également souhaitable d'avoir des méthodes secondaires d'interpolation pour étalonner les thermomètres à résistance de platine à longue tige au-dessous de 0 °C (en supposant que l'interpolation primaire se fera avec une fonction-écart par les moindres carrés jusqu'à la température de l'hélium).

7. ÉCHELLE PROVISOIRE DE TEMPÉRATURE DE 1976 ENTRE 0,5 K et 30 K (EPT-76)

Le Président rappelle que l'EPT-76 a été proposée lors de la précédente session du CCT afin d'éviter la prolifération des échelles de laboratoires au-dessous de 30 K. Dans ses grandes lignes, cette échelle a été approuvée en 1976 par le CIPM qui a donné au CCT l'autorisation de la mettre en application. Alors que l'on pensait qu'elle serait prête en 1976, elle n'a été achevée que la semaine précédant la présente session, lors d'une réunion du GT4 à Leiden. Si l'EPT-76 est acceptée maintenant par le CCT, elle deviendra une échelle recommandée officiellement sous les auspices du CIPM. Revenant sur une proposition antérieure du GT4 (voir point 2c), le Président demande à Mr Swenson d'ouvrir la discussion.

Mr Swenson dit que l'EPT-76 est fondée essentiellement sur le thermomètre magnétique. Quatre échelles magnétiques ont été comparées au NML et, bien qu'elles fussent fondées sur des expériences très différentes utilisant des sels magnétiques différents, elles étaient cohérentes entre elles et avec l'échelle du thermomètre à gaz NPL-75. En conséquence, l'EPT-76 est fondée sur l'une des échelles magnétiques.

A 27,1 K, l'EPT-76 diffère de 4 mK de l'échelle NPL-75,

à cause de la condition de continuité avec l'EIPT-68 à cette température. Une EIPT future suivra peut-être l'échelle NPL-75.

L'extension de l'EPT-76 au-dessous de 1 K est fondée sur une échelle magnétique du NPL utilisant le nitrate de magnésium et de cérium. Au NBS, on a vérifié cette échelle, à 1 mK près, au point de transition supraconducteur du cadmium (0,5 K environ), au moyen du thermomètre absolu à bruit.

Au contraire de l'EIPT-68, on peut réaliser l'EPT-76 de différentes façons. On peut utiliser le thermomètre magnétique ou le thermomètre à gaz pour interpoler entre diverses combinaisons des onze points de référence de définition (Tableau I, Document CCT/78-40). On peut aussi utiliser l'une des diverses échelles aux basses températures en liaison avec les différences entre elles et l'EPT-76 (Tableaux 2 à 5, même document). Toutes ces réalisations doivent être cohérentes à 1 mK près environ.

La température du point d'ébullition de ^4He et les différences $T_{58} - T_{76}$ du Tableau 3 sont, à quelques millikelvins près, cohérentes avec les résultats du thermomètre absolu à bruit de l'Université de Münster.

En ce qui concerne le document qui doit être préparé sur le contexte, l'obtention et l'emploi de l'échelle (*voir* section 2c), Mr Swenson indique qu'il contiendra la référence aux publications originales sur le thermomètre magnétique, le thermomètre à gaz (à paraître) et le thermomètre à bruit (à paraître). Il ne comportera pas de renseignements spécifiques sur l'utilisation du thermomètre magnétique et du thermomètre à gaz comme instruments d'interpolation.

Avant de passer à l'approbation de l'EPT-76 par le CCT, le Président demande s'il y a des commentaires.

Au sujet du tableau 3, Mr Rusby fait remarquer que des résultats récents ont confirmé les renseignements antérieurs, à savoir qu'au-dessus de 5 K, $T_{58} - T_{76}$ dépend assez fortement de la température : à 5,15 K et 5,2 K, ces différences sont respectivement de - 6,3 mK et - 5,0 mK.

Mr Schooley fait des commentaires sur les températures des points de référence supraconducteurs du tableau I, qui sont fondées sur le "NBS Standard Reference Material 767". Bien qu'on ait l'impression que pour ces supraconducteurs les températures de transition ne dépendent pas beaucoup du degré de pureté, il est important de comparer les résultats avec ceux obtenus pour d'autres échantillons. Mr Swenson est

d'accord ; pour le moment, les seuls renseignements disponibles viennent de l'IMPR, et laissent à penser qu'il existe d'assez gros écarts entre les températures de transition des échantillons d'indium et d'aluminium de l'IMPR et celles obtenues avec les matériaux du NBS. Mr Swenson ajoute que, de la même façon, il convient d'étudier plus étroitement les pressions de vapeur de ^3He au-dessous de 1 K.

Mr Thomas demande si l'on donnera des renseignements spécifiques sur l'utilisation du thermomètre à gaz comme instrument d'interpolation, en particulier parce que la seule référence donnée dans le projet qui a été distribué concerne le thermomètre absolu à gaz de Berry. Mr Swenson répond que l'on ne donnera aucune recommandation spécifique sur la construction du thermomètre à gaz ni sur la valeur des coefficients du viriel, les pressions de remplissage, etc., mais on fera seulement référence à la proposition de Barber (interpolation entre deux points). A une autre question de Mr Thomas concernant l'importance du thermomètre à gaz comme instrument d'interpolation, Mr Swenson répond que le thermomètre magnétique et le thermomètre à gaz sont mentionnés comme exemples d'instruments thermodynamiques d'interpolation. S'il devait lui-même choisir entre les deux, il choisirait probablement le thermomètre à gaz.

Mr Crovini demande si l'on peut utiliser le thermomètre à résistance de germanium ou de rhodium-fer comme instruments d'interpolation ; Mr Swenson répond que, comme il n'y a qu'un seul point de référence entre 4 K et 14 K, il faut un thermomètre thermodynamique d'interpolation. L'étalonnage de thermomètres à résistance nécessiterait au moins deux points de référence de plus.

Mr Ling Shan-Kang, par l'intermédiaire de Mr Yu Ta Tung, et Mr Schooley demandent pourquoi la température du point du plomb dans le tableau I n'est donnée qu'avec une seule décimale alors que celle des autres points de transition supraconducteurs l'est avec trois ou quatre décimales ; ces questions conduisent à une longue discussion sur la reproductibilité de ces points. (La réponse officielle à cette question est qu'il s'agit de nombres exactement définis). Mr Schooley pense que la non-reproductibilité d'un dispositif ou de plusieurs dispositifs est telle qu'il n'est pas réaliste de donner les températures à 0,1 mK près. Mr Swenson répond qu'un document conjoint exposant l'expérience obtenue avec les dispositifs du NBS dans quatre ou cinq laboratoires au cours des récentes années sera publié.

Après une remarque de Mr Quinn selon laquelle on ne doit pas donner l'impression que l'exactitude thermodynamique d'une température donnée est de l'ordre de 0,1 mK, on décide d'ajouter à la dernière phrase du Document CCT/78-40, l'indication explicite suivante : "l'exactitude thermodynamique estimée est donnée dans la référence 9". Pour finir, on décide de laisser inchangé le nombre de décimales données dans le tableau I sauf pour le point du plomb, qui sera 7,1999 K (c'était la moyenne exacte entre les déterminations faites dans les divers laboratoires, mais par commodité elle avait été arrondie à 7,2 K).

Sous la forme du document 40 légèrement modifié, l'EPT-76 est approuvée par le CCT*. Après cette approbation, le Président propose que le CCT autorise le GT4 à publier l'article sur le contexte de l'EPT-76 (voir point 2c), tel que l'a décrit Mr Swenson, avec l'imprimatur du CCT ; ce document et l'échelle elle-même seront donc publiés ensemble. Le CCT approuve la proposition du Président.

8. PROGRAMMES FUTURS ET COMPOSITION DES GROUPES DE TRAVAIL

Avant d'ouvrir la discussion, le Président souligne que c'est grâce aux Groupes de travail que des progrès si importants ont été faits par le CCT. Il renvoie aux Procès-Verbaux de la 11^e session du CCT (p. T 30 et T 31) pour les attributions des cinq groupes de travail existants.

a. Programmes futurs

Groupe de travail 1 : Le Président fait remarquer que la préparation du texte de la nouvelle EIPT constituera encore la tâche essentielle du GT1. Toutefois, il y a aussi l'importante question d'un document sur les renseignements complémentaires de l'EIPT. Lors de la précédente session du CCT, le GT1 a été chargé de préparer un tel document. Il est évident que celui-ci ne peut être prêt à temps pour se rapporter à l'EIPT-68 ; il doit donc concerner l'EIPT-87. Le CCT est d'accord sur la proposition du Président selon laquelle il appartient au GT1 de préparer ce document.

* Compte tenu de la discussion qui a précédé sur les différences des températures des points de transition supraconducteurs entre les différents échantillons d'un même matériau, on indique aussi de façon explicite dans le tableau I que les températures de définition s'entendent pour le "NBS Standard Reference Material 767".

Groupe de travail 2 : Mr Crovini pense que le GT2 doit poursuivre les travaux sur les points de référence secondaires. Des discussions qui ont eu lieu, il ressort aussi que le GT2 doit poursuivre ses travaux sur les réalisations secondaires de l'EIPT. Le Comité est d'accord pour ne rien changer aux attributions du GT2. A la suite de suggestions de MM. Kemp et Quinn, le Comité demande au GT2 de préparer des suggestions explicites sur des réalisations secondaires de l'EIPT, en particulier sur une réalisation au-dessus de 0 °C fondée sur les thermocouples.

Groupe de travail 3 : Mr Quinn fait remarquer qu'il est évident que les résultats concernant les mesures thermodynamiques de température au-dessus de 100 K seront obtenus très lentement ; il propose que le GT3 soit essentiellement chargé de l'introduction dans l'EIPT des thermomètres à résistance de platine aux températures élevées. Il mentionne le programme pilote de comparaisons de thermomètres de ce type déjà proposé par le GT3. On discute pour savoir si cette activité rentre effectivement dans les attributions du GT3, car le GT2 a eu également une action dans ce domaine. Le Comité est d'accord pour dire qu'il n'y a pas à changer les attributions du GT3 qui doit poursuivre ses travaux dans l'important domaine des thermomètres à résistance de platine aux températures élevées et que le GT3 et le GT2 discuteront de leurs activités communes dans ce domaine.

Groupes de travail 4 et 5 : Les attributions de ces Groupes de travail demeurent inchangées.

b. *Composition*

Le Président fait remarquer que, à l'exception de quelques membres à titre personnel, tous les membres du CCT sont des laboratoires. Ce n'est pas le cas pour les groupes de travail, où les membres sont nominativement désignés. C'est l'habitude de choisir les membres des groupes de travail en grande partie dans le CCT, mais en fait la seule condition est que ce soient des experts.

Groupe de travail 1

Le Président est d'accord pour continuer à assumer la présidence du Groupe de travail. Il fait remarquer que, malgré tous les efforts qui ont été faits, il n'a pas été possible d'obtenir une participation effective de Mr Oleinik, si bien

qu'il paraît nécessaire d'envisager son remplacement. On ne sait pas du tout si Mr Plumb consent à continuer d'être membre. Mr Schooley discutera de cette question avec Mr Plumb et tiendra le Président du GT1 au courant.

Le Président souligne que le GT1 aura une double tâche : préparer le texte de l'EIPT et jouer le rôle de comité de rédaction pour le document sur les renseignements complémentaires. Mr Hudson propose que Mr Schooley fasse partie de ce groupe de travail, eu égard en particulier au travail à faire sur le document relatif aux renseignements complémentaires. Le Président accepte cette proposition. Mr W.R.G. Kemp propose que Mr R.C. Kemp du NML fasse partie du groupe. Mr Coates, expert dans le domaine des températures élevées, accepte aussi de faire partie du groupe. Après plus ample discussion, il est décidé que le GT1 et le groupe de rédaction associé seront formés des personnalités suivantes : Mr Coates, Mr R.C. Kemp (lorsqu'il aura donné son accord) et Mr Schooley (et si possible Mr Plumb).

Groupe de travail 2

Mr Crovini informe le Comité de son désir d'abandonner la présidence et propose que Mr Bedford le remplace. Cela est accepté. Le Président du Comité est heureux que Mr Crovini veuille bien rester membre du GT2. Mr Maas restera aussi membre et Mr Skakala fera savoir au Président s'il fera partie du GT2 ou si le nom de quelqu'un d'autre de son institut sera avancé.

Groupes de travail 3, 4 et 5

Il est convenu qu'aucun changement n'interviendra dans la présidence et la composition de ces groupes de travail.

A la fin de la discussion, le Président saisit l'occasion de féliciter le GT4 pour avoir donné l'EPT-76. L'ensemble du Comité se joint au Président pour louer cet important travail.

9. DISCUSSION DES DOCUMENTS PRÉSENTÉS A LA 12^e SESSION DU CCT

Avant d'appeler les commentaires concernant chaque document, le Président résume les critères de choix des documents destinés à être publiés dans les Procès-Verbaux du CCT : les documents seront publiés s'ils sont parvenus au BIPM au moins deux mois avant la réunion (s'ils excèdent la longueur maxi-

male prescrite de deux pages, on publiera une forme abrégée (voir *Comité Consultatif de Thermométrie*, 10^e session, 1974, p. T 20)). Les documents qui seront publiés ailleurs ou qui donnent des informations d'intérêt momentané seront publiés sous forme de résumé seulement. Pour les autres, seul leur titre figurera dans la liste des documents. On peut faire des exceptions à ces règles, en particulier pour les documents soumis par un Groupe de travail (par exemple, le Document CCT/78-40). Des versions abrégées des rapports des groupes de travail seront publiées.

Ensuite Mr Bedford attire l'attention sur le Document CCT/78-4 qui contient des renseignements nouveaux sur l'importance de l'oxydation du platine dans les thermomètres à résistance de platine. Mr Kemp appelle les commentaires des membres sur l'Annexe du Document CCT/78-12). Parlant du Document CCT/78-8, Mr Crovini dit qu'il y a une discontinuité dans l'EIPT-68 à 90,188 K si l'on utilise le point triple de l'argon. Le Président fait remarquer que cette discontinuité peut être due en partie à l'erreur sur la température du point triple de l'oxygène (voir l'annexe du Document CCT/78-12).

Mr Hudson attire l'attention sur le Document CCT/78-13 dans lequel on suggère que le point triple du gallium remplace celui de l'eau dans l'EIPT et pour la définition du kelvin. Il invite les autres laboratoires à étudier les mérites relatifs de ces deux points triples. Au cours d'une discussion assez complète sur cette question, MM. Bedford, Mitsui, Crovini et Bonheure donnent des indications sur les recherches faites dans leur laboratoire sur le point triple de l'eau. Mr Schooley signale que la diffusivité thermique plus grande du gallium entraîne des perturbations thermiques plus faibles et conduit, pour atteindre l'équilibre, à des temps plus courts que dans le cas de l'eau. Le Président exprime l'espoir qu'à la prochaine session on ait davantage de renseignements sur les mérites de ces deux points triples.

En réponse à une question de Mr Schooley, Mr Mitsui dit que les indications données dans les documents CCT/78-18 et 20 se rapportent à des thermomètres à résistance de platine pour températures élevées fabriqués il y a dix ans ; on disposera dans deux ou trois ans de renseignements sur les nouveaux thermomètres du NRLM.

Mr Schooley attire l'attention (Document CCT/78-17) sur un dispositif supraconducteur pour les températures de référence au-dessous de 0,5 K, compte tenu en particulier de la

proposition faite plus haut d'étendre l'EIPT jusqu'à 0,01 K.

Mr Rusby fait remarquer que, entre 4 K et 20 K, le thermomètre acoustique du NPL concorde à 1 mK près avec l'échelle NPL-75 lorsque l'on utilise la valeur la plus probable de la constante des gaz (Document CCT/78-39).

Enfin, le Président suggère que le Secrétaire et lui-même choisissent les documents qui seront publiés (si nécessaire, sous forme abrégée), ceux dont on publiera seulement un résumé et ceux dont on ne donnera que le titre dans la liste des documents (Annexe T 1). Cela est accepté.

10. QUESTIONS DIVERSES

a. *Travaux thermométriques futurs du BIPM*

Mr Terrien fait remarquer qu'on espère dans un proche avenir étendre certaines des activités du BIPM en thermométrie, et pour ce faire le BIPM a besoin des conseils des laboratoires nationaux. Le Président se reporte au Document CCT/78-46 dans lequel est faite une proposition pour les travaux futurs et sollicite les commentaires du Comité. Mr Coates fait remarquer qu'étant donnée la pression croissante exercée sur les laboratoires nationaux pour qu'ils entreprennent des travaux intéressant l'industrie, le BIPM pourrait entreprendre quelques recherches à caractère fondamental, par exemple dans le domaine de la thermométrie aux basses températures. Mr Giacomo pense que le BIPM a besoin d'avoir de très bonnes mesures de la température au voisinage de la température ambiante pour effectuer ses autres travaux ; il a l'impression que si une recherche fondamentale doit être faite, la priorité doit être d'abord donnée à ce domaine. Mr Quinn pense que des travaux de recherche fondamentale en liaison avec le prochain changement de l'EIPT seraient les bienvenus, par exemple sur les thermomètres à résistance de platine aux températures élevées.

Mr Schooley suggère que le BIPM s'engage dans l'étude des thermomètres à résistance de platine dans lesquels le support de la résistance est en silice fondue au lieu d'être en mica. Mr Evans du NBS serait en mesure de fournir des thermomètres de ce type, ayant une résistance de 25 ohms à 0 °C. Cela pourrait conduire à la mise au point d'un thermomètre à résistance de platine qui pourrait recouvrir le domaine compris entre 90 K et 1064 °C.

Mr Coates trouve le dernier point du document CCT/78-46

particulièrement intéressant parce qu'il concerne un domaine de température (419 °C à 630 °C) pour lequel nulle part ailleurs on n'utilise la pyrométrie optique.

Mr Quinn demande si l'on doit étendre les travaux sur les cellules scellées (point 3, document CCT/78-46). A ce sujet, Mr Schooley signale que le NBS apprécierait toute collaboration sur les cellules à point triple du gallium et serait heureux de fournir une telle cellule si le BIPM le juge utile.

Enfin, Mr Quinn fait remarquer que si un instrument quelconque nouveau, ayant une application très spécifique en thermométrie, est mis au point, il serait très intéressant que le BIPM en ait connaissance et ait la possibilité de l'étudier.

b. *Rapport et Recommandation au CIPM*

Le rapport au CIPM comportera un rapport abrégé de la session, une notification de l'approbation de l'EPT-76 par le CCT, une copie du texte de l'EPT-76 et une Recommandation en plusieurs points pour les travaux futurs. Des copies du compte rendu des séances seront également mises à la disposition des membres du CIPM.

Après discussion, le Comité se met d'accord sur le texte de la Recommandation et de son préambule.

c. *Prochaine session du CCT*

Il est décidé que la prochaine session se tiendra en 1980, vraisemblablement en mai.

*
* *

Le Président remercie Mr Giacomo et ses collaborateurs pour l'excellente organisation de cette session. Mr Terrien remercie le Président et tous les participants pour leur coopération agréable et compétente.

Reçu le 7 août 1978,
Version révisée reçue le 16 octobre 1978.

ANNEXE T 1

Documents de travail présentés à la 12^e session du CCT

Ces documents de travail, qu'ils soient ou non publiés dans ce volume, peuvent être obtenus dans leur langue originale sur demande adressée au BIPM.

Document

CCT/

- 78-1 Report 4 of Working Group 2 to the CCT (voir Annexe T 3).
- 78-2 4th Report of Working Group 3 to the CCT (voir Annexe T 4).
- 78-3 NML (Australie).- Reference Temperatures near 800 °C, by J.V. McAllan (voir Annexe T 25).
- 78-4 NRC (Canada).- Effect of platinum oxidation on the IPTS-68, by R.J. Berry (voir Annexe T 24).
- 78-5 NRC (Canada).- Some properties of CO₂, by J. Ancsin (voir Annexe T 18).

Document

CCT/

- 78-6 IMGC (Italie).- Summary of results of thermodynamic temperature measurements and high temperature platinum resistance thermometry at IMGC, by A. Actis, L. Crovini and P. Marcarino (voir Annexe T 27).
- 78-7 IMGC (Italie).- On the annealing of high temperature platinum resistance thermometers, by L. Crovini (voir Annexe T 28).
- 78-8 IMGC (Italie).- On the use of argon triple point according the text of the IPTS-68 (1975), by F. Pavese (voir Annexe T 15).
- 78-9 IMGC (Italie).- On the possibility of defining secondary level scales without the use of boiling points, by F. Pavese and G. Demonti (voir Annexe T 19).
- 78-10 IMGC (Italie).- On the structure of a new International Practical Temperature Scale below 0 °C, by F. Pavese (voir Annexe T 21).
- 78-11 IMGC (Italie).- On the IPTS-68 temperature value of the triple point of methane, by F. Pavese
Publié dans *Metrologia*, 15, 1979, p. 47.
- 78-12 Report 4 of Working Group 1 to the CCT (voir Annexe T 2).
- 78-12 (Annexe) NML (Australie).- A proposal for a Practical Temperature Scale between 1 K and 273 K, by R.C. Kemp, L.M. Besley and W.R.G. Kemp (voir le résumé à l'Annexe T 2bis).
Texte complet publié dans *Metrologia*, 14, 1978, p. 137.
- 78-13 NBS (États-Unis d'Amérique).- Proposed role for the triple point temperature of gallium in the definition of the International Practical Temperature Scale, by B.W. Mangum and D.D. Thornton (voir Annexe T 22).

Document

CCT/

- 78-14 NBS (États-Unis d'Amérique).- Realization of triple point of argon in a transportable sample cell, by G.T. Furukawa (voir Annexe T 13).
- 78-15 NBS (États-Unis d'Amérique).- Superconductive fixed points for temperatures above 0.5 K, by J.F. Schooley (voir Annexe T 8).
- 78-16 NBS (États-Unis d'Amérique).- Comparison of freezing temperatures of the National Bureau of Standards SRM-740 zinc standards, by G.T. Furukawa and J.L. Riddle (voir Annexe T 23).
- 78-17 NBS (États-Unis d'Amérique).- A superconductive device to provide reference temperatures for use below 0.5 K, by R.J. Soulen Jr. (voir Annexe T 7).
- 78-18 NRLM (Japon).- Precise measurement of the freezing point of gold with a platinum resistance thermometer, by N. Takiya.
Publié dans *Bulletin of NRLM*, No. 33, 1976, p. 23.
- 78-19 NRLM (Japon).- Equilibration of ortho-para hydrogen using chromium potassium sulfate for use in vapour pressure thermometry, by H. Sakurai.
Publié dans *Jap. J. Appl. Phys.*, 17, No. 6, 1978.
- 78-20 NRLM (Japon).- Precise measurement of the freezing point of silver with a platinum resistance thermometer, by N. Takiya (voir Annexe T 30).
- 78-21 ASMW (Rép. Dém. Allemande).- Determination of freezing temperature of copper of different graded purity, by E. Geyer, M. Bannert and U. Uhlemann (voir Annexe T 31).
- 78-22 ASMW (Rép. Dém. Allemande).- Repeatability of measurements with germanium thermometers at normal boiling point of ^4He (4.2 K), by L. Sur (voir Annexe T 9).

Document

CCT/

- 78-23 NRLM (Japon).- Realization of the triple point of argon using sealed portable cell, by A. Inaba and K. Mitsui (voir Annexe T 14).
- 78-24 NRLM (Japon).- Effects of impurity and annealing on the triple point of methane, by A. Inaba and K. Mitsui.
Publié dans *Jap. J. Appl. Phys.*, 17, No. 8, 1978.
- 78-25 NRLM (Japon).- Calibration of an NQR-thermometer using $KClO_3$ against IPTS-68 from 200 K to 400 K, by H. Sakurai, A. Inaba and K. Mitsui.
A paraître dans *Metrologia*.
- 78-26 NRLM (Japon).- Realization of the triple points of krypton and xenon using sealed transportable cell, by A. Inaba and K. Mitsui (voir Annexe T 17).
- 78-27 PTB (Rép. Féd. d'Allemagne).- Calibration of platinum resistance thermometers in an evaporation cryostat in the temperature range from 13.81 K to 273.15 K, by W. Blanke and W. Thomas (voir Annexe T 20).
- 78-28 NRLM (Japon).- A sealed portable cell made of copper for realizing triple points of condensed gases, by K. Mitsui and A. Inaba (voir Annexe T 12).
- 78-29 NRLM (Japon).- A formulation of the W-t relation of platinum resistance thermometers from 0 °C to 1064,43 °C, by K. Mitsui (voir Annexe T 29).
- 78-30 NML (Australie).- Secondary and other reference points, by R.C. Kemp and W.R.G. Kemp (voir Annexe T 16).
- 78-31 NML (Australie).- The suitability of tungsten strip lamps as secondary standards sources below 1064 °C, by T.P. Jones and J. Tapping (voir Annexe T 32).

Document

CCT/

- 78-32 NML (Australie).- The stability of germanium resistance thermometers at 20 K, by L.M. Besley and H.H. Plumb.
Publié dans *Rev. Sci. Instr.*, 49, 1978, p. 68.
- 78-33 NML (Australie).- Further stability studies on germanium resistance thermometers at 20 K, by L.M. Besley.
Publié dans *Rev. Sci. Instr.*, 49, 1978, p. 1041.
- 78-34 NML (Australie).- A simple method of calibrating some PRTs in terms of IPTS-68 to an uncertainty of 20 mK, by L.M. Besley and R.C. Kemp.
Publié dans *Cryogenics*, 8, 1978, p. 497.
- 78-35 NPL (Royaume-Uni).- New values for reference points below 10 K, by R.L. Rusby.
- 78-36 NPL (Royaume-Uni).- Interpolation to replace IPTS-68 deviation functions, by S.D. Ward.
- 78-37 INM (France).- Reproductibilité d'un dispositif à cellule scellée. Comparaison de mesures effectuées en 1976 et 1978, par G. Bonnier et Y. Hermier.
- 78-38 Report No. 2 of Working Group 5 to the CCT (voir Annexe T 6).
- 78-39 NPL (Royaume-Uni).- Low frequency acoustic thermometry in the range 4.2 - 20 K, by A.R. Colclough.
- 78-40 Working Group 4 : The 1976 Provisional 0.5 K to 30 K Temperature Scale (voir Annexe T 5 et p. T 7).
- 78-41 NML (Australie).- Present programme in temperature measurement, by W.R.G. Kemp.
- 78-42 NRLM (Japon).- Note on the catalytic phenomenon of the triple point of methane, by A. Inaba and K. Mitsui.

Document

CCT/

- 78-43 IMT (Tchécoslovaquie).- Experiences referring to the calibration of the high temperature resistance thermometers, by M. Borovička and L. Hudoba (voir Annexe T 26).
- 78-44 IMPR (U.R.S.S.)- A high stable carbon resistance thermometer, by S.F. Vorfolomeew, G.A. Kytin, O.F. Pogorelova and D.N. Astrov (voir Annexe T 10).
- 78-45 IMPR (U.R.S.S.)- On the sorption correction for the precise gas thermometer, by A.P. Gershanik, M.L. Glikman and D.N. Astrov (voir Annexe T 11).
- 78-46 Travaux futurs du BIPM.
- 78-47 NRLM (Japon).- Platinum-cobalt resistance thermometer for low temperature use, by T. Shiratori and K. Mitsui.
Ce document est une version amendée du document CCT/76-44.
-

ANNEXE T 2

4^e Rapport du Groupe de travail 1*

(Révision de l'EIPT)

(Traduction du Document CCT/78-12)

Pour le Groupe de travail 1 la tâche essentielle est de préparer une échelle pour remplacer l'EIPT-68. A la suite des discussions de la 11^e session du CCT en juin 1976, le Groupe de travail 1 a été chargé de trois tâches dont il devait rendre compte dans son rapport de janvier 1978.

- 1) projet d'une révision de l'EIPT-68 ;
- 2) projet de monographie sur les renseignements complémentaires relatifs à la réalisation de l'EIPT-68 ;
- 3) projet de rédaction concernant les mesures de température à un niveau secondaire (en collaboration avec le Groupe de travail 2).

1) *Projet de révision de l'EIPT-68*

Plusieurs suggestions et idées se sont fait jour concernant l'importance de la révision selon les différents domaines de température. Il est évident qu'il faut étendre l'échelle révisée vers des températures plus basses que celles de l'EIPT-68, probablement jusqu'à 1 K ou 0,5 K ; il est évident

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

Ce rapport a été communiqué aux membres du CCT en mars 1978 et discuté à la 12^e session du CCT en mai 1978.

aussi que l'EIPT-68 s'écarte beaucoup trop des températures thermodynamiques dans plusieurs régions. On peut également dire qu'au-dessous de 0 °C la définition de l'EIPT-68 est trop compliquée, et qu'entre 630 °C et 1064 °C il faut abandonner le thermocouple Pt 10Rh/Pt comme instrument étalon d'interpolation.

Les publications et discussions suivantes se rapportent directement à ces points généraux :

a) L'Échelle Provisoire de Température de 1976, de 0,5 K à 30 K [1], constitue la base de la partie basse température de l'échelle. Son intégration dans une EIPT révisée nécessitera un certain travail supplémentaire.

b) Kemp *et al.* [2] ont fait une suggestion en ce qui concerne le point a) ("Proposition pour une Echelle Pratique de Température entre 1 K et 273 K"). Ils prétendent que cette échelle est plus simple que l'EIPT-68. Les auteurs soulignent aussi la nécessité de nouvelles mesures des températures thermodynamiques au voisinage de 54 K.

Nous notons que l'accord entre les valeurs numériques des températures et les températures thermodynamiques au-dessous d'environ 30 K dans les deux échelles dont il est question en a) et b) dépend de la valeur choisie pour la constante des gaz. Il paraît donc important de mesurer à nouveau R pour vérifier une mesure récente [3] qui diffère significativement de la valeur admise précédemment [4].

c) D'autres suggestions pour des améliorations de l'EIPT au-dessous de 0 °C ont été faites par Kirby *et al.* [5], Ward et Compton [6] et Pavese *et al.* [7]. Elles consistent surtout en améliorations des méthodes d'interpolation et en un meilleur choix des points fixes de définition.

d) Au-dessus de 0 °C, de nombreuses études [8 à 13] ont révélé des écarts entre T_{68} et les températures thermodynamiques, en particulier dans le domaine de 630 °C à 1064 °C. Une comparaison de l'EIPT-68 et des températures thermodynamiques de 630 °C à 1064 °C, sous les auspices du Groupe de travail 3, vient de commencer au NBS, au NPL et à la PTB [34].

e) Evans et Wood [14], Marcarino et Crovini [15] et Quinn *et al.* [9] ont montré qu'un thermomètre à résis-

tance de platine avec une méthode d'interpolation appropriée donnerait des résultats concordant très étroitement avec les températures thermodynamiques, ce que ne donne pas le thermocouple Pt 10Rh/Pt. Les deux premières publications ci-dessus suggèrent des équations d'interpolation spécifiques pour le thermomètre à résistance de platine utilisé comme instrument étalon de 630 °C à 1064 °C. Toutefois, toute modification de ces températures de jonction entraînerait des changements dans ces équations. Il semble que l'on ne dispose d'aucun résultat concernant la limite supérieure du thermomètre à résistance de platine ; toutefois, nous croyons savoir qu'on envisage de faire au NBS une étude complète sur ce sujet. On peut éventuellement faire une interpolation à partir de 0 °C jusqu'à la jonction avec le pyromètre optique au moyen d'une équation convenable ou bien au moyen d'une table de référence comme celle qui existe maintenant au-dessous de 0 °C.

2) *Renseignements complémentaires pour la réalisation de l'EIPT-68*

Dans la version amendée de 1975, on a supprimé une quantité importante de renseignements de ce genre parce que l'on a eu l'impression que ces renseignements seraient mieux dans une publication séparée. De cette façon, ces renseignements ne feraient pas vraiment partie intégrante de la définition de l'échelle et il serait plus facile de les mettre à jour. Une grande quantité de renseignements complémentaires existe déjà, dispersés dans un grand nombre de publications. Toutefois, peu sont sous une forme facile à utiliser. A notre avis, il ne rentre pas dans les attributions du Groupe de travail 1 de faire une rédaction effective de ces renseignements complémentaires ; il faut pour cela la contribution d'un certain nombre de personnes, chacune experte dans différents domaines de l'échelle. On peut considérer qu'il appartient effectivement au Groupe de travail 1 de collationner ces contributions. Les références [16 à 27] constituent un exemple de documents traitant de ce problème. Les membres du CCT peuvent certainement suggérer d'autres publications que l'on pourrait ajouter à cette liste.

3) *Mesures de température de niveau secondaire*

Ce point devrait être étudié en coopération avec le Groupe de travail 2. Le rapport du Groupe de travail 2 qui sera pré-

senté à la session du CCT de 1978 présente une discussion détaillée des points de référence secondaires et des réalisations secondaires de l'EIPT-68. On peut se reporter aux références 19, 26 et 28 à 33 comprise pour l'état des discussions sur les mesures au niveau secondaire en général.

Reçu le 6 mars 1978.

BIBLIOGRAPHIE*

1. W.G. 4 of CCT, "The 1976 Provisional 0.5 K to 30 K Temperature Scale", preliminary manuscript (1978).
2. KEMP (R.C.), BESLEY (L.M.), KEMP (W.R.G.), Ce volume, Annexe T 2bis (résumé) ; *Metrologia*, 14, 1978, p. 137.
3. QUINN (T.J.), COLCLOUGH (A.R.), CHANDLER (T.R.D.), *Phil. Trans. Roy. Soc. (London)*, A 283, 1976, p. 367.
4. COHEN (E.R.), TAYLOR (B.N.), *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 2, 1973, p. 663.
5. KIRBY (C.G.), BEDFORD (R.E.), KATHNELSON (J.), *Metrologia*, 11, 1975, p. 117.
6. WARD (S.D.), COMPTON (J.P.), manuscrit non publié, sur la comparaison des thermomètres à résistance de platine organisée par le CCT (1977).
7. PAVESE (F.), DEMONTI (G.), FERRI (C.), Cryogenic Engineering Conference, Paper KC-3, Boulder, Colorado, 1977.
8. GUILDNER (L.A.), EDSINGER (R.E.), *J. Res. NBS*, 80A, 1976, p. 703.
9. QUINN (T.J.), CHANDLER (T.R.D.), CHATTLE (M.V.), *Metrologia*, 9, 1973, p. 44.
10. CROVINI (L.), ACTIS (A.), *Metrologia*, 14, 1978, p. 69.
11. BONHORE (J.), *Metrologia*, 11, 1975, p. 141.
12. JUNG (H.J.), *Temperature Measurement 1975*, p. 278.
13. COSLOVI (L.), ROSSO (A.), RUFFINO (G.), *Metrologia*, 11, 1975, p. 85.
14. EVANS (J.P.), WOOD (S.D.), *Metrologia*, 7, 1971, p. 108.
15. MARCARINO (P.), CROVINI (L.), *Temperature Measurement 1975*, p. 107.
16. voir "Renseignements Complémentaires" dans "Echelle Internationale Pratique de Température de 1968", Comptes Rendus de la Treizième Conférence Générale des Poids et Mesures, 1967-68, p. A1.
17. CROVINI (L.), BEDFORD (R.E.), MOSER (A.), *Metrologia*, 13, 1977, p. 197 ; voir la bibliographie pour un grand nombre de réalisations de points fixes.
18. McLAREN (E.H.), *Temperature*, 3, I, 1962, p. 185.

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

19. RIDDLE (J.L.), FURUKAWA (G.T.), PLUMB (H.H.), *NBS Monograph 126*, 1973.
 20. McLAREN (E.H.), MURDOCK (E.G.), *Comité Consultatif de Thermométrie*, 7^e session, 1964, p. T 49.
 21. BERRY (R.J.), *Temperature*, 3, I, 1962, p. 301.
 22. BERRY (R.J.), *Metrologia*, 2, 1966, p. 80.
 23. BERRY (R.J.), *Metrologia*, 10, 1974, p. 145.
 24. ROESER (W.F.), LONBERGER (S.T.), *NBS Circular 590*, 1958.
 25. McLAREN (E.H.), MURDOCK (E.G.), *Temperature*, 4, III, 1972, p. 1543.
 26. KOSTKOWSKI (H.J.), LEE (R.D.), *NBS Monograph 41*, 1962.
 27. Recommended Practices in Optical Pyrometry, Monographie en préparation par ASTM, Subcommittee E20.02.
 28. BEDFORD (R.E.), DAUPHINEE (T.M.), PRESTON-THOMAS (H.), *Temperature Measurement*, Ch. 1, dans "Tools and Techniques in Physical Metallurgy" (F. Weinberg, ed.) (Dekker, 1970).
 29. McELROY (D.L.) and FULKERSON (W.), "Temperature Measurement and Control", *Techniques of Metals Research* (R.F. Burnshah, Ed.), (Interscience, 1968), 1, Part 1, Ch. 2.
 30. WISE (J.A.), *NBS Monograph 150*, 1976.
 31. "Manual on the Use of Thermocouples in Temperature Measurement" *ASTM Special Technical Publication 470A*, 1974.
 32. BARBER (C.R.), "The Calibration of Thermometers", *NPL Publication*, 1971.
 33. ANDERSON (R.L.), KOLLIE (T.G.), *CRC Critical Reviews in Analytical Chemistry*, 6, 1976, p. 171.
 34. 4^e Rapport du Groupe de travail 3, Ce volume, Annexe T 4.
-

ANNEXE T 2 bis

Proposition pour une échelle pratique de température entre 1 K et 273 K*

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

National Measurement Laboratory (Australie)

(Traduction du Document CCT/78-12 (Annexe))

Résumé

On montre que la combinaison des deux échelles pratiques de température, l'EPT-76 et l'EIPT-68, dans le domaine de 1 K à 83 K donne une échelle qui est irrégulière par rapport aux données thermodynamiques les plus récentes. On suggère une autre échelle pratique, $T_{77,NML}$, qui couvre le domaine de 1 K à 273,16 K et se fonde sur les meilleures données thermodynamiques dont on dispose au-dessous de 83 K et sur l'EIPT-68 actuelle au-dessus de 83 K. L'échelle $T_{77,NML}$ permet d'étalonner les thermomètres à résistance, dans ce domaine, de façon plus exacte et plus lisse par rapport à la température thermodynamique ; elle est d'autre part d'une utilisation plus facile que les échelles pratiques de température actuelles. Certaines incompatibilités entre $T_{77,NML}$ et l'EIPT-68 laissent à penser qu'il conviendrait de faire une nouvelle détermination de la température thermodynamique du point triple de l'oxygène.

Reçu le 13 mars 1978.

* Publiée dans *Metrologia*, 14, 1978, p. 137.

ANNEXE T 3

4^e Rapport du Groupe de travail 2*

(Points fixes secondaires et échelles secondaires)
(Traduction du Document CCT/78-1)

1. RÔLE D'UNE LISTE DE POINTS DE RÉFÉRENCE SECONDAIRES DANS LE TEXTE DE L'EIPT

Les textes des différentes EIPT ont toujours comporté un tableau des points de référence secondaires. Malheureusement on n'a jamais expliqué de façon satisfaisante le rôle d'un tel tableau dans la réalisation et la dissémination de l'EIPT. C'est une source de confusion pour les utilisateurs dont certains considèrent à tort que les points de référence secondaires font partie de l'EIPT et les utilisent librement sur un pied d'égalité avec les points primaires de définition. Il paraît donc nécessaire de tenter d'expliquer comment et quand utiliser la liste des points de référence secondaires, étant entendu que cette liste n'est pas uniquement un relevé des caractéristiques thermophysiques de matériaux dont la compilation ne serait du domaine d'aucune EIPT.

Nous pouvons regrouper les utilisations des points de référence secondaires dans les mesures de température sous les titres généraux suivants :

* Les membres de ce Groupe de travail sont MM. L. CROVINI, Président, Istituto di Metrologia G. Colonnetti (Italie), R.E. BEDFORD, Conseil National de Recherches (Canada), H. MAAS, Amt für Standardisierung, Messwesen und Warenprüfung (R.D.A.).

Ce rapport a été communiqué aux membres du CCT en janvier 1978 et discuté à la 12^e session du CCT en mai 1978.

- a) réalisation d'autres unités,
- b) contrôle interne d'une réalisation de l'EIPT ou comparaison entre elles de différentes réalisations de l'EIPT,
- c) réalisations de l'échelle à un niveau secondaire,
- d) étalonnages de thermomètres secondaires,
- e) étalonnage "in situ" d'instruments.

Pour ces utilisations des points de référence secondaires, il existe toujours quelque autre solution, en ce sens que le but peut être atteint par une méthode différente. De plus, même lorsque l'on utilise un point de référence secondaire de cette façon, il est généralement nécessaire d'utiliser aussi une autre méthode (thermomètre étalonné, équation d'interpolation connue, etc.) pour compléter l'opération. En d'autres termes, les points de référence secondaires permettent d'obtenir des valeurs de température qui ne sont que discrètes*, aussi exactes soient-elles ; il est donc nécessaire d'utiliser quelque chose d'autre, en même temps, pour avoir une échelle continue, pour étalonner un thermomètre, etc. Dans ce qui suit, nous faisons des suggestions pour l'utilisation des points de référence secondaires.

a) *Réalisation d'autres unités*

C'est là une application très limitée mais importante qui concerne à l'heure actuelle uniquement le point de congélation du platine et le point triple de l'azote dont on a respectivement besoin pour réaliser la candela et le mètre. Comme la candela et le mètre sont des unités de base du SI, on n'a pas besoin des valeurs de la température pour ces deux points. On a toutefois besoin de la valeur de la température du point du platine pour lier les unités photométriques aux unités radiométriques (efficacité lumineuse) ou, par exemple, pour lier les étalons d'éclairement énergétique spectral aux étalons de luminance énergétique spectrale.

b) *Contrôle interne d'une réalisation de l'EIPT ou comparaison entre elles de différentes réalisations de l'EIPT*

Cela recouvre deux cas légèrement différents. Dans le premier, tout laboratoire qui vient de réaliser l'EIPT peut la contrôler sur un ensemble de points de référence secondaires.

* Les relations pression de vapeur-température au-dessous de 100 K sont une exception.

Toute différence qu'il décèle entre ses mesures et la valeur donnée dans le texte de l'EIPT pour le même point de référence secondaire peut, après l'évaluation qui s'impose, être considérée comme erreur systématique. Une erreur de ce type comporte plusieurs parties : celle qui provient d'une réalisation donnée de l'EIPT, celle qui est due à une réalisation donnée du point de référence secondaire dans le laboratoire, et l'incertitude liée à la valeur du point de référence secondaire dans l'EIPT. Si la seconde composante est faible par rapport aux deux autres (c'est-à-dire si la réalisation du point de référence secondaire dans le laboratoire considéré est bonne), on peut donner une estimation de l'exactitude de la nouvelle réalisation de l'EIPT, qui n'est limitée que par l'incertitude du point de référence secondaire tel qu'il est donné dans le texte de l'EIPT. Comme exemples de cette application on peut donner la réalisation du point de congélation de l'antimoine (ou de l'aluminium) pour vérifier l'extrapolation de la formule d'interpolation du thermomètre à résistance de platine (par exemple l'effet des défauts d'isolement du thermomètre à résistance de platine qui ne sont pas décelables au-dessous de 450 °C) ou l'utilisation du point de congélation du cadmium pour effectuer un contrôle interne des étalonnages de thermomètres à résistance de platine. Les points de référence secondaires peuvent aussi être utiles dans le domaine du pyromètre optique. Le second cas concerne la comparaison d'échelles entre laboratoires. La méthode directe consiste à comparer entre eux les thermomètres qui représentent les échelles. Toutefois, on utilise quelquefois les points de référence secondaires lorsque l'on a besoin d'une comparaison très exacte à des points précis, ou lorsqu'il est préférable pour éliminer des erreurs systématiques dues au transport de thermomètres, ou à des causes semblables, de faire circuler un appareillage qui permet de réaliser un point de référence secondaire. Par exemple, les cellules à point triple cryogéniques conçues au CNAM et à l'IMGC sont particulièrement appropriées à ce but, et évitent complètement les problèmes provenant de l'échange de thermomètres. On peut les utiliser pour comparer soit des réalisations primaires de points d'ébullition ou de points triples, soit des températures entre des points fixes dans la mesure où l'on peut avoir une cellule ayant une température convenable.

c) *Réalisations de l'échelle à un niveau secondaire*

Ce sujet est traité plus à fond dans l'un des paragraphes suivants. Il convient d'abord de souligner qu'à l'heure actuelle il n'existe aucun autre moyen officiel de réaliser l'EIPT. Toute modification, ou version "abrégée" du texte de l'EIPT conduira inévitablement à une nouvelle échelle. Il peut toutefois arriver que les différences systématiques entre la nouvelle échelle et l'EIPT (actuellement l'EIPT-68) soient suffisamment faibles pour être négligées par un laboratoire donné ou que, dans d'autres cas, la réduction de la complexité et du prix de revient de la réalisation compense le caractère non négligeable de l'incertitude. Dans de tels cas, on a établi ce que l'on peut appeler une échelle de niveau secondaire. On peut utiliser les points de référence secondaires ainsi que certains points de définition de l'EIPT, combinés avec des instruments d'interpolation appropriés, pour définir l'échelle de niveau secondaire. On ne peut opérer ainsi de façon incontrôlée si l'on veut éviter une prolifération des échelles de niveau secondaire et si l'on ne peut disposer que de quelques options soigneusement choisies.

d) *Étalonnages de thermomètres secondaires*

On peut effectuer des étalonnages de thermomètres secondaires, catégorie beaucoup plus importante que les précédentes, par comparaison soit directe soit indirecte, pour un ensemble discret de valeurs de la température avec un thermomètre étalon représentant l'EIPT. On peut supposer que pour les thermomètres secondaires (thermomètres de précision ayant une reproductibilité éprouvée) la forme générale de l'équation reliant le signal de sortie à la température est connue à l'avance. On peut alors programmer le nombre et la distribution des points d'étalonnage. Il est possible de réaliser certains des points d'étalonnage au moyen de points de référence secondaires convenables ; dans ce cas, on aura une comparaison *indirecte* avec les thermomètres étalons de l'EIPT. L'exactitude de la comparaison dépend de l'incertitude de la valeur attribuée à la température du point de référence secondaire et de l'incertitude de la réalisation en question. Le choix entre une comparaison directe ordinaire et la méthode des points de référence secondaires est essentiellement une question de commodité et de prix de revient.

e) *Étalonnage "in situ" d'instruments*

Nous considérons ici un appareil complexe de mesure dans

lequel il est impossible ou malaisé de séparer le détecteur de température du reste de l'instrument et de l'étalonner de la façon habituelle. "In situ" signifie que l'étalon de température doit être mis en contact thermique avec le détecteur dans l'appareil. Cette opération demande des types spéciaux d'étalons et des procédés particuliers de comparaison. Dans certains types d'appareils à haute température pour les mesures de propriétés thermophysiques, on peut remplacer l'échantillon habituel par un échantillon spécial fait d'une substance pure dont on connaît le point de fusion et par rapport auquel on peut étalonner le détecteur. On peut donner comme autre exemple les appareils à point de fusion que l'on utilise fréquemment en chimie analytique. Etant donné les inévitables limites de conception, ces instruments présentent des différences systématiques entre la température de la substance en fusion et celle à laquelle le thermomètre est soumis. Il est par conséquent nécessaire de les étalonner en utilisant des échantillons dont on connaît le point de fusion.

On peut remarquer que comme en d) il est nécessaire de programmer le nombre et la position des points d'étalonnage, selon le type d'équation qui relie l'indication donnée par le détecteur à sa température. Il n'y a aucun moyen d'étalonner avec une exactitude raisonnable un détecteur de spécifications indéterminées, même avec un ensemble de points de référence secondaires, sauf en des points précis.

2. TABLEAU DES POINTS DE RÉFÉRENCE SECONDAIRES DANS UNE FUTURE EIPT

Compte tenu de ce qui a été dit ci-dessus, il ne fait aucun doute qu'une future EIPT devra encore comporter une liste comparable au Tableau VI de l'EIPT-68. Il devra toutefois être explicité que la liste des points de référence secondaires n'est donnée que pour fournir à l'utilisateur des valeurs de température d'états physiques correspondant à une température constante et hautement reproductible, telles qu'elles sont déterminées au moyen d'expériences très exactes. Un relevé général des applications possibles des points de référence secondaires devra être inclus dans les "Renseignements complémentaires".

Pour chaque point de référence secondaire, il faudra satisfaire aux critères suivants :

a) Aussi bien la température de transformation que la qualité du matériau (pureté, stabilité chimique et physique) doivent être hautement reproductibles. En outre, des substances suffisamment pures doivent être immédiatement à la disposition de tout utilisateur.

b) On doit mesurer directement dans l'EIPT la valeur de la température attribuée : il faut plusieurs expériences comparables sur plusieurs échantillons de la substance.

c) On doit donner une évaluation de l'exactitude pour chaque valeur attribuée. Cela est important. L'indication de l'exactitude devrait éliminer la possibilité, qui existe aujourd'hui, que des utilisateurs inexpérimentés accordent aux points de référence secondaires un statut presque identique à celui des points de référence primaires.

A titre d'exemple, on peut considérer le point de fusion du gallium, pour lequel il existe cinq déterminations récentes. Les résultats sont les suivants :

Auteurs	Pureté de l'échantillon	Point de fusion (°C)	Exactitude estimée par l'auteur (mK)
Thornton & Mangum (NBS) [1]	7N *	29,772	± 1
Sostman (YSI) [2]	6N	29,770	± 2
Lau & Schlott (ASMW) [3]	5N5	29,769 ₇ **	± 0,6
Thornton (NBS) ₂ [4]	7N	29,771 ₄	± 1,4
Thornton & Mangum (NBS) ₃ [5]	7N	29,772 ₁	± 0,2 ₅

* Avec cette convention d'écriture, 7N représente une pureté de 0,999 999 9 ; 5N5 représente une pureté de 0,999 995.

** Point de congélation.

Pour comparer correctement ces données, il faut ajouter une correction de pureté de 0,1 et 0,2 mK respectivement aux résultats du YSI et de l'ASMW (ces corrections sont fondées sur les résultats de (NBS)₂ [4] pour des échantillons de pureté différente) et une correction pour la pression hydrostatique de 0,1 mK. En arrondissant mieux les résultats de YSI et de (NBS)₂, on obtient :

(NBS) ₁	29,772 °C	moyenne	29,771 ₁ °C
YSI	29,769 ₈ °C	Ecart-type	1,10 mK
ASMW	29,770 ₀ °C	Ecart-type de la moyenne	0,49 mK
(NBS) ₂	29,771 ₅ °C	Incertitude pour un taux	
(NBS) ₃	29,772 ₁ °C	de confiance de 99 %	± 1,3 mK

Sur cette base il semble raisonnable d'attribuer au point de fusion du gallium la température de 29,771₁ °C ± 1,3 mK.

La figure 1 montre les cinq déterminations indépendantes et leurs incertitudes. Pour certaines d'entre elles, les

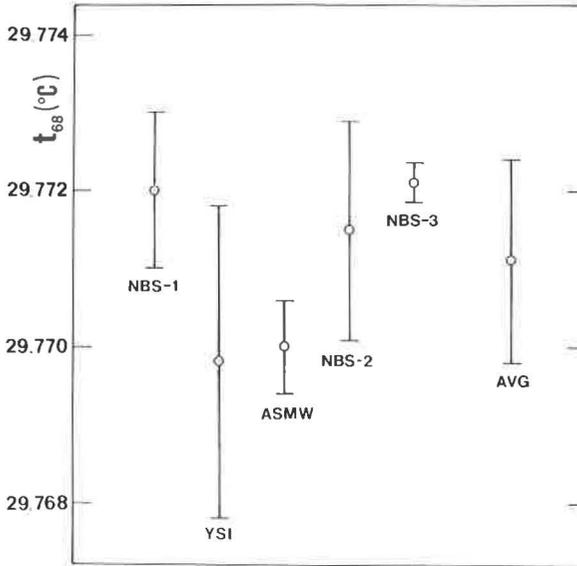


Fig. 1.- Résultats de cinq déterminations indépendantes du point de fusion du gallium. Les incertitudes indiquées sont celles données par les auteurs. L'incertitude donnée pour la valeur moyenne est de $\pm 2,57 \sigma$, où σ est l'écart-type estimé de la moyenne des cinq mesures.

domaines d'incertitude ne se recouvrent pas. Les expériences de l'YSI et de l'ASMW ont l'avantage d'utiliser de gros lingots, alors que les valeurs de (NBS)₁ et (NBS)₂ ont été obtenues avec des échantillons de 20 g seulement. Nous soupçonnons toutefois l'estimation d'exactitude de l'ASMW d'être quelque peu optimiste. Elle ne tient compte que des erreurs statistiques liées aux mesures faites sur un seul échantillon et non pas des erreurs systématiques telles que celles qui sont liées à l'étalement du thermomètre. En outre, le résultat de l'ASMW concerne une détermination du point de congélation, mais avec une

telle pureté il semble ne pas y avoir de différence appréciable entre les points de fusion et de congélation. Par ailleurs, les expériences du NBS semblent concordantes entre elles pour ce qui est des valeurs et des évaluations d'exactitude. Il est intéressant de noter que les résultats de $(NBS)_2$ ont été obtenus en utilisant des thermistances sélectionnées comme instruments d'interpolation.

On peut obtenir la valeur proposée par fusion (ou congélation) de n'importe quel échantillon de gallium de pureté 6N ou mieux.

d) On doit indiquer la pureté minimale de la substance qui permet de réaliser le point de référence secondaire avec l'exactitude donnée.

e) La référence aux travaux expérimentaux originaux décrivant les réalisations du point de référence secondaire doit être donnée.

f) Des renseignements doivent être donnés sur tout paramètre physique qui affecte le point de référence secondaire (par exemple le coefficient de pression).

Le fait de n'inclure que des points sur lesquels on est documenté peut encourager les laboratoires à mesurer correctement d'autres points. Il vaut mieux limiter le nombre total des points ; ce nombre ne devrait pas être augmenté de façon arbitraire, simplement pour combler des vides. L'établissement de la liste des points qui ne satisfont pas à ces impératifs (points de référence tertiaires) devrait être laissé au soin d'autres organisations (telles que l'UICPA).

3. POINTS DE RÉFÉRENCE SECONDAIRES ET ÉTALONS MATÉRIELS DE RÉFÉRENCE

Depuis quelques années, des recherches se poursuivent au sein d'organisations scientifiques nationales ou internationales, visant à définir les caractères d'une ou plusieurs propriétés physiques ou chimiques de lots particuliers d'étalons matériels hautement reproductibles. Les étalons matériels de référence obtenus de cette façon sont distribués aux utilisateurs pour étalonner des instruments de mesure, des appareils d'analyse, etc. Il est évident que cette activité risque d'interférer avec l'utilisation des points de référence secondaires. Il convient toutefois de souligner que les points de référence secondaires sont nettement différents des étalons matériels de

référence. Les points de référence secondaires attribuent des valeurs à la température des changements d'état de matériaux de grande pureté, alors que les étalons matériels de référence caractérisent des états physiques d'échantillons donnés de matériaux. Il n'y a aucune façon automatique de combiner une substance pure, quelle qu'en soit la pureté, avec une valeur de température pour obtenir un point de référence secondaire *prêt à être utilisé*.

Malgré tout, on peut, peut-être, faire circuler et utiliser des étalons matériels de référence pour réaliser des points de référence secondaires pour des utilisations à faible exactitude, telles que celles du paragraphe e) du point 1. Il est clair, toutefois, qu'un étalon matériel de référence de ce type provient d'un laboratoire d'étalonnage donné et non de l'EIPT. Il ne peut être lié à l'EIPT-68, ou à n'importe quelle échelle à venir, que parce qu'un laboratoire donné l'a étalonné, l'a certifié et en a garanti les méthodes d'utilisation. Pour résumer, on peut avoir des points d'étalonnage en utilisant des étalons matériels de référence, mais, dans ces cas-là, leur exactitude est déterminée seulement par l'utilisateur et par le laboratoire qui a fabriqué l'étalon matériel de référence et qui en est responsable.

4. ÉCHELLES DE NIVEAU SECONDAIRE

4.1. *Préambule*

Nous avons déjà souligné (§ 1 (c)) qu'il n'existe qu'une seule façon officielle de réaliser l'EIPT. Lors des précédentes sessions du CCT, on a discuté sur l'idée de donner un statut quelque peu "officiel" à une échelle secondaire. Après avoir étudié longuement cette question, le Groupe de travail 2 pense qu'il n'est pas souhaitable que le CCT promulgue une échelle secondaire officielle. Notre opinion se fonde sur l'expérience malheureuse antérieure, où des utilisateurs inexpérimentés, à défaut de spécifications contraires, n'ont fait aucune distinction entre les points de référence secondaires et les points fixes de définition, simplement parce que les points de référence secondaires figuraient dans le texte de l'EIPT. Le Groupe de travail 2 craint que si le CCT avalisait une échelle secondaire il en résulte une situation encore pire. Deux échelles officielles seraient alors en usage et la distinction entre elles deviendrait assez floue.

Toutefois, le fait demeure qu'il y a des laboratoires qui ont besoin de l'EIPT, mais ou bien il ne leur est pas utile de la réaliser avec l'exactitude la plus élevée possible, ou bien il n'en ont pas les moyens, ou bien ils n'ont pas une expérience suffisante pour le faire. En conséquence, il faudrait que le CCT aborde d'une façon ou d'une autre le problème des échelles secondaires, c'est-à-dire qu'il faudrait fournir des renseignements en ce qui concerne l'exactitude estimée par rapport à l'EIPT de quelques échelles secondaires choisies, pour lesquelles on dispose de méthodes fiables de mise en oeuvre.

On pourrait traiter convenablement aussi bien les points de référence secondaires que les échelles secondaires en séparant le texte de l'EIPT aussi bien des renseignements complémentaires que de la discussion des échelles secondaires. Les points de référence secondaires devraient être inclus dans les renseignements complémentaires (§ 3.) et les échelles secondaires devraient faire l'objet d'une troisième publication. Cela éviterait le genre de problèmes qui ont été soulevés dans le passé et permettrait de mettre à jour les renseignements complémentaires sans faire une nouvelle édition du texte de l'EIPT. De cette façon, les renseignements complémentaires pourraient comporter des directives auxquelles on pourrait se fier sans impliquer nécessairement que les autres techniques ne soient pas valables, par exemple les techniques de recuit des thermocouples platine/platine rhodié.

4.2. *Échelles secondaires éventuelles*

4.2.1. Thermomètres étalonnés - échelles à fils

L'échelle secondaire la plus directe et probablement la plus exacte peut être obtenue avec les thermomètres à résistance de platine, les thermocouples platine/platine à 10 % de rhodium, et les lampes à ruban de tungstène qui ont été étalonnées par un laboratoire national. Ces étalons doivent être conservés selon les méthodes indiquées dans les renseignements complémentaires. Il faut au moins trois de chacun de ces étalons pour permettre des contrôles internes de la stabilité de l'échelle secondaire ainsi établie. Il est recommandé de disposer de cellules à point triple de l'eau pour contrôler le R_0 des thermomètres à résistance de platine et pour permettre d'utiliser l'"unité du pont" dans les mesures de thermomètres à résistance de platine.

4.2.2. 14 K à 273 K

4.2.2.1. Thermomètre à résistance de platine avec interpolation simplifiée

On peut utiliser une méthode simplifiée d'étalonnage (p. ex. Kirby *et al.* [6]) en liaison avec une échelle à fil (§ 4.2.1.) pour éviter d'avoir à utiliser des cryostats complexes de comparaison. Avec cette méthode [6], on a besoin seulement de quatre points d'étalonnage (dans l'hélium, l'hydrogène, l'azote liquides et au point triple de l'eau). Ceux-ci, associés à la formule d'interpolation

$$\Delta W = c(W-1) + d.\ln W + e.(\ln W)^2$$

(dans laquelle W est la résistance réduite du thermomètre que l'on étalonne et ΔW est la différence entre la résistance réduite de ce thermomètre et celle du thermomètre étalon), permettent d'avoir des étalonnages exacts à ± 3 mK entre 273 K et 77 K, à ± 6 mK entre 77 K et 20 K, et à ± 30 mK entre 20 K et 4 K. Les relations pression de vapeur-température [7] peuvent remplacer les points de comparaison de l'hydrogène et de l'azote liquides.

On peut obtenir une exactitude encore plus grande en ajoutant un terme en $(\ln W)^3$ à l'équation d'interpolation et en ajoutant un point d'étalonnage au voisinage de 160 K.

Si on mesure la pression de vapeur dans des cryostats à hélium, hydrogène et azote convenablement conçus et si l'on obtient les températures correspondantes d'après les relations pression de vapeur-température, l'équation d'interpolation ci-dessus permet de réaliser une échelle secondaire indépendante de tout thermomètre à résistance de platine étalonné au préalable ; dans ce cas, ΔW est la différence entre la résistance réduite du thermomètre et $W_{\text{CCT-68}}(T_{68})$.

4.2.2.2. Relation pression de vapeur - température

Pour les domaines restreints de 14 K à 30 K et de 60 K à 100 K, les relations pression de vapeur - température pour l'hydrogène, le néon, l'azote et l'oxygène [7] donnent des approximations raisonnables de l'EIPT. Nous estimons que ces relations sont exactes à ± 5 mK ; l'exactitude la plus grande correspondante, nécessaire pour les mesures de pression est de $\pm 1,3$ Pa ($\pm 0,01$ mmHg).

4.2.2.3. Extrapolation des équations d'interpolation du thermomètre à résistance de platine

L'extrapolation vers les basses températures de l'étalonnage dans l'EIPT au-dessus de 0 °C d'un thermomètre à résistance de platine, associée à un tableau de corrections, fournit une échelle secondaire exacte à ± 3 mK entre 273 K et 150 K, et à ± 10 mK à 77 K [8].

4.2.3. De 0 °C à 1800 °C

L'échelle secondaire la plus simple et la moins onéreuse dans ce domaine peut être établie avec des thermocouples platine/platine rhodié et les tables de référence internationales appropriées [9]. Par exemple on peut utiliser un thermocouple platine - 10 % rhodium/platine (10/0) ou un thermocouple platine - 13 % rhodium/platine (13/0) entre 0 °C et 1500 °C ou un thermocouple en double alliage jusqu'à 1800 °C. Si le thermocouple (10/0 ou 13/0) est recuit d'une façon nettement spécifiée, étalonné aux points de congélation ou de fusion du zinc, de l'antimoine ou de l'aluminium, de l'argent, de l'or ou du cuivre et du palladium et si des polynômes simples sont ajustés sur les différences entre les forces électromotrices observées et calculées, les échelles secondaires obtenues seront exactes à $\pm 0,2$ °C (de 0 °C à 500 °C), à $\pm 0,3$ °C (de 500 °C à 1100 °C), à ± 1 °C (à 1500 °C). L'étalonnage au point du palladium (et, si on le désire, au point de l'or) peut être fait par la méthode du fil. Si l'on ne dispose pas d'installations pour effectuer l'étalonnage au point du palladium, l'étalonnage jusqu'au point de l'or peut être extrapolé jusqu'à 1500 °C avec une incertitude d'environ ± 3 °C à 1500 °C. La référence [10] donne les courbes caractéristiques d'écart pour le thermocouple 10/0.

Le domaine de l'échelle secondaire peut être étendu à environ 1800 °C si, par exemple, on utilise un thermocouple platine - 30 % rhodium/platine - 6 % rhodium et si on ajoute un point d'étalonnage (le point de fusion du platine par la méthode du fil). Burns et Gallagher [11] ont discuté l'exactitude de cette échelle secondaire.

Si l'on a besoin d'une exactitude plus élevée dans le domaine de 0 °C à 600 °C on peut substituer au thermocouple un thermomètre à résistance de platine commercial ($\alpha \geq 3,85 \times 10^{-3}$) ou de qualité supérieure. Avec des étalonnages au point triple de l'eau, aux points de congélation de l'étain et du zinc, et par interpolation quadratique, on peut obtenir des

exactitudes nettement meilleures que $\pm 0,1$ °C. Cette échelle peut aussi être étendue à 90 K avec une exactitude à $\pm 0,5$ K avec un point d'étalonnage supplémentaire au point d'ébullition de l'oxygène et par interpolation au moyen de l'équation de Callendar-Van Dusen.

4.2.4. Thermomètres à résonance quadrupolaire nucléaire

Il semble vraisemblable que, dans un proche avenir, des thermomètres à résonance quadrupolaire nucléaire fourniront de bonnes échelles secondaires, mais à présent on dispose d'une documentation expérimentale insuffisante sur leur reproductibilité. La documentation dont on dispose [12] indique que ces thermomètres sont moins sensibles aux impuretés et demandent moins de points d'étalonnage que les thermomètres à résistance habituels ; ils couvrent un large domaine de température, ne sont pas sensibles aux effets de dimension, et seront probablement commercialisés prochainement [13]. D'un autre côté, l'équipement annexe est plus complexe que pour les thermomètres à résistance.

Reçu en janvier 1978.

BIBLIOGRAPHIE

1. THORNTON (D.D.), MANGUM (B.W.), *Comité Consultatif de Thermométrie*, 11^e session, 1976, p. T 157.
2. SOSTMAN (H.E.), *Rev. Sci. Instr.*, 48, 1977, p. 127.
3. LAU (S.), SCHLOTT (P.), *Comité Consultatif de Thermométrie*, 11^e session, 1976, p. T 161.
4. THORNTON (D.D.), *Clinical Chemistry*, 23, 1977, p. 719.
5. THORNTON (D.D.), MANGUM (B.W.), à paraître ; (voir MANGUM (B.W.), *Clinical Chemistry*, 23, 1977, p. 711).
6. KIRBY (C.G.M.), BEDFORD (R.E.), KATHNELSON (J.), *Metrologia*, 11, 1975, p. 117.
7. CROVINI (L.), BEDFORD (R.E.), MOSER (A.), *Metrologia*, 13, 1977, p. 197.
8. BEDFORD (R.E.), *Temperature, Its Measurement and Control in Science and Industry*, Vol. 4, I, p. 15, Instrument Society of America, Pittsburgh, 1972.
9. POWELL (R.L.), HALL (W.J.), HYINK (C.H.), SPARKS (L.L.), BURNS (G.W.), SWAGER (M.G.), PLUMB (H.H.), *NBS Monograph 125*, 1974.
10. BEDFORD (R.E.), *High Temperatures-High Pressures*, 4, 1972, p. 241.
11. BURNS (G.W.), GALLAGHER (J.S.), *J. Res. NBS*, 70C, 1965, p. 89.
12. UTTON (D.B.), VANIER (J.), *Instrumentation Technology*, Décembre 1976, p. 47.
13. OHTE (A.), IWASKA (H.), *IEEE Trans. on Instr. Meas.* IM-25, 1976, p. 357.

ANNEXE T 4

4^e Rapport du Groupe de travail 3* (Températures supérieures à 100 K) (Traduction du Document CCT/78-2)

Les deux brèves notes préparées par le Groupe de travail 3 sur les différences entre l'EIPT-68 et la température thermodynamique et les preuves de l'existence de ces différences sont maintenant parues dans *Metrologia*, 13, 1977, p. 175 et p. 178. Depuis l'élaboration de ces notes, aucun nouveau résultat expérimental ne nous permet d'étendre au-dessus de 460 °C le domaine des différences proposées, ni ne nous amène à modifier les conclusions qui y sont données.

En ce qui concerne le domaine compris entre 630,74 °C et 1064,43 °C nous proposons d'entreprendre une comparaison internationale restreinte des échelles. Cette comparaison serait effectuée au moyen des nouveaux thermomètres à résistance de platine pour les températures élevées conçus et fabriqués au NBS. Elle se limiterait aux laboratoires qui procèdent effectivement à l'heure actuelle à des mesures de température thermodynamique dans ce domaine, c'est-à-dire le NBS (thermomètre

* Les membres de ce Groupe de travail sont MM. T.J. QUINN, Président, Bureau International des Poids et Mesures (Sèvres), L.A. GUILDNER, National Bureau of Standards (U.S.A.), A. MOSER, Institut National de Métrologie (France), W. THOMAS, Physikalisch-Technische Bundesanstalt (R.F.A.).

Ce rapport a été communiqué aux membres du CCT en janvier 1978 et discuté à la 12^e session du CCT en mai 1978.

à gaz), NPL et PTB (thermomètre à rayonnement). Nous pensons que la comparaison va commencer au début de l'année 1978.

En étudiant la question, souvent posée, du remplacement du thermocouple Pt 10 % Rh/Pt comme instrument de définition de l'EIPT-68 entre 630,74 °C et 1064,43 °C, il est nécessaire de prendre position sur la reproductibilité nécessaire de l'instrument qui remplacera le thermocouple. On évalue à $\pm 0,2$ K ou $\pm 0,3$ K la reproductibilité de l'échelle actuelle fondée sur le thermocouple. Si l'on tient compte des besoins scientifiques et industriels actuels qui peuvent aller jusqu'à exiger $\pm 0,5$ K même pour le haut de l'échelle, la reproductibilité actuelle de l'EIPT-68 est à l'évidence inadéquate. Il nous semble qu'une amélioration d'un facteur 10 soit souhaitable et puisse être atteinte ; en conséquence nous nous fixons le but suivant :

"Une échelle remplaçant l'actuelle EIPT-68 entre 630,74 °C et 1064,43 °C devrait avoir une reproductibilité aux points fixes et entre ces points fixes meilleure que 0,04 K. Cette reproductibilité devrait inclure les effets de la dérive sur une durée raisonnable aussi bien que les effets dus à l'immersion et aux variations entre les instruments de différentes fabrications".

Bien que le thermomètre à résistance de platine semble demeurer le candidat le plus apte à remplacer le thermocouple, nous ne souhaitons pas, à ce stade des travaux, exclure l'éventualité de pouvoir utiliser le pyromètre tout au moins sur une partie du domaine compris entre 630,74 °C et 1064,43 °C.

L'expérience a montré que les besoins industriels et scientifiques rattrapent de façon inévitable et même quelquefois dépassent les possibilités de mesure que peuvent offrir les instruments. C'est pourquoi il nous paraît certain qu'une décision prochaine sur le remplacement du thermocouple comme instrument de définition de l'EIPT-68 profitera à la science et à l'industrie.

Reçu en janvier 1978.

ANNEXE T 5

Cette Annexe concerne le Rapport du Groupe de travail 4* au CCT, qui était le texte de l'Echelle Provisoire de Température de 1976 entre 0,5 K et 30 K.

Après quelques modifications, le texte de cette Echelle a été définitivement adopté par les membres du CCT.

Les grandes lignes de cette Echelle avaient été présentées en 1976 dans le rapport du CCT au CIPM (65^e session). Celui-ci les avait adoptées et avait autorisé la mise en application de cette Echelle.

Le texte de l'Echelle Provisoire de Température de 1976 entre 0,5 K et 30 K est donné p. T 7 de ce Volume, à la suite du Rapport du CCT au CIPM.

Il fait l'objet d'une publication séparée du BIPM, disponible sur simple demande adressée au BIPM.

* Document CCT/78-40 reçu le 9 mai 1978.

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

Ce Rapport a été communiqué aux membres du CCT et discuté lors de la 12^e session du CCT en mai 1978.

Il est publié dans les Comptes Rendus de la XV^e Conférence Internationale sur la Physique à basse température, tenue à Grenoble, France, en août 1978 (Suppl. au *J. de Physique*, Fasc. 8, C-6, 1978, Vol. III, p. C 6 - 1631).

Le texte anglais de cette Échelle est publié dans *Metrologia*, 15, 1979, p. 65.

Il est suivi par "The derivation and development of the 1976 Provisional 0.5 K to 30 K Temperature Scale", rédigé par les membres du Groupe de travail 4.

ANNEXE T 6

2^e Rapport du Groupe de travail 5*

(Thermomètres aux températures inférieures à 30 K)

(Traduction du Document CCT/78-38)

A.

Au cours des deux années qui se sont écoulées depuis notre dernier rapport, peu de choses ont été publiées ou ont été portées à notre connaissance, qui permettent d'avancer dans la recherche de thermomètres pratiques pour les températures inférieures à 30 K. D'un point de vue métrologique (disons, avec une précision d'utilisation de l'ordre de 1 mK ou meilleure), les principaux candidats demeurent le thermomètre à résistance de germanium, le thermomètre à résistance de rhodium-fer, toute version simplifiée du thermomètre à gaz à volume constant et le thermomètre à sel magnétique. Nous résumons d'abord les progrès dans ces quatre domaines.

1 - *Thermomètre à résistance de germanium (GeRT)*

a) Au NML, Besley et Plumb ont entrepris un programme ambitieux pour faire subir des cycles thermiques à des GeRT

* 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).

afin d'éprouver leur stabilité. On trouvera un premier rapport de leurs résultats dans *Rev. Sci. Instr.*, 49, 1978, p. 68. Il couvre 100 cycles, entre la température ambiante et 20 K, effectués avec 30 GeRT de chez Cryocal Inc. (qui était alors en Floride) et de chez Scientific Instruments Inc. Il s'est avéré que 11 thermomètres demeuraient stables à environ $\pm 0,5$ mK près et les auteurs ont pu classer les différentes instabilités en dérives, sauts, variations bimodales ou aléatoires. D'autres essais sont envisagés mais d'ici là les auteurs indiquent que les essais avant utilisation sont essentiels pour choisir les GeRT fiables. Pour des travaux métrologiques, il semblerait qu'il faille effectuer des vérifications après chaque refroidissement.

b) Au NPL, Rusby a entrepris, sur une échelle plus modeste qu'au NML, quelques vérifications de stabilité pour des GeRT provenant de chez Lake Shore Cryotonics Inc. On a fait subir six cycles à sept thermomètres Lake Shore et trois thermomètres Cryocal (encore fabriqués en Floride - nous n'avons connaissance d'aucun essai sérieux sur des thermomètres Cryocal fabriqués depuis que cette société a déménagé à Minneapolis, bien que certains aient été envoyés au NML) ; des mesures ont été faites à 4,2, 10 et 20 K à chaque refroidissement. L'un des thermomètres Lake Shore avait une résistance de prise de potentiel élevée et était instable mais les autres étaient stables à mieux qu'environ 0,5 mK à 4,2 K, environ 0,5 mK à 10 K et entre 0,5 et 1,0 mK à 20 K. Il n'y avait aucune corrélation nette entre les changements observés aux trois températures dans un cycle donné, bien qu'il parût qu'elles ressemblaient plus à des décalages constants en $\ln R$ qu'en R .

c) Une nouvelle venue dans les rangs des fabricants de GeRT est la société japonaise Yokogawa Electric Works. Des essais sur plusieurs thermomètres de cette société sont en cours au NRLM, mais il est prématuré de donner des résultats définitifs.

d) Au NBS, on a constaté qu'il était extrêmement difficile de trouver, pour utilisation au-dessous de 0,1 K, des GeRT fiables et de sensibilité élevée (100 k Ω à 0,01 K). La plupart des thermomètres ont présenté des ruptures de connexions, comportement qui était beaucoup moins fréquent pour les thermomètres ayant une sensibilité plus faible (5 k Ω à 0,01 K).

e) Au NBS également, un certain nombre de GeRT parmi les premiers fabriqués (de chez Minn. Honeywell et Cryocal) ont

présenté des reproductibilités meilleures que 1 mK dans le domaine de température de 2,3 K à 27 K sur une période de 15 ans.

2 - *Thermomètre à résistance de rhodium-fer (RIRT)*

a) Ce thermomètre est moins sensible et plus grand que les GeRT ; il est de la même dimension que le thermomètre à résistance de platine du type capsule. Toutefois, le NPL continue à constater qu'aucun de ces thermomètres n'est instable aux basses températures et que cette caractéristique vaut bien l'effort supplémentaire qu'ils demandent pour les mesures. En particulier, les trois thermomètres que Berry avait utilisés à l'origine donnent encore des résultats à 0,1 mK près par rapport aux premières comparaisons à 4,2 K auxquelles ils ont participé et cela après bientôt cinq ans d'usage fréquent. De nouveaux tests intensifs seraient instructifs et nous sommes heureux de la proposition faite par le NML d'entreprendre des essais de cycles thermiques sur des RIRT comparables à ceux qu'ils ont effectués sur des GeRT.

b) Depuis la précédente session du CCT, des RIRT matérialisant les échelles du NPL (NPL-75 et T-x1) dans le domaine de 0,5 à 27 K ont été fournis à plusieurs laboratoires actifs dans ce domaine de température. Jusqu'ici, il y a eu peu d'information en retour et nous sollicitons les commentaires de ceux qui ont reçu ces thermomètres.

c) Une difficulté inhérente au RIRT est qu'il n'existe qu'un fabricant de ce type de thermomètre, en l'occurrence H. Tinsley and Co. Toutefois, Chino Works au Japon a l'intention de fabriquer sous peu quelques RIRT et de les faire essayer au NRLM, ce qui est une bonne chose.

3 - *Thermomètre à gaz à volume constant (CVGT)*

Au NBS, Van Degrift a commencé des recherches sur les possibilités de réalisation d'un CVGT pour les basses températures utilisant un oscillateur LC simple constitué d'un résonateur à cavité rentrante piloté par une diode tunnel, de telle sorte que la fréquence d'un signal radiofréquence donne la pression du gaz. L'étude en est à ses tout débuts mais on a utilisé un prototype qui a donné une sensibilité de 50 μ K, entre 0,7 K et 300 K, pour un décalage total de fréquence de 1 pour cent. Les principaux avantages de cet appareil, en

dehors de sa précision, sont ses faibles dimensions (dimensions extérieures : 2 cm de diamètre, 5 cm de longueur), une linéarité de 0,1 % entre 0,7 K et 20 K et un circuit de mesure très simple (compteur de fréquence et amplificateur radio-fréquence rf).

4 - *Thermomètre à sel magnétique* (MST)

On peut se demander s'il peut être considéré comme un thermomètre vraiment pratique, mais il est si important dans le domaine au-dessous de 30 K que nous l'incluons. En fait, nous avons peu de renseignements nouveaux depuis notre dernier rapport et, à notre connaissance, il y a peu de travaux en cours sur cette question. Toutefois, au NBS, Mangum a construit un système à l'éthylsulfate de néodyme pour étudier le caractère lisse d'autres échelles ; il l'a ensuite abandonné en faveur d'un système beaucoup plus sensible utilisant le $Gd(PO_3)_3$.

B.

Les quatre types de thermomètres ci-dessus sont ceux que nous avons choisi de considérer d'après notre premier rapport de Groupe de travail. Tous sont aptes à définir et à conserver des échelles de température avec une exactitude meilleure que 1 mK (et peut-être encore bien meilleure) qui était notre critère de sélection. A l'évidence, ils ne sont pas strictement à mettre en compétition, en ce sens que chaque type a des qualités et des faiblesses différentes : il n'y a pas de "meilleur choix". Par ailleurs, l'extension de l'EIPT vers les basses températures exigera de choisir un instrument d'interpolation et nous avons recensé les qualités d'interpolation des quatre types de thermomètres ainsi que leur domaine d'utilisation. Nous en avons tiré quelques conclusions, mais nous avons délibérément évité de faire des recommandations.

1 - A notre connaissance, il n'y a pas de façon satisfaisante d'utiliser les résultats du GeRT autrement qu'en ajustant un polynôme par la méthode des moindres carrés. Un GeRT unique pourrait couvrir le domaine de 1 K à 20 K, mais il est probable que ce domaine devrait être divisé en deux moitiés,

un polynôme du 7^e ou du 8^e degré étant ajusté sur chacune ; le nombre de points d'étalonnage dont on aurait besoin dépasserait nettement le nombre de points fixes dont on dispose. En conséquence, il semble que le GeRT soit destiné à demeurer un instrument commode de laboratoire sans rôle spécifique dans une nouvelle EIPT.

2 - Les RIRT tels qu'ils sont actuellement peuvent être utilisés de 0,4 K à la température ambiante. Ceux que l'on a étudiés jusqu'à maintenant présentent une similitude marquée dans leurs caractéristiques. Rusby a utilisé pour le domaine de 0,5 K à 20 K les résultats de 8 thermomètres, provenant de 6 lots (de la même provenance), pour voir si l'on peut dériver une fonction de référence afin d'exprimer les étalonnages au moyen d'une fonction-écart simple, essentiellement comme on le fait dans l'EIPT-68 pour le thermomètre à résistance de platine. En utilisant les neuf points fixes spécifiés dans le Tableau I de l'EPT-76 plus le point λ de l'hélium, les exactitudes d'interpolation étaient dans chaque cas inférieures à environ 0,5 mK. Tandis que cette exactitude pourrait être acceptable, il ne serait pas possible de garantir une conformité satisfaisante des fournitures ultérieures de fil, en particulier si, comme ce serait souhaitable, on disposait de plusieurs sources de fil.

Une seconde approche était fondée sur le fait que l'on peut décrire avec exactitude, au moyen d'un polynôme du 8^e degré les caractéristiques des RIRT entre 0,5 K et 20 K (écart-type d'environ 0,2 mK), et que les caractéristiques des différents thermomètres sont suffisamment semblables pour qu'elles puissent être traitées de la même façon. Il n'y a aucune raison de supposer que ces observations dépendent des détails de fabrication de ces thermomètres. La question se pose alors de savoir si des mesures à un nombre relativement réduit de points fixes suffiraient pour définir une courbe du huitième degré avec suffisamment d'exactitude et si des erreurs faites à ces points fixes seraient augmentées par l'interpolation. En utilisant les 10 points précédents (c'est-à-dire avec seulement un degré de liberté dans la courbe), l'erreur d'interpolation atteignait 1 mK au voisinage de 10 K, mais en ajoutant un point du Nb à 9 K l'erreur maximale était d'environ 0,5 mK au voisinage de 18 K et elle était au plus d'environ 0,3 mK au-dessous de 14 K. L'introduction d'erreurs de 1 mK dans les points fixes, ou diverses combinaisons d'erreurs de 1 mK, donnaient rarement lieu à des erreurs d'interpolation supé-

rieures à 1,3 mK et leurs effets étaient très localisés. Ce résultat satisferait le besoin d'exactitude, au moins au-dessous de 14 K, et on peut penser qu'il serait assez général pour tous les RIRT. Par une coïncidence heureuse, de récents travaux faits au NBS par Schooley laissent à penser d'un point du Nb est peut-être en train de devenir une réalité.

3 - Comme instrument d'interpolation, le CVGT a l'avantage de ne demander que deux points fixes. Toutefois, pour que l'interpolation soit suffisamment conforme à la température thermodynamique, il pourrait être nécessaire de spécifier une expression pour le 2^e coefficient du viriel $B(T)$. Il faudrait des mesures assez précises (disons 10×10^{-6}) des rapports de pression et il serait nécessaire d'évaluer les effets d'espace nuisible. A l'extrémité inférieure, le domaine serait écourté par l'approche de la pression de vapeur, ou plus exactement par la difficulté de spécifier $B(T)$ correctement. On pourrait résoudre bien des difficultés si l'on pouvait utiliser un oscillateur à diode tunnel comme élément sensible pour faire *in situ* des mesures de pression de gaz à faible densité, tandis que l'élimination des effets d'espace nuisible permettrait de ne tenir compte, pour déterminer la grandeur du réservoir de gaz, que de la nécessité de rester maître des effets d'adsorption. Il serait nécessaire comme pour tous les CVGT, de bien connaître la dilatabilité thermique du matériau du réservoir.

4 - On a construit plusieurs thermomètres magnétiques avec des exactitudes conformes à notre critère pour des mesures dans le domaine de 1 K à 30 K, en utilisant divers sels et au-dessous de 1 K en utilisant le nitrate de cérium et de magnésium (CMN). On peut établir la relation susceptibilité-température en utilisant assez peu de points fixes (peut-être quatre, mais souvent moins) et l'interpolation résultante est lisse par rapport aux températures thermodynamiques. Un avantage du MST est que l'on peut en principe couvrir la totalité du domaine simplement avec un choix approprié de sels. En pratique, cela pourrait ne pas être totalement vrai car il est nécessaire de faire appel à un réfrigérateur à dilution pour le "domaine du CMN" et il pourrait aussi être souhaitable d'utiliser un détecteur "SQUID" sensible pour obtenir un thermomètre de plus petites dimensions. Il faudrait encore un pont traditionnel pour la partie supérieure du domaine de température.

C.

Il est malencontreux, sinon même surprenant, que les possibilités d'utilisation pratique des thermomètres paraissent liées au nombre de points d'étalonnage nécessaires. Il en résulte que l'on envisage des thermomètres "quasi primaires" pour jouer le rôle d'instruments de définition dans une future Echelle Internationale "Pratique" de Température, comme c'est déjà le cas à l'autre extrémité de l'EIPT. Toutefois, il faut reconnaître que peu importe comment sera définie l'EIPT au-dessous de 30 K, son emploi quotidien se fera essentiellement au moyen du GeRT. Une définition faisant appel au CVGT ou au MST impliquerait une autre étape entre la réalisation des points fixes et la disponibilité de l'échelle, à savoir la détermination des valeurs de la température en de nombreux points du domaine afin d'étalonner des thermomètres à résistance. Les réalisations de l'échelle à partir des principes fondamentaux constitueraient des événements rares. Une définition au moyen du RIRT demanderait davantage de points fixes, mais offrirait une réalisation directe sous une forme susceptible d'être acceptable pour les laboratoires d'étalonnage secondaires, comme l'est actuellement le thermomètre à résistance de platine.

Le choix final de l'instrument d'interpolation dépendra entre autres choses, du nombre, de l'état et de la répartition des points fixes disponibles, du perfectionnement des divers thermomètres au cours des toutes prochaines années et de la limite inférieure fixée pour l'utilisation du thermomètre à résistance de platine dans l'échelle révisée. La façon dont ces problèmes seront résolus au mieux n'est nullement évidente.

Reçu le 4 avril 1978.

ANNEXE T 7

Dispositif à supraconduction pour fournir des températures de référence inférieures à 0,5 K

par R. J. SOULEN Jr.

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

(Traduction du Document CCT/78-17)

1. INTRODUCTION

L'une des caractéristiques de la prochaine Echelle Internationale Pratique de Température sera son extension aux températures inférieures à 13,8 K, limite inférieure actuelle de l'EIPT-68. Cette extension dépendra en partie de la disponibilité de points de référence. La mise au point du dispositif à points fixes supraconducteurs SRM 767 a déjà rendu possible la définition d'une échelle jusqu'à 0,5 K [1]. Dans le présent document, nous rendons compte des progrès faits dans la réalisation d'un nouveau dispositif à points fixes supraconducteurs contenant différents matériaux qui permettrait de poursuivre l'extension jusqu'à des températures de 0,015 K.

2. DESCRIPTION PHYSIQUE ET CONSTRUCTION

Le nouveau dispositif fonctionne sur le même principe, c'est-à-dire expulsion de flux par effet Meissner, que le SRM 767, qui contient cinq matériaux, donnant une température de transition reproductible (T_c) entre 0,5 K et 7,2 K. La configuration physique effective de ce dispositif à basses températures de transition est toutefois quelque peu différente du SRM 767, essentiellement parce qu'il est plus délicat

de maintenir le contact thermique aux très basses températures. La figure 1 montre la disposition des enroulements et des échantillons qui s'est avérée satisfaisante.

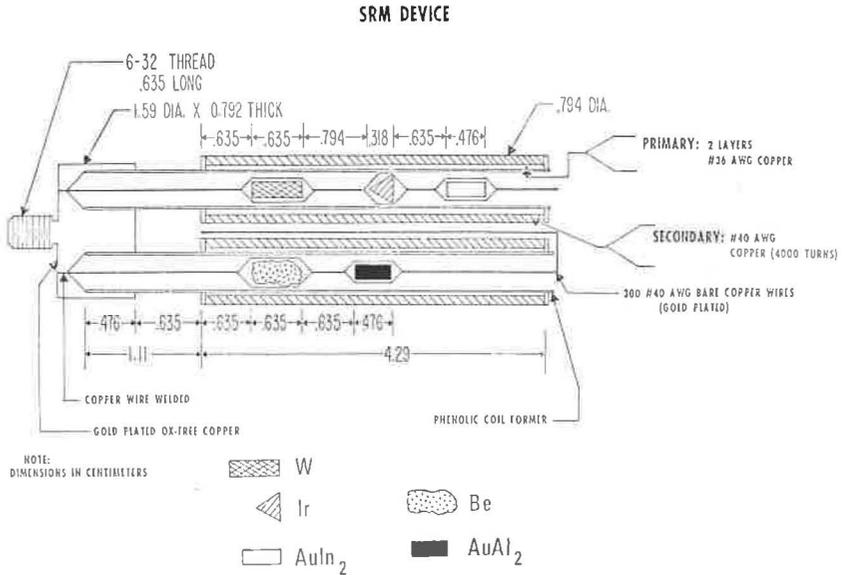


Fig. 1.- Dispositif à point fixe qui fournit cinq températures de référence au-dessous de 0,5 K. Des échantillons de W, Be, Ir, AuAl₂ et AuIn₂ sont entourés de fils de cuivre qui entourent aussi deux groupes d'enroulements. Le dispositif est terminé par un filetage de 6-32 pour être facilement adapté à un appareil.

3. EXPÉRIENCES ET RÉSULTATS

Pour contrôler la reproductibilité des valeurs de T_C de chaque échantillon et pour déterminer les variations de T_C d'un échantillon à l'autre, on a soumis trois dispositifs construits d'après la figure 1 à quatre cycles entre la température ambiante et 0,011 K. Les résultats de ces cycles thermiques, entre 300 K et 0,01 K, sur les trois prototypes sont résumés au Tableau I. Il faut remarquer que l'hystérésis qui résulte du phénomène de retard à la transformation, était assez important dans plusieurs cas pour empêcher la mesure.

TABLEAU I

Mesures relatives aux transitions supraconductrices
pour trois dispositifs à points fixes

Matériau	Série N°	T_c Cycle 1 (mK)	T_c Cycle 2 (mK)	T_c Cycle 3 (mK)	T_c Cycle 4 (mK)	Largeur, \bar{w} (mK)	Hystérésis (mK)
W	1	15,3	15,4	15,5	15,5	0,15	0,03-0,08
W	2	15,3	15,1	15,4	15,5	0,2	0,05
W	3	-	-	15,4	15,0	0,2	0,5
Be	1	20,7	-	22,7	21,9	0,06	0,7-1,4
Be	2	23,3	-	23,4	22,7	0,06	0,2-1,2
Be	3	22,4	-	24,7	23,2	0,05	2,5-4,5
Ir	1	97,56	97,61	97,49	97,40	0,4	< 0,1
Ir	2	97,36	97,36	97,18	97,13	0,4	< 0,1
Ir	3	97,68	97,84	97,77	97,58	0,7	< 0,1
AuAl ₂	1	159,04	158,87	159,01	159,18	0,4	< 0,1
AuAl ₂	2	158,87	158,77	158,93	159,10	0,8	< 0,1
AuAl ₂	3	159,10	158,87	159,10	159,21	0,09	< 0,1
AuIn ₂	1	204,0	203,96	204,08	204,16	0,3	< 0,1
AuIn ₂	2	203,9	203,86	203,94	204,06	0,2	< 0,1
AuIn ₂	3	204,06	203,86	204,0	204,14	0,2	< 0,1

Je remercie mon collègue D.B. Utton de m'avoir communiqué ses études non publiées sur AuAl₂, Mr F. Biancaniello qui a préparé des boules de AuIn₂ et AuAl₂, Mr R.B. Dove qui a été d'une grande aide pour les aspects techniques de ces recherches et l'Office of Standard Reference Materials du NBS pour sa contribution.

Document original reçu le 7 mars 1978,
version abrégée reçue le 31 mai 1978.

BIBLIOGRAPHIE

1. Ce volume, Annexe T 8.
2. BUHRMAN (R.A.), HALPERIN (W.P.), *J. Low Temp. Phys.*, 16, 1974, p. 409.

ANNEXE T 8

Points fixes supraconducteurs pour des températures supérieures à 0,5 K

par J. F. SCHOOLEY

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

(Traduction du Document CCT/78-15)

On comprend maintenant assez bien le principe qui consiste à utiliser une transition supraconductrice pour avoir une température de référence fixe. Depuis environ cinq ans, le National Bureau of Standards peut fournir un dispositif, "Standard Reference Material (SRM) 767", qui utilise des échantillons de grande pureté des supraconducteurs Pb, In, Al, Zn et Cd. Avec ces échantillons, on peut espérer obtenir des températures de référence uniformes à ± 1 mK près d'une série à l'autre et d'un dispositif à l'autre quand on les utilise selon les méthodes conseillées [1]. On a attribué des températures provisoires aux transitions supraconductrices du dispositif, dans l'Echelle Provisoire de Température de 1976 entre 0,5 K et 30 K [2].

Le NBS a reçu trois suggestions essentielles pour améliorer le dispositif SRM 767. Ce sont :

- 1) étendre le domaine de température auquel on peut appliquer le principe du point fixe supraconducteur ;
- 2) réduire les incertitudes sur les températures du SRM 767, si possible à $\pm 0,1$ mK ;
- 3) tenter de vérifier dans quelle mesure les échantillons individuels du dispositif fournissent une température de référence qui est caractéristique du matériau pur.

Dans une autre annexe, R.J. Soulen [3] rend compte des progrès qui ont été faits pour obtenir des températures de référence supraconductrices au-dessous de 0,5 K. Dans le présent document, nous rendons compte des progrès effectués à des températures supérieures. Il y a eu peu de progrès, toutefois, dans le sens de la troisième suggestion ; nous souhaitons souligner à nos collègues, en particulier à ceux qui peuvent avoir des matériaux supraconducteurs d'origines différentes de celle des échantillons du NBS, l'utilité de comparaisons d'échantillons de référence. De telles comparaisons permettraient d'être certain que les températures de référence qui en résultent peuvent être obtenues en préparant le matériau dans n'importe quel laboratoire.

Dans notre laboratoire, on a préparé des échantillons de Pb, In, Al, Zn et Cd de façon spéciale en les recuisant soigneusement. Sur ces échantillons, on a trouvé que les largeurs de transitions supraconductrices étaient aussi petites que 0,4 mK pour chaque élément. Toutefois, on n'a pas encore mesuré la reproductibilité des valeurs de T_C d'un échantillon à l'autre ni d'une expérience à l'autre.

Nous avons préparé plusieurs échantillons de Nb avec des largeurs de transition aussi petites que 9 mK, par chauffage résistif de fil de Nb à une température de 1600 °C dans un vide de 10^{-11} Pa. Nous étudierons la reproductibilité de la température obtenue avec des échantillons de ce type.

Nous avons préparé de nombreux échantillons de Nb_3Sn ($T_C \approx 18,0$ K) et de V_3Ga ($T_C \approx 15,0$ K), en utilisant principalement une méthode de dépôt par vaporisation qui consiste à chauffer un fil de Nb ou de V en présence de vapeur de Sn ou de Ga à 700 °C - 1100 °C. Les largeurs de transition respectives n'ont toutefois pas été inférieures à 17 mK et 40 mK.

Nous continuons d'étudier ces supraconducteurs dans l'espoir de collaborer avec d'autres laboratoires de métrologie pour produire d'utiles points de référence à basse température.

Document original reçu le 7 mars 1978,
version abrégée reçue le 31 mai 1978.

BIBLIOGRAPHIE

1. SCHOOLEY (J.F.), SOULEN Jr (R.J.), EVANS Jr. (G.A.), *NBS Special Publication 260-44*, 1972. Voir aussi SOULEN Jr. (R.J.) [3].
SCHOOLEY (J.F.), EVANS Jr. (G.A.), *Rev. Sci. Inst.*, 44, 1973, p. 1537.
 2. Ce volume, p. T 7 ; *Metrologia*, 15, 1979, p. 65.
 3. SOULEN Jr. (R.J.), Ce volume, Annexe T 7.
-

ANNEXE T 9

Reproductibilité des mesures faites avec des thermomètres à résistance de germanium au point d'ébullition de ^4He (4,2 K)

par L. SUR

Amt für Standardisierung, Messwesen und Warenprüfung (Rép. Dém. Allemande)

(Traduction du Document CCT/78-22)

Douze thermomètres au germanium de chez Scientific Instruments Inc. (type N2D et N2D spécial) ont été soumis à des essais de stabilité à la température du point d'ébullition de ^4He .

Les thermomètres ont été soumis à des chocs thermiques, jusqu'à cinquante fois, en les immergeant dans l'hélium liquide puis en les portant à nouveau à la température ambiante. La mesure de la résistance $R(4,2)$ à 4,2 K a été effectuée après chacune des cinq premières immersions, puis après la dixième et ensuite toutes les dix immersions. Le courant de mesure était de 5 μA . Le déroulement du cycle thermique était le suivant : refroidissement à 4,2 K en six minutes environ, durée d'immersion dans l'hélium liquide, environ trois minutes, remontée à la température ambiante en six minutes environ. Les mesures de $R(4,2)$ étaient effectuées après une durée d'immersion dans l'hélium liquide supérieure à une heure, la température du bain étant constante à mieux que 0,02 mK/min.

L'installation de mesure comportait un manomètre pour mesurer la pression de vapeur de l'hélium et un système pour immerger les thermomètres à germanium. L'incertitude du manomètre (manomètre à mercure en forme de U avec lecture par cathétomètre) était de ± 6 Pa.

Le système d'immersion était constitué essentiellement d'un cylindre creux en cuivre, de diamètre extérieur 14 mm, dont le volume intérieur était relié au manomètre au moyen d'un tube capillaire de 4 mm de diamètre avec un dispositif intermédiaire pour absorber le rayonnement. La partie du tube capillaire exposée à l'hélium liquide était placée dans un tube protecteur de 8 mm de diamètre pour empêcher l'apparition de points froids. De plus, des puits avaient été ménagés dans le cylindre en cuivre pour recevoir six thermomètres à germanium. On utilisait comme cryostat un récipient normal d'hélium liquide de 10 l de capacité.

Comme il est de pratique courante, on mesurait les valeurs de la résistance des thermomètres par comparaison à une résistance étalon de 1 k Ω au moyen d'un potentiomètre à courant continu (type R 348, fabriqué en U.R.S.S.). A 4,2 K, le défaut de reproductibilité des mesures de différence de potentiel était équivalent à une incertitude de $\pm 0,03$ mK sur la température, avec un niveau de confiance de 0,997. Six des douze thermomètres soumis aux essais ont présenté une instabilité (niveau de confiance de 0,997) de plus de $\pm 1,5$ mK. Les six autres thermomètres avaient des instabilités de $\pm 1,20$ mK, $\pm 1,20$ mK, $\pm 1,04$ mK, $\pm 0,91$ mK, $\pm 0,72$ mK et $\pm 0,59$ mK.

Reçu le 8 mars 1978.

ANNEXE T 10

Thermomètre à résistance de carbone très stable

par S. F. VORFOLOMEEV, G. A. KYTIN, O. F. POGORELOVA et D. N. ASTROV

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

(Traduction du Document CCT/78-44)

Le thermomètre à résistance de carbone est l'instrument couramment utilisé pour la mesure des basses températures. Ses avantages et ses inconvénients sont bien connus, le principal inconvénient étant son assez faible stabilité. Lors de nos premiers essais pour améliorer ce paramètre important nous avons obtenu un carbone composite qui, pour la même dimension de l'élément sensible à quatre bornes, permet d'obtenir une dispersion de 15 % de la résistance des thermomètres à 4,2 K. A cette température, la stabilité courante était de 2 mK environ ; à 20 K, elle était de 10 mK [1]. Les récentes améliorations de la technique, en particulier ce qui touche au nettoyage de la surface de l'élément sensible et à sa protection contre les influences atmosphériques, permettent d'améliorer nettement sa stabilité. Pour de nombreux spécimens, la stabilité à la température de l'azote liquide est de l'ordre de quelques millikelvins ; elle est toujours meilleure que 1 mK à 20 K. Les essais de stabilité de ces thermomètres au point de transition supraconducteur du plomb ont donné des résultats qui se sont avérés être à l'intérieur des limites de reproductibilité de ce point de transition lui-même, pour le même échantillon de plomb et pour des mesures qui ont duré pendant un an. La stabilité indiquée est pratiquement la même pour des matériaux d'autres

compositions qui permettent d'obtenir la courbe convenable $R(T)$ pour le domaine du millidegré ou au voisinage de 70 K. La stabilité élevée que l'on a observée et qui peut être encore améliorée par la technique de fabrication du thermomètre est en particulier due à l'absence d'effet piézorésistant du matériau employé et au fait que de nouvelles dislocations n'apparaissent pas au cours des cycles thermiques, alors que ce sont là les deux sources principales de l'instabilité des thermomètres à germanium. On peut obtenir une courbe d'étalonnage représentée par une relation polynomiale entre les logarithmes de R et de T , comme celle qui est utilisée pour les thermomètres à résistance du germanium. Mais on a trouvé qu'une relation avec un plus petit nombre de termes et avec des exposants non numériques promet une meilleure approximation.

Reçu le 9 mai 1978.

BIBLIOGRAPHIE

1. VORFOLOMEEV (S. Ph.) *et al.*, *Pribori i texhnika eksperimenta*, N° 1, 1977, p. 262.

ANNEXE T 11

Sur la correction de sorption pour le thermomètre à gaz de précision

par A. P. GERSHANI^K, M. S. GLIKMAN et D. N. ASTROV

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

(Traduction du Document CCT/78-45)

La sorption de l'hélium dans le thermomètre à gaz de précision est la source d'une correction importante qu'il est assez difficile d'estimer. Ces difficultés tiennent au fait que l'on connaît mal la valeur réelle de la surface du réservoir du thermomètre à gaz et le lien complexe qui existe entre la sorption par centimètre carré et la température, la pression, les propriétés du matériau utilisé, etc. Les valeurs de la correction de sorption qui ont été déjà publiées diffèrent de façon significative et varient de 60 mK [1] et 10 mK [2] à 0,1 mK [3] à la température de l'hélium. Même si la correction estimée est négligeable, il est assez difficile d'être certain que la valeur de la surface réelle que l'on a prise en compte est correcte et qu'il n'y a pas d'impuretés ayant une grande surface dans le réservoir, surtout lorsque la surface de celui-ci a été plaquée chimiquement. Ces facteurs et d'autres facteurs semblables peuvent décaler fortement les résultats des mesures de température et il est difficile d'en maîtriser la présence. On a l'impression que pour chaque expérience au thermomètre à gaz de précision, il est nécessaire de mesurer la valeur de la sorption pour l'instrument lui-même.

Pour obtenir la sorption de façon directe, il faut mesurer la surface réelle du réservoir, par exemple par la

méthode de sorption du xénon à la température de l'azote liquide [4], la surface d'une quantité suffisante du même matériau, bien dégazé, que celui qui est utilisé pour le réservoir, et calculer alors la sorption de l'hélium sur cet échantillon présentant une grande surface, pour toutes les pressions et toutes les températures. A notre connaissance, cette méthode complexe n'a jamais été utilisée. Une autre possibilité [5], qui consiste à placer des disques métalliques dans le réservoir du thermomètre à gaz donne bien sûr une estimation de l'influence de la sorption, mais la valeur obtenue peut être assez éloignée de celle qui correspond à l'instrument réel.

Nous avons effectué des recherches en vue d'élaborer une méthode pour déterminer la correction de sorption et nous avons trouvé une équation universelle qui donne la sorption pour différents matériaux dans un grand intervalle de température [6]. Cette équation permet de réduire nettement le nombre des mesures nécessaires pour calculer la sorption. On a obtenu cette équation en utilisant pour l'adsorbat le modèle liquide quand le film est épais et le modèle solide quand la sorption est faible. Selon les résultats expérimentaux [7], nous avons aussi supposé que la chaleur de sorption de l'hélium ne dépend pas de la température.

L'équation est la suivante :

$$\ln \frac{V_g}{V_{st}} = \ln \frac{\tau}{\theta} + \frac{\theta}{\tau} \frac{L}{RT} + \frac{\alpha}{RT\tau^3} \quad (1)$$

Elle permet de calculer la valeur de la sorption depuis les températures les plus basses de nos expériences (1,5 K) jusqu'à la température ambiante et au-delà. Ici V_g est le volume molaire de la phase gazeuse, V_{st} le volume molaire "étalon" que l'on prend égal à $30 \text{ cm}^3/\text{mol}$, L la chaleur de vaporisation "étalon" de l'hélium ($L/R = 10 \text{ K}$), R la constante des gaz, α le coefficient d'interaction entre l'adsorbat d'hélium et la paroi; τ , grandeur sans dimension, caractérise l'épaisseur du film. La sorption réduite θ est définie par :

$$\theta = \frac{\alpha}{1,13 \alpha_m} \quad (2)$$

où α est la sorption, α_m la sorption de l'argon ou de l'azote en monocouche. Le nombre 1,13 provient de la différence entre la sorption en monocouche pour l'argon et la structure quasi-

liquide de l'hélium. A partir du modèle liquide pour les films épais et du modèle solide pour les films minces, nous avons obtenu la relation entre θ et l'épaisseur de la couche

$$\tau = 0,686 + 0,18 \theta + 0,82 \theta e^{-4/\theta} \quad (3)$$

En utilisant un modèle plus fort pour les interactions dans l'adsorbat pour $\theta \geq 2,5$, nous avons obtenu l'équation

$$\ln \frac{p_s}{p} = \frac{(L-RT) \left(\frac{\theta}{\tau} - 1\right)}{RT \left(\frac{\theta-0,5}{2}\right)^3} + \frac{\alpha}{RT\tau^3} \quad (4)$$

qui rend mieux compte que la formule (1) des résultats expérimentaux aux températures inférieures à 5 K. Les deux équations (1) et (4), après avoir utilisé les équations (2) et (3), rendent compte à ± 10 % près de tous les résultats expérimentaux que nous connaissons pour la sorption sur des matériaux très différents [8-14], avec une valeur de α qui ne dépend ni de la pression ni de la température.

Pour déterminer la correction de sorption, il suffit d'avoir des valeurs de α_m et α indépendantes de la pression et de la température. Ces valeurs caractérisent la surface réelle et la nature du matériau du réservoir. Il est assez facile de les mesurer pour l'instrument lui-même et d'utiliser les équations (1) ou (4) pour calculer la sorption à toutes les températures et toutes les pressions.

Il est commode d'effectuer les mesures à des pressions de l'ordre de 0,1 Pa et à la température de l'hélium liquide. La quantité d'hélium adsorbé sera comparable à la quantité à l'état gazeux et on peut mesurer la pression elle-même avec une précision suffisante. Le thermomètre à gaz étant à 4,2 K, il faut le remplir avec une certaine quantité d'hélium pour avoir une pression de l'ordre de 0,1 Pa. Il faut ensuite refroidir le thermomètre à environ 2 K et le remplir de nouveau avec une certaine quantité de gaz pour faire remonter la pression à une valeur du même ordre. On peut calculer la sorption α d'après la relation

$$\alpha = \frac{V_c}{RT} \frac{\sum (p_i - p_f)}{n} - \frac{p_g V_g}{RT} \quad (5)$$

où V_c est la valeur du volume étalonné à la température ambiante T , p_i et p_f les pressions dans V_c avant et après remplissage du thermomètre à gaz, n le nombre de remplissages ($n = 2$ ou 3),

p_g, V_g, T_g les paramètres du thermomètre à gaz (il faut apporter à p_g une correction pour l'effet thermo-moléculaire). En utilisant le α mesuré et l'équation (1), on peut calculer α et α_m et de là la sorption pour toutes les pressions et toutes les températures.

Il est intéressant de mentionner que l'on a trouvé que la valeur de α était pratiquement la même pour des matériaux de natures très différentes comme le cuivre, l'argent, le verre, le "graphoil", l'acide benzoïque. On a utilisé les résultats de [10-14] pour ce calcul. On a trouvé que la valeur de α est de "38-40 K (Layer)³" et on peut l'utiliser pour déterminer la sorption dans le thermomètre à gaz. En utilisant cette expression de α , il suffit de mesurer la sorption à une seule température.

La figure 1 montre les résultats de nos mesures de sorption, en fonction de la température, sur le cuivre traité.

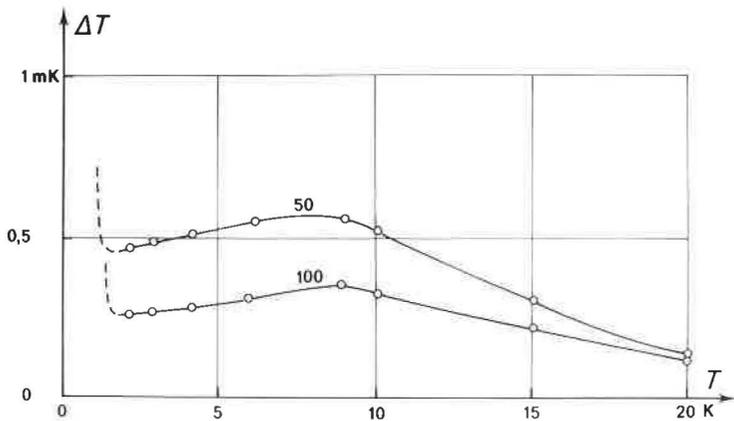


Fig. 1.- Corrections de sorption pour un réservoir en cuivre, pour des pressions de 50 et 100 kPa à la température ambiante.

Ils sont présentés comme une correction de température pour un thermomètre à gaz à volume constant de 500 cm^3 ($\varnothing = 60 \text{ mm}$, $h = 160 \text{ mm}$), pour des pressions de 50 kPa et 100 kPa à la température ambiante. La correction varie de 0,1 à 0,6 mK, avec un maximum au voisinage de 9 K et ne s'annule pas, même à 20 K.

BIBLIOGRAPHIE

1. KEESOM (W.H.), SCHMIDT, *Proc. Roy. Acad. Amst.*, 36, 1933, p. 832.
 2. KIRENKOV (I.I.), ISRAILOV (K.S.), DIYKOV (U.V.), *Metrologia*, 10, 1974, p. 41.
 3. QUINN (T.J.), COMPTON (J.P.), *Reports Progr. Phys.*, 38, 1975, p. 141.
 4. GREGG (S.), SINGH (K.), "Adsorption, specific surface and porosity", Publ. "Mir", Moscow, 1970.
 5. BERRY (K.H.), *Comité Consultatif de Thermométrie*, 9^e session, 1971, p. T 115.
 6. GERSHANIK (A.P.), GLIKMAN (M.S.), *J. Physicheskoi Himii*, 51, 1977, p. 2293.
 7. GERSHANIK (A.P.), GLIKMAN (M.S.), - *ibid.*-, 50, 1976, p. 1029.
 8. LONG (E.A.), MEYER (L.), *Advan. Phys.*, 2, 1953, p. I.
 9. CHESTER (M.), YANG (L.G.), STEPHENS (J.B.), *Phys. Rev. Letters*, 29, 1972, p. 211.
 10. DOUNT (J.G.), LERNER (E.J.), *Low Temp. Phys.*, 8, 1972, p. 79.
 11. BRETZ (M.), DASH (J.G.), HICKERNELL (D.C.), McLEAN (E.O.), VILCHES (E.O.), *Phys. Rev. A*, 8, 1973, p. 1589.
 12. HOBSON (J.P.), *Can. J. Phys.*, 37, 1959, p. 300.
 13. GERSHANIK (A.P.), GLIKMAN (M.S.), *J. Physicheskoi Himii*, 47, N 30, 1973.
 14. GERSHANIK (A.P.), GLIKMAN (M.S.), KONENKOV (V.A.), *J. Physicheskoi Himii*, 49, N 7, 1975.
-

ANNEXE T 12

Une cellule scellée en cuivre pour réaliser les points triples des gaz condensés

par K. MITSUI et A. INABA

National Research Laboratory of Metrology (Japon)

(Traduction du Document CCT/78-28)

Pour réaliser plus facilement les points triples de gaz condensés, on a construit et essayé une cellule en cuivre de petites dimensions, autonome, destinée à être employée dans un cryostat adiabatique. Le schéma de construction de la cellule est donné à la figure 1 ; la figure 2 montre un ensemble

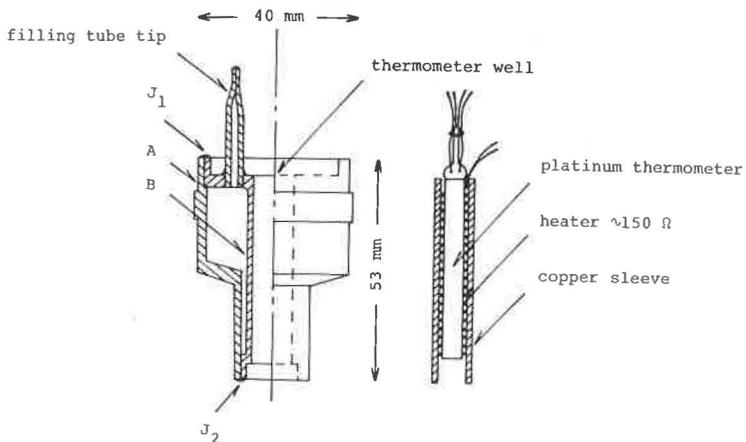


Fig. 1.- Construction de la cellule
Espace pour le gaz condensé : 0,88 cm³
Volume total : 14,8 cm³

Fig. 2.- Ensemble thermomètre
et chauffage.

thermomètre et chauffage adaptable dans le puits de la cellule. Les principales caractéristiques de la cellule sont les suivantes :

- 1) En supposant que la mesure de température soit faite lorsque l'équilibre thermique est atteint dans les conditions d'adiabatisme, tout le corps de la cellule est en cuivre qui est un bon conducteur thermique.
- 2) La cellule comporte deux parties (A et B sur la figure 1) qui sont assemblées par soudure sous argon sans utiliser de décapant le long des deux jonctions circulaires, J1 et J2 ; un puits, ouvert aux deux extrémités, pour le thermomètre est ménagé au centre de la cellule.

Après construction, on a nettoyé la surface interne de la cellule avec un produit nettoyant acide et on l'a rincée à l'eau chaude ; on a alors fait le vide dans la cellule et on l'a dégazée par chauffage. On a rempli les cellules avec des échantillons de gaz obtenus dans le commerce (Ar, Kr, Xe, et CH₄), de manière que le gaz condensé remplisse juste l'étroit espace cylindrique à la périphérie du puits thermométrique. On a queusoté le tube de remplissage en cuivre et on a soudé son extrémité à l'argent pour en assurer l'étanchéité.

Bien que l'on n'ait pas encore effectué d'essais de longue durée, on a pu constater que le fonctionnement de la cellule était assez stable [1,2,3]. En ce qui concerne des échantillons de gaz inertes, d'une pureté d'environ 99,995 % ou supérieure, on peut reproduire le point triple à $\pm 0,2$ mK près en utilisant ce type de cellule avec un cryostat adiabatique.

Reçu en mars 1978.

BIBLIOGRAPHIE

1. Ce volume, Annexe T 14.
2. *Ibid.*, Annexe T 17.
3. *Ibid.*, Annexe T 1, Document CCT/78-24.

ANNEXE T 13

Réalisation du point triple de l'argon dans une cellule scellée

par G. T. FURUKAWA

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

(Traduction du Document CCT/78-14)

1. INTRODUCTION

Il semble que les cellules scellées qu'utilisent Bonnier [1] et Pavese [2] pour réaliser des points triples, présentent les caractéristiques souhaitables pour des comparaisons entre laboratoires d'appareils à points fixes. De plus, il semble que l'on puisse avec ce type de cellule reproduire à 0,1 ou 0,2 mK près la température du point triple d'un échantillon donné (par exemple d'argon). Ainsi, il est possible qu'au-dessous de 0 °C la future EIPT soit définie plus exactement grâce aux cellules à point triple transportables [3].

Aux fins d'échange et de comparaison de points fixes, on a commencé au NBS des recherches sur la réalisation de points triples utilisant les techniques décrites par Bonnier et Pavese. Le présent rapport donne une brève description des résultats obtenus jusqu'ici avec l'argon.

2. CELLULE SCELLÉE, ÉCHANTILLON D'ARGON ET APPAREIL DE MESURE

La cellule scellée utilisée dans cette étude a été construite en acier inoxydable avec une forme semblable à celle décrite par Bonnier [1]. La cellule contenait deux thermomètres.

Une enveloppe mince en cuivre doré renfermait la cellule, fournissant une surface isotherme pour assurer l'adiabaticisme et la protection des thermomètres en partie exposés aux variations de la température extérieure. Selon le fournisseur, l'échantillon d'argon qui a été utilisé était pur à 99,999 9 % avec moins de $0,2 \times 10^{-6}$ d'oxygène. Aucune analyse de vérification n'a été faite pour l'instant.

Pour les mesures, on a utilisé un calorimètre adiabatique [4] qui était employé auparavant pour des études de capacité thermique. Un comparateur de courant continu Guildline, modèle 9975 [5] a été utilisé en liaison avec un enregistreur graphique pour la mesure continue de la résistance du thermomètre.

3. RÉSULTATS ET CONCLUSION

La figure 1 donne le résultat des mesures. Pour les deux thermomètres à résistance de platine, on a trouvé comme valeurs du point triple 83,800 40 K et 83,800 37 K.

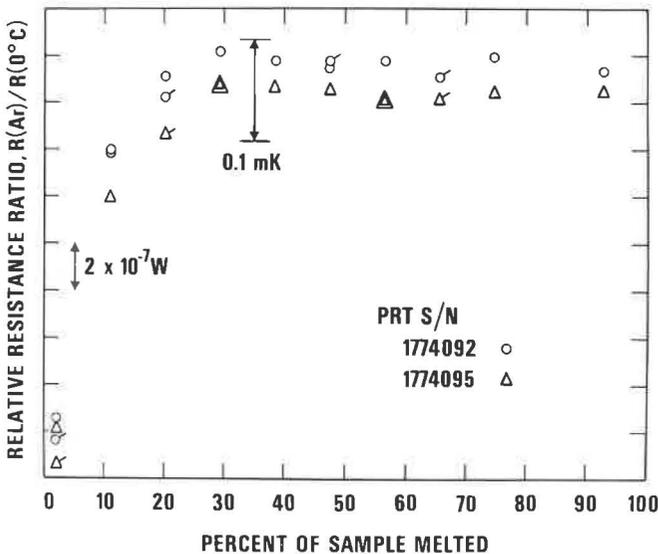


Fig. 1.- Points de fusion de l'échantillon d'argon en fonction du pourcentage de substance fondue.

Ce pourcentage est calculé au moyen de l'expression
[(apport de chaleur)/(chaleur totale de fusion)] x 100.

○ et △ : Observations faites après une nuit pour atteindre l'équilibre.

La valeur moyenne 83,800 38 K est supérieure de 0,61 mK à la valeur moyenne 83,799 77 obtenue antérieurement dans ce laboratoire avec deux appareils différents à point de congélation de l'argon [6]. On peut peut-être attribuer la différence à la plus grande pureté de l'échantillon d'argon utilisé dans les mesures présentes ou à la différence de méthode.

Les mesures courantes au NBS montrent qu'on peut préparer des cellules à point triple de l'argon scellées avec des échantillons de pureté très élevée. Les observations de température qui résultent de l'utilisation de la cellule en mode calorimétrique indiquent que, avec la conception actuelle de la cellule, on peut approcher l'équilibre à seulement 0,1 mK près 15 minutes après la fusion de seulement 20 % de l'échantillon. L'échange de cellule de ce type entre les différents laboratoires pourrait réduire la différence sur la définition du point triple de l'argon à 0,1 mK ou moins.

Document original reçu le 7 mars 1978,
version abrégée reçue le 31 mai 1978.

BIBLIOGRAPHIE

1. BONNIER (G.), MALASSIS (R.), *Bull. BNM*, 6, 1975, p. 19.
2. PAVESE (F.), CAGNA (G.), FERRI (D.), Proceedings Sixth International Cryogenic Engineering Conference, Grenoble, 1976, paper E 13.
3. PAVESE (F.), DEMONTI (G.), FERRI (D.), Proceedings Cryogenic Engineering Conference, Boulder, Colorado, 1977, paper KC-3.
4. FURUKAWA (G.T.), REILLY (M.L.), *J. Res. NBS*, 74 A, 1970, p. 617.
5. Les références aux marques de fabrique sont faites seulement pour l'identification et la simplification de la description de l'appareil et n'impliquent en aucune façon l'approbation de ces matériels par le National Bureau of Standards.
6. FURUKAWA (G.T.), BIGGE (W.R.), RIDDLE (J.L.), *Temperature, Its Measurement and Control in Science and Industry*, Vol. 4, I, p. 231, Instrument Society of America, Pittsburgh, 1972.

ANNEXE T 14

Réalisation du point triple de l'argon au moyen d'une cellule scellée

par A. INABA et K. MITSUI

National Research Laboratory of Metrology (Japon)

(Traduction du Document CCT/78-23)

Au NRLM, on a réalisé le point triple de l'argon au moyen de cellules scellées* en cuivre, placées dans un cryostat adiabatique. Les cellules utilisées contiennent une petite quantité de gaz commercial comportant des quantités différentes d'impuretés. Pour évaluer le point triple de la substance pure et le taux d'impuretés dans les échantillons utilisés, on a employé la méthode d'analyse thermique. Quatre séries de mesures ont montré qu'on peut déterminer la température du point triple de l'argon pur à 0,1 mK près.

TABLEAU I

Caractéristiques des deux cellules utilisées

Cellule	1	2
Pression dans la cellule à la température ambiante (atm)	≈ 80	≈ 80
Quantité de matière de l'échantillon (mol)	0,047	0,048
Chaleur latente (J)	56,4	56,6
Fraction totale d'impuretés	5×10^{-6}	17×10^{-6}

* Ce volume, Annexe T 12.

Mesures

Après refroidissement du gaz à une température d'environ 1 K au-dessous du point triple et maintien à cette température pendant une nuit, on a fait les mesures en utilisant un pont de Kusters (Guildline Instruments, modèle 9970), avec une exactitude relative de 1×10^{-7} . Les résistances étalons utilisées, 1 Ω et 10 Ω , sont directement rattachées à Ω_{77} -ETL. On a réduit à courant nul toutes les valeurs de résistance du thermomètre à résistance de platine en extrapolant les mesures faites avec 1 et $\sqrt{2}$ mA. Pour évaluer la fraction fondue (f), on a utilisé un processus de chauffage intermittent en plusieurs étapes. Pour chaque étape, il fallait 1 à 2 heures après coupure du chauffage pour obtenir l'équilibre et atteindre une stabilité de température meilleure que 10 μ K.

TABLEAU II

Résultats

Cellule et série	Date	W
1-1	11 octobre 1977	0,216 063 2
1-2	12	2 8
2-1	13	3 0
2-2	14	2 8

En prenant pour résultats les températures finales à chaque étape du chauffage, l'élévation soudaine à la fin du palier, due à l'apport de chaleur, était à peine décelable jusqu'à $f = 1$ ainsi que l'indique la figure 1. Ce résultat montre qu'il n'est pas nécessaire, pour la détermination du point triple, de considérer comme significatives les quantités d'impuretés relevées ici dans l'argon, à la condition d'adopter pour la température du point triple la valeur correspondant à $1/f = 0$. La différence entre la valeur de $W(T_{O_2})$ calculée à partir de $W(T_{Ar})$ et celle qui a été déterminée au NRLM au moyen du point d'ébullition de l'oxygène était équivalente à 1,75 mK. Cet écart peut être attribué essentiellement à l'incertitude sur la réalisation du point d'ébullition (non pas du point de rosée) de l'oxygène, mais il peut aussi provenir partiellement de la non-unicité de T_{68} ou de l'erreur d'interpolation.

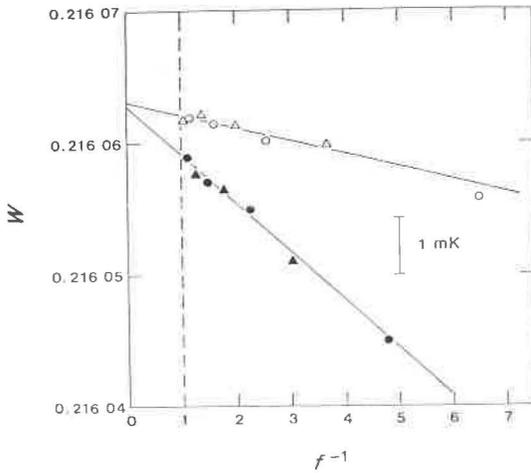


Fig. 1.- Valeurs de W correspondant aux températures d'équilibre en fonction de l'inverse de la fraction fondue.

o cellule 1, série 1 ● cellule 2, série 1
Δ " 1 " 2 ▲ " 2 " 2

Reçu en mars 1978.

ANNEXE T 15

L'utilisation du point triple de l'argon d'après l'EIPT-68 (édition amendée de 1975)

par F. PAVESE

Istituto di Metrologia G. Colonnetti (Italie)

(Traduction du Document CCT/78-8)

Au chapitre II 2.a, après la définition du polynôme pour le domaine allant de 54,361 K à 90,188 K, le texte de l'édition de 1975 de l'EIPT-68 indique : "Les coefficients de cette fonction sont déterminés d'après les écarts mesurés au point triple et au point de rosée de l'oxygène (ou au point triple de l'argon, voir note (d), au Tableau I) et d'après la dérivée première de la fonction écart au point de rosée de l'oxygène, telle qu'elle résulte de l'équation (9)."

En conséquence, comme on utilise également le point triple de l'argon pour déterminer les coefficients de l'équation (9), il en résulte qu'à 83,798 K les valeurs des deux fonctions écart adjacentes sont égales :

$$A_3 + B_3 \cdot 83,798 + C_3 (83,798)^2 + A_4 \cdot 189,352 - C_4 (-189,352)^3 \cdot (-189,352 - 100) = 0 \quad (1)$$

et, à 90,188 K, on doit avoir égalité des valeurs des dérivées premières :

$$B_3 + 2 \cdot C_3 \cdot 90,188 = A_4 = C_4 \cdot (-182,962)^2 \cdot (-4 \cdot 182,962 - 3 \cdot 100) = 0 \quad (2)$$

La température de jonction des deux fonctions écart est toujours 90,188 K ; en utilisant le point triple de l'argon

comme point fixe, on ne peut éviter la discontinuité dans la valeur de $W(T)$ que si

$$A_3 + B_3 \cdot 90,188 + C_3 (90,188)^2 + A_4 \cdot 182,962 - C_4 (-182,962)^3 \cdot (-182,962 - 100) = \Delta = 0 \quad (3)$$

Les équations (2) et (3) établissent une relation entre A_3 , B_3 , C_3 , A_4 et C_4 qui devrait être valable pour n'importe quel thermomètre. Cela ne peut être le cas, ainsi qu'il ressort des valeurs de Δ pour environ 70 thermomètres, de modèles et de provenances différents, comme le montre la fig. 1a.

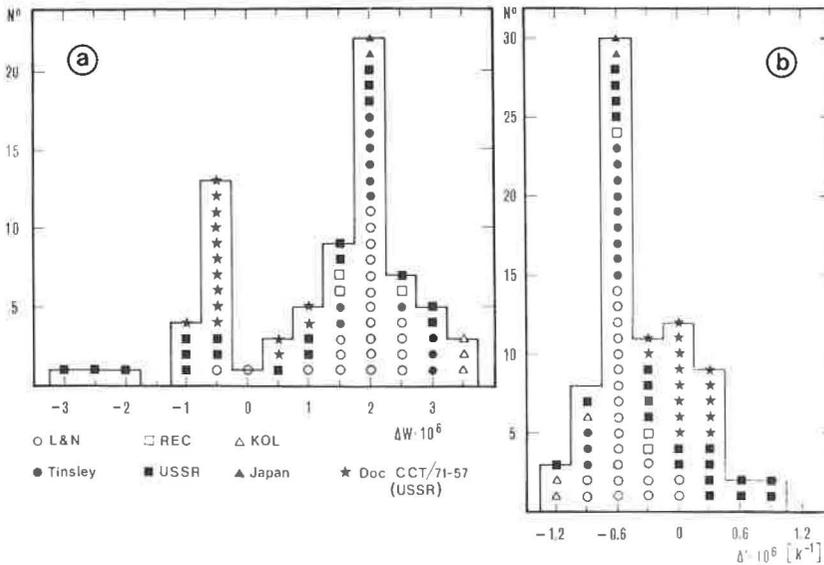


Fig. 1.- Discontinuité de l'EIPT-68 lorsque l'on utilise le point triple de l'argon.

a) discontinuité de la valeur de $W(T)$ à 90,188 K.

b) discontinuité de la valeur de $d(\Delta W)/dT$ à 83,798 K.

Pour de nombreux thermomètres, la discontinuité n'est pas négligeable ; en conséquence on ne peut mettre en oeuvre, à la lettre, la définition de l'EIPT-68 (1975) sans introduire une discontinuité de la valeur de $W(T)$ à 90,188 K. Il faut modifier ou clarifier cette définition.

Déplacer la température de jonction et la mettre à 83,798 K n'est pas une solution : il apparaît là une discontinuité de la dérivée première à moins que l'on ait :

$$B_3 + 2 \cdot C_3 \cdot 83,798 - A_4 - C_4 \cdot (-189,352)^2 \cdot (-4 \cdot 189,352 - 3 \cdot 100) = \Delta' = 0 \quad (4)$$

Là encore, les équations (4) et (2) établissent une relation entre B_3 , C_3 , A_4 , et C_4 indépendante du thermomètre considéré, relation qui, en général, n'est pas satisfaite. La valeur de Δ' pour les thermomètres mentionnés plus haut est donnée à la figure 1b.

A l'heure actuelle, la seule solution possible est d'obtenir W (90,188 K) à partir de l'étalonnage au point triple de l'argon dans le domaine de 83,798 K à 273,15 K et de l'utiliser ensuite comme point d'étalonnage dans le domaine de 54,361 K à 90,188 K.

L'autre possibilité est d'utiliser à la fois W et $d(\Delta W)/dT$ à 83,798 K (considérée comme température de jonction), mais, ainsi que le montre la figure 2, cette définition conduit

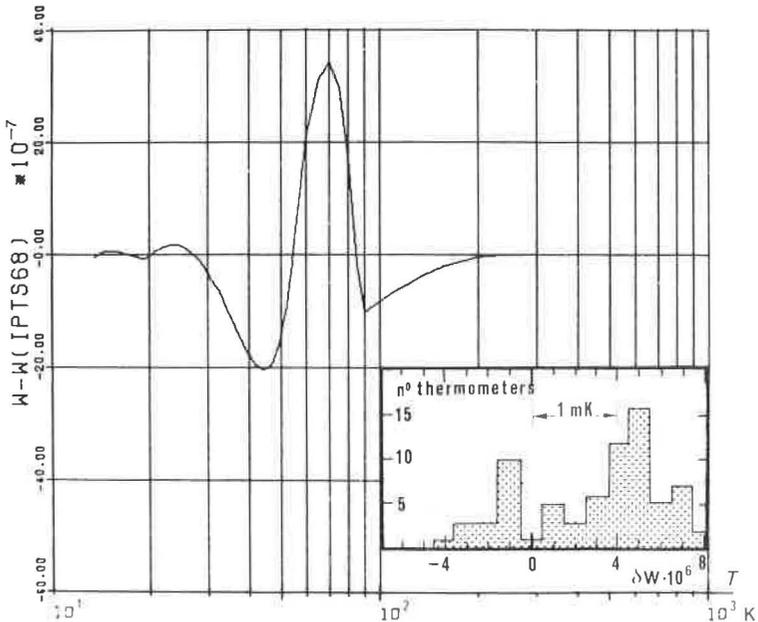


Fig. 2.- Ecarts entre l'EIPT-68 définie en utilisant le point triple de l'argon comme point de jonction (voir texte) et l'EIPT-68 définie en utilisant le point de rosée de l'oxygène.

à de grandes différences par rapport à la définition fondée sur le point de rosée de l'oxygène. L'EIPT-68 paraît dépendre particulièrement et de façon critique du choix du point fixe

aux alentours de 90 K. Ce fait, qui constitue un inconvénient de la définition mathématique actuelle, est probablement dû à l'anomalie bien connue de $\bar{W}_{\text{CCT-68}}$ au voisinage de 80-90 K. Cela entraîne une altération des fonctions écart qui a été observée sur environ 60 thermomètres de toute provenance ; seul le groupe des thermomètres de l'IMPR mentionné dans le document CCT/71-57 ne montre pas cette anomalie.

Il faut éliminer cette anomalie ; si l'on y parvient, il est vraisemblable que les différences qui apparaissent sur la figure 2 se réduiront dans des limites acceptables et que l'on pourra disposer aussi de la seconde solution.

Document original reçu le 6 mars 1978,
version corrigée reçue le 25 mai 1978.

ANNEXE T 16

Points de référence secondaires et autres points de référence

par R. C. KEMP et W. R. G. KEMP

National Measurement Laboratory (Australie)

(Traduction du Document CCT/78-30)

Au NML, on a réalisé les points de référence suivants :

Point de référence	Température dans l'EIPT-68 (K)	Reproductibilité (mK)	Incertitude totale (mK)	Qualification comme point fixe
Point triple du krypton	115,763 9	$\pm 0,2$	± 1	discutable à cause d'une éventuelle dépendance de la composition isotopique.
Point triple de l'azote	63,145 9	$\pm 0,1$	$\pm 0,5$	excellent
Point triple du néon naturel	24,563 5	$\pm 0,2$	± 1	bon
Transition α - β de l'azote	35,621	± 2	± 3	ne convient pas

Reçu le 13 mars 1978.

ANNEXE T 17

**Réalisation des points triples du krypton et du xénon
au moyen de cellules scellées**

par A. INABA et K. MITSUI

National Research Laboratory of Metrology (Japon)

(Traduction du Document CCT/78-26)

On a déterminé dans l'EIPT-68 les températures des points triples du krypton et du xénon réalisés dans des cellules scellées. Le processus expérimental et la méthode d'analyse des résultats étaient semblables à ceux qui ont été utilisés pour le point triple de l'argon.*

TABLEAU I

Caractéristiques des cellules employées

	Kr		Xe	
	(1)	(2)	(1)	(2)
Pression dans la cellule à la température ambiante (atm)	≈ 65	≈ 75	≈ 85	≈ 85
Quantité de matière de l'échantillon (mol)	0,041	0,047	0,052	0,053
Chaleur latente (J)	67,3	76,8	119,6	121,5
Fraction totale d'impuretés	36×10^{-6}	190×10^{-6}	28×10^{-6}	19×10^{-6}

* Ce volume, Annexe T 14.

extrapolées, pour lesquelles on a estimé l'incertitude totale à $\pm 0,2$ mK d'après la dispersion maximale des résultats.

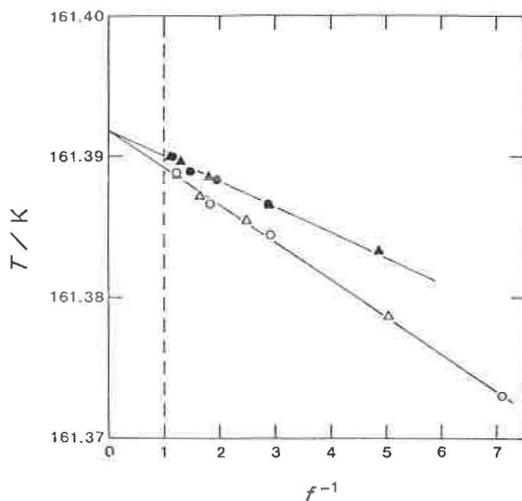


Fig. 2.- Température d'équilibre du xénon en fonction de l'inverse de la fraction fondue.

o cellule 1, série 1 ● cellule 2, série 1
 Δ " 1 " 2 ▲ " 2 " 2

TABLEAU III

Comparaison avec d'autres mesures

	T (K)	
Beaumont <i>et al.</i> (1961)*	115,768	} Kr
Michels and Prins (1962)*	752	
Lovejoy (1963)*	762	
Fender and Halsey (1965)*	786	
Bedford and Prins (1974)*	752	
NML (1976)**	765 4	
Notre résultat	766 1	
Michels and Prins (1962)*	161,375	} Xe
Lovejoy (1963)*	392	
Bedford and Prins (1974)*	375	
Notre résultat	391 8	

* Valeurs tirées de *Metrologia*, 13, 1977, p. 197.

** Comité Consultatif de Thermométrie, 11^e session, 1976, Annexe T 1, Document CCT/76-56.

ANNEXE T 18

Sur quelques propriétés du dioxyde de carbone

par J. ANCSIN

Conseil National de Recherches (Canada)

(Traduction du Document CCT/78-5)

On peut représenter, à ± 1 mK près, les résultats de certaines déterminations de la pression de vapeur de CO_2 faites récemment au NRC dans le domaine des températures comprises entre 170 K et 194,7 K par l'équation suivante :

$$\ln \frac{p}{p_0} = \sum_{i=-1}^{+2} a_i T^i$$

où

$$\begin{aligned} a_{-1} &= -3,900\ 224 \times 10^3 \text{ K} \\ a_0 &= 2,857\ 660 \times 10^1 \\ a_1 &= -6,687\ 764 \times 10^{-2} \text{ K}^{-1} \\ a_2 &= 1,181\ 504 \times 10^{-4} \text{ K}^{-2} \end{aligned}$$

Les températures sont mesurées dans l'EIPT-68, telle qu'elle est réalisée au NRC avec le thermomètre à résistance de platine, type capsule N° 11521389 de Leeds and Northrup, dont le comportement, par rapport à quelques autres, a été décrit par Kirby *et al.* (voir, dans leur article, le tableau 3, pour $n = 4$).

L'équation ci-dessus donne une température de sublimation sous la pression normale de

$$T = 194,670\ 7 \text{ K.}$$

D'autres mesures ont donné pour la température du point triple la valeur $T = 216,579$ K. Le tableau I compare ces valeurs avec celles obtenues par d'autres chercheurs. Le détail de ces travaux paraîtra dans *Metrologia*.

TABLEAU I

Température du point triple et du point de sublimation du CO_2

Point triple	{	Meyers (1933)	216,579 K
		Ambrose (1957)	216,578
		Lovejoy (1963)	216,581
		Michels (1957)	216,580
		Bedford (1974)	
		ce travail	216,579
Point de sublimation	{	Barber (1966)	194,674 K
		Lovejoy (1963)	194,673
		ce travail	194,671

Reçu le 28 février 1978.

BIBLIOGRAPHIE

1. KIRBY (C.G.M.), BEDFORD (R.E.), KATHNELSON (J.), *Metrologia*, 11, 1975, p. 117.
 2. LOVEJOY (D.R.), *Nature*, 197, 1963, p. 353.
 3. MEYERS (C.H.), VAN DUSEN (M.S.), *J. Res. NBS*, 10, 1933, p. 381.
 4. AMBROSE (D.), *Brit. J. Appl. Phys.*, 8, 1957, p. 32.
 5. MICHELS (A.), WASSENAAR (T.), SLUYTERS (Th.), DE GRAAF (W.), *Physica*, 23, 1957, p. 89.
 6. BARBER (C.R.), *Brit. J. Appl. Phys.*, 17, 1966, p. 391.
 7. BEDFORD (R.E.), PRINS (C.), *Physics*, 77, 1974, p. 121.
-

ANNEXE T 19

Sur la possibilité de définir des échelles secondaires sans utiliser de point d'ébullition

par F. PAVESE et G. DEMONTI

Istituto di Metrologia G. Colonnelli (Italie)

(Traduction du Document CCT/78-9)

Le quatrième rapport du Groupe de travail 2 [1] donne au point 4 quelques exemples d'éventuelles échelles secondaires, toutes fondées directement ou non sur des points d'ébullition.

Nous avons au contraire, en partant de notre document CCT/76-35, étudié les possibilités de fonder une échelle de température, dans le domaine de 14 à 273 K, seulement sur des points triples ou des transitions solide-solide.

Nous avons de plus choisi de faire des recherches seulement sur de nouveaux points fixes proches des points de définition de l'EIPT-68, afin de ne pas modifier la structure fondamentale de l'EIPT ; cela fournit la relation la plus simple entre la définition de l'échelle secondaire et celle de l'échelle primaire.

Ces recherches ont été faites au début avec un petit groupe de thermomètres [2], en étudiant la reproductibilité des points fixes - tous réalisés dans de petites cellules scellées - intervenant dans les nouvelles définitions, et ensuite l'effet de leur utilisation sur la définition mathématique de l'échelle. Maintenant, les calculs ont été étendus à environ 70 thermomètres comprenant des modèles provenant de Leeds and Northrup, Rosemount, Tinsley, du KOL, de l'URSS et du Japon. Lorsque ce travail sera achevé, c'est environ 110

thermomètres qui auront été étudiés.

Pour les calculs, on a substitué les nouveaux points fixes, un par un, aux points officiels correspondants, dans tout le domaine de l'EIPT-68, et déplacé en conséquence, si nécessaire, le point de jonction des deux domaines adjacents, pour autant que ΔW et $d(\Delta W)/dT$ soient l'un et l'autre concernés.

Cette méthode est différente de celle qui est employée maintenant pour utiliser le point triple de l'argon selon le texte actuel de l'EIPT-68 [3].

Les différences entre cette méthode d'étalonnage et la méthode officielle sont représentées sur la figure 1 b à j où l'on donne la dispersion du maximum des écarts que l'on observe à la température indiquée, pour tous les thermomètres étudiés(1).

On a étudié les substitutions suivantes :

a) au lieu du point d'ébullition normal de l'hydrogène, le point triple du deutérium (18,72 K)⁽²⁾ ou la transition solide-solide du méthane (20,49 K)⁽²⁾.

b) Au lieu du point d'ébullition normal du néon, le point triple du néon (24,562 K)⁽²⁾ ou la transition solide-solide (α - β) de l'oxygène (23,867 K)⁽²⁾.

c) Au lieu du point de rosée normal de l'oxygène, le point triple du méthane (90,686 K)⁽²⁾ ou le point triple de l'argon (83,798 K).

d) Au lieu du point d'ébullition de l'eau, le point triple du dioxyde de carbone (216,581 K)⁽²⁾.

De plus, on a ajouté l'effet de l'utilisation du point triple du xénon (161,392 K)⁽²⁾ et celui du mercure (234,308 K)⁽²⁾ mais on n'a pas encore effectivement réalisé ces points fixes à l'IMGC.

En ce qui concerne la substitution dans les définitions mathématiques, la figure 1 montre que pour chaque thermomètre il existe en général une différence entre les deux étalonnages,

(1) La figure 2 donne les courbes d'écart complètes pour les échelles secondaires proposées.

(2) Valeur de la température estimée d'après les données disponibles dans les publications.

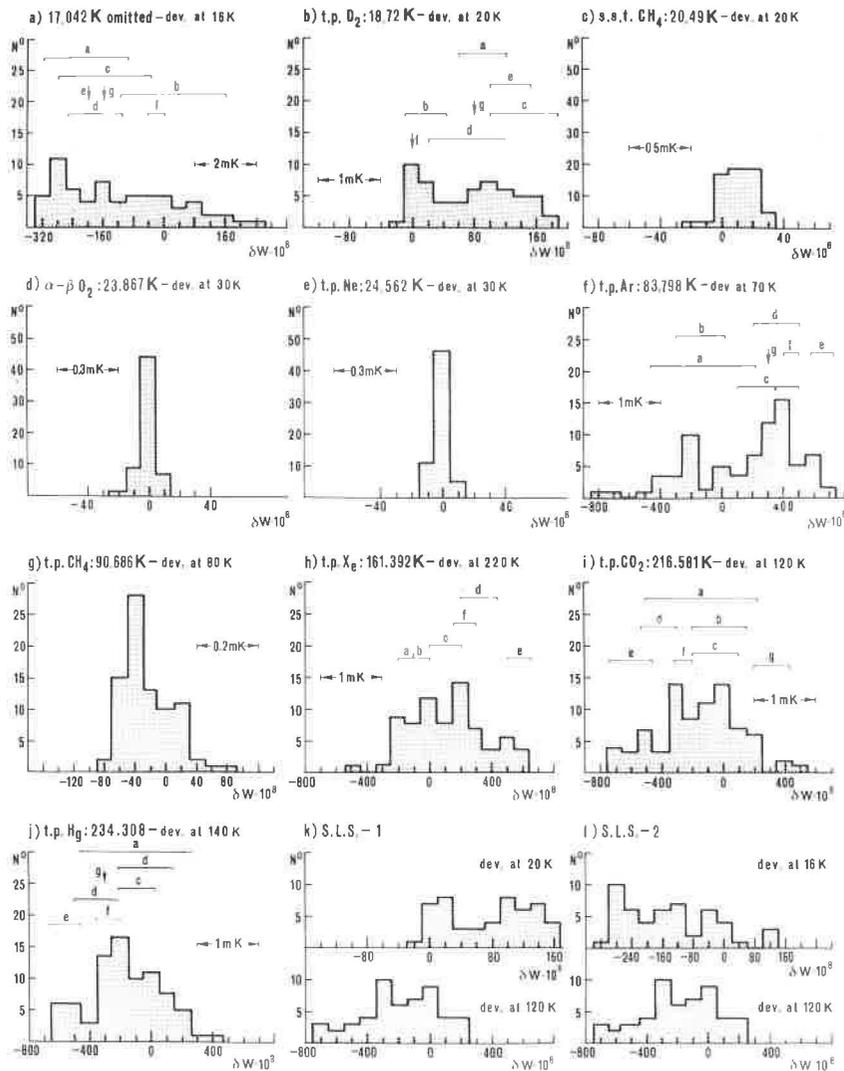


Fig. 1.

a-j.- Répartition, pour différents thermomètres, des écarts maximaux (intervenant à la température indiquée) de la définition qui utilise les nouveaux points fixes indiqués (voir texte) par rapport à la définition de l'EIPT-68 qui utilise le point de rosée de l'oxygène.

k-l.- Répartition, pour différents thermomètres, des écarts maximaux des définitions des deux échelles secondaires (voir Tableau I) par rapport à la définition de l'EIPT-68 qui utilise le point de rosée de l'oxygène.

Type de thermomètre : a, U.R.S.S. ; b, U.R.S.S. (Document CCT/71-57) ; c, Leeds and Northrup ; d, Tinsley ; e, KOL ; f, Rosemount ; g, Japon.

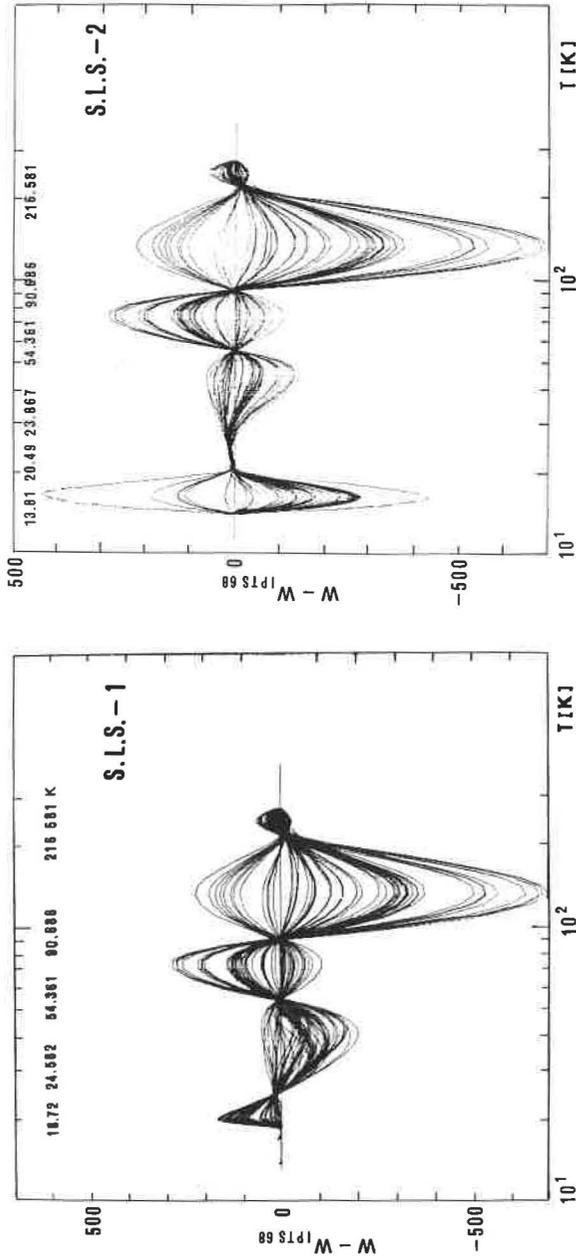


Fig. 2.- Écart, pour chaque thermomètre, des définitions de la figure 1 par rapport à la définition de l'IPT-68 qui utilise le point de rosée de l'oxygène.

TABLEAU I

Définitions des échelles secondaires

T (K)	EIPT-68	Echelle secondaire 1 (SLS-1)	Echelle secondaire 2 (SLS-2)
373,15	P.E. eau		
273,16	P.T. eau	P.T. eau	P.T. eau
216,581		P.T. dioxyde de carbone	P.T. dioxyde de carbone
90,686		P.T. méthane	P.T. méthane
90,188	P.R. oxygène		
83,798	P.T. argon		
54,361	P.T. oxygène	P.T. oxygène	P.T. oxygène
27,102	P.E. néon		
24,562		P.T. néon	
23,867			T. oxygène
20,28	P.E. hydrogène		
20,49			T. méthane
18,72		P.T. deutérium	
17,042	P.E'. hydrogène		
13,81	P.T. hydrogène		P.T. hydrogène

Abréviations : P.T., point triple ; P.E., point d'ébullition normal ; P.E', point d'ébullition sous la pression de 25/76 atm ; P.R., point de rosée ; T., point de transition solide-solide.

mais cette différence, pour Hg, CO₂, CH₄, Ne et la transition solide-solide de O₂ et de CH₄, se trouve dans les limites de reproductibilité de l'EIPT-68 telle qu'elle est donnée par l'ordre de grandeur des écarts. Avec D₂, les différences à 20 K atteignent 2 mK.

Le point du xénon est moins bon que celui du dioxyde de carbone si l'on considère le grand changement de part et d'autre de 161 K et la moins bonne jonction avec l'EIPT-68 à 0 °C (Fig. 1 *h*). Pour ce qui concerne les raisons des écarts élevés avec l'argon, voir [2]. Enfin, la figure montre aussi que, pour les points qui présentent les plus grands écarts (*a*, *b*, *f* et *h* à *j*), la dispersion totale des différences est due à la somme des contributions (assez faibles) provenant des différents modèles de thermomètres.

En ce qui concerne la reproductibilité des nouveaux points fixes, des problèmes sont apparus seulement pour les transitions solide-solide dont l'exactitude est limitée, pour toute application pratique, à environ $\pm 0,005$ K. Pour le deutérium, on peut définir la température du point triple à quelques dixièmes de

millikelvin près, mais nous sommes encore en train d'étudier si l'on peut vraiment ou non éviter le catalyseur pour la conversion ortho-para.

Enfin, nous avons calculé l'effet qui résulte de l'omission du point à 17,042 K dans la définition (Fig. 1 a), ce qui conduit à des différences allant jusqu'à 7 mK.

Ces calculs comportent toutes les options disponibles dans le domaine de 14 à 273 K⁽³⁾.

Avec ces options, il est possible d'établir beaucoup d'échelles secondaires. Nous en avons choisi deux (Tableau I) qui représentent deux réalisations différentes mais très particulières.

La première (Fig. 1 k), limitée aux températures supérieures à 20 K, ne comporte que des points fixes (points triples) offrant une reproductibilité meilleure que 1 mK ; comme, par ailleurs, ses écarts par rapport à l'EIPT-68 sont essentiellement inférieure à 1 mK (sauf au voisinage de 20 K), on pourrait envisager cette échelle secondaire pour une prochaine édition de la définition primaire de l'EIPT.

La seconde (Fig. 1 l) présente encore à peu près la même non-unicité par rapport à l'EIPT-68 mais elle est réalisée en utilisant au-dessous de 54 K des points fixes de moins bonne reproductibilité si bien que l'exactitude globale est inférieure. D'un autre côté, elle est plus facile à réaliser puisqu'il ne faut que deux gaz (c'est-à-dire des cellules scellées) pour la réaliser au-dessus de 90 K, trois au-dessus de 20 K et quatre au-dessus de 14 K.

Document original reçu le 6 mars 1978,
version corrigée reçue le 25 mai 1978.

BIBLIOGRAPHIE

1. 4^e rapport du Groupe de travail 2, ce volume, Annexe T 3.
2. PAVESE (F.), DEMONTI (G.), FERRI (D.), *Advances in Cryogenic Engineering* (Ed. K.D. Timmerhaus, Arrowsmith, Bristol 1978), vol. 23, K 4 503-11.
3. PAVESE (F.), ce volume, Annexe T 15.

(3) Nous avons également trouvé que l'on pourrait commodément utiliser l'éthane (90,352 K) (à paraître dans *J. Chem. Thermodynamics*).

**Étalonnage des thermomètres à résistance de platine
dans un cryostat à évaporation dans
le domaine des températures
comprises entre 13,81 K et 273,15 K**

par W. BLANKE et W. THOMAS

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (Rép. Féd. d'Allemagne)

(Traduction du Document CCT/78-27)

A la Physikalisch-Technische Bundesanstalt, on utilise un cryostat à évaporation pour étalonner les thermomètres à résistance de platine du type capsule dans le domaine des températures comprises entre 13,81 K et 273,15 K. On peut utiliser ce cryostat pour comparer les thermomètres à des thermomètres à résistance étalons préalablement étalonnés d'après l'EIPT-68 ; on peut aussi réaliser les points fixes de définition au-dessous de 273,15 K.

La figure 1 donne un schéma du cryostat. Selon le domaine de température, on introduit soit de l'hélium liquide, soit de l'azote liquide par l'orifice d'admission (14) dans le réfrigérateur (12), qui consiste en un tube de cuivre soudé à une enveloppe de cuivre (21). Cette enveloppe entoure l'écran de rayonnement (7) et un bloc de cuivre (19), qui contient la chambre de mesure (9) du thermomètre à pression de vapeur et comporte des puits destinés à recevoir jusqu'à 6 thermomètres à résistance. Dans le réfrigérateur (12), le gaz liquéfié s'évapore. Le gaz froid refroidit l'écran de rayonnement (8) et passe dans le tube (13) par une électro-vanne de régulation vers une pompe à vide. Cette vanne est actionnée par un régulateur proportionnel afin de maintenir la température de l'enveloppe (21). Pour le régulateur, on utilise comme élément sensible à la température la thermistance ou la résistance

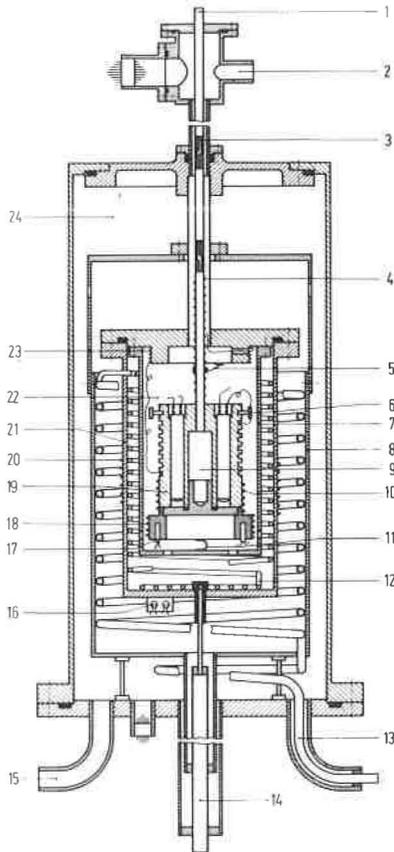


Fig. 1.- Cryostat à évaporation

au carbone (16). Pendant la comparaison des thermomètres et la réalisation des points d'ébullition, le bloc de cuivre (19) est relié thermiquement à l'écran de rayonnement (7) par un fil de cuivre (11). La température du bloc est réglée au moyen d'un chauffage (18) par un second régulateur proportionnel qui utilise une thermistance ou une résistance au carbone (17) comme élément sensible. On peut obtenir une température du bloc en cuivre constante à mieux que 0,5 mK sur 10 minutes.

Pour les expériences avec les points triples, on supprime la liaison thermique (11) et l'anneau de cuivre avec le chauffage (18). Avec le chauffage (10), on peut communiquer, par impulsions, de la chaleur au bloc de façon à faire fondre de petites quantités de fluide solidifié pour contrôler le changement d'état.

Pour les travaux sur les points fixes de l'hydrogène, on peut introduire un catalyseur dans la chambre (9). Par le tube (15) on pompe de façon continue l'intérieur de l'enceinte à vide (24). Pendant le refroidissement du bloc et le début de la condensation du gaz dans la chambre (9), on remplit l'espace (22) d'hélium (gaz d'échange thermique) par le tube (2), alors que cet espace est maintenu sous vide le reste du temps. Pour réduire les transferts de chaleur par rayonnement, toutes les parties principales du cryostat sont dorées. Les conducteurs des thermomètres sont ancrés thermiquement sur le piège thermique (23) et sur les disques de saphir (6) soudés au bloc. Pour réduire l'apport de chaleur le long du tube de transmission de la pression (1) qui relie la chambre de mesure (9) au système de manipulation du gaz et au système de mesure de la pression, le tube est ancré thermiquement au couvercle de l'enveloppe (21) au moyen d'un fil de cuivre (5).

Une estimation de la répartition de la température dans le bloc montre que les différences de température devraient être inférieures à 0,05 mK. Le gradient de température le long du tube de transmission de la pression est contrôlé par trois thermocouples cuivre-constantan, qui sont fixés sur le tube. Le chauffage (4) empêche la condensation du gaz dans le tube (1), lorsque le gaz d'échange thermique a été introduit dans l'espace (22).

Pendant les expériences sur les points d'ébullition, la pression est mesurée avec une jauge Ruska Corporation à tube de Bourdon (spirale en quartz) dont l'étalonnage est vérifié après chaque série de mesures au moyen d'une balance de pression. L'incertitude relative sur la pression est de 4×10^{-5} à 1 bar. Les résistances des thermomètres sont déterminées au moyen d'un comparateur de courant continu de Kusters à 8 décades. Toutefois quelques-unes des mesures ont été effectuées avec un pont automatique à courant alternatif.

Pour la réalisation des points fixes, on a estimé que l'erreur systématique maximale était de 0,5 mK. L'erreur aléatoire était de $\pm 0,3$ mK pour un taux de confiance de 99,73 %. Pour la comparaison des thermomètres, les mêmes erreurs étaient respectivement de 0,3 mK et de $\pm 0,2$ mK. Ces incertitudes sont confirmées par une comparaison internationale de thermomètres à résistance [1].

Le thermomètre N° 188 682 comparé au National Physical Laboratory, a été étalonné dans ce cryostat par réalisation directe du point triple de l'hydrogène et des points d'ébulli-

tion de l'hydrogène et du néon. Dans le même cryostat, on a comparé ce thermomètre à des thermomètres étalons au point d'ébullition et au point triple de l'oxygène. Les thermomètres étalons avaient été au préalable étalonnés à ces points dans un appareil semblable à celui qui a été décrit dans [2]. Les écarts maximaux des résultats de la PTB et du NPL s'élèvent à 0,6 mK à tous les points fixes sauf au point d'ébullition de l'oxygène, où l'on a trouvé une différence de 1,7 mK. Ainsi que des expériences ultérieures l'ont montré, cette différence plus élevée est due aux mesures en courant alternatif, utilisé pour ce point lors des premières expériences. Une description détaillée de l'appareillage complet paraîtra prochainement dans *PTB-Mitteilungen*.

BIBLIOGRAPHIE

1. WARD (S.D.), COMPTON (J.P.), *Metrologia*, 15, 1979, p. 31.
2. THOMAS (W.), BLANKE (W.), *Temperature, Its Measurement and Control in Science and Industry*, Vol. 4, I, p. 225, Instrument Society of America, Pittsburgh, 1972.

Recu le 9 mars 1978.

**Sur la structure d'une nouvelle
Échelle Internationale Pratique de Température
au-dessous de 0 °C**

par F. PAVESE

Istituto di Metrologia G. Colonnetti (Italie)

(Traduction du Document CCT/78-10)

Une échelle pratique de température est utile dans la mesure où elle est réalisable par n'importe quel laboratoire, en suivant sa définition, de façon indépendante et plus aisée qu'en utilisant un thermomètre thermodynamique.

L'extension de l'EIPT vers les basses températures, jusqu'à 14 K, faite en 1968, a tellement augmenté le nombre des points fixes et, dans l'ensemble, la complexité de l'équipement nécessaire pour réaliser l'échelle, que l'EIPT est devenue un domaine accessible seulement à des spécialistes hautement qualifiés en thermométrie thermodynamique. La conséquence est que seulement un petit nombre de laboratoires ont réalisé l'EIPT-68 ; dans de trop nombreux autres, les méthodes d'étalonnage n'ayant que peu ou pas du tout de rapport avec l'EIPT ont encore une large place, ce qui conduit souvent à des effets malencontreux sur la qualité des mesures des propriétés liées à la température.

Aussi, il convient de faire un effort maximal pour établir une EIPT qui encourage l'utilisation directe de sa définition par un nombre d'utilisateurs aussi grand que possible. Pour atteindre ce but, il faudrait suivre les grandes lignes ci-après :

a) En ce qui concerne la *structure mathématique*, sa complexité n'est pas un problème aujourd'hui, où l'on dispose largement d'ordinateurs, mais il serait souhaitable d'éviter les méthodes itératives ou d'ajustement par les moindres carrés pour obtenir les paramètres d'étalonnage et les tables.

b) En ce qui concerne l'*instrument d'interpolation*, la définition de l'EIPT doit comporter aussi une réalisation à exactitude plus faible au moyen de thermomètres de moindre qualité, parce que beaucoup d'utilisateurs ne sont intéressés que par une exactitude moyenne (environ 0,01 K). Il n'est pas souhaitable de laisser aux laboratoires la liberté complète de chercher leur solution pour les procédures d'étalonnages secondaires, car dans la plupart des cas cela serait effectué sans établir *aucune relation directe* avec la définition primaire. Par conséquent, il faut inclure dans le texte la définition d'une échelle officielle de niveau secondaire (ES) ; d'un autre côté, il faut prendre des précautions pour éviter tout risque de malentendu ou de mauvais usage de cette ES. La définition suivante aurait l'avantage d'être probablement la mieux comprise des utilisateurs :

1) l'ES conserve la même structure mathématique que la définition primaire et les mêmes températures d'étalonnage ;

2) l'exactitude moindre de l'ES vient de la moindre qualité des thermomètres ou de l'installation simplifiée (pour les points fixes).

Par conséquent, seul le niveau d'exactitude déterminerait la différence entre la définition primaire et la définition secondaire ; cela éliminerait toute possibilité de confusion qui pourrait résulter de l'emploi de groupes différents de points fixes ou de définitions mathématiques différentes ; cela éviterait aussi l'embaras du choix entre les nombreuses définitions possibles d'une ES.

c) En ce qui concerne les *points d'étalonnage*, ils doivent faire appel à un minimum d'équipement et être conçus de façon à pouvoir être mis en oeuvre avec une connaissance minimale de la "physique" de l'expérience, en suivant un processus strictement réglementé de façon

à faire appel à un personnel qualifié mais non spécialisé, ou même à un système automatique.

La sensibilité de l'étalonnage aux dérives des températures d'étalonnage dépend entièrement de la fonction d'interpolation. Avec une structure mathématique bien choisie, la température des points d'étalonnage ne serait pas critique. Cela signifie que, dans un intervalle de quelques kelvins autour de chaque température d'étalonnage définissant l'échelle, le choix de groupes différents de points fixes n'altérerait pas l'unicité de l'échelle d'une quantité supérieure à sa reproductibilité, telle qu'elle est définie à partir des différences maximales entre les étalonnages de différents thermomètres effectués en utilisant le même groupe de points fixes.

En conséquence, on devrait, dans le texte de l'échelle, généraliser les indications d'options pour le choix des points fixes (actuellement limitées, au-dessous de 0 °C, au point triple de l'argon) à tous ceux pour lesquels on a un choix. En dehors de chaque point de référence principal, dont la valeur de la température résulte de mesures thermodynamiques, il faudrait, pour toutes les options, attribuer des valeurs cohérentes de la température.

d) En dehors des points fixes considérés pour la définition primaire (et secondaire), le texte de l'échelle devrait aussi attribuer des valeurs à la température d'un nombre limité de *points de référence secondaires*, mais dans un esprit différent du tableau IV de la définition actuelle. L'échelle secondaire étant définie dans l'EIPT même, la raison essentielle d'inclure une longue liste de points de référence secondaires dans le texte de l'échelle tombe d'elle-même ; cette liste devrait figurer dans les "Informations complémentaires", publication distincte du texte de l'échelle.

Un petit nombre de points de référence secondaires, conservés dans le texte de l'échelle, serviront de points pour le "contrôle interne d'une réalisation de l'EIPT ou la comparaison de différentes réalisations de l'EIPT", conformément au paragraphe b du 4^e Rapport du GT-2⁽¹⁾.

(1) 4^e Rapport du Groupe de travail 2, ce volume, Annexe T 3.

En raison de la très haute reproductibilité de nombreux points fixes, en particulier des points triples, leur utilisation à la place de températures arbitrairement choisies dans un cryostat destiné aux comparaisons, pour les recherches mentionnées ci-dessus, présentera des avantages importants :

- 1) cela permettra d'améliorer l'exactitude des comparaisons ;
- 2) cela permettra de comparer avec la plus grande exactitude les séries de mesures faites dans différents laboratoires puisque toutes les températures mesurées seront indépendantes des échelles à résistance.

Il conviendrait de choisir ces points de référence secondaires afin qu'ils soient à peu près à mi-chemin entre les températures des points de référence primaires, où la non-reproductibilité est maximale.

Reçu le 6 mars 1978.

**Rôle proposé pour la température
du point triple du gallium
dans la définition de l'EIPT**

par B. W. MANGUM et D. D. THORNTON

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

(Traduction du Document CCT/78-13)

Nous avons trouvé [1] qu'à bien des égards le point triple du gallium (29,774 06 °C) est supérieur, comme point fixe, au point triple de l'eau qui joue actuellement un rôle clé dans l'EIPT [2]. Dans le présent document, nous proposons que les laboratoires nationaux entreprennent des essais appropriés sur le point triple du gallium en tant que point fixe thermométrique et que, s'il s'avère convenable, le point triple du gallium supplante le point triple de l'eau dans le rôle que celui-ci tient dans l'EIPT.

On rencontre beaucoup de problèmes pour réaliser le point triple de l'eau à mieux que $\pm 0,1$ mK [3 à 6]. Certains de ces problèmes sont inhérents au point triple de l'eau lui-même et d'autres sont liés aux propriétés des thermomètres à résistance de platine étalons dont on dispose couramment, propriétés qui se manifestent seulement au voisinage du point de congélation de l'eau [6,1]. Dans le rapport qu'il a fait sur la variation de la température du point triple de l'eau en fonction du temps, Berry [3] passe en revue les instabilités que l'on observe dans les études soigneuses de cet état "d'équilibre". Après préparation (congélation) d'un manchon de glace dans une cellule à point triple de l'eau, la température s'élève *généralement* de quelques dixièmes de millikelvin au cours de la

première journée, puis au rythme de 0,1 mK par jour pendant plusieurs jours et ensuite de plus en plus lentement jusqu'à devenir constante à 0,02 mK près après 1 ou 2 semaines. Quelquefois, Berry a observé des cellules à point triple, préparées de façon normale, dont la température présentait des fluctuations d'environ $\pm 0,1$ mK même plusieurs jours après leur préparation. En fait, Barber *et al.* [4] et Berry [3] sont arrivés à la conclusion qu'il est difficile de définir la température du point triple de l'eau à mieux que 0,1 mK. Nous avons observé un comportement de la température de cellules à point triple de l'eau semblable à celui qu'a observé Berry.

En utilisation normale, les cellules à point triple de l'eau sont généralement conservées dans un bain de glace [7]. Comme c'est là un milieu congelant, des cristaux de glace peuvent croître à partir du manchon vers la paroi de la cellule, et ainsi provoquer dans le manchon des contraintes qui peuvent affecter la température. Nous avons observé des baisses de température d'environ 0,1 mK dues à cet effet. Par conséquent, il est nécessaire de vérifier fréquemment le manchon pour éviter ce phénomène. En étudiant la température du point triple du gallium [1], nous avons rencontré un problème avec les thermomètres à résistance de platine étalons, problème qui se présentait au point triple de l'eau et non au point triple du gallium. Au point triple de l'eau, sur cinq thermomètres à résistance de platine étalons, quatre ont fourni des résultats qui dépendaient de la période d'inversion du courant de mesure. Pour des périodes d'inversion du courant de 4, 8 et 16 secondes, on a observé un effet allant jusqu'à $53 \mu\Omega$ (équivalent à environ 0,5 mK). L'effet était beaucoup plus important à la fréquence de 400 Hz.

En comparant le point triple du gallium au point triple de l'eau, nous avons trouvé que le point triple du gallium était meilleur en ce sens qu'il est plus stable et que l'on peut le réaliser avec plus de précision et plus de facilité. L'incertitude sur la température mesurée du point triple du gallium était limitée principalement par l'incertitude sur la réalisation du point triple de l'eau et par les incertitudes sur les étalonnages des thermomètres à résistance de platine étalons. En ce qui concerne la stabilité, nous avons surveillé la température du point triple du gallium de façon continue sur des durées allant jusqu'à quatre jours, sans observer aucun changement dans la limite de notre résolution (1,5 μ K). Cela contraste

avec le comportement que l'on a observé pour la température du point triple de l'eau qui présente des variations d'environ $\pm 25 \mu\text{K}$. Il est beaucoup plus facile de préparer le point triple du gallium que le point triple de l'eau et on peut l'utiliser beaucoup plus tôt après sa préparation. Alors qu'il faut attendre au moins un à trois jours pour que le point triple de l'eau atteigne sa valeur "d'équilibre" [7,3], le point triple du gallium atteint son équilibre en quelques heures seulement.

Le fait que le point triple du gallium supplante le point triple de l'eau dans son rôle clé dans l'EIPT entraînerait une redéfinition de l'échelle et, de là, une redéfinition du kelvin, au moins dans sa formulation. En utilisant le point triple du gallium, au lieu du point triple de l'eau, comme point fixe pour l'étalonnage des thermomètres à résistance de platine étalons et comme point fixe auquel seraient rapportées les températures mesurées à l'aide de ces thermomètres, la précision des mesures de température augmenterait considérablement.*

Reçu le 7 mars 1978.

BIBLIOGRAPHIE

1. MANGUM (B.W.), THORNTON (D.D.), à paraître dans *Metrologia*.
2. *Comptes Rendus des Séances de la 15^e Conférence Générale des Poids et Mesures*, 1975, p. A 1 ; *Metrologia*, 12, 1976, p. 7.
3. BERRY (R.J.), *Can. J. Phys.*, 37, 1959, p. 1230.
4. BARBER (C.R.), HANDLEY (R.), HERINGTON (E.F.G.), *Brit. J. Appl. Phys.*, 5, 1954, p. 41.
5. FURUKAWA (G.T.), RIDDLE (J.L.), BIGGE (W.R.), *J. Res. NBS*, 80 A, 1976, p. 477.
6. BERRY (R.J.), *Metrologia*, 2, 1966, p. 80.
7. RIDDLE (J.L.), FURUKAWA (G.T.), PLUMB (H.H.), *NBS Monograph 126*, 1973.

* Dans le même contexte, on pourrait aussi étudier les avantages probables du point triple du mercure.

Comparaison des températures de congélation des étalons de zinc SRM-740 du NBS

par G. T. FURUKAWA et J. L. RIDDLE

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

(Traduction du Document CCT/78-16)

1. Introduction

La définition de l'EIPT-68 implique l'extrapolation des indications du thermomètre à résistance de platine depuis 419,58 °C jusqu'à la limite supérieure de 630,74 °C. A 630,74 °C, une erreur d'étalonnage au point du zinc est amplifiée 3,5 fois [1]. Il s'ensuit qu'une excellente reproductibilité du point du zinc est essentielle pour réaliser avec exactitude l'EIPT-68 aux températures supérieures. Ce document décrit brièvement les résultats de la comparaison de cellules à point de congélation qui ont été montées en utilisant des étalons de zinc SRM-740 du National Bureau of Standards.

2. Échantillons de zinc et appareil

L'étalon de zinc SRM-740 a une pureté nominale de 99,999 9 %. Les cellules à point du zinc ont été montées par des méthodes semblables à celles qui sont décrites pour le montage des cellules à point de l'étain [2]. On a préparé cinq cellules pour la comparaison.

Pour la comparaison, on a construit au NBS deux fours de grande précision à trois enroulements. On a utilisé deux ponts

en courant alternatif [3] avec enregistreurs graphiques pour la mesure continue de la résistance des thermomètres à résistance de platine ; 1 mm sur l'enregistrement correspond à 1 $\mu\Omega$ (soit environ 0,01 mK).

3. Méthode de mesure et résultats

Pour les mesures du point de congélation du zinc, on s'attendait, d'après notre expérience antérieure, à une dérive de la résistance des thermomètres à résistance de platine ; aussi a-t-on comparé directement le point de congélation de chaque cellule à celui d'une cellule de référence. On a réalisé le même jour deux congélations pour chaque paire de cellules, une le matin (mesures AM) et l'autre l'après-midi (PM). La cellule de référence était placée dans l'un des fours, et la cellule à comparer était dans l'autre four. Pour se soustraire à l'effet éventuel des fours sur le point de congélation, on échangeait les deux cellules pour les mesures de l'après-midi. En utilisant deux thermomètres à résistance de platine, on a obtenu chaque jour quatre mesures comparatives.

Les résultats de la comparaison des cinq cellules sont résumés au tableau I. Les points de congélation des cinq cellules concordent à environ 0,1 mK près. Les résultats de la comparaison, même avec la même paire de cellules ont montré plus de dispersion que prévu. On envisage de faire d'autres expériences pour déterminer la cause de cette dispersion. Au cours de ces expériences, la vitesse de congélation était très lente (12 à 14 heures pour une solidification complète). On envisage d'étudier l'effet des vitesses de congélation sur les températures du point de congélation observées.

Document original reçu le 7 mars 1978,
version abrégée reçue le 31 mai 1978.

BIBLIOGRAPHIE

1. RIDDLE (J.L.), FURUKAWA (G.T.), PLUMB (H.H.), *NBS Monograph 126*, 1973.
Une erreur d'étalonnage au point de l'étain est aussi amplifiée 3,5 fois à 630,74 °C.
2. FURUKAWA (G.T.), RIDDLE (J.L.), BIGGE (W.R.), *Temperature, Its Measurement and Control in Science and Industry*, vol. 4, I, p. 247, Instrument Society of America, Pittsburgh, 1972.
3. CUTKOSKY (R.D.), *J. Res. NBS*, 74 C, 1970, p. 15.

TABLEAU I

*Comparaison de points de congélation
des étalons de zinc SRM-740 du NBS*

(Toutes les mesures se réfèrent à la cellule 75A)

Cellule comparée	Mesure	[R (Cell. X) - R (Cell. 75A)] x 10 ⁷ Ω ^(a)	
		Thermomètre 1 ^(b)	Thermomètre 2 ^(c)
74A	AM	5 ₀	1 ₁
	PM	28 ₂ ^(d)	- 4 ₅
	Moyenne ^(e)		0 ₅
74B	AM	12 ₀	- 1 ₉
	PM	- 2 ₁	- 6 ₇
	Moyenne ^(e)		0 ₃
75B	AM	4 ₃	17 ₀
	PM	12 ₃	12 ₈
	Moyenne ^(e)		11 ₆
75C	AM	3 ₇	8 ₇
	PM	0 ₀	- 4 ₁
	Moyenne ^(e)		2 ₁

(a) $\Delta R = 1 \times 10^{-7} \Omega$ correspondant à $\Delta T \approx 10^{-6} \text{ K}$.

(b) Thermomètre N° 1 805 523.

(c) Thermomètre N° 1 812 209.

(d) Cette valeur a été exclue de la moyenne.

(e) Moyenne des quatre observations faites avec les deux thermomètres.

Influence de l'oxydation du platine sur l'EIPT-68

par J. BERRY

Conseil National de Recherches (Canada)

(Traduction du Document CCT/78-4)

Jusqu'à récemment il y avait peu d'indices, et aucune preuve définitive, que du platine polycristallin massif puisse réagir avec l'oxygène ou l'air, à des pressions modérées, au-dessous de 630 °C, pour former une couche superficielle d'oxyde d'épaisseur supérieure à une ou deux couches atomiques. Toutefois, en 1977, nous avons découvert [1] qu'une pellicule visible d'oxyde de platine multicouche pouvait se former sur un fil ou une lame de platine chauffé pendant une semaine ou plus dans l'oxygène sous la pression d'une atmosphère environ, à une température comprise entre 450 et 550 °C. Avant cela, nous avons observé de grandes variations de la résistance de thermomètres à résistance de platine chauffés dans des conditions semblables et c'est cela qui nous avait conduits aux recherches mentionnées plus haut. Dans un travail plus récent [2], on a identifié l'oxyde de platine comme étant la phase orthorhombique de PtO_2 , d'après sa chaleur de décomposition, sa figure de diffraction électronique et ses propriétés relatives à sa solubilité en milieu acide. Bien que la vitesse de formation de cet oxyde diminue effectivement lorsque l'on réduit la pression de l'oxygène, elle est encore suffisante aux pressions partielles utilisées normalement dans les thermomètres à résistance de platine pour avoir un effet possible sérieux sur l'EIPT-68 au-dessous de 630,74 °C.

La variation de résistance des thermomètres à résistance de platine, due à l'oxydation, possède les caractéristiques fondamentales suivantes. La résistance $R(t)$, où $t \leq 550$ °C approximativement, augmente à des rythmes allant jusqu'à plusieurs millikelvins par heure au fur et à mesure que l'oxyde se forme, dans le domaine de 350 à 550 °C ; elle décroît ensuite (souvent de façon brusque), grossièrement de la même quantité, quand l'oxyde se décompose à des températures supérieures à environ 600 °C. L'augmentation de la résistance pendant l'oxydation est due au fait qu'une partie du platine est transformée en une pellicule d'oxyde relativement peu conducteur, ce qui réduit l'aire de la section efficace du fil. On a analysé en détail un modèle de résistance approprié [2], ce qui a montré, entre autres choses, que l'augmentation relative de $R(t)$ devait être proportionnelle à l'épaisseur moyenne de la pellicule d'oxyde et que le rapport $R(t)/R(0)$ devait varier nettement moins que $R(t)$ ou que $R(0)$. On a vérifié cela expérimentalement : par exemple, un thermomètre dont $R(0)$ avait augmenté de 0,2 % (ce qui correspond à 0,5 K) par suite de l'oxydation, présentait une diminution de $R(100)/R(0)$ de seulement 15×10^{-6} (ce qui correspond à 4 mK).

Cette stabilité modérément bonne de la résistance réduite pendant la formation (et la décomposition) de l'oxyde de platine, jointe au fait que, dans le domaine considéré de l'EIPT-68, les températures sont définies en fonction de cette résistance réduite, ramène le problème, qui pourrait avoir des proportions catastrophiques pour la thermométrie, à un problème que l'on peut résoudre sans trop de difficultés dans la plupart des cas. L'obstacle principal pour des travaux de grande précision est que $R(t)$ et $R(0)$ doivent correspondre tous les deux au même état d'oxydation ; c'est pourquoi il faut mesurer $R(0)$ fréquemment si les processus ci-dessus conduisent à des dérives importantes de la résistance. Il faut être particulièrement vigilant quand le thermomètre passe d'une zone de température "d'oxydation" à une zone de température "de décomposition de l'oxyde". Bien entendu, cette situation est fortement aggravée si l'on utilise des pressions partielles d'oxygène excessivement fortes dans les thermomètres à résistance de platine, possibilité qui n'est pas exclue par les recommandations actuelles de l'EIPT-68.

Nous examinons maintenant deux façons d'aborder le problème. Premièrement, nous espérons établir les limites des

zones de température pour l'oxydation et pour la décomposition de l'oxyde avec les thermomètres existants afin que l'utilisateur puisse programmer ses mesures pour réduire la durée pendant laquelle le thermomètre est soumis à des conditions défavorables. Deuxièmement, nous espérons déterminer dans quelle mesure on peut réduire la pression d'oxygène dans les thermomètres, et par conséquent la vitesse d'oxydation, sans que la contamination par les impuretés devienne le problème dominant. Des progrès considérables ont été faits dans ces deux directions et on devrait être bientôt en mesure de faire des recommandations précises.

Il convient également de noter ici que la petite augmentation réversible de $R(0)$ au plus égale à 4×10^{-6} (ce qui correspond à 1 mK), dont on a rendu compte précédemment [3,4] pour des thermomètres chauffés entre 100 et 250 °C, est presque certainement le signe précurseur de la formation d'oxyde dans les trois dimensions. Elle est vraisemblablement due à la première couche moléculaire partielle d'oxyde à deux dimensions, qui se forme à la surface du platine. Comme on l'a dit précédemment [3], il est difficile d'éviter complètement cet effet aux températures inférieures car il suffit d'une trace d'oxygène pour qu'il survienne.

Reçu le 21 février 1978.

BIBLIOGRAPHIE

1. BERRY (R.J.), *Can. J. Chem.*, 55, 1977, p. 1792.
2. BERRY (R.J.), à paraître dans *Surface Science*, 1978.
3. BERRY (R.J.), *Metrologia*, 10, 1974, p. 145.
4. BERRY (R.J.), *Temperature Measurement 1975*, Inst. Phys. Conf., Ser. 26, p. 99, Institute of Physics, London, 1975.

ANNEXE T 25

Températures de référence au voisinage de 800 °C

par J. V. McALLAN

National Measurement Laboratory (Australie)

(Traduction du Document CGT/78-3)

Les travaux de l'IMGC sur l'eutectique Cu-Ag [1, 2] sont les seuls travaux de précision récents sur les températures de référence entre les points de l'aluminium (660 °C) et de l'argent (962 °C). Comme le point de fusion de cet eutectique est difficile à réaliser, le NML a fait des recherches sur le point de congélation de NaCl. Ce matériau aussi est difficile à utiliser à cause de sa faible conductivité thermique, de son augmentation importante de volume à la fusion et de sa transparence et parce qu'il est difficile d'éliminer les traces d'eau et en particulier d'ions OH^- de la plupart des sels.

Les sels "purs" du commerce sont beaucoup moins purs que ne le sont les métaux et le meilleur NaCl que nous ayons pu avoir contient 10 à 20 x 10^{-6} d'impuretés. La température de congélation trouvée pour ce NaCl est $802,32 \pm 0,05$ °C, en utilisant des thermomètres à résistance de platine étalonnés dans l'EIPT-68 et en extrapolant à partir du point du zinc avec l'équation de l'EIPT. Il est improbable que l'on obtienne une amélioration de l'exactitude, à moins que l'on dispose de NaCl nettement plus pur.

En conséquence, nous sommes revenus à l'eutectique Cu-Ag. Des mesures préliminaires donnent une valeur de $779,88 \pm 0,03$ °C, en utilisant l'équation du thermomètre à résistance de platine

de l'EIPT-68. Les valeurs obtenues au thermomètre à résistance à l'IMGC [2], lorsqu'elles sont ramenées à l'équation de l'EIPT, donnent une moyenne de 779,85 °C. La dispersion de nos résultats semble être environ la moitié de celle des valeurs de l'IMGC [1], et nous avons tenu compte de mesures qui étaient délibérément faites dans des conditions loin d'être optimales. Nous supposons que nos matériaux étaient un peu plus purs que ceux utilisés à l'IMGC et que notre valeur définitive demeurera environ 0,03 K plus élevée que celle de ce laboratoire.

Néanmoins, nous pensons que c'est là un accord très satisfaisant pour des points fixes aussi délicats, en particulier du fait que nous extrapolons à partir d'étalonnages effectués aux points de l'étain et du zinc. Nous nous attendons à ce que notre exactitude finale pour la température de l'eutectique Cu-Ag soit d'environ 0,01 K.

Les points du NaCl et de Cu-Ag exigent tous les deux une régulation complexe du four avec des enroulements de chauffage des extrémités rigoureusement réglés. Un bloc de comparaison en cuivre dans un four de ce genre donnerait une exactitude au moins comparable à celle du point de Cu-Ag et serait beaucoup plus souple pour des étalonnages ordinaires. Marcarino et Crovini [2] estiment à ± 2 mK l'exactitude d'une telle comparaison. Dans une nouvelle EIPT, il semble souhaitable de limiter le domaine du thermomètre à résistance de platine au point de l'argent, de l'or ou du cuivre et de faire appel à des comparaisons pour les étalonnages secondaires entre 660 et 962 °C.

Reçu le 17 février 1978.

BIBLIOGRAPHIE

1. BONGIOVANNI (G.), CROVINI (L.), MARCARINO (P.), *High Temperatures - High Pressures*, 4, 1972, p. 573.
2. MARCARINO (P.), CROVINI (L.), *Temperature Measurement 1975*, Inst. Phys. Conf. Ser. 26, p. 107, Institute of Physics, London, 1975.

Expériences sur l'étalonnage des thermomètres à résistance pour températures élevées

par M. BOROVIČKA et L. HUDOBA

Institut Métrologique Tchécoslovaque

(Traduction du Document CCT/78-43)

L'étalonnage des thermomètres à résistance de platine pour températures élevées, en particulier en vue de remplacer le thermocouple Pt 10 % Rh/Pt comme instrument d'interpolation de l'EIPT, est d'une importance essentielle pour la pratique. Depuis 1974, l'Institut Métrologique Tchécoslovaque (IMT) a apporté un soin constant à ces problèmes [1].

On a effectué des mesures entre 0 °C et 1100 °C (en fait du point triple de l'eau au point de congélation de l'or) avec des thermomètres à résistance de platine pour températures élevées de chez Rosemount, Leeds and Northrup et des thermomètres tchécoslovaques ZPA (série zéro). Par ailleurs, nous donnerons quelques résultats concernant l'étalonnage de thermomètres à résistance commerciaux pour températures élevées de chez Rosemount, instruments qui ont donné les meilleurs résultats. L'erreur de reproductibilité des mesures exprimée par l'intervalle de confiance pour la probabilité $P = 0,99$, au point triple de l'eau, variait de ± 3 mK à ± 5 mK pour les différents thermomètres.

On a obtenu des résultats analogues, lors de mesures partielles faites à l'IMT dans le cadre d'une comparaison de thermomètres à résistance pour températures élevées entre l'IMT et l'ASMW (Berlin) [2]. Les résultats complets de ces

mesures n'ont pas encore été publiés. Les valeurs mentionnées plus haut sont également en bon accord avec celles de Chattle [3].

En plus de la valeur relativement grande de l'intervalle de confiance au point triple de l'eau, nous avons aussi trouvé que la durée de vie du tube protecteur en quartz fondu était limitée à cause de la dévitrification aux températures élevées.

Etant donnés ces deux facteurs limitatifs, nous avons décidé de poursuivre les expériences sur un domaine réduit de température, à savoir jusqu'au point de congélation de l'argent.

Les résultats de mesures faites à l'IMT et ceux des comparaisons faites en 1977 entre l'IMT et l'OMH (Budapest) ont fait apparaître pour ce domaine de température un intervalle de confiance nettement réduit, variant de $\pm 0,9$ mK à $\pm 1,1$ mK au point triple de l'eau. Ces résultats confirment le fait que le point de congélation de l'argent est un des points fixes les plus appropriés pour étalonner les thermomètres à résistance au point le plus élevé de ce domaine de température.

Nous avons étudié le point de congélation de l'eutectique Ag-Cu comme point fixe entre le point de l'antimoine et le point de l'argent. Nous avons utilisé des matériaux de provenance tchécoslovaque de pureté 5 N (soit 0,999 99) pour l'argent et 4 N5 (soit 0,999 95) pour le cuivre. Nous avons effectué la fusion des composants et la préparation des échantillons d'eutectique Ag-Cu dans un four à vide sous atmosphère protectrice d'argon. La pureté finale de l'eutectique préparé de cette façon était de 0,999 986.

Les mesures préliminaires, faites en extrapolant l'équation de l'EIPT-68 pour les thermomètres à résistance dans le domaine de 0 °C à 630 °C, ont donné pour l'eutectique Ag-Cu la valeur 779,83 °C avec une incertitude de $\pm 0,03$ K.

Les limites de l'erreur de reproductibilité de la mesure du point de congélation de l'eutectique Ag-Cu, exprimées par l'intervalle de confiance pour $P = 0,99$, ne dépassaient pas ± 4 mK pour les échantillons pris individuellement. On a trouvé les mêmes résultats avec des échantillons d'eutectique provenant de l'OMH lors de comparaisons entre l'IMT et l'OMH. L'erreur de reproductibilité de ces dernières mesures sur l'eutectique Ag-Cu a toutefois atteint ± 9 mK, avec un taux de confiance de 0,99. Les résultats complets de ces comparaisons

entre l'IMT et l'OMH seront publiés prochainement.

Reçu le 9 mai 1979

BIBLIOGRAPHIE

1. CIBÁK (M.), BOROVÍČKA (M.), HUDOBA (L.), Research of Pt resistance thermometer in the range 630 °C - 1064 °C, Internal report ČSMÚ, 1008.
 2. CIBÁK (M.), BOROVÍČKA (M.), HUDOBA (L.), High temperature resistance thermometer as interpolation mean of the practical temperature scale (en Slovaque), Československá standardizace (sous presse).
 3. CHATTLE (M.V.), Temperature, Its Measurement and Control in Science and Industry, Vol. 4, II, p. 907, Instrument Society of America, Pittsburgh, 1972.
-

**Résumé des résultats
de mesures de la température thermodynamique
et de thermométrie à résistance de platine
aux températures élevées à l'IMGC**

par A. ACTIS, L. CROVINI et P. MARCARINO

Istituto di Metrologia G. Colonnetti (Italie)

(Traduction du Document CCT/78-6)

Dans le domaine de 630 à 962 °C, on a déterminé la température thermodynamique en utilisant un thermomètre à bruit [1].

Les résultats font apparaître un écart important par rapport à t_{68} . Tout récemment, Ricolfi et Lanza [2] ont fait une détermination exacte de l'intervalle de température entre le point de congélation de l'argent et celui de l'or. Ils ont montré que la différence de température thermodynamique est plus petite de 0,12 K ± 0,04 K que l'intervalle de température correspondant dans l'EIPT-68. On a recalculé la fonction écart de la référence [1] avec ce nouveau résultat. Il en résulte :

$$\begin{aligned}
 t - t_{68} = & - 3,348 \cdot 2 \cdot 10^{-2} + 2,889 \cdot 0 \cdot 10^{-3} (t_{68} - 630,74) \\
 & + 3,099 \cdot 46 \cdot 10^{-5} (t_{68} - 630,74)^2 - 2,114 \cdot 0 \cdot 10^{-7} (t_{68} \\
 & - 630,74)^3 + 2,867 \cdot 1 \cdot 10^{-10} (t_{68} - 630,74)^4 \quad (1)
 \end{aligned}$$

La fonction écart ainsi obtenue est très proche de la précédente, toute différence étant bien dans les limites de l'erreur expérimentale.

On a traité de la même façon la fonction écart de l'échelle du thermomètre à résistance de platine aux températures élevées, comme elle a été proposée par Marcarino et Crovini [3],

par rapport à l'EIPT-68. Entre 0 °C et 962 °C, l'échelle proposée du thermomètre à résistance de platine est définie au moyen des équations suivantes :

$$t = t' + 0,045 \left(\frac{t'}{100 \text{ °C}} \right) \left(\frac{t'}{100 \text{ °C}} - 1 \right) \left(\frac{t'}{419,58 \text{ °C}} - 1 \right) \cdot \left(\frac{t'}{630,74 \text{ °C}} - 1 \right) \left[1 - \varepsilon \left(\frac{t'}{1064,43 \text{ °C}} \right)^n \right] \quad (2)$$

$$W(t') = 1 + At' + Bt'^2 \quad (3)$$

Lorsque l'on attribue au point de l'argent la valeur provenant de [1] et que l'on tient compte des résultats de Ricolfi et Lanza, les équations (2) et (3) sont satisfaites avec $n = 4,1$.

Lorsque l'on modifie la constante n , la valeur extrapolée pour le point de l'or est également modifiée, et cela indépendamment du thermomètre utilisé. On a trouvé une différence maximale de 1 mK parmi différents groupes de thermomètres, lorsqu'on a fait l'extrapolation au point de l'or, en utilisant les équations (2) et (3), soit avec $n = 4,6$ soit avec $n = 4,1$.

BIBLIOGRAPHIE

1. CROVINI (L.) et ACTIS (A.), *Metrologia*, 14, 1978, p. 69.
2. RICOLFI (T.) et LANZA (F.), *High Temperatures - High Pressures*, 9, 1977, p. 483.
3. MARCARINO (P.) et CROVINI (L.), *Temperature Measurement 1975*, Inst. Phys. Conf. Ser. 26, p. 107, Institute of Physics, London, 1975.

Document original reçu le 6 mars 1978,
version corrigée reçue le 29 août 1978.

ANNEXE T 28

Sur le recuit des thermomètres à résistance de platine pour températures élevées

par L. CROVINI

Istituto di Metrologia G. Colonnetti (Italie)

(Traduction du Document CCT/78-7)

Il y a environ cinquante ans qu'ont été faites les premières tentatives pour étendre l'échelle du thermomètre à résistance de platine au-dessus de 630 °C, et le problème du recuit n'est toujours pas résolu de façon satisfaisante.

Pour les mesures de température au-dessous de 500 °C, nous pouvons conserver un thermomètre à résistance de platine dans un état de référence bien défini et reproductible, en le recuisant à n'importe quelle température entre 450 et 500 °C. Cet état de référence, auquel on se rapporte comme conditions de recuit complet, est tout à fait propice à fournir une très grande reproductibilité de l'échelle du thermomètre à résistance de platine jusqu'à 500 °C. Au contraire, lorsque le thermomètre est soumis à des températures supérieures à 500 °C, et en particulier supérieures à 650 °C, ce recuit n'est plus suffisant pour assurer la reproductibilité, c'est-à-dire ramener le thermomètre à son état de référence. Pour obtenir cet état, il convient d'utiliser certaines méthodes de recuit plus élaborées.

On peut distinguer deux types de modifications de la résistance du thermomètre lorsqu'on utilise celui-ci au-dessus de 650 °C : certaines modifications sont dues à des défauts lacunaires piégés dans le platine par effet de tremp

lorsqu'on refroidit rapidement le thermomètre à partir de températures élevées ; d'autres ont une autre cause (par exemple contamination et oxydation du platine, défauts autres que lacunaires, croissance des grains). Pour éliminer les défauts lacunaires piégés, Evans et Wood [1] ont adopté un recuit de 1 h à 650 °C, suivi d'un refroidissement très lent (6 à 8 h) jusqu'à la température ambiante.

Berry [2] a suggéré un refroidissement par échelons de 50 °C (paliers d'environ 10 min) à partir de la température mesurée ou de 850 °C (la plus basse de ces deux températures jusqu'à 450 °C, et ensuite jusqu'à la température ambiante. Ses résultats montrent que les méthodes de [1, 4, 5] n'éliminent pas la totalité des défauts lacunaires.

Wood [3] a conçu une troisième technique fondée sur les découvertes de Berry : un refroidissement contrôlé de façon automatique jusqu'à 450 °C à partir de la température mesurée, au rythme de 90 °C par heure.

Chattle [4] et Marcarino et Crovini [5] ont adopté des techniques semblables : un recuit de 30 min à 650 °C suivi d'un recuit de 30 min à 450 °C pour Chattle, et une séquence identique avec des durées de 1 h pour Marcarino et Crovini.

Le problème des défauts lacunaires piégés est virtuellement résolu au moyen des techniques de Berry [2] ou de Wood [3]. On n'a pas encore trouvé de méthodes pour stabiliser de façon satisfaisante les autres modifications de la résistance. La figure 1 montre un cas typique obtenu par Marcarino et Crovini [5] : les points noirs se rapportent aux déterminations successives de R_{Ag}/R_{TP} tandis que les cercles blancs représentent les valeurs de la résistance déterminée au point triple de l'eau (R_{TP}). La stabilité de R_{Ag}/R_{TP} est évidemment liée à celle de R_{TP} mais elle ne subsiste pas très longtemps. Wood [3] a obtenu des résultats comparables en soumettant un thermomètre du type à cage d'écureuil à un chauffage prolongé à 1065 °C et à des trempes et recuits périodiques.

Evans a suggéré [6] que la conception du thermomètre peut avoir une influence sur sa stabilité lorsqu'on l'utilise à des températures élevées, et cela dans une plus grande mesure que lorsqu'on l'utilise au-dessous de 500 °C. Nous avons en fait observé un comportement complètement différent pour des thermomètres de conception différente (voir tableau I) et, parfois, pour des thermomètres de même type (à cage d'écureuil).

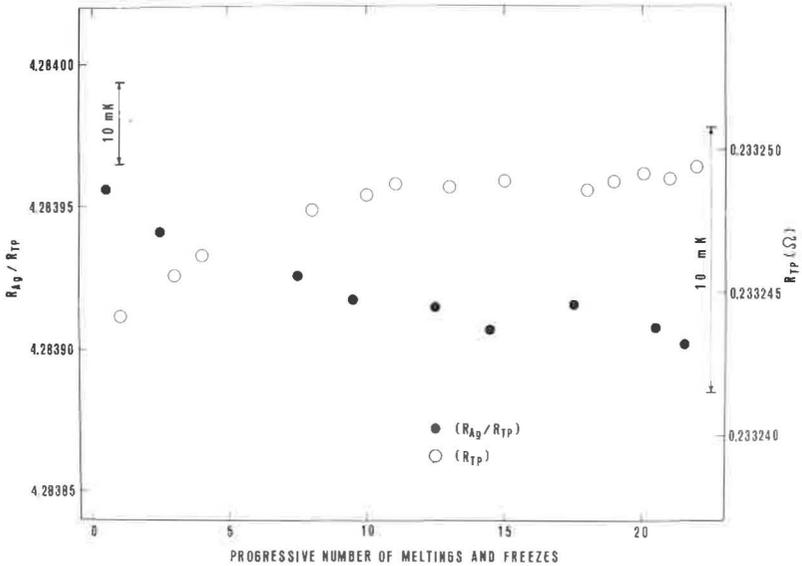


Fig. 1.- Comportement d'un thermomètre à résistance de platine soumis à des expositions répétées à la température du point de congélation de l'argent.

Il a été aussi noté [6] que la répétition fréquente de cycles entre des températures élevées et la température ambiante affecte davantage la stabilité qu'une utilisation prolongée, mais continue, à une température élevée. Mais c'est le premier cas qui correspond aux conditions courantes d'utilisation, si l'on adopte le thermomètre à résistance de platine comme instrument d'interpolation dans une future EIPT, entre le point de l'antimoine et, disons, le point de l'or.

Aucune des techniques de recuit proposées jusqu'à maintenant pour stabiliser les thermomètres ne s'est avérée franchement supérieure aux autres. Peut-être aucune d'entre elles n'est-elle apte à pallier certains phénomènes défavorables, qui surviennent aux températures élevées, comme par exemple l'oxydation du platine [7].

Il ne fait aucun doute qu'en toute priorité il convient de résoudre le problème de la stabilisation par recuit, avant de pouvoir prescrire le thermomètre à résistance de platine comme instrument d'interpolation de l'EIPT aux températures élevées. Je tends à penser qu'une technique satisfaisante de recuit devrait au moins donner pour R_{TP} une stabilité de

TABLEAU I

Quelques résultats de recuits de thermomètres effectués à l'IMGC

Thermomètre	Température d'utilisation	Type de recuit	Ecart à 0,01 °C (%)	
1	t_{Ag}	36 h	a	+ 2 x 10 ⁻⁴
1	t_{Cu}	14 h	a	+ 6 x 10 ⁻³
2	t_{Ag}	16 h	a	- 4 x 10 ⁻⁴
3	800 °C	2 h	b	+ 2,5 x 10 ⁻²
3	800-1000 °C	10 h	c	+ 6,8 x 10 ⁻³
4	800 °C	24 h	b	- 0,10
4	800-1000 °C	9 h	c	- 16 x 10 ⁻³

Types de thermomètres : 1 et 2 - 0,25 Ω, cage d'écureuil ;
3 - 1,4 Ω, filament bobiné, double capillaire ;
4 - 25 Ω, filament enroulé, hélice.

Types de recuit : a) 30 min à 650 °C suivies de 30 min à 450 °C ;
b) premier traitement en l'état, 1 h à 480 °C après utilisation à température élevée ;
c) traitement final pour obtenir la stabilité, identique à b).

Note : Le thermomètre 3 présente une diminution finale de R_{100}/R_0 de 16×10^{-6} par rapport à l'état initial, tandis que le thermomètre 4 présente une diminution de 2×10^{-5} .

± 1 mK, mesurée comme différence entre les résistances au point triple de l'eau avant et après une mesure à un point fixe à température élevée (utilisation de 1 à 5 h).

Document original reçu le 6 mars 1978,
Version corrigée reçue le 29 août 1978.

BIBLIOGRAPHIE

1. EVANS (J.P.), WOOD (S.D.), *Metrologia*, 7, 1971, p. 108.
2. BERRY (R.J.), *Temperature**, 1972, p. 937.
3. WOOD (S.D.), *NBS Tech. Note 764*, 1973.
4. CHATTLE (M.V.), *Temperature**, 1972, p. 907.
5. MARCARINO (P.) et CROVINI (L.), *Temperature Measurement 1975*** , p. 107.

6. EVANS (J.P.), *Temperature**, 1972, p. 899.
7. BERRY (R.J.), *Can. Journ. of Chem.*, 55, 1977, p. 1792.

* *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.

ANNEXE T 29

**Expression de la relation $W - t$
pour les thermomètres à résistance de platine,
de 0 °C à 1 064,43 °C**

par K. MITSUI

National Research Laboratory of Metrology (Japon)

(Traduction du Document CCT/78-29)

On propose une formule pour exprimer la relation entre la résistance réduite W et la température t pour les thermomètres à résistance de platine, de 0 °C à 1064,43 °C. La formule donne une approximation de l'EIPT-68 à 0,3 mK près de 0 °C à 450 °C, et à 3,5 mK près de 450 °C à 630,74 °C. Dans le domaine de 630,74 °C à 1064,43 °C, cette formule est semblable à celle qu'a proposée le Groupe de travail 2 et concorde avec elle à 10 mK près. Les équations sont données ci-après ; elles sont semblables à celles de l'EIPT-68.

$$W = 1 + At' + Bt'^2 \quad (1)$$

$$t = t' + N(t') \quad (2)$$

où

$$N(t') = 0,053 \left(\frac{t'}{100 \text{ °C}} \right)^2 \left(\frac{t'}{419,58 \text{ °C}} - 1 \right) \left(\frac{t'}{769 \text{ °C}} - 1 \right) \left[1 - e \left(\frac{t'}{1064,43 \text{ °C}} \right)^4 \right]$$

Il faut déterminer les constantes A et B au moyen des valeurs de W observées aux points de congélation de l'étain et du zinc avec les valeurs de t' suivantes :

$$t' \text{ (point de congélation de l'étain)} = 231,879 \text{ 2 °C,}$$

$$t' \text{ (point de congélation du zinc)} = 419,58 \text{ °C,}$$

et avec une valeur de e égale à 0,77.

On détermine ensuite la constante e au moyen de la valeur de W observée au point de congélation de l'or (ou au point de congélation de l'argent lorsqu'on utilise le thermomètre au-dessous de ce dernier point) avec la valeur t' calculée d'après l'équation (1).

On a effectué le calcul des constantes A , B et e pour plusieurs thermomètres en utilisant les valeurs de W observées aux points fixes indiqués dans le tableau I.

TABLEAU I

Valeurs de W observées à cinq points fixes

Thermomètre	W_{Sn}	W_{Zn}	W_{Sb}	W_{Ag}	W_{Au}
N° 6452	1,892 735	2,568 790	3,279 973	4,286 054	4,571 306
651	778	8 851	80 157	6 273	71 590
653	746	8 770	80 038	6 136	71 380
E 058	546	8 441	79 532	5 294	70 537
059	216	7 837	78 665	3 929	69 000
061	063	7 577	78 268	3 442	68 576
062	291	7 988	78 884	4 343	69 577
063	717	8 751	79 968	5 882	71 211

Le résultat en est donné au tableau II, en même temps que les écarts des températures calculées aux points de congélation

TABLEAU II

Constantes des thermomètres et écarts des températures calculées aux points de congélation de l'antimoine et de l'argent

Thermomètre	$A \times 10^3$	$B \times 10^7$	e	$t_{\text{cal}} - t_{\text{Sb}}^*$ (mK)	$t_{\text{cal}} - t_{\text{Ag}}^*$ (mK)
N° 6452	3,987 184	- 5,916 176	0,746 4	- 31	- 24
651	7 419	18 311	74 9	+ 7	+ 13
653	7 349	21 243	95 3	+ 20	+ 63
E 058	6 390	17 066	64 7	- 1	- 13
059	4 987	17 939	70 3	+ 15	+ 4
061	4 277	15 800	79 5	+ 5	- 7
062	5 265	15 998	76 6	+ 5	- 14
063	7 125	16 993	52 5	- 11	- 45

* $t_{\text{Sb}} = 630,74 \text{ }^\circ\text{C}$, $t_{\text{Ag}} = 962,08 \text{ }^\circ\text{C}$

de l'antimoine et de l'argent. Les trois premières lignes du tableau I donnent les résultats obtenus au NRLM (par S. Nakaya *et al.* [1]) et les cinq dernières lignes donnent les résultats obtenus au NPL (par M.V. Chattle [2]). Etant donnée la nature de la formule que l'on présente, les constantes A du tableau II représentent les valeurs de $dW(t)/dt$ à 0 °C des thermomètres.

Le but de cette formule est d'assurer une variation lisse et naturelle avec la température de la dérivée seconde de la fonction $W(t)$; la figure 1 en donne une illustration.

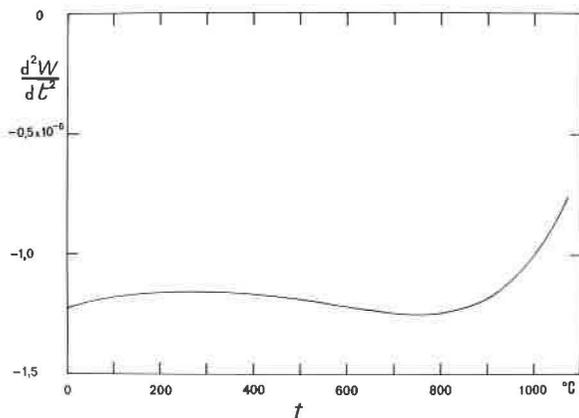


Fig. 1.- Variation de $\frac{d^2W}{dt^2}$ en fonction de la température.

Cette figure, qui représente le "thermomètre étalon" de la table $W_{\text{CCT-68}}$, a été établie en utilisant les équations ci-dessous, qui sont une approximation de la formule que l'on présente, dont l'erreur est inférieure à 0,1 mK au-dessous de 630 °C et au plus égale à 3 mK à environ 960 °C.

$$W(t) = 1 + At + Bt^2 - (A + 2Bt) N(t) \quad (3)$$

$$dW(t)/dt = A + 2B(t - N(t)) - (A + 2Bt) \cdot dN(t)/dt \quad (4)$$

$$d^2W(t)/dt^2 = 2B(1 - 2dN(t)/dt - t \cdot d^2N(t)/dt^2) - A \cdot d^2N(t)/dt^2 \quad (5)$$

Reçu en mars 1978.

BIBLIOGRAPHIE

1. NAKAYA (S.), UCHIYAMA (H.), SAINO (T.), *Comité Consultatif de Thermométrie*, 8^e session, 1967, Annexe 1, Document 37.
2. CHATTLE (M.V.), *Temperature, Its Measurement and Control in Science and Industry*, Vol. 4, II, p. 907, Instrument Society of America, Pittsburgh, 1972.

Mesure précise du point de congélation de l'argent avec un thermomètre à résistance de platine

par N. TAKIYA

National Research Laboratory of Metrology (Japon)

(Traduction du Document CCT/78-20)

On a observé la température de congélation de l'argent avec une résolution de 0,1 mK en utilisant un thermomètre à résistance de platine et un pont de Kusters pour la mesure des résistances.

Le thermomètre à résistance de platine que l'on a utilisé est un de ceux qui ont été mis au point dans notre laboratoire il y a une dizaine d'années [1], et dont l'élément sensible consiste en un fil de platine de 0,5 mm de diamètre ; la valeur de sa résistance à 0 °C est de 0,12 ohm (*fig. 1*).

Le creuset, en graphite pur, contient 950 g d'argent et permet une profondeur d'immersion de 20 cm et une épaisseur d'argent autour du thermomètre de 7,5 mm. Le tube en silice qui contient le creuset est scellé à son extrémité supérieure de telle sorte que l'on peut être maître de l'atmosphère intérieure. On utilise normalement de l'argon à la pression d'une atmosphère (*fig. 2*).

On a pu observer avec succès la courbe de congélation grâce à la méthode suivante :

a) on maintient d'abord le four à quelques kelvins au-dessus de la température de congélation de l'argent ;

b) le four est ensuite refroidi rapidement jusqu'à ce que l'on détecte la nucléation de l'argent ;

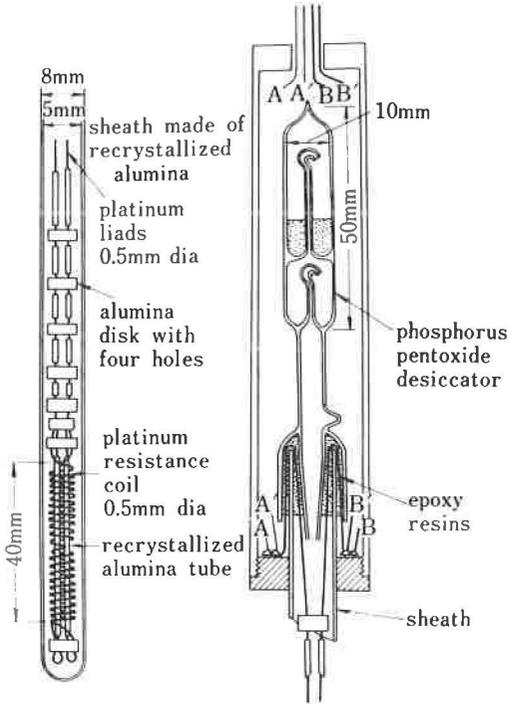


Fig. 1.- Construction du thermomètre.

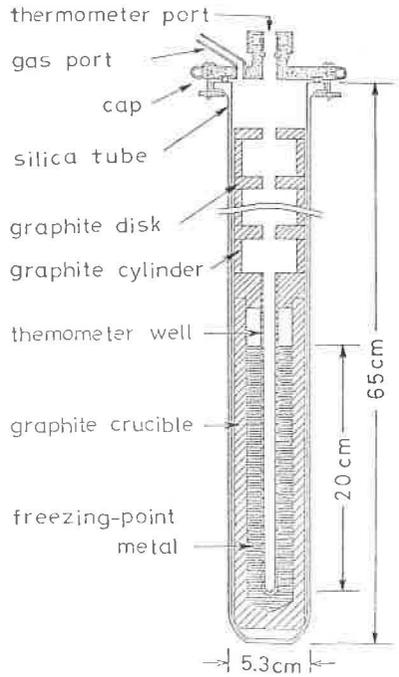


Fig. 2.- Creuset complet

c) on remonte ensuite rapidement la température du four jusqu'à environ 2 K au-dessous de la température de congélation de l'argent ;

d) après cela, on le maintient à cette température jusqu'à ce que la congélation soit achevée (fig. 3).

Lorsque l'on refroidissait le four lentement à vitesse constante ($- 0,16$ K/min), la remontée de température après la surfusion était trop lente comme le montre la figure 4.

On a comparé la température de congélation de deux échantillons d'argent de types différents (échantillon I et échantillon II), tous les deux de pureté nominale 99,999 % (tableau I).

Les courbes de congélation de ces échantillons (fig. 3 et fig. 5) ont été retracées en fonction de l'inverse de la fraction fondue (fig. 6). Selon la méthode d'analyse thermique qui utilise l'équation (1), on estime que les points de congélation de l'échantillon I et de l'échantillon II sont inférieurs

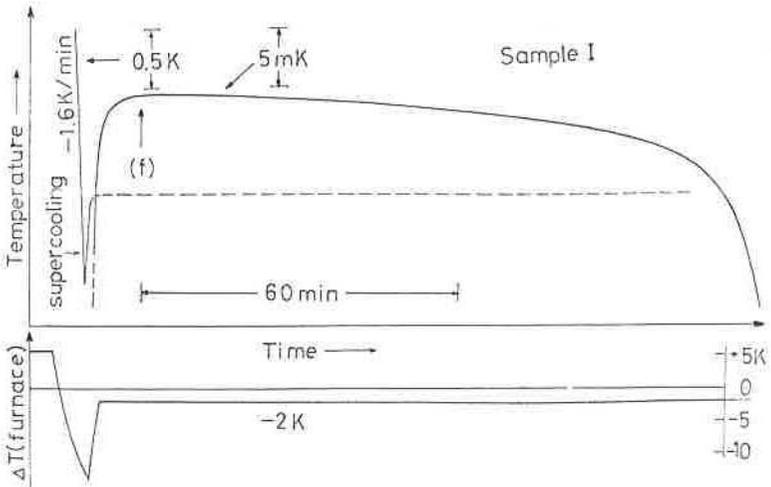


Fig. 3.- Courbe typique de congélation de l'échantillon I.

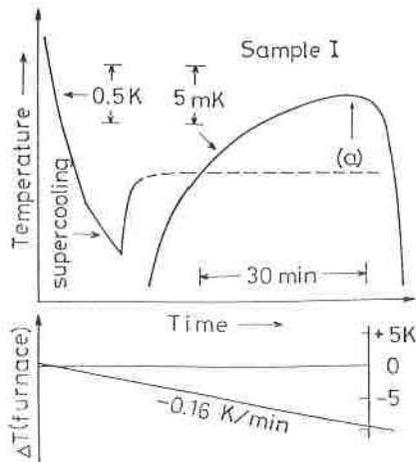


Fig. 4.- Courbe typique de congélation lorsque le four est refroidi lentement à vitesse constante.

TABLEAU I

Impuretés nominales dans les échantillons

Echantillon I		Echantillon II	
Ag	99,999 (%)	Ag	99,999 (%)
Cu	0,000 0	Mg	w.v.*
Pb	0,000 0	Cu	w.v.
Fe	0,000 1	Si	v.w.v.
Bi	0,000 0	Fe	v.w.v.
Te	0,000 0		

* analysé sur plaque sèche
w.v. : faiblement visible
v.w.v. : très faiblement visible

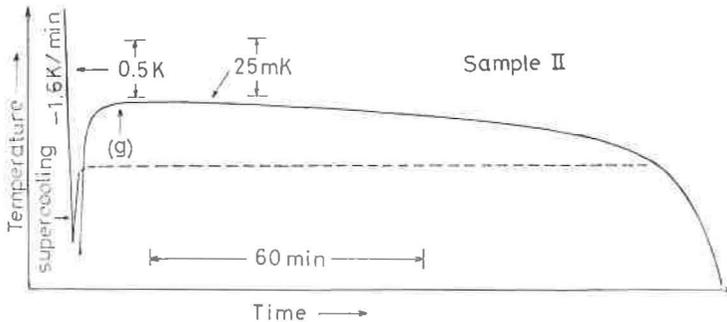


Fig. 5.- Courbe typique de congélation de l'échantillon II.

au point de congélation de l'argent pur respectivement de 1,3 mK et de 12 mK.

On a déterminé la variation de la température de congélation en fonction de la pression ; on a trouvé 6,8 mK pour une atmosphère.

La figure 7 donne le résultat de dix-neuf mesures effectuées en une semaine ; elle représente seulement les lectures du thermomètre qui concernent le point de congélation de l'échantillon I. La reproductibilité était de $\pm 0,3$ mK (écart-type) sur une durée d'environ 22 heures d'utilisation du thermomètre à 962 ± 10 °C.

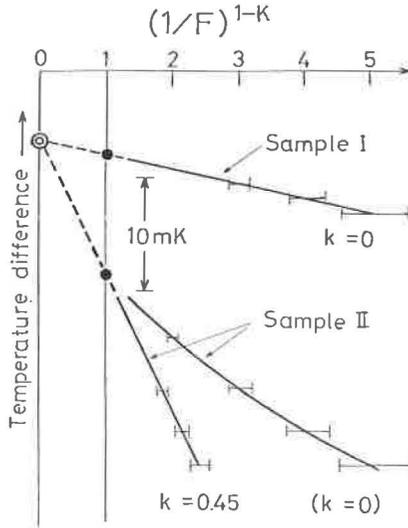


Fig. 6.- Décroissance de la température de congélation en fonction de l'inverse de la fraction fondue.

⊙ point de congélation de l'argent pur (estimé)

● point de congélation de l'échantillon d'argent (estimé)

Equation (1) :

$$T_s - T_{Ag} = -\frac{N}{A}(1-k)\left(\frac{1}{F}\right)^{1-k}$$

T_s : température d'équilibre en cours de congélation

T_{Ag} : température de congélation de l'argent pur, 1235,58 K

N : fraction molaire des impuretés dans l'échantillon

F : fraction fondue

k : constante de "ségrégation"

A : constante cryoscopique qui est égale à L/RT_{Ag}^2

L : chaleur latente de fusion de l'argent pur, $1,11 \times 10^3$ J/mol

R : constante des gaz.

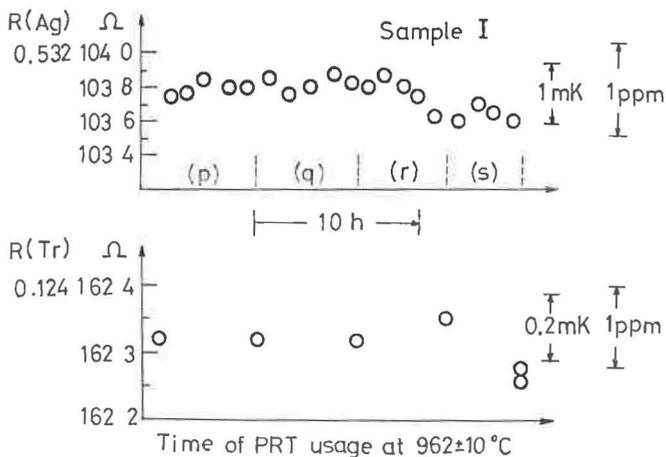


Fig. 7.- Mesures successives de $R(Ag)$ et $R(Tr)$

Reçu le 8 mars 1978.

BIBLIOGRAPHIE

1. NAKAYA (S.), UCHIYAMA (H.), *Comité Consultatif de Thermométrie*, 6^e session, 1962, p. 57 et 7^e session, 1964, p. 43.

ANNEXE T 31

Détermination de la température de congélation du cuivre selon le taux de pureté

par E. GEYER, M. BANNERT et U. UHLEMANN

Amt für Standardisierung, Messwesen und Warenprüfung (Rép. Dém. Allemande)

(Traduction du Document CCT/78-21)

On a déterminé la température de congélation t_{68} (Cu) d'un groupe de cinq échantillons de cuivre provenant de matériaux pour points fixes de différentes puretés nominales. On a utilisé des échantillons de la série des étalons de cuivre de référence de l'ASMW, de pureté "99,3 à 99,998 %", et des mélanges de ces échantillons. Le tableau I donne le résultat des analyses des cinq échantillons (N^{OS} 3 à 7).

TABLEAU I

Proportion d'impuretés pour cinq échantillons de cuivre (unité : 10⁻⁶)

	Échantillons				
	3	4	5	6	7
Bi	0,27	90	41	19,7	10,1
Zn	0,5	1007	450,7	212	106,1
Ni	1,8	940	432,7	209	105,9
Fe	7,4	474	181,6	107	58,6
Ag	11,2	992	454,7	216	114,0
Sn	0,15	955	438,2	216	109,0
Cr	0,2	96	42,0	20,6	10,4
Pb	0,5	916	427,9	205	103,3
Au	0,1	45	16,7	9,6	4,8
Sb	1,1	1001	60,1	207	104,9
Mn	0,55	92	42,6	20	10,2

La mesure de la température t_{68} (Cu) a été effectuée au moyen d'un comparateur [1].

Comme lampes pyrométriques de comparaison, on a utilisé deux lampes à ruban de tungstène (Osram Wi 17 et lampe GEC à haute stabilité) ; au préalable, ces lampes avaient été étalonnées sur l'intervalle de 1064,43 °C à 1188,78 °C grâce à une liaison avec le point fixe de l'or, suivie d'un quadruplement de luminance énergétique à une longueur d'onde effective $\lambda = (660 \pm 0,2)$ nm. L'incertitude de l'étalonnage des lampes était de 0,1 K.

Pour effectuer les mesures, on a utilisé un corps noir à cavité cylindrique ($r = 1,5$ mm, $l = 30$ mm, $\rho = 0,13$) en graphite spectroscopiquement pur (Nationally-Owned Elektrokohle Works, Berlin-Lichtenberg). Le creuset pouvait contenir 320 g de cuivre. On a déterminé l'émissivité par le calcul, comme l'indique Quinn [2]. Elle était : $\epsilon = 0,9997$.

On chauffait le corps noir dans un four normal. On utilisait un dispositif mécanique spécial pour placer le corps noir et l'une ou l'autre lampe pyrométrique sur l'axe optique du dispositif de comparaison (incertitude du positionnement $\pm 0,1$ mm).

Le tableau II donne les températures de congélation déterminées pour les échantillons 3 à 7. La température indiquée est la moyenne arithmétique d'au moins 15 mesures individuelles

TABLEAU II

Résultats des mesures de température de congélation pour cinq échantillons de cuivre

	Pureté en masse (%)	Température de congélation t_{68} (°C)
Échantillon 3	99,998	1084,88
7	926	4,86
6	856	4,44
5	701	4,06
4	399	3,02

de la température de congélation que l'on déterminait en général sur plusieurs jours (recalescence pendant environ 15 à 20 minutes). L'écart-type des valeurs déterminées est $\sigma = 0,07$ K. L'incertitude des températures de congélation indiquées est $u_T = 0,15$ K avec un niveau de confiance de 0,95. Elle est due à l'incertitude de l'étalonnage du corps noir de comparaison

($\pm 0,1$ K) et à l'incertitude du réglage du corps noir et des lampes pyrométriques par rapport à l'axe optique du dispositif de comparaison ($\pm 0,05$ K).

En admettant $u_T = 0,15$ K, on peut s'attendre à une relation linéaire entre les valeurs numériques de t_{68} (Cu) et de c pour $99,3\% \leq c \leq 99,998\%$. Par extrapolation à $c = 100\%$, on obtient t_{68} (Cu) = $(1084,97 \pm 0,15)^\circ\text{C}$ comme température de congélation du cuivre pur.

Reçu le 8 mars 1978.

BIBLIOGRAPHIE

1. GEYER (E.), Conference on Temperature Measurement, Sept. 1975, Prague, Document 37/40.
 2. QUINN (T.J.), *Brit. J. Appl. Phys.*, 13, 1967, p. 1105.
-

**Aptitude des lampes à ruban de tungstène
comme sources étalons secondaires
au-dessous de 1 064 °C**

par T. P. JONES et J. TAPPING

National Measurement Laboratory (Australie)

(Traduction du Document CCT/78-31)

En envisageant d'étendre la pyrométrie photoélectrique au-dessous de 1064 °C comme moyen de réaliser l'EIPT dans ce domaine, il est essentiel d'étudier la façon dont on pourra disséminer l'échelle de température. A l'heure actuelle, il semble que le moyen le plus vraisemblable de transférer cette échelle aux instruments pratiques est d'utiliser des lampes à ruban de tungstène de grande stabilité. Il est par conséquent nécessaire d'étudier la reproductibilité des lampes à ruban de tungstène utilisées au-dessous de 1064 °C.

On trouvera dans la référence [1] les détails d'une étude sur les caractéristiques de fonctionnement de ces lampes au-dessous de 1064 °C. Pour réduire les incertitudes liées à l'emploi de ces lampes, il est nécessaire de limiter leur emploi à 1064 °C et au-dessous, de mesurer et, si possible, de contrôler l'environnement de la lampe, et d'apporter des corrections pour en tenir compte. Il faut en particulier tenir compte des modifications de la luminance énergétique spectrale dues aux variations de la résistance de la lampe et de la température des broches. On a trouvé que le fait d'apporter des corrections pour les modifications de la résistance de la lampe diminue d'un ordre de grandeur l'incertitude sur l'utilisation des lampes.

Les incertitudes liées à l'utilisation de ces lampes au-dessous de 1064 °C, données au tableau I, représentent les valeurs minimales que l'on peut atteindre dans des conditions pratiques. Toutes les incertitudes citées correspondent à un taux de confiance estimé à 99 %.

TABLEAU I

Incertitudes liées à l'utilisation des lampes à ruban de tungstène au-dessous de 1064 °C

Source d'incertitude	Incertitudes composantes	Incertitudes (mK)		
		1064°C	960°C	770°C
Nettoyage		5	4	3
Positionnement		5	4	3
Température ambiante		3	5	14
Stabilité à long terme		10	8	5
Température des broches	} facteur de correction de luminance énergétique	1	3	9
Résistance	} - due à la température des broches - due au facteur de correction - due à la mesure total	2	5	16
		8	14	30
		2	5	16
		9	16	38
		15	20	45
Incertitude totale (arrondie à 5 mK)				

Les incertitudes citées se rapportent uniquement à l'emploi de lampes à ruban de tungstène. Pour obtenir l'incertitude totale sur la réalisation photoélectrique de la température au-dessous de 1064 °C, il convient de combiner cette incertitude avec l'incertitude liée à la réalisation fondamentale de l'échelle de température. Cette composante peut varier d'un laboratoire à l'autre mais nos recherches préliminaires et celles qui ont été publiées par d'autres laboratoires nationaux [2], [3], [4], laissent à penser que l'incertitude partielle à laquelle on peut s'attendre sur la réalisation fondamentale d'une échelle de température photoélectrique au-dessous de 1064 °C, est du même ordre de grandeur que celle qui est liée aux lampes à ruban de tungstène. Ainsi, les incertitudes totales qu'il conviendra sans doute d'appliquer à la dissémination d'une

échelle de température photoélectrique sont de l'ordre de 0,03 K à 1064 °C, 0,05 K à 960 °C et 0,08 K à 770 °C.

Si l'on compare ces valeurs à l'incertitude annoncée lorsque l'on utilise des thermomètres à résistance de platine dans le domaine de température de 630 °C à 1064 °C, incertitude qui est de l'ordre de 0,01 K [5], il semble qu'il faille préférer la thermométrie à résistance de platine pour réaliser l'EIPT dans le domaine compris entre 630 °C et 1064 °C.

Document original reçu le 13 mars 1978,
Version corrigée reçue le 23 octobre 1978.

BIBLIOGRAPHIE

1. JONES (T.P.), TAPPING (J.), *Metrologia*, à paraître.
 2. QUINN (T.J.), CHANDLER (T.R.D.), CHATTLE (M.V.), *Metrologia*, 9, 1973, p. 44.
 3. JUNG (H.J.), *Temperature Measurement 1975*, Inst. Phys. Conf. Ser. 26, p. 278, Institute of Physics, London, 1975.
 4. COSLOVI (L.), ROSSI (A.), RUFFINO (G.), *Metrologia*, 11, 1975, p. 85.
 5. *Comité Consultatif de Thermométrie*, 11^e session, 1976, p. T 21.
-

TABLE DES MATIÈRES

COMITÉ CONSULTATIF DE THERMOMÉTRIE 12^e Session (1978)

	Pages
Notice historique sur les organes de la Convention du Mètre	v
Liste des membres	vii
Ordre du jour	ix
Rapport au Comité International des Poids et Mesures, par M. Durieux	T 1
Rapport abrégé présenté à la 67 ^e session du CIPM	1
Principaux points discutés et conclusions (Échelle Provisoire de Température de 1976 entre 0,5 K et 30 K. Échelle Internationale Pratique de Température. Monographie complémentaire à l'EIPT. Points de référence secondaires et réalisations secondaires de l'EIPT. Comparaisons internationales. Groupes de travail)	2
<i>Recommandation T 1 (1978)</i>	5
Texte de l'Échelle Provisoire de Température entre 0,5 K et 30 K (EPT-76)	7
Compte rendu des séances de la 12 ^e session du CCT	16
1. Approbation du compte rendu des séances de la 11 ^e session du CCT	17
2. Questions soulevées par la 11 ^e session du CCT	17
a) Publication de la liste des points de référence secondaires (<i>Metrologia</i> , 13, 1977, p. 197)	17
b) Publication des différences entre l'EIPT-68 et les températures thermodynamiques au-dessus de 0 °C (<i>Metrologia</i> , 13, 1977, p. 175 et p. 177)	17
c) Échelle provisoire de température de 1976 entre 0,5 K et 30 K (EPT-76)	17
d) Divers: demande d'informations par le Président du Groupe de travail 5	18
3. Discussion des rapports des Groupes de travail 1 à 5	18
a) Rapport du Groupe de travail 1 (Préparation du remplacement de l'EIPT-68)	18

b)	Rapport du Groupe de travail 2 (Révision des points de référence secondaires et recherches sur des techniques pratiques simplifiées de mesure des températures)	19
c)	Rapport du 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)	21
d)	Rapport du 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)	23
e)	Rapport du Groupe de travail 5 (Thermomètres pratiques aux températures inférieures à 30 K)	24
4.	Discussion sur la réunion du Groupe de travail 2 avec la sous-commission I.4.1 de l'UICPA le 8 mai 1978 au BIPM (points de référence secondaires et matériaux de référence)	26
5.	État d'avancement des travaux en relation avec les points 1 à 5 de la Recommandation T 1 (1976) faite au CIPM	27
a)	Mesure des températures thermodynamiques entre 20 K et 1 064 °C	27
b)	Mesure de la constante des gaz	27
c)	Recherches sur la détermination de la température pour la jonction des domaines du thermomètre à résistance de platine et du pyromètre optique et sur les thermomètres à résistance de platine aux températures élevées	28
d)	Recherches sur des méthodes simplifiées de réalisation de l'EIPT-68	28
e)	Recherches sur la dissémination de l'EIPT au-dessus de 2 000 K au moyen de lampes à ruban de tungstène ou par tout autre moyen approprié	29
6.	Discussion de trois points soulevés par les rapports du Groupe de travail 1 et du Groupe de travail 2	29
a)	Monographie sur les renseignements complémentaires pour la réalisation de l'EIPT-68	29
b)	Projet d'échelle pour une future révision de l'EIPT-68 (résumé de 13 propositions concernant les principes de la nouvelle EIPT)	31
c)	Sanction officielle de réalisations secondaires de l'EIPT-68	35
7.	Échelle Provisoire de Température de 1976 entre 0,5 K et 30 K (EPT-76) Exposé sur l'article donnant le contexte de l'EPT-76. Les textes de l'Échelle et de cet article seront publiés ensemble	38 39
8.	Programmes futurs et composition des Groupes de travail	41
a)	Programmes futurs	41
	Groupe de travail 1: Texte de la nouvelle EIPT et document sur les renseignements complémentaires	41
	Groupe de travail 2: Points de référence secondaires et réalisations secondaires de l'EIPT	42
	Groupe de travail 3: Thermomètres à résistance de platine aux températures élevées et températures thermodynamiques au-dessus de 100 K	42
	Groupes de travail 4 et 5: attributions inchangées	42
b)	Composition	42
	Groupes de travail 1: création d'un groupe de rédaction	42
	Groupes de travail 2: Mr Bedford, président	43
	Groupes de travail 3, 4 et 5: aucun changement	43

9. Discussion des documents présentés à la 12 ^e session du CCT	43
10. Questions diverses	45
a) Travaux thermométriques futurs du BIPM	45
b) Rapport et Recommandation du CCT au CIPM	46
c) Prochaine session du CCT	46

Annexes

T 1. Documents de travail présentés à la 12 ^e session du CCT	47
T 2. 4 ^e Rapport du Groupe de travail 1 (Révision de l'EIPT)	53
T 2 bis. NML (Australie). — Proposition pour une échelle pratique de température entre 1 et 273 K, par R. C. Kemp, L. M. Besley et W. R. G. Kemp (Résumé)	58
T 3. 4 ^e Rapport du Groupe de travail 2 (Points fixes secondaires et échelles secondaires)	59
T 4. 4 ^e Rapport du Groupe de travail 3 (Températures supérieures à 100 K)	72
T 5. Rapport du Groupe de travail 4 (Voir le texte de l'Échelle Provisoire de Température de 1976 entre 0,5 K et 30 K à la page T 7)	74
T 6. 2 ^e Rapport du Groupe de travail 5 (Thermomètres aux températures inférieures à 30 K)	76
T 7. NBS (États-Unis d'Amérique). — Dispositif à supraconduction pour fournir des températures de référence inférieures à 0,5 K, par R. J. Soulen Jr	83
T 8. NBS (États-Unis d'Amérique). — Points fixes supraconducteurs pour des températures supérieures à 0,5 K, par J. F. Schooley	86
T 9. ASMW (Rép. Dém. Allemande). — Reproductibilité des mesures faites avec des thermomètres à résistance de germanium au point d'ébullition de ⁴ He (4,2 K), par L. Sur	89
T 10. IMPR (U.R.S.S.). — Thermomètre à résistance de carbone très stable, par S. F. Vorfolomeev, G. A. Kytin, O. F. Pogorelova et D. N. Astrov.	91
T 11. IMPR (U.R.S.S.). — Sur la correction de sorption pour le thermomètre à gaz de précision, par A. P. Gershanik, M. S. Glikman et D. N. Astrov.	93
T 12. NRLM (Japon). — Une cellule scellée en cuivre pour réaliser les points triples des gaz condensés, par K. Mitsui et A. Inaba	98
T 13. NBS (États-Unis d'Amérique). — Réalisation du point triple de l'argon dans une cellule scellée, par G. T. Furukawa	100
T 14. NRLM (Japon). — Réalisation du point triple de l'argon au moyen d'une cellule scellée, par A. Inaba et K. Mitsui	103
T 15. IMGC (Italie). — L'utilisation du point triple de l'argon d'après l'EIPT-68 (édition amendée de 1975), par F. Pavese	106
T 16. NML (Australie). — Points de référence secondaires et autres points de référence, par R. C. Kemp et W. R. G. Kemp	110
T 17. NRLM (Japon). — Réalisation des points triples du krypton et du xénon au moyen de cellules scellées, par A. Inaba et K. Mitsui	111
T 18. NRC (Canada). — Sur quelques propriétés du dioxyde de carbone, par J. Ancsin	114
T 19. IMGC (Italie). — Sur la possibilité de définir des échelles secondaires sans utiliser de point d'ébullition, par F. Pavese et G. Demonti	116
T 20. PTB (Rép. Féd. d'Allemagne). — Étalonnage des thermomètres à résistance de platine dans un cryostat à évaporation dans le domaine des températures comprises entre 13,81 K et 273,15 K, par W. Blanke et W. Thomas	122

T 21.	IMGC (Italie). — <i>Sur la structure d'une nouvelle Échelle Internationale Pratique de Température au-dessous de 0 °C</i> , par F. Pavese	126
T 22.	NBS (États-Unis d'Amérique). — <i>Rôle proposé pour la température du point triple du gallium dans la définition de l'EIPT</i> , par B. W. Mangum et D. D. Thornton	130
T 23.	NBS (États-Unis d'Amérique). — <i>Comparaison des températures de congélation des étalons de zinc SRM-740 du NBS</i> , par G. T. Furukawa et J. L. Riddle	133
T 24.	NRC (Canada). — <i>Influence de l'oxydation du platine sur l'EIPT-68</i> , par J. Berry	136
T 25.	NML (Australie). — <i>Températures de référence au voisinage de 800 °C</i> , par J. V. McAllan	139
T 26.	IMT (Tchécoslovaquie). — <i>Expériences sur l'étalonnage des thermomètres à résistance pour températures élevées</i> , par M. Borovička et L. Hudoba	141
T 27.	IMGC (Italie). — <i>Résumé des résultats de mesures de la température thermodynamique et de thermométrie à résistance de platine aux températures élevées à l'IMGC</i> , par A. Actis, L. Crovini et P. Marcarino	144
T 28.	IMGC (Italie). — <i>Sur le recuit des thermomètres à résistance de platine pour températures élevées</i> , par L. Crovini	146
T 29.	NRLM (Japon). — <i>Expression de la relation $W - t$ pour les thermomètres à résistance de platine, de 0 °C à 1 064,43 °C</i> , par K. Mitsui	151
T 30.	NRLM (Japon). — <i>Mesure précise du point de congélation de l'argent avec un thermomètre à résistance de platine</i> , par N. Takiya	154
T 31.	ASMW (Rép. Dém. Allemande). — <i>Détermination de la température de congélation du cuivre selon le taux de pureté</i> , par E. Geyer, M. Bannert et U. Uhlemann	160
T 32.	NML (Australie). — <i>Aptitude des lampes à ruban de tungstène comme sources étalons secondaires au-dessous de 1 064 °C</i> , par T. P. Jones et J. Tapping	163

IMPRIMERIE DURAND

28600 LUISANT (FRANCE)

Dépôt légal, Imprimeur, 1979, n° 3469

ISBN 92-822-2057-5

ACHEVÉ D'IMPRIMER LE 1979-10-10

Imprimé en France