

**COMITÉ CONSULTATIF DE THERMOMÉTRIE**

**SESSION DE 1984**

---

ISBN 92-822-2091-5





# COMITÉ CONSULTATIF DE THERMOMÉTRIE

Rapport de la 15<sup>e</sup> session  
1984

Édité par le BIPM, Pavillon de Breteuil, F-92310 Sèvres, France



---

## NOTICE SUR LES ORGANES DE LA CONVENTION DU MÈTRE

---

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 m<sup>2</sup>) 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 actuellement tous les quatre 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 actuellement tous les 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.

---

(1) Au 31 décembre 1984, quarante-six 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), Corée (Rép. Pop. Dém. 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.

Une trentaine de physiciens ou techniciens travaillent dans les laboratoires du Bureau International. Ils y font principalement des recherches métrologiques, des comparaisons internationales des réalisations des unités et des vérifications d'étalons dans les domaines mentionnés ci-dessus. Ces travaux font l'objet d'un rapport annuel détaillé qui est publié avec les procès-verbaux des séances du Comité International. La dotation annuelle du Bureau International est de l'ordre de 12 058 000 francs-or (en 1984), soit environ 21 880 000 francs français.

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 (*BIPM Proc.-Verb. Com. Int. Poids et Mesures*, 31, 1963, p. 97). Chaque Comité Consultatif, dont la présidence est généralement confiée à un membre du Comité International, est composé de délégués 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 huit :

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 (CEMIRI), créé en 1958. En 1969, ce Comité Consultatif a institué quatre sections : Section I (Rayons X et  $\gamma$ , électrons), Section II (Mesure des radionucléides), Section III (Mesures neutroniques), Section IV (Étalons d'énergie  $\alpha$ ) ; 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 (ce Comité Consultatif a remplacé la « Commission du Système d'Unités » instituée par le CIPM en 1954).
8. Le Comité Consultatif pour la Masse et les grandeurs apparentées (CCM), créé en 1980.

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 hors commerce 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**

*Secrétaire*  
J. DE BOER

*Président*  
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.

ČESKOSLOVENSKÝ METROLOGICKÝ ÚSTAV [CSMU], Bratislava.

CONSEIL NATIONAL DE RECHERCHES [NRC], Ottawa.

CSIRO, Division of Applied Physics [CSIRO], Lindfield (Australie).

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

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

INSTITUT NATIONAL DE MÉTROLOGIE [NIM], Beijing.

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

KAMERLINGH ONNES LABORATORIUM [KOL], Leiden.

NATIONAL BUREAU OF STANDARDS [NBS], Gaithersburg (États-Unis d'Amérique).

NATIONAL PHYSICAL LABORATORY [NPL], Teddington.

NATIONAL RESEARCH LABORATORY OF METROLOGY [NRLM], Ibaraki.

PHYSIKALISCH-TECHNISCHE BUNDESANSTALT [PTB], Braunschweig.

VAN SWINDEN LABORATORIUM [VSL], Delft.

F.G. BRICKWEDDE, Pennsylvania State University, Pennsylvania.

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 15<sup>e</sup> session

---

1. Ouverture de la session. Nomination d'un rapporteur.
  2. Approbation du compte rendu des séances de la 14<sup>e</sup> session du CCT (1982).
  3. Documents présentés à la 15<sup>e</sup> session du CCT : classement dans les points ci-dessous de l'ordre du jour.
  4. Rapports des Groupes de travail :
    1. GT1 : Révision de l'EIPT et Renseignements complémentaires.
    2. GT2 : Points de référence secondaires et monographie sur les méthodes secondaires.
    3. GT3 : Domaine du thermomètre à résistance de platine.
    4. GT4 : EIPT au-dessous du domaine du thermomètre à résistance de platine.
    5. Réunion du 24 octobre 1983, tenue au NPL.
  5. Comparaisons internationales et points fixes.
  6. Examen du document sur les méthodes secondaires de thermométrie.
  7. Thermomètres à résistance de platine pour la mesure des hautes températures.
  8. Différences  $T - T_{68}$  et  $T - T_{76}$ .
  9. Températures au-dessous de 0,5 K.
  10. Méthodes d'interpolation entre les points fixes.
  11. Nouvelle EIPT : situation actuelle.
  12. Travaux futurs et composition des Groupes de travail.
  13. Travaux du BIPM.
  14. Publication des documents.
  15. Questions diverses.
  16. A-t-on besoin d'une EIPT ? Proposition de Mr Durieux.
  17. Prochaine session du CCT.
-



---

RAPPORT  
DU  
COMITÉ CONSULTATIF DE THERMOMÉTRIE  
(15<sup>e</sup> session - 1984)  
AU  
COMITÉ INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES  
par M. DURIEUX, rapporteur

---

Le Comité Consultatif de Thermométrie (CCT) a tenu sa 15<sup>e</sup> session au Pavillon de Breteuil les 5, 6 et 7 juin 1984.

Étaient présents :

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

Les délégués des laboratoires membres :

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

Československý Metrologický Ústav [CSMU], Bratislava  
(M. BOROVIČKA).

Conseil National de Recherches [NRC], Ottawa (R. E. BEDFORD).  
CSIRO, Division of Applied Physics [CSIRO], Lindfield  
(W. R. G. KEMP).

Institut National de Métrologie [NIM], Beijing (LING SHANKANG).

Institut National de Métrologie [INM], Paris (A. MOSER,  
G. BONNIER).

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

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

National Bureau of Standards [NBS], Gaithersburg (J. F. SCHOOLEY,  
R. J. SOULEN).

National Physical Laboratory [NPL], Teddington (R. L. RUSBY,  
M. V. CHATTLE).

National Research Laboratory of Metrology [NRLM], Ibaraki  
(M. MORIMURA).

Physikalisch-Technische Bundesanstalt [PTB], Braunschweig  
(W. THOMAS, W. BLANKE).

Van Swinden Laboratorium [VSL], Delft (P. BLOEMBERGEN).

L'un des membres nominativement désignés :

C.A. SWENSON (Ames).

Le directeur du BIPM (P. GIACOMO).

Assistaient aussi à la session : J. TERRIEN, directeur honoraire ;  
T. J. QUINN, sous-directeur ; J. BONHOURE, R. P. HUDSON et  
G. GIRARD, adjoints au directeur du BIPM.

Excusé : F. G. BRICKWEDDE (Pennsylvania), membre nominativement désigné.

Absents : Institut de Métrologie D. I. Mendéléev [IMM], Leningrad ;  
Institut des Mesures Physicotechniques et Radiotechniques [IMPR],  
Moscou.

Le CCT a eu cinquante-cinq documents à étudier, parmi lesquels les rapports des quatre Groupes de travail et un grand nombre de communications se rapportant à la nouvelle Échelle Internationale Pratique de Température (EIPT) en cours d'établissement. Le CCT a été satisfait de constater que le document intitulé « Supplementary Information for the IPTS-68 and the EPT-76 » avait été publié récemment \* et que la liste révisée des points de référence secondaires était prête. Elle sera publiée prochainement, ainsi que de nouvelles valeurs de la différence  $T - T_{68}$  ou  $T - T_{76}$  de 0,5 à 730 K.

Le CCT a également été satisfait d'apprendre que la comparaison internationale de cellules scellées à point triple de l'argon était achevée. Cette comparaison a été organisée par l'IMGC (Turin). Le rapport final comportant les résultats de cette comparaison fera l'objet d'une Monographie du BIPM \*\*.

En ce qui concerne la future EIPT, il reste à examiner un certain nombre de difficultés d'ordre pratique et de principe.

Sur le plan pratique, il n'est pas encore certain que le thermomètre à résistance de platine pour la mesure des hautes températures puisse fonctionner de façon satisfaisante au-dessus du point de l'argent (960 °C) ; par ailleurs, il faudrait connaître beaucoup mieux la relation entre l'échelle du thermomètre à résistance et la température thermodynamique au-dessus de 460 °C.

Sur le plan des principes, il reste encore à résoudre toute une série de questions telles que : définitions de remplacement, niveau acceptable de non unicité, échelles très exactes sur des domaines restreints, coupure de l'échelle, limite inférieure de température pour le thermomètre à résistance de platine et choix d'un instrument d'interpolation au-dessous de cette limite, jusqu'à 4,2 K. Les quatre Groupes de travail étudient

---

\* *BIPM Monographie*, 1983.

\*\* *BIPM Monographie* 84/4, 1984.

la façon de résoudre la plupart des désaccords qui subsistent sur ces points.

On a aussi discuté de questions concernant les échelles pour les très basses températures et les points fixes aux basses températures. Enfin, le CCT a longuement discuté de la nécessité d'une EIPT : actuellement, on estime qu'une telle échelle sera nécessaire pour l'avenir à échéance prévisible.

Pour faire des progrès dans l'établissement d'une nouvelle EIPT, il paraît essentiel que les Groupes de travail se réunissent au moins une fois avant la prochaine session du CCT qui doit se tenir au cours de l'été 1986, et que chacun de ces Groupes soumette au moins un rapport avant octobre 1985.

25 juin 1984

---

---

## **Compte rendu des séances de la 15<sup>e</sup> session du CCT**

---

Le président accueille tous les participants, en particulier les trois nouveaux délégués : Mr Soulen du NBS, Mr Morimura du NRLM et Mr Chattle du NPL. Il exprime ses regrets à l'occasion du départ de trois délégués de longue date : Mr Thomas de la PTB, Mr Kemp du CSIRO et Mr Moser de l'INM, qui ont fait savoir qu'ils assistaient au CCT pour la dernière fois.

### **1. Ouverture de la session. Nomination d'un rapporteur**

Le président rappelle le rôle, l'organisation et le travail du CCT, en liaison avec le CIPM ; il rappelle aussi les missions confiées aux quatre Groupes de travail et insiste sur la nécessité de limiter à cinq personnes au maximum (trois ou quatre de préférence) le nombre des membres d'un Groupe de travail afin de rendre ce dernier le plus efficace possible.

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

### **2. Compte rendu des séances de la 14<sup>e</sup> session du CCT (1982)**

Le compte rendu des séances de la 14<sup>e</sup> session est approuvé.

### **3. Documents présentés à la 15<sup>e</sup> session du CCT : classement dans les différents points de l'ordre du jour**

On convient de discuter les documents en même temps que les points de l'ordre du jour auxquels ils se rattachent. Dans ce but, les

cinquante-cinq documents sont classés comme suit :

<i>Point de l'ordre du jour</i>	<i>Numéro du document</i>
4.1	29, 51
4.2	40A, 40B
4.3	4, 28, 44, 52, 53
4.4	27, 32, 38, 51
5	1, 2, 7, 8, 10, 14, 15, 20, 22, 23, 24, 30, 31, 33, 34, 35, 45, 47
6	26, 40B
7	4, 12, 13, 17, 28, 42, 44, 49, 50, 52
8	3, 5, 6, 8, 21, 36, 39, 43, 54
9	19
10	8, 9, 11, 16, 18, 38, 41
11	27, 48
16	37
—	25, 46

#### **4. Rapports des Groupes de travail**

##### **4.1. Groupe de travail 1**

Le président, en qualité de président du GT1, fait remarquer qu'aucun rapport formel n'a été présenté. Le rapport du GT1 est contenu pour l'essentiel dans la monographie « Supplementary Information for the IPTS-68 and the EPT-76 » qui a été publiée par le BIPM en juillet 1983. Des exemplaires de cette monographie (qui a été imprimée à 2 000 exemplaires) ont été distribués à tous les membres et délégués ; d'autres sont encore disponibles. Pour répondre à l'une des tâches du GT1 qui est d'établir la trame de la nouvelle EIPT, une réunion rassemblant les membres du GT1, ceux du GT4 et le président du GT3 a eu lieu au NPL en octobre 1983 (*voir* Annexe T 2). Une autre tâche impartie au GT1 est de satisfaire à une demande du CIPM de définir plus explicitement le rôle de la (nouvelle) EIPT au sein des unités du SI. C'est l'objet du document 29 : un projet qu'il sera nécessaire de réviser ultérieurement au cours de la session. Le président indique qu'il reste un certain nombre de questions litigieuses au sujet de cette nouvelle échelle. Il exprime le souhait que sa mise au point soit achevée à la fin de la décennie en cours, mais une fois prête, il ne peut dire ni à quelle date ni de quelle façon elle pourra être mise en application.

Mr Schooley souligne que le travail du GT1, de préparation détaillée de la nouvelle échelle, dépend beaucoup des travaux du GT3 et du GT4. Il est difficile, de ce fait, de rédiger un projet de texte avant que des décisions soient prises, par exemple au sujet des températures de transition et des formules d'interpolation. Le président est d'accord sur ce point, mais estime qu'il serait très souhaitable d'avoir des versions

provisoires disponibles à tout moment de façon à assurer une mise en application méthodique d'une éventuelle révision. Mr Schooley convient que de telles versions provisoires aident à localiser avec précision les problèmes qui restent à résoudre.

## 4.2. Groupe de travail 2

Le président, Mr Bedford, présente le travail du GT2 qui comprend deux parties : la compilation d'une table de points de référence secondaires présentée sous une forme publiable (document 40A) ; la préparation d'un premier projet de monographie décrivant des réalisations secondaires de l'EIPT-68 et une bonne pratique en thermométrie secondaire (document 40B). Ce dernier document n'est qu'un projet partiel : le GT2 a l'intention d'inclure d'autres éléments qui n'apparaissent pas encore dans la table des matières. Il a semblé souhaitable d'aller plus loin qu'une simple description de réalisations secondaires, en donnant aussi quelques conseils sur une utilisation correcte des instruments employés. Le titre actuel ne semble pas, non plus, très approprié. Le GT2 accueillera toutes les suggestions concernant le contenu de cette monographie, lors de la discussion du point 6. Mr Bedford considère que la première tâche du GT2 est maintenant achevée (document 40A). Il résume brièvement la façon dont ce texte a été préparé et les critères qui ont été utilisés pour choisir les points de référence secondaires retenus. La partie la plus difficile consistait à évaluer convenablement les incertitudes ; pour ce faire, on a utilisé une méthode mise au point par Paule et Mandel qui introduit le concept de composante de variance entre séries de mesures indépendantes. A la suite de la réunion du GT2 qui a eu lieu avant la 15<sup>e</sup> session du CCT, quelques modifications mineures devront être apportées au contenu du document 40A.

Mr Hudson félicite le GT2 pour son excellent rapport et souhaite que la table des points de référence secondaires soit publiée dans *Metrologia* dès que possible. Mr Quinn signale qu'on lui demande quelquefois quel est le statut des points de référence secondaires par rapport à l'EIPT-68 ; des incompréhensions subsistent. Est-ce que le GT2 traitera cette question dans la monographie ? Mr Bedford répond que le GT2 l'a déjà fait dans un précédent rapport et qu'il est possible d'insérer un bref paragraphe à ce sujet. Mr Quinn estime que ces points de référence secondaires sont simplement des éléments utiles d'information et rien de plus. Mr Bedford pense qu'ils sont plus que cela, qu'ils sont nécessaires lors de réalisations secondaires par exemple. Mr Schooley est de cet avis et va même plus loin : il fait remarquer qu'il y a des cas particuliers (par exemple le point du gallium, en médecine) où leur emploi améliorera la qualité de la thermométrie. Mr Kemp pense que le mot « secondaire » pourrait être supprimé ; les

points de référence secondaires peuvent être considérés simplement comme des températures de référence auxquelles le CCT donne une importance particulière parce qu'ils s'appuient sur de vastes recherches. De plus, il est extrêmement important d'avoir des valeurs numériques « préférées » ou « acceptées » à disposition.

### 4.3. Groupe de travail 3

Le président, Mr Crovini, résume le rapport du GT3 qui traite du problème du choix de la limite inférieure de température pour le domaine du thermomètre à résistance de platine. Le GT3 accepte la possibilité d'un thermomètre d'interpolation à gaz dans le domaine de 4 K à 25 K, mais considère qu'il est obligatoire que sa possibilité de réalisation soit démontrée. Sinon, le GT3 recommande que le thermomètre à résistance de platine soit l'instrument d'interpolation jusqu'à 13,81 K. Le rapport propose l'emploi d'une fonction d'interpolation de 14 K à 273 K conformément à l'article de Kemp *et al.* (document 8).

Il reste trois difficultés importantes concernant la connaissance des températures thermodynamiques entre 14 K et le point de l'or : 1) dans certains domaines,  $(T - T_{68})$  ne résulte que d'une seule détermination ; 2) dans d'autres domaines, l'exactitude est insuffisante ; 3) en particulier au-dessus de 730 K, il y a un large désaccord entre les différentes déterminations.

Mr Crovini résume l'état de la situation concernant  $(T - T_{68})$ . Au-dessous de 273 K, les différents résultats sont en bon accord ; il faut toutefois noter qu'une seule série de résultats est disponible entre 100 K et 230 K. De 273 K à 730 K, les résultats par pyrométrie à rayonnement total et par thermométrie à gaz sont en parfait accord. De 730 K à 903 K, les résultats par pyrométrie à rayonnement monochromatique de la PTB et du BIPM concordent ; toutefois, ils sont en désaccord avec les résultats, également concordants, par pyrométrie à rayonnement monochromatique du NPL et par thermométrie à bruit de l'IMGC. Au-dessus de 903 K, il existe une diversité de mesures relatives et absolues qui montrent pour  $(T - T_{68})$  un maximum d'environ 0,5 K au voisinage de 1 073 K, mais on estime que l'exactitude est nettement insuffisante.

Pour toutes ces raisons, le GT3 recommande qu'une fonction de référence pour le thermomètre à résistance de platine soit adoptée de 14 K à 273 K, car il y a maintenant assez de données expérimentales dans ce domaine ; de plus, il presse le CCT de recommander : 1) que tous les résultats des mesures de  $(T - T_{68})$  décrites dans les documents du CCT soient mis sous une forme satisfaisante et soient publiés ; 2) que des mesures supplémentaires de  $(T - T_{68})$  au-dessus de 903 K soient poursuivies ; 3) que dans les domaines où il n'y a que des résultats isolés d'autres déterminations soient faites.

Mr Crovini attire l'attention sur l'expérience acquise jusqu'à maintenant sur les thermomètres à résistance de platine pour la mesure des hautes températures. Des études sont en cours dans six laboratoires et l'on a noté une assez grande variété de comportements : thermomètres cassés, pertes électriques substantielles au-dessus de 900 °C, stabilité inégale, propriétés d'immersion et d'auto-échauffement acceptables. Des mesures à mieux que 20 mK semblent possibles. Le GT3 propose différentes recommandations concernant les thermomètres à résistance de platine pour la mesure des hautes températures (*voir Annexe T 4*).

Mr Crovini estime qu'il est devenu nécessaire que les Groupes de travail se réunissent entre les sessions du CCT et demande que le CCT fasse une recommandation officielle à ce sujet pour aider à l'obtention des frais de déplacement nécessaires. Le président remercie Mr Crovini pour son rapport et pense que le CCT avalisera certainement cette recommandation concernant les réunions des Groupes de travail.

Mr Bedford attire l'attention sur les travaux en cours au NRC sur les défauts d'isolement, effectués par Mr Berry et Mr Zhang. Mr Bloembergen demande quelle est l'amélioration obtenue avec les thermomètres à résistance de platine pour la mesure des hautes températures lorsque leur emploi est limité au point de l'argent au lieu du point de l'or. Mr Crovini répond que ce n'est pas clair pour le moment : dans un cas particulier, une dérive de 100 mK s'est produite pour l'or et de moins de 20 mK pour l'argent dans des temps comparables ; dans un autre cas, la contamination était presque la même à 980 °C et au point de l'or. Mr Schooley fait remarquer que la plupart des thermomètres à résistance de platine pour la mesure des hautes températures utilisés à ce jour sont construits par les laboratoires et peuvent en conséquence être de qualité variable, ce qui conduit à des variations extrêmes dans leur fonctionnement. Le NBS en a trouvé de stables à 10 mK près à 1 100 °C pendant de longues périodes ; d'autres se comportent très mal à cette température. Il peut être plus facile d'estimer la limite supérieure de température utile quand on a à sa disposition des thermomètres commerciaux de qualité plus uniforme. En réponse à Mr Bloembergen qui signale que Chino Works produit des thermomètres depuis un certain temps, Mr Schooley répond que les premiers thermomètres Chino ne s'étaient pas bien comportés aux hautes températures. Mr Morimura indique que Mr Sawada, qui est en train de tester au NRLM des thermomètres à résistance de platine pour la mesure des hautes températures Chino, a remarqué qu'il était très important de nettoyer le fil à l'eau chaude. Maintenant Chino le fait aussi, ce qui a pour résultat une amélioration de la qualité. Les thermomètres promettent d'être stables à 1 100 °C mais les recherches ne sont pas achevées. Mr Morimura a apporté au BIPM deux thermomètres à résistance de platine pour la mesure des hautes températures pour qu'ils y soient étudiés.

Mr Bloembergen fait remarquer que les essais du NRLM montrent



un accroissement de  $\alpha$  avec le temps d'utilisation, tandis qu'un rapport de l'IMGC montre une décroissance de  $\alpha$ . A l'IMGC, le thermomètre est placé dans un bloc d'inconel, ce qui n'est apparemment pas le cas au NRLM. Mr Chattle observe que le fonctionnement des thermomètres à résistance de platine pour la mesure des hautes températures au-dessous du point de l'argent n'est pas vraiment connu, parce qu'ils ont tous d'abord été recuits et utilisés à plus haute température. Cette exposition à plus haute température dégrade probablement (par contamination, par exemple) leur fonctionnement au-dessous du point de l'argent. A ce propos, Mr Schooley répond que Mr Evans devient, lui aussi, réservé sur l'utilité d'un long recuit à 1 100 °C. Des tests très proches des conditions actuelles de fonctionnement sont susceptibles d'être plus utiles. Mr Schooley informe le CCT que Yellow Springs Instrument Company essaye aussi de fabriquer des thermomètres à résistance de platine pour la mesure des hautes températures.

Au sujet de la contamination par l'inconel, Mr Ling se réfère au document 50 ; au NIM, on a trouvé différents degrés de stabilité suivant que le recuit à haute température (1 100 °C) était fait dans un four en inconel ou dans un four en graphite. Mr Crovini décrit en détail l'expérience de l'IMGC ; son laboratoire n'a pas été capable d'obtenir une bonne stabilité à 980 °C ou à 1 080 °C avec différentes techniques de recuit quand un four en inconel était utilisé.  $R_0$  augmentait de façon continue et  $\alpha$  décroissait. Après une discussion avec le NIM, on a essayé récemment un four en graphite ; les résultats préliminaires semblent être meilleurs. Mr Crovini souligne que dans le four en inconel (comme dans le four en graphite le plus récent), il y a à la fois une gaine en silice et le fourreau en silice du thermomètre qui séparent le platine de l'inconel (ou du graphite). Compte tenu du fait qu'il est peu probable que l'utilisation de l'inconel puisse être évitée dans les applications générales, il est très important de résoudre ce problème de contamination par l'inconel. Mr Bloembergen signale qu'il a rencontré des problèmes de ce type avec des thermocouples platine-rhodium. Mr Schooley se demande s'il y a un lien entre la présence de l'inconel et celle de l'oxygène contenu dans le thermomètre. Citant le travail de Mr Evans, il dit que la variation de  $\alpha$  dépend fortement de la quantité d'oxygène. Mr Bedford rappelle que la contamination par le cuivre, à travers deux couches de silice, de thermomètres à résistance de platine placés dans un lingot de cuivre a été observée au NRC il y a de nombreuses années ; l'effet peut être similaire à celui du nickel provenant de l'inconel.

#### 4.4. Groupe de travail 4

Le président, Mr Hudson, résume brièvement le rapport du GT4. Il mentionne la réunion commune des Groupes de travail en octobre

1983 (*voir* Annexe T 2), un travail théorique de Mr McConville qui conduit à une valeur pour le second coefficient du viriel de  $^4\text{He}$  en très bon accord avec la valeur expérimentale de Berry et la publication prochaine des fonctions réciproques des fonctions reliant la pression de vapeur de l'hélium à la température.

#### 4.5. Réunion commune des Groupes de travail 1, 3 et 4

Mr Quinn ouvre la discussion en faisant remarquer que le rapport de la réunion d'octobre 1983 des GT1, 3 et 4 affecte de nombreux points de l'ordre du jour. Après avoir donné lecture du document 51 (*voir* Annexe T 2), il souligne que le rapport propose l'utilisation de domaines de température qui se chevauchent dans la définition de la nouvelle EIPT : un thermomètre d'interpolation à gaz de 4 K à 25 K et un thermomètre à résistance de platine de 14 K à 273 K. L'une comme l'autre des définitions, aucune n'ayant la préférence, serait valable de 14 K à 25 K. Mr Schooley souligne qu'on s'éloignerait de la règle admise jusqu'à maintenant, ce qui pourrait mener à des difficultés dans l'expression des incertitudes dans le domaine où il y a chevauchement.

Le rapport propose aussi un chevauchement dans les domaines de  $^3\text{He}$  et de  $^4\text{He}$ . Mr Schooley s'inquiète de l'existence d'une définition au-dessous de 1 K, où il devient très difficile de mesurer avec exactitude les pressions de vapeur. Mr Rusby estime aussi que la mesure est plus difficile à effectuer au-dessous de 1 K, mais il affirme que l'on a atteint une exactitude de l'ordre de  $\pm 0,5$  mK à 1 K et il est persuadé que l'on peut l'obtenir également à 0,5 K. Mr Durieux observe que des définitions qui se recouvrent ont déjà été proposées (il pense au choix entre le point triple de l'argon et le point d'ébullition de l'oxygène). On peut aussi remarquer, en ce qui concerne le domaine au-dessous de 1 K, que les mesures du KOL étaient reproductibles à  $\pm 0,3$  mK près à 0,5 K et que, dans les limites de cette incertitude, un accord a été obtenu entre les pressions de vapeur mesurées et calculées. Mr Kemp estime que l'ambiguïté possible entre les définitions qui se recouvrent pourrait être levée de la manière suivante : utiliser le thermomètre d'interpolation à gaz comme ci-dessus de 4 K à 13,8 K et insister pour qu'il reproduise les différentes températures des points fixes de 13,8 K à 25 K. Mr Swenson suppose qu'en pratique l'EIPT sera conservée au moyen d'une série de thermomètres à résistance (Ge, RhFe) étalonnés. Ainsi, la difficulté que l'on éprouve à mesurer la pression de vapeur peut ne pas être un obstacle important, puisqu'elle n'aura pas à être pratiquée fréquemment ou de façon routinière.

Par ailleurs, Mr Bloembergen n'est pas d'accord sur l'emploi des points d'étalonnage à 14 K, 17 K et 20 K pour le thermomètre à résistance de platine s'il n'est pas l'instrument étalon au-dessous de

25 K. Le gain marginal en unicité au-dessus de 25 K ainsi obtenu ne justifie pas les complications supplémentaires. Mr Kemp indique que les études du CSIRO portant sur une grande variété de thermomètres montrent clairement une amélioration de l'unicité au-dessus de 25 K avec l'adjonction de points fixes au-dessous de 25 K. Toutefois, peut-être pourrait-on pallier l'objection de Mr Bloembergen en permettant l'utilisation de fonctions d'interpolation qui se recouvrent. Cela risquerait d'accroître l'incertitude de l'EIPT, mais pas au-delà des défauts de reproductibilité des thermomètres.

Mr Schooley déplore le manque de résultats publiés concernant le thermomètre d'interpolation à gaz. Il devient ainsi très difficile d'évaluer correctement les différentes propositions pour la définition de l'EIPT. Mr Durieux signale, toutefois, qu'un rapport \* sur les thermomètres à gaz du KOL et du NPL permet de déduire que, s'ils étaient utilisés comme instruments d'interpolation, ils concorderaient à 0,6 mK près de 4 K à 25 K ; une description plus détaillée sera publiée prochainement. Mr Quinn fait un parallèle entre la définition de l'EIPT au-dessus de 1 064 °C suivant la loi de Planck, sans préciser l'instrument, et l'utilisation proposée d'un thermomètre d'interpolation à gaz aux basses températures, ce dernier étant simplement une application possible de la théorie des gaz. Il estime qu'une définition en fonction de la théorie des gaz est suffisante et qu'il n'est pas utile de spécifier les caractéristiques du thermomètre. Une telle définition au-dessus de 25 K serait aussi solide, en principe, mais un thermomètre à résistance de platine donne l'exactitude nécessaire en causant beaucoup moins de problèmes. Mr Kemp craint que, dans la pratique, l'EIPT ne dégénère dans cette région en échelle à résistance en raison de la difficulté qu'il y a à construire un thermomètre à gaz. Divers laboratoires peuvent simplement établir leur échelle sur le thermomètre à gaz d'un autre laboratoire. Le président souligne que, pour le moment, toutes ces nouvelles propositions ne constituent, dans un certain sens, que des ébauches.

Mr Schooley demande à Mr Rusby quelle est son opinion sur la possibilité d'utiliser un thermomètre rhodium-fer (RhFe) comme base d'une échelle à résistance pour le domaine inférieur à celui du thermomètre à résistance de platine ; le thermomètre RhFe semble stable à environ  $\pm 0,1$  mK près pour de très longues périodes. Mr Rusby répond qu'en principe le thermomètre RhFe pourrait être employé comme instrument d'interpolation de façon semblable au thermomètre à résistance de platine ; cependant, il nécessiterait comme points fixes de définition, les points de l'hydrogène, le point de transition supraconductrice du plomb, ainsi que plusieurs autres points de détermination de pression de vapeur. Ces points, plus que le thermomètre, fixeraient sa limite. En pratique, l'emploi du thermomètre RhFe n'est

---

\* Temperature, Its Measurement and Control in Science and Industry, 5, 1982, pp. 25-31.

pas possible parce qu'il n'existe qu'un seul fournisseur de rhodium-fer. Mr Rusby suppose que les utilisateurs de la nouvelle EIPT emploieront sans doute le thermomètre RhFe comme une échelle à résistance. Mr Hudson fait remarquer que le GT4, il y a de nombreuses années, était arrivé à la conclusion que l'échelle la plus reproductible serait une échelle à résistance en rhodium-fer, mais que le fait d'être une échelle à résistance la rendait inacceptable.

Pour Mr Bedford, il semble y avoir plus d'avantages que d'inconvénients dans les définitions d'échelle qui se recouvrent. Il se demande s'il y a vraiment des inconvénients significatifs dans le cas où les différences entre les définitions sont inférieures aux défauts de reproductibilité des thermomètres. Mr Schooley répond qu'une multiplicité de valeurs assignées à un état thermique donné pourrait susciter des problèmes légaux. Même si les différences entre les valeurs sont aujourd'hui négligeables, elles peuvent ne plus l'être demain.

Mr Swenson souligne une difficulté du thermomètre à résistance de platine comme instrument étalon au-dessous de 25 K. Les valeurs des points fixes de l'hydrogène et leurs inexactitudes sont déterminées par thermométrie à gaz. Si cette dernière se perfectionne à l'avenir, il pourrait être souhaitable de changer ces valeurs, modifiant ainsi l'échelle du thermomètre à résistance de platine. Si le thermomètre à gaz est l'instrument étalon, ce problème ne se pose pas. Le président remarque que ce genre de chose a toujours été un problème. Toutefois, des changements peuvent être faits et des restrictions imposées ; tant qu'ils n'ont pas pour résultat des changements dans les valeurs des températures ou, tout au plus, des changements visibles seulement par un utilisateur exceptionnel (par exemple, dans le passé, le remplacement du point de glace par le point triple de l'eau), alors il n'y a pas vraiment de difficulté. Mr Crovini observe que l'objection de Mr Swenson pourrait être étendue aussi aux points fixes de 4 K et de 25 K. A la limite, nous aurions à utiliser un thermomètre à gaz sur la totalité du domaine des températures, ce qui est bien sûr impossible. Ainsi, Mr Crovini n'est pas d'accord avec Mr Swenson : il estime que l'emploi d'un instrument pratique ne peut pas être évité, quand bien même il serait désirable de ne plus jamais changer les valeurs numériques de température.

Le président conclut la discussion de ce point de l'ordre du jour en résumant brièvement les problèmes évoqués. Il suggère que leur étude soit confiée à un Groupe de travail (le GT3, voir point 12).

## 5. Comparaisons internationales et points fixes

Le président demande tout d'abord que l'on présente les rapports des différentes comparaisons internationales.

Mr Pavese résume l'état actuel de la comparaison des cellules scellées

à point triple. Le travail est pratiquement achevé et une volumineuse monographie contenant tous les résultats sera bientôt disponible au BIPM. De plus, un rapport sera publié\*.

Mr Pavese commente brièvement la qualité des différents points fixes. L'argon est excellent : 40 déterminations faites avec 12 cellules montrent une exactitude de  $\pm 0,2$  mK. L'azote est aussi très bon, bien que trois cellules et trois laboratoires seulement aient été engagés dans cette comparaison. L'oxygène est bon en principe et donne une haute précision mais, malheureusement, il peut y avoir des différences systématiques supérieures à 1 mK pour certaines cellules. Celles-ci sont toujours associées à l'utilisation d'oxygène commercial et donnent toujours une valeur trop élevée de température. Il est raisonnable de supposer que les échantillons défectueux sont contaminés par l'argon, mais les tentatives faites pour mesurer la quantité d'argon semblent montrer trop peu d'argon (une concentration d'impuretés inférieure à  $10 \times 10^{-6}$ ) pour produire des erreurs de température aussi importantes. Toute cellule remplie d'oxygène commercial doit être vérifiée avec un thermomètre étalon pour savoir si elle est satisfaisante ou non. L'hydrogène est bon ; toutefois, de très petites incertitudes sont notées, quelque peu en contradiction avec la dispersion des résultats. Le méthane ne vaut pas l'argon, en particulier à cause de la difficulté d'obtenir des échantillons suffisamment purs. Le néon est un point très important et donne de bons résultats. Les incertitudes de mesure sont de  $\pm 0,25$  mK environ mais les valeurs moyennes sont contenues dans 0,5 mK pour plusieurs cellules. Le point triple du deutérium pourrait être important pour la nouvelle EIPT, mais on ne dispose pour le moment d'aucune garantie pour son utilisation dans des cellules scellées. A ce jour, tous les échantillons de  $D_2$  ont été contaminés par différentes quantités de HD et  $H_2$ . On a pu montrer que les cellules contaminées sont stables et on suppose que le point triple du deutérium est en principe très bon.

Au cours d'une assez longue discussion, différentes questions sont posées à Mr Pavese pour préciser certains aspects de son rapport. Les mérites relatifs des cellules scellées et des cellules conventionnelles ouvertes sont examinés. Mr Schooley estime que les cellules scellées sont importantes parce qu'elles peuvent être transportées ; elles permettent ainsi des comparaisons *in situ* de nombreux points fixes primaires et secondaires de divers laboratoires d'étalonnage. Mr Bedford rappelle que c'était l'un des objectifs essentiels de la comparaison internationale de cellules scellées. Mr Bonnier considère qu'il n'y a pas de différence essentielle entre les cellules scellées et les cellules ouvertes ; dans les deux cas, la cellule est fermée par un robinet. La seule différence est que la cellule scellée est fermée une fois pour toutes. Mr Kemp estime que la cellule ouverte présente l'avantage de pouvoir changer l'échantillon

---

\* *Metrologia*, 20, 1984, pp. 127-144.

de gaz ou d'utiliser diverses techniques de purification et d'observer l'effet produit sur la valeur du point triple étudié. Une discussion sur la dégradation possible avec le temps des échantillons scellés montre qu'il n'en est rien pour le moment ; en fait, on a seulement observé une grande stabilité, même pour des échantillons impurs.

Revenant à la question de la pureté de l'oxygène commercial, Mr Blanke indique que le problème principal pour le fournisseur est l'analyse. Toutefois, les fournisseurs peuvent faire une analyse précise si nécessaire : la PTB a obtenu des échantillons satisfaisants de cette façon. La discussion se poursuit sur les analyses d'impuretés, en particulier de l'oxygène.

Mr Rusby pose une question au sujet de l'utilisation possible du deutérium pour la définition de la nouvelle échelle. HD à la concentration d'impureté de  $1 \times 10^{-6}$  dans  $D_2$  change la température du point triple de  $6 \mu K$  (Pavese). En conséquence, des échantillons ayant la plus haute pureté disponible ( $70 \times 10^{-6}$  de HD) peuvent encore contenir assez de HD pour donner une incertitude d'environ  $0,4 \text{ mK}$  lors de la réalisation du point triple ; c'est tout juste tolérable.

A une question de Mr Bedford demandant si la nouvelle échelle stipulera ou non le type de réalisation du point triple à utiliser, le président répond que c'est peu probable : il vaut mieux insérer des recommandations convenables dans la monographie contenant les Renseignements complémentaires.

Les membres du CCT remercient Mr Pavese pour la somme de travail qu'il a consacrée à l'organisation et à la collecte des résultats de cette vaste comparaison internationale de cellules scellées.

Mr Bloembergen présente son rapport sur la comparaison en cours de cellules scellées au point triple de l'argon pour thermomètres à tige. Jusqu'à maintenant, les répétabilités et les reproductibilités entre laboratoires sont de  $\pm 0,4 \text{ mK}$  environ. A ce jour, seules des cellules du type INM ont été utilisées, mais on espère disposer prochainement d'autres cellules provenant du NRC et du NBS.

Mr Schooley commente son rapport sur une comparaison des points de transition supraconductrice du NBS préparés avec des matériaux provenant d'origines différentes ; il évoque les progrès récents obtenus dans l'amélioration des dispositifs du NBS. Quand un soin particulier est apporté à la préparation des échantillons et des méthodes expérimentales, la reproductibilité est maintenant supérieure à  $\pm 0,1 \text{ mK}$  pour tous les matériaux. Les largeurs de transition augmentent avec le taux d'impuretés et l'importance de l'érouissage ; aussi les modes de recuit sont-ils importants. La dispersion des températures de transition pour des échantillons préparés à partir d'un lot unique de matériau est quelque peu inférieure à celle des températures de transition pour des matériaux d'origines différentes. En général, l'accord est bon pour le plomb, l'indium et le cadmium provenant de pays différents, et moins bon pour l'aluminium.

A une question de Mr Swenson, Mr Schooley répond que les échantillons dans les dispositifs du NBS ne sont pas des cristaux uniques; la recristallisation durant le recuit est stoppée lorsque les grains ont environ la taille du diamètre du fil. Mr Maas signale que, pour l'indium, il prépare des cristaux uniques dans des creusets de graphite; ceux-ci donnent finalement une reproductibilité d'environ  $\pm 0,3$  mK. Mr Rusby se renseigne sur le niveau de technologie requis pour préparer régulièrement des échantillons qui présentent des largeurs de transition suffisamment petites. Mr Schooley répond qu'au NBS, en utilisant des méthodes relativement simples mais méticuleuses, un échantillon sur cinq seulement est un échec. Ce taux d'échec n'est pas assez élevé pour évaluer la corrélation entre la largeur de transition et la température de transition. Le président souligne que si Mr Schooley acceptait d'augmenter son taux d'échec, il pourrait être en mesure de fournir à Mr Rusby une réponse définitive!

## **6. Examen du document sur les méthodes secondaires de thermométrie**

Mr Bedford ouvre la discussion par un bref résumé du contenu actuel du document et indique les sujets marquants que le GT2 pense y ajouter. Il souligne que tout commentaire et toute critique sur le document seront les bienvenus; le GT2 souhaite recevoir des textes rédigés ou rerédigés de sujets nouveaux ou existants pour les inclure dans le prochain projet. Ces textes devraient parvenir au GT2 avant la fin de 1984.

Suit une discussion sur le contenu et la portée de cette future monographie. Mr Rusby et Mr Crovini estiment que sa portée doit être plus restreinte, sinon la tâche du GT2 sera trop difficile à remplir. Mr Schooley, au contraire, pense que l'on doit continuer comme prévu, l'audience n'en sera que plus large. Mr Bedford note qu'une partie du problème vient de ce que les grandes lignes du projet sont trop vagues. Le GT2 n'a pas pu obtenir des directives précises du CCT, il y deux ans. La discussion continue, sans que l'on parvienne à une conclusion bien nette sur la portée de cette monographie.

Le président suggère que l'on y introduise le maximum de renseignements possible compte tenu des contraintes de l'emploi du temps. Mr Bedford déclare que le GT2 espère achever un second projet en 1985 et présenter un troisième projet à la session du CCT de 1986.

## **7. Thermomètres à résistance de platine pour la mesure des hautes températures**

Le président ouvre la discussion, en faisant remarquer qu'il ne pourra pas y avoir d'accord sur une nouvelle échelle tant qu'un



thermomètre à résistance de platine pour la mesure des hautes températures satisfaisant ne sera pas mis au point.

Mr Schooley résume l'expérience du NBS ; le thermomètre à résistance de platine pour la mesure des hautes températures doit, bien sûr, être capable de performances supérieures à celles du thermocouple qu'il doit remplacer. Au NBS, on observe encore un écart considérable d'un thermomètre à l'autre ; cependant les meilleurs thermomètres reproduisent à 20 mK près, d'une série à l'autre, la température du point de l'or calculée au moyen d'une équation du second degré à partir de 0 °C et des points de l'étain et du zinc. Il est maintenant important de trouver un thermomètre de type commercial qui ait d'aussi bonnes performances.

Mr Chattle, au contraire, trouve le fonctionnement du thermomètre (d'après l'expérience du NPL) décevant. Il estime qu'il est nécessaire d'effectuer une étude plus approfondie des dérives à court terme. Au NPL, à la suite de diverses difficultés, on utilise maintenant un caloduc au sodium à un seul élément de chauffage et le thermomètre est placé dans un bloc en graphite sans gaine intermédiaire protectrice en silice. On a rencontré des problèmes de fuites électriques et on a trouvé d'importantes forces thermoélectriques dans la tête des thermomètres. Dans les essais d'immersion aux températures les plus hautes, la résistance du thermomètre changeait de l'équivalent de 2 à 3 mK pour une variation de profondeur d'immersion de 2 à 3 cm. On a utilisé à la fois des ponts en courant alternatif et en courant continu avec une différence de 2 mK environ au point de l'or. Après une immersion à haute température, le thermomètre était sorti, on le laissait refroidir naturellement, puis on le recuisait une demi-heure à 650 °C et une demi-heure à 450 °C, avant de le mesurer au point triple de l'eau. Mr Chattle se demande si les résultats du NPL, plus mauvais, sont dus à des techniques différentes.

Mr Ling résume l'expérience chinoise développée dans le document 50. A la fois la résistance aux chocs et la stabilité à long terme sont satisfaisantes. L'estimation de la stabilité est obtenue d'une manière différente de celle de Mr Evans, non pas à partir de variations de températures calculées par extrapolation, mais à partir de conditions d'emploi simulées. Il se demande si les effets des fuites électriques seraient beaucoup moins importants si l'on utilisait des mesures en courant continu plutôt qu'en courant alternatif. Les effets possibles des constantes de temps, des pertes électriques, des courants de Foucault dans les métaux, etc... rendent souhaitable une étude approfondie du fonctionnement en courant alternatif et en courant continu.

Mr Morimura décrit le travail effectué au NRLM sur les thermomètres Chino. Les thermomètres de 2,5  $\Omega$  se sont révélés supérieurs aux thermomètres de 5  $\Omega$  et semblent constituer un compromis raisonnable.

Mr Crovini revient sur le problème de la contamination (vraisemblablement par le nickel) dans les blocs en inconel. Mr Ling déclare qu'au NIM, on a obtenu de bien meilleurs résultats avec le graphite



qu'avec l'inconel ; les temps de recuit sont beaucoup plus courts pour obtenir la stabilité. Mr Bonnier demande si, lorsque l'on utilise un bloc en graphite, une circulation de gaz neutre est introduite pour empêcher le graphite de brûler. En ce qui concerne les expériences de l'IMGC, Mr Crovini répond que non ; le graphite brûle probablement au début, mais peut-être pas de façon continue à mesure que la quantité de gaz carbonique augmente. Mr Quinn signale que l'expérience acquise avec les thermocouples en platine-rhodium montre très clairement que la présence d'une atmosphère réductrice doit être évitée : le platine se contamine rapidement, à des températures assez supérieures à 1 000 °C bien sûr, de l'ordre de 1 400 °C. Une longue discussion, à laquelle prennent part de nombreux membres, s'engage sur ce problème, en particulier sur la possibilité que la contamination provienne de l'inconel en présence d'une atmosphère semi-réductrice. Il est évident que davantage de résultats expérimentaux sont nécessaires.

Mr Crovini résume le problème en déclarant qu'il n'est probablement pas particulier à l'inconel, mais qu'il est susceptible de se produire avec de nombreux métaux (voir le commentaire précédent de Mr Bedford concernant le cuivre). Il n'est pas possible d'éviter l'emploi de blocs métalliques, comme par exemple les caloducs doublés d'inconel, dans les expériences sur les thermomètres à résistance de platine pour la mesure des hautes températures, aussi est-il très important que le problème soit résolu.

Le président lance la discussion sur la nécessité d'utiliser les thermomètres à résistance de platine pour la mesure des hautes températures en position horizontale. Mr Chattle déclare que c'est essentiel pour pouvoir les comparer aux pyromètres optiques, même si cela doit ramener leur limite supérieure de température au point de l'argent. Plusieurs membres font remarquer qu'une température de jonction au point de l'argent ne suscite pas de problème particulier pour le pyromètre optique. Mr Quinn rappelle que le point de l'argent peut être un petit peu plus difficile à réaliser que celui de l'or en raison de la possibilité de contamination par l'oxygène. Mr Bedford souligne que, si le point de l'argent est la température de référence pour le pyromètre, l'incertitude sur la réalisation des hautes températures due à l'incertitude de réalisation de la température de référence sera légèrement plus grande. La question de la nécessité d'utiliser le thermomètre à résistance de platine pour la mesure des hautes températures en position horizontale est débattue longuement. Tout le monde est d'accord pour penser que la possibilité d'un fonctionnement horizontal ou vertical inversé (tête en bas) serait extrêmement utile.

A une question technique de Mr Crovini, Mr Chattle répond que la gaine des thermomètres chinois a une épaisseur de 0,75 mm et que les tiges des thermomètres Chino se déforment moins que celles des thermomètres chinois aux températures proches du point de l'or.

Le président demande un bref résumé des recherches prévues sur

les thermomètres à résistance de platine pour la mesure des hautes températures et obtient les réponses suivantes :

NPL : comparaison entre les thermomètres à résistance de platine pour la mesure des hautes températures et les pyromètres optiques, au point de l'or, si l'on réussit à les faire fonctionner en position horizontale.

CSIRO : poursuite des expériences sur le fonctionnement en position horizontale avec divers thermomètres, y compris deux thermomètres Chino de  $2,5 \Omega$ .

NRC : poursuite des mesures de perte d'isolement et essais de fonctionnement à haute température. (Mr Bedford remercie Mr Ling pour les trois thermomètres qu'il a apportés à Paris et qui sont destinés au NRC).

BIPM : étalonnage aux points fixes entre  $0^\circ\text{C}$  et le point de l'or pour évaluer leur stabilité.

NBS : poursuite des travaux sur les formules d'interpolation (voir le résumé précédent de Mr Schooley).

PTB : poursuite des tests de stabilisation (Mr Thomas remarque que deux des thermomètres chinois ont été cassés, mais ont pu être réparés).

ASMW : poursuite de la mise au point d'un thermomètre à résistance de platine pour la mesure des hautes températures commencée il y a deux ans (Mr Maas fait remarquer que, pour autant que l'on puisse en juger, la stabilité atteinte est de  $1 \text{ mK}$  sur  $R_0$  après 100 heures à  $1\,000^\circ\text{C}$ ).

IMGC : recherches sur la stabilité et comparaisons de thermomètres à la fois aux points fixes et dans un caloduc, de  $660^\circ\text{C}$  à  $960^\circ\text{C}$  environ.

NIM : poursuite des expériences décrites ci-dessus.

NRLM : poursuite des recherches sur les thermomètres Chino et, en particulier, sur un groupe de thermomètres de  $2,5 \Omega$ .

### 8. Différences ( $T - T_{68}$ ) et ( $T - T_{76}$ )

Mr Kemp ouvre la discussion en faisant référence au document 8 qui propose des valeurs pour les températures thermodynamiques des points fixes de définition au-dessous de  $273 \text{ K}$  et donne ( $T - T_{68}$ ) de  $14 \text{ K}$  à  $273 \text{ K}$  avec une incertitude de  $\pm 2 \text{ mK}$ . Au voisinage de  $100 \text{ K}$ , les valeurs de ( $T - T_{68}$ ) obtenues par la méthode des isothermes sont systématiquement un peu inférieures ( $\sim 1 \text{ mK}$ ) à celles obtenues par thermométrie à gaz. Les valeurs obtenues par la méthode des isothermes sont plus exactes mais celles obtenues par thermométrie à gaz déterminent avec exactitude la forme de la courbe. Mr Hudson se demande pourquoi ( $T - T_{68}$ ) est si grand dans le domaine compris entre  $100 \text{ K}$  et  $200 \text{ K}$  puisque l'EIPT-68 est ici fondée sur le thermomètre à gaz canadien. Le président et Mr Bedford soulignent que les différences

ne reflètent pas que l'incertitude liée à cette détermination, parce que l'EIPT-68 n'a pas été strictement fondée sur le thermomètre à gaz ; les valeurs originales ont dû être ajustées de façon à coller aux valeurs prédéterminées des points fixes, pour se fondre dans une moyenne de quatre échelles au-dessous de 90 K et donner des valeurs réalistes de trois dérivées de  $W$  en fonction de  $T_{68}$ . Mr Soulen souligne que les valeurs données dans le document 8 sont fortement liées aux déterminations faites au thermomètre à gaz ; il serait souhaitable de faire appel à d'autres lois physiques, par exemple à la thermométrie à bruit.

Mr Rusby demande si la forme irrégulière de  $(T - T_{68})$  se reflète dans la difficulté d'établir une fonction de référence  $W = f(T_{68})$ . Mr Kemp et Mr Durieux répondent que non, les valeurs de  $(T - T_{68})$  sont trop petites pour affecter matériellement l'ajustage. Suit une discussion pour savoir si l'on doit mettre une limite au degré d'une nouvelle fonction de référence. Tout le monde est d'accord pour dire que le degré ne doit pas être inutilement élevé, mais les opinions divergent sur le point à partir duquel il serait trop élevé.

Le président s'inquiète des différences minimales mais systématiques observées entre les mesures par rayonnement total faites au NPL et les résultats obtenus au NBS avec le thermomètre à gaz. Y a-t-il une chance de les réduire, sachant que la région voisine de 273 K est d'une importance primordiale ? Mr Quinn donne une description détaillée de l'étude par rayonnement total faite au NPL, mettant en relief les origines et les ordres de grandeur des diverses incertitudes. Il conclut en déclarant que les mesures du NPL au-dessous de 0 °C sont effectivement en accord avec la thermométrie à gaz du CSIRO et diffèrent, de 0 °C à 100 °C, de la thermométrie à gaz du NBS d'une quantité minimale, mais suffisante pour être significative. Mr Quinn considère que l'accord entre la pyrométrie à rayonnement total et la thermométrie à gaz dans ce domaine est remarquable, ce qui donne confiance et laisse penser que les valeurs de  $(T - T_{68})$  sont correctes. A une question de Mr Bedford sur la possibilité d'étendre le domaine des mesures de température par rayonnement total, Mr Rusby répond qu'il espère que le phénix renaîtra de ses cendres. Il évoque des difficultés techniques et pratiques (manque de main-d'œuvre) mais espère fortement que les mesures pourront être étendues vers de plus basses températures (— 100 °C) et peut-être même (cela est plus difficile) vers des températures plus élevées, mais pas au-dessus de 200 °C. Avec l'expérience acquise dans ses expérimentations, Mr Quinn pense que les incertitudes de la pyrométrie à rayonnement total pourraient être réduites d'un facteur dix (c'est-à-dire  $\sim 0,2$  mK à 30 °C) en y consacrant beaucoup de temps et d'argent. Des progrès significatifs ont été faits récemment dans les méthodes de noircissage de surface et de prise en compte des effets de diffraction.

Mr Schooley décrit l'état actuel de la thermométrie à gaz au NBS, dont il est maintenant responsable. Il n'est pas prévu de faire d'autres

mesures dans le domaine précédemment couvert par Mr Guildner, sauf peut-être pour reproduire les points de l'étain et du zinc. Un nouveau four pour des températures plus élevées est en cours de réalisation ; tous les autres équipements fonctionnent bien. Les difficultés actuelles concernent le four et le réservoir. Il y a une diminution faible mais continue de la pression au point de l'aluminium ( $\sim 10$  mK par semaine), mais non au point de glace, qui peut être associée à la dilatation du réservoir. Pour essayer de résoudre ce problème, on fait actuellement des mesures au point de l'étain et on procède à des cycles entre  $0^\circ\text{C}$  et l'étain de façon à étudier la stabilité. Le plan à long terme du NBS est d'atteindre des températures plus élevées, en particulier de faire des mesures aux points de congélation de l'antimoine, de l'aluminium et de l'argent.

En réponse aux questions posées, Mr Kemp indique que la thermométrie à gaz du CSIRO se poursuivra, il l'espère, jusqu'à  $40^\circ\text{C}$ .

Suit une longue discussion philosophique (à l'initiative de Mr Schooley) sur l'avantage de publier les mesures des températures thermodynamiques sans faire référence à  $T_{68}$ . Au lieu de fournir  $(T - T_{68})$ , on pourrait simplement donner, par exemple, la résistance du platine en fonction de  $T$ . Pour comparer des déterminations, il faudrait, soit faire circuler des thermomètres particuliers, soit rattacher des thermomètres différents. Cette dernière solution correspond, en fait, à ce qui se pratique actuellement pour  $T_{68}$ , avec toutes les difficultés inhérentes à l'irrégularité de  $(T - T_{68})$  et aux importantes incertitudes associées au thermocouple platine-rhodium. La conclusion générale est qu'il n'y a pas de meilleur moyen que de donner  $(T - T_{68})$ .

Mr Quinn attire, ensuite, l'attention sur la forme de la courbe  $(T - T_{68})$  en fonction de  $T_{68}$ , à  $630^\circ\text{C}$ . La discontinuité de la pente à  $630^\circ\text{C}$  peut être inconciliable avec celle qui a été mesurée dans le passé avec le thermocouple et le thermomètre à résistance de platine. La détermination de  $(T - T_{68})$  effectuée par Coates (1982) s'écarte quelque peu de celles de Jung (document 5) et de Bonhoure (document 21), mais concorde mieux avec les estimations existantes de la discontinuité de la pente. Mr Bedford considère que ce qui est admis comme ordre de grandeur de la discontinuité est trop imprécis pour aider à résoudre les différences qui existent entre Coates et Jung. Mr Crovini ajoute que l'ordre de grandeur de la discontinuité a été évalué plusieurs fois et a toujours été compris entre 0,1 % et 0,2 %. Les récentes valeurs de  $(T - T_{68})$  impliquent une discontinuité plus proche de 0,4 %, aussi y a-t-il une difficulté à résoudre. Mr Rusby rappelle que les résultats de Mr Coates ne sont pas définitifs ; il est donc prématuré de parler de désaccord avec Mr Jung. Des corrections aux valeurs provisoires du NPL doivent encore être calculées ; elles peuvent aider à résoudre la difficulté. Mr Rusby exprime l'opinion de Mr Coates en déclarant que la région voisine de  $630^\circ\text{C}$  doit être étudiée minutieusement. Tout le

monde est d'accord pour estimer nécessaire de mieux connaître ce domaine de température.

Mr Kemp demande au CCT d'encourager de nouvelles recherches sur le point de fusion de l'eutectique cuivre-argent. Il y a des raisons de penser qu'il est reproductible à  $\pm 2$  mK près; si c'est le cas, il pourrait être très utile pour étudier la fonction d'interpolation du thermomètre à résistance de platine.

### 9. Températures inférieures à 0,5 K

La question de savoir si la nouvelle EIPT peut, et doit, être définie au-dessous de 0,5 K a déjà été discutée à la dernière session du CCT\*.

Le président mentionne le document 19 sur l'échelle de température du NBS dans le domaine de 15 mK à 200 mK et demande quels sont les commentaires.

Mr Soulen déclare que, si l'on considère les difficultés que les expérimentateurs éprouvent pour mesurer les températures dans ce domaine, ce ne serait pas une mauvaise idée que le CCT fasse quelque chose. Des recherches sont en cours, par exemple sur les points de référence supraconducteurs (NBS) et la thermométrie à bruit (NBS, PTB Berlin, KOL). Mr Soulen considère qu'il serait prématuré de décider maintenant d'une limite inférieure de l'échelle au voisinage de 0,5 K.

Mr Thomas fait remarquer que la question de la limite inférieure de l'EIPT a été discutée à la dernière session et que le CCT a décidé qu'aucune échelle pratique n'était nécessaire au-dessous de 0,5 K. Mr Hudson répond que rien n'est jamais décidé de façon aussi définitive au sein du CCT.

Mr Hudson déclare que toute recommandation du CCT pour les valeurs des températures thermodynamiques des points fixes au-dessus de 0,5 K pourrait aussi couvrir le domaine inférieur à cette température. Cela serait, bien sûr, assez différent, quant à la forme, de la constitution d'une échelle.

Mr Schooley souligne l'avantage, pour la communauté scientifique, de bonnes mesures de température au-dessous de 0,5 K.

Le président demande si une liste de valeurs recommandées de points fixes suffirait ou si une échelle de température serait nécessaire. Mr Swenson estime qu'une telle liste pourrait être ajoutée à une liste de points de référence supplémentaires de l'EIPT, par exemple les points supraconducteurs aux basses températures s'ajouteraient naturellement aux points supraconducteurs au-dessus de 0,5 K. Mr Soulen mentionne la courbe de fusion de  $^3\text{He}$  liquide comme base possible

---

\* *BIPM Com. Cons. Thermométrie*, 14, 1982, p. T 15.

pour une échelle de température. A une question de Mr Bonnier qui demande si on peut envisager une échelle fondée sur des points de transition supraconductrice et un instrument d'interpolation, Mr Soulen répond que le principal dispositif d'interpolation est le thermomètre magnétique à nitrate de cerium et de magnésium, mais que cette méthode présente des difficultés.

Le président conclut la discussion en déclarant qu'il semble que le CCT devrait étudier sérieusement le domaine inférieur à 0,5 K ; ce sujet pourrait être abordé ultérieurement quand le CCT discutera des tâches des Groupes de travail (*voir* point 12).

## 10. Méthodes d'interpolation entre les points fixes

Le document 51 (*voir* Annexe T 2) sert de point de départ à la discussion. Mr Schooley demande pourquoi on observe un gonflement aussi important de la non-unicité de l'échelle du thermomètre à résistance de platine, juste au-dessous de 273 °C. Mr Kemp répond que c'est probablement dû, en partie, à des difficultés expérimentales, c'est-à-dire à des gradients thermiques dans le bloc de comparaison. On obtiendrait quelque amélioration en étalonnant les thermomètres au point triple du xénon, mais cela, bien sûr, ne fournirait qu'un seul point sur les courbes de non-unicité. Quand Mr Bonnier lui demande explicitement si une partie de la non-unicité observée dans les comparaisons Ward-Compton et CSIRO des thermomètres à capsule peut être due à des gradients thermiques dans le bloc de comparaison, Mr Kemp confirme qu'il en est ainsi. Il ajoute que Mr Sakurai et R. C. Kemp (CSIRO) effectuent de nouvelles mesures avec un bloc dont ils espèrent qu'il aura une température plus uniforme.

Sollicité par le président, Mr Kemp ne doute pas qu'une fonction d'interpolation unique pour tout le domaine compris entre 14 K et 273 K donne les meilleurs résultats et convienne pour une plus large variété de thermomètres ; mais, en divisant le domaine en diverses parts, l'emploi de plusieurs fonctions d'interpolation donne des résultats acceptables et présente l'avantage que les thermomètres qui ne doivent être utilisés que jusqu'à 84 K ou 54 K n'ont pas besoin d'être étalonnés jusqu'à 14 K.

Mr Crovini souligne combien il est important d'avoir une méthode d'interpolation précise couvrant un domaine réduit, disponible dans la région allant de — 50 °C à 50 °C. Quand on a comparé des cellules de gallium dans divers laboratoires, l'incertitude la plus grande provenait de ce que les thermomètres à résistance de platine utilisés pour mesurer les températures devaient être étalonnés jusqu'aux points de l'étain et du zinc. Mr Kemp est un peu surpris que les erreurs lors des étalonnages à plus haute température affectent de façon appréciable la mesure de la température du point du gallium. Il suggère que toute interpolation

de ce type dans un domaine restreint avec des points fixes supplémentaires, comme le propose Mr Crovini, soit placée à part et ne fasse pas partie de la définition de l'échelle.

Mr Crovini cite l'exemple des gens concernés par les étalons électriques. Ils ont besoin, pour connaître les températures à  $\pm 1$  mK près, de thermomètres à résistance de platine qui soient étalonnés avec beaucoup d'exactitude à la température ambiante. Ils désirent aussi que ces étalonnages soient conformes à l'échelle officielle.

Mr Rusby souligne qu'il peut être aussi souhaitable d'avoir une méthode de rechange recommandée pour étalonner un thermomètre à résistance de platine avec des points triples seulement, c'est-à-dire sans y inclure les points d'ébullition de l'hydrogène ; cependant, en général, il met en garde contre la prolifération des méthodes.

Mr Swenson préférerait que soient spécifiés un plus grand nombre de points fixes qu'il n'est nécessaire pour la définition primaire de l'échelle, de façon à permettre l'emploi des méthodes d'ajustement par moindres carrés. Cela satisferait aussi aux demandes de Mr Crovini, en ce qu'une interpolation sur un domaine limité (sans ajustement par les moindres carrés) peut être faite en utilisant les points du mercure et du gallium. Mr Kemp comprend l'utilité des points fixes supplémentaires ; en fait, il souligne que le CSIRO inclut toujours le point du cadmium dans ses étalonnages de thermomètres à résistance de platine à tige, mais il ne voit pas pourquoi les points fixes supplémentaires feraient partie de l'échelle elle-même. Mr Rusby ne pense pas qu'il y ait des points fixes disponibles susceptibles d'améliorer l'échelle sur toute son étendue et qui ne soient pas déjà utilisés comme points fixes de définition ; le point du gallium pourrait remplacer le point de vapeur pour l'étalonnage des thermomètres à capsule qui sont surtout utilisés au-dessous de 50 °C. Cependant, il n'améliorerait pas et, sans doute même, il dégraderait légèrement l'étalonnage des thermomètres à tige. En ce qui concerne les autres points, celui du mercure est trop proche du point triple de l'eau et le point triple de l'azote est trop proche de celui de l'oxygène pour être d'une grande utilité. Il serait important d'avoir un point supplémentaire près de 40 K, mais il n'y en a pas.

Mr Kemp souligne que l'utilisation du point du gallium n'est pas nécessaire, ni à conseiller, pour déterminer le coefficient  $\alpha$  pour les thermomètres à résistance de platine à capsule. Il est très facile d'obtenir le coefficient  $\alpha$  par comparaison avec un thermomètre à tige étalonné dans un bain d'eau à 100 °C environ. Mr Blanke est aussi d'avis que le point du gallium n'est pas nécessaire pour la définition primaire de l'échelle. Mr Bonnier remarque, tout d'abord que la comparaison des thermomètres à résistance de platine à capsule et à tige dans un bain liquide n'est pas si facile, deuxièmement qu'il n'est pas logique de mélanger des points de congélation et des bains liquides que l'on agite pour déterminer  $\alpha$ , troisièmement que le coefficient  $\alpha$  pourrait être déterminé à partir d'une mesure au point du xénon. Cela serait



séduisant, non seulement parce que, pour effectuer l'étalonnage au point du xénon, on utiliserait la même méthode et le même cryostat que pour les autres points fixes à basse température, mais aussi parce que l'addition du point du xénon à l'échelle réduirait considérablement la non-unicité entre 84 K et 273 K.

Mr Quinn demande quelle serait la non-unicité d'une interpolation fondée sur les points triples du mercure, de l'eau et du gallium dans le domaine situé entre ces points. Mr Crovini répond que peu de valeurs sont disponibles mais il est sûr que ce serait mieux qu'avec l'EIPT-68, en particulier parce qu'une méthode d'étalonnage qui n'obligerait pas à chauffer le thermomètre à résistance de platine au-dessus de 100 °C donnerait presque certainement une meilleure reproductibilité du thermomètre.

Mr Bedford mentionne que Mr Ancsin (NRC) utilise le point de l'indium pour déterminer le coefficient  $\alpha$  des thermomètres à capsule. Mr Ancsin publiera sous peu les résultats d'une comparaison internationale d'un certain nombre de thermomètres à résistance de platine à capsule et à tige entre 0 °C et le point de l'indium, ce qui donnera des informations sur la non-unicité.

Mr Schooley voudrait que, par principe, il n'y ait qu'une seule échelle primaire bien définie et que toute méthode d'étalonnage de rechange (par exemple celle proposée par Mr Crovini pour couvrir un domaine de température restreint) soit considérée comme réalisation secondaire de l'échelle. Il estime que l'exemple des déterminations de température pour les mesures électriques, donné par Mr Crovini, fait partie de ce que l'on peut appeler la recherche scientifique qui ne met en cause aucun aspect légal des échelles. Mr Crovini n'est pas d'accord : il estime que la conservation des étalons électriques, qui demande des mesures précises de température, est une activité métrologique. Le président attire l'attention sur les exigences contractuelles qui peuvent intervenir.

Mr Kemp propose que les mérites des méthodes d'interpolation qui donnent pratiquement le même résultat que celle choisie pour la définition de l'échelle soient étudiés pour la prochaine session du CCT. Le président pense que cela serait utile. On pourrait aller au-devant de quelques-unes des objections précédemment citées en autorisant une définition de rechange, mais en spécifiant, par exemple, que le thermomètre à résistance de platine ne soit jamais utilisé au-dessus de 50 °C. Il n'y aurait alors pas, bien sûr, une échelle unique.

Mr Crovini remarque que dans la comparaison des cellules de gallium à l'IMGC, à l'INM et au NPL, organisée dans le cadre de la Communauté Économique Européenne, les températures des cellules étaient mesurées avec un thermomètre commun mis en circulation avec les cellules et avec des thermomètres locaux étalonnés dans les différents laboratoires. Mr Crovini estime que la source majeure d'incertitude sur les mesures de température avec les thermomètres locaux provenait de



la propagation des erreurs d'étalonnage au point de l'étain et des défauts de reproductibilité des thermomètres parce qu'ils avaient été chauffés aux températures des points de l'étain et du zinc.

Mr Kemp pense que de meilleurs résultats pourraient être obtenus si chaque laboratoire améliorerait ses étalonnages de thermomètres à résistance de platine. Il rappelle que dans le cas des comparaisons Ward-Compton des réalisations de l'EIPT-68 dans divers laboratoires, on a trouvé plusieurs défauts dans les réalisations des points fixes. Mr Chattle, commentant les comparaisons de cellules de gallium, mentionne qu'avec les thermomètres à résistance de platine locaux, on a observé des différences de 0,5 mK environ ; avec le thermomètre à résistance de platine en circulation, ces différences étaient légèrement inférieures. Questionné au sujet de l'exactitude des étalonnages au point de l'étain, Mr Chattle l'estime à  $\pm 1$  mK près environ. L'effet de cette incertitude serait de 0,3 mK à 0,4 mK au point du gallium.

Le président et Mr Bedford remarquent que la réalisation du point de l'étain faite au NRC a une reproductibilité de  $\pm 0,2$  mK. Mr Crovini précise que l'incertitude totale due à l'étalonnage au point de l'étain inclut, non seulement la reproductibilité du point lui-même, mais aussi l'exactitude d'une mesure de résistance déterminée et la stabilité du thermomètre qui est toujours un problème. Questionné par Mr Bloembergen sur la différence entre deux cellules de gallium lorsque les températures sont mesurées avec le même thermomètre à résistance de platine, Mr Chattle répond qu'il l'estime à 0,2 mK ou 0,3 mK. Mr Bonnier ajoute que l'écart-type était de 0,13 mK. Mr Bedford mentionne que Mr Ancsin, au NRC, est en train de mesurer les différences entre des thermomètres à résistance de platine étalonnés dans l'EIPT-68 ; il trouve que la non-unicité atteint  $\pm 0,5$  mK, à mi-chemin entre le point triple de l'eau et le point de l'étain.

Mr Pavese remarque que l'on a rencontré des problèmes similaires à ceux mentionnés par Mr Crovini pour la détermination du point du gallium quand il a fallu déterminer les valeurs des points triples de l'azote et du néon dans l'EIPT-68. Mr Schooley estime qu'il serait utile d'inclure l'un des thermomètres à résistance de platine qui ont été utilisés dans la comparaison internationale des cellules à point triple, lors des déterminations des températures thermodynamiques au thermomètre à gaz ; on obtiendrait ainsi les températures thermodynamiques de tous les points triples de la manière la plus directe. Mr Pavese admet que cela serait utile pour déterminer les meilleures températures thermodynamiques des points triples de l'azote et du néon. Il a été difficile d'assigner ces valeurs à mieux que 1 mK près, bien que le groupe de cellules ait très bien défini les points triples, en raison de la non-unicité de l'EIPT-68.

Suit alors une nouvelle discussion détaillée pour déterminer dans quelle mesure on pourrait bénéficier des résultats plus précis, au voisinage de la température ambiante, que l'on peut obtenir lorsque le

thermomètre à résistance de platine est aussi étalonné au point du gallium. Mr Durieux remarque qu'une réalisation spécifiée de l'échelle, celle obtenue par interpolation entre les points triples du mercure, de l'eau et du gallium, peut en elle-même présenter une non-unicité plus faible que celle d'autres réalisations autorisées de l'échelle; le fait d'ajouter des réalisations de rechange augmentera toujours, en principe, la non-unicité totale de l'échelle.

Mr Bloembergen souligne que si le point du gallium est mesuré avec, par exemple, dix thermomètres à résistance de platine, la valeur moyenne  $T_{68}$  aura une incertitude inférieure à celle de la non-unicité de l'EIPT-68 à cette température (dans le sens que la moyenne de dix autres thermomètres à résistance de platine donnerait très vraisemblablement presque la même valeur de  $T_{68}$ ). Mr Bedford remarque qu'un seul thermomètre à résistance de platine, toutefois, pourrait encore donner une valeur différente qui soit à peu près dans les limites de la non-unicité de l'échelle.

Mr Kemp souligne que les étalonnages de thermomètres dans l'EIPT peuvent être vérifiés en faisant des mesures à un point intermédiaire, comme le point du gallium, à condition qu'une meilleure valeur de ce point dans l'échelle soit connue; quant à Mr Crovini, il fait valoir l'avantage d'inclure le point du gallium dans la définition de l'échelle. Il rappelle que, dans le passé, le point de l'étain a été introduit dans l'EIPT en utilisant la meilleure valeur fondée sur la moyenne  $T_{68}$  de plusieurs thermomètres; le risque existait, cependant, qu'une seule mesure au point de l'étain avec un thermomètre étalonné au point de vapeur donne une température légèrement différente. Finalement, Mr Schooley déclare être sûr que, si le point du gallium est inclus dans la prochaine échelle, tout comme le point triple de l'eau, le point du cadmium, le point de l'indium, etc..., Mr Kemp sera capable de mettre au point une fonction de référence qui mette des nœuds à tous ces points; mais il est tout à fait possible que Mr Crovini propose alors un autre matériau, le phénoxybenzène ou toute autre chose, dont l'ajout ferait encore diminuer la non-unicité de l'échelle, dans un domaine où l'intérêt scientifique ou un autre objectif rendrait désirable une échelle extrêmement précise.

## 11. Nouvelle EIPT : situation actuelle

Le président mentionne les documents 27 et 48 qui traitent de ce sujet et demande à Mr Quinn d'exposer la situation.

Commençant par les basses températures, Mr Quinn rappelle la discussion qui a déjà eu lieu au cours de cette session sur la limite inférieure de la nouvelle EIPT. A un moment donné, le CCT doit

décider si l'échelle doit être étendue au-dessous de 0,5 K ou si on peut se contenter de donner des points fixes pour ce domaine.

On semble être parvenu à un accord pour que les échelles de pression de vapeur de l'hélium soient la base de l'échelle entre 4,2 K et 0,5 K.

Pour le domaine qui va de 4,2 K à la limite inférieure du domaine du thermomètre à résistance de platine, trois suggestions ont été faites pour établir l'échelle : le thermomètre d'interpolation à gaz (4,2 K-24 K), le thermomètre magnétique (4,2 K-13,8 K) et le thermomètre à résistance RhFe avec des points fixes qui pourraient comprendre des points de transition supraconductrice. Pour le thermomètre RhFe, l'inconvénient est qu'il n'y a qu'un seul fournisseur. Le problème du choix de la limite inférieure du domaine du thermomètre à résistance de platine est lié à la question de savoir quelle est la meilleure des trois suggestions. Une proposition a été faite, lors d'une réunion conjointe du GT1 et du GT4, en présence du président du GT3, en octobre 1983. Selon cette proposition, entre 4 K et 25 K, l'EIPT serait définie, soit au moyen d'un thermomètre d'interpolation à gaz, soit au moyen d'un thermomètre d'interpolation à gaz entre 4 K et 14 K et de thermomètres à résistance de platine au-dessus, ceux-ci étant étalonnés à 14 K, 17 K, 20 K, 25 K et aux points fixes à température supérieure (voir Annexe T 2).

L'échelle du thermomètre à résistance de platine au-dessus de 25 K pourrait être réalisée au moyen de points triples seulement, si une légère augmentation de la non-unicité était tolérée : c'est une question importante. Aussi, au-dessus de 25 K, a-t-il été suggéré que la fonction d'interpolation pour le thermomètre à résistance de platine ne soit pas unique dans certains domaines, par exemple pour permettre l'emploi de thermomètres à tige jusqu'à 84 K et de thermomètres à capsule au-dessus de 0 °C, ou encore pour faciliter l'étalonnage des thermomètres à résistance de platine dans un domaine restreint autour de la température ambiante avec une non-unicité plus faible que celle liée à la définition générale de l'EIPT considérée comme un tout dans ce domaine.

En ce qui concerne le thermomètre à résistance de platine pour la mesure des hautes températures, il reste beaucoup à faire sur les thermomètres eux-mêmes et sur la méthode d'interpolation. Toutefois, si ces thermomètres se montraient satisfaisants jusqu'au point de l'argent, rien ne devrait empêcher le CCT de fixer la limite supérieure du thermomètre à résistance de platine à ce point.

En ce qui concerne les températures thermodynamiques, jusqu'à 460 °C, la courbe ( $T - T_{68}$ ) peut être tracée sans crainte excessive. La thermométrie à bruit et la pyrométrie optique, suivant les régions, ont confirmé la thermométrie à gaz. Entre 460 °C et 630 °C, on a encore besoin de confirmer les résultats de la pyrométrie optique, en raison de divergences entre divers résultats préliminaires. Des mesures

supplémentaires sont nécessaires dans le domaine qui va de 630 °C au point de l'argent. D'énormes progrès ont été faits, en de nombreux domaines, depuis la dernière session du CCT.

Avant de passer aux commentaires sur l'introduction de Mr Quinn, le président remarque qu'il a aperçu un signe de consternation horrifiée et de désaccord sur le visage de Mr Kemp lorsque l'on a suggéré une limite supérieure à 14 K pour le thermomètre magnétique; cela, malheureusement, a échappé à l'enregistrement des discussions.

Mr Kemp rappelle que, la veille, quelqu'un a signalé que 0,6 K serait une limite plus pratique que 0,5 K pour l'échelle de pression de vapeur de  $^3\text{He}$ . Le président observe qu'une décision de cette nature pourrait être prise à tout instant, jusqu'au dernier moment.

Mr Schooley attire l'attention sur les recommandations présentées dans le document 18 pour la nouvelle EIPT. De plus, il insiste pour que les résultats des mesures existantes fassent l'objet d'une publication complète, afin que le CCT n'ait pas à prendre de décisions à partir de valeurs non publiées. Le président approuve, mais distingue entre les décisions et les prises en considération du CCT. Pour ces dernières, le CCT devrait naturellement tenir compte des progrès et des résultats nouveaux, même si ceux-ci n'ont pas encore été entièrement publiés.

Mr Rusby demande si, du fait des très nombreux problèmes en suspens avec les thermomètres à résistance de platine pour la mesure des hautes températures, le CCT ne devrait pas être réaliste, aller au-delà de la remarque de Mr Quinn et admettre comme point de jonction avec le pyromètre optique le point de l'argent.

Mr Ling pense aussi qu'il serait sans doute sage de considérer le point de l'argent comme point de jonction. Il va même plus loin et suggère qu'on effectue une étude sur la non-unicité d'une échelle fondée sur des thermomètres à résistance de platine pour la mesure des hautes températures étalonnés aux points de congélation de l'or, de l'argent, de l'aluminium, du zinc et de l'étain, en comparant les thermomètres à intervalle de 50 °C. Dans ce but, Mr Ling espère que le CCT fixera une fonction d'interpolation provisoire.

Mr Morimura pense que l'on peut encore espérer faire la jonction au point de congélation de l'or et qu'il est donc trop tôt pour la fixer au point de l'argent.

Mr Thomas déclare que H. J. Jung (PTB) est convaincu que le point de l'argent est la température la plus élevée à laquelle le thermomètre à résistance de platine pour la mesure des hautes températures devrait être utilisé.

Avant de poursuivre la discussion sur la situation actuelle de la nouvelle EIPT, le président rappelle que les pyrométristes réclament la possibilité d'employer ces thermomètres en position horizontale ou, pour le moins, en position verticale inversée.

Mr Quinn sollicite des commentaires à ses remarques sur les trois possibilités de choix pour définir l'échelle entre 4,2 K et 13,8 K ou

25 K. A Mr Bedford qui demande s'il y a assez de points fixes disponibles pour faire du thermomètre RhFe une possibilité viable, Mr Rusby répond que, pour les thermomètres RhFe dont il dispose et dont la provenance est unique, la non-unicité de l'échelle entre 4,2 K et 14 K serait d'environ 0,2 mK avec des points d'étalonnage au-dessous de 4,2 K (points fixes de pression de vapeur ou supraconducteurs) et au-dessus de 13,8 K (à partir d'un thermomètre à résistance de platine) en y incluant le point du plomb. L'omission du point du plomb porterait cette valeur à 0,4 ou 0,5 mK seulement. Mr Rusby, ainsi que Mr Kemp, pense que l'emploi d'un thermomètre RhFe serait une possibilité technique de définition de l'échelle. Toutefois, Mr Rusby aime à répéter ce qu'il a déclaré précédemment, c'est-à-dire que la thermométrie à gaz, qui permet de définir complètement et une fois pour toutes une interpolation entre 4,2 K et 25 K, est une méthode extrêmement puissante. A Mr Schooley qui demande si l'utilisation d'un thermomètre à bruit comme instrument d'interpolation thermodynamique dans ce domaine pourrait être prise en considération, Mr Soulen répond que cela serait certainement moins pratique.

Mr Schooley fait à nouveau remarquer qu'il hésiterait à fonder l'échelle au-dessous de 1 K sur la pression de vapeur de  $^3\text{He}$  en raison de la difficulté à mesurer les pressions dans ce domaine avec une précision suffisante. A une autre remarque de Mr Schooley sur ce sujet, Mr Swenson rappelle que la fonction donnant la pression de vapeur  $^3\text{He}$  entre 0,5 K et 1 K n'est pas tant fondée sur des calculs thermodynamiques que sur des mesures directes dans une échelle de température magnétique.

Mr Kemp signale que le thermomètre magnétique est utilisé par T. C. Cetas (CSIRO) jusqu'à 83 K et par Mr Swenson jusqu'à 35 K. Mr Swenson pense, néanmoins, que la thermométrie à gaz est le meilleur choix possible pour une EIPT entre 4,2 K et 25 K. Mr Kemp ne connaît personne qui soit activement engagé dans des recherches en thermométrie magnétique dans ce domaine de température. Mr Rusby remarque qu'il peut être facile de bien monter un thermomètre magnétique mais qu'il peut être tout aussi facile de mal le monter. Il ajoute qu'au NPL les travaux de thermométrie à gaz de K. J. Berry étaient complexes; cependant, quand tous les problèmes de mesure de pression et toutes les corrections à appliquer eurent été résolus pour la mesure des isothermes, la thermométrie à gaz à volume constant, par comparaison, était presque banale.

Mr Quinn estime qu'on est parvenu à un accord général quant à l'utilisation d'un thermomètre d'interpolation à gaz dans la nouvelle échelle. Toutefois, Mr Kemp pense que l'utilisation du thermomètre RhFe est un moyen peu onéreux d'obtenir une échelle, à l'objection près que le thermomètre peut très bien ne plus être disponible à l'avenir parce qu'il n'y a qu'un seul fournisseur. Mr Hudson félicite Mr Kemp pour cette conclusion et rappelle que le GT4 était déjà

parvenu, dans son rapport de 1982, à la conclusion qu'une échelle à résistance de rhodium-fer serait la meilleure échelle, à cela près qu'une échelle à résistance est inacceptable. Mr Kemp cite Mr Rusby qui est maintenant d'avis que le thermomètre RhFe peut être employé comme instrument d'interpolation avec des points fixes au-dessous de 4,2 K et au-dessus de 13,8 K et avec ou sans point additionnel à 7,2 K. Mr Hudson rappelle que cette possibilité a déjà été avancée dans le rapport du GT4 de 1982, comme troisième choix, essentiellement à égalité avec le thermomètre d'interpolation à gaz si ce n'est le problème de la fourniture du matériau. Mr Kemp mentionne aussi qu'un thermomètre PtCo, avec des propriétés similaires à celles du thermomètre RhFe, est fabriqué au Japon. Mr Soulen suggère que l'entreprise qui fabrique des thermomètres PtCo soit encouragée à fabriquer aussi des thermomètres RhFe et vice versa. Il s'informe ensuite sur l'emploi du thermomètre magnétique entre 13,8 K et 24,5 K. Mr Hudson répond que, compte tenu de la technologie actuelle, cela ne serait pas pratique.

On examine alors le document 29, qui est un projet de note au CIPM en réponse à une demande d'information sur l'EIPT. Mr Schooley remarque que la non-unicité de l'EIPT-68 entre les points fixes, donnée au paragraphe 2.5, est de 1 à 2 mK et demande si ces valeurs sont correctes. Mr Rusby et Mr Kemp, se référant aux comparaisons faites par Ward et Compton sur les thermomètres à résistance de platine entre 14 K et 273 K, répondent que cela dépend si l'on inclut ou non les résultats des thermomètres extrêmes ; en les incluant, la non-unicité pourrait atteindre 3 mK. Commentant l'assertion du paragraphe 3, à savoir que les différences ( $T - T_{68}$ ) sont raisonnablement bien connues entre 630 °C et le point de l'or, Mr Soulen remarque qu'il y a encore une incertitude d'environ 0,1 K sur ces différences au voisinage de 630 °C. Mr Rusby attire l'attention sur le paragraphe 2.4 qui, tel qu'il est rédigé, ne décrit pas correctement l'EIPT-68.

## 12. Travaux futurs et composition des Groupes de travail

Le président rappelle que le CCT dispose actuellement de quatre Groupes de travail, dont la composition et les tâches ont été définies en 1980 \*. Il donne un bref résumé du travail accompli :

Le GT1 a rédigé une monographie « Supplementary Information for the IPTS-68 and the EPT-76 » qui a été publiée par le BIPM en 1983 ; elle sera probablement mise à jour dans quelques années. La tâche principale du GT1 reste la préparation d'une EIPT de remplacement, avec mission de rédiger une version provisoire du texte. Le GT1 a

---

\* BIPM Com. Cons. Thermométrie, 13, 1980, pp. T 38-40.

aussi, parfois, d'autres documents à préparer, comme la réponse à une question précise du CIPM (voir document 29).

Le GT2 a établi un document sur les points de référence secondaires (voir Annexe T 3) qui sera publié dans *Metrologia* \*. Le travail sur les mesures secondaires de température, déjà bien engagé, constituera à l'évidence une tâche énorme pour les deux prochaines années au moins.

En ce qui concerne le GT3 et le GT4, le président propose qu'ils restent responsables de l'échelle, l'un au-dessus, l'autre au-dessous de la limite inférieure du domaine du thermomètre à résistance de platine. Il semble, toutefois, que la connaissance des températures thermodynamiques est maintenant suffisamment avancée pour qu'il devienne important de centraliser l'information disponible. Le président propose que la tâche qui consiste à fournir des informations sur les températures thermodynamiques dans tout le domaine situé entre 0,5 K et le point de l'or (ou le point de l'argent) soit confiée au GT4. On pourrait considérer comme urgent de préparer un article à publier dans *Metrologia* sur les valeurs recommandées de  $(T - T_{68})$ .

Le président estime que la composition du GT1 et celle du GT4 sont adéquates pour les tâches décrites ci-dessus. Pour le GT3, il en va différemment : trois de ses membres ne seront bientôt plus disponibles en raison, soit d'un départ à la retraite (Mr Kemp et Mr Thomas), soit d'un changement de centre d'intérêt (Mr Coates). Le président demande quels sont les autres commentaires sur les tâches et la composition des Groupes de travail.

Mr Kemp est un peu inquiet à l'idée de confier l'établissement des fonctions d'interpolation pour les thermomètres à résistance de platine à un Groupe de travail et les températures thermodynamiques à un autre, parce que ces deux problèmes sont en relation très étroite. Le président note que Mr Kemp lui-même a montré que la connaissance des températures thermodynamiques avait bien progressé ; les méthodes d'interpolation seront très peu modifiées par toute amélioration future des valeurs des températures thermodynamiques. Mr Kemp souligne qu'une étroite coopération est nécessaire entre les deux Groupes de travail et suggère que leurs réunions entre deux sessions du CCT se tiennent en un même lieu. Il ajoute qu'il y a un fossé dangereux dans la connaissance des températures thermodynamiques, dans le domaine du thermomètre à résistance de platine pour la mesure des hautes températures. Quand ce problème sera résolu, il deviendra relativement simple d'établir la fonction d'interpolation : en effet, les théoriciens croient que la relation de la résistance en fonction de la température du platine est beaucoup plus simple aux hautes températures qu'aux températures plus basses.

Mr Soulen demande si la question des valeurs à attribuer aux points

---

\* *Metrologia*, 20, 1984, pp. 145-155.



de référence supraconducteurs entre 0,5 K et 9 K et la question de savoir si l'échelle se terminera ou non à 0,5 K devraient être traitées dans le cadre des Groupes de travail existants. Mr Soulen accueillerait favorablement la formation d'un cinquième Groupe de travail composé de membres de la PTB (Berlin), du NBS, du laboratoire finlandais spécialisé dans les basses températures et du KOL.

Mr Crovini souligne qu'une bonne communication entre les Groupes de travail est essentielle ; il demande si les suggestions concernant les points fixes dans le domaine du thermomètre à résistance de platine entrent bien dans le cadre des tâches attribuées au GT3. Le président affirme que c'est certainement le cas. Mr Rusby remarque que la composition actuelle du GT4 est biaisée en faveur des basses températures ; il demande s'il ne vaudrait pas mieux laisser la détermination des températures thermodynamiques dans le domaine du thermomètre à résistance de platine aux soins du GT3 et confier les points de référence supraconducteurs et le domaine au-dessous de 0,5 K, ainsi que Mr Soulen lui-même, au GT4.

Questionné par le président au sujet de suggestions précises, Mr Soulen répond que le GT3 pourrait s'occuper de tous les points fixes, y compris des points de transition supraconductrice au-dessus et au-dessous de 0,5 K, et le GT4 des déterminations de température thermodynamique jusqu'aux très basses températures ; on pourrait aussi créer un cinquième Groupe de travail, spécialement pour le domaine des températures au-dessous de 0,5 K.

Suit une discussion concernant la taille optimale d'un Groupe de travail et la communication entre les Groupes de travail et les experts qui n'en sont pas membres. Mr Soulen pense que la communication pourrait être améliorée et que les résultats seraient disponibles plus tôt si, dans les prochaines années, une réunion annuelle du CCT avait lieu et si elle était précédée de réunions parallèles des Groupes de travail. Le président estime que des réunions annuelles des Groupes de travail sont souhaitables mais qu'une réunion annuelle du CCT serait difficile à organiser.

A Mr Schooley qui demande quels sont les instruments que le GT3 doit prendre en considération pour les hautes températures, le président répond que seul le thermomètre à résistance de platine pour la mesure des hautes températures est à prendre en compte. On n'attend pas d'évolution en ce qui concerne le pyromètre optique et des instruments tels que les thermomètres à fibre optique n'ont guère de chances de convenir pour des échelles de température. Mr Crovini ajoute que le pyromètre optique a été mentionné dans les attributions du GT3, en 1980, pour deux raisons, l'une étant la comparaison internationale des thermomètres à résistance de platine pour la mesure des hautes températures avec le pyromètre optique, l'autre la détermination des températures thermodynamiques.

En ce qui concerne les deux possibilités mentionnées par Mr Soulen



pour traiter des très basses températures, Mr Hudson suggère que le GT4 pourrait s'occuper de façon satisfaisante de ce domaine si Mr Soulen se joignait au GT4. Mr Durieux peut facilement rester en contact avec Mr Frossati (KOL) et le GT4 peut obtenir des informations de la PTB (Berlin) et du laboratoire finlandais spécialisé dans les basses températures durant le cours normal de son fonctionnement.

Mr Bonnier se demande si la liaison entre les Groupes de travail est assez forte dans l'intervalle des réunions du CCT. Il suggère que le président de chaque Groupe de travail envoie aussi tous les documents de son Groupe aux présidents des autres Groupes.

Finalement, on se met d'accord sur les attributions et la composition suivantes des Groupes de travail :

### Attributions des Groupes de travail

GT1 : 1) Préparation d'une version provisoire du texte de la nouvelle EIPT.

2) Préparation d'autres documents si nécessaire.

GT2 : Préparation d'un document sur les méthodes secondaires de mesure des températures internationales.

GT3 : 1) Choix des points fixes et des instruments d'interpolation (en particulier le thermomètre à résistance de platine pour la mesure des hautes températures) pour la nouvelle EIPT.

2) Étude des méthodes d'interpolation dans le domaine du thermomètre à résistance de platine.

GT4 : 1) Études sur l'échelle de température au-dessous de 24 K (points fixes et instruments d'interpolation).

2) Fourniture d'informations sur la température thermodynamique au-dessous de 1 064 °C.

### Composition des Groupes de travail

GT1 : Mr Preston-Thomas  
(président)  
Mr Bloembergen  
Mr Quinn

GT2 : Mr Bedford (président)  
Mr Bonnier  
Mr Maas  
Mr Pavese

GT3 : Mr Crovini (président)  
Mr R. C. Kemp  
Mr Ling  
Mr Schooley

GT4 : Mr Hudson (président)  
Mr Durieux  
Mr Rusby  
Mr Soulen  
Mr Swenson

Après avoir consulté le président, Mr Crovini est autorisé à ajouter Mr Sakurai comme membre du GT3, si toutefois Mr Sakurai est d'accord et à condition qu'il soit en mesure d'assister aux réunions du Groupe de travail et peut-être aussi du CCT.

Le président propose, ensuite, que le CCT considère s'il y a des travaux expérimentaux urgents à effectuer. Il en mentionne deux qui semblent évidents : l'étude plus approfondie du thermomètre à résistance de platine pour la mesure des hautes températures et la détermination des températures thermodynamiques dans le domaine autour de 630 °C. Mr Kemp signale que des recommandations précises figurent dans le rapport du GT3 (voir Annexe T 4) : mesure des températures thermodynamiques au-dessus de 14 K et étude du thermomètre à résistance de platine pour la mesure des hautes températures. Il aimerait y ajouter une recommandation concernant de nouvelles recherches sur le point de fusion de l'eutectique Cu-Ag, comme point de référence utile pour le thermomètre à résistance de platine pour la mesure des hautes températures.

Mr Quinn, se référant à des discussions ayant eu lieu au cours de cette session, recommande que soient faites des mesures de non-unicité de l'EIPT-68 entre les points fixes, dans le domaine du thermomètre à résistance de platine, de 0 °C à 419 °C ou 630 °C. Les mesures pourraient être la comparaison, dans un bloc à température uniforme, d'un certain nombre de thermomètres à résistance de platine ou l'étalonnage des thermomètres à des points fixes situés entre les points fixes de définition. Mr Kemp préfère les étalonnages aux points fixes intermédiaires et suggère de porter tout d'abord les efforts sur les mesures aux points du gallium, de l'indium et du cadmium. Mr Bonnier remarque que de telles mesures fourniraient aussi des informations sur les températures de ces points fixes dans l'EIPT-68. Si l'on compare les résultats de plusieurs laboratoires, il faut faire attention aux écarts éventuels entre les températures réalisées dans les différentes cellules à point fixe.

Questionné par Mr Crovini sur le programme du NRC, Mr Bedford répond que J. Ancsin est en train de comparer entre eux des thermomètres à résistance de platine à capsule et à tige, jusqu'au point de congélation de l'indium ; ce dernier est réalisé dans une petite cellule scellée à point triple. Mr Ancsin a étudié vingt thermomètres à capsule environ, probablement de quatre types différents, et dix thermomètres à tige de deux types différents, au cours de ce programme. Le président souligne qu'il est important d'inclure autant de types de thermomètre à résistance de platine que possible dans le projet. Mr Schooley demande s'il serait utile que B. W. Mangum (NBS) distribue à des laboratoires une demi-douzaine de cellules de gallium et de cadmium. Le président répond que, pour le NRC, il serait certainement profitable d'en recevoir. Mr Rusby suggère que le point de congélation de l'antimoine y soit aussi inclus. Mr Quinn rappelle que tous les thermomètres à résistance

de platine ne conviennent pas pour les mesures au point de l'antimoine et Mr Crovini remarque que des problèmes de fuite électrique peuvent exister à cette température.

Mr Quinn regrette que le BIPM n'ait pas la possibilité de faire ces mesures et demande qu'une proposition plus précise soit faite sur la manière dont le travail pourrait être mené. Finalement, on se met d'accord pour que, avant la prochaine session du CCT, le plus grand nombre possible de laboratoires entreprennent l'étude de la non-unicité entre 0 °C et 470 °C. On suggère que, pour commencer, des mesures aux points de congélation du gallium, de l'indium et du cadmium soient faites avec une diversité aussi grande que possible de thermomètres à résistance de platine\*.

Pour terminer ces discussions sur les Groupes de travail et leurs tâches et sur le travail expérimental à effectuer, le président demande si le CCT ne devrait pas faire des recommandations, pour lui-même ou au CIPM, sur ces questions.

Pour que les Groupes de travail fonctionnent efficacement, le président propose de recommander avec force que chaque Groupe se réunisse au moins une fois entre deux sessions du CCT.

### 13. Travaux du BIPM

Mr Bonhoure décrit les travaux en cours au BIPM, consacrés pour la plus grande part aux mesures de  $(T - T_{68})$  par radiométrie monochromatique dans le domaine de température allant de 420 °C à 630 °C. Il cite aussi les installations pour l'étalonnage des thermomètres, du point de l'argon au point du zinc, et des thermocouples, de 630 °C au point de l'or. Il ajoute que des comparaisons de cellules à point triple de l'eau de fabrications différentes ont révélé un accord supérieur à 0,1 mK.

Après la clôture de la réunion, de nombreux membres du CCT ont visité le laboratoire de thermométrie du BIPM.

### 14. Publication des documents

Le président rappelle la règle admise : le rapport du CCT et ceux des Groupes de travail sont publiés par le BIPM. Toutefois, les rapports des Groupes de travail, s'ils ne sont que des versions provisoires de documents qui seront publiés de façon formelle ultérieurement (comme

---

\* Après la clôture officielle de la réunion du CCT, on a demandé à Mr Bedford de coordonner ce travail, ce qu'il a accepté de faire après consultation de plusieurs membres.

les projets intermédiaires de la monographie « Supplementary Information for the IPTS-68 and the EPT-76 ») ne sont pas publiés. Les autres documents sont publiés seulement dans des cas exceptionnels.

La liste complète des documents présentés au CCT figure à l'Annexe T 1 ; ils sont disponibles sur demande adressée au BIPM.

## 15. Questions diverses

Ce point ne fait l'objet d'aucun commentaire.

## 16. A-t-on besoin d'une EIPT ?

### Proposition de Mr Durieux

Mr Durieux remarque que, au lieu de définir une échelle internationale pratique de température, le CCT pourrait fournir un catalogue de méthodes pour mesurer la température thermodynamique dans divers domaines de température, avec différents niveaux d'exactitude. Cela offrirait plus de souplesse au CCT et à l'utilisateur ; de plus, cela rendrait inutile la définition d'une nouvelle grandeur physique, la « température internationale pratique », ce qui s'avère assez malcommode à élaborer. Cela serait aussi plus en accord avec ce qui se fait pour les autres grandeurs physiques telles que la longueur, où seule l'unité fondamentale du SI est définie bien que la mesure des longueurs dans cette unité soit probablement loin d'être une banalité.

Mr Hudson remarque qu'il est peut être bon de dire que la suggestion de Mr Durieux porte à sa conclusion ultime l'idée, exprimée dans le document 37, que le CCT devrait moins s'inquiéter des questions de non-unicité et de chevauchement des échelles. Il répète que, dans le cas de la longueur, la définition de l'unité est le but final du problème tant que l'on s'en tient au plan strictement formel. Ensuite, quand on aborde la question pratique, à savoir quel profit les gens tirent de cette définition dans le monde réel, on présente des recommandations, par exemple des valeurs de fréquences recommandées.

Le président rappelle que, lors de sessions précédentes du CCT, il avait été suggéré que, si l'on remplaçait l'EIPT actuelle, la nouvelle échelle durerait peut-être encore trente ans et qu'après cela la proposition avancée par Mr Durieux deviendrait effectivement une réalité.

A la suite d'autres commentaires généraux, Mr Hudson pense qu'il y a peut-être un malentendu. L'approche de Mr Durieux est, si l'on peut dire, une approche philosophique, en ce sens qu'il souhaite mettre le kelvin sur le même pied d'égalité que les autres unités. L'intention n'est pas — il en est certain — que le CCT devrait cesser d'offrir au

public une « mise en pratique ». Cette solution pourrait peut-être apporter plus de souplesse que ne le ferait le texte d'une EIPT révisée.

Mr Rusby hésite pour sa part à entrer dans des considérations philosophiques mais souligne que les communautés scientifiques et industrielles ont besoin d'avoir une référence pour la coopération internationale en thermométrie. Il souligne que l'on a besoin d'une EIPT et que si le CCT rompt avec la tradition d'une définition unique, le nombre des solutions de rechange autorisées devrait être strictement limité. Ces solutions devraient être introduites seulement si l'on a des raisons importantes de le faire, par exemple pour obtenir une échelle très reproductible dans le domaine restreint allant de  $-40^{\circ}\text{C}$  à  $+40^{\circ}\text{C}$  ou, peut-être, pour établir des échelles entre 14 K et 24 K par des méthodes plus commodes que celle proposée par Mr Kemp.

Partant d'un point de vue plus pratique, Mr Swenson remarque que l'insistance mise par le CCT sur l'unicité est bien illusoire parce que l'unicité existe seulement aux points fixes et non dans les intervalles. Il serait très utile d'avoir plus de résultats sur la non-unicité, par exemple entre  $0^{\circ}\text{C}$  et  $460^{\circ}\text{C}$ . En principe, une surabondance de points fixes et de définitions de rechange de l'échelle devrait permettre des étalonnages plus cohérents entre eux que l'EIPT ne le permet actuellement. Mr Kemp déclare que l'on dispose déjà d'un bon nombre de données sur la non-unicité de l'EIPT dans le domaine du thermomètre à résistance de platine, par exemple celles qui proviennent d'étalonnages de thermomètres à tige. Le CSIRO fait toujours une mesure au point du cadmium, avant et après étalonnage ; les thermomètres comprennent des Leeds and Northrup et des thermomètres chinois et japonais.

Revenant sur le principe du choix entre une EIPT et un certain nombre de méthodes recommandées pour mesurer les températures, Mr Hudson répète que l'exactitude de chaque méthode approuvée devrait être spécifiée. Le président, toutefois, pense que si une douzaine de méthodes ou davantage sont employées, il deviendra presque impossible de s'y retrouver plus tard. Mr Kemp souligne que le commerce international a besoin que la même échelle soit employée partout. Aussi Mr Rusby et Mr Crovini insistent-ils sur l'importance d'avoir une échelle de température bien définie. Mr Quinn est d'accord avec Mr Kemp pour penser que le commerce international ainsi que les comparaisons entre les laboratoires nationaux requièrent l'utilisation d'une échelle internationale commune.

Dans la suite de la discussion, Mr Bloembergen souligne que, dans le cas d'autres grandeurs physiques, on n'a pas défini d'échelles internationales. Mr Quinn pense que, dans la plupart de ces cas, la grandeur peut être mesurée par l'utilisateur avec la reproductibilité requise mais que cela n'est pas vrai pour la température thermodynamique. Mr Bloembergen estime que l'on se rapproche de cette situation, aussi dans le cas de la température thermodynamique.

En conclusion, le président considère que, même si dans le futur

on doit se rapprocher d'une situation dans laquelle une échelle internationale de température ne sera plus nécessaire, la plupart des personnes présentes sont d'avis que cette étape n'est pas encore atteinte.

### 17. Prochaine session du CCT

Le CCT se réunira à nouveau en 1986, probablement fin mai ou début juin.

\*  
\* \*

Avant de lever la séance, le président remercie tous les participants pour leur coopération pendant la session, le directeur du BIPM et ses collaborateurs pour l'aide matérielle apportée au cours des réunions.

Reçu le 11 décembre 1984,  
Texte révisé reçu le 20 février 1985.

---

## ANNEXE T 1

### Documents de travail présentés à la 15<sup>e</sup> 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/

- 84-1 IMM (U.R.S.S.). — Realization of the indium freezing point, by B. N. Oleinik, A. G. Ivanova, M. M. Dviniyaninov and V. A. Zamkovets.
- 84-2 NBS (États-Unis d'Amérique). — NBS SRM 767a Superconductive Fixed-Point Device, by J. F. Schooley.
- 84-3 NBS (États-Unis d'Amérique). — NBS High-Temperature Gas Thermometry, by R. E. Edsinger and J. F. Schooley.
- 84-4 NIM (Rép. Pop. de Chine). — The stability of the thermometer No. 80138 at the silver point.
- 84-5 PTB (Rép. Féd. d'Allemagne). — An Optical Measurement of the Deviation of International Practical Temperatures  $T_{68}$  from Thermodynamic Temperatures in the Range from 730 K to 903 K, by H. J. Jung.
- 84-6 PTB (Rép. Féd. d'Allemagne). — Gas thermometer measurements at 27 K, 54 K and 90 K, by F. Weber.
- 84-7 PTB (Rép. Féd. d'Allemagne). — The temperature of the triple points of methane and argon on IPTS-68, by W. Blanke.
- 84-8 CSIRO (Australie). — A Reference Function for Platinum Resistance Thermometer Interpolation between 13.8 K and 273.15 K, by R. C. Kemp, L. M. Besley and W. R. G. Kemp.

- 84-9 CSIRO (Australie). — The use of the xenon triple point in platinum resistance thermometer interpolation between 13.81 K and 273.15 K, by R. C. Kemp.
- 84-10 CSIRO (Australie). — Realization of the triple point of <sup>nat</sup>xenon and experiments with <sup>136</sup>xenon in a sealed cell of novel design, by R. C. Kemp, W. R. G. Kemp and P. W. Smart.
- 84-11 CSIRO (Australie). — Platinum Resistance Thermometer Interpolation below 273.15 K, by R. C. Kemp.
- 84-12 CSIRO (Australie). — An experiment using high temperature resistance thermometers, by T. P. Jones and J. V. McAllan.
- 84-13 NRLM (Japon). — Progress in Evaluating the Performance of the High Temperature Platinum Resistance Thermometers, by M. Morimura and S. Sawada.
- 84-14 NRLM (Japon). — The Ag-Cu Eutectic Point as a Reference Temperature, by H. Itoh.
- 84-15 NRLM (Japon). — Dependence of Superconducting Transition Temperature on Detection Techniques, by K. Nara. (Publié dans *Japanese J. of Appl. Phys.*, **22**, 12, 1983, pp. 1815-1817).
- 84-16 CSMU (Tchécoslovaquie). — Interpolation of the temperature scale by means of resistance thermometer up to the temperature of silver solidification (961.93 °C) and control of the solidification temperature of eutecticum AgCu, by M. Borovicka.
- 84-17 NBS (États-Unis d'Amérique). — Characteristics of some high temperature platinum resistance thermometers, by J. P. Evans.
- 84-18 NBS (États-Unis d'Amérique). — Recommendations on the form of a replacement IPTS, by J. F. Schooley and R. J. Soulen Jr.
- 84-19 NBS (États-Unis d'Amérique). — The NBS temperature scale in the range 15 to 200 mK, by J. H. Colwell, W. E. Fogle and R. J. Soulen, Jr.
- 84-20 NBS (États-Unis d'Amérique). — Determination of the superconductive transition temperatures of Cd, Zn and Al using a Josephson junction noise thermometer, by W. E. Fogle, J. H. Colwell and R. J. Soulen, Jr.
- 84-21 BIPM. — Étude pyrométrique des températures comprises entre 420 et 630 °C, par J. Bonhoure et R. Pello.



- 84-22 CSMU (Tchécoslovaquie). — Triple point of gallium and mercury as thermometric standards, by M. Borovicka.
- 84-23 ASMW & Zentralinstitut für Festkörperphysik und Werkstoffforschung, Dresden (Rép. Dém. Allemande). — Progress in Research Concerning the Superconducting Transition of Niobium as a Reference Temperature, by B. Fellmuth, H. Maas and D. Elefant.
- 84-24 ASMW (Rép. Dém. Allemande). — Investigations Concerning the Superconducting Transition Points of Lead and Indium, by B. Fellmuth.
- 84-25 ASMW & Zentralinstitut für Optik und Spektroskopie der AdW, Berlin (Rép. Dém. Allemande). — Black Body Radiator Applicable up to Operating Temperatures of 3200 K for Calibrating Spectral and Ratio Pyrometers, by E. Geyer, H. Falk and E. Wahls.
- 84-26 ASMW (Rép. Dém. Allemande). — Simple Equipment for Thermometer Calibration and for Secondary IPTS-68 Realization in the Range 77 to 273 K, by P. Seifert.
- 84-27 NBS (États-Unis d'Amérique). — EPT-76 Comparison Experiments at the National Bureau of Standards, by E. R. Pfeiffer.
- 84-28 NBS (États-Unis d'Amérique). — Some Studies of High Temperature Resistance Thermometry: A Report to the CCT, by J. P. Evans.
- 84-29 NRC (Canada) - BIPM. — The International Practical Temperature Scale, by H. Preston-Thomas and T. J. Quinn.
- 84-30 NRLM (Japon). — Remeasurements of the Triple Point of Oxygen - Comparisons between the NRLM's sealed cell and an open cell, by H. Sakurai and O. Tamura.
- 84-31 NBS (États-Unis d'Amérique). — The Triple Point of Oxygen in Sealed Transportable Cells, by G. T. Furukawa.
- 84-32 Rapport du Groupe de travail 4 du CCT (*voir* Annexe T 5, p. T 82).
- 84-33 VSL (Pays-Bas) ; INM (France). — An intercomparison of sealed argon triple-point cells by means of long-term standard resistance thermometers, by P. Bloembergen, G. Bonnier et H. Ronsin.
- 84-34 INM (France). — The carbon dioxide triple point in a multicompartiment cell, by G. Bonnier, Y. Hermier and Wu Biqin.

- 84-35 IMPR (U.R.S.S.). — On the superconductive fixed points temperatures, by O. F. Pogorelova, G. A. Kytin and D. N. Astrov.
- 84-36 IMPR (U.R.S.S.). — A Precision Gas Thermometer for the 4 to 273 K Range, by D. N. Astrov, L. B. Belyansky, U. A. Dedikov, A. A. Zacharov and S. P. Polunin.
- 84-37 BIPM. — Thermometric Heresies, by R. P. Hudson.
- 84-38 NPL (Royaume-Uni) - KOL (Pays-Bas). — New  $^3\text{He}$  and  $^4\text{He}$  Vapour Pressure Equations, by R. L. Rusby and M. Durieux.
- 84-39 NPL (Royaume-Uni). — The Thermodynamic Temperature of the Gold and Silver Points, by J. W. Andrews and Gu Chuanxin.
- 84-40A Rapport du GT2 : « Recommended Values of Temperature for a Selected Set of Secondary Reference Points » (*voir* Annexe T 3, p. T 49).
- 84-40B Rapport du GT2 : « Secondary Realizations of the IPTS ».
- 84-41 CSIRO (Australie) - NRLM (Japon). — Intercomparison of 12 Standard Platinum Resistance Thermometers between 13.8 K and 273.15 K, by H. Sakurai and R. C. Kemp.
- 84-42 NPL (Royaume-Uni). — Stability Tests on High Temperature Platinum Resistance Thermometers (0.25 ohm at 0 °C), by M. V. Chattle.
- 84-43 BIPM - NPL (Royaume-Uni). — Total-radiation measurements of  $T - T_{68}$  in the range 233 K to 381 K, by T. J. Quinn and J. E. Martin.
- 84-44 BIPM. — Comportement des thermomètres à résistance de platine pour la mesure des hautes températures, par J. Bonheure et R. Pello.
- 84-45 IMGIC (Italie). — Stability of *n*-deuterium and *e*-deuterium in sealed metal cells, by F. Pavese.
- 84-46 NIM (Rép. Pop. de Chine). — The Experimental Investigation on the Relationship between Brightness Temperature and Wavelength, by Zhao Qi, Li Da-jin, Lang Zhao-lin and Zhang Zhe.
- 84-47 NIM (Rép. Pop. de Chine). — Realization of Freezing Point of Copper by Photoelectric Comparator at NIM, by Zhao Qi, Li Da-jin, Yuan Zun-dong, Zhang Zhe and Qiu Nai-rong.

- 84-48 NIM (Rép. Pop. de Chine). — Recommendation on Successor of IPTS-68, by Ling Shankang, Zhao Qi and Li Xumo.
- 84-49 NIM (Rép. Pop. de Chine). — The effect of annealing condition on the stability of HTPRT, by Li Xumo, Fan Xiuhua and Su Jingrong.
- 84-50 NIM (Rép. Pop. de Chine). — The progress in high temperature platinum resistance thermometry at NIM, by Li Xumo, Su Jinrong, Chen Ming, Fan Xiuha and Xiao Wuzi.
- 84-51 Report of a meeting of Working Groups 1 and 4 (*voir* Annexe T 2, p. T 44).
- 84-52 IMGC (Italie). — Latest results on NIM HTPRTs at IMGC, by P. Marcarino.
- 84-53 2nd Report of Working Group 3 (*voir* Annexe T 4, p. T 72).
- 84-54 CSIRO (Australie). — Deviation of  $T_{68}$  from thermodynamic temperatures in the region of 1000 K, by R.C. Kemp and W.R.G. Kemp.
-

## ANNEXE T 2

---

### **Rapport de la réunion des Groupes de travail 1 et 4** (avec la participation du président du Groupe de travail 3) tenue au NPL le 24 octobre 1983

(Traduction du Document CCT/84-51)

---

Étaient présents : H. PRESTON-THOMAS, T. J. QUINN (GT1) ; L. CROVINI (GT3) ; R. P. HUDSON, M. DURIEUX, R. L. RUSBY (GT4).

Des contributions particulièrement utiles ont été soumises à cette réunion par W. R. G. Kemp et C. A. Swenson.

#### **Buts**

Cette réunion avait été organisée essentiellement pour tenter d'arriver à un accord sur deux points litigieux en attente concernant le projet de nouvelle EIPT : la limite inférieure de température du domaine du thermomètre à résistance de platine et les méthodes à suivre pour définir l'EIPT entre cette limite inférieure et le domaine de la pression de vapeur de l'hélium.

On a aussi discuté de quelques autres questions, telles que les travaux en cours sur la mesure des températures thermodynamiques dans les différents domaines de température et les progrès accomplis dans les essais et la fabrication des thermomètres à résistance pour la mesure des hautes températures.

#### **Qualités requises pour une échelle aux basses températures**

On a estimé que, dans la pratique, l'EIPT serait conservée, dans le domaine de température concerné, au moyen de thermomètres à résistance étalonnés avec soin et que presque tous les « étalonnages pour clients » seraient effectués en utilisant des techniques de comparaison

automatisées. Les étalonnages primaires deviendraient occasionnels, essentiellement pour contrôler les thermomètres de référence.

On est aussi arrivé à la conclusion que les qualités requises pour l'EIPT devraient comprendre : la possibilité de s'arrêter à 84 K \* pour les laboratoires nationaux qui n'ont pas besoin de travailler aux basses températures ou n'ont pas l'équipement pour le faire \*\* ; la possibilité d'atteindre une exactitude à  $\pm 0,2$  mK près pour les points fixes mentionnés au-dessus de 273 K \*\*\* ; la possibilité d'atteindre des exactitudes à  $\pm 0,5$  mK près pour toutes les températures inférieures à 273 K.

On a discuté et en général on a été d'accord sur un grand nombre d'autres questions qui s'éloignent de la thermométrie à résistance aux basses températures, en particulier : la nécessité d'une autre limite (supérieure cette fois) à 40 °C ; la compatibilité avec l'EIPT d'échelles secondaires, telles qu'une échelle très exacte entre  $-40$  et  $+30$  °C ou une échelle déterminée par trois points d'étalonnage entre 84 K et 232 °C ; la nécessité de corriger la discontinuité (par rapport aux températures thermodynamiques) à 630 °C et l'opportunité de corriger la pente à 0 °C ; les perspectives de succès du fonctionnement, jusqu'au point de l'or ou bien de l'argent, des thermomètres à résistance de platine construits par les chinois ou les japonais pour la mesure des hautes températures.

## Discussion sur les basses températures

Les deux principales options examinées ont été : la limitation de l'échelle du thermomètre à résistance de platine à 25 K, avec interpolation au thermomètre à gaz à partir de deux points entre 25 K et 4 K \*\*\*\* ; l'échelle du thermomètre à résistance de platine descendant jusqu'à 14 K, avec le thermomètre à gaz ou (éventuellement) le thermomètre magnétique de 14 K à 4 K.

Les informations communiquées par W. R. G. Kemp (voir fig. 1) montrent de façon très claire que les étalonnages aux points fixes jusqu'à 25 K fournissent des reproductibilités entre thermomètres excellentes jusqu'à 54 K. Toutefois, pour étendre cette reproductibilité jusqu'à 25 K, il semble qu'il faille *trois* points d'étalonnage supplémen-

---

\* Par commodité de présentation, les points fixes bien connus sont arrondis à la valeur entière la plus proche : 14, 25, 54, 84 et 273 K se rapportent à des points triples directement identifiables ; 4, 20 et 27 K à des points d'ébullition ; et 17 K à un point arbitraire.

\*\* Dans les domaines de température où une échelle ainsi tronquée aurait une exactitude inférieure à celle de l'échelle complète, elle n'aurait qu'un statut auxiliaire.

\*\*\* Il se peut que les points d'ébullition aux basses températures ne soient pas reproductibles à  $\pm 0,2$  mK d'un laboratoire à l'autre.

\*\*\*\* Ou éventuellement un thermomètre à gaz d'interpolation à partir de trois points, avec le point fixe supplémentaire à 14 K.

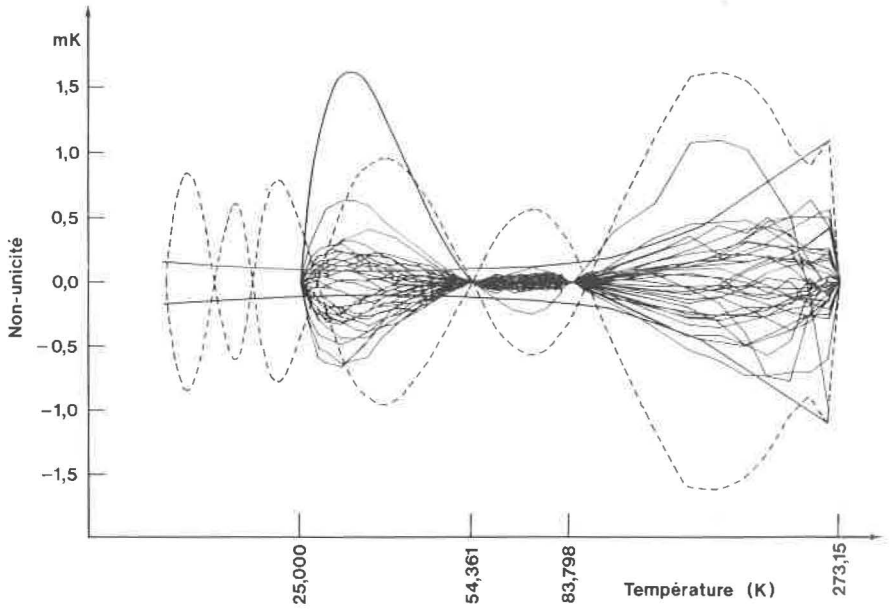


Fig. 1a.

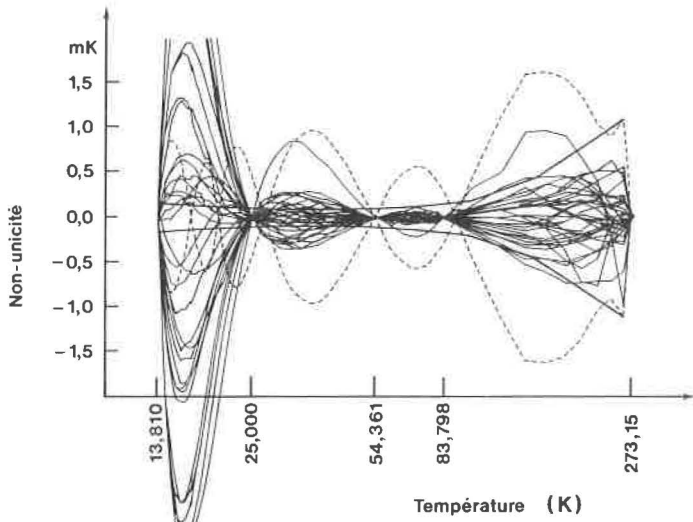


Fig. 1b.

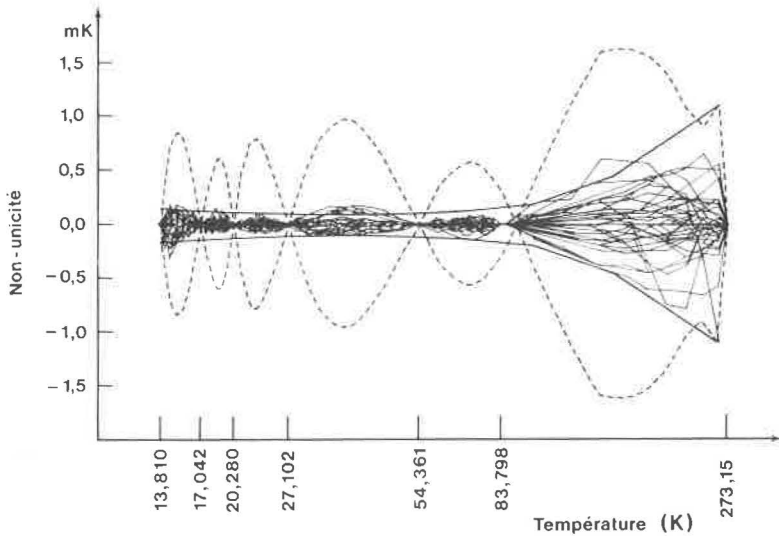


Fig. 1c.

Fig. 1. — Non-unicité en fonction de la température, suivant les points fixes utilisés.

- Non-unicité calculée
- - - Non-unicité IPT-68
- Incertitude expérimentale

taires à environ 14, 17 et 20 K (l'un, à 14 K, ne convenait pas ; les résultats pour les deux autres n'ont pas été donnés). En tenant compte de ces étalonnages supplémentaires, les reproductibilités sont bonnes jusqu'à 20 ou même 17 K, et correctes jusqu'à 14 K.

Après avoir discuté en détail les différents résultats et les arguments écrits disponibles, compte tenu de l'avis des experts présents en thermométrie magnétique et en thermométrie à gaz, on a, à l'unanimité, recommandé au CCT l'emploi d'une EIPT dont les caractéristiques seraient les suivantes :

Entre 273 K et 25 K, l'EIPT serait définie au moyen de thermomètres à résistance de platine étalonnés à 14, 17, 20, 25, 54, 84 et 273 K, ainsi qu'à une ou deux températures supérieures. Les points d'étalonnage à 25 K et au-dessus seraient des points fixes de type courant ; les points à 14, 17 et 20 K seraient, soit de type courant (point triple de H<sub>2</sub> ou pression de vapeur), soit des points mesurés au moyen d'un thermomètre à gaz d'interpolation étalon.

Entre 4 K et 25 K, l'EIPT serait définie comme pouvant être réalisée, soit au moyen d'un thermomètre à gaz d'interpolation comme indiqué ci-dessus, soit au moyen d'un thermomètre à gaz pour le domaine compris entre 4 K et 14 K et de thermomètres à résistance de platine étalonnés ainsi qu'il a été indiqué ci-dessus pour le domaine compris entre 14 K et 25 K.

Au-dessous de 4 K, il n'y a eu aucune controverse ; on pense que la thermométrie à pression de vapeur de  $^4\text{He}$  et  $^3\text{He}$  devrait être utilisée jusqu'à la limite pratique de fonctionnement de  $^3\text{He}$ . On estime que c'est à cette température que devrait être la limite inférieure de la nouvelle EIPT. Il n'y aurait aucune difficulté pour étendre ultérieurement l'échelle à des températures plus basses ; en revanche, modifier un domaine de basses températures, s'il s'avérait erroné, donnerait lieu à beaucoup plus de contestations.

1<sup>er</sup> février 1984

---



## ANNEXE T 3

### Rapport du Groupe de travail 2 \* (Points de référence secondaires)

(Traduction du Document CCT/84-40A)

Lors de la 14<sup>e</sup> session du CCT en 1982 et après de longues discussions, il a été demandé au Groupe de travail 2, entre autres tâches, de préparer une liste de points de référence secondaires en indiquant la valeur de la température recommandée, l'estimation de l'incertitude sur chaque valeur et une bibliographie s'y rapportant. Cette liste est donnée ci-après sous forme de tableau. En la préparant, nous avons été guidés par les critères déterminés dans le rapport du Groupe de travail de janvier 1978 <sup>(1)</sup>. Nous les rappelons brièvement :

- a) Les points de référence secondaires doivent être très reproductibles.
- b) On doit avoir plus d'une mesure expérimentale de la valeur de la température.
- c) On doit donner une estimation de l'exactitude de la température attribuée.
- d) On doit spécifier la pureté du corps correspondant à la température attribuée.
- e) On doit indiquer les références bibliographiques des mesures expérimentales originales.
- f) On doit indiquer l'effet des autres grandeurs physiques sur la valeur de la température, lorsqu'il y a lieu. (On n'a pas trouvé beaucoup d'informations de ce genre pour chacun des points de référence retenus dans la liste ; on en a données pour quelques points ; l'effet de la

---

\* Les membres de ce Groupe de travail sont : MM. R. E. BEDFORD, président, Conseil National de Recherches (Canada) ; G. BONNIER, Institut National de Métrologie (France) ; H. MAAS, Amt für Standardisierung, Messwesen und Warenprüfung (Rép. Dém. Allemande) ; F. PAVESE, Istituto di Metrologia G. Colonnetti (Italie).

<sup>(1)</sup> 4<sup>e</sup> rapport du Groupe de travail 2, *BIPM Com. Cons. Thermométrie*, 12, 1978, pp. T59-T71.

pression sur bon nombre de points figure dans les tableaux de « Supplementary Information for the IPTS-68 and the EPT-76 »). Nous avons considéré ce critère comme moins important que les cinq premiers.

Le tableau a été divisé en trois parties. Les points de référence figurant dans la partie A sont ceux pour lesquels les cinq premiers critères sont (à quelques exceptions près seulement) bien remplis. En fait, ils sont d'une qualité comparable à celle des points fixes de définition de l'EIPT-68 et constituent une série dans laquelle on peut choisir des points fixes pour toute nouvelle EIPT. Les exceptions sont de deux sortes. Quelques températures attribuées (par exemple les points de congélation du bismuth et du plomb) ne sont le résultat que d'une seule mesure expérimentale, mais le travail est suffisamment bien documenté pour justifier leur intégration dans la partie A. Les autres (point de l'eutectique cuivre 71,9 % d'argent et les points de congélation du rhodium, de l'iridium, du molybdène et du tungstène) figurent dans la partie A parce que, bien que leur température ne soit pas connue avec toute l'exactitude souhaitable, ils se trouvent dans des domaines de température pour lesquels on ne dispose pas d'autres meilleurs points.

La partie B du tableau comporte les points de référence secondaires qui ne satisfont pas complètement à la totalité des cinq premiers critères (dans bien des cas il n'existe qu'une seule détermination expérimentale) ou bien qui sont d'utilisation moins commode que ceux de la partie A, même s'ils font l'objet d'une documentation tout à fait bonne. Dans ce deuxième groupe, on peut citer comme exemples les transitions solide/solide et quelques points d'ébullition. La plupart des points qui figurent dans la partie B constituent d'excellents sujets de recherches expérimentales nouvelles.

La partie C donne quelques exemples de points qui devraient être étudiés pour évaluer leur aptitude comme points de référence secondaires. Dans le passé, on avait souhaité disposer d'un grand nombre de points de référence secondaires dans la région qui s'étend de  $-100^{\circ}\text{C}$  à  $200^{\circ}\text{C}$  environ, et dans laquelle se situent beaucoup des points proposés. De plus, on ne sait pas encore très bien quels points de référence, ou combien, seront utilisés pour fournir une interpolation satisfaisante avec les thermomètres à résistance étalons dans la nouvelle EIPT. Plusieurs des points à basse température mériteraient d'être encore étudiés à cet égard. Les points figurant dans la partie C ne sont donnés qu'à titre d'exemples ; leur présence dans cette partie ne signifie pas que ce soient les seuls ou qu'une bibliographie complète soit donnée.

Pour établir ce tableau, c'est surtout le critère (c) qui a présenté la difficulté la plus grande. La documentation concernant l'exactitude, celle fournie par les publications, est extrêmement variable. D'un côté, on trouve une analyse détaillée comportant des estimations des incertitudes autres qu'aléatoires ; de l'autre, on trouve une simple

indication numérique en guise d'incertitude. Certains rapports abordent de façon assez complète le problème de la reproductibilité, en déduisent en partie l'incertitude, mais ne font aucune mention d'éventuelles composantes aléatoires. Dans bien des cas, il n'apparaît pas de façon évidente de quelle méthode statistique il s'agit et rarement, sinon jamais, n'est indiqué le nombre d'observations indépendantes. Inévitablement, pour se faire une idée générale, d'autres facteurs sont aussi utilisés, comme le degré d'accord entre des expériences indépendantes, ainsi que la connaissance que l'on peut avoir d'expérimentations comparables effectuées par les mêmes auteurs.

De l'ensemble des résultats concernant chaque point de référence secondaire, on a pu en rejeter certains. Les raisons les plus fréquentes de rejet venaient du manque de précision (en particulier parmi les premières mesures), ou bien parce que les mesures étaient exprimées dans une échelle de température impossible à relier correctement à l'EIPT-68, ou bien parce que les mesures n'étaient pas suffisamment bien décrites.

En ce qui concerne les points de référence secondaires donnés dans le tableau, pour lesquels on disposait de deux (ou généralement plus) déterminations indépendantes, on a utilisé la méthode de Paule et Mandel<sup>(2)</sup> pour leur attribuer une valeur de température et une incertitude. Cette méthode permet « une analyse statistique des séries de résultats qui proviennent d'expérimentations multiples » et « reconnaît l'existence d'inconsistances à la fois à l'intérieur d'un groupe et entre groupes ». En bref, la méthode calcule une valeur « pondérée »  $\tilde{T}$  à partir des diverses valeurs moyennes obtenues de façon indépendante  $\bar{T}_i$ . Chaque  $\bar{T}_i$  est pondéré d'un facteur  $\omega_i$  donné par  $\omega_i^{-1} = (s_i^2/n_i) + s_b^2$ , où  $s_i^2/n_i$  est la variance de  $\bar{T}_i$  et  $s_b^2$  est une composante de variance entre séries que l'on peut calculer par itération. Ainsi, lorsque cela est possible, les valeurs de  $T_{68}$  données dans le tableau sont des valeurs « pondérées » calculées de cette façon et les incertitudes associées sont  $2/\sum_i \omega_i$  (arrondies par excès); elles correspondent approximativement à des limites de confiance de 95 %. Si, comme cela arrive souvent,  $s_b^2 = 0$ , la valeur « pondérée » revient alors à la valeur moyenne pondérée habituelle. On a utilisé un petit ordinateur de bureau programmable pour faire ces calculs.

Le problème en utilisant cette méthode est de savoir comment attribuer les variances  $s_i^2/n_i$ , qui sont liées sans être nécessairement identiques, aux carrés des incertitudes indiquées par les auteurs. Il n'est jamais possible de calculer  $s_i^2/n_i$  explicitement à partir des résultats donnés dans les rapports publiés (par exemple,  $n_i$  n'est presque jamais indiqué). Sauf indication contraire, nous avons supposé que l'incertitude

---

(<sup>2</sup>) PAULE, R. C. and MANDEL, J. Consensus values and weighting factors, *J. Res. Natl. Bur. Stand. (U.S.)*, **87**, 1982, pp. 377-385.

donnée par les auteurs était égale à un écart-type ; nous l'avons corrigée, selon les cas, pour tenir compte de facteurs comme la non-unicité de l'EIPT-68, les conversions d'échelle de température, le taux d'impuretés, etc.; et nous avons pris le carré de la valeur corrigée comme égal à  $s_i^2/n_i$ .

Prenons d'abord, comme exemple d'application de la méthode, le point du néon naturel. Nous disposons de douze mesures, que nous ramenons à dix parce que les références 6 et 8, et 10 et 11 paraissent se rapporter aux mêmes séries de résultats expérimentaux. Voici les différentes valeurs dont proviennent  $T_{68}$  et l'incertitude données dans le tableau :

Référence	$T_{68}$ (K)	incertitude donnée par les auteurs (mK)	ajustements (mK)	$(s_i^2/n_i)^{1/2}$ (mK)
7	24,5620	—	a,b	1
8	,5618	0,8	b	1
10	,561	1	c	2
12	,5631	1		1
13	,560	2	c	3
14	,5627	1		1
15	,5625	2		2
16	,5619	1 ?	b	1
17	,5624	1	b,d	1,5
18	,555	4	c,e	5

a. Incertitude expérimentale estimée à  $\pm 0,5$  mK.

b. Non-unicité de l'EIPT-68, à 24,5 K, égale à  $\pm 0,8$  mK (voir Fig. 1.4 dans « Supplementary Information for the IPTS-68 and the EPT-76 »).

c. Incertitude sur le passage de NBS-55 à l'EIPT-68 estimée à  $\pm 2$  mK à 24,5 K (y compris la non-unicité).

d. Thermomètre étalonné ailleurs et transféré ; incertitude associée estimée à  $\pm 1$  mK.

e. Le point d'ébullition du néon de l'auteur se trouvant à 3 mK au-dessous de la valeur de l'EIPT-68, l'équation de pression de vapeur, et partant la valeur du point triple, ont été déplacées de 3 mK ; l'incertitude associée est estimée à  $\pm 1$  mK.

A partir de ces valeurs nous obtenons le résultat porté dans le tableau :  $T_{68} = 24,562\ 2 \pm 0,000\ 8$  K. C'est un exemple d'une série de résultats extrêmement bonne, comme le fait apparaître  $s_b = 0$  ; autrement dit, il n'y a pas de composante de variance entre séries. On peut discuter de la nécessité de retenir la référence 18 ; c'est un cas limite, et le résultat n'est pas changé si l'on supprime la référence 18.

Comme second exemple, considérons le point de congélation du platine. Dans ce cas, la bibliographie fournit huit mesures indépendantes. Nous en avons rejeté quatre : trois ont été effectuées par pyrométrie visuelle il y a environ 50 ans et une (1970) par pyrométrie « high speed » : elles sont d'un ordre de grandeur moins précises que les quatre autres. Dans cet exemple, aucune des incertitudes estimées par

les auteurs n'a été ajustée. Le calcul donne  $T_{68} = 2\,041,9 \pm 0,7$  K, valeur que nous avons portée dans la liste du tableau après l'avoir arrondie à  $2\,042 \pm 1$  K. Dans ce cas,  $s_b$  vaut 0,5 K et est plus grand que toutes les incertitudes individuelles sauf une. C'est la principale raison pour laquelle nous avons arrondi au kelvin le plus proche.

Plusieurs équations de pression de vapeur figurent dans le tableau. Il n'existe pas de bonne méthode pour faire la moyenne d'équations déterminées de façon indépendante; qui plus est, un tel exercice n'apparaît pas comme particulièrement utile. Dans chaque cas, nous avons retenu l'équation d'un seul expérimentateur, mais toutes les autres concordent avec celle retenue dans les limites de l'incertitude indiquée.

Malheureusement, lorsque nous avons préparé le tableau, on ne disposait d'aucun des résultats de la comparaison internationale de cellules scellées à point triple organisée sous l'égide du CCT et il n'a pu en être tenu compte dans ces calculs.

22 mai 1984

Valeurs des températures recommandées pour un choix de points de référence secondaires  
Partie A : points de premier choix

État d'équilibre <sup>a</sup>	$T_{68}$ (K)	$t_{68}$ (°C)	Incertitude <sup>b</sup> (K)	Pureté du corps <sup>c</sup> (% en masse ou en volume)	Références <sup>d</sup>
Équilibre entre les phases liquide et vapeur de l'hydrogène en équilibre <sup>e</sup>	de 13,81 à 20,28	de - 259,34 à - 252,87	0,001	99,99	2
$p = p_0 \exp \left[ A + \frac{B}{T_{68}} + CT_{68} \right] + \sum_{i=0}^5 b_i T_{68}^i$ $A = 4,030\,610\,6$ $B = -101,803\,28\,K$ $C = 4,877\,861\,1 \times 10^{-2}\,K^{-1}$ $b_0 = 984,374\,89$ $b_1 = -293,525\,87\,K^{-1}$ $b_2 = 34,778\,619\,K^{-2}$ $b_3 = -2,046\,488\,3\,K^{-3}$ $b_4 = 5,979\,981\,1 \times 10^{-2}\,K^{-4}$ $b_5 = -6,941\,649\,2 \times 10^{-4}\,K^{-5}$					
Point triple du néon <sup>20</sup> Ne	24,546	- 248,604	0,001	99,95 <sup>f</sup>	9, 10
Point triple du néon naturel <sup>g</sup>	24,5622	- 248,5878	0,0004	99,99 <sup>f</sup>	7, 8 (93) <sup>h</sup> , 10 (11) <sup>h</sup> , 12-18
Équilibre entre les phases liquide et vapeur du néon <sup>i</sup>	de 24,562 à 27,102	de - 248,588 à - 246,048	0,002	99,99 <sup>f</sup>	7, (8, 10)
$\ln \frac{p}{p_0} = A + \frac{B}{T_{68}} + CT_{68} + DT_{68}^2$ $A = 11,534\,31$ $B = -252,593\,8\,K$ $C = -1,216\,916 \times 10^{-1}\,K^{-1}$ $D = 1,475\,653 \times 10^{-3}\,K^{-2}$					

État d'équilibre <sup>a</sup>	$T_{68}$ (K)	$t_{68}$ (°C)	Incertitude <sup>b</sup> (K)	Pureté du corps <sup>c</sup> (% en masse ou en volume)	Références <sup>d</sup>
Point triple de l'azote <sup>ee</sup>	63,1462	- 210,0038	0,0007	99,999	2, 15, 21, 22
Point d'ébullition de l'azote	77,344	- 195,806	0,002	99,999	21
Équilibre entre les phases liquide et vapeur de l'azote	de 63,146 à 77,344	dc - 210,004 à - 195,806	0,002	99,999	21
$\ln \frac{p}{p_0} = A + \frac{B}{T_{68}} + CT_{68} + DT_{68}^2$					
$A = 14,974\ 170$					
$B = -874,467\ 650\ \text{K}$					
$C = 6,655\ 806 \times 10^{-2}\ \text{K}^{-1}$					
$D = 2,473\ 924 \times 10^{-4}\ \text{K}^{-2}$					
Point triple de l'argon <sup>ee</sup>	83,7976	- 189,3524	0,0003	99,999	12, 17, 23-30
Point d'ébullition de l'argon <sup>k</sup>	87,2946	- 185,8554	0,0003	99,999	23, 27, 134
Équilibre entre les phases liquide et vapeur de l'argon	de 83,798 à 87,294	dc - 189,352 à - 185,856	0,001	99,999	23
$\ln \frac{p}{p_0} = A + \frac{B}{T_{68}} + CT_{68}$					
$A = 10,593\ 120$					
$B = -864,700\ 28\ \text{K}$					
$C = -7,876\ 11 \times 10^{-3}\ \text{K}^{-1}$					
Équilibre entre les phases liquide et vapeur de l'oxygène <sup>i</sup>	de 65 <sup>l</sup> à 90,188	dc - 208,15 <sup>l</sup> à - 182,962	0,001	99,999	33 (8)
$\ln \frac{p}{p_0} = A + \frac{B}{T_{68}} + \frac{C}{T_{68}^2} + DT_{68} + ET_{68}^2 + FT_{68}^3$					
$A = 33,935\ 826$					
$B = -1\ 724,524\ 0\ \text{K}$					
$C = 9\ 846,889\ 7\ \text{K}^2$					
$D = -3,131\ 257\ 6 \times 10^{-1}\ \text{K}^{-1}$					
$E = 1,927\ 509\ 1 \times 10^{-3}\ \text{K}^{-2}$					
$F = -4,720\ 598\ 4 \times 10^{-6}\ \text{K}^{-3}$					
Point triple du méthane (CH <sub>4</sub> ) <sup>k</sup>	90,6854	- 182,4646	0,0003	99,995	26, 29, 34-37

État d'équilibre <sup>a</sup>	$T_{68}$ (K)	$t_{68}$ (°C)	Incertitude <sup>b</sup> (K)	Pureté du corps <sup>c</sup> (% en masse ou en volume)	Références <sup>d</sup>
Point de triple du mercure	234,3083	- 38,8417	0,0005	99,9999	43 (32)
Point de congélation du mercure <sup>m</sup>	234,3137	- 38,8363	0,0005	99,9999	43 (32)
Point de glace <sup>n</sup>	273,15	0			
Point de fusion du gallium <sup>de</sup>	302,9220	29,7720	0,0002	99,99999	47-50, 136-139
Point triple du gallium <sup>dd</sup>	302,9240	29,7740	0,0002	99,99999	47, 49-51, 136, 137
Point triple de l'indium <sup>m</sup>	429,7795	156,6295	0,0004	99,9999	56, 140
Point de congélation de l'indium <sup>m</sup>	429,7848	156,6348	0,0003	99,9999	55, 56, 141
Point de congélation du bismuth <sup>m</sup>	544,592	271,442	0,001	99,9999	57
Point de congélation du cadmium <sup>m</sup>	594,2582	321,1082	0,0003	99,9999	58 (59) <sup>h</sup> , 60, 61
Point de congélation du plomb <sup>m</sup>	600,652	327,502	0,001	99,9999	62
Point de congélation de l'antimoine <sup>m</sup>	903,905	630,755	0,003	99,9999	59, 67
Point de congélation de l'aluminium <sup>m,o</sup>	933,607	660,457	0,005	99,9999	68, 69
Point de fusion de l'alliage eutectique cuivre 71,9 % argent <sup>p</sup>	1 052,70	779,55	0,07	99,999	70, 71, 142
Point de fusion de l'alliage eutectique cuivre 71,9 % argent <sup>o</sup>	1 053,03	779,88	0,05	99,999	72, 73
Point de congélation du cuivre	1 358,03	1 084,88	0,010	99,999	74-78
Point de congélation du palladium <sup>q</sup>	1 828,5	1 555,3	0,2	99,999	94, 95
Point de congélation du platine	2 041,9	1 768,7	0,4	99,99	100-104
Point de congélation du rhodium	2 236	1 963	5	99,99	105
Point de congélation de l'iridium	2 720	2 447	6	99,99	113
Point de fusion du molybdène	2 897	2 624	5	99,9	116-119
Point de fusion du tungstène	3 693	3 420	10	99,9	121-124



Valeurs des températures recommandées pour un choix de points de référence secondaires  
Partie B : points de deuxième choix

État d'équilibre <sup>a</sup>	$T_{68}$ (K)	$t_{68}$ (°C)	Incertitude <sup>b</sup> (K)	Pureté du corps <sup>c</sup> (% en masse ou en volume)	Références <sup>d</sup>
Point triple de l'hydrogène normal	13,958	- 259,192	0,002	99,99r	2
Point d'ébullition de l'hydrogène normal	20,397	- 252,753	0,002	99,99r	2
Point de transition $\alpha$ - $\beta$ de l'oxygène solide	23,873	- 249,277	0,005	99,999	3-6, 15
Équilibre entre les phases solide et vapeur du néon: <sup>e</sup> $\ln \frac{P}{P_0} = A + \frac{B}{T_{68}} + CT_{68} + DT_{68}^2$	de 20 à 24,562	de - 253,15 à - 248,588	0,002	99,99	7 (8)
$A = 11,038\ 09$ $B = - 266,917\ 2\ \text{K}$ $C = - 7,875\ 422 \times 10^{-2}\ \text{K}^{-1}$ $D = 1,516\ 646 \times 10^{-3}\ \text{K}^{-2}$					
Point de transition $\alpha$ - $\beta$ de l'azote solide	35,621	- 237,529	0,006	99,999	19
Point de transition $\beta$ - $\gamma$ de l'oxygène solide	43,8021	- 229,3479	0,0006	99,999	3-6, 15, 20
Équilibre entre les phases solide et vapeur de l'azote $\ln \frac{P}{P_0} = A + \frac{B}{T_{68}} + CT_{68}$	de 56 à 63,146	de - 217,15 à - 210,004	0,002	99,999	21
$A = 12,189\ 891$ $B = - 861,621\ 597\ \text{K}$ $C = - 1,006\ 552 \times 10^{-2}\ \text{K}^{-1}$					
Équilibre entre les phases solide et vapeur de l'argon $\ln \frac{P}{P_0} = A + \frac{B}{T_{68}}$	de 81 à 83,788 <sup>s</sup>	de - 192,15 à - 189,362 <sup>s</sup>	0,001	99,999	23
$A = 11,022\ 51$ $B = - 955,992\ \text{K}$					

État d'équilibre <sup>a</sup>	$T_{68}$ (K)	$t_{68}$ (°C)	Incertitude <sup>b</sup> (K)	Pureté du corps <sup>c</sup> (% en masse ou en volume)	Références <sup>d</sup>
Point triple du krypton	115,764	- 157,386	0,001	99,995	12, 26, 38
Point triple du xénon <sup>1</sup>	161,3897	- 111,7603	0,0006	99,995	26, 38-40, 143
Point de sublimation du dioxyde de carbone	194,673	- 78,477	0,003	99,99	26, 41
Point triple du dioxyde de carbone	216,580	- 56,570	0,001	99,99	15, 26, 42
Point triple du bromobenzène <sup>a</sup>	242,417	- 30,733	0,010	99,998	44
Point triple du phénoxybenzène (diphenyl éther)	300,021	26,871 <sup>v</sup>	0,002	99,9999	45, 46
Point triple du nitrile succinique	331,230	58,080	0,005	99,9995	52
Point de congélation du sodium	370,969	97,819	0,005	99,99	53
Point triple de l'acide benzoïque	395,520	122,370	0,004	99,998	54
Point de congélation de l'acide benzoïque <sup>w</sup>	395,532	122,382	0,004	99,998	54
Point d'ébullition du mercure	629,811	356,661	0,004	99,9999	63, 31
Équilibre entre les phases liquide et vapeur du mercure <sup>1</sup>					
	de	de			
	622,15	349	0,010	99,9999	63 (31)
	a	a			
	636,15	363			
Point d'ébullition du soufre	717,824	444,674	0,002	99,995	64

$$t_{68} = A + B \left( \frac{p}{p_0} - 1 \right) + C \left( \frac{p}{p_0} - 1 \right)^2 + D \left( \frac{p}{p_0} - 1 \right)^3$$

- A = 356,657 °C
- B = 55,552 °C
- C = - 23,03 °C
- D = 14,0 °C

État d'équilibre <sup>a</sup>	$T_{68}$ (K)	$t_{68}$ (°C)	Incertitude <sup>b</sup> (K)	Pureté du corps <sup>c</sup> (% en masse ou en volume)	Références <sup>d</sup>
Équilibre entre les phases liquide et vapeur du soufre					
	de 708,15 à 726,15	de 435 à 453	0,005	99,99	65
$t_{68} = A + B \left( \frac{p}{p_0} - 1 \right) + C \left( \frac{p}{p_0} - 1 \right)^2 + D \left( \frac{p}{p_0} - 1 \right)^3$					
$A = 444,674 \text{ } ^\circ\text{C}$					
$B = 69,010 \text{ } ^\circ\text{C}$					
$C = -27,48 \text{ } ^\circ\text{C}$					
$D = 19,14 \text{ } ^\circ\text{C}$					
Point de fusion de l'alliage eutectique cuivre 66,9 % aluminium (Al-CuAl <sub>2</sub> )					
	821,406	548,256	0,010	99,999 9	66
Température de luminance <sup>x</sup> (0,653 μm) à la fusion du fer					
	1 670	1 397	6	99,95	79
Température de luminance <sup>x</sup> (0,653 μm) à la fusion du palladium <sup>y</sup>					
	1 688	1 415	5	99,99	80
Température de luminance <sup>x</sup> (0,997 μm) à la fusion du titane					
	1 711	1 438	6	99,9	81
Point de congélation du nickel <sup>z</sup>					
	1 728	1 455	3	99,9	82, 83, 84
Point de congélation du cobalt <sup>z</sup>					
	1 768	1 495	3	99,9	82
Température de luminance <sup>x</sup> (0,653 μm) à la fusion du titane					
	1 800	1 527	3	99,9	81, 85, 86
Point de congélation du fer					
	1 811	1 538	3	99,99	87 (88-92)
Température de luminance <sup>x</sup> (0,993 μm) à la fusion du vanadium					
	1 875	1 602	7	99,9	96
Température de luminance <sup>x</sup> (0,650 μm) à la fusion du zirconium					
	1 940	1 667	8	99,98	99
Point de fusion du titane					
	1 943	1 670	3	99,9	85, 86

État d'équilibre <sup>a</sup>	$T_{68}$ (K)	$t_{68}$ (°C)	Incertitude <sup>b</sup> (K)	Pureté du corps <sup>c</sup> (% en masse ou en volume)	Références <sup>d</sup>
Température de luminance <sup>x</sup> (0,653 $\mu\text{m}$ ) à la fusion du vanadium <sup>aa</sup>	1 990	1 717	5	99,9	96, 97 (98)
Point de fusion du zirconium	2 128	1 855	8	99,98	99
Température de luminance <sup>x</sup> (0,65 $\mu\text{m}$ ) à la fusion du ruthénium	2 294	2 021	8	99,98	98
Point de fusion de l'alumine (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	2 327 <sup>bb</sup>	2 054 <sup>bb</sup>	6	99,9	106
Température de luminance <sup>x</sup> (0,995 $\mu\text{m}$ ) à la fusion du molybdène	2 331	2 058	8	99,95	107
Température de luminance <sup>x</sup> (0,650 $\mu\text{m}$ ) à la fusion du niobium <sup>aa</sup>	2 429	2 156	5	99,9	98, 108, 109
Température de luminance <sup>x</sup> (0,653 $\mu\text{m}$ ) à la fusion du molybdène <sup>aa</sup>	2 529	2 256	6	99,95	98, 107
Point de fusion du ruthénium	2 607	2 334	10	99,98	110
Température de luminance <sup>x</sup> (0,995 $\mu\text{m}$ ) à la fusion du tantale	2 620	2 347	8	99,99	111
Point de fusion de l'oxyde d'yttrium (Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	2 712	2 439	12	99,999	112
Point de fusion du niobium	2 746	2 473	7	99,9	114, 115
Température de luminance <sup>x</sup> (0,653 $\mu\text{m}$ ) à la fusion du tantale	2 846	2 573	8	99,99	111
Température de luminance <sup>x</sup> (0,653 $\mu\text{m}$ ) à la fusion du tungstène	3 208	2 935	10	99,95	120

Valeurs des températures recommandées pour un choix de points de référence secondaires  
Partie C : Points possibles méritant une étude complémentaire<sup>c</sup>

État d'équilibre	Température approchée		Références
	$T_{68}$ (K)	$t_{68}$ (°C)	
Point triple du deutérium en équilibre	18,68	— 254,47	125 (135), 126, 127
Point triple du propane	85,52	— 187,63	128
Point triple de l'éthane	90,35	— 182,80	129, 130
Point d'ébullition du méthane	111,66	— 161,49	27, 34
Point d'ébullition du krypton	119,80	— 153,35	27
Point d'ébullition du xénon	165,05	— 108,10	27, 40
Équilibre entre les phases liquide et vapeur du xénon	161 à 165	— 112 à — 108	40
Équilibre entre les phases solide et vapeur du dioxyde de carbone	170 à 195	— 103 à — 78	41, 131
Diverses transitions solide-solide			
Point triple du rubidium	312,42	39,27	132
Points triples et de congélation de diverses substances organiques, principalement dans le domaine 100 K-200 °C ; exemples types récemment étudiés :			133
Point triple du 1,3-dioxolan-2-one (C <sub>3</sub> H <sub>4</sub> O <sub>3</sub> )	309,47	36,32	46
Point triple du n-icosane (C <sub>20</sub> H <sub>42</sub> )	309,64	36,49	46

- a. Dans ce tableau les états d'équilibre sont considérés à une pression  $p_0 = 101\,325\text{ Pa}$ , sauf pour les points triples, les températures de luminance et les cas précis pour lesquels un domaine de pression est attribué de façon explicite.
- b. Les incertitudes mentionnées sont (lorsque cela est possible) égales au double de l'erreur quadratique des valeurs « pondérées ». Elles correspondent en gros à un niveau de confiance de 95 %. Les incertitudes expérimentales individuelles sont les meilleures estimations fondées sur les indications données dans les références et sur l'accord entre les résultats d'expériences comparables. Pour quelques-uns des points au-dessous de 273 K qui sont relativement éloignés d'un point fixe de définition, la contribution la plus forte à l'incertitude est la non-unicité de l'EIPT-68.
- c. La pureté minimale du corps pour lequel sont données les valeurs de température et d'incertitude est exprimée en pourcentage, à 0 °C et sous une atmosphère normale : en volume lorsque le corps est liquide ou gazeux, en masse lorsque le corps est solide (il y a quelques exceptions : par exemple, le mercure).
- d. On n'a retenu que les références bibliographiques qui ont contribué directement au choix de la valeur de la température. Les autres déterminations (généralement, soit moins exactes avec trop peu de renseignements pour être utiles, soit exprimées dans une échelle de température pour laquelle la relation à l'EIPT-68 n'est pas suffisamment bien établie) sont mentionnées dans la référence 1 ou dans les précédents rapports du GT2.
- e. Le terme  $\sum_{i=0}^5 b_i T_{68}^i$  dans l'équation ajoutée à la valeur de  $p$  une pression pouvant atteindre l'équivalent de 1 mK.
- f. Si l'azote est une impureté dans le néon,  $100 \times 10^{-6}$  d'azote abaisseront le point triple d'environ 1,5 mK.
- g. Ces valeurs sont valables pour le néon de composition isotopique voisine de celle qui est spécifiée dans la Section III.6 de l'EIPT-68, (édition amendée de 1975). Les températures du point triple et les équations de pression de vapeur pour  $^{20}\text{Ne}$  et  $^{22}\text{Ne}$  sont données par Furukawa (10).
- h. Les références entre parenthèses donnent des indications supplémentaires, mais paraissent se rapporter à la même expérimentation que celle décrite dans les références qui ne sont pas entre parenthèses.
- i. Il n'existe pas de moyen commode d'obtenir une « valeur moyenne » pour les équations de pression de vapeur à partir de différentes références. Nous avons préféré retenir, pour chaque corps, une équation donnée dans une référence particulière. Dans tous les cas, les différences entre cette équation et les équations équivalentes des références entre parenthèses restent à l'intérieur des limites de l'incertitude indiquée.
- j. Le point triple de l'argon est un point fixe de définition de l'EIPT-68 (édition amendée de 1975) de concert avec le point de l'oxygène. Sa valeur, ici recommandée, diffère de 0,4 mK de celle indiquée dans l'EIPT-68 (édition amendée de 1975). Il y aura par conséquent des différences systématiques (au voisinage de cette température) entre les réalisations de l'EIPT-68 fondées sur le point triple de l'argon et celles fondées sur le point de rosée de l'oxygène (voir, par exemple, ce qui est indiqué pour le point triple du méthane).
- k. La température mentionnée dans la référence 134 a été abaissée de 0,3 mK pour la rapporter, non plus au point triple de l'argon, mais au point de rosée de l'oxygène.
- l. Au-dessous de 65 K, la pression de vapeur de l'oxygène est si basse qu'elle ne peut guère servir comme référence secondaire en thermométrie de précision.
- m. Voir Tableau 5 de l'EIPT-68 (édition amendée de 1975) pour l'effet de la pression sur ces points de congélation.
- n. Le point de glace est une approximation de la température inférieure de 10 mK à celle du point triple de l'eau.
- o. La température indiquée est la valeur obtenue par extrapolation des équations de définition de l'EIPT-68 pour le thermomètre à résistance de platine.

- p. La valeur indiquée pour cette température est celle qui a été mesurée avec un thermocouple platine 10 % rhodium/platine selon la définition de l'EIPT-68.
- q. Point de congélation en l'absence d'oxygène.
- r. On doit être prudent si le néon est une impureté importante (ce qui n'est pas le cas normalement) :  $100 \times 10^{-6}$  de néon abaisseront le point triple d'environ 0,2 mK.
- s. Cette équation n'est pas valable dans le domaine de fusion de l'argon [23] ; par conséquent, la température maximale d'application est (arbitrairement) située à 10 mK au-dessous du point triple.
- t. Ce point se situe approximativement à mi-chemin entre deux points fixes de définition de l'EIPT-68 ; il pourrait donc être utile pour réduire la non-unicité dans une nouvelle échelle. Pour le moment, il figure dans la catégorie B ; sa reproductibilité n'est pas suffisamment bonne pour qu'il figure dans la catégorie A. Des effets isotopiques en sont peut-être la cause. De nouvelles études de ce point sont très souhaitables.
- u. La valeur publiée [44] a été convertie dans l'EIPT-68 et abaissée de 2 mK pour obtenir la température correspondant à  $F^{-1} = 1$ .
- v. La température indiquée est estimée égale à celle du point triple du corps idéalement pur. Dans la pratique, il est difficile d'atteindre une pureté supérieure à 99,999 %, pour laquelle la température du point triple est  $26,868 \pm 0,002$  °C.
- w. La valeur indiquée pour le point de congélation est celle sous une atmosphère d'air sec. On obtient des valeurs différentes sous une atmosphère d'azote ou d'oxygène [54].
- x. Les valeurs de température de luminance sont données pour les longueurs d'onde particulières indiquées. Elles sont déterminées avec des échantillons dans le vide ou dans un environnement de gaz inerte à la pression atmosphérique. Les corrections de pression sont négligeables, si on les compare aux incertitudes des mesures.
- y. Température mesurée avec l'échantillon placé dans une atmosphère d'argon pur.
- z. Température mesurée avec l'échantillon dans le vide [83] ou dans de l'hélium purifié [82].
- aa. Températures mesurées ramenées à une longueur d'onde commune avant d'en faire la moyenne.
- bb. Point de fusion dans le vide.
- cc. Les points de référence mentionnés dans cette partie sont proposés seulement à titre d'exemples. Cela ne veut pas dire que ce soient les seuls points de ce genre ni que les références qui les accompagnent soient les seules existantes.
- dd. Les températures mesurées correspondent à des échantillons d'une pureté allant de 0,999 995 à 0,999 999 9 ; elles ont été ramenées à 0,999 999 9.
- ee. L'exactitude intrinsèque de plusieurs points triples (et probablement aussi d'autres points) est meilleure que celle indiquée. L'une des principales composantes des incertitudes données dans le tableau est la non-unicité de l'EIPT-68 (voir aussi la note b). Dans une récente comparaison internationale de cellules à point triple (aux basses températures) où il était possible de s'affranchir de la non-unicité, on a trouvé que, pour chacun des points triples du néon, de l'azote et de l'argon, les réalisations des divers laboratoires étaient en accord à  $\pm 0,15$  mK près. Un rapport complet de cette comparaison sera publié dans *Metrologia* \* ; l'ensemble des résultats est contenu dans le rapport final \*\*.

\* *Metrologia*, **20**, 1984, pp. 127-144.

\*\* PAVESE F., International intercomparison of fixed points by means of sealed cells (13.81 K to 90.686 K), *BIPM Monographic* **84/4**.

### Bibliographie

(Les divers volumes de «Temperature, Its Measurement and Control in Science and Industry» sont simplement indiqués : TMCSI, 1, etc.)

1. CROVINI, L., BEDFORD, R.E. et MOSER, A. Extended List of Secondary Reference Points. *Metrologia*, **13**, 1977, pp. 197-206.
2. ANCSIN, J. Thermometric Fixed Points of Hydrogen. *Metrologia*, **13**, 1977, pp. 79-86.
3. ANCSIN, J. Crystalline Transformations of Oxygen. *In*: Temperature Measurement 1975, London, Institute of Physics, Conference Series N° 26, 1975, pp. 57-64.
4. KEMP, W. R. G. et PICKUP, C. P. The Transition Temperatures of Solid Oxygen. TMCSI, **4**, 1972, pp. 217-223.
5. ORLOVA, M. P. Temperatures of Phase Transitions in Solid Oxygen. TMCSI, **3**, Part 1, 1962, pp. 179-183.
6. MUIJLWIJK, R., DURIEUX, M. et VAN DIJK, H. The Temperatures at the Transition Points in Solid Oxygen. *Physica*, **43**, 1969, pp. 475-480 [voir aussi MUIJLWIJK, R. Vapour Pressures of Oxygen and Platinum Thermometry below 100 K. Ph.D. Thesis, Leiden, 1968].
7. ANCSIN, J. Vapour Pressures and Triple Point of Neon and the Influence of Impurities on These Properties. *Metrologia*, **14**, 1978, pp. 1-7.
8. TIGGELMAN, J. L. Low Temperature Platinum Thermometry and Vapour Pressures of Neon and Oxygen. Ph.D. Thesis, Leiden, 1973.
9. KEMP, R. C. et KEMP, W. R. G. The Triple Point of  $^{20}\text{Ne}$ . *Metrologia*, **17**, 1981, pp. 67-68.
10. FURUKAWA, G. T. Vapor Pressures of Natural Neon and of the Isotopes  $^{20}\text{Ne}$  and  $^{22}\text{Ne}$  from the Triple Point to the Normal Boiling Point. *Metrologia*, **8**, 1972, pp. 11-27.
11. FURUKAWA, G. T., SABA, W. G., SWEGER, D. M. et PLUMB, H. H. Normal Boiling Point and Triple Point Temperature of Neon. *Metrologia*, **6**, 1970, pp. 35-37.
12. KEMP, R. C. et KEMP, W. R. G. The Triple Points of Krypton, Argon, Nitrogen and Neon. *Metrologia*, **14**, 1978, pp. 83-88.
13. COMPTON, J. P. The Realisation of the Normal Boiling Point of Neon. II. Vapour Pressure Measurements. *Metrologia*, **6**, 1970, pp. 103-109.
14. KHNYKOV, V. M., RABUKH, L. I., BELYANSKY, L. B., PANKIV, T. S., ORLOVA, M. P. et ASTROV, D. N. Realization of the IPTS in the 18.7 to 273 K Range using the Triple Point Temperatures (Document CCT/76-39, présenté à la 11<sup>e</sup> session du Comité Consultatif de Thermométrie en 1976, non publié).
15. PAVESE, F. et FERRI, D. Ten Years of Research on Sealed Cells for Phase Transition Studies of Gases at IMGC. TMCSI, **5**, 1982, pp. 217-227.
16. WARD, S. D. Realizations of the Triple Points of Argon and Neon at NPL. *BIPM Com. Cons. Thermométrie*, **13**, 1980, Document CCT/80-51.
17. SEIFERT, P. Tripelpunkte von Gasen als Fixpunkte im Tieftemperaturbereich. *Metrologische Abhandlungen*, **3**, 1983, pp. 133-146 [voir aussi SEIFERT, P. Sealed Triple Point Cells for Low Temperature Thermometer Calibration. Document CCT/82-6 présenté à la 14<sup>e</sup> session du Comité Consultatif de thermométrie en 1982, non publié].



18. GRILLY, E. R. The Vapour Pressure of Solid and Liquid Neon. *Cryogenics*, **2**, 1962, pp. 226-229.
19. KEMP, R. C. et KEMP, W. R. G. The  $\alpha$ - $\beta$  Transition in Nitrogen. *Metrologia*, **15**, 1979, pp. 87-88.
20. COWAN, J. A., KEMP, R. C. et KEMP, W. R. G. An Investigation of the  $\beta$ - $\gamma$  Transition in Oxygen. *Metrologia*, **12**, 1976, pp. 87-91.
21. ANCSIN, J. Some Thermodynamic Properties of Pure and Impure Nitrogen. *Can. J. Phys.*, **52**, 1974, pp. 1521-1531.
22. TIGGELMAN, J. L. et DURIEUX, M. Vapour Pressures of Liquid Oxygen and Nitrogen. TMCSI, **4**, 1972, pp. 149-157 [voir aussi MOUSSA, M. R. M. On Thermometry between 63 and 273.15 K. Ph. D. Thesis, Leiden, 1966].
23. ANCSIN, J. Studies of Phase Changes in Argon. *Metrologia*, **9**, 1973, pp. 147-154.
24. FURUKAWA, G. T., BIGGE, W. R. et RIDDLE, J. L. Triple point of Argon. TMCSI, **4**, 1972, pp. 231-243.
25. FURUKAWA, G. T. Reproducibility of the Triple Point of Argon in Sealed Transportable Cells. TMCSI, **5**, 1982, pp. 239-248.
26. LOVEJOY, D. R. Some Boiling and Triple Points Below 0 °C. *Nature*, **197**, 1963, pp. 353-354.
27. KEMP, R. C., KEMP, W. R. G. et COWAN, J. A. The Boiling Points and Triple Points of Oxygen and Argon. *Metrologia*, **12**, 1976, pp. 93-100.
28. KHNYKOV, V. M., ORLOVA, M. P., BELYANSKY, L. B. et RABUKH, L. N. The Argon Triple Point : a New Reference Point for the Temperature Scale. *Zhurnal Fizicheskoi Khimii*, **52**, 1978, pp. 1483-1484 [voir aussi *Russian Journal of Physical Chemistry*, **52**, 1978, pp. 849-850].
29. BLANKE, W. The Temperatures of the Triple Points of Methane and Argon on the IPTS-68 (Document CCT/84-7, présenté à la 15<sup>e</sup> session du Comité Consultatif de Thermométrie en 1984, non publié).
30. PAVESE, F. The Triple Point of Argon and Oxygen. *Metrologia*, **14**, 1978, pp. 93-103.
31. AMBROSE, D. et SPRAKE, C. H. S. The Vapour Pressure of Mercury. *J. Chem. Thermodynamics*, **4**, 1972, pp. 603-620.
32. FURUKAWA, G. T., RIDDLE, J. L., BIGGE, W. R. et PFEIFFER, E. R. Application of Some Metal SRM's as Thermometric Fixed Points. *NBS Special Publication* **260-77**, 1982.
33. ANCSIN, J. Vapor Pressure Scale of Oxygen. *Can. J. Phys.*, **52**, 1974, pp. 2305-2312.
34. PAVESE, F., CAGNA, G. et FERRI, D. The Triple Point of Pure Methane. Proceedings of the Sixth International Cryogenic Engineering Conference, London, 1976, pp. 281-285.
35. PAVESE, F. On the IPTS-68 Temperature Value of the Triple Point of Methane. *Metrologia*, **15**, 1979, pp. 47-49.
36. BONHOURE, J. et PELLO, R. Temperature of the Triple Point of Methane. *Metrologia*, **14**, 1978, pp. 175-177.
37. BONHOURE, J. et PELLO, R. Points Triples de l'Argon et du Méthane : Utilisation de Cellules Scellées. *Metrologia*, **16**, 1980, pp. 95-99.
38. INABA, A. et MITSUI, K. Réalisation des points triples du krypton et du xénon au moyen de cellules scellées. *BIPM Com. Cons. Thermométrie*, **12**, 1978, pp. T111-T113.
39. KEMP, R. C., KEMP, W. R. G. et SMART, P. W. The Triple Point of Natural Xenon. TMCSI, **5**, 1982, pp. 229-230.

40. ANCSIN, J. Note Concerning the Suitability of Xenon as Temperature Fixed Point. *Metrologia*, **14**, 1978, pp. 45-46.
41. BARBER, C. R. The Sublimation Temperature of Carbon Dioxide. *Brit. J. Appl. Phys.*, **17**, 1966, pp. 391-397.
42. AMBROSE, D. The Triple Point of Carbon Dioxide as a Thermometric Fixed Point. *Brit. J. Appl. Phys.*, **8**, 1957, pp. 32-34.
43. FURUKAWA, G. T. et BIGGE, W. R. Le point triple du mercure comme étalon thermométrique. *BIPM Com. Cons. Thermométrie*, **11**, 1976, pp. T138-T144.
44. MASI, J. F. et SCOTT, R. B. Some Thermodynamic Properties of Bromobenzene from 0 to 1 500 K. *J. Res. Natl. Bur. Stand. (U.S.)*, **79A**, 1975, pp. 619-628.
45. COX, J. D. et VAUGHAN, M. F. The Triple Point of Phenoxybenzene. *Metrologia*, **16**, 1980, pp. 105-109.
46. COX, J. D. et VAUGHAN, M. F. Temperature fixed points: Evaluation of four types of triple-point cell. *TMCSI*, **5**, 1982, pp. 267-280.
47. MANGUM, B. W. et THORNTON, D. D. Determination of the Triple-Point Temperature of Gallium. *Metrologia*, **15**, 1979, pp. 201-215.
48. THORNTON, D. D. The Gallium Melting-Point Standard: A Determination of the Liquid-Solid Equilibrium Temperature of Pure Gallium on the International Practical Temperature Scale of 1968. *Clinical Chemistry*, **23**, 1977, pp. 719-724.
49. CHATTLE, M. V., RUSBY, R. L., BONNIER, G., MOSER, A., RENAOT, E., MARCARINO, P., BONGIOVANNI, G. et FRASSINETI, G. An intercomparison of gallium fixed point cells. *TMCSI*, **5**, 1982, pp. 311-316.
50. BOROVICKA, M. et DEMIAN, J. Realization of the Triple Point and Melting Point of Gallium (Document CCT/82-24, présenté à la 14<sup>e</sup> session du Comité Consultatif de Thermométrie en 1982, non publié).
51. MANGUM, B. W. Triple point of gallium as a temperature fixed point. *TMCSI*, **5**, 1982, pp. 299-309.
52. GLICKSMAN, M. E. et VOORKEES, P. W. The triple-point equilibria of succinonitrile: Its assessment as a temperature standard. *TMCSI*, **5**, 1982, pp. 321-326.
53. BUTKIEWICZ, J. et GIZMAJER, W. Étude sur le point thermométrique du sodium (Document CCT/80-1, présenté à la 13<sup>e</sup> session du Comité Consultatif de Thermométrie en 1980, non publié).
54. SCHWAB, F. W. et WICKERS, E. Freezing Temperature of Benzoic Acid as a Fixed Point in Thermometry. *J. Res. Natl. Bur. Stand. (U.S.)*, **34**, 1945, pp. 333-372.
55. McLAREN, E. H. The Freezing Points of High-Purity Metals as Precision Temperature Standards. IV. Indium: Thermal Analyses on Three Grades of Cadmium. *Can. J. Phys.*, **36**, 1958, pp. 1131-1147.
56. SAWADA, S. Realization of the triple point of indium in a sealed glass cell. *TMCSI*, **5**, 1982, pp. 343-346.
57. McLAREN, E. H. et MURDOCK, E. G. The Freezing Points of High-Purity Metals as Precision Temperature Standards. VII. Thermal Analyses on Seven Samples of Bismuth with Purities Greater than 99.999 + %. *Can. J. Phys.*, **41**, 1963, pp. 95-112.
58. McLAREN, E. H. Intercomparison of 11 Resistance Thermometers at the Ice, Steam, Iron, Cadmium, and Zinc Points. *Can. J. Phys.*, **37**, 1959, pp. 422-432.

59. McLAREN, E. H. et MURDOCK, E. G. The Freezing Points of High-Purity Metals as Precision Temperature Standards. VIIIb. Sb : Liquidus Points and Alloy Melting Ranges of Seven Samples of High-purity Antimony ; temperature-scale realization and reliability in the range 0-631 °C. *Can. J. Phys.*, **46**, 1968, pp. 401-444.
60. McALLAN, J. V. et CONNOLLY, J. J. The use of the cadmium point to check calibrations on the IPTS. TMCSI, **5**, 1982, pp. 351-353.
61. FURUKAWA, G. T. et PFEIFFER, E. R. Investigation of the freezing temperature of cadmium. TMCSI, **5**, 1982, pp. 355-360.
62. McLAREN, E. H. et MURDOCK, E. G. The Freezing Points of High-Purity Metals as Precision Temperature Standards. VI. Thermal Analyses on Five Samples of Lead with Purities Greater than 99.999 + %. *Can. J. Phys.*, **38**, 1960, pp. 577-587.
63. BEATTIE, J. A., BLAISDELL, B. E. et KAMINSKY, J. An Experimental Study of the Absolute Temperature Scale. IV. The Reproducibility of the Mercury Boiling Point. The Effect of Pressure on the Mercury Boiling Point. *Proc. Amer. Acad. Arts Sci.*, **71**, 1937, pp. 375-385.
64. BERRY, R. J. The Reproducibility of the Sulphur Point. *Can. J. Phys.*, **38**, 1960, pp. 1027-1047.
65. BEATTLE, J. A., BENEDICT, M. et BLAISDELL, B. E. An Experimental Study of the Absolute Temperature Scale. II. The Reproducibility of the Sulphur Point. The Effect of Pressure on the Sulphur Point. *Proc. Amer. Acad. Arts Sci.*, **71**, 1937, pp. 327-360.
66. McALLAN, J. V. Metal Binary Eutectics as Fixed Temperature Points. TMCSI, **4**, 1972, pp. 265-274.
67. BONGIOVANNI, G., CROVINI, L. et MARCARINO, P. Comparaison de thermomètres à résistance de platine au point de congélation de l'antimoine. *BIPM Com. Cons. Thermométrie*, **9**, 1971, pp. T66-T74.
68. McALLAN, J. V. et AMMAR, M. M. Comparison of the Freezing Points of Aluminium and Antimony. TMCSI, **4**, 1972, pp. 275-285.
69. FURUKAWA, G. T., BIGGE, W. R., RIDDLE, J. L. et REILLY, M. L. The freezing point of aluminium as a temperature standard. *In* : Temperature Measurement 1975, London, Institute of Physics, Conference Series N° 26, 1975, pp. 389-397.
70. CROVINI, L. et MARCARINO, P. Point de fusion de l'eutectique cuivre-argent. *BIPM Com. Cons. Thermométrie*, **10**, 1974, pp. T79-T82.
71. BEDFORD, R. E. et MA, C. K. Measurement of the melting temperature of the copper 71.9 % silver eutectic alloy with a monochromatic optical pyrometer. TMCSI, **5**, 1982, pp. 361-369.
72. MARCARINO, P. et CROVINI, L. Characteristics of platinum resistance thermometers up to the silver freezing point. *In* : Temperature Measurement 1975, London, Institute of Physics, Conference Series N° 26, 1975, pp. 107-116.
73. McALLAN, J. V. Reference temperatures near 800 °C. TMCSI, **5**, 1982, pp. 371-376.
74. RIGHINI, F., ROSSO, A. et RUFFINO, G. New determination of the freezing point of copper. *High Temp. — High Press.*, **4**, 1972, pp. 471-475.
75. RICOLFI, T. et LANZA, F. The Silver and Copper Freezing Points as Accurate Reference Standards for Radiation Pyrometry. *High Temp. — High Press.*, **9**, 1977, pp. 483-487.

76. COATES, P. B. et ANDREWS, J. W. A precise determination of the freezing point of copper. *J. Phys. F.*, **8**, 1978, pp. 277-285.
77. OHTSUKA, M. et BEDFORD, R. E. Measurement of the thermodynamic temperature interval between the freezing points of silver and copper. *TMCSI*, **5**, 1982, pp. 175-181.
78. JONES, T. P. et TAPPING, J. A photoelectric pyrometer temperature scale below 1064.43 °C and its use to measure the silver point. *TMCSI*, **5**, 1982, pp. 169-174.
79. CEZAIIRLIYAN, A. et McCLURE, J. L. Radiance Temperature (at 653 nm) of Iron at Its Melting Point. *J. Res. Natl. Bur. Stand. (U.S.)*, **79A**, 1975, pp. 541-544.
80. MILLER, A. P. et CEZAIIRLIYAN, A. Radiance Temperature (at 653 nm) of Palladium at its Melting Point. *High Temperature Science*, **11**, 1979, pp. 41-47.
81. RIGHINI, F., ROSSO, A., COSLOVI, L., CEZAIIRLIYAN, A. et McCLURE, J. L. Radiance Temperature of Titanium at its Melting Point. In: Proc. of Seventh Symposium on Thermophysical Properties (A. Cezairliyan, Ed., Am. Soc. Mech. Engrs., New York), 1977, pp. 312-318.
82. VANDUSEN, M. S. et DAHL, A. I. Freezing Points of Cobalt and Nickel. *J. Res. Natl. Bur. Stand. (U.S.)*, **39**, 1947, pp. 291-295.
83. WENSEL, H. T. et ROESER, W. F. Freezing Point of Nickel as a Fixed Point on the International Temperature Scale. *J. Res. Natl. Bur. Stand. (U.S.)*, **5**, 1930, pp. 1309-1318.
84. RATANAPUECH, P. et BAUTISTA, R. G. Normal Spectral Emissivities of Liquid Iron, Liquid Nickel, and Liquid Iron-Nickel Alloys. *High Temp. Science.*, **14**, 1981, pp. 269-283.
85. CEZAIIRLIYAN, A. et MILLER, A. P. Melting Point, Normal Spectral Emittance (at the Melting Point), and Electrical Resistivity (above 1900 K) of Titanium by a Pulse Heating Method. *J. Res. Natl. Bur. Stand. (U.S.)*, **82**, 1977, pp. 119-122.
86. BEREZIN, B. Y., KATS, S. A., KENISARIN, M. M. et CHEKHOVSKOI, V. Y. Heat and Melting Temperature of Titanium. *Teplofizika Vysokikh Temperatur*, **12**, 1974, pp. 524-529 [voir aussi *High Temperature*, **12**, 1974, pp. 450-455].
87. ROESER, W. F. et WENSEL, H. T. Freezing Temperatures of High-Purity Iron and of Some Steels. *J. Res. Natl. Bur. Stand. (U.S.)*, **26**, 1941, pp. 273-287.
88. SCHOFIELD, T. H. et BACON, A. E. The Melting Point of Titanium. *J. Inst. Metals*, **82**, 1953-54, pp. 167-169.
89. BRISTOW, C. A. The Constitutional Diagram of the Alloys of Iron and Nickel. Part 1. — The Delta Region. *Iron and Steel Institute Special Report*, **24**, 1939, pp. 1-8.
90. ADCOCK, F. An Investigation of the Iron-Carbon Constitutional Diagram. Part I. — Preliminary Survey of the  $\delta$  Region. *J. Iron and Steel Institute*, **135**, 1937, pp. 281-292.
91. ORIANI, R. A. et JONES, T. S. An Apparatus for the Determination of the Solidus Temperatures of High-Melting Alloys. *Rev. Sci. Instr.*, **25**, 1954, pp. 248-250.
92. CEZAIIRLIYAN, A. et McCLURE, J. L. Thermophysical Measurements on Iron Above 1500 K Using a Transient (Subsecond) Technique. *J. Res. Natl. Bur. Stand. (U.S.)*, **78A**, 1974, pp. 1-4 [voir les remarques sur la pureté

- des échantillons in SWARTZENDRUBER, L. J. The Fe (Iron) System. *Bulletin of Alloy Phase Diagrams*, **3**, 1982, pp. 161-165.]
93. TIGGELMAN, J. L., VAN RIJN, C. et DURIEUX, M. Vapour Pressures of Liquid and Solid Neon between 19 K and 30 K. *TMCSI*, **4**, 1972, pp. 137-147.
  94. JONES, T. P. et HALL, K. G. The Melting Point of Palladium and Its Dependence on Oxygen. *Metrologia*, **15**, 1979, pp. 161-163.
  95. COATES, P. B., CHANDLER, T. R. D. et ANDREWS, J. W. A New Determination of the Freezing Point of Palladium. *High Temp. — High Press.*, **15**, 1983, pp. 573-582.
  96. CEZAIIRLIYAN, A., MÜLLER, A. P., RIGHINI, F. et ROSSO, A. Radiance Temperature of Vanadium at its Melting Point. *High Temperature Science*, **11**, 1979, pp. 223-232.
  97. BEREZIN, B. Y., CHEKHOVSKOI, V. Y. et SHEINDLIN, A. E. Heat of Fusion of Vanadium. *Doklady Akademii Nauk SSSR*, **201**, 1971, pp. 583-585 [voir aussi *Soviet Physics — Doklady*, **16**, 1972, pp. 1007-1009].
  98. BEREZIN, B. Y., KATS, S. A. et CHEKHOVSKOI, V. Y. Spectral Emissivities of Molten Refractory Metals. *Teplofizika Vysokikh Temperatur*, **14**, 1976, pp. 497-502 [voir aussi *High Temperature*, **14**, 1976, pp. 448-452].
  99. CEZAIIRLIYAN, A. et RIGHINI, F. Measurement of Melting Point, Radiance Temperature (at Melting Point), and Electrical Resistivity (above 2,100 K) of Zirconium by a Pulse Heating Method. *Revue Int. Hautes Temp. et Réfract.*, **12**, 1975, pp. 201-207.
  100. QUINN, T. J. et CHANDLER, T. R. D. The Freezing Point of Platinum Determined by the NPL Photoelectric Pyrometer. *TMCSI*, **4**, 1972, pp. 295-309.
  101. QUINN, T. J. Corrections in Optical Pyrometry for the Refractive Index of Air. *Metrologia*, **10**, 1974, p. 115.
  102. JONES, T. P. et TAPPING, J. The Freezing Point of Platinum. *Metrologia*, **12**, 1976, pp. 19-26.
  103. KUNZ, H. et LOHRENGEL, J. Nouvelle détermination du point de congélation du platine. *BIPM Com. Cons. Thermométrie*, **11**, 1976, pp. T197-199 [voir aussi *Jahresbericht der PTB*, 1975, p. 64 et p. 190].
  104. LANZA, F. et RICOLFI, T. The IMGC determination of the freezing point of platinum. *High Temp. — High Press.*, **8**, 1976, pp. 217-224.
  105. ROESER, W. F. et WENSEL, H. T. Freezing Point of Rhodium. *J. Res. Natl. Bur. Stand. (U.S.)*, **12**, 1934, pp. 519-526.
  106. HLAVAC, J. IUPAC Report : Melting Temperatures of Refractory Oxides : Part 1. *Pure and Applied Chemistry*, **54**, 1982, pp. 682-688 [voir aussi SCHNEIDER, S. J. : IUPAC Report PAC 21/1-N., London, Butterworth 1970, d'après SCHNEIDER, S. J. and McDANIEL, C. L. Effect of Environment upon the Melting Point of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. *J. Res. Natl. Bur. Stand. (U.S.)*, **71A**, 1967, pp. 317-333].
  107. CEZAIIRLIYAN, A., COSLOVI, L., RIGHINI, F. et ROSSO, A. Radiance temperature of molybdenum at its melting point. Temperature Measurement 1975, London, Institute of Physics Conference Series N° 26, 1975, pp. 287-296.
  108. CEZAIIRLIYAN, A. Radiance Temperature of Niobium at its Melting Point. *J. Res. Natl. Bur. Stand. (U.S.)*, **77A**, 1973, pp. 333-339.
  109. RIGHINI, F. et ROSSO, A. Ten years of high speed pyrometry at IMGC. *TMCSI*, **5**, 1982, pp. 433-438.
  110. KENISARIN, M. M., BEREZIN, B. Y., GORINA, N. B., KATS, S. A., POLYAKOVA,

- V. P., SAVITTSKII, E. M. et CHEKHOVSKOI, V. Y. The Melting Point of Ruthenium. *Teplofizika Vysokikh Temperatur*, **12**, 1974, pp. 1309-1310 [voir aussi *High Temperature*, **12**, 1974, pp. 1159-1160].
111. CEZAIIRLIYAN, A., McCLURE, J. L., COSLOVI, L., RIGHINI, F. et ROSSO, A. Radiance temperature of tantalum at its melting point. *High Temp.* — *High Press.*, **8**, 1976, pp. 103-111.
112. FOEX, M. Recherche sur le point de fusion de l'oxyde d'yttrium. *High Temp.* — *High Press.*, **9**, 1977, pp. 269-282.
113. HENNING, F. et WENSEL, H. T. The Freezing Point of Iridium. *J. Res. Natl. Bur. Stand. (U.S.)*, **10**, 1933, pp. 809-821.
114. CEZAIIRLIYAN, A. Measurement of melting point, normal spectral emittance (at melting point), and electrical resistivity (above 2 650 K) of niobium by a pulse heating method. *High Temp.* — *High Press.*, **4**, 1972, pp. 453-458.
115. BEREZIN, B. Y., KENIZARIN, M. M. et CHEKHOVSKOI, V. Y. Melting Point of Niobium. *Teplofizika Vysokikh Temperatur*, **10**, 1972, pp. 1214-1217 [voir aussi *High Temperature*, **10**, 1972, pp. 1092-1094].
116. CEZAIIRLIYAN, A., MORSE, M. S. et BECKETT, C. W. Measurement of Melting Point and Electrical Resistivity (above 2 840 K) of Molybdenum by a Pulse Heating Method. *Rev. Int. Hautes Temp. et Réfract.*, **7**, 1970, pp. 382-388.
117. LATA, R. E. et FRYXELL, R. E. Determination of Solidus-Liquidus Temperatures in the  $UO_{2+x}$  system ( $-0.50 < x < 0.20$ ). *J. Nuclear Mat.*, **35**, 1970, pp. 195-210.
118. KENISARIN, M. M., BEREZIN, B. Y. et CHEKHOVSKOI, V. Y. The Melting Point of Molybdenum as a Secondary Fixed Point on the International Practical Temperature Scale. *High Temp.* — *High Press.*, **4**, 1972, pp. 707-713.
119. RUDY, E. et PROGULSKI, J. A Pirani Furnace for the Precision Determination of the Melting Temperatures of Refractory Metallic Substances. *Planseeber. Pulvermet.*, **15**, 1967, pp. 13-45.
120. CEZAIIRLIYAN, A. et MÜLLER, A. P. Radiance Temperature (at 653 nm) of Tungsten at Its Melting Point. *Int. J. Thermophysics*, **3**, 1982, pp. 89-99.
121. CEZAIIRLIYAN, A. Measurement of Melting Point and Electrical Resistivity (above 3 600 K) of Tungsten by a Pulse Heating Method. *High Temp. Science*, **4**, 1972, pp. 248-252.
122. ALLEN, R. D. Techniques for Melting-Point Determination on an Electrically Heated Refractory Metal. *Nature*, **193**, 1962, pp. 769-770.
123. RUDY E., WINDISCH, St. et HOFFMAN, J. R. Ternary Phase Equilibria in Transition Metal-Boron-Carbon-Silicon System Part I. Related Binary Systems. Volume VI. W-C System: Supplemental Information on the MO-C System. *Report AFML-TR-65-2*, Air Force Materials Laboratory Research and Technology Division, Dayton, Ohio, 1966.
124. ZALABAK, C. F. The Melting Points of Tantalum Carbide and of Tungsten. *NASA Technical Note D-761*, 1961.
125. PAVESE, F. The Triple Point of Equilibrium-Hydrogen Isotopes. *Physica*, **107B**, 1981, pp. 333-334.
126. ANCSIN, J. About the Usefulness of Deuterium in Thermometry (Document CCT/82-8, présenté à la 14<sup>e</sup> session du Comité Consultatif de Thermométrie en 1982, non publié).
127. KEMP, R. C. The triple points of equilibrium and normal deuterium. *TMCSI*, **5**, 1982, pp. 249-250.

128. PAVESE, F. et BESLEY, L. M. Triple-point temperature of propane: measurements on two solid-to-liquid transitions and one solid-to-solid transition. *J. Chem. Thermodynamics*, **13**, 1981, pp. 1095-1104.
  129. PAVESE, F. Some thermodynamic properties of ethane between its double solid-to-solid transition and its triple-point temperature. *J. Chem. Thermodynamics*, **10**, 1978, pp. 369-379.
  130. STRATY, G. C. et TSUMURA, R. Phase transition and melting pressures of solid ethane. *J. Chem. Phys.*, **64**, 1976, pp. 859-861.
  131. ANCSIN, J. Sur quelques propriétés du dioxyde de carbone. *BIPM Com. Cons. Thermométrie*, **12**, 1978, pp. T114-T115.
  132. FIGUEROA, J. M. et MANGUM, B. W. The triple point of rubidium: A temperature fixed point for biomedical applications. *TMCSI*, **5**, 1982, pp. 327-337.
  133. STAVELEY, L. A. K., LOBO, L. Q. et CALADO, J. C. G. Triple-points of low melting substances and their use in cryogenic work. *Cryogenics*, **21**, 1981, pp. 131-144.
  134. PAVESE, F. The Use of Triple Point of Gases in Sealed Cells as Pressure Transfer Standards: Oxygen (146.25 Pa), Methane (11,696 Pa), and Argon (68,890 Pa). *Metrologia*, **17**, 1981, pp. 35-42.
  135. PAVESE, F. et BARBERO, C. The Triple Point of Pure Normal Deuterium. *Cryogenics*, **19**, 1979, pp. 255-260.
  136. BONHOURE, J. et PELLO, R. Température du point triple du gallium. *Metrologia*, **19**, 1983, pp. 15-20.
  137. LAU, S. Entwicklung und Anwendung des Gallium-Fixpunktes im ASMW. *Metrologische Abhandlungen des ASMW*, **4**, 1984, pp. 1-5.
  138. SOSTMAN, H. E. Melting Point of Gallium as a Temperature Calibration Standard. *Rev. Sci. Instrum.*, **48**, 1977, pp. 127-130.
  139. OLEINIK, B. N., IVANOVA, A. G., ZAMHOVETZ, V. A. et ERGARDT, N. N. Point fixe de référence de fusion du gallium (Document CCT/82-32 présenté à la 14<sup>e</sup> session du Comité Consultatif de Thermométrie en 1982, non publié).
  140. ANCSIN, J. Melting Curves and Heat of Fusion of Indium, *Metrologia*, **21**, 1985, pp. 7-9.
  141. OLEINIK, B. N., IVANOVA, A. G., DVINIANINOV, M. M. et ZAMKOVETS, V. A. Realization of the Indium Freezing Point (Document CCT/84-1 présenté à la 15<sup>e</sup> session du Comité Consultatif de Thermométrie en 1984, non publié).
  142. ITOH, H. The Ag-Cu Eutectic Point as a Reference Temperature (Document CCT/84-14 présenté à la 15<sup>e</sup> session du Comité Consultatif de Thermométrie en 1984, non publié).
  143. KEMP, R. C., KEMP, W. R. G. et SMART, P. W. Realization of the Triple Point of <sup>nat</sup>Xenon and Experiments with <sup>136</sup>Xenon in a Sealed Cell of Novel Design (Document CCT/84-10, présenté à la 15<sup>e</sup> session du Comité Consultatif de Thermométrie en 1984, non publié).
-

## ANNEXE T 4

---

### **2<sup>e</sup> Rapport du Groupe de travail 3 \*** (Domaine du thermomètre à résistance de platine)

(Traduction du Document CCT/84-53)

---

#### **1. Introduction**

C'est en 1980 (voir le premier rapport du Groupe de travail 3) qu'ont été redéfinies pour la dernière fois les tâches du Groupe de travail 3; le CCT ne les a pas modifiées lors de sa session de 1982. Il s'ensuit que l'on peut diviser le rapport en quatre sections principales, à savoir :

A) formule d'interpolation des thermomètres à résistance de platine et points fixes ;

B) détermination des températures thermodynamiques ;

C) thermométrie par rayonnement ;

D) thermomètres à résistance de platine pour la mesure des hautes températures : leur mise au point et leur comparaison.

L'objet de la première section est en relation très étroite avec le contenu des trois autres sections. Toutefois, nous avons peu de choses à dire dans ce rapport au sujet de la thermométrie par rayonnement, qui ne soit déjà compris dans la section B) ; ce point ne sera donc pas traité dans ce qui suit.

---

\* Les membres de ce Groupe de travail sont MM. L. CROVINI, président, Istituto di Metrologia G. Colonnetti (Italie) ; P. B. COATES, National Physical Laboratory (Royaume-Uni) ; W. R. G. KEMP, CSIRO (Australie) ; LING SHAN KANG, Institut National de Métrologie (Rép. Pop. de Chine) ; J. F. SCHOOLEY, National Bureau of Standards (États-Unis d'Amérique) ; W. THOMAS, Physikalisch-Technische Bundesanstalt (Rép. Féd. d'Allemagne).



## 2. Formule d'interpolation des thermomètres à résistance de platine

### 2.1. Limite de l'échelle du thermomètre à résistance de platine aux basses températures et projet d'interpolation entre 13,8 K et 273,15 K

Le président du Groupe de travail 3 a participé à une réunion des Groupes de travail 1 et 4, qui s'est tenue au NPL le 24 octobre 1983. L'un des buts de cette réunion était de discuter (et, éventuellement, de proposer) une température pour la limite inférieure de l'échelle du thermomètre à résistance de platine et de trouver une façon d'opérer une jonction lisse avec l'échelle des basses températures, c'est-à-dire l'échelle du thermomètre à gaz.

Toute décision sur cette question doit reposer sur les indications dont on dispose quant à la non-unicité connue de l'échelle du thermomètre à résistance de platine (*voir* figure 1 de W. R. G. Kemp, Annexe T 2, p. 46), et sur la confirmation des résultats obtenus avec les instruments d'interpolation susceptibles d'être choisis pour le domaine inférieur à celui du thermomètre à résistance de platine.

Tel qu'il a été présenté à la réunion, le problème est double : d'une part, il faut choisir le meilleur instrument d'interpolation pour le domaine inférieur à celui du thermomètre à résistance de platine ; d'autre part, il faut éviter de dégrader l'exactitude bien connue de l'échelle du thermomètre à résistance de platine.

Limiter le domaine du thermomètre à résistance de platine à 25 K conduirait à augmenter de façon excessive la non-unicité entre 25 K et 54 K (comparer les figures 1*a* et 1*c*). On ne diminue que de façon partielle, mais non suffisante, cette non-unicité en ajoutant un point d'étalonnage à 13,81 K (*voir* figure 1*b*). Il a donc été suggéré que la future EIPT soit définie en fonction de l'échelle du thermomètre à résistance de platine au-dessus de 25 K, et que l'on conserve trois points supplémentaires d'étalonnage au-dessous de cette température, à savoir à 14, 17 et 20 K environ. Ceux-ci pourraient être réalisés, soit en comparant le thermomètre à résistance de platine avec les instruments d'interpolation étalons de ce domaine, soit avec trois points fixes appropriés dont la température serait fixée en fonction de l'instrument d'interpolation étalon.

Jusqu'à maintenant il n'a pas été possible de faire la preuve de la reproductibilité et de la commodité d'un thermomètre à gaz d'interpolation ; en conséquence, le Groupe de travail 3 recommande que le thermomètre à résistance de platine demeure l'instrument d'interpolation jusqu'à 14 K.

### 2.2. Domaine supérieur à 273,15 K

Comme pour le précédent domaine, on n'est pas parvenu à faire une proposition complète. Une question en particulier demeure encore

ouverte, celle de fixer la limite supérieure de l'échelle du thermomètre à résistance de platine au point de l'or ou à celui de l'argent. Cette question est approfondie au paragraphe 4.

### 3. Détermination de la température thermodynamique au-dessus de 14 K

Depuis le premier rapport, on dispose des résultats de nouvelles déterminations. On peut donc les comparer aux précédents. Bien qu'avec les nouvelles déterminations, le domaine compris entre 14 K et 1337 K soit presque entièrement couvert, il y a trois difficultés :

- 1) certains résultats ne proviennent que d'un seul expérimentateur ;
- 2) l'exactitude n'est pas suffisante ;
- 3) il existe de larges écarts entre certains résultats.

Les résultats disponibles ne sont pas tous ramenés directement au point triple de l'eau. Dans le cas de mesures relatives, il est nécessaire que les températures de référence soient cohérentes du point de vue thermodynamique.

#### 3.1. Domaine compris entre 14 K et 273 K

Mise à part l'échelle NPL 75, nous disposons dans ce domaine des résultats suivants :

KOL (Steur, 1983)/CVGT, réf 273 K/14-100 K  
CSIRO (Kemp *et al.*, 1982)/CVGT, Réf 273 K/14-273 K  
CSIRO (Kemp *et al.*, 1983)/CVGT, Réf 273 K/14-300 K  
CSIRO (Kemp *et al.*, 1982)/ISO, Réf 20 K (NPL 75)/20-84 K  
CSIRO (Cetas, 1976)/Mag, Réf 13,8 K (NPL 75) ; 27,1 ; 54,4 ; 84 K  
(CVGT CSIRO)/14-84 K  
PTB (Weber, 1983)/ISO, Réf 273 K/BP Ne ; TP O<sub>2</sub> ; BP O<sub>2</sub>  
Univ. Bristol (Gugan and Michel, 1980)/DCGT, Réf 20 K (NPL-75)/14-27 K  
Univ. Munster (Storm and Klempt, 1983)/NT, Ref 273 K/TP Ar  
NPL (Quinn and Martin, 1983)/TRT, Réf 273 K/240-273 K

CVGT : Thermomètre à gaz à volume constant

ISO : Isothermes

Mag : Thermomètre magnétique

DCGT : Thermomètre à gaz à constante diélectrique

NT : Thermomètre à bruit

TRT : Thermomètre à rayonnement total

BP : Point d'ébullition

TP : Point triple.

Un résumé de ces résultats est donné par R. C. Kemp *et al.*, (voir Document CCT/84-8). Il convient de noter qu'entre 100 K et 230 K les mesures n'ont été faites que par un seul auteur.

### 3.2. Domaine compris entre 273 K et 730 K

Quinn et Martin, NPL (1982), ont publié les résultats qu'ils ont obtenus avec un thermomètre à rayonnement total dans le domaine compris entre 327 K et 365 K. Ils sont parvenus à un bon accord avec les résultats du NBS (Guildner et Edsinger, 1976). En 1983, Quinn et Martin ont obtenu les résultats de nouvelles mesures (non encore publiés) qui couvrent le domaine compris entre 240 K et 375 K et qui passent, de façon lisse, au point triple de l'eau.

Pickup, CSIRO (1982), a travaillé à 408 K avec un thermomètre à bruit. Il a trouvé  $T - T_{68} = -12$  mK (NBS :  $-33,6$  mK). L'auteur n'exclut pas que le désaccord soit dû à des « problèmes électroniques intermittents » dans son appareil.

### 3.3. Domaine compris entre 730 K et 1337 K

Dans ce domaine, plusieurs travaux de recherche, faisant tous appel à la thermométrie par rayonnement monochromatique, ont été faits au cours des trois dernières années.

De 730 K à 903 K environ (point de congélation de l'antimoine), Coates et Andrews (NPL), Jung (PTB) et Bonhoure (BIPM) ont obtenu des résultats rattachés à une température thermodynamique, comme avaient fait Guildner et Edsinger jusqu'à 730 K. Les résultats de la PTB s'écartent de façon linéaire de  $T_{68}$ , pour atteindre un écart maximal de  $-0,15$  K au point de congélation de l'antimoine. A cette température, le résultat de la PTB est de  $0,12$  K inférieur à celui du NPL, alors qu'il y a un bon accord avec les résultats préliminaires obtenus au BIPM. Les résultats du NPL au point de l'antimoine concordent, toutefois, avec ceux qui ont été obtenus à l'IMGC avec un thermomètre à bruit.

Les résultats les plus récents entre 903 K et 1337 K sont ceux de Coates et Andrews (1982). Ils sont rattachés à 730 K et ont été obtenus par des mesures thermodynamiques effectuées avec un pyromètre à rayonnement monochromatique. Il faut considérer les résultats du NPL comme provisoires : il existe en effet un désaccord avec l'un des trois filtres interférentiels utilisés (Coates, communication privée). Dans ce domaine les seules mesures thermodynamiques récentes reliées à 273 K sont celles qui ont été faites à l'IMGC avec un thermomètre à bruit (Crovini et Actis, 1978) et qui couvrent le domaine compris entre 903 K et 1235 K.

Plusieurs mesures d'intervalles de température dans le domaine

supérieur à 903 K ont également fait l'objet de publications. Notons entre autres : Bedford et Ma, 1982 ; Jones et Tapping, 1982 ; Jung, 1975 ; Bonhoure, 1975 ; Ricolfi et Lanza, 1977 ; Quinn *et al.*, 1973 ; Coslovi *et al.*, 1975.

### 3.4. Conséquences possibles des nouvelles déterminations

Dans le domaine compris entre 14 K et 273 K, on a utilisé les résultats pour former une fonction lisse pour  $T - T_{68}$ , ainsi qu'une nouvelle fonction de référence pour le thermomètre à résistance de platine étalon (R. C. Kemp *et al.*, Document CCT/84-8). La fonction est la suivante :

$$W_{\text{réf}} = \sum_{n=0}^{16} A_n \left\{ \left[ \ln \left( \frac{T}{273,15} \right) + 1,49 \right] / 1,49 \right\}^n \quad (1)$$

Pour les mesures au-dessus de 730 K, les incertitudes de mesures données pour le moment sont si grandes que nous ne pouvons pas faire de recommandation sur la forme que doit avoir une fonction de référence entre 730 K et 1337 K.

Nous demandons instamment au CCT de faire les recommandations suivantes :

1) Tous les résultats soumis à cette réunion sous forme préliminaire doivent être publiés immédiatement.

2) On doit tout particulièrement encourager les mesures de température thermodynamique au-dessus de 903 K.

3) Que de nouvelles mesures de température thermodynamique soient effectuées dans les domaines où une seule expérience a été faite.

## 4. Thermomètres à résistance pour la mesure des hautes températures

### 4.1. Recherches expérimentales

Le Groupe de travail 3 a reçu des rapports concernant des recherches sur les thermomètres à résistance pour les hautes températures, recherches faites dans les six laboratoires suivants :

BIPM, J. Bonhoure

IMGC (Italie), P. Marcarino

NBS (États-Unis d'Amérique), J. P. Evans

NIM (Rép. Pop. de Chine), Ling Shan Kang

CSIRO (Australie), T. P. Jones et J. V. McAllan

PTB (Rép. Féd. d'Allemagne), H. J. Jung et H. Nubbemeyer.

D'autres laboratoires ont reçu des thermomètres d'essai fabriqués par le NIM ou ont construit des thermomètres eux-mêmes. Nous attendons qu'ils nous communiquent leurs résultats. Voici un bref résumé des résultats fournis par les six laboratoires mentionnés ci-dessus :

a) BIPM. Trois thermomètres chinois, Nos 18220, 18240 et 18245, ont été essayés. Il s'agissait d'étudier l'effet du chauffage sur le  $R(0)$ . La méthode consistait à effectuer les opérations suivantes : mesure du  $R(0)$  ; chauffage à  $650\text{ }^{\circ}\text{C}$  pendant une heure ; nouvelle mesure du  $R(0)$  ; chauffage à  $1\ 085\text{ }^{\circ}\text{C}$  pendant 50 heures, suivi de cycles de recuit à  $650\text{ }^{\circ}\text{C}$  et  $450\text{ }^{\circ}\text{C}$  ; nouvelle mesure du  $R(0)$  ; nouveau chauffage à  $1\ 085\text{ }^{\circ}\text{C}$  pendant 100 heures, suivi par des cycles de recuit ; pour finir, nouvelle mesure du  $R(0)$ . On n'a pratiquement pas observé de modification ( $\leq 8 \times 10^{-6}$ , non liée au temps de façon évidente) de la valeur du  $R(0)$  sur aucun des thermomètres.

b) IMGC. Trois thermomètres, Nos 18213, 18233 et 80166, ont été chauffés pendant des périodes de 50 heures ou de 100 heures dans un bloc en inconel 600 à des températures comprises entre  $750\text{ }^{\circ}\text{C}$  et  $1\ 080\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Les résistances,  $R(0)$ ,  $R(\text{Sn})$ ,  $R(\text{Zn})$ , étaient mesurées après les périodes de chauffage. Toutes les valeurs de  $R$  ont augmenté de façon nette et toutes les valeurs de  $\alpha$  ont diminué comme le montre le tableau suivant :

Thermomètre	$\Delta R(0), R(0)$	$\Delta R(\text{Sn}), R(\text{Sn})$	$\Delta R(\text{Zn}), R(\text{Zn})$	$\Delta\alpha, \alpha$
18213	0,000 142	0,000 128	0,000 114	— 0,000 002 <sub>3</sub>
	0,260 492	0,493 052	0,669 174	0,003 927
18233	0,000 106	0,000 097	0,000 085	— 0,000 001 <sub>7</sub>
	0,261 257	0,494 489	0,671 118	0,003 927
80166	0,000 155	0,000 141	0,000 128	— 0,000 002 <sub>8</sub>
	0,240 430	0,455 047	0,617 580	0,003 926 <sub>6</sub>

c) NBS. Quatre thermomètres chinois et trois thermomètres du NBS ont été essayés dans le cadre de trois expériences séparées. Dans la première, chaque thermomètre était étalonné à 0, Au, 0, Ag, 0, Al, 0, Zn, 0 et Sn (0, point triple de l'eau ; Au, Ag, Al, Zn, Sn, point de congélation correspondant) en utilisant deux intensités de courant de mesure différentes ; ensuite les thermomètres étaient chauffés pendant 100 heures à  $1\ 100\text{ }^{\circ}\text{C}$  et l'étalonnage effectué à nouveau.

Dans la deuxième expérience, une gaine de fil de platine était placée autour de la tige de chaque thermomètre, le thermomètre était mis dans un creuset d'argent et sa résistance était mesurée avec la gaine et le fil de garde interne reliés au circuit de garde du pont de résistance

Cutkosky. On a fait des mesures comparables avec la gaine et la garde interne connectées dans diverses autres combinaisons.

Dans la troisième expérience, les caractéristiques d'immersion du thermomètre étaient mesurées dans un creuset au point du zinc.

Les résultats de la première expérience ont fait apparaître une variation moyenne de  $R(T)/R(0)$ , après 100 heures à 1 100 °C, égale à 8,4 mK au point de l'aluminium, 12,3 mK au point de l'argent, 10,4 mK au point de l'or.  $R(0)$  a varié de l'équivalent de 0,3 mK à 0,8 mK à 0 °C après un cycle à température élevée. Toutes les valeurs de  $\alpha$  sont restées supérieures à  $0,003\ 926_8\ \text{K}^{-1}$ . L'échauffement du thermomètre dû au courant de mesure n'était pas excessif et son effet était facilement corrigé. Tous les thermomètres ont fonctionné correctement au cours des essais.

La deuxième expérience a fait apparaître la présence d'effets importants dus aux courants de fuite : 20 mK ou davantage au point de l'argent. La gaine extérieure constituait la meilleure protection contre les effets des courants de fuite.

La troisième expérience n'a donné que ce que l'on attendait en importance des effets de la profondeur d'immersion au point du zinc.

On a fait une autre analyse des résultats de la première expérience en extrapolant un étalonnage dans l'EIPT-68 pour obtenir les valeurs de  $t'$  pour les températures de l'aluminium, de l'argent et de l'or. Obtenues par le calcul à partir des séries de 14 déterminations avec sept thermomètres, les valeurs d'un écart-type correspondaient à 4 mK au point de l'aluminium, 10 mK au point de l'argent et 15 mK au point de l'or.

On a entrepris une étude du comportement de fonctions d'interpolation semblables à celles qui sont utilisées dans l'EIPT-68, mais en les étendant aux points de l'aluminium, de l'argent et de l'or. Cette étude doit être suspendue tant que de nouvelles valeurs des points fixes aux températures élevées n'auront pas été spécifiées.

d) NIM. Des creusets d'aluminium, d'argent et d'or ont été préparés avec des échantillons d'une pureté allant jusqu'à 99,999 9 %. Sur une période de trois ans, de nombreux essais ont été faits sur la stabilité des thermomètres et des points fixes et les différences de températures des points fixes entre différents creusets. Ces essais ont comporté jusqu'à 12 cycles pour un creuset donné sur une période de un mois. On donne ci-après les résultats pour trois thermomètres à trois points fixes et au

Thermomètre	$\Delta T(\text{Al})$ , mK	$\Delta T(\text{Ag})$ , mK	$\Delta W(\text{Au})$ , $W(\text{Au})$
80136	0,5	1,0	0,000 008 4,572 100
79515	0,7	0,9	—
80212	0,4	1,6	0,000 004 4,571 800

cours de la même durée. Les variations sont données sous forme de la valeur d'un écart-type pour  $\Delta T(\text{Al}, \text{Ag})$  ou sous forme de  $\Delta W(\text{Au})/W(\text{Au})$ .

e) CSIRO. Sur les dix thermomètres que N. Bass a construits pendant son récent stage au NBS, quatre ont été comparés avec le pyromètre photoélectrique au point de l'argent, en utilisant un caloduc au sodium. La non-uniformité de la température à l'intérieur du corps noir au point de l'argent a été estimée à 5 mK sur la plus grande partie de sa longueur. Sur une période de 8 heures, un thermomètre est demeuré stable et trois autres ont dérivé de façon approximativement linéaire pour donner des températures inférieures de  $\Delta T \sim 20$  mK. Les valeurs de  $W(\text{Al})$  pour les thermomètres étaient stables à  $\pm 3$  mK près.

Le comportement général des thermomètres pendant toute la durée des mesures au point de l'argent s'est montré irrégulier, avec un coefficient  $\alpha$  décroissant de 0,003 926 à 0,003 925.

On a observé d'importants effets de perte (jusqu'à 50 mK) lorsque l'on déconnectait la garde interne des thermomètres. Deux thermomètres ont cessé de fonctionner pendant ces mesures.

Aucun rapport n'est parvenu sur des essais effectués sur les thermomètres reçus du NIM.

f) PTB. Trois thermomètres chinois ont été étudiés. Les thermomètres N<sup>os</sup> 18234, 80159 et 80168 ont été d'abord chauffés à 900 — 960 °C pendant huit périodes de cinq heures chacune.  $W(\text{Ag})$  a varié après 40 heures de quantités correspondant respectivement à + 9 mK, 0 mK et + 4 mK. Ensuite, les thermomètres N<sup>os</sup> 18234 et 80159 ont été chauffés pendant des périodes de 50 heures jusqu'à 1 000 °C, pendant 300 heures au total. A la fin de chaque période de 50 heures, on a mesuré leur  $R(\text{Ag})$  et leur  $R(0)$ . Les variations cumulées de  $W(\text{Ag})$  correspondaient respectivement à — 21 mK et — 16 mK. Par la suite, la tige des thermomètres N<sup>os</sup> 80168 et 18234 s'est cassée, ce qui a temporairement interrompu l'étude entreprise sur ceux-ci.

On a étudié les caractéristiques d'immersion au point triple de l'eau et aux points de congélation de l'étain, du zinc et de l'argent avec le thermomètre N<sup>o</sup> 80159; le fait de s'éloigner de 10 cm du bas d'un lingot de 20 cm n'entraînait pas de variations de température supérieures à 0,2 mK, 1,1 mK, 0,5 mK et 2,0 mK respectivement.

## 4.2. Conclusions

On peut tirer plusieurs conclusions des indications données au point 4.1. Ce sont les suivantes :

a) On dispose sur les nouveaux thermomètres d'un large éventail en chauffage et en durée. Les mesures faites au BIPM, au NIM, au NBS et à la PTB traduisent toutes une bonne stabilité (variations

inférieures à 20 mK au point de l'or) au chauffage à températures élevées, alors que ce n'est pas le cas pour les mesures faites à l'IMGC et au CSIRO. Sur 19 thermomètres étudiés, 4 ont cessé de fonctionner au cours des mesures.

b) Les caractéristiques concernant l'immersion et l'échauffement dû au courant des thermomètres sont compatibles avec leur utilisation en thermométrie de précision.

c) Les pertes électriques à des températures supérieures à 900 °C sont importantes (correspondant à l'équivalent de 50 mK au point de l'or). En revanche, les pertes peuvent être réduites par une garde, soit interne, soit externe.

d) Les thermomètres peuvent donner des valeurs assez précises de  $t'$  (identiques à seulement 20 mK près), même lorsque celles-ci sont extrapolées du point du zinc au point de l'or.

### 4.3. Propositions de recommandation

A partir de ces conclusions, le Groupe de travail 3 présente les recommandations suivantes :

a) Les laboratoires qui ont en leur possession, soit des thermomètres chinois, soit leurs propres thermomètres à résistance de platine pour la mesure des températures élevées, sont invités à effectuer sur ceux-ci des études comparables à celles dont il a été rendu compte au point 4.1. et à communiquer leurs résultats au CCT.

b) On encourage fortement tous les efforts tendant à créer des sources commerciales de thermomètres à résistance de platine pour les hautes températures (par exemple, Chino Works au Japon, Yellow Springs Instruments aux États-Unis d'Amérique, Yunan Instrument Factory en Chine).

c) Si l'on en vient à accepter l'idée que le choix de certains types de thermomètres, ou celui de certaines techniques de laboratoire, ou l'un et l'autre, sont la cause des meilleurs résultats de stabilité et de précision mentionnés au point 4.1., il conviendra alors de prendre les mesures suivantes : premièrement, les méthodes qui conduisent à de meilleurs résultats devront être adoptées pour étudier les meilleurs des thermomètres disponibles ainsi qu'il est suggéré au point précédent, 4.2. a) ; deuxièmement, on devra recommander l'emploi des nouveaux thermomètres à résistance pour les hautes températures comme instruments d'interpolation pour des températures allant jusqu'au point de l'or.

d) On encourage l'étude approfondie des formules d'interpolation pour un domaine élargi du thermomètre à résistance de platine. On



note que le point de l'aluminium s'avère à la fois nécessaire et utile comme point fixe.

e) On suggère que, dans leur rapport sur les thermomètres à résistance pour les hautes températures, les laboratoires donnent au moins les indications suivantes :

- 1) tous les résultats de mesure de résistance à toutes les températures mesurées ;
- 2) les effets d'immersion à toutes les températures, disons à partir du point du zinc et au-dessus ;
- 3) toute manifestation de perte électrique ;
- 4) toute expérience concernant l'utilisation en position horizontale ;
- 5) des renseignements détaillés concernant l'enceinte entourant les thermomètres.

Juin 1984

### Bibliographie

(Les divers volumes de « Temperature, Its Measurement and Control in Science and Industry » sont simplement indiqués : TMCSI, 1, etc.).

- BEDFORD, R. E. et MA, C. K. TMCSI, 5, 1982, p. 361.
- BONHOURS, J., et PELLO, R. Document CCT/84-21 présenté à la 15<sup>e</sup> session du Comité Consultatif de Thermométrie en 1984, non publié.
- CETAS, T. C. *Metrologia*, 12, 1976, p. 27.
- COATES, P. B. et ANDREWS, J. W. TMCSI, 5, 1982, p. 109.
- COSLOVI, L., ROSSO, A. et RUFFINO, G. *Metrologia*, 11, 1975, p. 85.
- CROVINI, L. et ACTIS, A. *Metrologia*, 14, 1978, p. 69.
- GUGAN, D. et MICHEL, G. W. *Metrologia*, 16, 1980, p. 149.
- GUILDNER, L. A. et EDSINGER, R. E. *J. Res. Natl. Bur. Stand. (U.S.)*, 80A, 1976, p. 703.
- KEMP, R. C., BESLEY, L. M. et KEMP, W. R. G. TMCSI, 5, 1982, p. 33.
- KEMP, R. C., BESLEY, L. M. et KEMP, W. R. G. 1983, non publié.
- KEMP, R. C., BESLEY, L. M. et KEMP, W. R. G. Document CCT/84-8 présenté à la 15<sup>e</sup> session du Comité Consultatif de Thermométrie en 1984, non publié.
- JUNG, H. J. *Temperature Measurement 1975*, London, Institute of Physics, Conference Series N° 26, 1975; p. 278.
- JUNG, H. J. *Metrologia*, 20, 1984, p. 67.
- JONES, T. P. et TAPPING, J. TMCSI, 5, 1982, p. 169.
- PICKUP, C. P. TMCSI, 5, 1982, p. 129.
- QUINN, T. J., CHANDLER, T. R. D. et CHATTLE, M. V. *Metrologia*, 9, 1973, p. 44.
- QUINN, T. J. et MARTIN, J. E. TMCSI, 5, 1982, p. 103.
- QUINN, T. J. et MARTIN, J. E. Document CCT/84-43 présenté à la 15<sup>e</sup> session du Comité Consultatif de Thermométrie en 1984, non publié.
- RICOLFI, T. et LANZA, F. *High Temp. — High Press.*, 9, 1977, p. 483.
- STEUR, P. P. M. Thèse, Leiden, 1983.
- STORM, L. et KLEMP, G. 1983, non publié.
- WEBER F., 1983, à paraître.

## ANNEXE T 5

---

### 2<sup>e</sup> Rapport du Groupe de travail 4 \*

(Nouvelle EIPT au-dessous du domaine du thermomètre  
à résistance de platine)

(Traduction du Document CCT/84-32)

---

1. Trois des membres du Groupe de travail ont assisté à la réunion *ad hoc* sur les problèmes de température cryogénique dans une nouvelle EIPT, tenue au NPL le 24 octobre 1983 ; le quatrième (C. A. Swenson) a soumis une contribution écrite. Cette réunion a fait l'objet d'un court rapport au CCT (*voir* Annexe T 2, p. T 44).
2. De nouvelles études ont été discutées (R. P. Hudson et R. L. Rusby) ; elles portent sur les aspects des méthodes pouvant être utilisées avec un thermomètre à gaz d'interpolation à l'extrémité inférieure d'une nouvelle EIPT. Ultérieurement, R. L. Rusby a préparé la note ci-après.
3. M. Durieux et R. L. Rusby ont présenté, pour publication dans la revue *Cryogenics* \*\*, les fonctions réciproques des fonctions reliant la pression de vapeur de <sup>3</sup>He et <sup>4</sup>He à la température.
4. Un article de G. T. McConville, qui sera présenté à la 17th International Low Temperature Conference, propose un nouveau potentiel interatomique pour <sup>4</sup>He, ce qui conduit pour le second coefficient du viriel à une valeur en accord, à  $\pm 0,3 \text{ cm}^3 \text{ mole}^{-1}$  près jusqu'à 2,6 K. avec celle obtenue par K. H. Berry à partir de ses résultats avec le thermomètre à gaz.

Avril-mai 1984

---

\* Les membres de ce Groupe de travail sont : MM. R. P. HUDSON, président, Bureau International des Poids et Mesures ; M. DURIEUX, Kamerlingh Onnes Laboratorium (Pays-Bas) ; R. L. RUSBY, National Physical Laboratory (Royaume-Uni) ; C. A. SWENSON, Iowa State University (États-Unis d'Amérique).

\*\* Inverted forms of the new helium vapour pressure equations, *Cryogenics*, **24**, 1984, pp. 363-366.

## Note sur le thermomètre à gaz d'interpolation à volume constant (4,2 K à 24,5 K)

Les principaux critères pour un thermomètre à gaz d'interpolation sont discutés dans « Supplementary Information for the IPTS-68 and the EPT-76 » (*BIPM Monographie*, 1983, pp. 88-92), lorsque l'on a affaire à des réalisations de l'EPT-76. Pour l'EIPT, on considère que le domaine d'application va de 4,2 K à 24,5 K.

Ces critères conduisent à des spécifications de construction qui sont en gros les suivantes :

- a) Volume du réservoir : 0,3 à 1 litre
- b) Capillaire : 1 mm de diamètre, 80 cm de longueur
- c) Volume à température ambiante :  $\sim 10 \text{ cm}^3$
- d) Sensibilité : 1,5 à 2,0 kPa/K (10 à 15 torr/K)
- e) Mesure de la pression : balance de pression et diaphragme capacitif.

De telles spécifications (à ne pas faire figurer dans la définition de l'échelle elle-même) devraient permettre de réaliser l'échelle avec une exactitude de  $\pm 0,5 \text{ mK}$  près. Avec un montage particulièrement soigné et bien conçu, on devrait pouvoir obtenir une exactitude encore supérieure. De même, on pourrait modifier la conception pour une exactitude plus faible : par exemple, on peut souhaiter utiliser un réservoir plus petit ou un manomètre à mercure au lieu d'une balance de pression.

### *Remarques complémentaires*

1) Avec une sensibilité en pression de 2 kPa/K, la non-linéarité due à l'imperfection du gaz ne devrait pas dépasser 1,0 mK et, si l'on utilise une valeur définie de  $B(T)$ , la non-unicité de l'échelle qui en résulte devrait pouvoir se réduire à environ 0,2 mK.

On peut utiliser des sensibilités plus élevées si cela est nécessaire, mais les expérimentateurs doivent être conscients du fait que l'incertitude due à celle sur  $B(T)$  et peut-être aussi sur  $C(T)$  augmente.

2) La mesure du volume de l'espace nuisible à température ambiante par la méthode de la dilatation des gaz ne devrait pas être difficile. Le volume de l'espace nuisible à basse température dépend, en revanche, de la répartition de la température le long du capillaire.

Pour un réservoir de 1 litre, on peut s'attendre à une non-linéarité de l'ordre de 0,4 mK, suivant les renseignements donnés dans « Supplementary Information ». Dans la pratique, l'effet doit être déterminé à chaque point dans une expérience a) parce que les calculs ne peuvent être exacts et b) parce que la répartition de la température peut ne pas être parfaitement reproductible. En particulier, il peut falloir plusieurs heures pour qu'un tube en acier inoxydable isolé

atteigne des conditions parfaitement stables après une variation de la température du réservoir. Pour surmonter ce problème, Berry a relié son capillaire à un bain d'hélium, en un point situé juste au-dessus du réservoir ; la répartition de la température est alors quasiment indépendante de la température du réservoir mais, comme le tube est plus froid qu'il n'est nécessaire, l'effet de l'espace nuisible est nettement accru. Une autre méthode, due à Weber, consiste à utiliser un capillaire en cuivre, ou recouvert de cuivre, sur la plus grande partie de sa longueur. L'effet d'espace nuisible est alors beaucoup plus faible et, en fait, on peut même le déterminer avec suffisamment d'exactitude en mesurant simplement la température de l'extrémité de la section en cuivre. Dans toutes les évaluations de la correction d'espace nuisible, il s'avère cependant utile d'effectuer des mesures directes après avoir obturé le capillaire à sa partie inférieure.

3) Compte tenu de l'écart (d'interpolation) attendu sur la linéarité, on a envisagé d'utiliser une interpolation de type quadratique, en se servant du point triple de l'hydrogène comme point fixe supplémentaire. Toutefois, les calculs ont montré que cela ne présentait pas grand avantage comparé à la fixation de valeurs aux coefficients du viriel comme il a été recommandé plus haut. On n'éviterait pas non plus la nécessité de mesurer les corrections d'espace nuisible, à cause des variations de la répartition de la température le long du capillaire. Le point triple de l'hydrogène aurait toutefois un rôle très utile comme point de référence secondaire : on pourrait y vérifier l'exactitude d'une réalisation de l'échelle.

---





## *Notice for the reader of the English version*

*In order to make the reports of the various Comités Consultatifs more accessible to the many readers who are more familiar with the English language than with the French, the Comité International des Poids et Mesures has decided to publish an English version of these reports. The reader must however be aware that the official report is always the French one. The English version is published for convenience only. If any matter gives rise to controversy, or if an authoritative reference is needed, the French text must be used. This applies especially to the text of the recommendations submitted to the Comité International des Poids et Mesures.*

## **Avertissement au lecteur de la version anglaise**

Afin de rendre plus facile l'accès aux rapports des divers Comités Consultatifs pour de nombreux lecteurs qui sont plus familiers avec la langue anglaise qu'avec la langue française, le Comité International des Poids et Mesures a décidé de publier une version en anglais de ces rapports. Le lecteur doit cependant prendre garde au fait que le rapport officiel est toujours celui qui est rédigé en français. La version anglaise n'est publiée que pour faciliter la lecture. Si un point quelconque soulève une discussion, ou si une référence autorisée est nécessaire, c'est toujours le texte français qui doit être utilisé. Ceci s'applique particulièrement au texte des recommandations proposées au Comité International des Poids et Mesures.





---

NOTE  
ON THE ORGANS OF  
THE CONVENTION DU MÈTRE

---

The Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) was set up by the Convention du Mètre signed in Paris on 20 May 1875 by seventeen States during the final session of the Diplomatic Conference of the Metre. This Convention was amended in 1921.

BIPM has its headquarters near Paris, in the grounds (43 520 m<sup>2</sup>) of the Pavillon de Breteuil (Parc de Saint-Cloud) placed at its disposal by the French Government; its upkeep is financed jointly by the Member States of the Convention du Mètre\*.

The task of BIPM is to ensure worldwide unification of physical measurements; it is responsible for:

- establishing the fundamental standards and scales for measurement of the principal physical quantities and maintaining the international prototypes;
- carrying out comparisons of national and international standards;
- ensuring the co-ordination of corresponding measuring techniques;
- carrying out and co-ordinating determinations relating to the fundamental physical constants that are involved in the above-mentioned activities.

BIPM operates under the exclusive supervision of the Comité International des Poids et Mesures (CIPM) which itself comes under the authority of the Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM).

The Conférence Générale consists of delegates from all the Member States of the Convention du Mètre and meets at present every four years. At each meeting it receives the Report of the Comité International on the work accomplished, and it is responsible for:

- discussing and instigating the arrangements required to ensure the propagation and improvement of the International System of Units (SI), which is the modern form of the metric system;
- confirming the results of new fundamental metrological determinations and the various scientific resolution of international scope;
- adopting the important decisions concerning the organization and development of BIPM.

The Comité International consists of eighteen members each belonging to a different State; it meets at present every year. The officers of this committee issue an Annual Report on the administrative and financial position of BIPM to the Governments of the Member States of the Convention du Mètre.

The activities of BIPM, which in the beginning were limited to the measurements of length and mass and to metrological studies in relation to these quantities, have been extended to standards of measurement for electricity (1927), photometry (1937), and ionizing radiations (1960). To this end the original laboratories, built in 1876-1878, were enlarged in 1929 and two new buildings were constructed in 1963-1964 for the ionizing radiation laboratories. Some thirty physicists or technicians are working in the BIPM

---

\* As of 31 December 1984 forty-six States were members of this Convention: Argentina (Rep. of), Australia, Austria, Belgium, Brazil, Bulgaria, Cameroon, Canada, Chile, China (People's Rep. of), Czechoslovakia, Denmark, Dominican Republic, Egypt, Finland, France, German Democratic Rep., Germany (Federal Rep. of), Hungary, India, Indonesia, Iran, Ireland, Italy, Japan, Korea (Dem. People's Rep.), Korea (Rep. of), Mexico, Netherlands, Norway, Pakistan, Poland, Portugal, Romania, Spain, South Africa, Sweden, Switzerland, Thailand, Turkey, U.S.S.R., United Kingdom, U.S.A., Uruguay, Venezuela, Yugoslavia.

laboratories. They are mainly conducting metrological research, international comparisons of realizations of units and the checking of standards used in the above-mentioned areas. An annual report published in *Procès-Verbaux des séances du Comité International* gives the details of the work in progress. BIPM's annual appropriation is of the order of 12 058 000 gold francs, approximately 21 880 000 French francs (in 1984).

In view of the extension of the work entrusted to BIPM, CIPM has set up since 1927, under the name of *Comités Consultatifs*, bodies designed to provide it with information on matters that it refers to them for study and advice. These *Comités Consultatifs*, which may form temporary or permanent «Working Groups» to study special subjects, are responsible for co-ordinating the international work carried out in their respective fields and proposing recommendations concerning the amendments to be made to the definitions and values of units. In order to ensure worldwide uniformity in units of measurement, the *Comité International* accordingly acts directly or submits proposals for sanction by the *Conférence Générale*.

The *Comités Consultatifs* have common regulations (*BIPM Proc.-Verb. Com. Int. Poids et Mesures*, 31, 1963, p. 97). Each *Comité Consultatif*, the chairman of which is normally a member of CIPM, is composed of delegates from the major metrology laboratories and specialized institutes, a list of which is drawn up by CIPM, as well as individual members also appointed by CIPM and one representative of BIPM. These committees hold their meetings at irregular intervals; at present there are eight of them in existence:

1. The *Comité Consultatif d'Électricité (CCE)*, set up in 1927.
2. The *Comité Consultatif de Photométrie et Radiométrie (CCPR)*, new name given in 1971 to the *Comité Consultatif de Photométrie* set up in 1933 (between 1930 and 1933 the preceding committee (CCE) dealt with matters concerning Photometry).
3. The *Comité Consultatif de Thermométrie (CCT)*, set up in 1937.
4. The *Comité Consultatif pour la Définition du Mètre (CCDM)*, set up in 1952.
5. The *Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde (CCDS)*, set up in 1956.
6. The *Comité Consultatif pour les Étalons de Mesure des Rayonnements Ionisants (CCEMRI)*, set up in 1958. In 1969 this committee established four sections: Section I (Measurement of X and  $\gamma$  rays, electrons); Section II (Measurement of radionuclides); Section III (Neutron measurements); Section IV ( $\alpha$ -energy standards). In 1975 this last section was dissolved and Section II made responsible for its field of activity.
7. The *Comité Consultatif des Unités (CCU)*, set up in 1964 (this committee replaced the «Commission for the System of Units» set up by the CIPM in 1954).
8. The *Comité Consultatif pour la Masse et les grandeurs apparentées (CCM)*, set up in 1980.

The proceedings of the *Conférence Générale*, the *Comité International*, the *Comités Consultatifs*, and the *Bureau International* are published under the auspices of the latter in the following series:

- *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* (this collection for private distribution brings together articles published in scientific and technical journals and books, as well as certain work published in the form of duplicated reports).

From time to time BIPM publishes a report on the development of the Metric System throughout the world, entitled *Les récents progrès du Système Métrique*.

The collection of the *Travaux et Mémoires du Bureau International des Poids et Mesures* (22 volumes published between 1881 and 1966) ceased in 1966 by a decision of CIPM.

Since 1965 the international journal *Metrologia*, edited under the auspices of CIPM, has published articles on the more important work on scientific metrology carried out throughout the world, on the improvement in measuring methods and standards, on units, etc., as well as reports concerning the activities, decisions, and recommendations of the various bodies created under the *Convention du Mètre*.



AGENDA  
for the 15th Meeting

---

1. Opening of the Meeting. Designation of a rapporteur.
  2. Approval of the report of the 14th Meeting of the CCT in 1982.
  3. Documents submitted to the 15th Meeting of the CCT : Classification into the items of the agenda.
  4. Reports of the Working Groups :
    1. WG1 : Revision of the IPTS and Supplementary Information.
    2. WG2 : Secondary reference points and the monograph describing secondary realizations of the IPTS-68.
    3. WG3 : The platinum resistance thermometer range.
    4. WG4 : IPTS above the platinum resistance thermometer range.
    5. Meeting held at NPL on 24 October 1983.
  5. International comparisons and fixed points.
  6. Examination of the monograph on methods of secondary thermometry.
  7. Platinum resistance thermometers for the measurement of high temperatures.
  8. Differences  $T - T_{68}$  and  $T - T_{76}$ .
  9. Temperatures below 0.5 K.
  10. Methods of interpolation between fixed points.
  11. The new IPTS : current situation.
  12. Future work and membership of the Working Groups.
  13. Work at the BIPM.
  14. Publication of documents.
  15. Miscellaneous subjects.
  16. Does one need a new IPTS ? Proposition of Mr. Durieux.
  17. Next meeting of the CCT.
-

---

REPORT  
OF THE  
COMITÉ CONSULTATIF DE THERMOMÉTRIE  
(15th Meeting — 1984)  
TO THE  
COMITÉ INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES  
by M. DURIEUX, rapporteur

---

The 15th Meeting of the CCT took place at the Pavillon de Breteuil on the 5th, 6th and 7th of June 1984.

Present at the 15th Meeting of the CCT :

H. PRESTON-THOMAS, member of CIPM, President of the CCT.

Delegates from the member laboratories :

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

Československý Metrologický Ústav [CSMU], Bratislava  
(M. BOROVIČKA).

CSIRO, Division of Applied Physics [CSIRO], Lindfield  
(W. R. G. KEMP).

Institut National de Métrologie [INM], Paris (A. MOSER,  
G. BONNIER).

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

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

National Bureau of Standards [NBS], Gaithersburg (J. F. SCHOOLEY,  
R. J. SOULEN).

National Institute of Metrology [NIM], Beijing (LING SHANKANG).

National Physical Laboratory [NPL], Teddington (R. L. RUSBY,  
M. V. CHATTLE).

National Research Council of Canada [NRC], Ottawa  
(R. E. BEDFORD).

National Research Laboratory of Metrology [NRLM], Ibaraki  
(M. MORIMURA).

Physikalisch-Technische Bundesanstalt [PTB], Braunschweig  
(W. THOMAS, W. BLANKE).

Van Swinden Laboratorium [VSL], Delft (P. BLOEMBERGEN).

One of the members by appointment :

C.A. SWENSON (Ames).

The Director of the BIPM (P. GIACOMO).

Also present : J. TERRIEN, Director Emeritus of the BIPM ;

T. J. QUINN, Deputy Director ; J. BONHOURE, R. P. HUDSON and  
G. GIRARD, Assistants to the director of the BIPM.

Excused : F. G. BRICKWEDDE (Pennsylvania), member by appointment.

Absent : Institut de Métrologie D.I. Mendéléév [IMM], Leningrad ;

Institut des Mesures Physico-techniques et Radiotechniques [IMPR],  
Moscou.

The Committee considered some fifty-five documents, these included reports from the four Working Groups and a large number of submissions relating to the proposed new IPTS. The Committee noted the recent publication of the « Supplementary Information for IPTS-68 and EPT-76 » \* and the proposed new listing of secondary reference points. This latter, together with a new estimate of the difference between  $T$  and  $T_{68}$  and  $T_{76}$  from 0.5 K to 730 K, will be published shortly.

The Committee also noted with approval the completion of the international intercomparison of sealed triple-point cells ; this was coordinated by the IMGC, Turin. The full report of the result of this intercomparison will be published as a BIPM Monograph \*\*.

As regards the proposed new IPTS, a number of practical and conceptual difficulties remain to be resolved.

Practically, it is not yet clear that the high-temperature platinum resistance thermometer can operate satisfactorily above the silver point (960 °C), also the relation of a resistance thermometer scale to thermodynamic temperature above 460 °C needs to be much better known.

Conceptually, questions of alternative definitions, the acceptable level of non-uniqueness, highly accurate scales over short ranges, truncation of the scale, lower temperature limit for the platinum resistance thermometer and choice of interpolating instrument below the lower limit down to 4.2 K, all remain to be resolved. Ways of resolving most of the disagreements on these points are being studied by the Working Groups.

---

\* BIPM Monographie, 1983.

\*\* BIPM Monographie 84/4, 1984.

Additionally, some questions concerning very low temperature scales and low temperature fixed points were discussed. Finally, the CCT discussed at length the question of the need for an IPTS, and concluded that at present it appears that one will be needed for the foreseeable future.

It was considered essential, if progress is to be made towards a new IPTS, that the Working Groups meet at least once before the next meeting of the CCT scheduled for the summer of 1986, and that they each submit at least one report by October 1985.

25 June 1984

---

---

## **Minutes of the Meeting**

---

The President welcomes all members and delegates, in particular three new delegates : Mr. Soulen from the NBS, Mr. Morimura from the NRLM, and Mr. Chattle from the NPL. He also expresses his regrets that three long-serving delegates are making their final appearance : Mr. Thomas from the PTB, Mr. Kemp from the CSIRO, and Mr. Moser from the INM.

### **1. Designation of a rapporteur. Opening of the Meeting**

Mr. Durieux is appointed as rapporteur. English is chosen as the working language.

The President outlines the structure, function and work of the CCT ; its relationship to the CIPM ; and the functions of, and interrelationships between, the four Working Groups. He emphasizes the desirability of a Working Group being restricted to five or fewer members (preferably three or four) for most efficient operation.

### **2. Approval of the report of the 14th Meeting of the CCT in 1982**

The minutes of the 14th Meeting are approved.

### **3. Documents presented to the 15th Meeting of the CCT : Classification into the items of the Agenda**

It is agreed that discussion of the documents will take place with the succeeding agenda items to which they most closely pertain. For this purpose the fifty-five documents are classified into the appropriate



agenda items, as follows :

<i>Agenda item</i>	<i>Document number</i>
4.1	29, 51
4.2	40A, 40B
4.3	4, 28, 44, 52, 53
4.4	27, 32, 38, 51
5	1, 2, 7, 8, 10, 14, 15, 20, 22, 23, 24, 30, 31, 33, 34, 35, 45, 47
6	26,40B
7	4, 12, 13, 17, 28, 42, 44, 49, 50, 52
8	3, 5, 6, 8, 21, 36, 39, 43, 54
9	19
10	8, 9, 11, 16, 18, 38, 41
11	27, 48
16	37
Miscellaneous	25, 46

#### 4. Reports of the Working Groups

##### 4.1. Working Group 1

The President, as Chairman of WG1, points out that no formal report has been submitted. The WG1 report is essentially embodied in the monograph « Supplementary Information for the IPTS-68 and the EPT-76 » which was published by the BIPM in July 1983. Copies of the monograph (of which 2 000 were printed) were distributed to all members and delegates, and more are available. In connection with the WG1 task of producing a skeleton framework for the new IPTS, a joint meeting of WG1, WG4, and the chairman of WG3 was held at the NPL in October 1983. A report of this meeting is given in Appendix T 2, p. 128. Another task of WG1 was the preparing of a response to a CIPM request to define more explicitly the role of the (new) IPTS amongst the SI units. A draft of a response appears as document 29, but it will be necessary to revise it later in the meeting. The President points out that there remain a number of contentious issues concerning the new scale. He expresses the hope that it will be ready by the last years of this decade, but even when ready he is not sure just how and when it will be implemented.

Mr. Schooley points out that the WG1 task of preparing the details of the new scale leans heavily on the work of WG3 and WG4. It is difficult, therefore, to produce a skeleton text before decisions on, for example, range junction temperatures and interpolation formulae are

made. The President agrees, but finds it highly advisable to have tentative versions available at all times to ensure an orderly implementation of the eventual revision. Mr. Schooley agrees that such tentative versions help to pin-point the remaining deficiencies.

## 4.2. Working Group 2

The Chairman, Mr. Bedford, outlines the work of WG2 which consists of two parts: compiling a table of secondary reference points (SRPs) in a form suitable for publication (document 40A); preparing a first draft of a monograph describing secondary realizations of the IPTS-68 and good thermometric practice in secondary thermometry (document 40B). The latter document is only a partial draft — WG2 intends to include other material in addition to that listed in the table of contents. It seemed desirable to go further than just describing secondary realizations by giving also some advice on proper use of the associated sensors. Also, the present title seems not very apt. WG2 will welcome suggestions regarding the content of this monograph during the discussion under item 6. Mr. Bedford considers the first part of the WG2 task to be now complete (document 40A). He briefly summarizes the make-up of the table and the criteria that were used to choose SRPs for inclusion. The most difficult part was to suitably assess the uncertainties and for this a method devised by Paule and Mandel was used which introduces a between-experiment component of variance. As a result of a WG2 meeting prior to the 15th CCT Meeting some minor revisions will be made to the material in the document 40A.

Mr. Hudson congratulates WG2 for a fine report and recommends that the table of SRPs be published in *Metrologia* as soon as possible.

Mr. Quinn says he is sometimes asked what the status of SRPs is vis-à-vis the IPTS-68. Misunderstandings exist. Will WG2 address this question in the formal publication? Mr. Bedford replies that WG2 did this in an earlier report and a brief paragraph could be inserted. Mr. Quinn voices the opinion that SRPs are simply useful pieces of information and nothing more. Mr. Bedford feels they are rather more than this — they are necessary for use with secondary realizations, for example. Mr. Schooley agrees and goes even further; he points out that there are particular instances (for example, the gallium point in medicine) where their use will improve the quality of thermometry. Mr. Kemp believes the word «secondary» should be omitted; SRPs may be considered simply as reference temperatures to which the CCT gives special emphasis because they are backed up by extensive investigations. Furthermore, it is extremely valuable to have «preferred» or «agreed» numerical values available.

### 4.3. Working Group 3

The Chairman, Mr. Crovini, summarizes the report of WG3. The report deals with the problem of the choice of the lower temperature for the platinum resistance thermometer (PRT) range. WG3 accepts the possibility of an interpolating gas thermometer from 4 K to 25 K, but considers it mandatory that its practicability be demonstrated. Failing this, WG3 recommends that the PRT be the interpolating instrument down to 13.81 K. The report proposes the use of an interpolating equation from 14 K to 273 K along the lines of that of Kemp *et al.* (document 8). There are still three main difficulties regarding knowledge of thermodynamic temperature between 14 K and the gold point: 1) in some regions ( $T - T_{68}$ ) results from a single experiment; 2) in some regions the accuracy is insufficient; 3) particularly above 730 K, there is large disagreement between different experiments. Mr. Crovini summarizes the present state-of-affairs re ( $T - T_{68}$ ). Below 273 K there is good agreement between various results, although only one set is available between 100 K and 230 K. From 273 K to 730 K results from total radiation and gas thermometry agree well. From 730 K to 903 K the spectral radiation results from PTB and BIPM are mutually consistent, but discrepant with the also-mutually-consistent spectral radiation results from NPL and noise thermometer results from IMGIC. Above 903 K there is a variety of relative and absolute measurements that show a maximum in ( $T - T_{68}$ ) of about 0.5 K near 1 073 K, but the accuracy is deemed insufficient. Because of all of this, WG3 recommends that a PRT reference function be adopted from 14 K to 273 K, there now being sufficient experimental data in that range, and urges the CCT to recommend that: 1) all results of ( $T - T_{68}$ ) measurements described in CCT documents be prepared in a form suitable for formal publication; 2) more measurements of ( $T - T_{68}$ ) above 903 K be pursued; 3) in ranges where there are single results, more experiments be conducted.

Mr. Crovini draws attention to the experience so far obtained with high-temperature PRTs (HTPRTs). Many experiments are being conducted with them in six laboratories, with rather a wide variety of behaviour being reported. Some have failed, electrical leakage is substantial above 900 °C, stability is variable, immersion and self-heating properties are acceptable. There is hope that performance to within 20 mK may be possible. WG3 offers several recommendations regarding HTPRTs (*see* Appendix T 4, p. 136).

Mr. Crovini says that it has become necessary for the Working Groups to meet formally between CCT meetings and asks for a formal recommendation from the CCT in this regard to provide assistance in obtaining the necessary travel funds.

The President thanks Mr. Crovini for this report and says that the

CCT certainly endorses his recommendation regarding WG meetings. Mr. Bedford draws attention to work in progress at the NRC by Mr. Berry and Mr. Zhang on insulation leakage. Mr. Bloembergen asks how much improvement is obtained with HTPRTs if their use is restricted to below the Ag point as compared with below the Au point. Mr. Crovini replies that it is not yet clear, but in one particular case a drift of 100 mK occurred at Au and less than 20 mK at Ag in comparable times. In another case contamination was about the same at 980 °C as at Au. Mr. Schooley points out that most HTPRTs used to date are laboratory-constructed and so may be rather variable in quality, leading to extreme variations in performance. NBS has found some to be stable to 10 mK at 1 100 °C for long times; others are very bad at this temperature. It may be easier to judge the useful upper temperature limit when commercial thermometers of more uniform quality are available. In reply to Mr. Bloembergen's comment that Chino Works has produced thermometers for some time, Mr. Schooley says that the earlier Chino ones did not perform very well at high temperatures. Mr. Morimura reports that Mr. Sawada at the NRLM is testing Chino HTPRTs and has found cleaning of the wire in hot water to be very important. Chino now does this also, resulting in an improvement in quality. The thermometers show promise of being stable at 1 100 °C but investigations are not yet complete. Mr. Morimura has brought two of the HTPRTs to the BIPM with him to be made available for study.

Mr. Bloembergen points out that the NRLM experiments show  $\alpha$  increasing with time of use whereas an IMGC report shows  $\alpha$  decreasing. At the IMGC the thermometer is used in an Inconel block, but apparently this is not the case at the NRLM. Mr. Chattle comments that the performance of HTPRTs below the Ag point is not really known because all of them were first treated and used at higher temperatures. This higher temperature exposure probably degrades (by, for example, contamination) their performance below the Ag point. On the point of Mr. Chattle, Mr. Schooley comments that Mr. Evans is also becoming sceptical of the usefulness of long annealing at 1 100 °C. Tests more closely resembling actual operating conditions are likely to be more useful. Mr. Schooley also informs the CCT that the Yellow Springs Instrument Company is attempting to manufacture HTPRTs.

Concerning the question of contamination by Inconel, Mr. Ling refers to document 50. At the NIM different degrees of stability were found depending upon whether the high temperature (1 100 °C) annealing was done in an Inconel-block furnace or in a graphite-block furnace. Mr. Crovini describes in detail the IMGC experience. They were unable to obtain stability at either 980 °C or 1 080 °C with a variety of annealing techniques when an Inconel-block furnace was used.  $R_0$  increased continuously and  $\alpha$  decreased. After discussion with the NIM, they have recently tried a graphite-block furnace. Preliminary results

appear to be better. Mr. Crovini emphasizes that in the Inconel block (as well as in the newer graphite block) there are both a silica liner and the silica thermometer sheath separating the platinum from the block material. Since it is unlikely that the use of Inconel can be avoided in general applications, it is very important to solve this problem of contamination by Inconel. Mr. Bloembergen says he has experienced related problems with platinum-rhodium thermocouples. Mr. Schooley wonders if there is any correlation between the Inconel effect and the oxygen content in the thermometer. Citing Mr. Evans's work, he says that the change in  $\alpha$  is markedly dependent upon the oxygen content. Mr. Bedford comments that contamination of PRTs by copper through two layers of silica in a copper ingot was observed at the NRC many years ago. The effect may be similar to that of nickel from the Inconel.

#### 4.4. Working Group 4

The Chairman, Mr. Hudson, briefly summarizes the WG4 report. He mentions the combined WG meeting in October 1983 (Appendix T 2), some theoretical work by Mr. McConville that leads to a value for the second virial coefficient of  $^4\text{He}$  in close agreement with Berry's experimental value, and the forthcoming publication of inverted helium vapour pressure equations.

#### 4.5. Joint meeting of Working Groups 1, 3 and 4

Mr. Quinn opens the discussion by remarking that the report of the October 1983 meeting of WGs 1, 3 and 4 impinges on many succeeding agenda items. After reading document 51 to the meeting, he emphasizes that the report proposes the use of overlapping ranges in the definition of the new IPTS: an interpolating gas thermometer from 4 K to 25 K, and a PRT from 14 K to 273 K. Either definition, with neither one nor the other having preference, would be valid from 14 K to 25 K. Mr. Schooley points out that this would be a departure from previous practice and might lead to difficulties in expressing scale uncertainties in the overlapping range. Furthermore, the report also proposes overlap in the  $^3\text{He}$  and  $^4\text{He}$  ranges. Mr. Schooley expresses concern about a definition below 1 K, where it becomes very difficult to measure vapour pressures accurately. Mr. Rusby agrees that measurement is more difficult below 1 K but asserts that an accuracy within  $\pm 0.5$  mK has been achieved at 1 K and is confident that it is attainable at 0.5 K. Mr. Durieux points out that alternative definitions are not unprecedented (referring to Ar triple point versus  $\text{O}_2$  boiling point). Also, regarding the range below 1 K, KOL measurements were reproducible within  $\pm 0.3$  mK at 0.5 K and, within this uncertainty, agreement was obtained between measured and calculated vapour

pressures. Mr. Kemp says the possible ambiguity between alternative definitions could be resolved in the following way: use the interpolating gas thermometer as above from 4 K to 13.8 K, and insist that it reproduce the various fixed-point temperatures from 13.8 K to 25 K. Mr. Swenson supposes that in practice the IPTS will be maintained on a set of calibrated resistance thermometers (Ge, RhFe). Therefore the difficulty of measuring vapour pressure may not be an important obstacle, not having to be done frequently or routinely.

On another point, Mr. Bloembergen disagrees with the use of calibration points at 14 K, 17 K, and 20 K for the PRT if it is not a defining instrument below 25 K. The marginal gain in uniqueness above 25 K obtained thereby is not worth the extra complication. Mr. Kemp says that CSIRO studies with a large variety of thermometers show clearly the decrease in non-uniqueness above 25 K with the inclusion of fixed points below 25 K. However, perhaps Mr. Bloembergen's objection could be accommodated by allowing the use of alternative interpolating equations. This might increase the IPTS uncertainty, but not beyond the irreproducibility of the thermometers.

Mr. Schooley decries the lack of any published results with an interpolating gas thermometer. This makes it very difficult to assess properly the various proposals for IPTS definition. Mr. Durieux points out, however, that a report in Volume 5 of *Temperature, Its Measurement and Control in Science and Industry* on the gas thermometers of KOL and NPL allows one to deduce that, if used as interpolating instruments, they would agree to within 0.6 mK between 4 K and 25 K. A more comprehensive description will be published shortly. Mr. Quinn draws an analogy between the definition of the IPTS above 1 064 °C in terms of Planck's law, without specifying the instrument, and the proposed use of an interpolating gas thermometer at low temperatures; the latter is just one possible application of the gas laws. He feels a definition in terms of the gas law is sufficient without specifying the details of the thermometer. Such a definition above 25 K would also be sound in principle but a PRT gives the required accuracy with much less trouble. Mr. Kemp fears that in practice the IPTS in this region may degenerate to a wire scale because of the difficulty in constructing a gas thermometer. Various laboratories may simply base their scale on some other laboratory's gas thermometer. The President emphasizes that all of these new proposals are, in a sense, tentative at this stage.

Mr. Schooley asks the opinion of Mr. Rusby as to the possibility of using a rhodium-iron (RhFe) thermometer as the basis of a wire scale below the PRT range. RhFe appears to be stable to about  $\pm 0.1$  mK for very long times. Mr. Rusby replies that in principle RhFe could be used as an interpolating instrument in a similar way to a PRT but it would require as defining fixed points the hydrogen points, the lead (Pb) superconductive transition plus other supercon-

ductive points or several points from vapour pressure determinations. These points, rather than the thermometer, would be the limitation. In practice it is not acceptable because there is only a single supplier of RhFe. He supposes that users of the new IPTS will indeed use RhFe in the sense of a wire scale. Mr. Hudson interjects that WG4, several years ago, concluded that while the most reproducible scale would be a RhFe wire scale, the fact of its being a wire scale would render it unacceptable.

Mr. Bedford says that there appear to be more advantages than disadvantages to alternative scale definitions. He wonders if there really are significant disadvantages if the differences between the definitions are smaller than the irreproducibilities of the thermometers. Mr. Schooley replies that a multiplicity of values assigned to a particular level of hotness might create legal problems. Even if the differences between values is now considered negligibly small, that may no longer be true at some future time.

Mr. Swenson points out a difficulty of the PRT as a defining instrument below 25 K. The hydrogen fixed-point values and their inaccuracies are determined by gas thermometry. If gas thermometry becomes more refined in the future, it may be desirable to change these fixed-point values, thus altering the PRT scale. If the gas thermometer is the defining instrument this problem does not arise. The President comments that this sort of thing has always been a problem. However, alterations can always be made and restrictions imposed and, so long as they result in no changes in values of temperature or, at most, changes visible only to the exceptional user (for example, in the past, replacement of the ice point by the water triple point) then there is really no difficulty. Mr. Crovini observes that Mr. Swenson's objection could be extended to the 4 K and 25 K fixed points also. In the limit, we would have to use a gas thermometer over the whole temperature range, which is of course impossible. He therefore disagrees with Mr. Swenson and says that the use of a practical instrument cannot be avoided, even though it would be desirable never again to change numerical values of temperature.

The President concludes the discussion of this agenda item by briefly summarizing the issues raised. He suggests that resolution of them should be the task of a Working Group (Working Group 3, *see* item 12).

## 5. International comparisons and fixed points

The President asks first for reports on the various international comparisons.

Mr. Pavese summarizes the current status of the international



comparison of sealed triple-point cells. The work is essentially complete and a voluminous monograph containing all of the results will soon be available from the BIPM. In addition, a report of the work will be submitted to *Metrologia*. Mr. Pavese comments briefly on the quality of the various fixed points. Argon is excellent — 40 determinations with 12 cells show accuracy within  $\pm 0.2$  mK. Nitrogen is also extremely good, although only 3 cells and 3 laboratories were involved. Oxygen is in principle good and gives high precision, but unfortunately there can be systematic differences larger than 1 mK for some cells. These are always associated with the use of commercial oxygen and always give a high temperature value. It is reasonable to suppose that the offending samples are contaminated with argon, but attempts to measure the argon content appear to show too little argon (an impurity concentration smaller than  $10 \times 10^{-6}$ ) to produce such large temperature errors. Any cell filled with commercial oxygen must be checked with a calibrated thermometer to determine if it is good. Hydrogen is good ; however, very small uncertainties are quoted that are somewhat discordant with the dispersion of the results. Methane is substantially inferior to argon, especially since it is difficult to obtain sufficiently pure samples. Neon is a very important point and gives good results. Measurement uncertainties are about  $\pm 0.25$  mK but the average values for several cells range over 0.5 mK. The deuterium triple point could be important for the new IPTS, but no definitive check of its use in sealed cells is yet available. To date, all  $D_2$  samples have been contaminated by various amounts of HD and  $H_2$ . It has been shown that contaminated cells are stable, and it is supposed the point is in principle a very good one.

There follows a lengthy discussion on the performance of sealed triple-point cells, including several questions to Mr. Pavese for clarification on the details of his report. The relative merits of sealed cells versus conventional open cells are debated. Mr. Schooley says sealed cells are important because they provide the possibility of the transport, and hence of in-situ comparisons, of many of the primary and secondary fixed points of various standard laboratories. Mr. Bedford says this was essentially one of the objectives of the international sealed-cell comparisons. Mr. Bonnier says there is no essential difference between sealed and open cells ; in both cases the cell is sealed with a tap. The only difference is that with a sealed cell the tap is closed once, and only once. Mr. Kemp says the open cell has the advantage that the gas sample can be changed or purification techniques applied and the effect on the triple-point value observed. A discussion of the possible deterioration of sealed samples with time points up that there is as yet no evidence of such deterioration — indeed, only high stability has been observed, even for impure samples.

Returning to the question of impure commercial oxygen, Mr. Blanke reports that the main problem for the supplier is the analysis. However,



suppliers can do an accurate analysis if necessary, and PTB has obtained satisfactory samples in this way. Further discussion regarding impurity analyses, especially of  $O_2$ , ensues.

Mr. Rusby raises a question regarding the possible use of deuterium in defining the new scale. HD at an impurity concentration of  $1 \times 10^{-6}$  in  $D_2$  changes the triple-point temperature by  $6 \mu K$  (Pavese). Therefore, samples with the highest available purity ( $70 \times 10^{-6}$  of HD) may still contain sufficient HD to give an uncertainty in triple-point realization of about 0.4 mK. This would be just barely tolerable.

To a question of Mr. Bedford whether the new scale will stipulate the type of triple-point realization to be used, the President replies that it is unlikely and that it would be better to place suitable recommendations in the Supplementary Information.

The CCT members thank Mr. Pavese for the large amount of work he has put into organizing, and compiling the results of, this extensive sealed-cell intercomparison.

Mr. Bloembergen reports on the intercomparison in progress of sealed argon triple-point cells using long-stem thermometers. So far, repeatabilities and inter-laboratory reproducibilities are about  $\pm 0.4$  mK. To date, only cells of INM design have been used but it is hoped to add some from the NRC and the NBS soon.

Mr. Schooley reports on a comparison of NBS superconductive transition points prepared from materials from different sources, and on recent progress in improving NBS devices. When particular attention is paid to sample preparation and experimental procedures, reproducibility is now better than  $\pm 0.1$  mK for all materials. Transition widths increase with impurity content and amount of cold working, so annealing procedures are important. The spread in transition temperatures for samples prepared from a single lot of material is somewhat smaller than for material from different sources. In general, the agreement for Pb, In and Cd between samples from different countries is good; for Al, not so good.

To a question from Mr. Swenson, Mr. Schooley replies that the samples in NBS devices are not single crystals; the recrystallization during annealing is stopped when the grains are about the size of the wire diameter. Mr. Maas says that for In he prepares single crystals in graphite crucibles, and these give finally a reproducibility of about  $\pm 0.3$  mK. Mr. Rusby inquires as to the level of technology required to consistently prepare samples that will exhibit suitably small transition widths. Mr. Schooley replies that at NBS with reasonably simple but careful procedures only about 1 in 5 samples fail. This failure rate is not high enough to assess the correlation between transition width and transition temperature. The President points out that if Mr. Schooley were to increase his failure rate, he might be able to provide Mr. Rusby with a definitive answer!

## **6. Examination of the monograph on methods of secondary thermometry**

Mr. Bedford introduces the discussion with a brief summary of the present content of the document and of outstanding topics that WG2 expects to include. He emphasizes that, whereas all comment and criticism on the document is welcome, WG2 is particularly interested in receiving written or rewritten versions of new or existing topics for inclusion in the next draft. Such material should reach WG2 before the end of 1984.

There follows a discussion on the content and scope of the proposed monograph. Mr. Rusby and Mr. Crovini feel that the scope should be more restricted, otherwise the task may be too difficult for WG2 to fulfil. Mr. Schooley, on the other hand, thinks it should be continued as outlined because it will then be extremely useful to a wide audience. Mr. Bedford replies that part of the problem is that the terms of reference are too diffuse. WG2 was unsuccessful in obtaining more specific directions from the CCT two years ago. The discussion continues but no specific conclusion is reached as to the precise scope of the monograph. The President suggests that as much useful information as possible be included within the constraints of a reasonable timetable. Mr. Bedford says that WG2 hopes to complete a second draft in 1985 and to present a third draft to the 1986 meeting of the CCT.

## **7. Platinum resistance thermometers for the measurement of high temperatures**

The President opens with the remark that no agreement on a new scale is likely until a satisfactory HTPRT is developed. Mr. Schooley summarizes NBS experience. The HTPRT must, of course, be able to perform better than the alternative thermocouple or radiation thermometer. There is still considerable variability from thermometer to thermometer at NBS, but the better ones each reproduce a gold-point temperature from run to run, as calculated from a  $0^{\circ}\text{C}$ -Sn-Zn quadratic, to within 20 mK. It is important now to find a commercial thermometer that will perform at this level. Mr. Chattle, on the other hand, finds the performance (based on NPL experience) disappointing. He says that there is need for more intensive study of short-term drifts. At the NPL, after some difficulties, they now use a sodium-heat-pipe furnace with a single heater, and the thermometer is immersed in a graphite block with no auxiliary-silica-well protection. They experienced electrical interference problems and found large thermal emfs in the thermometer heads. In immersion tests at the higher temperatures, the thermometer resistance changed by the equivalent of 2 to 3 mK for 2 to 3 cm

change in immersion. They have used both ac and dc bridges with about a 2 mK difference at the gold point. After high-temperature immersion the thermometer is removed, allowed to cool naturally, and annealed one half hour at 650 °C and then one half hour at 450 °C before the water triple point is measured. Mr. Chattle wonders if the poorer performance results from the different techniques. Mr. Ling summarizes the Chinese experience, referring to document 50. Both shock resistance and long-term stability are good. Their estimate of the latter is obtained differently from that of Mr. Evans — not from variation in extrapolated temperatures but from simulated-use conditions. He wonders if leakage effects may be much less important if dc rather than ac measurements are used. The possible effects of time constants, electrical losses, eddy currents in the metals and so on make a thorough study of ac versus dc advisable. Mr. Morimura describes the work on Chino thermometers at the NRLM. 2.5 Ω thermometers have proved better than 5 Ω ones, and seem to be a reasonable compromise.

Mr. Crovini reintroduces the problem of contamination (presumably by Ni) in Inconel blocks. Mr. Ling says that they at the NIM certainly had better results in graphite than in Inconel — much shorter annealing times to obtain stability. Mr. Bonnier asks if, when a graphite block is used, a neutral gas flow is introduced to prevent burning of the graphite. For the IMGC experiments Mr. Crovini replies that this was not done, so the graphite was probably burning initially, but maybe not continuously as the content of CO<sub>2</sub> built up. Mr. Quinn comments that past experience with platinum-rhodium thermocouples shows very clearly that the presence of a reducing atmosphere must be avoided. Otherwise the platinum contaminates rapidly, although at rather higher temperatures than 1 000 °C of course, say near 1 400 °C. There follows considerable discussion of this problem by many members, especially of the possibility that the contamination may result from Inconel in the presence of a semi-reducing atmosphere. It is obvious that more experimental data are required. Mr. Crovini summarizes by saying that the problem is presumably not peculiar to Inconel but likely occurs with many metals (and refers, as an example, to Mr. Bedford's earlier comment regarding Cu). It will not be practicable to avoid using metal blocks, as for example Inconel-clad heat pipes, in experiments with HTPRTs, so it is very important that the problem be solved.

The President asks for comments on the need for horizontal operation of HTPRTs. Mr. Chattle says it is essential in order to compare them with radiation thermometers, even if it limits their upper temperature limit to the Ag point. Several members comment that insofar as the optical pyrometer is concerned a junction temperature at the Ag point introduces no special problem. Mr. Quinn says that Ag may be marginally more difficult to realize than Au because of the possibility of contamination by oxygen. Mr. Bedford points out that if Ag is the reference temperature for the pyrometer, the uncertainty

in the realization of high temperatures due to the realization uncertainty in the reference temperature will be marginally greater. The question of the need for horizontal operation of the HTPRT is debated at length. There is general agreement that the possibility of horizontal or vertical-but-inverted operation would be exceedingly useful.

To a technical question of Mr. Crovini, Mr. Chattle replies that the sheath on Chinese thermometers is 3/4 mm thick, and that Chino thermometers exhibit less bending than Chinese thermometers near gold-point temperatures.

The President asks for brief résumés of future planned experiments with HTPRTs, with the following replies :

NPL : comparisons between HTPRTs and radiation thermometers to the gold point, if horizontal operation is successful.

CSIRO : continue experiments with horizontal operation with a variety of thermometers including two 2.5  $\Omega$  Chino ones.

NRC : continue insulation-leakage measurements, and then some high-temperature performance tests (Mr. Bedford thanks Mr. Ling for the three thermometers that he has brought to Paris to go to the NRC).

BIPM : fixed-point calibrations 0 °C to Au to assess stabilities.

NBS : continue work on interpolating equations (and see earlier summary by Schooley).

PTB : continue stabilization tests (Mr. Thomas remarks that two of the Chinese thermometers were broken, but were successfully repaired).

ASMW : continue development of a HTPRT, begun two years ago (Mr. Maas comments that so far they appear to have achieved a stability of 1 mK in  $R_0$  after 100 hours at 1 000 °C).

IMGC : investigate stability, and intercompare thermometers both at fixed points and in a heat-pipe furnace from, say, 660 °C to 960 °C.

NIM : continue experiments described earlier.

NRLM : continue investigation of Chino thermometers, especially a group of 2.5  $\Omega$  ones.

## 8. Differences ( $T - T_{68}$ ) and ( $T - T_{76}$ )

Mr. Kemp opens the discussion with reference to document 8 which suggests values for the thermodynamic values of the defining fixed points below 273 K, and depicts ( $T - T_{68}$ ) from 14 K to 273 K with an uncertainty of  $\pm 2$  mK. Near 100 K, isotherm measurements of ( $T - T_{68}$ ) are systematically slightly lower ( $\sim 1$  mK) than gas-thermometer measurements. The isotherm values are more accurate but the gas-thermometer values accurately determine the shape. Mr. Hudson questions why ( $T - T_{68}$ ) is so large in the region 100 K-200 K since the IPTS-68 here is based upon Canadian gas thermometry. The

President and Mr. Bedford point out that the differences do not reflect only the uncertainty in the earlier work because the IPTS-68 was not strictly based on the gas thermometry; the original data had to be adjusted so as to fit predetermined fixed-point values, to merge with an average of four scales below 90 K, and to produce realistic values of three derivatives of  $W$  as a function of  $T_{68}$ . Mr. Soulen points out that the data displayed in document 8 are highly weighted to gas-thermometer determinations. It would be desirable to invoke other physical laws, for example noise thermometry.

Mr. Rusby questions if the irregular shape of  $(T - T_{68})$  is reflected in the difficulty of fitting a reference function  $W = f(T_{68})$ . Mr. Kemp and Mr. Durieux say «no, the values of  $(T - T_{68})$  are too small to materially affect the fitting exercise». There follows a discussion of whether some restriction should be placed on the degree of a new reference function. All agree that the degree should not be unnecessarily high but there were differences of opinion on how high would be too high.

The President asks about the small but systematic differences between the total-radiation measurements of NPL and the gas-thermometer results of NBS. Is there a chance of these being resolved, since the region near 273 K is of special importance? Mr. Quinn gives a detailed description of the NPL total-radiation experiment, emphasizing the origins and magnitudes of the various uncertainties. He concludes by saying the NPL measurements below 0 °C are effectively in agreement with CSIRO gas thermometry, and from 0 °C to 100 °C differ from NBS gas thermometry by a small, but just significant, amount. Mr. Quinn feels that the agreement between total-radiation and gas thermometry in this range is remarkable and inspires confidence that the values of  $(T - T_{68})$  are correct. To a question from Mr. Bedford as to the possibility of extending the temperature range of the total-radiation measurements, Mr. Rusby replies that he hopes the phoenix will rise from the ashes. He describes some technical and practical (lack of manpower) difficulties but has high hopes that the measurements can be extended to lower temperatures (— 100 °C) and perhaps even (and this is more difficult) to higher ones, but not above 200 °C. Mr. Quinn comments that as a result of the experience gained in his experiments, he is of the opinion that the uncertainties in total-radiation thermometry could be reduced by a factor of ten (i.e. to ~ 0.2 mK at 30 °C) with the expenditure of a great deal of money and time. Significant advances in methods for surface blackening and in allowing for diffraction effects have recently been made. Mr. Schooley describes the present status of the NBS gas thermometry, for which he is now responsible. There is no intent to make more measurements in the range previously covered by Mr. Guildner, except perhaps to reproduce the tin and zinc points. A new furnace for higher temperatures is being developed; all of the other equipment is working well. Present

difficulties revolve around the furnace and the bulb. There is a slow continuous decrease in pressure at the Al point ( $\sim 10$  mK/week), but not at the ice point, which may be associated with bulb expansion. To try and resolve this problem they are presently measuring at the Sn point, and cycling between  $0^\circ\text{C}$  and Sn, in order to achieve stability. The long-range plan is to extend the NBS measurements to higher temperatures — in particular to measure at the Sb, Al and Ag freezing points.

In reply to questions, Mr. Kemp indicates that the CSIRO gas thermometry will continue, he hopes up to  $40^\circ\text{C}$ .

There follows a long philosophical discussion (initiated by Mr. Schooley) as to the merits of publishing measurements of thermodynamic temperature without reference to  $T_{68}$ . Instead of producing  $(T - T_{68})$  one could simply produce, for example, platinum resistance as a function of  $T$ . To intercompare experiments one would have to circulate particular thermometers, or interrelate different thermometers. The latter is, in effect, what is done now with  $T_{68}$ , with all its attendant difficulties arising from the irregularity in  $(T - T_{68})$  and the large uncertainties associated with the platinum-rhodium thermocouple. The general conclusion is that there is no better way than reporting  $(T - T_{68})$ .

Mr. Quinn then draws attention to the shape of the curve of  $(T - T_{68})$  versus  $T_{68}$  at  $630^\circ\text{C}$ . The discontinuity in slope at  $630^\circ\text{C}$  may be incompatible with that measured in earlier thermocouple and PRT experiments. Measurements of  $(T - T_{68})$  by Coates (1982) are somewhat discrepant with those of Jung (document 5) and of Bonhoure (document 21), but agree better with existing estimates of the slope discontinuity. Mr. Bedford comments that existing estimates of the magnitude of the discontinuity are too imprecise to be of use in resolving the differences between Coates and Jung. Mr. Crovini says the magnitude of the discontinuity has been estimated several times and found always to be between 0.1 % and 0.2 %. The newly reported values of  $(T - T_{68})$  imply a discontinuity nearer 0.4 %, so there is a difficulty that must be resolved. Mr. Rusby reports that the results of Mr. Coates should still be considered provisional, so it is premature to speak of a discrepancy with Mr. Jung. Some corrections to the NPL provisional numbers have still to be calculated and these may help in resolving the difficulty. He expresses the opinion of Mr. Coates that the region near  $630^\circ\text{C}$  should be investigated in some detail. There is general agreement that more information is required in this temperature range.

Mr. Kemp asks the CCT to encourage more study of the Cu-Ag eutectic melting point. There is reason to believe it may be reproducible to within 2 mK and, if so, it can be very useful in studies of PRT interpolation equation.

## 9. Temperatures below 0.5 K

The question of whether the new IPTS can, and should, be defined below 0.5 K was also discussed at the last session of the CCT\*.

The President mentions document 19 on the NBS temperature scale in the range 15 mK to 200 mK and asks for comments.

Mr. Soulen says that, looking at difficulties which experimentalists have in measuring temperatures in this range, it would not be a bad idea for the CCT to do something. Work is in progress, for example, on superconductive reference points (NBS) and noise thermometry (NBS, PTB Berlin, KOL). Mr. Soulen considers it to be premature to decide now on a lower limit of the scale near 0.5 K.

Mr. Thomas interjects that the question of the lower limit of the IPTS was discussed at the last meeting and the CCT decided that no practical scale was necessary below 0.5 K. Mr. Hudson responds that nothing is ever settled that finally within the CCT.

Mr. Hudson says that any CCT recommendation for the thermodynamic temperature values of fixed points above 0.5 K could also cover the range below this temperature. This would, of course, be rather different from formally constituting a scale.

Mr. Schooley emphasizes the interest of the scientific community in good temperature measurements below 0.5 K.

The President asks whether a list of recommended fixed-point values would be sufficient or would a temperature scale be required.

Mr. Swenson says that such a list could be added to a list of supplementary reference points of the IPTS, e.g. the low-temperature superconductive points would be a natural addition to superconductive points above 0.5 K. Mr. Soulen mentions the melting curve of liquid  $^3\text{He}$  as a possible basis for a temperature scale. On a question by Mr. Bonnier whether it is possible to contemplate a scale based on superconductive transition points and an interpolating instrument, Mr. Soulen remarks that the main interpolating device has been the magnetic thermometer based on cerium magnesium nitrate but there are difficulties with this procedure.

The President concludes the discussion by saying that it looks as though the CCT should look seriously at the range below 0.5 K and mentions that this matter could be further discussed when the CCT recommends tasks for the Working Groups later (*see* section 12).

## 10. Methods of interpolation between fixed points

Document 51 (*see* Appendix T 2, p. 128) is taken as a starting point for the discussion. Mr. Schooley asks why there is such a big ballooning

---

\* *BIPM Com. Cons. Thermométrie*, 14, 1982, p. T 94.



of the measured non-uniqueness of the PRT scale just below 273 °C. Mr. Kemp answers that this is probably partly due to experimental difficulties, i.e. thermal gradients in the comparison block. Some improvement would accrue by calibrating the thermometers at the Xe triple point but this, of course, would provide only one point on the non-uniqueness curves. When explicitly asked by Mr. Bonnier if part of the non-uniqueness found in the Ward-Compton and CSIRO comparisons of capsule thermometers can be due to thermal gradients in the comparison block, Mr. Kemp confirms that this is so. He adds that Mr. Sakurai and Mr. R. C. Kemp at CSIRO are making new measurements with what they hope will be a block with a more uniform temperature.

In reply to a question by the President, Mr. Kemp points out that, although there is little doubt that a single interpolation function for the whole region from 14 K to 273 K gives the best results and would handle a larger variety of thermometers, the use of interpolation functions for parts of the range will give acceptable results and has the advantage that thermometers which are to be used down to, say, 84 K or 54 K do not have to be calibrated all the way down to 14 K.

Mr. Crovini points to the importance of having a precise short-range, interpolation procedure available for the range — 50 °C to 50 °C. In comparing Ga cells in various laboratories the largest uncertainty came from the fact that the PRTs used for measuring the temperatures had to be calibrated up to the Sn and Zn points. Mr. Kemp is a little surprised that errors in the calibrations at the higher temperatures affect the measured temperature of the Ga point appreciably. He suggests that any such short-range interpolation with extra fixed points, as proposed by Mr. Crovini, be something special and not part of the scale definition.

Mr. Crovini, however, says that, for example, people concerned with electrical standards require, for temperature control well within 1 mK, PRTs that are calibrated very accurately at room temperature. They also desire that these calibrations be on the official scale.

Mr. Rusby points out that it may be desirable to have also an alternative recommended method for calibration of a PRT at triple points only, i.e. without including hydrogen boiling points, but, in general, he warns against a proliferation of methods. Mr. Swenson would prefer that more fixed points be specified than are needed in the primary definition of the scale so that least-squares fitting procedures can be used. This would also satisfy Mr. Crovini's requirements in that a short-range interpolation (without least-squares fit) can be made using the Hg and Ga points. Mr. Kemp can see the usefulness of having additional fixed points; in fact, he points out, CSIRO always includes a Cd point in its calibrations of long-stem PRTs, but he does not see that they should be part of the scale itself. Mr. Rusby does not think that there are fixed points available which would improve



the scale over its whole range and which are not yet used as defining fixed points; the Ga point could replace the steam point for the calibration of capsule thermometers, which are used mainly at temperatures below 50 °C. However it would not improve, and would probably slightly degrade, the calibration of long-stem thermometers. Concerning other points, the Hg point is too close to the triple point of water and the triple point of N<sub>2</sub> too close to that of O<sub>2</sub> to be of much use. It would be important to have an extra point near 40 K but that is not available. Mr. Kemp points out that the use of a Ga point is not necessary, or advisable, for measuring the  $\alpha$  coefficient for capsule PRTs. It is very easy to obtain the  $\alpha$  coefficient by comparison with a calibrated long-stem thermometer in a water bath at approximately 100 °C. Mr. Blanke also is of the opinion that a Ga point is not necessary for the primary definition of the scale. Mr. Bonnier remarks that, firstly, the comparison of capsule and long-stem PRTs in a liquid bath is not so easy; secondly, it is not consistent to mix freezing points and stirred liquid baths to determine  $\alpha$ ; thirdly, the  $\alpha$  coefficient could be determined from a measurement at the Xe point. This would be attractive not only because for the calibration at the Xe point the same method and cryostat will be used as for the other low-temperature fixed points but also because adding the Xe point to the scale would reduce considerably the non-uniqueness between 84 K and 273 K.

Mr. Quinn asks what the non-uniqueness of an interpolation using the triple points of Hg, H<sub>2</sub>O and Ga would be in the range between these points. Mr. Crovini answers that few data are available but he feels sure that it would be better than with the IPTS-68, particularly because a calibration scheme that does not involve heating the PRT above 100 °C would almost certainly give a better reproducibility of the thermometer.

Mr. Bedford mentions that Mr. Ancsin at NRC uses the In point for obtaining the  $\alpha$  coefficient of capsule thermometers. Mr. Ancsin will soon publish results of an intercomparison of a number of capsule and long-stem PRTs between 0 °C and the In point which will give information on non-uniqueness.

As a point of principle, Mr. Schooley would like to see only one well-defined primary scale; and any alternative calibration procedures (for example, that proposed by Mr. Crovini for covering a narrow temperature range) should be treated as a secondary realization of the scale. He feels that the example of temperature determinations for electrical measurements, given by Mr. Crovini, falls under the heading of scientific research in which no legal aspects of temperature scales are involved. Mr. Crovini does not agree with this; he can see that maintenance of electrical standards, for which the precise temperature measurements are required, is a metrological activity. The President points to the contractual requirements that may be involved.

Mr. Kemp proposes that the merits of interpolation procedures

which give practically the same result as the one chosen for the scale definition should be investigated for the next meeting of the CCT. The President agrees that this would be useful. One might meet several of the foregoing objections by allowing an alternative definition but specifying, for example, that the PRT never be used above 50 °C. There would then, of course, not be a unique scale.

Mr. Crovini remarks that in the comparison of Ga cells at IMGC, INM and NPL, organized in the EEC, the temperatures of the cells were measured with a common thermometer circulated with the cells and with local thermometers calibrated in the various laboratories. Mr. Crovini is of the opinion that the major source of uncertainty in the temperature measurements with the local thermometers came from propagation of calibration errors at the Sn point and from irreproducibilities of the thermometers because they were heated to the temperatures of the Sn and Zn points. Mr. Kemp suggests that better results could be obtained if each laboratory would improve its PRT thermometer calibrations. He recalls that also in the case of the Ward-Compton comparisons of IPTS-68 realizations in various laboratories, several shortcomings in fixed-point realizations were found. Mr. Chattle, commenting on the Ga cell comparisons, mentions that with the local PRTs differences of about 0.5 mK were found. With the circulated PRT these differences were slightly smaller. When asked about the estimated accuracy of the Sn-point calibrations, Mr. Chattle guesses about  $\pm 1$  mK. The effect at the Ga point of this uncertainty would be 0.3 mK to 0.4 mK. The President and Mr. Bedford remark that the NRC realization of the Sn point has a reproducibility of  $\pm 0.2$  mK. Mr. Crovini points out that the total uncertainty due to the calibration at the Sn point involves not only the reproducibility of this point itself but also the accuracy of a particular resistance measurement and the stability of the thermometer, which is always a problem. When asked by Mr. Bloembergen what the difference between Ga points was when measured with the same PRT thermometer, Mr. Chattle estimates this to be 0.2 mK to 0.3 mK. Mr. Bonnier adds that the standard deviation was 0.13 mK. Mr. Bedford mentions that Mr. Ancsin at NRC is measuring the difference between PRTs calibrated on the IPTS-68 and finds that non-uniqueness balloons to  $\pm 0.5$  mK midway between the triple points of water and Sn.

Mr. Pavese remarks that problems similar to those mentioned by Mr. Crovini for the determination of the Ga point were encountered when the values of the triple points of N<sub>2</sub> and Ne on the IPTS-68 had to be determined. Mr. Schooley remarks that it would be useful to include one of the PRTs used in the intercomparison of triple-point cells in gas-thermometer determinations of thermodynamic temperatures in order to get thermodynamic temperatures of all of the triple points in the most direct way. Mr. Pavese agrees that this would be useful for determining the best thermodynamic temperatures of the triple

points of  $N_2$  and Ne. It was difficult to assign such values to within better than 1 mK, although the group of cells did define the triple points quite well, because of the non-uniqueness of the IPTS-68.

Hereafter there is a further extensive discussion on the extent to which one would benefit from the more precise temperature measurements near room temperature that can be obtained when the PRT is also calibrated at the Ga point. Mr. Durieux remarks that a specific realization of the scale, such as obtained through interpolation between the Hg,  $H_2O$  and Ga points, can in itself have a smaller non-uniqueness than other allowed realizations of the scale; but adding alternative realizations will, in principle, always increase the total non-uniqueness of the scale. Mr. Bloembergen emphasizes that if the Ga point is measured with, say, ten PRTs, the average  $T_{68}$  value would have an uncertainty smaller than the non-uniqueness of IPTS-68 at this temperature (in the sense that the average of ten other PRTs would very likely give nearly the same  $T_{68}$  value). Mr. Bedford remarks that a single PRT, however, could still give a different value approximately within the non-uniqueness of the scale.

Mr. Kemp stresses that calibrations of thermometers on the IPTS can be checked by measuring at an intermediate point, such as the Ga point, if a best value of this point on the scale is known, while Mr. Crovini stresses the advantage of making the Ga point part of the scale definition. He mentions that in the past the Sn point was made part of the IPTS using a best value based on the average  $T_{68}$  value from a number of thermometers, although there was the danger that a single measurement of the Sn point with a thermometer calibrated at the steam point would give a slightly different temperature. Finally, Mr. Schooley says that he is sure that if the Ga point is included in the next scale, as well as the triple point of water, the Cd point, the In point and so on and so forth, Mr. Kemp will be able to design a reference function that puts nodes at all of these points, but that it is entirely possible that Mr. Crovini will come up with another material, phenoxybenzene or something, the addition of which would decrease the non-uniqueness of the scale even further in a range where scientific interest or some other purpose makes an extremely precise scale desirable.

## 11. The new IPTS : current situation

The President mentions that documents 27 and 48 deal with this subject and asks Mr. Quinn to open the discussion. Starting at the low-temperature end of the range, Mr. Quinn recalls the discussion held earlier in the meeting on the lower limit of the new IPTS. At some time the CCT has to decide whether the scale should be extended below 0.5 K, or whether perhaps only fixed points could be given for

this range. It seems to have been agreed that the helium-vapour-pressure scales will be the basis of the scale between 4.2 K and about 0.5 K. For the range from 4.2 K to the lower limit of the PRT range, three suggestions have been made: an interpolating gas thermometer scale (4.2-24 K), a magnetic thermometer scale (4.2-13.8 K), and a rhodium-iron resistance thermometer scale (4.2-13.8 K) based on fixed points which could include superconductive transition points. For the rhodium-iron thermometer there is the problem that there is only one manufacturer. Mixed with the question of which of the three methods is the best is the decision what the lower limit of the PRT range should be. A proposal had been made, at a combined meeting of WG1 and WG4, with the President of WG3 present, in October 1983. According to this proposal the IPTS between 4 K and 25 K would be defined as realizable either in terms of an interpolating gas thermometer, or in terms of an interpolating gas thermometer from 4 K to 14 K and PRTs above, the PRTs being calibrated at 14 K, 17 K, 20 K, 25 K and higher temperature fixed points (*see* Appendix T 2, p. 128). One important point is that a PRT scale above 25 K could be realized by means of triple points only, if a slight increase in the non-uniqueness is acceptable. Also, above 25 K, it has been suggested that more than one interpolation formula for the PRT be allowed in certain ranges, e.g. to allow the use of long-stem thermometers down to 84 K and capsule thermometers above 0 °C, and to get a calibration method for PRTs in a narrow range around room temperature with a smaller internal non-uniqueness than that of the IPTS as a whole in that range. As for the HTPRT, much remains to be done on the thermometers themselves and on the interpolation procedure. However, Mr. Quinn is of the opinion that, if these thermometers can be shown to be good up to the Ag point, nothing at all should stop the CCT from putting the upper limit of the PRT range at that point. Regarding the question of thermodynamic temperatures, Mr. Quinn says that up to about 460 °C a curve of  $T - T_{68}$  can be drawn without undue worry. Noise thermometry and radiation thermometry in different regions have confirmed the gas thermometry. Between 460 °C and 630 °C more confirmation of results of radiation thermometry is needed because there is some discrepancy between the preliminary results reported. More measurements are needed in the range 630 °C to the Ag point. An enormous amount of progress in many fields has been made since the last CCT meeting.

Before asking for comments on Mr. Quinn's introduction, the President points out that there was a look of horrified dismay and disagreement on Mr. Kemp's face when an upper limit of 14 K for the magnetic thermometer was suggested, and this, unfortunately, escaped the sound recording of the meeting.

Mr. Kemp recalls that, during lunch the previous day, someone pointed out that, for a <sup>3</sup>He vapour-pressure scale, 0.6 K would be a

more practical limit than would 0.5 K. The President observes that a decision of that nature could be made at any time up to the last moment.

Mr. Schooley draws attention to the recommendations for the new IPTS in document 18. As a general remark Mr. Schooley urges full publication of measurement results so that the CCT does not have to make decisions on the basis of unpublished data. The President agrees, but distinguishes between decisions and considerations by the CCT. In these considerations the CCT should naturally take notice of new developments and data even if they are not yet fully published.

Mr. Rusby asks if, in view of the fact that there are so many outstanding problems with HTPRTs, the CCT should not be realistic and go one step further than Mr. Quinn's remark and recognize that the junction with the optical pyrometer will be at the Ag point. Mr. Ling also feels that it would perhaps be advisable to consider the Ag point as the junction point. Further, he suggests that an investigation be made on the non-uniqueness of a PRT scale based on HTPRTs calibrated at the freezing points of Au, Ag, Al, Zn, Sn, by making intercomparisons of the thermometers at 50 °C intervals. Mr. Ling hopes that the CCT will assign a provisional interpolation formula for this purpose. Mr. Morimura thinks that there is still the possibility to have the junction point at the freezing point of Au and that it is therefore too early to decide on the Ag point. Mr. Thomas says that Mr. Jung at PTB is convinced that the Ag point is the highest temperature to which the HTPRT should be used. Before further discussion on the current situation of the new IPTS until later in the meeting, the President makes one more remark on the use of HTPRTs, reminding the Committee that optical pyrometrists have asserted that HTPRTs must have the ability to be used horizontally or, at the very least, in an inverted position.

Mr. Quinn asks for comments on his remarks about three possible choices for the definition of the scale between 4.2 K and 13.8 K or 25 K. In reply to a question by Mr. Bedford as to whether there are sufficient fixed points available to make the RhFe thermometer a viable possibility, Mr. Rusby answers that for the RhFe thermometers which he has available from only one source the non-uniqueness of the scale between 4.2 K and 14 K would be about 0.2 mK with calibration points below 4.2 K (vapour pressures or superconductive fixed points) and above 13.8 K (from a PRT) and with the Pb point included. Omitting the Pb point would only increase this figure to 0.4 or 0.5 mK. Mr. Rusby, and also Mr. Kemp, feels that the use of the RhFe thermometer for the definition of the scale would be a technical possibility. However, Mr. Rusby likes to repeat what he said earlier, viz., that gas thermometry, with which one can define completely for all time an interpolation between 4.2 K and 25 K, is an extremely powerful method. To a question by Mr. Schooley as to whether the

use of a noise thermometer as a thermodynamic interpolation instrument in this range might be considered, Mr. Soulen replies that this would probably be less convenient.

Mr. Schooley re-emphasizes that he would hesitate to base the scale below 1 K on  $^3\text{He}$  vapour pressures because of the difficulty in getting sufficient precision in the pressure measurements in this range. In answer to a further remark of Mr. Schooley on this subject, Mr. Swenson recalls that the  $^3\text{He}$  vapour pressure equation between 0.5 K and 1 K is not so much based on thermodynamical calculations as on direct measurements on a magnetic temperature scale.

Mr. Kemp remarks that the magnetic thermometer has been used by Cetas at CSIRO up to 83 K and by Mr. Swenson up to 35 K. Mr. Swenson feels, nevertheless, that gas thermometry is the better choice for an IPTS between 4.2 K and 25 K. Mr. Kemp knows no one who is actively engaged in magnetic thermometry in this temperature range. Mr. Rusby remarks that a magnetic thermometer may be easy to set up but it is also easy to do badly. He adds that at NPL the gas thermometry project of Berry was complex but after all problems of pressure measurements and corrections to be applied were solved for the isotherm measurements, constant volume gas thermometry, by comparison, was almost trivial.

Mr. Quinn expresses the opinion that there is general agreement that the interpolating gas thermometer be used in the new scale. However, Mr. Kemp feels that the use of the RhFe thermometer is a very inexpensive way of getting a scale with the one objection that the thermometer may not be available in the future, because there is only one commercial supplier. Mr. Hudson congratulates Mr. Kemp for this conclusion and recalls that WG4 already in its first report in 1982 came to the conclusion that a RhFe wire scale would be the best scale except for the fact that a wire scale is unacceptable. Mr. Kemp answers that Mr. Rusby has now expressed the opinion that the RhFe thermometer can be used as an interpolating instrument with fixed points below 4.2 K and above 13.8 K and with or without one additional point at 7.2 K. Mr. Hudson notes that this possibility was also set forth in the 1982 WG4 report, as third best, essentially equal to the interpolating gas thermometer except for the problem of procurement of material. Mr. Kemp mentions also that a PtCo thermometer with properties similar to those of the RhFe thermometer is made in Japan. Mr. Soulen suggests that the company that makes PtCo thermometers be encouraged to make RhFe thermometers also and vice versa. Mr. Soulen inquires also about the use of the magnetic thermometer between 13.8 K and 24.5 K. Mr. Hudson answers that, given the present technology, this would not be practical.

Hereafter, some remarks are made regarding document 29 which is a draft for a note to the CIPM, in answer to a request for information on the IPTS. Mr. Schooley remarks that the non-uniqueness of the

IPTS-68 between fixed points is given in paragraph 2.5 of document 29 as being 1 mK to 2 mK and asks if these values are correct. Mr. Rusby and Mr. Kemp, referring to the Ward-Compton comparisons of PRTs between 14 K and 273 K, reply that this depends on whether data for extreme thermometers should be included; if one does this the non-uniqueness may be as high as 3 mK. Commenting on the statement in paragraph 3 of document 29 that differences  $T - T_{68}$  are reasonably well known between 630 °C and the gold point, Mr. Soulen remarks that there is still an uncertainty of about 0.1 K in these differences near 630 °C. Mr. Rusby draws attention to paragraph 2.4 which, as it stands, does not describe the IPTS-68 correctly.

## 12. Future work and membership of the Working Groups

The President reminds members that the CCT has now four Working Groups, the tasks and membership of which were defined in 1980\*.

He gives a short summary of the present status of the work concerning these tasks:

WG1 has produced the monograph « Supplementary Information for the IPTS-68 and the EPT-76 » which was published by the BIPM in 1983. It will presumably be updated in a few years. The main task of WG1 will be continuing the preparation of a replacement IPTS and making available a tentative version of its text. Sometimes there are also other documents to be prepared, such as the answer to a specific question of the CIPM (see document 29).

WG2 has produced a paper on « recommended values for a selected set of secondary reference points » which will soon be sent to *Metrologia*\*\* for publication. Their work on secondary temperature measurements, though excellently begun, obviously will constitute an enormous task for the next two years at least.

Regarding WG3 and WG4, the President proposes that they remain responsible for the scale above and below the lower limit of the platinum thermometer range, respectively. It seems, however, that the knowledge of thermodynamic temperatures is now so far advanced that the matter of unifying the available information becomes important. The President proposes that the task of providing information on thermodynamic temperatures in the entire range between 0.5 K and the gold point, or the silver point, be given to WG4. It might be considered as a work of some urgency that a *Metrologia* paper on recommended values of  $T - T_{68}$  be prepared.

The President is of the opinion that the membership of WG1 and

---

\* BIPM Com. Cons. Thermométrie, 13, 1980, pp. T 38-40.

\*\* Metrologia, 20, 1984, pp. 145-155.



WG4 is adequate for the task as described above. For WG3 it is different insofar as three of its members will not be available much longer, either because of retirement (Mr. Kemp and Mr. Thomas) or change of interest (Mr. Coates). The President asks for further comments on the tasks and membership of the Working Groups.

Mr. Kemp is a little concerned about assigning interpolation formulae for platinum thermometers to one WG and thermodynamic temperatures to another because they are closely related. The President answers that Mr. Kemp himself has shown that the knowledge of thermodynamic temperature is well advanced; interpolation procedures will be negligibly modified by any future refinement in thermodynamic temperature values. Mr. Kemp emphasizes that intense cooperation between the two Working Groups is necessary and suggests that meetings of these Working Groups between CCT meetings be held at the same place. Mr. Kemp also says that there is a nasty gap in knowledge of thermodynamic temperatures in the HTPRT range. Once this is sorted out it will be relatively straightforward to create the interpolation expression, because theoreticians believe that the resistance versus temperature relation of platinum is much simpler at high temperatures than at lower temperatures.

Mr. Soulen asks if values for superconductive reference points between 0.5 K and 9 K and the question of whether or not the scale be terminated at 0.5 K should be dealt with by the existing Working Groups. Mr. Soulen could imagine the formation of a fifth Working Group with members from PTB (Berlin), NBS, the low temperature laboratory in Finland, and KOL.

Mr. Crovini stresses that good communication between Working Groups is essential and asks whether suggestions for fixed points in the PRT range are within the terms of reference of WG3. The President confirms that this is certainly so. Mr. Rusby remarks that the present membership of WG4 is biased towards low temperatures and asks whether it would not be better to leave the determination of thermodynamic temperatures in the PRT range with WG3 and add the superconductive reference points and the range below 0.5 K, and Mr. Soulen himself, to WG4.

When asked by the President for specific suggestions, Mr. Soulen says that either WG3 could deal with all fixed points, including the superconductive transition points above and below 0.5 K, and WG4 with thermodynamic temperature determinations down to very low temperatures, or a fifth WG could be formed specifically for the temperature range below 0.5 K.

There is some discussion about the optimum size of a Working Group and the communication between WGs and experts who are not members. Mr. Soulen feels that communication could be improved and data would become available sooner if, for the next few years, annual meetings of the CCT were held, each preceded by parallel sessions of



the Working Groups. The President agrees that annual meetings of the Working Groups are desirable but feels that annual meetings of the CCT would be difficult to arrange.

In answer to a question by Mr. Schooley about high-temperature instruments to be considered by WG3, the President says that only the HTPRT has to be considered. No changes are expected for the optical pyrometer and such instruments as optical-fibre thermometers are not likely to be relevant to temperature scales. Mr. Crovini adds that the optical pyrometer was mentioned in the 1980 terms of reference of WG3 for two reasons, one being the intercomparison of HTPRTs with the optical pyrometer, the other being the determination of thermodynamic temperatures.

Regarding the two possibilities for dealing with the very low temperatures mentioned by Mr. Soulen, Mr. Hudson suggests that WG4 could satisfactorily deal with this range if Mr. Soulen were added to WG4. Mr. Durieux can easily keep in contact with Mr. Frossati at KOL and WG4 can acquire information from PTB (Berlin) and the Finnish low temperature laboratory in the normal course of its operation.

Mr. Bonnier wonders if the linkage among WGs is strong enough between the CCT meetings. He suggests that the Chairman of each WG send any WG document also to the Chairmen of the other Working Groups.

After a tea break the meeting agrees on the following terms of reference and on the membership of the Working Groups.

#### **Terms of references of Working Groups :**

- WG1: 1) Preparation of a tentative version of the text of the new IPTS.  
2) Preparation of other documents when this is required.
- WG2: Preparation of a document on secondary measurement techniques for determining international temperatures.
- WG3: 1) Choice of fixed points and interpolating instruments (in particular the HTPRT) for the new IPTS.  
2) Study of interpolation procedures for the IPTS in the PRT range.
- WG4: 1) Studies related to the temperature scale below 24 K (fixed points and interpolating instruments).  
2) Providing information on thermodynamic temperature below 1 064 °C.

### Membership of the Working Groups

WG1 : Mr. Preston-Thomas (Chairman) Mr. Bloembergen Mr. Quinn	WG2: Mr. Bedford (Chairman) Mr. Bonnier Mr. Maas Mr. Pavese
WG3 : Mr. Crovini (Chairman) Mr. R.C. Kemp Mr. Ling Mr. Schooley	WG4: Mr. Hudson (Chairman) Mr. Durieux Mr. Rusby Mr. Soulen Mr. Swenson

Mr. Crovini is authorized to add Mr. Sakurai to WG3, after consultation with the President, when it is determined that Mr. Sakurai is willing to serve and is able to attend meetings of the WG, if not also meetings of the CCT.

Thereafter, the President proposes that the CCT decide if there is any urgent experimental work to be done. He mentions two areas where this is evidently so: further study of the HTPRT and the determination of thermodynamic temperatures in the range around 630 °C. Mr. Kemp mentions that specific recommendations regarding further work to be done are listed in the report of WG3 (document 53) in the field of thermodynamic temperature measurements above 14 K and for HTPRTs. Mr. Kemp would like to add to this a recommendation for further investigation of the CuAg eutectic melting point as a useful reference point for the HTPRT.

Mr. Quinn, referring to earlier discussions during this meeting, recommends that measurements be made of the non-uniqueness of the IPTS-68 between fixed points in the PRT range from 0 °C to 419 °C or 630 °C. The measurements could involve intercomparisons in a block of a number of PRTs or the calibration of the thermometers at fixed points between the defining fixed points. Mr. Kemp prefers calibrations at intermediate fixed points and suggests, as a first effort, measurements at the Ga, In and Cd points. Mr. Bonnier remarks that such measurements would also provide information on the temperatures of these fixed points on the IPTS-68. If results from different laboratories are compared, care has to be taken of possible differences in temperatures realized in different fixed-point cells.

Asked by Mr. Crovini about the NRC program, Mr. Bedford says that Mr. Ancsin is intercomparing capsule and long-stem PRTs up to the In freezing point. The latter is realized with a small sealed triple-point cell. His intercomparisons are probably limited to range up to the In freezing point. He has run about 20 capsule thermometers of perhaps four different types and 10 long-stem PRTs of two different types through this program. The President emphasizes the importance

of including as many types of PRTs as possible in the project. Mr. Schooley asks whether it would be useful if Mr. Mangum at NBS could distribute half a dozen Ga cells and Cd cells among laboratories. The President answers that for NRC it would certainly be profitable to receive these. Mr. Rusby suggests that also the Sb freezing point be included. Mr. Quinn mentions that not all PRTs are suitable for measurements at the Sb point and Mr. Crovini remarks that problems of electrical leakage may occur at this temperature. Mr. Quinn regrets that there is no possibility for doing these measurements at the BIPM and proposes that a more definite suggestion be made on how the work can be done. It is agreed that, before the next CCT meeting, as many laboratories as possible will undertake to examine non-uniqueness from 0 °C to 470 °C. It is suggested that, as a start, measurements of some of the Ga, In and Cd freezing points be made with as large a variety of PRTs as possible\*.

At the end of the discussions on the Working Groups and their tasks, and on necessary experimental work, the President asks whether the CCT should make any recommendations to itself or to the CIPM on these matters. The President proposes a strong recommendation that, for the Working Groups to function effectively, there should be meetings of each WG at least once between CCT meetings.

### 13. Work at the BIPM

Mr. Bonhoure describes the work in progress in thermometry in the BIPM laboratories, the major portion of which is concerned with spectral radiation measurements of  $(T - T_{68})$  in the temperature range from about 420 °C to 630 °C. He also describes the facilities for calibration of thermometers from the Ar point to the Zn point, and of thermocouples from 630 °C to the Au point. Intercomparison of triple-point-of-water cells of many types of manufacture has shown agreement to better than 0.1 mK.

Following the close of the meeting many CCT members visit the thermometry laboratories.

### 14. Publication of documents

The President recalls that the accepted procedure is for the BIPM to publish the Report of the meeting and the reports of the Working

---

\* Following the formal closing of the CCT meeting Mr. Bedford was asked, and after consultation with several members agreed, to coordinate this work.

Groups; however, these last are not published if they are only provisional drafts of documents to be published formally at a later time (such as interim drafts of the monograph on Supplementary Information). Other documents are published only in exceptional cases but all are listed and are available from the archives of BIPM.

## 15. Miscellaneous subjects

There are no questions raised under this item.

### 16. Does one need a new IPTS? Proposition of Mr. Durieux

Mr. Durieux remarks that, instead of defining an international practical temperature scale, the CCT could give a catalogue of methods for measuring thermodynamic temperature in the various temperature ranges with various levels of accuracy. This would give both the CCT and the user more flexibility and would make the somewhat awkward procedure of defining a new physical quantity «international practical temperature» unnecessary. It would also be more in line with the situation for other physical quantities like length, where only the fundamental SI unit is defined although measurements of lengths in terms of this unit are probably far from trivial.

Mr. Hudson remarks that it is perhaps fair to say that Mr. Durieux's suggestion takes to the ultimate conclusion the idea, expressed in document 37, that the CCT should relax a little on matters of non-uniqueness and scale overlap. He repeats that in the case of length, the definition of the unit is the end of the matter as far as ultimate formality is concerned. After that one addresses the practical question of how people in the real world would take advantage of that definition, and some recommendations, e.g. recommended frequency values, are presented.

The President recalls that in earlier meetings of the CCT it was suggested that if we replace the present IPTS, the new scale would perhaps last another 30 years and that thereafter the proposition put forward by Mr. Durieux would indeed become a reality.

In response to some further general comments, Mr Hudson says that he thinks there may be some misunderstandings: Mr Durieux's approach is, one might say, a philosophical one in that he wishes to put the kelvin on the same footing as other units. There is no thought there, he is sure, that the CCT should cease to offer to the public a mise-en-pratique. The latter, perhaps, could more readily incorporate flexibility than could the text of a revised IPTS.

Mr. Rusby would hesitate to enter into a philosophical discussion but emphasizes that for international cooperation in thermometry the industrial and scientific communities need a reference. He emphasizes that an IPTS is needed and that if the CCT breaks away from the tradition of one unique definition, the number of allowed alternatives should be strictly limited. Alternatives should be included only when there are important reasons for doing so such as, e.g., the necessity of having a very reproducible scale in the narrow range from  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  to  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  and, possibly, realizations of low temperature scales between 14 K and 24 K by methods easier than the one proposed by Mr. Kemp.

Taking a more practical point of view, Mr. Swenson remarks that the emphasis that the CCT has put on uniqueness is just illusory because it exists only at the fixed points and not in between. It would be very useful to have more data on uniqueness, e.g., between  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  and  $460\text{ }^{\circ}\text{C}$ . In principle, an excess of fixed points and alternative definitions of the scale could provide calibrations which are « more unique » among themselves than the IPTS is now. Mr. Kemp says that a fair amount of data on the non-uniqueness of the IPTS in the platinum thermometer range is already available, e.g., from calibrations of long-stem thermometers. CSIRO always measures a Cd point before and after calibrations; the thermometers include Leeds and Northrup, Chinese, and Japanese ones.

Coming back to the principle of having an IPTS or a number of recommended procedures for measuring temperatures, Mr. Hudson repeats that the accuracy of each approved procedure should be specified. The President, however, thinks that if a dozen or more procedures are used it will be almost impossible to track them down later. Mr. Kemp emphasizes that international trade requires that the same scale be used everywhere. Also Mr. Rusby and Mr. Crovini stress the importance of having a well-defined temperature scale. Mr. Quinn agrees with Mr. Kemp that international trade and also comparisons between national laboratories require the use of a common international scale. In a further discussion, Mr. Bloembergen emphasizes that in the case of other physical quantities one has not defined international scales. Mr. Quinn thinks that in many of those cases the quantity can be measured with the reproducibility required by the user but this is not so for thermodynamic temperature. Mr. Bloembergen answers that we are approaching this stage also in the case of thermodynamic temperature.

As a conclusion of the discussion, the President remarks that, although in the future one will approach a situation in which an international temperature scale is no longer required, most people around the table are of the opinion that this stage has not yet been reached.

### 17. Next Meeting of the CCT

It is agreed that the CCT shall meet again in 1986. A convenient time will be late May or early June.

\*  
\* \*

Before closing the meeting, the President thanks all the participants for their cooperation, and the Director and the staff of the BIPM for their help before and during the meeting.

Received : December 11, 1984  
and in revised form February 20, 1985

---

**APPENDIX T 1**

---

**Working documents submitted to the CCT at its 15th Meeting**  
(*see the list of documents on page T 39*)

---

## APPENDIX T 2

---

### **Report of a meeting of Working Groups 1 and 4** (with the Chairman of WG3 participating) at NPL on October 24, 1983

(Document CCT/84-51)

---

Those present were: H. PRESTON-THOMAS, T. J. QUINN (WG1); L. CROVINI (WG3); R. P. HUDSON, M. DURIEUX, R. L. RUSBY (WG4).

There were some extremely useful documentary submissions to this meeting from W. R. G. Kemp and C. A. Swenson.

#### **Purpose**

This meeting was called specifically to attempt to reach an agreement on two outstanding points of contention concerning the proposed revised IPTS: the lower temperature limit of the platinum resistance thermometer range and the method (or methods) to be used to define the IPTS between that lower limit and the helium vapour pressure region.

Some other matters, such as the current work on thermodynamic temperature measurement in various temperature regions and progress in testing and production of high temperature resistance thermometers were also discussed.

#### **Low Temperature Scale Requirements**

The group was of the opinion that in practice, over the temperature range under discussion, the IPTS would be maintained on carefully calibrated master resistance thermometers, and that nearly all « customer calibrations » would be by automated comparison techniques. There would thus be only occasional requirements for primary level calibrations, these being mostly re-calibrations of the master thermometers. The



group also agreed that requirements for the IPTS should if possible include: the ability to terminate at 84 K \* for those national standards laboratories that were not interested in or not equipped for lower temperature work \*\*; an attainable accuracy within  $\pm 0.2$  mK for designated fixed points below 273 K \*\*\*; attainable scale accuracies should be within  $\pm 0.5$  mK for any temperature below 273 K.

A large number of other points more remote from low temperature resistance thermometry were discussed (and in general agreed upon) including: the requirement for another (high) termination possibility at 420 °C; the compatibility with the IPTS of secondary scales, such as a highly accurate one between  $-40$  and  $+30$  °C or a three-point calibration one between 84 K and 232 °C; the necessity of correcting the discontinuity (with respect to thermodynamic temperatures) at 630 °C and the desirability of correcting the slope at 0 °C; the prospects of successful operation of the Chinese or Japanese high-temperature platinum resistance thermometers up to either the gold or the silver point.

### Low Temperature Discussion

The two major options discussed were the termination of a PRT scale at 25 K with two-point gas thermometer interpolation between 25 K and 4 K \*\*\*\*, and a PRT scale down to 14 K with gas thermometry or (possibly) magnetic thermometry from 14 K to 4 K.

Data supplied by Kemp (see Figure 1) showed very clearly that fixed-point calibrations down to 25 K provided excellent reproducibilities among thermometers down to 54 K. However, extending this reproducibility down to 25 K apparently required *three* additional calibration points (one, at 14 K, was inadequate; data for two were not given) at about 14, 17 and 20 K. Given these additional calibrations, reproducibilities were good down to 20 or even 17 K, and adequate down to 14 K.

After discussing in detail the various data and written arguments available, together with the opinions of the magnetic and gas thermometrists present, the group unanimously agreed to recommend to the CCT the use of an IPTS along the following lines:

From 273 K down to 25 K the IPTS would be defined in terms of

\* For descriptive convenience, well known fixed points are rounded to the nearest degree: the numbers 14, 25, 54, 84 and 273 K refer to readily identifiable triple points; 4, 20 and 27 K to boiling points; and 17 K to an arbitrary measured point.

\*\* In temperature regions where such a truncated scale had a lower accuracy than the complete one, it would have only a subsidiary status.

\*\*\* The low temperature boiling points may not be reproducible to within 0.2 mK from laboratory to laboratory.

\*\*\*\* Or possibly a three-point interpolating gas thermometer, with the additional fixed point at 14 K.

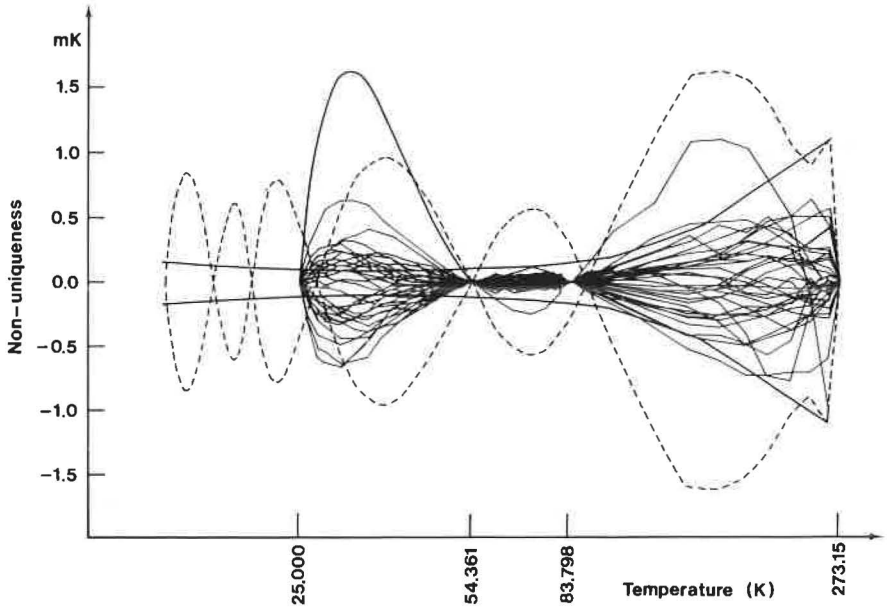


Fig. 1a.

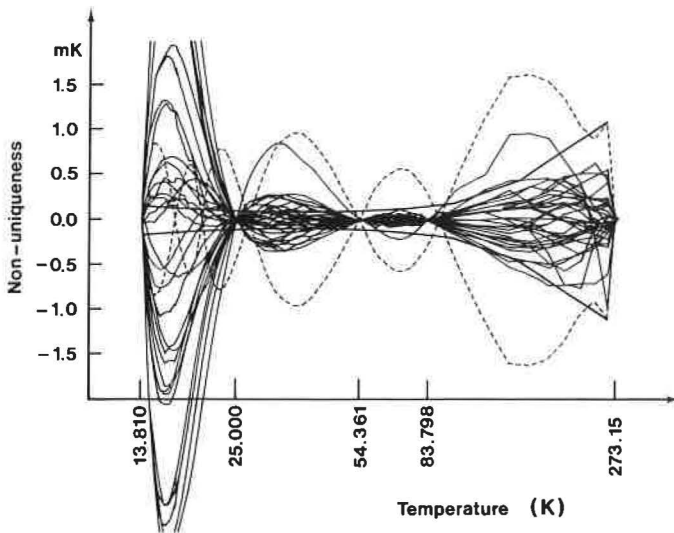


Fig. 1b.

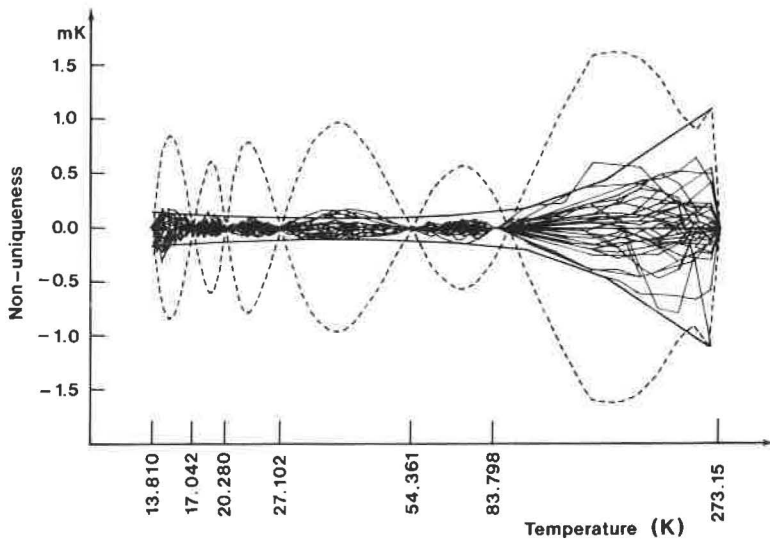


Fig. 1c.

Fig. 1. — Non-uniqueness as a function of temperature according to the fixed points employed.

- Calculated non-uniqueness
- - - - IPTS-68 non uniqueness
- Experimental uncertainty

PRTs calibrated at 14, 17, 20, 25, 54, 84 and 273 K and at one or two higher temperatures. Calibration points at 25 K and above would be standard-type fixed points; the 14, 17 and 20 K points would be either standard type ( $\text{H}_2$  triple point or vapour pressure) or points measured by a standard interpolating gas thermometer.

From 4 K to 25 K, the IPTS would be defined as realizable *either* in terms of an interpolating gas thermometer as described above, *or* in terms of such a gas thermometer in the 4 K to 14 K range and PRTs calibrated as described above over the 14 K to 25 K range.

Below 4 K, there was no controversy;  $^4\text{He}$  and  $^3\text{He}$  vapour-pressure thermometry is expected to be used down to the practical operating limit of  $^3\text{He}$ . At that temperature, the group considered that the new IPTS should terminate. There would be no difficulty in extending the scale to lower temperatures at a later date; in contrast, *amending* a low-temperature range that is found to be in error would be a much more contentious procedure.

1 February 1984

## APPENDIX T 3

---

### Report of Working Group 2 \*

(Recommended Values of Temperature for a Selected Set  
of Secondary Reference Points)

(Document CCT/84-40A)

---

At the 14th Meeting of the CCT in 1982, after considerable discussion and debate, WG 2 was asked, as one of its tasks, to prepare a list of secondary reference points (SRPs) giving recommended values of temperature, estimates of the uncertainties of these values, and a set of associated references. This list is presented herewith in the accompanying table <sup>(1)</sup>. In preparing it we have been guided by the criteria set out in the January 1978 report of WG 2 <sup>(2)</sup>. Briefly, these criteria were :

- a) The SRP must be highly reproducible.
- b) There should be more than one experimental measurement of the value of temperature.
- c) An estimate of the accuracy of the assigned temperature should be given.
- d) The purity of the material corresponding to the assigned temperature should be stated.
- e) References to the original experiments should be given.

---

\* Members of this Working Group are: MM. R.E. BEDFORD, Chairman, National Research Council (Canada); G. BONNIER, Institut National de Métrologie (France); H. MAAS, Amt für Standardisierung, Messwesen und Warenprüfung (D.R.G.); F. PAVESE, Istituto di Metrologia G. Colonnetti (Italy).

<sup>(1)</sup> For the table and references see the present volume p. T 49 and *Metrologia*, **20**, 1984, pp. 145-155.

<sup>(2)</sup> 4<sup>e</sup> rapport du Groupe de travail 2, *BIPM Com. Cons. Thermométrie*, **12**, 1978, pp. T59-T71.

f) Information regarding the effects of other physical quantities on the value of temperature should be given, where appropriate. (Not very much information of this sort was available for any of the listed points; some is included for some points; the effect of pressure on many of the points is tabulated in the Supplementary Information). This criterion we have treated as less important than the preceding five.

The table has been divided into three parts. The SRPs listed in Part A are those for which criteria (a) to (e) are (with only a few exceptions) well-fulfilled. They are essentially of comparable quality to that of the defining fixed points of the IPTS-68 and constitute a set which can be drawn upon in selecting fixed points for any IPTS revision. The exceptions are of two sorts: A few of the assigned temperatures (e.g. freezing points of bismuth and lead) are the result of only a single experiment but the work is sufficiently-well documented as to justify their inclusion in Part A. Those of the other sort (the melting point of the copper 71.9 % silver eutectic and the freezing points of rhodium, iridium, molybdenum and tungsten) are included in Part A because, although their temperatures are not as accurately-known as we would like, they fall in temperature regions where other and better points are not available.

Part B of the table is made up of SRPs that either fail to meet satisfactorily all of the criteria (a) to (e) (frequently there is only one experimental determination) or that are less convenient to use than those of Part A, even though the documentation may be adequate. Examples in this latter group are the solid/solid transitions and some boiling points. Most of the points in Part B are prime candidates for further experimental work.

Part C lists a few examples of points that should be studied to assess their suitability as possible SRPs. The need has been expressed in the past for an especially dense spectrum of SRPs in the region from about  $-100^{\circ}\text{C}$  to  $200^{\circ}\text{C}$  where many of the suggested points lie. Also, it is not yet clear which, or how many, reference points will be used to provide adequate interpolation for the standard resistance thermometer(s) in the revised IPTS. Several of the lower temperature points may be worthy of further study in this regard. The points listed in Part C are offered as examples only; there is no implication that these are the only such points or that a complete set of references is given.

In preparing the table, criterion (c) obviously presented the greatest difficulty. The documentation regarding accuracy that is provided in the published reports varies widely. At one extreme is a detailed analysis including estimates of systematic errors; at the other is the statement of a simple numerical value as the uncertainty. Some reports discuss reproducibility rather fully, deriving a measure of uncertainty,

but mention possible systematics not at all. Frequently it is not clear which statistical measure is being quoted, and seldom, if ever, is the number of independent observations given. Inevitably, in making an overall judgment, other indicators are also used, such as the degree of agreement between independent experiments and familiarity with similar experiments by the same authors.

From the assemblage of data for each SRP some results may have been rejected. The most common reasons for rejection were that the measurements were too imprecise (some of the earlier ones especially), they were on a temperature scale that could not be related precisely enough to the IPTS-68, or they were insufficiently-well described.

For those SRPs in the table where two or (usually) more independent determinations were available, we have used the method of Paule and Mandel\* to assign a value of temperature and an uncertainty. This method allows « statistical analysis of sets of data which are assembled from multiple experiments » and « recognizes the existence of both within group and between group variabilities ». Briefly, the method calculates a *consensus value*  $\bar{T}$  from the various independently obtained average value  $\bar{T}_i$ . Each  $\bar{T}_i$  is weighted by a factor  $\omega_i$  given by  $\omega_i^{-1} = (s_i^2/n_i) + s_b^2$ , where  $s_i^2/n_i$  is the variance of  $\bar{T}_i$  and  $s_b^2$  is a between-set component of variance that can be calculated by iteration. Thus (where possible) the values of  $T_{68}$  in the table are the consensus values calculated in this manner, and the associated uncertainties are  $2/\sum_i \omega_i$  (rounded upwards), which are approximately equivalent to 95 % confidence limits. If, as frequently happens,  $s_b^2 = 0$ , then the consensus value reduces to the usual weighted average value. A programmable desk calculator was used for the computations.

The problem in applying this method is how to assign the variances  $s_i^2/n_i$ , which are related to, but not necessarily the same as, the squares of the uncertainties quoted by the authors. Without exception, it is impossible to calculate  $s_i^2/n_i$  explicitly from the data provided in the published reports (almost never is  $n_i$  given, for example). Unless it is otherwise clear, we have assumed that the authors' quoted uncertainty is a standard deviation, have adjusted it as deemed appropriate for such factors as IPTS-68 non-uniqueness, temperature scale conversions, impurity content, etc., and taken the square of the adjusted value to be  $s_i^2/n_i$ .

As illustrations of the method, consider first the triple point of natural neon. Twelve measurements were available, but these we reduced to ten because references 6 and 8, and 10 and 11, appear to refer to the same sets of experimental data. The various quantities from which  $T_{68}$  and the uncertainty in the table were derived are set out below :

---

\* PAULE, R.C. and MANDEL, J. Consensus Values and Weighting Factors, *J. Res. Natl. Bur. Stand. (U.S.)*, **87**, 1982, pp. 377-385.

Reference	$T_{68}$ (K)	authors' uncertainty (mK)	adjustments (mK)	$(s_i^2/n_i)^{1/2}$ (mK)
7	24.562 0	—	a, b	1
8	.561 8	0.8	b	1
10	.561	1	c	2
12	.563 1	1		1
13	.560	2	c	3
14	.562 7	1		1
15	.562 5	2		2
16	.561 9	1 ?	b	1
17	.562 4	1	b, d	1.5
18	.555	4	c, e	5

a. experimental uncertainty estimated to be  $\pm 0.5$  mK.

b. IPTS-68 non-uniqueness at 24.5 K taken as  $\pm 0.8$  K (see Fig. 1.4 of Supplementary Information for the IPTS-68 and EPT-76).

c. uncertainty in converting NBS-55 to the IPTS-68 estimated to be  $\pm 2$  mK at 24.5 K (including non-uniqueness).

d. thermometer was calibrated elsewhere and transferred; associated uncertainty estimated to be  $\pm 1$  mK.

e. because author's neon boiling point was 3 mK below the IPTS-68 value, his vapour-pressure equation, and hence triple-point value, was shifted 3 mK; associated uncertainty estimated to be  $\pm 1$  mK.

From these data we obtain the result in the table:  $T_{68} = 24.562\ 2 \pm 0.000\ 8$  K. This is an example of an extremely good set of data, as evidenced by  $s_b = 0$ ; that is, there is no between-set component of variance. Whether reference 18 should be included is arguable; this is a borderline case, and the result is unchanged if reference 18 is deleted.

As a second illustration consider the freezing point of platinum. This time the literature provided eight independent measurements. We rejected four of these: three were done by visual pyrometry about 50 years ago and one (1970) by high-speed pyrometry, and all of these are about an order of magnitude less precise than the remaining four. In this example none of the authors' estimated uncertainties were adjusted. The calculation gives  $T_{68} = 2\ 041.9 \pm 0.7$  K, which we list (rounded) in the table as  $2\ 042 \pm 1$  K. This time  $s_b$  is 0.5 K, larger than all but one of the individual uncertainties. This was the chief reason for rounding the result to the nearest kelvin.

Several vapour-pressure equations appear in the table. There is no convenient way to average independently-determined equations nor, indeed, did such an exercise appear to be particularly useful. In each case, we have entered one experimenter's equation, but all other equations referred to agree with it to within the uncertainty listed.

Unfortunately, when the table was prepared, none of the results of the CCT-sponsored international intercomparison of sealed triple-point cells were available for inclusion in the calculations.

## APPENDIX T 4

---

### **2nd Report of Working Group 3 \*** (Platinum Resistance Thermometer Range)

(Document CCT/84-53)

---

#### **1. Introduction**

The terms of reference of Working Group 3 were last specified in 1980 (see the first report of WG 3) and left unchanged at the CCT meeting of 1982. As a consequence, the report may be subdivided into four main sections, namely :

- A) interpolating equations of platinum resistance thermometers (PRTs) and fixed points ;
- B) determinations of thermodynamic temperatures ;
- C) radiation thermometry ;
- D) high-temperature platinum resistance thermometers, their development and intercomparison.

The topic in the first section is strictly interrelated with those of the following three other sections. For this report, however, very little has to be said regarding thermometry that is not already covered by section B and, consequently, this topic is not dealt with in the following.

---

\* Members of this Working Group are : L. CROVINI, Chairman, Istituto di Metrologia G. Colonnetti (Italy) ; P.B. COATES, National Physical Laboratory (United Kingdom) ; W.R.G. KEMP, CSIRO (Australia) ; LING SHAN KANG, National Institute of Metrology (People's Rep. of China) ; J.F. SCHOOLEY, National Bureau of Standards (U.S.A.) ; W. THOMAS, Physikalisch-Technische Bundesanstalt (Fed. Rep. of Germany).



## 2. Interpolating equation of platinum resistance thermometers

### 2.1. Termination of PRT scale at low temperature and interpolation scheme between 13.8 K and 273.15 K

The chairman of WG3 participated in a meeting of Working Groups 1 and 4, at NPL on October 24, 1983. One topic of this meeting was to discuss, and possibly to suggest, a temperature to terminate the PRT scale at low temperature and a way to join it smoothly to the lower temperature scale, e.g., the gas thermometer scale.

Any decision on this matter has to rely on the information available on the established non-uniqueness of the PRT scale (*see* Figure 1, from W.R.G. Kemp, Appendix T 2, p. T 130), and on the demonstration of the performances of candidates for interpolating instrument below the PRT range.

The problem, as presented at the meeting, was two-fold, one aspect being the selection of the best interpolating instrument below the PRT range and the other being the need to avoid degrading the well-known accuracy of the PRT scale.

Termination at 25 K would entail an excessive increase of the non-uniqueness between 25 K and 54 K (compare Figures 1a and 1c). This is only partially, but not sufficiently, reduced when a calibration point at 13.81 K is added (*see* Figure 1b). It was, then, suggested that a future IPTS be defined in terms of the PRT scale above 25 K but that three additional calibration points be retained below this temperature, namely, at about 14, 17 and 20 K. They might be realized either by comparing the PRT with the standard interpolating instruments for this range or with three suitable fixed points, the temperature of which would be assigned with the standard interpolating instrument.

The reproducibility and practicability of an interpolating gas thermometer so far not being demonstrated, WG3 would, therefore, recommend that the PRT remain the interpolating instrument down to 14 K.

### 2.2. Range above 273.15

No complete proposal, as for the previous range, has been yet worked out. Particularly, it is still an open question whether to terminate the PRT scale at the freezing point of gold or at that of silver. More insight into this matter is provided in Section 4.

## 3. Determinations of thermodynamic temperature above 14 K

Since the first report the results of some new determinations have been made available. They can now be compared with those already

considered in the previous report. Although the coverage with the new determinations is almost complete from 14 K up to 1337 K, there are three difficulties :

- 1) some of them are available from only one experimenter,
- 2) accuracy is not sufficient, and
- 3) there are large disagreements between some of the results.

Not all data available are directly referred to the triple point of water. In the case of relative measurements it is necessary that the reference temperature be thermodynamically consistent.

### 3.1. Range from 14 K to 273 K

In this range we have available the following results, besides the NPL 75 scale :

KOL (Steur, 1983) / CVGT, Ref 273 K / 14-100 K  
CSIRO (Kemp *et al.*, 1982) / CVGT, Ref 273 K / 14-273 K  
CSIRO (Kemp *et al.*, 1983) / CVGT, Ref 273 K / 14-300 K  
CSIRO (Kemp *et al.*, 1982) / ISO, Ref 20 K (NPL75) / 20-84 K  
CSIRO (Cetas, 1976) / Mag, Ref 13.8 K (NPL75); 27.1 ; 54.4, 84 K  
(CVGT CSIRO) 14-84 K  
PTB (Weber, 1983) / ISO, Ref 273 K / BPNe ; TPO<sub>2</sub> ; BPO<sub>2</sub>  
Univ. Bristol (Gugan and Michel, 1980)/DCGT, Ref 20 K (NPL-75)/14-27 K  
Univ. Munster (Storm and Kemp, 1983) / NT, Ref 273 K / TPAr  
NPL (Quinn and Martin, 1983) / TRP, Ref 273 K / 240-273 K

CVGT - Constant Volume Gas Thermometry  
ISO - Isotherms  
Mag - Magnetic Thermometry  
DCGT - Dielectric Constant Gas Thermometry  
NT - Noise Thermometry  
TRT - Total Radiation Thermometry

A summary of these results is provided by R.C. Kemp *et al.*, 1984. It is worth noting that between 100 K and 230 K the measurements have been carried out only by one author.

### 3.2. Range from 273 K to 730 K

Quinn and Martin, NPL, (1982) published their results with a total radiation thermometer in the range from 327 K to 365 K. They achieved a good agreement with NBS results (Guildner and Edsinger, 1976). In 1983 the results of further measurements have been made available by

Quinn and Martin (1984) albeit not yet published, covering the range from 240 K to 375 K, and smoothly passing through the triple point of water.

A further point was measured at 408 K by Pickup, CSIRO, (1982) with a noise thermometer. He found  $T - T_{68} = -12$  mk (NBS:  $-33.6$  mK). The author does not exclude that the disagreement be due to « intermittent electronic problems » in this apparatus.

### 3.3. Range from 730 K to 1337 K

In this range several projects, all entailing monochromatic radiation thermometry, have been active in the last three years.

From 730 K to about 903 K (freezing point of antimony) Coates and Andrews, NPL, Jung, PTB, and Bonhoure, BIPM, have obtained results, with reference to a thermodynamic temperature as measured by Guildner and Edsinger, up to 730 K. PTB results deviate linearly from  $T_{68}$ , reaching a maximum deviation of  $-0.15$  K at the freezing point of antimony. At this temperature the result of PTB is 0.12 K lower than NPL's, whereas there is a good agreement with preliminary results at BIPM. NPL results at the antimony point, however, agree with those obtained at IMGIC with a noise thermometer.

From 903 K to 1337 K the most recent results available are those of Coates and Andrews (1982). They were obtained by thermodynamic measurements relative to 730 K, using a monochromatic radiation pyrometer. The NPL results must be considered as provisional on account of a discrepancy found with one of the three interference filters used (Coates, private communication). In this range the only recent thermodynamic measurements relative to 273 K are those carried out at IMGIC with a noise thermometer (Crovini and Actis, 1978), covering the range from 903 K to 1235 K.

There have also been published several measurements of temperature intervals in the range above 903 K. These include Bedford and Ma, 1982; Jones and Tapping, 1982; Jung, 1975; Bonhoure, 1975; Ricolfi and Lanza, 1977; Quinn *et al.*, 1975; Coslovi *et al.*, 1975.

### 3.4. Possible consequences of the new determinations

For the range from 14 K to 273 K the data have been used to generate a smooth function for  $T - T_{68}$  and, also, a new reference function for the SPRT (R.C. Kemp *et al.*, 1984). The function has the following form :

$$W_{\text{ref}} = \sum_{n=0}^{16} A_n \left\{ \left[ \ln \left( \frac{T}{273.15} \right) + 1.49 \right] / 1.49 \right\}^n \quad (1)$$

For measurements above 730 K the uncertainties of measurements reported to date are so large that we cannot recommend the form of a reference function between 730 K and 1337 K.

We urge the CCT to recommend further work in the following areas :

- 1) All data submitted in preliminary form to this meeting should be published forthwith.
- 2) Thermodynamic temperature measurements above 903 K should be especially encouraged.
- 3) Further thermodynamic temperature measurements be carried out in those temperature ranges where only one experiment has been conducted.

## 4. High-Temperature Resistance Thermometers

### 4.1. Survey of experimental work

WG3 has received reports on high-temperature resistance work from six laboratories. They are :

BIPM, J. Bonhoure  
IMGC (Italy), P. Marcarino  
NBS (U.S.A.), J.P. Evans  
NIM (P.R.C.), Ling Shankang  
CSIRO (Australia), T.P. Jones and J.V. McAllan  
PTB (Fed. Rep. of Germany), H.J. Jung and H. Nubbemeyer

Other laboratories have received test thermometers from the NIM or have prepared thermometers by themselves. We await communication of the results of their experiments. A brief summary of the results received from the six laboratories named above follows :

a) BIPM. Three Chinese thermometers, numbers 18220, 18240, and 18245, have been tested in an experiment designed to discover the effect of heating upon  $R(0)$ . The procedure was as follows: measure  $R(0)$ ; heat at 650 °C for one hour; measure  $R(0)$  again; heat at 1085 °C for 50 hours, followed by annealing cycles at 650 °C and 450 °C; measure  $R(0)$  again; heat again to 1085 °C, for 100 hours, followed by the annealing cycles; and, finally, re-measure  $R(0)$ . Nearly no change ( $\leq 8 \times 10^{-6}$ , not obviously time-dependent) was observed in the  $R(0)$  value for any of the thermometers.

b) IMGC. Three Chinese thermometers, numbers 18213, 18233, and 80166, were heated for periods of 50 hours or 100 hours in an Inconel 600 tempering block at temperatures ranging from 750 °C to 1080 °C.

The resistances  $R(0)$ ,  $R(\text{Sn})$ ,  $R(\text{Zn})$  were measured after the heating intervals. All  $R$  values rose noticeably and  $\alpha$  values all decreased, according to the following table :

Thermometer	$\Delta R(0)$ ; $R(0)$	$\Delta R(\text{Sn})$ ; $R(\text{Sn})$	$\Delta R(\text{Zn})$ ; $R(\text{Zn})$	$\Delta\alpha$ ; $\alpha$
18213	0.000 142	0.000 128	0.000 114	— 0.000 002 <sub>3</sub>
	0.260 492	0.493 052	0.669 174	0.003 927
18233	0.000 106	0.000 097	0.000 085	— 0.000 001 <sub>7</sub>
	0.261 257	0.494 489	0.671 118	0.003 927
80166	0.000 155	0.000 141	0.000 128	— 0.000 002 <sub>8</sub>
	0.240 430	0.455 047	0.617 580	0.003 926 <sub>6</sub>

c) NBS. Four Chinese thermometers and three NBS thermometers were tested in three separate experiments. In the first, each thermometer was calibrated at 0, Au, 0, Ag, 0, Al, 0, Zn, 0, and Sn (0: water triple-point; chemical symbol: «corresponding freezing point») using two different measuring currents; then the thermometers were heated for 100 hours at 1 100 °C and the calibration repeated.

In the second experiment, a mesh of Pt wire was placed around the sheath of each thermometer, the thermometer was inserted into a Ag cell, and its resistance was measured with the mesh and any internal guard wire connected to the Cutkosky Resistance Bridge guard circuit. Similar measurements were made with the mesh and the internal guard connected in various other combinations.

In the third experiment the thermometer immersion characteristics were measured in a Zn cell.

The results of the first experiment showed an average change in  $R(T)/R(0)$  after 100 hours at 1 100 °C equivalent to 8.4 mK at Al, 12.3 mK at Ag, 10.4 mK at Au.  $R(0)$  changed by the equivalent of 0.3 mK to 0.8 mK at 0 °C after one high-temperature cycle. All  $\alpha$  values remained larger than 0.003 926<sub>8</sub> K<sup>-1</sup>. Thermometer self-heating was not excessive and its effect was easily corrected. No thermometer failed during the test.

The second experiment showed the presence of substantial leakage-current effects; 20 mK or more at Ag. The external mesh provided the best protection from the effects of leakage currents.

The third experiment showed only expected magnitudes of immersion-depth effects at the zinc temperature.

A further analysis of the data from the first experiment was achieved by extrapolating an IPTS-68 calibration to provide  $t'$  values for the Al, Ag and Au temperatures. Based on sets of 14 determinations with seven thermometers, the computed one-standard-deviation values corresponded to 4 mK at Al, 10 mK at Ag, and 15 mK at Au.

A study has been commenced of the behaviour of interpolation functions similar to those used in the IPTS-68 but extending them to

Al, Ag and Au. Definitive work on this study must be deferred until new assignments are made to the high-temperature fixed points.

d) NIM. Al, Ag and Au cells have been prepared with samples of purity up to 99.999 9 %. Over a three-year period numerous tests have been conducted of thermometer and fixed-point stability and fixed-point temperature variation among different cells. These tests consisted of as many as 12 cycles in given cell over a one-month period. Listed below are data for three thermometers tested in three fixed-point cells over such a period. The variations are expressed as one-standard-deviation value in  $\Delta T(\text{Al,Ag})$  or as  $\Delta W(\text{Au})/W(\text{Au})$ .

Thermometer	$\Delta T(\text{Al})$ , mK	$\Delta W(\text{Ag})$ , mK	$\Delta W(\text{Au}); W(\text{Au})$
80136	0.5	1.0	0.000 008 4.572 100
79515	0.7	0.9	— —
80212	0.4	1.6	0.000 004 4.571 800

e) CSIRO. Of ten thermometers constructed by N. Bass during his recent stay at NBS, four were compared with the photoelectric pyrometer at Ag, using a sodium heat pipe. The temperature non-uniformity within the Ag blackbody was estimated as 5 mK over most of its extent. Over an 8-hour period, one thermometer remained stable and three drifted approximately linearly to register temperatures that were lower by  $\Delta T \sim 20$  mK. The values of  $W(\text{Al})$  for the thermometers were stable within  $\pm 3$  mK.

The general behaviour of the thermometers during extended experimentation at Ag was erratic, with  $\alpha$  decreasing from 0.003 926 to 0.003 925.

Substantial leakage effects (up to 50 mK) were observed upon disconnecting the internal thermometer guards. Two thermometers failed during the experiments.

No report has been given of any tests on any thermometers received from the NIM.

f) PTB. Three Chinese thermometers were tested. Thermometers numbered 18234, 80159, and 80168 were heated first to 900-960 °C for eight 5-hour periods.  $W(\text{Ag})$  changed after 40 hours by amounts corresponding to + 9 mK, 0 mK, and + 4 mK, respectively. Then thermometers No. 18234 and 80159 were heated in 50-hour periods to 1 000 °C for a total of 300 hours. At the end of each 50-hour period,  $R(\text{Ag})$  and  $R(0)$  were measured. Cumulative changes in  $W(\text{Ag})$  corresponded to - 21 mK and - 16 mK, respectively. Subsequently

the sheaths of the thermometers No. 80168 and 18234 broke, temporarily stopping further work with them.

The immersion characteristics were studied at H<sub>2</sub>O, Sn, Zn and Ag with thermometer No. 80159; a 10-cm withdrawal from the bottom of a 20-cm ingot produced temperature changes of no more than 0.2 mK, 1.1 mK, 0.5 mK, and 2.0 mK, respectively.

## 4.2. Conclusions

Several conclusions can be drawn from the information in Section 4.1. They are:

a) A wide range of heating and durability has been observed with the new thermometers. Measurements at BIPM, NIM, NBS and PTB all indicate good stability (changes of no more than 20 mK at Au) upon high-temperature heating, whereas those at IMGIC and CSIRO do not. Of the 19 thermometers tested, four failed during testing.

b) Immersion and self-heating properties of the thermometers are consistent with their use in precision thermometry.

c) Electrical leakage at temperatures above 900 °C is substantial (corresponding to as much as 50 mK at Au). On the other hand, the leakage can be reduced by either internal or external guarding.

d) The thermometers can provide reasonably precise  $t'$  values (identical within as little as 20 mK) even when extrapolated from Zn to Au.

## 4.3. Proposed recommendations

Working Group 3 offers the following recommendations based upon these conclusions:

a) Laboratories possessing either Chinese or their own high-temperature platinum resistance thermometers are encouraged to conduct experiments with them similar to the ones reported in Section 4.1, and to communicate their results to the CCT.

b) Efforts to establish commercial sources of high-temperature platinum resistance thermometers (e.g., Chino Works in Japan, Yellow Springs Instruments in the USA, Yunan Instrument Factory in China) are strongly encouraged.

c) If the idea is accepted that either or both of certain thermometers or certain laboratory techniques have been responsible for the better stability and precision data reported in Section 4.1, then two steps should be taken: first, the more successful procedures should be

adopted to test the best of the available thermometers according to the suggestion in the previous point 4.3(a); second, the new high-temperature platinum resistance thermometers should be recommended for use as interpolation instruments at temperatures as high as Au.

d) The investigation of interpolation formulas for an extended platinum resistance thermometer range is encouraged. It is noted that Al appears to be both needed and useful as a fixed point.

e) It is suggested that those laboratories reporting on HTPRTs include at least the following information :

- 1) all resistance data at all temperatures measured ;
- 2) the effects of immersion at all temperatures from, say, zinc upwards ;
- 3) any evidence of leakage ;
- 4) any experiment on horizontal usage ;
- 5) detailed information on the enclosure surrounding the thermometers.

June 1984

### References

(The various volumes of « Temperature, Its Measurement and Control in Science and Industry » are referred to as : TMCSI, 1, etc.)

- BEDFORD, R. E. and MA, C. K. TMCSI, 5, 1982, p. 361.
- BONHOURE, J. and PELLO, R. Document CCT/84-21 submitted to the present meeting.
- CETAS, T. C. *Metrologia*, 12, 1976, p. 27.
- COATES, P. B. and ANDREWS, J. W. TMCSI, 5, 1982, p. 109.
- COSLOVI, L., ROSSO, A. and RUFFINO, G. *Metrologia*, 11, 1975, p. 85.
- CROVINI, L. and ACTIS, A. *Metrologia*, 14, 1978, p. 69.
- GUGAN, D. and MICHEL, G. W. *Metrologia*, 16, 1980, p. 149.
- GUILDNER, L. A. and EDSINGER, R. E. *J. Res. Natl. Bur. Stand. (U.S.)*, 80A, 1976, p. 703.
- KEMP, R. C., BESLEY, L. M. and KEMP, W. R. G. TMCSI, 5, 1982, p. 33.
- KEMP, R. C., BESLEY, L. M. and KEMP, W. R. G. 1983, unpublished.
- KEMP, R. C., BESLEY, L. M. and KEMP, W. R. G. Document CCT/84-8 submitted to the present meeting.
- JUNG, H. J. Temperature Measurement 1975, London, Institute of Physics, Conference Series n° 26, 1975, p. 278.
- JUNG, H. J. *Metrologia*, 20, 1984, p. 67.
- JONES, T. P. and TAPPING, J. TMCSI, 5, 1982, p. 169.
- PICKUP, C. P. TMCSI, 5, 1982, p. 129.



- QUINN, T. J., CHANDLER, T. R. D. and CHATTLE, M. V. *Metrologia*, **9**, 1973, p. 44.
- QUINN, T. J. and MARTIN, J.E. *TMCSI*, **5**, 1982, p. 103.
- QUINN, T. J. and MARTIN, J. E. Document CCT/84-43 submitted to the present meeting.
- RICOLFI, T. and LANZA, F. *High Temp. — High Press.*, **9**, 1977, p. 483.
- STEUR, P. P. M. Thesis, Leiden, 1983.
- STORM, L. and KLEMPF, G. 1983, unpublished.
- WEBER, F., 1983, to be published.
-

## APPENDIX T 5

---

### 2nd Report of Working Group 4 \*

(Extension below the platinum thermometer region of a revised IPTS)

(Document CCT/84-32)

---

1. Three members of the Working Group attended the *ad hoc* meeting on cryotemperature concerns in a revised IPTS held at NPL on October 24, 1983 and the fourth (C.A. Swenson) submitted a written contribution. A summary of this meeting is furnished in a Report to the CCT from the President (*see* Appendix T 2, p. T 128).
2. Some further studies were carried out and discussed (R. P. Hudson and R. L. Rusby) on aspects of possible operational procedures for an interpolation gas thermometer at the low-temperature end of a revised IPTS. Subsequent to these, R. L. Rusby prepared the notes appended hereto (*see* Note).
3. Amplified inverted  $^3\text{He}$  and  $^4\text{He}$  vapour-pressure equations have been submitted for publication in *Cryogenics* \*\* by M. Durieux and R. L. Rusby.
4. We take note of a paper by G.T. McConville, to be presented at the 17th International Low Temperature Conference, which proposes a new interatomic potential for  $^4\text{He}$  that leads to a second virial coefficient agreeing to within  $0.3 \text{ cm}^3 \text{ mole}^{-1}$  down to 2.6 K with that derived by K. H. Berry from his gas-thermometry data.

April/May 1984

---

\* Members of this Working Group are : R.P. HUDSON, Chairman, Bureau International des Poids et Mesures ; M. DURIEUX, Kamerlingh Onnes Laboratorium (Netherlands) ; R. L. RUSBY, National Physical Laboratory (United Kingdom) ; C. A. SWENSON, Iowa State University (U.S.A.).

\*\* Inverted forms of the new helium vapour pressure equations, *Cryogenics*, **24**, 1984, pp. 363-366.

## Notes on the Interpolating Constant-Volume Gas Thermometer 4.2 K to 24.5 K

The main criteria for an interpolating gas thermometer have been discussed in « Supplementary Information for the IPTS-68 and the EPT-76 » (*BIPM Monographie*, 1983, pp. 88-92), as applied to realizations of the EPT-76. For the IPTS the range of application is assumed to be 4.2 K to 24.5 K.

The criteria lead to a design specification roughly as follows :

- a) Bulb size : 0.3 to 1 litre
- b) Capillary : 1 mm diameter, 80 mm long
- c) Room temperature volume :  $\sim 10 \text{ cm}^3$
- d) Sensitivity : 1.5 to 2.0 kPa/K (10 to 15 torr/K)
- e) Pressure measurement : Pressure balance and capacitance diaphragm.

Such a specification (which would *not* be included in the definition of the scale itself) would permit a realization of the scale with an accuracy within  $\pm 0.5 \text{ mK}$ . In a particularly careful and well-designed experiment, better accuracy could be achieved. Equally, the design could be adapted for lower accuracy : for example, if it is desired to use a smaller bulb and/or a mercury manometer instead of a pressure balance.

### *Additional remarks*

(i) With a pressure sensitivity of 2 kPa/K, non-linearity due to gas imperfection should not exceed 1.0 mK, and if a defined value of  $B(T)$  is used the non-uniqueness of the scale from this source could be reduced to about 0.2 mK.

Higher sensitivities may be employed if required, but experimenters should be aware of the increased uncertainty arising from uncertainties in  $B(T)$  and possibly  $C(T)$  as well.

(ii) The measurement of the room temperature deadspace volume by the gas-expansion method should not be difficult. The low-temperature deadspace volume, however, depends on the details of the temperature distribution along the capillary.

For a 1-litre bulb a non-linearity of 0.4 mK would be expected on the basis of order-of-magnitude calculations such as are given in the Supplementary Information. In practice, the effect must be determined at each point in an experiment *a*) because calculations cannot be exact and *b*) because the temperature distribution may not be perfectly reproducible. In particular, it may take several hours for an isolated stainless-steel tube to reach perfectly steady conditions after a change in bulb temperature. In order to overcome this problem, Berry connected

his capillary to the helium bath at a point just above the bulb — the temperature distribution was then almost independent of bulb temperature, but since the tube is colder than necessary the deadspace effect is significantly increased. An alternative procedure, following Weber, is to use a copper, or copper-clad, capillary for most of its length. The deadspace effect is then much smaller, and indeed it *may* be determined accurately enough just by measuring the temperature at the termination of the copper section. In all assessments of the deadspace correction, however, it will prove extremely useful to carry out direct measurements with the capillary blanked off at the lower end.

(iii) In view of the expected departure (of the interpolation) from linearity, consideration has been given to using a quadratic interpolation, employing the triple point of hydrogen as an additional fixed point. However, calculation showed that there was little advantage compared with assuming values of virial coefficients as recommended above. The need to measure deadspace corrections would not be avoided either, because of variations in temperature distribution along the capillary. The hydrogen triple point would, however, have a very useful role as a secondary reference point at which the accuracy of a realization of the scale could be checked.

---

---

## TABLE DES MATIÈRES

---

### COMITÉ CONSULTATIF DE THERMOMÉTRIE

#### 15<sup>e</sup> session (1984)

---

	Pages
Notice sur les organes de la Convention du Mètre . . . . .	v
Liste des membres . . . . .	vii
Ordre du jour . . . . .	x
<b>Rapport au Comité International des Poids et Mesures, par M. Durieux . . . . .</b>	<b>T 1</b>
Communications se rapportant à la nouvelle EIPT. Publication du document intitulé 'Supplementary Information for the IPTS-68 and the EPT-76'. Liste des points de référence secondaires. Achèvement de la comparaison internationale de cellules scellées à point triple de l'argon . . . . .	2
<b>Compte rendu des séances de la 15<sup>e</sup> session du CCT . . . . .</b>	<b>4</b>
1. Ouverture de la session. Nomination d'un rapporteur . . . . .	4
2. Approbation du compte rendu des séances de la 14 <sup>e</sup> session du CCT (1982) . . . . .	4
3. Documents présentés à la 15 <sup>e</sup> session du CCT . . . . .	4
4. Rapports des Groupes de travail . . . . .	5
4.1. Groupe de travail 1 . . . . .	5
4.2. Groupe de travail 2 . . . . .	6
4.3. Groupe de travail 3 . . . . .	7
4.4. Groupe de travail 4 . . . . .	9
4.5. Réunion commune des Groupes de travail 1, 3 et 4 . . . . .	10
5. Comparaisons internationales et points fixes . . . . .	12
6. Examen du document sur les méthodes secondaires de thermométrie . . . . .	15
7. Thermomètres à résistance de platine pour la mesure des hautes températures . . . . .	15
8. Différences ( $T - T_{68}$ ) et ( $T - T_{76}$ ) . . . . .	18
9. Températures inférieures à 0,5 K . . . . .	21
10. Méthodes d'interpolation entre les points fixes . . . . .	22
11. Nouvelle EIPT : situation actuelle . . . . .	26
12. Travaux futurs et composition des Groupes de travail . . . . .	30
Attributions des Groupes de travail . . . . .	33
Composition des Groupes de travail . . . . .	33
13. Travaux du BIPM . . . . .	35

14. Publication des documents . . . . .	35
15. Questions diverses . . . . .	36
16. A-t-on besoin d'une EIPT? Proposition de Mr Durieux . . . . .	36
17. Prochaine session du CCT . . . . .	38
 <b>Annexes :</b>	
T 1. Documents de travail présentés à la 15 <sup>e</sup> session du CCT. . . . .	39
T 2. Rapport de la réunion des Groupes de travail 1 et 4 (avec la participation du président du Groupe de travail 3) tenue au NPL le 24 octobre 1983 . . . . .	44
T 3. Rapport du Groupe de travail 2 (Points de référence secondaires) . . . . .	49
T 4. Rapport du Groupe de travail 3 (Domaine du thermomètre à résistance de platine). . . . .	72
T 5. Rapport du Groupe de travail 4 (Nouvelle EIPT au-dessous du domaine du thermomètre à résistance de platine). . . . .	82
 <b>Notice for the reader of the English version. Avertissement au lecteur de la version anglaise . . . . .</b>	 87
<b>Note on the organs of the Convention du Mètre . . . . .</b>	<b>89</b>
<b>Agenda . . . . .</b>	<b>92</b>
 <b>Report to the Comité International des Poids et Mesures, by M. Durieux . . . . .</b>	 <b>93</b>
Submissions relating to the proposed new IPTS. Publication of 'Supplementary Information for the IPTS-68 and the EPT-76'. Proposed new listing of secondary reference points. Completion of the international comparison of sealed triple-point cells . . . . .	94
 <b>Minutes of the Meeting . . . . .</b>	 <b>96</b>
1. Designation of a rapporteur. Opening of the Meeting . . . . .	96
2. Approval of the report of the 14th Meeting of the CCT in 1982. . . . .	96
3. Documents presented to the 15th Meeting of the CCT . . . . .	96
4. Reports of the Working Groups. . . . .	97
4.1. Working Group 1. . . . .	97
4.2. Working Group 2. . . . .	98
4.3. Working Group 3. . . . .	99
4.4. Working Group 4. . . . .	101
4.5. Joint meeting of Working Groups 1, 3 and 4 . . . . .	101
5. International comparisons and fixed points . . . . .	103
6. Examination of the monograph on methods of secondary thermometry. . . . .	106
7. Platinum resistance thermometers for the measurement of high temperatures . . . . .	106
8. Differences ( $T - T_{68}$ ) and ( $T - T_{76}$ ) . . . . .	108
9. Temperatures below 0.5 K . . . . .	111
10. Methods of interpolation between fixed points. . . . .	111
11. The new IPTS: current situation . . . . .	115

12. Future work and membership of the Working Groups . . . . .	119
Terms of references of Working Groups . . . . .	121
Membership of the Working Groups . . . . .	122
13. Work at the BIPM . . . . .	123
14. Publication of documents . . . . .	123
15. Miscellaneous subjects . . . . .	124
16. Does one need a new IPTS? Proposition of Mr. Durieux . . . . .	124
17. Next meeting of the CCT . . . . .	126

**Appendices :**

T 1. Working documents submitted at the 15th Meeting of the CCT . . . . .	127
T 2. Report of a meeting of Working Groups 1 and 4 (with the Chairman of WG3 participating) at NPL on October 24, 1983 . . . . .	128
T 3. Report of Working Group 2 (Recommended Values of Temperature for a Selected Set of Secondary Reference Points) . . . . .	132
T 4. Report of Working Group 3 (Platinum Resistance Thermometer Range)	136
T 5. Report of Working Group 4 (Extension below the platinum thermometer region of a revised IPTS) . . . . .	146

---

IMPRIMERIE DURAND  
28600 LUISANT (FRANCE)

---

Dépôt légal : Imprimeur, 1985, n° 4982  
ISBN 92-822-2091-5

ACHEVÉ D'IMPRIMER : AOÛT 1985

Imprimé en France