

COMITÉ CONSULTATIF DE THERMOMÉTRIE

SESSION DE 1987

BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES



COMITÉ CONSULTATIF DE THERMOMÉTRIE

Rapport de la 16^e session
1987

Édité par le BIPM, Pavillon de Breteuil, F-92312 Sèvres Cedex, France

ISBN 92-822-2101-6

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 m²) du Pavillon de Breteuil (Parc de Saint-Cloud) mis à sa disposition par le Gouvernement français ; son entretien est assuré à frais communs par les États membres de la Convention du Mètre (1).

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

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

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

La Conférence Générale est formée des délégués de tous les États membres de la Convention du Mètre et se réunit 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 1987, quarante-sept 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, Israël, 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 quarantaine 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 15 692 500 francs-or (en 1987), soit environ 28 475 000 de 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 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 (CCEMRI), créé en 1958. En 1969, ce Comité Consultatif a institué quatre sections : Section I (Rayons X et γ , électrons), Section II (Mesure des radionucléides), Section III (Mesures neutroniques), Section IV (Étalons d'énergie α) ; cette dernière Section a été dissoute en 1975, son domaine d'activité étant confié à la Section II.
7. Le Comité Consultatif des Unités (CCU), créé en 1964 (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 aussi des monographies sur des sujets métrologiques particuliers et, sous le titre « *Le Système International d'Unités (SI)* », une brochure remise à jour périodiquement qui rassemble toutes les décisions et recommandations concernant les unités.

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
D. KIND

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 [VNIIM], Leningrad.

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

INSTITUT NATIONAL DE MÉTROLOGIE [NIM], Beijing.

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

KAMERLINGH ONNES LABORATORIUM [KOL], Leyde.

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 16^e session

1. Ouverture de la session. Nomination d'un rapporteur.
2. Approbation du compte rendu des séances de la 15^e session du CCT (1984).
3. Documents présentés à la 16^e session du CCT : classement dans les différents points de l'ordre du jour.
4. Remplacement de l'EIPT-68 :
 1. Acceptation d'une nouvelle échelle ; état d'esprit à cet égard.
 2. Échéance pour la préparation d'une nouvelle échelle (généralités).
5. Groupes de travail :
 1. GT1 :
 1. Remarques préliminaires sur le projet d'EIT ;
 2. Deuxième édition de « Supplementary Information for the IPTS-68 and the EPT-76 » (Supplementary Information for the ITS-90).
 2. GT2 : Projet de monographie « Techniques for Approximating the IPTS-68 and the EPT-76 ».
 3. GT3 : Propositions pour une fonction de référence, des méthodes d'interpolation et des domaines de température pour le thermomètre à résistance de platine.
 4. GT4 :
 1. Différences $T - T_{68}$ et $T - T_{76}$;
 2. Spécifications pour le thermomètre à gaz d'interpolation.
6. Remplacement de l'EIPT-68 (suite) :
 1. Situation actuelle du thermomètre à résistance de platine pour la mesure des hautes températures.
 2. Extension éventuelle de l'EIT-90 au-dessous de 1 K.
 3. Problèmes divers.
 4. Mesures à prendre.
7. Annonce aux utilisateurs des modifications à venir de l'EIPT.
8. Discussion du projet de résolution du CIPM à présenter à la CGPM.

9. Groupes de travail : travaux futurs et composition.
 10. Remplacement de l'EIPT-68 (suite) : préparation d'une nouvelle échelle (détail des échéances).
 11. Décision prise en 1985 par le CIPM sur les travaux thermométriques du BIPM.
 12. Publication des documents.
 13. Questions diverses.
 14. Prochaine session du CCT.
-

RAPPORT
DU
COMITÉ CONSULTATIF DE THERMOMÉTRIE
(16^e session — 1987)
AU
COMITÉ INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES
par M. DURIEUX, rapporteur

Le Comité Consultatif de Thermométrie (CCT) a tenu sa 16^e session au Bureau International des Poids et Mesures (BIPM), à Sèvres, du 9 au 11 juin 1987.

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 du Canada [NRC], Ottawa (R. E. BEDFORD).

CSIRO, Division of Applied Physics [CSIRO], Lindfield (T. P. JONES, R. C. KEMP, J. J. CONNOLLY).

Institut de Métrologie D. I. Mendéléev [IMM], Leningrad (A. POKHODOUN).

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

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

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

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

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

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

National Research Laboratory of Metrology [NRLM], Ibaraki
(H. SAKURAI).

Physikalisch-Technische Bundesanstalt [PTB], Braunschweig
(W. BLANKE, H.-J. JUNG).

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 (présent à la première demi-séance) ; T. J. QUINN, sous-directeur ; J. BONHOURE, R. P. HUDSON et G. GIRARD, adjoints au directeur du BIPM ; A. SATRAPINSKY (interprète).

Absents : Institut des Mesures Physicotechniques et Radiotechniques [VNIIFTRI], Moscou ; F. G. BRICKWEDDE (Pennsylvania), membre nominativement désigné.

Pour l'essentiel, la réunion a commencé par le rapport des présidents des groupes de travail :

Groupe de travail 1 — Présentation d'un projet de nouvelle échelle de température (appelée ici EIT-90).

Groupe de travail 2 — Présentation d'un projet de monographie « Techniques for Approximating the IPTS-68 and the EPT-76 ». Les commentaires que les membres du CCT auraient à faire sur ce projet devraient être communiqués au président du Groupe de travail 2 (R. E. Bedford) en septembre 1987 au plus tard.

Groupe de travail 3 — Résumé des dernières observations concernant les thermomètres à résistance de platine pour la mesure des hautes températures, à savoir : la confirmation de la migration du nickel au travers des fourreaux en silice ; l'inaptitude de l'eutectique cuivre/argent, ou de la pression de vapeur d'un caloduc, comme point fixe de définition au voisinage de 800 °C ; les récentes améliorations du comportement des thermomètres ; l'étude des diverses formules d'interpolation ; l'accord général sur le choix du point de congélation de l'argent, et non de l'or, comme limite du domaine.

Groupe de travail 4 — Suggestion qu'un article rassemblant les connaissances actuelles de $T - T_{68}$, prévu à l'origine pour être publié dans *Metrologia*, soit considéré comme une communication privée (et susceptible d'être corrigée) aux membres de la présente session du CCT.

Recommandation d'utiliser un thermomètre à gaz comme instrument étalon de l'EIT-90 entre 4 K (et non 3 K) et 24 K environ ; d'employer les échelles à pression de vapeur de l'hélium dans le domaine le plus large possible, mais en excluant celle de ^4He au-dessous du point λ ; de remettre à plus tard le choix de la limite inférieure de l'EIT-90.

Une longue discussion, centrée essentiellement sur le rapport du Groupe de travail 1 et sur le projet de résolution proposé par le CIPM à la 18^e CGPM, s'est engagée ensuite pour savoir si le CCT serait vraiment en mesure de donner dès 1989 une forme définitive à l'EIT-90 pour que celle-ci soit promulguée en 1990. On a fait remarquer que des études importantes intéressant l'EIT-90 et sa relation aux températures thermodynamiques étaient en cours dans un certain nombre de laboratoires et que les résultats de ces expériences ne seraient pas connus en 1989. Les erreurs numériques dans l'EIT-90 risquent donc d'être nettement plus grandes qu'elles ne le seraient pour une échelle publiée plus tard ; de plus, il est possible que des laboratoires restreignent les crédits consacrés à ces études si l'on sait que l'EIT-90 sera promulguée avant leur achèvement. En revanche, on peut dire aussi qu'on se trouve presque à tout moment dans cette même situation.

La plupart des participants sont d'accord sur ce qui suit : compte tenu de la répugnance toujours plus grande (encore peut-on discuter ce fait) à apporter des changements numériques aux systèmes de mesure, mais compte tenu aussi de l'occasion qui se présente de faire coïncider la solution de continuité introduite par l'EIT-90 avec les modifications prévues aux unités électriques, il est important de publier l'EIT-90 qui — cela ne fait aucun doute — sera bien supérieure à l'EIP-68. On pourra toujours, sans trop de difficulté, apporter ultérieurement des changements autres que numériques. Il est convenu de suivre l'opinion qui prévaut et d'essayer d'assurer l'échéance de 1990, en ne perdant pas de vue que le projet pourrait être retiré en 1989 si nécessaire, bien que cela ne soit pas souhaitable.

Plusieurs aspects des thermomètres à résistance de platine pour la mesure des hautes températures comme instruments étalons de l'EIT-90 ont été considérés. On a discuté des formules d'interpolation possibles, en se rapportant à des documents précis. La forme la plus convenable semble devoir être une fonction de référence assortie de plusieurs fonctions-écarts. On a constaté des améliorations récentes dans le comportement des thermomètres, mais il est manifeste qu'il subsiste des défauts fâcheux. Il semble que les thermomètres de fabrication chinoise soient stables à ± 5 mK près jusqu'à 1 064 °C, au moins à court terme.

L'expérience que l'on a des thermomètres de fabrication japonaise suggère qu'il existe une relation étroite entre un terme α élevé et une bonne stabilité à haute température. On a noté qu'il faut porter attention aux problèmes liés aux fuites électriques dans les isolants des thermomètres et à l'influence de la fréquence des dispositifs de mesure. L'amélioration

du comportement des thermomètres laisse à penser que les points de congélation aux températures élevées sont moins reproductibles qu'on ne le croyait précédemment ; on pourrait organiser des comparaisons entre laboratoires aux points de l'argent et de l'or. De plus, on est un peu préoccupé du manque de thermomètres de fabrication commerciale.

La question d'une limite inférieure de l'EIT-90 au-dessous de 1 K a été discutée brièvement. Parmi les techniques possibles, il y a la thermométrie suivant la courbe de fusion de ^3He , les points de transitions supraconductrices, la thermométrie à gaz de ^3He . À l'heure actuelle, il semble conseillé de conserver la limite inférieure de l'EIT-90 au niveau relativement élevé (1 K par exemple) prévu initialement ; un abaissement ultérieur est toujours possible et la procédure en est assez simple. En revanche, revenir sur une définition initiale qui a été mal étudiée est à la fois difficile et embarrassant.

D'autres questions connexes ont été soulevées. Des mesures de divers points fixes secondaires (en particulier ceux du gallium, de l'indium, du cadmium et de l'antimoine), faites avec des séries importantes de thermomètres à résistance de platine, ont donné des valeurs numériques vraisemblables pour l'unicité de l'EIT-68 dans le domaine compris entre 0°C et 650°C . On a reconnu l'importance du thermocouple or/platine nouvellement mis au point comme instrument très précis (± 10 mK environ) jusqu'à $1\,000^\circ\text{C}$. Ce thermocouple sera vraisemblablement utilisé comme étalon de transfert avec l'EIT-90 et risque même de concurrencer le thermomètre à résistance de platine pour la mesure des hautes températures comme instrument étalon au-dessus de 600°C . Bien qu'il soit moins précis que le thermomètre à résistance de platine, il est nettement plus simple et beaucoup moins cher. Le thermocouple palladium/platine semble avoir une importance comparable au-dessus de $1\,000^\circ\text{C}$. On a insisté sur la nécessité d'avoir une autre possibilité de définir l'EIT-90 avec grande précision entre -40°C et $+40^\circ\text{C}$. On a confirmé que le manque de reproductibilité du point triple de l'oxygène, phénomène observé entre laboratoires, est dû à la contamination par l'argon. Il semble que les problèmes de contamination du deutérium par l'hydrure de deutérium rencontrés auparavant soient en grande partie réglés, ce qui permet d'envisager d'utiliser le point triple du deutérium comme point fixe de définition de l'EIT-90.

Lors de l'étude minutieuse du projet de rédaction de l'EIT-90, plusieurs points ont été soulevés concernant le texte lui-même, les détails des définitions et le temps qu'il faudra pour remplir les blancs et pour résoudre les questions encore pendantes. Parmi les points de détail, il faut noter : la nécessité d'une représentation lisse des températures thermodynamiques ; le choix entre 3,2 K et 4,2 K pour la limite inférieure du thermomètre à gaz ; le choix des points fixes ; le problème, dans les définitions, des domaines de température qui se chevauchent ; les méthodes d'interpolation ; le désir de ne pas avoir de points d'étalonnage obligatoires très en dehors du domaine courant d'utilisation du

thermomètre. La plupart de ces questions ont été laissées au Groupe de travail 3 pour qu'il les résolve et soumette des propositions au CCT en temps utile.

Au cours de la matinée du 11 juin, les groupes de travail se sont réunis, soit séparément, soit dans diverses combinaisons, pour étudier plusieurs des questions posées jusque là.

On a discuté ensuite, dans le détail, l'organisation, la composition et les tâches des groupes de travail :

Groupe de travail 1 — Préparation du texte de l'EIT-90 et révision de la monographie « Supplementary Information for the ITS-90 ».

H. Preston-Thomas (président)
P. Bloembergen
T. J. Quinn

Groupe de travail 2 — Achèvement de la monographie « Techniques for Approximating the ITS ».

R. E. Bedford (président)
G. Bonnier
H. Maas
F. Pavese

Groupe de travail 3 — Définition du domaine du thermomètre à résistance de platine dans l'EIT-90.

L. Crovini (président)
H.-J. Jung
R. C. Kemp
Ling Shankang
H. Sakurai
J. F. Schooley

Groupe de travail 4 — Mise au point des meilleures valeurs de $T - T_{68}$ et communication de ces valeurs au Groupe de travail 3 ; définition du domaine du thermomètre à gaz dans l'EIT-90. (Ces sujets seront traités par deux sous-groupes à l'intérieur de ce Groupe de travail.)

R. P. Hudson (président)
M. Durieux
R. L. Rusby
R. J. Soulen
P. P. M. Steur
C. A. Swenson

On a minutieusement rédigé deux recommandations, T 1 et T 2, à soumettre au CIPM. T 1 insiste sur la nécessité de poursuivre les

recherches en thermométrie fondamentale. T 2 traite de l'importance de la mise au point à venir de méthodes simples et peu coûteuses pour faire des mesures de température.

On a aussi rédigé une déclaration (1987/1) : son texte traduit l'effet désastreux de la réduction, qui s'est récemment étendue, des moyens consacrés à la recherche en thermométrie dans les laboratoires nationaux. De plus, on a noté et déploré la récente décision du CIPM de reporter sur la radiométrie les efforts consacrés par le BIPM à la thermométrie, essentiellement en réduisant les travaux de recherche et les services d'étalonnage pour l'extérieur.

Dans les mesures précises de température, on rencontre des difficultés qui sont encore loin d'être résolues, bien qu'elles ne constituent pas, en principe, des obstacles insurmontables.

Au cours des dernières années, cinq grands laboratoires nationaux, ainsi que le Bureau International des Poids et Mesures, ont notablement réduit les moyens consacrés à leurs recherches sur les étalons thermométriques. Ce concours de circonstances fortuit a sérieusement entravé l'élaboration d'une nouvelle échelle de température et amoindri la confiance accordée à son exactitude. Il aura pour effet, dans l'avenir, de ralentir les études concernant la détermination plus exacte de la température thermodynamique dans l'Échelle internationale de température de 1990 [EIT-90] (c'est-à-dire la détermination des erreurs), ainsi que de ralentir tout progrès dans l'amélioration, l'extension et l'exploitation des possibilités de l'EIT-90.

À la lumière de ce qui précède, le Comité Consultatif de Thermométrie souhaite attirer l'attention du Comité International des Poids et Mesures sur le fait qu'il estime très important de ne pas réduire davantage, dans l'ensemble du monde, les recherches en thermométrie de précision et qu'au contraire il souhaite voir s'inverser, dès que possible, la tendance actuelle, accidentelle, à réduire ces recherches.

Un échéancier pour la préparation de l'EIT-90 a été établi : l'EIT-90 doit être terminée en septembre 1989 ; en fait, elle doit être achevée à l'automne 1988 pour laisser suffisamment de temps aux membres du CCT pour l'étudier et la vérifier. Le tableau des valeurs de $T - T_{68}$ doit être prêt le 1^{er} janvier 1989. Les groupes de travail présenteront leur rapport en mars 1988. La monographie que prépare le Groupe de travail 2 doit être convenablement revue pour être en accord avec l'EIT-90 et prête à publier à la fin de 1988.

On est convenu que seuls les rapports des groupes de travail seraient publiés en annexe au rapport de la 16^e session du CCT ; il est rappelé que le rapport du Groupe de travail 4 est complété par un document traitant des différences $T - T_{68}$, que le rapport du Groupe de travail 3 comporte deux documents et que le rapport publié du Groupe de travail 2 se limitera à une brève mise au point sur l'état d'avancement de la monographie en cours de préparation.

On a décidé que la prochaine session du CCT aurait lieu en septembre 1989, après avoir discuté des avantages qu'il y aurait à se

réunir en 1988 ; la question a été soumise à un vote et seule une petite minorité s'est déclarée en faveur d'une réunion en 1988. Il est évident, toutefois, qu'un certain nombre de réunions de groupes de travail, et de très nombreuses consultations entre groupes, devront avoir lieu d'ici le mois de septembre 1989.

Quelques questions diverses ont été brièvement abordées : l'EIT-90 doit-elle définir la résistance réduite W comme égale à $R/R(0\text{ }^{\circ}\text{C})$ ou à $R/R(0,01\text{ }^{\circ}\text{C})$? Doit-on exprimer le terme α à partir de $W(\text{Ga})$? Doit-on procéder à des comparaisons entre des cellules scellées d'argent et aussi d'aluminium ? Comment résoudre la question des erreurs dues aux fuites électriques dans les thermomètres à résistance de platine pour la mesure des hautes températures, alors que le programme de travail du NRC a été réduit ? L'ASMW a obtenu l'accord du CCT pour organiser une comparaison internationale de points fixes supraconducteurs.

9 juillet 1987

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

Nécessité de travaux fondamentaux en thermométrie

RECOMMANDATION T 1 (1987)

Le Comité Consultatif de Thermométrie,

tout en déclarant que la valeur T_{90} de la température mesurée dans l'Échelle internationale de température de 1990 (EIT-90) sera aussi voisine de la température thermodynamique T que le permettent les connaissances actuelles,

reconnaît

— que l'adoption de l'EIT-90 ne signifie en aucune façon que nous ayons maintenant une connaissance définitive de la valeur des températures thermodynamiques,

— que le travail nécessaire pour développer cette connaissance fondamentale par des déterminations directes des températures thermodynamiques est difficile, complexe et de longue haleine,

— qu'il est nécessaire d'anticiper les besoins à venir d'exactitude et de précision croissantes,

propose, en conséquence, de surveiller en permanence l'accord entre T_{90} et T au fur et à mesure des progrès de la science,

insiste sur l'importance de l'étude et de la mise en œuvre de méthodes nouvelles conduisant à des déterminations plus exactes des températures thermodynamiques, dans tout le domaine couvert par l'EIT-90 et aussi vers les très basses températures jusqu'à quelques millikelvins,

et insiste sur l'importance de la poursuite des travaux des laboratoires nationaux dans ce but.

Méthodes simplifiées et économiques de mesure des températures

RECOMMANDATION T 2 (1987)

Le Comité Consultatif de Thermométrie,

tout en reconnaissant que sa tâche principale est de veiller à améliorer la mise en pratique et à mettre à jour périodiquement l'Échelle internationale de température, s'est efforcé dans les années récentes de répondre aux demandes des chercheurs, ingénieurs et autres utilisateurs qui ont besoin de bonnes mesures de température plutôt que de mesures de température du niveau le plus élevé,

a noté les travaux récents sur les thermocouples or/platine et palladium/platine indiquant que ces thermocouples peuvent présenter des avantages appréciables, pour de nombreux usages, par rapport aux thermocouples habituels platine/platine rhodié.

En conséquence, le Comité Consultatif de Thermométrie,

recommande aux laboratoires nationaux de poursuivre leurs recherches sur les méthodes simplifiées et de coût réduit de mesure des températures, en particulier sur ces nouveaux thermocouples pour déterminer leur fonction ainsi que les règles pratiques de construction et d'utilisation qui devraient permettre d'exploiter au mieux leurs possibilités.

Compte rendu des séances de la 16^e session du CCT

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

Le président ouvre la session et accueille tous les membres et les délégués, en particulier Mr Kemp et Mr Connolly (CSIRO), Mr Sakurai (NRLM), Mr Pokhodoun (VNIIM) ainsi que son interprète (Mr-Satrapinsky) et Mr Jung (PTB, Berlin) qui assistent pour la première fois à une réunion du CCT.

Mr Durieux est nommé rapporteur. L'anglais est choisi comme langue de travail. Le second projet de l'ordre du jour est adopté.

2. Approbation du compte rendu des séances de la 15^e session du CCT (1984)

Le compte rendu des séances de la 15^e session est approuvé.

3. Documents présentés à la 16^e session du CCT : classement dans les différents points de l'ordre du jour

Plus de soixante documents sont parvenus au CCT, dont un grand nombre en début de réunion seulement : il n'est donc pas aisé de les classer immédiatement selon les différents points de l'ordre du jour. Pour gagner du temps, ils ne seront introduits et discutés qu'au fur et à mesure du déroulement de la réunion.

4. Remplacement de l'EIPT-68

4.1. Acceptation d'une nouvelle échelle ; état d'esprit à cet égard

Le président résume la situation présente et souligne les raisons pour lesquelles cette 16^e session du CCT est tout particulièrement importante : la possibilité s'offre au CCT d'établir des échéances pour l'introduction

d'une Échelle internationale de température révisée (EIT). À cet égard, le président compare la situation à celle de diverses autres sessions passées. Il précise que pour qu'une nouvelle échelle puisse être promulguée, il doit y avoir une quasi unanimité au sein du CCT, puisque le CIPM, auquel le CCT rend compte, risque d'estimer prématurée une modification de l'échelle si les opinions au sein du CCT sont divergentes. Si le CCT propose une modification de l'échelle à l'unanimité, les membres du CIPM auront à se prononcer sur l'opportunité du changement pour le bien du SI et en tenant compte des divers intérêts nationaux. Il est donc, aussi, essentiel que se dessine dans le monde entier un mouvement général d'acceptation, en particulier de la part des milieux industriels.

Le président rappelle un projet actuellement en cours, suivant lequel les valeurs utilisées pour conserver les représentations de l'ohm et du volt doivent être modifiées le 1^{er} janvier 1990 ; les nouvelles valeurs doivent être connues avant le 1^{er} janvier 1989. Selon toute vraisemblance, cette future révision des unités électriques sera acceptée mais suscitera quelques oppositions. Bien qu'une révision de ce type rapproche les unités conservées de leurs valeurs vraies conformes au SI, beaucoup d'utilisateurs industriels sont plus intéressés par la continuité que par l'exactitude fondamentale. Si ce n'était le fait qu'il existe, pour le volt tel qu'il est conservé, par exemple, trois valeurs dans le monde, le projet aurait rencontré une opposition à peu près générale. De l'avis du président, si le projet avait été présenté quelques années plus tôt, l'opposition aurait été moindre car, au niveau d'exactitude des mesures faites alors dans l'industrie, le changement (1×10^{-5} environ) serait passé inaperçu. Ce n'est plus le cas à présent.

Le président compare cette situation à l'égard des unités électriques à celle qui se présente en thermométrie. Les modifications proposées dans l'EIT sont perceptibles et gêneront les utilisateurs, essentiellement dans l'industrie. On sait, par exemple, que la continuité est primordiale dans certains cas et que, pour eux, on utilise encore l'EIPT-48 de préférence à l'EIPT-68. Les milieux scientifiques, en revanche, accepteront probablement un tel changement. Il s'ensuit que le CCT se trouve devant un dilemme : il peut recommander un changement de l'échelle dès maintenant, même si celle-ci risque de ne pas être totalement satisfaisante en ce qui concerne l'exactitude thermodynamique ; ou bien il peut attendre jusqu'à ce qu'une meilleure échelle soit élaborée, mais avec le risque de rencontrer alors une opposition beaucoup plus grande de la part des éventuels utilisateurs et, par conséquent, aussi de la part du CIPM. Nous devons mettre en balance perfection et urgence.

4.2. Échéance pour la préparation d'une nouvelle échelle (généralités)

De l'avis du président, si on élabore une nouvelle échelle de température, le changement sera plus facilement accepté s'il coïncide avec le changement des unités électriques que s'il intervient, par exemple,

deux ans plus tard, entraînant une nouvelle solution de continuité dans les mesures. Si une nouvelle échelle doit être promulguée en 1990, le CCT doit se réunir en 1989 pour l'approuver. À défaut d'approbation, la proposition de nouvelle échelle serait retirée. Nous pouvons donc, en fait, proposer une échelle maintenant et nous avons jusque dans le courant de l'été 1989 pour la retirer, avec difficulté toutefois.

Si le principe d'une nouvelle échelle est retenu, la tâche du CCT sera vraisemblablement triple : *a*) éliminer les imperfections découvertes dans le texte actuel de l'échelle et apporter les changements nécessaires aux formules d'interpolation ; *b*) réviser et mettre à jour tous les documents se rapportant à l'échelle, comme ceux contenant les renseignements complémentaires et les techniques d'approximation de l'EIT ; *c*) contrôler et enregistrer en permanence tous les écarts entre l'EIT et la température thermodynamique. Ce dernier point constitue une tâche très importante que l'on ne peut effectuer qu'au terme de travaux de recherche faits dans les laboratoires nationaux ou au BIPM ; il doit faire l'objet d'une recommandation ferme au CIPM.

Les participants ne font aucun commentaire particulier sur ces remarques du président.

5. Groupes de travail

5.1. Groupe de travail 1

5.1.1. Remarques préliminaires sur le projet d'EIT

En tant que président du Groupe de travail 1, le président du CCT rappelle qu'un projet préliminaire d'EIT-90 (document 22) a été établi après plusieurs réunions du Groupe de travail 1 ; ce projet a été diffusé aux membres du CCT quelque temps avant cette réunion, en sollicitant leurs commentaires et leurs suggestions. Un deuxième projet, tenant compte des commentaires reçus, en particulier ceux, fort utiles, de Mr Rusby (document 33), a été établi ; on y a fait figurer une note indiquant que des propositions d'interpolation (document 46), faites par l'Australie et concernant les thermomètres à résistance de platine pour la mesure des hautes températures, pourraient y être ajoutées. Ce deuxième projet (document 22A)* a été distribué au cours de la première séance du CCT.

Le Groupe de travail 1 prépare, ou a préparé, d'autres documents. L'un d'eux est un projet de résolution que le CIPM doit présenter à la 18^e CGPM en 1987 et qui concerne l'introduction d'une nouvelle EIT en 1990. Des projets de résolution de ce type doivent être portés à la connaissance des États membres de la Convention du Mètre six mois

* voir section 6.4.

avant la CGPM, aussi le CCT n'a-t-il pas eu la possibilité de le voir. Une fois soumis, le projet ne peut plus être modifié mais peut être retiré. Ce texte a aussi été distribué aux participants (document 54).

À une question de Mr Rusby qui demande si le projet de résolution dont il est question correspond au document 23, le président répond par la négative ; il indique qu'il se présente sous une forme comparable à la proposition concernant la modification des unités électriques et qu'il prévoit la mise en application d'une nouvelle EIT au 1^{er} janvier 1990, étant bien entendu que les détails nécessaires seront disponibles un an auparavant. Mr Quinn précise qu'il s'agit d'un projet de résolution adopté par le CIPM en 1986 et soumis de façon formelle à la CGPM.

Mr Rusby demande alors quels sont le statut et le but du document 23 intitulé 'Replacement of the International Practical Temperature Scale of 1968' ? Doit-il être discuté seulement à cette session du CCT ? Le président répond que, si le CCT propose un changement de l'échelle de température, une justification devra être présentée aux États membres de la Convention du Mètre. En pratique, sinon en principe, cette justification émanera du CCT et le document 23 n'est qu'un projet destiné à servir de point de départ.

5.1.2. Deuxième édition de « Supplementary Information for the IPTS-68 and the EPT-76 » (Supplementary Information for the ITS-90)

En conclusion du rapport du Groupe de travail 1, le président remarque qu'on a peu travaillé (y compris sous forme de projet préliminaire et de rédaction) pour réviser le document « Supplementary Information for the IPTS-68 and the EPT-76 » ; les modifications à y apporter devront en effet être, soit adaptées à la future EIT-90, soit rédigées à nouveau mais rester applicables à l'EIPT-68. Si l'EIT-90 est adoptée, quelques parties de ce document disparaîtront et de nouvelles devront être introduites, en particulier en ce qui concerne les thermomètres à résistance de platine pour la mesure des hautes températures et les thermomètres à gaz. Dans le cas d'une EIT-90, la révision doit effectivement être prête pour 1990 ; dans le cas contraire, elle est moins urgente mais il est vraisemblable qu'elle sera de toute façon prête vers 1990.

5.2. Groupe de travail 2: Projet de monographie « Techniques for Approximating the IPTS-68 and the EPT-76 »

Le président, Mr Bedford, rappelle au CCT qu'il incombe au Groupe de travail 2 de préparer un document décrivant les façons dont on peut réaliser l'EIPT-68 et l'EPT-76 à des niveaux modestes d'exactitude. Le long projet actuel (Version D) qui constitue la base du rapport du Groupe de travail 2 fait l'objet du document 21. Ce projet que le CCT

a vu en 1984 a été révisé trois fois : vers la fin de 1984 (Version B), à la suite de réunions du Groupe de travail 2 à Turin en 1985 (Version C) et à Berlin en 1986 (Version D). Les membres du Groupe de travail 2 ont le sentiment que ce document est maintenant sous une forme presque publiable. Il comporte encore quelques défauts évidents, mais auxquels on peut remédier facilement ; pour l'essentiel, il manque des sections, des figures et des références. Au cours d'une réunion du Groupe de travail 2, tenue au BIPM le 8 juin 1987, quelques corrections rédactionnelles importantes ont été suggérées. Mr Bedford demande maintenant aux membres du CCT de lui communiquer par écrit leurs commentaires et leurs critiques afin qu'il puisse en être tenu compte.

Le président du Groupe de travail 2 estime qu'une version publiable devrait être prête à la fin de 1988 et demande s'il conviendrait alors de la publier (comme monographie du BIPM) ou s'il faudrait attendre l'éventuelle apparition de l'EIT-90. Dans ce dernier cas, quelques modifications rédactionnelles évidentes mais peu étendues concernant les désignations des échelles seraient nécessaires. À diverses questions de détail, Mr Bedford répond qu'il attend de recevoir les commentaires du NPL, que la date limite pour recevoir les commentaires des membres du CCT est fixée à septembre 1987 et que le Groupe de travail 2 est conscient du recouvrement possible et des interférences entre « Supplementary Information » et ce document. À des questions de Mr Quinn et de Mr Giacomo qui demandent si, dès maintenant, dans la rédaction du texte, on peut anticiper l'introduction de l'EIT-90, Mr Bedford répond que c'est possible et relativement facile. On est d'accord pour estimer qu'il faut rédiger le document dans cette perspective et le publier dès qu'il sera prêt, sans attendre l'éventuelle promulgation d'une EIT-90.

5.3. Groupe de travail 3 : Propositions pour une fonction de référence, des méthodes d'interpolation et des domaines de température pour le thermomètre à résistance de platine

Le président, Mr Crovini, résume le travail du Groupe de travail 3 depuis 1984. En coopération avec le NBS, un « Workshop » a été organisé à Gaithersburg en 1985 pour rassembler et collationner autant de renseignements que possible sur les thermomètres à résistance de platine pour la mesure des hautes températures ; un rapport (voir Annexe T4, p. T43) a été rédigé par la suite. À la même occasion, le Groupe de travail 3 s'est réuni avec le Groupe de travail 4 pour discuter de la partie inférieure du domaine de température du thermomètre à résistance de platine et de son raccordement au domaine du thermomètre à gaz d'interpolation. À l'époque, au Groupe de travail 3, on pensait que le thermomètre à gaz convenait parfaitement jusqu'à 24,5 K ; on avait aussi le sentiment que le thermomètre à résistance de platine était suffisamment exact jusqu'à 13,8 K et on estimait qu'il pouvait être

retenu comme autre solution. Revenant au sujet des thermomètres à résistance de platine pour la mesure des hautes températures, Mr Crovini considère que beaucoup de progrès ont été accomplis depuis 1985. Le schéma d'interpolation couramment préféré sur la totalité du domaine du thermomètre à résistance de platine est décrit dans un addenda au rapport du Groupe de travail 3 (voir Annexe T5, p. T 51). Le NRLM, qui a présenté un nouveau modèle de thermomètre, pense aussi que la stabilité de ce type de thermomètre est d'autant meilleure que $\alpha > 3,927 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. À l'IMGC, on a confirmé la migration du chrome, du nickel ou du cuivre au travers de la silice, avec contamination ultérieure possible de la résistance. En conséquence, il ne faut pas utiliser les thermomètres en contact étroit avec ces métaux au-dessus de 600 °C.

Il semble aussi nécessaire d'évaluer la qualité des points fixes à température élevée. Il n'y en a pas de suffisamment reproductible entre les points de congélation de l'aluminium et de l'argent ; en effet l'eutectique cuivre/argent n'est reproductible qu'à $\pm 10 \text{ mK}$ et les caloducs au sodium à bouchon de gaz ne donnent pas des résultats suffisamment reproductibles d'un instrument à l'autre. De plus, il est souhaitable d'étudier à nouveau les points de l'aluminium et de l'argent : des désaccords sont apparus récemment. Une comparaison du point de congélation de l'argent avec des cellules transportables est en cours entre le NBS et l'IMGC.

En ce qui concerne les méthodes d'interpolation, Mr Crovini en a décrites plusieurs, fondées sur une fonction de référence et diverses fonctions écarts, qui sont utilisables au-dessous du point triple du gallium. Au-dessus de 0 °C on peut utiliser, soit une technique comparable, soit une approximation à l'aide d'un polynôme ; dans ce dernier cas, il est possible d'introduire une représentation paramétrique comportant un paramètre tel que t' relié à t au moyen d'une fonction indépendante du thermomètre. Le Groupe de travail 3 recommande la méthode de la fonction de référence qui présente les avantages suivants :

a) le domaine compris entre 0 °C et 962 °C peut être scindé en plusieurs sous-domaines pour faire face aux besoins des étalonnages, ce qui est très important car un thermomètre à résistance de platine ne doit pas être porté à une température très supérieure à son domaine d'utilisation ; b) on peut avoir une non-unicité faible, donc acceptable ; c) on peut réaliser la continuité, même au niveau des dérivées première et seconde. Deux propositions de ce type, qui diffèrent sur des détails, sont décrites dans les documents 46 et 53 ; elles seront étudiées ultérieurement.

Bien que la méthode de la fonction de référence offre la plus grande souplesse, elle peut présenter une faiblesse aux températures élevées. La méthode admet implicitement que la fonction de référence représente au mieux la résistance réduite d'un thermomètre à résistance de platine

type. Les thermomètres à résistance de platine pour la mesure des hautes températures présentent trois points faibles : fuite électrique, instabilité à température élevée, erreurs d'immersion (conduction thermique). Il pourrait arriver que, par suite d'améliorations apportées à la construction des thermomètres, une fonction de référence choisie aujourd'hui ne soit plus bien représentative dans l'avenir et que, par exemple, elle entraîne une non-unicité. On pourrait, toutefois, pallier ce risque, en modifiant la fonction de référence dans un petit amendement apporté à l'échelle.

Faisant référence au document 8 qui traite de fonctions d'interpolation spline de troisième degré, Mr Bloembergen demande quelle est l'opinion du Groupe de travail 3 au sujet de la limite supérieure de température du domaine du thermomètre à résistance de platine. Mr Crovini répond que, au moment où s'est tenu le « Workshop » en 1985, on ne savait pas encore s'il convenait d'adopter le point de congélation de l'argent ou celui de l'or ; au Groupe de travail 3, on considère maintenant que la meilleure limite est celle du point de l'argent. La dérive de la valeur de la résistance des thermomètres est nettement plus petite au point de l'argent qu'à celui de l'or et, de plus, l'utilisation du point de l'argent comme limite supérieure du domaine du thermomètre à résistance de platine permet d'obtenir plus facilement la continuité avec le domaine du rayonnement.

5.4. Groupe de travail 4

5.4.1. Différences $T - T_{68}$ et $T - T_{76}$

Le président, Mr Hudson, rappelle qu'à l'origine la tâche du Groupe de travail 4 était de mettre à jour un document de 1977 portant sur les différences $T - T_{68}$ et, avec l'approbation du CCT, de le publier dans *Metrologia*. Toutefois, les membres du Groupe de travail 4 estiment maintenant que, compte tenu des nouveaux résultats qui vont vraisemblablement être obtenus bientôt, il vaudrait mieux considérer le document 9 comme point de départ d'un document à publier plus tard lorsqu'une nouvelle échelle sera établie ; en conséquence, ils demandent que le document 9 soit joint au présent rapport de la 16^e session du Comité Consultatif de Thermométrie (voir Annexe T7, p. T 59). Mr Hudson remercie Mr Bedford et Mr Kemp pour leur contribution.

5.4.2. Spécifications pour le thermomètre à gaz d'interpolation

Mr Hudson rappelle que les spécifications concernant un thermomètre à gaz d'interpolation ont été discutées dans les précédents rapports du Groupe de travail 4 et à nouveau dans le rapport actuel (voir Annexe T6, p. T 57). Un compte rendu mis à jour a été communiqué précédemment au Groupe de travail 1. À la suite d'une réunion tenue le 8 juin 1987,

le Groupe de travail 4 recommande maintenant que la limite inférieure de température pour le thermomètre à gaz soit fixée à 4,2 K et non à 3,2 K. La valeur la plus basse ne présente aucun avantage net, au contraire : les corrections deviennent de plus en plus importantes de 4,2 K à 3,2 K. De plus, le thermomètre à gaz n'est pas l'instrument le plus simple et on doit éviter d'y avoir recours lorsque une autre solution aisée et de bonne qualité existe.

Le Groupe de travail 4 recommande d'utiliser au-dessous de 4,2 K les pressions de vapeur de l'hélium, qui permettent d'obtenir une précision et une reproductibilité de $\pm 0,1$ mK ; toutefois, il convient de n'utiliser que ^3He au-dessous de T_λ à cause des difficultés pratiques que l'on rencontre avec ^4He dans ce domaine. À une question de Mr Pavese sur la limite inférieure recommandée pour la nouvelle échelle, Mr Hudson répond qu'il en a été discuté et que, sauf s'il apparaissait des raisons de changer, la valeur 0,5 K constitue un compromis satisfaisant. Mr Pavese demande encore si la pression de vapeur de ^3He est exacte à 0,1 mK près au-dessous de 1 K : Mr Rusby estime que les mesures de pression de vapeur ne sont pas exactes à mieux que 1 mK à 0,5 K, bien que la formule d'interpolation puisse convenir jusqu'à 0,2 K. Mr Pavese demande enfin s'il faut exclure la coexistence de plusieurs définitions au-dessous de 24 K ; Mr Hudson répond que, au Groupe de travail 4, on n'est prêt à accepter plusieurs formules que si elles sont équivalentes, c'est-à-dire également bonnes.

6. Remplacement de l'EIPT-68 (suite)

Mr Quinn ouvre la discussion par des commentaires généraux sur l'opportunité de remplacer l'EIPT-68, les pressions qui s'exercent sur le CCT et les aspects techniques liés à l'introduction d'une nouvelle échelle de température. Il donne un aperçu détaillé des progrès considérables qui ont été réalisés depuis 1968 dans presque tous les domaines concernant les étalons de température ; de plus, il est certain qu'on dispose maintenant d'informations en quantité suffisante, ou qu'à tout le moins cela sera le cas d'ici deux ans, pour proposer une nouvelle échelle qui, même si elle n'est pas parfaite, sera largement supérieure à l'EIPT-68 et à l'EPT-76 actuelles. Ce sont les questions techniques qui sont importantes pour le CCT : il faut toutefois mettre en balance les inconvénients d'une échelle qui n'est pas tout à fait parfaite et les avantages d'une mise en service prochaine, à une époque qui coïncide avec des changements de priorités dans les laboratoires nationaux et avec les modifications prévues concernant les étalons électriques. Si l'on ne change pas d'échelle maintenant, il risque d'être extrêmement difficile de le faire plus tard.

Avant de solliciter des commentaires, le président répète que, si le CCT décide de poursuivre son projet pour introduire une nouvelle échelle en 1990 et si des difficultés insurmontables surgissent, le projet pourra toujours être abandonné à tout moment avant 1990. Insistant sur le contenu du document 54 (Projet de résolution du CIPM à la CGPM), Mr Rusby comprend qu'il s'agit d'une proposition que le CCT doit accepter ou retirer. Il ne voit aucune raison de lier un changement des étalons de température au changement qui doit intervenir pour les étalons électriques ; de plus, il doute sérieusement qu'il reste suffisamment de temps pour que l'échelle soit prête, en pratique, au début de 1989. Lorsque le CCT se réunira en 1989, il sera quasiment mis devant un fait accompli ; Mr Rusby aurait préféré une proposition qui laisse une marge de manœuvre plus grande. Le président fait remarquer que le projet de résolution (document 54) a déjà été présenté ; il n'est par conséquent plus possible d'en modifier la rédaction mais il est possible de le retirer. De toute façon le CCT est engagé, non à formuler une nouvelle échelle pour 1990, mais à essayer de le faire. De plus, il n'est pas nécessaire que certains détails précis (valeur de $T - T_{68}$, fonction de référence du thermomètre à résistance de platine) soient prêts pour janvier 1989. Des changements mineurs pourront être apportés jusqu'en janvier 1990, de même qu'il restera toujours possible de retirer le projet d'échelle même si cela n'est pas souhaitable. Mr Quinn fait remarquer que, sans ce projet de résolution, il n'y aurait eu aucune possibilité d'avoir une nouvelle échelle en 1990.

Plusieurs membres expriment leur inquiétude à propos du peu de temps qu'il reste pour formuler l'échelle. Des travaux de recherche sont en cours dans beaucoup de laboratoires et les résultats risquent de ne pas être disponibles avant 1989. Quelle est la date limite pour présenter de nouveaux résultats ? De plus, il est tout à fait possible que les crédits pour les recherches en cours soient supprimés si les travaux ne sont pas terminés avant l'introduction de la nouvelle échelle. Mr Jung, par exemple, commencera en 1988 des mesures de $T - T_{68}$ entre 660 °C et 960 °C ; il aura peut-être des résultats pour 1989 mais ceux-ci ne seront certainement pas publiés officiellement d'ici là. Pourra-t-il en être tenu compte ? Le président et Mr Quinn le pensent, compte tenu de l'excellente réputation de la PTB, sauf si ces résultats s'écartent nettement des valeurs déjà connues. En revanche, Mr Hudson estime que l'échéancier est tel qu'il y a peu de chance qu'ils puissent être utilisés.

Mr Jones, au nom du CSIRO, appuie la proposition de tenter de parvenir à une nouvelle échelle pour 1990, surtout avec la possibilité de retirer le projet. Sans cela, une nouvelle échelle ne verrait certainement pas le jour avant plusieurs années.

Mr Crovini n'approuve pas la phrase qui figure dans le document 54 selon laquelle les valeurs de $T - T_{90}$ « seront négligeables pendant de nombreuses années à venir ». Il estime que c'est une affirmation très forte que les résultats dont on dispose actuellement ne confirment pas.

De plus, on peut l'interpréter comme signifiant qu'à l'avenir il ne sera plus nécessaire de faire des mesures de la température thermodynamique, ce qui est absurde. Mr Quinn répond que le mot « négligeable » s'adresse aux utilisateurs industriels et non aux métrologistes. Le président rappelle que la phrase ne peut plus être modifiée mais que, pour ce qui est des mesures de la température thermodynamique, il insistera dans son rapport au CIPM pour qu'elles soient poursuivies (Recommandation T 1 (1987), p. T 7).

Une discussion supplémentaire, à laquelle prennent part de nombreux participants, s'engage alors sur l'échéancier : les formules d'interpolation pour les thermomètres à résistance de platine et à gaz doivent être mises au point ; les différences $T - T_{68}$ doivent être évaluées ; il faut aussi établir une fonction de référence pour le thermomètre à résistance de platine et Mr Jung envisage un thermomètre à résistance de platine pour la mesure des hautes températures avec un blindage modifié qui risque de donner des résultats différents. Tout cela prendra beaucoup de temps.

En dépit de toutes les difficultés prévues, il semble qu'un accord général existe pour tenter de formuler une nouvelle EIT pour 1990.

6.1. Situation actuelle du thermomètre à résistance de platine pour la mesure des hautes températures

Mr Jones ouvre la discussion en présentant d'abord le document 15 qui décrit la mesure thermodynamique des points de l'or, de l'argent et de l'eutectique cuivre/argent par référence au point de l'aluminium ; les résultats concordent bien avec les déterminations antérieures. Il passe ensuite au document 46 qui décrit une méthode d'interpolation pour le thermomètre à résistance de platine, méthode établie à partir des résultats de comparaisons entre des thermomètres à résistance de platine pour la mesure des hautes températures et des pyromètres optiques.

Mr Crovini estime que la méthode d'interpolation proposée dans le document 53 offre plusieurs avantages sur celle du document 46 ; elle fait aussi appel à une fonction de référence et à des fonctions écarts, mais celles-ci sont exprimées suivant W et non t ; de plus, ces fonctions sont telles qu'elles autorisent des sous-domaines partant de 0 °C pour aller à l'une ou l'autre de plusieurs températures supérieures et que la continuité de leurs dérivées première et seconde est assurée jusqu'au point de l'aluminium. En outre, le point du gallium étant commun aux relations d'étalonnage au-dessus et au-dessous de 0 °C, la continuité des dérivées est aussi facile à obtenir à 0 °C sans trop d'acrobaties mathématiques. Mr Crovini poursuit en citant beaucoup de détails fournis dans le document 53 ; il estime qu'en poussant encore l'analyse on doit pouvoir améliorer la méthode.

Mr Ling décrit les récentes recherches faites sur les thermomètres construits par la Chine (document 57). Ceux-ci semblent fiables à

± 5 mK près jusqu'au point de l'argent, après plus de 200 cycles entre 0°C et 962°C ; des défauts de reproductibilité plus grands (10-20 mK) peuvent être dus aux points fixes eux-mêmes. Les différences observées entre les mesures en courant continu et celles en courant alternatif sont négligeables au-dessous de 660°C ; en revanche, elles peuvent atteindre 20 mK à une température supérieure et elles dépendent de la fréquence (maximum utilisé : 75 Hz). Les résultats en courant continu sont les bons.

Mr Bedford résume les observations faites par Mr Berry au NRC (document 45), en particulier celles qui sont liées aux problèmes de fuites par défaut d'isolement et qui sont maintenant confirmées par les résultats obtenus en Chine. Les erreurs dues aux fuites peuvent être très importantes si elles ne sont pas éliminées ou si l'on n'en tient pas compte convenablement; elles sont particulièrement gênantes avec les thermomètres qui comportent une garde. Bien que cela ne soit pas spécifié dans son document, Mr Berry attire l'attention sur le fait que, pour comparer des résultats de mesures en courant alternatif et en courant continu, il faut un laps de temps considérable entre les mesures pour évaluer convenablement les différences. Il faut beaucoup de temps pour que le thermomètre retrouve son équilibre quand il est mis à la terre, puis isolé, ou inversement; si l'on passe un peu vite d'un état à l'autre, les résultats sont faux.

Mr Sakurai, en s'appuyant sur le document 11, signale que l'expérience acquise avec les thermomètres construits au Japon montre que l'on obtient une très bonne stabilité à long terme au point de l'or, seulement si $\alpha > 3,927 \times 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. En revanche, si la limite supérieure de température doit être le point de l'argent, les thermomètres présentant un $\alpha < 3,927 \times 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ peuvent être suffisamment stables. À propos du document 34, Mr Sakurai précise que l'on rencontre des difficultés pour réaliser des points de l'argent et de l'aluminium stables, ce qui peut être dû à l'oxydation. Une comparaison de cellules contenant de l'argent est en cours entre le NBS et l'IMGC; Mr Sakurai propose d'étendre cette comparaison à d'autres laboratoires.

Mr Jung présente des résultats récents de comparaisons faites aux points de l'argent et de l'aluminium entre le NIM et la PTB. Il est définitivement établi que la différence de 24 mK entre deux cellules contenant de l'aluminium (document 8) est due à un échantillon défectueux, mais on ne connaît pas la nature exacte de l'anomalie; cette dernière est inhabituelle: les points de fusion et de congélation de l'échantillon défectueux concordent bien et le domaine de fusion est remarquablement petit. Mr Jung signale que l'accord au point de l'aluminium (tel qu'il est obtenu avec deux nouvelles cellules) est maintenant réalisé à ± 1 mK près; en revanche, on observe des écarts allant jusqu'à 10 mK au point de l'argent (la cellule de fabrication chinoise donne une température plus élevée). Mr Bonnier se demande si cela n'est pas dû aux fours, qui présentent des différences, plutôt

qu'aux échantillons d'argent. Mr Jung ne le pense pas, mais espère résoudre le problème en comparant toutes les cellules dans un même laboratoire.

Mr Bloembergen et Mr Jung discutent ensuite des mérites respectifs de l'utilisation, soit des rapports de résistance, soit des différences de résistance, pour faire des interpolations avec les thermomètres à résistance de platine pour la mesure des hautes températures. Mr Jung préfère les rapports de résistance. Il poursuit en décrivant avec beaucoup de détails les fonctions d'interpolation spline de troisième degré du document 63 et conclut qu'elles valent mieux que la méthode exposée par Mr Crovini. La non-unicité est de 0,7 mK au-dessous de 420 °C et d'environ 3 mK au maximum au-dessus ; dans ce dernier cas il y a un intervalle de 300 °C couvert par la fonction spline, c'est pourquoi l'interpolation s'écarte de la température thermodynamique de plusieurs millikelvins. Mr Jones fait valoir qu'il est souhaitable de n'avoir que deux points d'étalonnage sur un intervalle, alors que les fonctions d'interpolation spline de troisième degré en nécessitent environ cinq.

Mr Soulen remarque que les preuves de non-unicité avec les thermomètres à résistance de platine pour la mesure des hautes températures s'accumulent. Or, qu'en est-il des températures thermodynamiques dans ce domaine ? Au NBS, Mr Reilly va comparer des thermomètres à résistance de platine avec des thermomètres à fibre optique et des pyromètres optiques classiques, en se servant d'un four tubulaire contenant un corps noir et non des points de congélation de métaux. Avec un peu de chance, il devrait avoir des résultats avant 1989. Par ailleurs, les travaux du NBS sur la thermométrie à gaz sont terminés. Dès que Mr Schooley aura déterminé le coefficient de dilatation thermique du réservoir, les résultats seront publiés. Mr Soulen est prêt à examiner toute demande de quiconque souhaite utiliser le manomètre de grande précision qui se trouve ainsi disponible au NBS. Au NPL, Mr Chattle va effectuer une comparaison entre le thermomètre à résistance de platine et le pyromètre optique, de 630 °C à 962 °C, en utilisant un four avec un caloduc à bouchon de gaz. Mr Crovini espère terminer d'ici un an une mesure du point de congélation du cuivre par thermométrie à bruit. Mr Quinn fait remarquer que la récente valeur donnée au point de l'or par le CSIRO (document 15), égale à 1064,14 °C, est indirectement fondée sur les résultats obtenus au NBS à 456 °C avec le thermomètre à gaz. La valeur absolue, fondée sur la constante de Stefan-Boltzmann et publiée par Mr Blevin il y a de nombreuses années, était de 1064,12 °C avec une incertitude de 0,4 K pour un niveau de confiance de 99 % ; l'accord est excellent, ce qui indique que les températures obtenues par L. A. Guildner et R. E. Edsinger sont correctes, au moins à ± 30 mK.

Mr Connolly, ainsi que d'autres participants, expriment leur inquiétude à propos du petit nombre de fournisseurs de thermomètres à résistance de platine pour la mesure des hautes températures. Citant le document 51,

Mr Bedford signale que le thermocouple or/platine mis au point par Mr McLaren et Mr Murdoch constitue une autre possibilité ; il a une précision de ± 10 mK entre 0°C et 1000°C et il est plus simple et nettement moins coûteux qu'un thermomètre à résistance ; considéré comme un instrument secondaire particulièrement exact, il permettrait probablement, si besoin était, de définir l'échelle avec suffisamment d'exactitude. Le président fait remarquer qu'une solution provisoire pourrait être de construire une échelle à partir des relations donnant W en fonction de T_{90} obtenues avec un thermomètre à résistance, d'interpoler avec le thermocouple or/platine et d'attendre ainsi la mise en vente d'un thermomètre à résistance facilement disponible. On pourrait modifier l'échelle ultérieurement sans apporter de changement numérique. Mr Maas signale que les résultats du NRC se trouvent confirmés par ceux, similaires, de l'ASMW avec un thermocouple platine/palladium et que l'on a atteint des exactitudes d'environ ± 20 mK à $1\ 100^{\circ}\text{C}$ et ± 50 mK à $1\ 300^{\circ}\text{C}$. Ces deux types de thermocouples sont plus sensibles que le thermocouple platine/platine rhodié à 10 %.

Mr Hudson s'étonne que les participants n'aient pas réagi à la description faite par Mr Bedford du thermocouple or/platine. Compte tenu des échéances rapprochées et de l'éventuel manque de thermomètres à résistance, il ne comprend pas pourquoi la possibilité d'avoir un instrument beaucoup moins onéreux, plus simple, plus stable et à peine moins exact n'a pas suscité davantage de réaction. En réponse, Mr Chattle indique qu'il n'y a pas encore beaucoup de publications sur le sujet mais qu'il doit les lire avec soin ; Mr Crovini ajoute que cet instrument demande encore beaucoup de mise au point et, bien qu'il soit bon, qu'il est encore nettement moins exact que le thermomètre à résistance ; enfin, Mr Jones signale qu'au-dessous de 800°C le thermomètre à résistance est beaucoup plus exact. Mr Bonnier suggère que, puisque beaucoup de thermomètres à résistance doivent être équipés d'une garde, on utilise un fil d'or comme garde afin de pouvoir comparer directement un thermocouple or/platine et un thermomètre à résistance. La discussion se termine par une information de Mr Bedford faisant savoir qu'une publication détaillée sur le thermocouple or/platine est sur le point de sortir et que des prétirages seront envoyés aux participants qui en feront la demande.

6.2. Extension éventuelle de l'EIT-90 au-dessous de 1 K

Le président rappelle qu'on a déjà suggéré 0,5 K comme limite inférieure de l'échelle, mais il considère qu'il n'y a vraiment aucun inconvénient à adopter une valeur un peu plus élevée : il sera toujours facile d'ajouter plus tard à l'échelle une extension vers les basses températures. Faisant référence au document 44, Mr Soulen pense qu'une sorte d'échelle de température universelle, pour les laboratoires qui

travaillent aux très basses températures, pourrait contribuer à résoudre des controverses sur des lois ou des propriétés physiques pour lesquelles les incertitudes des mesures de température sont une source courante de difficultés. La proposition conjointe du NBS et de la PTB, bien que n'apportant rien de nouveau, consiste à utiliser la courbe de fusion de ^3He . Mr Soulen poursuit en donnant de nombreux détails sur les programmes de travail en cours dans ces deux laboratoires, ainsi que dans d'autres, où l'on espère atteindre des exactitudes de $\pm 0,1\%$ et des précisions de $\pm 0,01\%$. Mr Jung est d'accord et ajoute que la thermométrie fondée sur la courbe de fusion de ^3He est moins sensible à interférence que, par exemple, les résistances de carbone ou de germanium, alors qu'il est sans doute aussi possible de la rendre meilleure que les dispositifs supraconducteurs. Plusieurs participants interviennent alors dans une discussion qui tourne essentiellement sur la nécessité de faire des mesures de pression, le nombre des points d'étalonnages nécessaires et la valeur probable ($\sim 0,8\text{ K}$) de la limite inférieure de l'échelle.

Mr Pavese envisage la possibilité d'utiliser un thermomètre à gaz de ^3He (document 10 A, B) entre $0,8\text{ K}$ et $24,6\text{ K}$. La jonction avec le thermomètre à courbe de fusion de ^3He se ferait au voisinage de $0,8\text{ K}$, ce qui permettrait d'éviter d'avoir à incorporer les relations de la pression de vapeur de l'hélium dans l'EIT-90. Entre $0,8\text{ K}$ et $2,2\text{ K}$, ce thermomètre à gaz serait utilisé en mode absolu, avec le point λ ($2,2\text{ K}$) comme point de référence ; au-dessus, il serait utilisé en mode d'interpolation. Mr Pavese présente d'autres détails techniques et estime que l'on peut atteindre une exactitude de $\pm 0,3\text{ mK}$; toutefois, on ne dispose pas, pour le moment, de résultats expérimentaux. Mr Pavese poursuit en remarquant que le domaine du thermomètre à gaz descend jusqu'à $3,2\text{ K}$ dans le document 22, alors que la limite inférieure retenue est de $4,2\text{ K}$, même lorsqu'on utilise ^3He , dans le document 22A. Il serait plus logique d'admettre $3,2\text{ K}$ (point d'ébullition de ^3He) pour étalonner un thermomètre à gaz de ^3He . Pour justifier la limite de $4,2\text{ K}$, Mr Rusby donne la raison suivante : le thermomètre à gaz d'interpolation est sensible aux corrections du coefficient du viriel, ce qui entraîne des écarts par rapport à un comportement linéaire simple ou quadratique, ces écarts croissant rapidement au fur et à mesure que la température décroît. Par conséquent, le domaine de température de ce thermomètre ne doit pas être plus grand qu'il n'est nécessaire. Au-dessus de $4,2\text{ K}$ il n'y a pas d'autre choix, mais au-dessous de $4,2\text{ K}$ les relations de la pression de vapeur de l'hélium offrent une solution plus précise. Un débat assez long sur ces assertions a lieu entre plusieurs membres du CCT. Mr Pavese n'est pas complètement d'accord avec les remarques de Mr Rusby et il tient, pour des raisons de commodité et de symétrie, à ce que l'on accepte $3,2\text{ K}$ comme température inférieure d'étalonnage du thermomètre à gaz de ^3He . Plusieurs participants n'y voient aucune objection de principe. Une autre possibilité est évoquée :

dans ce cas-là, le thermomètre à gaz de ^3He permettrait-il de définir les températures jusqu'à 3,2 K, ou bien seulement jusqu'à 4,2 K avec 3,2 K comme point d'étalonnage extérieur au domaine de définition des températures ?

Mr Hudson déclare que le Groupe de travail 4, invité à considérer ce problème, l'a étudié longuement sans parvenir à le résoudre. Pour être plus précis, le Groupe de travail 4 a examiné la proposition de Mr Pavese, qui consiste à remanier la définition de l'échelle pour permettre d'utiliser un thermomètre à ^4He ou, ce qui revient au même, à ^3He avec 3,2 K comme point d'étalonnage le plus bas. Il a estimé qu'au-dessus de 4,2 K les deux définitions se valaient. La proposition de Mr Pavese éliminerait aussi la nécessité du thermomètre à pression de vapeur de ^4He mais, sur cette question, le Groupe de travail 4 s'est partagé : deux membres étaient défavorables à la proposition, deux favorables et un neutre. Plus précisément, ceux qui étaient défavorables à la proposition avaient le sentiment que les pressions de vapeur de l'hélium (que ce soit ^3He ou ^4He) sont plus sensibles et reproductibles que le thermomètre à gaz et devraient par conséquent avoir la préférence. Ceux qui étaient favorables à la proposition étaient d'avis contraire, mais estimaient que le principe de ne pas permettre plusieurs définitions parallèles, à moins qu'elles ne soient d'égale qualité, avait déjà été transgressé dans d'autres domaines et pouvait bien l'être encore ! Ils considéraient, de plus, que la nette supériorité attribuée au thermomètre à pression de vapeur devait encore être prouvée. Le Groupe de travail 4 a aussi suggéré de formuler l'échelle à titre provisoire en acceptant un choix de définitions équivalentes, le thermomètre à gaz de ^3He ne devant être retenu que si des résultats ultérieurs venaient confirmer son intérêt. En revanche, il n'a pas envisagé la possibilité d'étalonner le thermomètre à gaz de ^3He à 3,2 K et de ne l'utiliser qu'au-dessus de 4,2 K.

Mr Pavese fait objection à ce rapport du Groupe de travail 4, car il craint qu'il n'y ait eu confusion entre reproductibilité et exactitude dans la comparaison des mérites respectifs des deux thermomètres. Il est d'accord pour considérer que le thermomètre à pression de vapeur est peut-être plus reproductible mais que sa qualité, c'est-à-dire son exactitude, est équivalente. Il s'ensuit une longue discussion entre plusieurs membres sur la distinction entre exactitude et reproductibilité ; il convient de savoir si, dans ce contexte, le mot exactitude signifie exactitude dans la représentation des températures thermodynamiques et si exactitude et qualité sont synonymes. Le soin de résoudre cette question est laissé à un nouveau Groupe de travail 4.

6.3. Problèmes divers

Mr Bedford, en réponse à une demande qui lui a été faite lors de la 15^e session (1984) du CCT, a coordonné une étude sur la non-unicité du thermomètre à résistance de platine entre 0 °C et 420 °C, en

s'intéressant d'abord à la détermination des points de congélation du gallium, de l'indium et du cadmium. Il remercie les sept laboratoires qui lui ont fourni des valeurs pour cette étude, dont les résultats figurent dans le document 38 ; il décrit brièvement les mesures qui ont été faites. Avec les valeurs utilisées, il semble que la non-unicité ne soit pas significativement différente de l'imprécision (0,2 mK) à 30 °C, soit comprise entre 0,5 mK et 1 mK à 156 °C et soit de 1 mK à 1,5 mK à 321 °C.

Mr Crovini souligne le besoin, à côté de la définition de l'échelle normalement prévue, d'une définition particulièrement précise au voisinage de la température ambiante, pour des travaux métrologiques de grande exactitude tels que l'établissement des unités électriques. Il suggère un sous-domaine spécial allant de - 40 °C à 40 °C, fondé sur le thermomètre à résistance de platine étalonné aux points triples du mercure, de l'eau et du gallium. Une étude (document 53) a montré qu'une telle échelle serait précise à mieux que 0,1 mK et ne différerait pas de l'échelle couvrant un domaine plus large de plus de 0,1 mK.

Mr Bonnier indique une méthode de mesure de α , pour un thermomètre à résistance de platine, en utilisant les points triples du gallium et de l'indium. Le fait que la valeur de α soit la même qu'avec la définition de l'EIPT-68 montre que la non-unicité de l'échelle est très petite à ces températures.

Mr Pavese, se référant au document 48, met en garde contre le danger de contamination du point triple de l'oxygène par l'argon. Il est maintenant confirmé que la dispersion des mesures au point triple de l'oxygène, lors d'une comparaison internationale antérieure, était due à des concentrations différentes d'argon dans l'oxygène. Cela résulte des analyses des fabricants qui peuvent être très inexactes, donc peu fiables. Le problème est particulièrement gênant parce que l'oxygène est préparé par distillation de l'air et que, de cette façon, il est difficile d'éviter la contamination par l'argon. Mr Blanke n'est pas d'accord : il n'a pas eu de problèmes, ni avec l'oxygène obtenu par distillation de l'air, ni avec les analyses des fabricants. Mr Bonnier ajoute que, d'après son expérience, l'oxygène en bouteille peut aussi être contaminé par le récipient lui-même. On discute ensuite des mérites respectifs de l'acier, de l'aluminium et de l'aluminium avec un revêtement spécial pour contenir du deutérium.

On en arrive ainsi au point triple du deutérium. Mr Pavese signale qu'il est maintenant parvenu, avec l'aide de Monsanto Research Corporation, à obtenir une reproductibilité de $\pm 0,1$ mK et une exactitude de $\pm 0,2$ mK en limitant la présence d'hydruure de deutérium à moins de 100×10^{-6} (document 49). Il a aussi utilisé un catalyseur à oxyde ferrique spécialement préparé pour inhiber la contamination, mais son efficacité est faible. Le point triple du deutérium est intéressant car il peut se substituer aux deux points d'ébullition de l'hydrogène pour formuler une échelle. Mr Bedford rappelle les expériences récentes qu'a

faites Mr Ancsin avec le deutérium (document 52) en utilisant un cryostat ouvert. Un échantillon contaminé et contenant jusqu'à 1 % d'hydrogène donne la valeur vraie du point triple du deutérium par extrapolation de l'enregistrement du rapport état vapeur/état condensé de l'échantillon. De plus, Mr Ancsin a fait des mesures sur la cellule de l'IMGC et obtenu la même valeur pour le point triple, mais il trouve que le catalyseur de l'IMGC est excessivement lent (des jours et non des heures comme avec l'oxyde ferrique normal).

6.4. Mesures à prendre

Le président ouvre la discussion en faisant la liste de plusieurs points abordés au cours de la session et pour lesquels des mesures sont à prendre, vraisemblablement surtout par les groupes de travail appropriés : Renseignements complémentaires, document du Groupe de travail 2, texte de l'EIT-90, valeurs de $T - T_{68}$, méthodes d'interpolation. Les autres points à propos desquels il faut prendre une décision concernent les futurs groupes de travail, sans doute au nombre de cinq et peut-être avec de nouveaux objectifs, et les recommandations à présenter au CIPM, y compris celle qui porte sur les recherches à faire sur le thermocouple or/platine et les instruments comparables.

Le CCT procède alors à une lecture, article par article, du document 22 A (projet de texte de l'EIT-90), afin d'identifier les points de désaccord ou en attente de décision et afin d'améliorer le texte lui-même. Cela conduit à un long débat portant sur de nombreux détails figurant dans le texte, y compris sur la révision de la rédaction elle-même, auquel prennent part tous les membres du CCT. Parmi les sujets discutés, il y a lieu de retenir : omission du mot « pratique » dans le titre ; lissage thermodynamique ; signification et unicité des définitions quand elles se doublent ; limite inférieure (0,5 K ?) et températures de jonction des domaines (par exemple, 3,2 K au lieu de 4,2 K) ; emploi de °C au lieu de K ; spécification des jonctions des domaines au moyen de valeurs de température ou d'appellation de points fixes ; emploi de l'expression « états d'équilibre » avec les thermomètres à gaz et à pression de vapeur ; façon la plus efficace de se reporter, dans le texte, aux Renseignements complémentaires ; opportunité d'admettre le thermomètre à gaz de ^3He jusqu'à 3,2 K ; nécessité ou non de stipuler les coefficients du viriel de l'hélium et, dans l'affirmative, de les faire figurer dans le texte ou dans les Renseignements complémentaires ; dépendance entre la grandeur de la correction due au coefficient du viriel et la masse volumique du gaz ; possibilité d'utiliser le point triple du deutérium en équilibre à la place des deux points d'étalonnage à 17 K et 20 K, le point triple du dioxyde de carbone à la place du point triple du gallium et le point de congélation de l'antimoine à la place de celui de l'aluminium ; formulation des méthodes d'interpolation du thermomètre

à résistance de platine, aussi bien la fonction de référence que les fonctions écarts ; choix, parmi les nombreux points fixes disponibles, de ceux à admettre dans l'échelle entre -100°C environ et 420°C ; non-unicité en fonction de l'inexactitude ; domaine de grande précision, mais d'étendue réduite au voisinage de la température ambiante, valable pour les thermomètres à résistance de platine du type capsule et à longue tige ; opportunité de conserver les annexes ; nécessité ou non de faire apparaître les différences entre les échelles et forme sous laquelle cela doit être fait.

La discussion détaillée du document 22 A prend fin sur deux observations faites, à propos de sa présentation, par Mr Giacomo. Il fait remarquer que les différentes références aux Renseignements complémentaires sont si nombreuses que le paragraphe final qui en parle serait mieux à sa place s'il était au début. De même, les chevauchements de définitions sont si nombreux qu'il serait préférable de ne donner que la définition la plus générale dans le texte ; les autres choix possibles pourraient être rassemblés à la fin du document.

7. Annonce aux utilisateurs des modifications à venir de l'EIPT

Aucune mesure n'a été prise à propos de ce point de l'ordre du jour.

8. Discussion du projet de résolution du CIPM à présenter à la CGPM

Ce projet de résolution (document 54) a déjà été longuement discuté en début de session. Cependant Mr Rusby, inquiet de l'échéance donnée dans le projet, demande des explications. Faut-il comprendre que la nouvelle échelle pourra être promulguée à n'importe quel moment après la réunion du CIPM ? Le président répond que cela dépendra du type de délégation d'autorité que la CGPM donnera au CIPM ; cette délégation peut être suffisamment large pour le permettre. Cela dépendra aussi de l'impression qu'aura le CIPM de pouvoir obtenir une approbation sur le plan international, ce qui est quelque chose que nous ne pouvons pas prévoir aujourd'hui. Si le CCT ne peut faire face à l'échéance de 1990, il pourra toujours abandonner l'échelle, ou la retirer et demander un report d'échéance. Dans ce cas-là, il sera à tout le moins nécessaire d'avoir l'approbation du CIPM. Mr Rusby souhaiterait des options plus ouvertes et préférerait qu'une proposition modifiée soit présentée avec des échéances moins strictes. Le président sollicite d'autres avis. Il fait

remarquer que le projet de résolution figure déjà dans le document de convocation de la CGPM et ne peut plus être changé ; toutefois la CGPM, si elle le désire, peut sans doute en accepter une version modifiée (mais il n'en est pas sûr). Mr Quinn signale que le CIPM peut présenter une autre proposition à la CGPM en session plénière ; Mr Hudson ajoute que les participants à la CGPM peuvent, à titre personnel, proposer des amendements. Mr Giacomo déclare alors qu'il est effectivement possible de modifier la rédaction du projet de résolution, ce qui est plus aisé en fait que d'en proposer un entièrement différent. Mr Rusby demande si d'autres participants partagent ses réserves. La seule réponse est celle du président qui estime que l'échelle peut être prête à temps, sauf pour ce qui est de quelques données complémentaires concernant la température thermodynamique. De plus, le président est convaincu que, par suite de l'action des groupes de pression, de la façon dont le public perçoit les choses et de la résistance inhérente à tout changement, un ajournement risquerait de conduire à une impossibilité définitive de promulguer une nouvelle échelle. Mr Soulen suggère que les Groupes de travail fassent une estimation du temps dont ils ont besoin et la fasse connaître, ce qui est accepté.

À nouveau, le président répète que le projet de résolution ne peut pas être présenté sans l'accord du CCT ; à défaut, il sera retiré. S'il est accepté par le CCT et s'il s'avère ensuite qu'il doit être retiré, on pourra le faire jusqu'en octobre 1989. On peut aussi concevoir un report en 1990 si l'échelle est alors presque prête, sans l'être tout à fait, mais le dire dans le projet original de résolution entraînerait à coup sûr le rejet du projet par le CIPM. La proposition est donc la suivante : le CCT approuve-t-il le projet de résolution (dans sa rédaction présente) prévoyant que l'EIT-90 sera vraisemblablement prête en 1989 pour entrer en vigueur le 1^{er} janvier 1990, ou bien le CCT retire-t-il ce projet ? Il est bien entendu que l'approbation comporte de façon implicite le droit de retirer l'échelle s'il s'avère que l'échéance ne peut être assurée. Mr Jones approuve le projet de résolution. Il s'ensuit une discussion sur la rigueur de certaines dates. On confirme ensuite que le projet de résolution est rédigé de façon comparable à celui qui a été proposé par le CCE et qui concerne une modification à apporter aux unités électriques. Mr Rusby demande au président de bien vouloir, lorsque la question sera discutée, attirer l'attention du CIPM sur la complexité de la situation concernant l'EIT-90 et l'avertir qu'elle n'est pas aussi avancée que le changement correspondant en électricité. Le président est d'accord. Mr Bloembergen pense qu'il serait dangereux de rédiger à nouveau ce projet de résolution et il approuve la rédaction présente. Après quelques échanges de vue supplémentaires, le CCT approuve le projet de résolution.

9. Groupes de travail : travaux futurs et composition

Le président estime que cinq groupes de travail sont nécessaires pour assurer la totalité du travail restant à faire, avec à peu près la répartition suivante :

Groupe de travail 1 : Préparation du texte de l'EIT-90 et révision de la monographie « Supplementary Information for the ITS-90 ».

Groupe de travail 2 : Achèvement de la monographie « Techniques for Approximating the ITS ».

Groupe de travail 3 : Définition du domaine du thermomètre à résistance de platine dans l'EIT-90.

Groupe de travail 4 : Collecte de toutes les informations concernant les températures thermodynamiques et les valeurs de $T - T_{68}$ sur lesquelles sera fondée l'EIT-90.

Groupe de travail 5 : Solution de toutes les questions pendantes concernant les domaines du thermomètre à gaz et de la pression de vapeur de l'hélium dans l'EIT-90.

Une discussion importante s'ensuit. Mr Rusby estime qu'il y a peu de différence entre ce que vient de proposer le président et les groupes de travail qui existent actuellement. À son avis, la tâche assignée au Groupe de travail 4 ne devrait pas être très lourde, mais il risque d'y avoir beaucoup trop d'allées et venues de documents entre les Groupes de travail 3 et 4. Mr Hudson considère que la plupart des prochaines mesures de la température thermodynamique concerneront sans doute les températures élevées pour lesquelles c'est le Groupe de travail 3, et non 4, qui est compétent. En ce qui concerne la tâche du Groupe de travail 3, Mr Quinn demande que dans la formulation finale des fonctions de référence et des fonctions écarts, il soit fait attention à leur élégance et à leur formalisme mathématique. Il convient de faire appel aux meilleures méthodes d'analyse pour les exprimer. La demande d'éclaircissement sur les tâches du Groupe de travail 5, faite par Mr Hudson, conduit à une longue discussion. Mr Rusby est alors proposé comme président du Groupe de travail 5 si celui-ci est effectivement constitué. Mr Rusby accepte.

Pour le président, il paraît clair que la composition des Groupes de travail 1 et 2 doit demeurer inchangée. Mr Crovini estime que le Groupe de travail 3, pour son programme futur, profiterait grandement de l'aide de Mr Jung si celui-ci en faisait partie. Mr Hudson propose une solution pour le dilemme des Groupes de travail 4 et 5, solution qui a l'agrément de certains membres. En bref : Mr Steur ferait partie du Groupe de

travail 4 ; les tâches confiées aux Groupes de travail 4 et 5 seraient traitées par le Groupe de travail 4 seul ; Mr Rusby (avec pleine responsabilité) et Mr Soulen étudieraient les résultats de mesure des températures thermodynamiques et resteraient en liaison étroite avec le Groupe de travail 3 ; Mr Swenson (comme chef des opérations), Mr Durieux et Mr Steur tenteraient de résoudre la question pendante concernant l'emploi du thermomètre à gaz ; Mr Hudson jouerait un rôle d'officier de liaison interne entre les groupes avec la responsabilité d'en rendre compte au CCT. L'accord se faisant sur cette proposition, la composition des Groupes de travail est finalement la suivante :

Groupe de travail 1 — Préparation du texte de l'EIT-90 et révision de la monographie « Supplementary Information for the ITS-90 ».

H. Preston-Thomas (président)
P. Bloembergen
T.J. Quinn

Groupe de travail 2 — Achèvement de la monographie « Techniques for Approximating the ITS ».

R.E. Bedford (président)
G. Bonnier
H. Maas
F. Pavese

Groupe de travail 3 — Définition du domaine du thermomètre à résistance de platine dans l'EIT-90.

L. Crovini (président)
H.-J. Jung
R. C. Kemp
Ling Shankang
H. Sakurai
J.F. Schooley

Groupe de travail 4 — Mise au point des meilleures valeurs de $T - T_{68}$ et communication de ces valeurs au Groupe de travail 3 ; définition du domaine du thermomètre à gaz dans l'EIT-90. (Ces sujets seront traités par deux sous-groupes à l'intérieur de ce groupe de travail).

R.P. Hudson (président)
M. Durieux
R. L. Rusby
R. J. Soulen
P. P. M. Steur
C. A. Swenson

10. Remplacement de l'EIPT-68 (suite) : préparation d'une nouvelle échelle (détail des échéances)

Le président fait un résumé de la situation. Il faut que l'échelle soit terminée pour le mois de septembre 1989. Par conséquent, l'essentiel du travail doit être fait avant octobre 1988 afin de laisser aux membres du CCT un délai d'examen suffisant. Nous devons donc soumettre au CIPM en octobre 1987, sinon un premier projet, au moins une annonce destinée aux laboratoires nationaux pour les informer du changement imminent. Les deux principaux documents associés doivent aussi être prêts pour 1989.

Mr Quinn suggère que les groupes de travail présentent des rapports d'avancement de leurs travaux au CCT en mars 1988 ; d'ici là, d'importants progrès devront avoir été faits sur tous les détails de la définition de l'EIT-90. Sinon, on profitera certainement de la liberté offerte de retirer le projet. En octobre 1988, on sera à trois mois de l'échéance de janvier 1989, époque à laquelle l'échelle devra être effectivement prête. Après discussion, il est convenu que les groupes de travail présenteront des rapports en mars 1988 ; en ce qui concerne les Renseignements complémentaires et la monographie du Groupe de travail 2, les rapports indiqueront simplement ce qui a été fait jusqu'à cette date. Il est rappelé que la monographie du Groupe de travail 2 doit être publiée dès qu'elle sera prête, ce qui, comme l'espère Mr Bedford, sera le cas à la fin de 1988 avec, dans toute la mesure du possible, une rédaction se rapportant à l'EIT-90 au lieu de l'EIPT-68.

L'annonce des changements numériques à apporter aux valeurs des températures avec l'introduction de l'EIT-90 devra être prête pour le 1^{er} janvier 1989 ; cela signifie que les valeurs de $T - T_{68}$, qui deviendront $T_{90} - T_{68}$, devront être prêtes. Il est convenu que des valeurs approximatives, sous forme graphique par exemple, seront suffisantes pour l'annonce préliminaire de 1989.

11. Décision prise en 1985 par le CIPM sur les travaux thermométriques du BIPM

Le président introduit ce point de l'ordre du jour en déclarant que les travaux effectués au BIPM dans le domaine de la thermométrie ont toujours fait l'objet de l'intérêt et des commentaires du CCT. La thermométrie au BIPM a une longue histoire et une réputation de qualité. Récemment, dans son plan à long terme pour les travaux scientifiques au BIPM, le CIPM (après consultation du directeur du BIPM) a procédé à une nouvelle affectation du personnel et des ressources financières qui étaient consacrés à la thermométrie. Mr Quinn

donne les précisions suivantes : le CIPM faisait depuis longtemps l'objet de fortes pressions pour accroître l'effort du BIPM dans les domaines de la photométrie et de la radiométrie, tout particulièrement cette dernière. Comme le montant total des ressources ne pouvait être accru, il a fallu en modifier la répartition. Au terme de longues délibérations, on a décidé que l'essentiel des ressources consacrées jusqu'à maintenant à la thermométrie serait transféré à la radiométrie. Il en résulte que la thermométrie au BIPM sera réduite aux étalonnages de thermomètres indispensables dans le domaine voisin de la température ambiante. Les travaux de Mr Bonhoure sur les mesures de $T - T_{68}$ sont maintenant achevés (document 39) et feront prochainement l'objet d'une publication. Dès lors, Mr Bonhoure effectuera ses recherches en radiométrie, en commençant par des comparaisons d'éclairement énergétique spectral. Le président fait remarquer que chaque comité consultatif propose habituellement de poursuivre ou d'étendre les travaux dans le domaine qui est le sien et, bien évidemment, cela est impossible quand le montant des ressources ne s'accroît pas.

Mr Jung déplore cette diminution de l'activité en thermométrie, particulièrement à propos du travail important effectué en pyrométrie ; il demande quelles sont les autres solutions qui ont été envisagées et quelle recherche future a été sacrifiée. Mr Jones se dit navré des réductions appliquées à la thermométrie et demande que le CCT reconnaisse le très beau travail que Mr Bonhoure a fait depuis des années dans ce domaine. Mr Bedford signale que l'ensemble du problème de réduction des recherches en thermométrie est bien plus inquiétant et ne se limite pas au BIPM ; beaucoup de laboratoires nationaux, y compris le NRC, sont confrontés au même problème. Il déplore ces réductions draconiennes. Mr Giacomo déclare que toutes les disciplines exigent d'excellentes mesures de température. Or, on peut déjà dire que, dans dix ou vingt ans, on en fera de mauvaises au BIPM ; on sait en effet que, dans tout domaine, cesser les recherches entraîne de mauvaises mesures. Celles de température sont d'une grande importance pour la plupart des activités météorologiques et elles ne devraient pas être négligées. Mr Pokhodoun ajoute que le travail réalisé au BIPM est très important et qu'il serait dommage de l'interrompre. Cela pourrait avoir des conséquences sur l'avancement de la nouvelle échelle de température ; il convient donc de le poursuivre.

Le président transmettra l'expression de ces craintes au CIPM (*voir* p. T 6 la déclaration 1987/1).

12. Publication des documents

Le président rappelle au CCT que peu de documents, autres que les rapports des groupes de travail, sont habituellement publiés en annexe du rapport. Il demande lesquels doivent l'être parmi les documents

présentés à cette session. Mr Swenson propose trois documents (4, 6 et 42) qui se rapportent à $T - T_{68}$. Mais d'autres participants estiment que les résultats donnés dans ces documents, qui sont dans un certain sens préliminaires, risquent d'être modifiés lorsque les expériences seront terminées et qu'avoir deux séries de valeurs imprimées serait source de confusion. On convient de ne publier que certains rapports des groupes de travail, c'est-à-dire les documents 7 et 64 (Groupe de travail 3), 9 et 13 (Groupe de travail 4). À la place de la monographie du document 21 (Groupe de travail 2), Mr Bedford rédigera un bref rapport qui sera publié.

Mr Giacomo fait remarquer que le BIPM reçoit peu de demandes de copies de documents. Mr Quinn ajoute que le BIPM donne volontiers l'autorisation de publier toute monographie et tout document sans restriction, ce qui sera aussi le cas de la future monographie du Groupe de travail 2. Enfin, Mr Bedford signale que, suivant Mr Ling, les Renseignements complémentaires ont été traduits en chinois et que 20 000 exemplaires ont été distribués. Mr Giacomo estime qu'il sera difficile de rivaliser.

13. Questions diverses

Lecture est donnée d'un projet de recommandation T1 (1987) du CCT au CIPM concernant la nécessité de poursuivre les mesures de température thermodynamique dans les laboratoires nationaux après la promulgation de l'EIT-90. Une longue discussion a lieu sur des points de détail de sa rédaction ; deux autres projets sont discutés avant qu'une version finale en français et en anglais soit acceptée.

Un projet de recommandation T2 (1987), visant à encourager les laboratoires nationaux à poursuivre leurs recherches sur des méthodes simplifiées de mesure des températures, est soumis au même examen minutieux du CCT avant que sa rédaction ne soit satisfaisante.

Au nom du Groupe de travail 4, Mr Soulen présente un tableau qui donne des valeurs approchées de $T - T_{68}$, avec des incertitudes estimées de 3σ , pour 16 points fixes entre la région de la pression de vapeur de l'hélium et le point de congélation de l'or. Mr Soulen dit que ces valeurs correspondent grossièrement à celles qui seront dans l'EIT-90, mais bien évidemment pas sous leur forme finale ; ce tableau ne doit pas être publié maintenant mais pourra faire partie du rapport d'avancement du Groupe de travail 4 de mars 1988.

Mr Crovini demande si le CCT a accepté l'opinion exprimée dans le document 1, que les rapports de résistance des thermomètres à résistance de platine soient exprimés en fonction du point triple de l'eau, c'est-à-dire en utilisant $R(0,01\text{ }^{\circ}\text{C})$ au lieu de $R(0\text{ }^{\circ}\text{C})$; il ajoute

que cela n'est pas difficile à faire, ni dans la fonction de référence, ni dans les fonctions écarts. Toutefois, plusieurs participants font remarquer que les utilisateurs industriels et, en fait, tous les utilisateurs de thermomètres à liquide et de thermocouples continueront à utiliser le point de glace comme point de référence. Mr Blanke a le sentiment que $R(0,01\text{ }^{\circ}\text{C})$ pourrait être utilisé dans la définition de l'échelle et $R(0\text{ }^{\circ}\text{C})$ pour les besoins techniques. Le président, Mr Connolly et Mr Quinn se disent inquiets de la confusion qui risque de résulter d'une telle situation. Le président souligne que, bien que les experts donnent généralement leur préférence à l'élégance, les utilisateurs la donnent à la simplicité et à la continuité. Il propose que le Groupe de travail 3 prépare tout pour ce changement mais il demande instamment au Groupe de travail 3 et aux autres membres du CCT de solliciter les réactions des utilisateurs de l'échelle.

Mr Crovini demande encore si le CCT accepte que, dans la nouvelle échelle, la valeur de α ne soit plus employée pour la spécification des thermomètres à résistance mais que, à sa place, on utilise le rapport de résistance à un point fixe; il suggère le point du gallium. Mr Bedford et Mr Connolly font remarquer que la valeur de α peut être facilement calculée en utilisant l'étalonnage au point du gallium; à cela Mr Bonnier ajoute que l'incertitude sur δ entraîne une incertitude sur la valeur de α équivalente à 0,2 mK seulement. Mr Jones estime souhaitable, pour les thermomètres à résistance de platine pour la mesure des hautes températures, que le rapport de résistance soit spécifié à un point fixe particulier utilisé dans l'étalonnage plutôt qu'au point du gallium. Il propose que la question soit résolue par le Groupe de travail 3. Le président accepte cette proposition et demande à Mr Crovini de choisir le système le meilleur, de l'avis du Groupe de travail 3.

Mr Bloembergen fait remarquer que, compte tenu des divergences qui existent entre les réalisations des points de congélation de l'aluminium et de l'argent dans les laboratoires nationaux (voir Sections 5.3 et 6.1), il serait souhaitable d'organiser une comparaison systématique en faisant circuler des cellules scellées. Mr Bonnier est d'accord avec cette proposition et ajoute qu'il serait nécessaire de faire circuler aussi les fours associés.

Mr Bloembergen attire l'attention sur le problème des fuites en courant alternatif dans les thermomètres à résistance de platine pour la mesure des hautes températures et demande qui va poursuivre la recherche fondamentale sur ce problème dans les deux prochaines années. Mr Bedford fait remarquer que, bien que la recherche expérimentale ait été interrompue au NRC sur ces thermomètres, Mr Berry va faire paraître au moins une publication avec ses résultats, y compris ceux portant sur le problème des fuites en courant alternatif.

Mr Maas signale la proposition (voir document 32) de comparaisons internationales de mesures avec des dispositifs à points de référence supraconducteurs. Certains membres du CCT sont intéressés par ces

comparaisons et Mr Maas demande au CCT d'en accepter officiellement le principe et de donner mandat à l'ASMW de les organiser. Le président confirme l'approbation de cette proposition par le CCT.

14. Prochaine session du CCT

Le président recommande que la prochaine session du CCT se tienne en septembre 1989, peu avant la réunion du CIPM, époque à laquelle l'EIT-90 doit être pour l'essentiel terminée. Mr Soulen préfère une session en 1988 parce qu'en 1989 tout devra être presque achevé et le CCT n'aura plus le temps de discuter. Un débat fait intervenir cet argument avec en regard les frais, les difficultés de faire circuler les comptes rendus, le calendrier du BIPM, etc. Finalement, la question est mise au vote. Il en résulte (par 8 voix contre 4 et 2 abstentions) que la prochaine session se tiendra au mois de septembre 1989. Il est toutefois évident que pendant les deux années à venir plusieurs réunions et de nombreuses consultations de groupes de travail devront avoir lieu.

Pour finir, le président précise que, compte tenu de l'importance toute particulière de la présente session, le compte rendu devra être diffusé aussitôt que possible. Il sera préparé par Mr Durieux et Mr Bedford et sera vraisemblablement diffusé en octobre. Auparavant, le président fera circuler un rapport donnant un résumé des résultats de la session.

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 9 novembre 1987

Révisé le 5 janvier 1988

ANNEXE T 1

Documents de travail présentés à la 16^e session du CCT

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

Document
CCT/

- 87-1 NBS (États-Unis d'Amérique). — Triple-point Temperature of Water (273.26 K) as the Reference Temperature for Resistance Ratios and Reference Functions of Platinum Resistance Thermometers in the New IPTS, by B.W. Mangum.
- 87-2 ASMW - Friedrich-Schiller-Universität, Jena (Rép. Dém. Allemande). — Investigation of Superconducting Transitions of Niobium Thin Films, by B. Fellmuth, H.-J. Köhler and K. Blüthner.
- 87-3 ASMW - Zentralinstitut für Festkörperphysik und Werkstofforschung, Dresden (Rép. Dém. Allemande). — Further Progress in Research Concerning the Superconducting Transition Point of Niobium as a Reference Temperature, by B. Fellmuth, D. Elefant, J.I. Mönch.
- 87-4 NBS (États-Unis d'Amérique). — Gas thermometric determination of $t(\text{KTTS})$ vs $t(\text{IPTS-68})$ in the range 457 °C to 660 °C, by R.E. Edsinger and J.F. Schooley.
- 87-5 IMGc (Italie) - KOL (Pays-Bas). — Interpolating helium constant-volume gas thermometers, by P.P.M. Steur, F. Pavese and M. Durieux.
- 87-6 NPL (Royaume-Uni) - BIPM. — Further measurements of $T - T_{68}$ in the temperature range - 140 to + 60 °C using the total radiation thermometer, by J.E. Martin, T.J. Quinn and B. Chu.

- 87-7 Report of Working Group 3 to the CCT, October 1985 (*voir Annexe T 4*, p. T 43).
- 87-8 Proposal of an Interpolating Procedure for Standard Platinum Resistance Thermometers in the Range from 0 °C until 961 °C by H.J. Jung and Li Xumo (submitted to Working Group 3 of the CCT, October 16, 1986).
- 87-9 Deviation of IPTS-68 and EPT-76 from Thermodynamic Temperature, by R.P. Hudson, M. Durieux, R.L. Rusby, R.J. Soulen and C.A. Swenson (Working Group 4 of the CCT) (*voir Annexe T 7*, p. T 59).
- 87-10 IMGC (Italie). — ^3He Scale Proposal 0.8-24.6 K :
A. Proposal for a single temperature scale between 0.8 K and 24.6 K using a ^3He gas thermometer, by P.P.M. Steur and F. Pavese.
B. ^3He constant-volume gas thermometry : Calculations for a temperature scale between 0.5 K and 30 K, by F. Pavese and P.P.M. Steur.
- 87-11 NRLM (Japon). — Stability Study of Doubled Helix 2.5 ohm Platinum Resistance Thermometers at 1 100 °C, by S. Sawada, M. Arai and H. Sakurai (Publié dans *Bull. of NRLM*, **35**, 4, 1986, pp. 89-96).
- 87-12 NRLM (Japon). — The Reproducibility of Triple Point of Gallium, by M. Arai, N. Takiya and S. Sawada (Publié dans *Transac. of the Soc. of Instrum. and Control Engineers*, **23**, 3, 1987).
- 87-13 3rd Report of Working Group 4 (*voir Annexe T 6*, p. T 57).
- 87-14 IMGC (Italie) - Monsanto Research Corporation : Mound (États-Unis d'Amérique) - KOL (Pays-Bas). — Measurements and calculations of the ^3He second virial coefficient between 1.5 K and 20.3 K, by F.C. Maticotta, G.T. McConville, P.P.M. Steur and M. Durieux.
- 87-15 CSIRO (Australie). — The determination of the thermodynamic temperature of thermometry fixed points in the range 660 to 1 064 °C, by T.P. Jones and J. Tapping.
- 87-16 CSIRO (Australie). — A Determination of Thermodynamic Temperatures and Measurements of the Second Virial Coefficient of ^4He Between 13.81 K and 287 K Using a Constant-Volume Gas Thermometer, by R.C. Kemp, W.R.G. Kemp and L.M. Besley, [Abstract] (Publié dans *Metrologia*, **23**, 1986/87, pp. 61-86).

- 87-17 CSIRO (Australie). — A Determination of the Thermodynamic Temperature of the Triple Point of Neon, by R.C. Kemp and H. Sakurai, [Abstract] (Publié dans *Metrologia*, **23**, 1986, pp. 33-36).
- 87-18 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, [Abstract] (Publié dans *Metrologia*, **21**, 1985, pp. 139-146).
- 87-19 CSIRO (Australie). — Intercomparison of 12 Standard Platinum Resistance Thermometers between 13.8 K and 273.15 K, by H. Sakurai and R.C. Kemp, [Abstract] (Publié dans *Metrologia*, **21**, 1985, pp. 201-206).
- 87-20 CSIRO (Australie). — The Use of the Gallium Triple Point in Platinum Resistance Thermometer Interpolation below 273.15 K, by R.C. Kemp.
- 87-21 Report of Working Group 2: Techniques for Approximating the IPTS-68 and the EPT-76.
- 87-22 Working Group 1: The International Temperature Scale of 1990.
- 87-23 H. Preston-Thomas, NRC (Canada). — Replacement of the International Practical Temperature Scale of 1968.
- 87-24 PTB (Rép. Féd. d'Allemagne). — The temperature of the triple point of nitrogen on IPTS-68, by W. Blanke.
- 87-25 NRC (Canada). — Measurement of the Discontinuity in dt/dt_{68} at 630.74 °C in the IPTS-68, by R.E. Bedford, C.K. Ma, W. Macready and D. Steski.
- 87-26 IMGC (Italie). — On the reference function for PRTs, particularly in the range 60-100 K: new calculations, by F. Pavese and P.P.M. Steur.
- 87-27 CSMU (Tchécoslovaquie). — Point de fusion du gallium en tant que point fixe secondaire de l'échelle de température, par M. Borovička, L. Hudoba et J. Demian.
- 87-28 CSIRO (Australie). — Speculation on the source of the non-uniqueness of IPTS-68 below 273.15 K, by R.C. Kemp.
- 87-29 NIM - Fu Dan University (Rép. Pop. de Chine). — The adding of the gallium triple point in the future international temperature scale, by Ling Shan-kang and Li Baiyun.
- 87-30 NIM (Rép. Pop. de Chine). — The study for superconductive transition temperature as thermometric fixed point, by Li Zhiran, Xia Yongjian and Huang Shuangkai.

- 87-31 ASMW (Rép. Dém. Allemande) - National Board of Metrology (Hongrie). — Intercomparison of the Temperature Scales in the Range from 1337.58 K to 2 300 K as realized in ASMW (GDR) and OMH (Hungary), by E. Geyer and G. Szilágyi.
- 87-32 ASMW (Rép. Dém. Allemande). — Recommended Values of Superconducting Transition Temperatures as Reference Temperatures for a Selected Set of Materials, by B. Fellmut and H. Maas.
- 87-33 NPL (Royaume-Uni). — Some observations on the ITS-90 draft of March 9, 1987 (CCT/87-22), by R.L. Rusby.
- 87-34 NRLM (Japon). — Precise Measurements of High Temperature Fixed Points by 2,5 ohm Doubled Helix Type HTPRT's, by S. Sawada, M. Arai and H. Sakurai.
- 87-35 NRLM (Japon). — Non-uniqueness Estimation of IPTS-68 at Cd, In and Ga Points, by N. Takiya, M. Arai, S. Sawada and H. Sakurai.
- 87-36 NRLM (Japon). — Thermal Cycling Stability and Low Temperature Properties of Thin Film Resistance Thermometers, by O. Tamura and H. Sakurai.
- 87-37 NPL (Royaume-Uni) - VNIIM (U.R.S.S.). — Intercomparison of gallium, indium and cadmium cells made at VNIIM (USSR) and NPL (UK), by M.V. Chattle and A.I. Pokhodun.
- 87-38 NRC (Canada). — IPTS-68 Nonuniqueness from 0 °C to 320 °C, by R.E. Bedford.
- 87-39 BIPM. — Étude pyrométrique des températures comprises entre 420 et 630 °C, par J. Bonhoure et R. Pello.
- 87-40 CSIRO (Australie). — A new measurement of the silver point, by J. Tapping and V.N. Ojha.
- 87-41 INM-CNAM (France). — About the possibility to use gallium, indium or carbon dioxide triple points to determine the α values of platinum resistance thermometers, by G. Bonnier, Y. Hermier, E. Renaot.
- 87-42 VNIIFTRI (U.R.S.S.). — A thermodynamic temperature measurement from 2,5 K to 27 K, by D.N. Astrov, L.B. Beliansky, Y.A. Dedikov, S.P. Polunin, A.A. Zacharov, N.B. Ermakov.
- 87-43 VNIIFTRI (U.R.S.S.). — A precision gas thermometer for 3 K to 300 K range, by D.N. Astrov, L.B. Beliansky, Y.A. Dedikov, A.A. Zacharov, S.P. Polunin.

- 87-44 NBS (États-Unis d'Amérique) - PTB (Rép. Féd. d'Allemagne). — Proposal for an international temperature scale below 1 K, by J.H. Colwell, W.E. Fogle, H. Marshak, R.J. Soulen, Jr., W. Buck, H.-D. Hahlbohm and G. Schuster.
- 87-45 NRC (Canada). — Research on High Temperature Platinum Resistance Thermometers at NRC, by R.J. Berry.
- 87-46 CSIRO (Australie). — A Proposed Definition of an International Temperature Scale in the Range 0 °C to 962 °C, by J.J. Connolly, T.P. Jones and J. Tapping.
- 87-47 University of Waterloo (Canada). — A New Accurate Interatomic Potential for Helium and Its Application to the Second Virial Coefficients.
- 87-48 IMGC (Italie). — Evidence of unreliability of factory analyses of argon impurity in oxygen, by F. Pavese, D. Ferri and D. Giraudi.
- 87-49 IMGC (Italie) - Monsanto Research Corporation: Mound Laboratory, Miamisburg (États-Unis d'Amérique). — The Triple Point Temperature of Pure Equilibrium Deuterium by F. Pavese and G.T. McConville (Publié dans *Metrologia*, **24**, 1987, pp. 107-120).
- 87-50 CSIRO (Australie). — The Effect of Calibration Errors in Interpolation Equations for Platinum Resistance Thermometers above 273.15 K, by R.C. Kemp.
- 87-51 NRC (Canada). — The Pt/Au Thermocouple: I. Essential Performance, by E.H. McLaren and E.G. Murdock.
- 87-52 NRC (Canada). — Work on D₂, by J. Ancsin.
- 87-53 IMGC (Italie). — Proposed interpolation scheme with a standard platinum resistance thermometer between — 189 °C and 961 °C, by L. Crovini.
- 87-54 Projet de résolution proposé par le CIPM à la 18^e CGPM.
- 87-55 NIM (Rép. Pop. de Chine). — Investigation of the Stability of Rhodium-iron Resistance Thermometer, by Wang Zilin, Wu Helian and Ling Shankang.
- 87-56 NIM (Rép. Pop. de Chine). — A New Direct Current Photoelectric Comparator, by Zhao Qi and Yuan Zuandong.
- 87-57 NIM (Rép. Pop. de Chine). — Some Remarks About High Temperature Platinum Resistance Thermometry, by Li Xumo.
- 87-58 NIM (Rép. Pop. de Chine). — The Development of the n-Octane Heat-pipe Blackbody Furnace, by Zhao Qi and Fu Lei.

- 87-59 NIM (Rép. Pop. de Chine). — The Realization of Triple Point of Xenon and the International Comparison, by Zhang Guoquan and Wang Li.
- 87-60 NIM (Rép. Pop. de Chine). — The Freezing Point of Aluminium, by Li Xumo.
- 87-61 NIM (Rép. Pop. de Chine). — Recent Advances in Thermometry at NIMTT, by Zhu Qijun.
- 87-62 VNIIFTRI (U.R.S.S.). — A thermodynamic temperature measurement in the 20 K to 300 K range, by D.N. Astrov, L.B. Belyansky, Y.A. Dedikov, S.P. Polunin and A.A. Zacharov.
- 87-63 PTB (Rép. Féd. d'Allemagne) - NIM (Rép. Pop. de Chine). — The cubic function as a new interpolating scheme in standard platinum resistance thermometry, by H.-J. Jung, Li Xumo and H. Nubbemeyer.
- 87-64 Addendum to Working Group 3 Report (*voir* Annexe T 5, p. T 51).
-

ANNEXE T 2

Rapport du Groupe de travail 1*

(Révision de l'EIPT et Renseignements complémentaires)

Le Groupe de travail 1 a préparé un projet de texte de la future Échelle internationale de température de 1990 (document 22A). Ce projet sera discuté lors de la 16^e session du Comité Consultatif de Thermométrie (9-11 juin 1987).

1^{er} juin 1987

* Les membres de ce Groupe de travail sont : MM. H. PRESTON-THOMAS, président, Conseil national de recherches (Canada); P. BLOEMBERGEN, Van Swinden Laboratorium (Pays-Bas); T. J. QUINN, Bureau International des Poids et Mesures.

ANNEXE T 3

Rapport du Groupe de travail 2*

(Méthodes secondaires de mesure des températures internationales)

(Traduction)

Le Groupe de travail 2 du CCT est chargé de préparer un document sur les méthodes secondaires de mesure des températures internationales. Un premier projet a été présenté au CCT lors de sa 15^e session en 1984. Une version B, augmentée et corrigée, a circulé entre les membres du Groupe de travail 2 en mai 1985, puis elle a fait l'objet d'une lecture critique lors de la réunion du Groupe de travail 2 à l'IMGC (Turin) en octobre 1985. Une version C, tenant compte des remarques faites, a été distribuée en septembre 1986; elle a été discutée lors d'une réunion du Groupe de travail 2 à l'ASMW (Berlin) en novembre 1986. Les changements recommandés lors de cette réunion ont été introduits dans la version D, intitulée « Techniques for Approximating the IPTS-68 and the EPT-76 ». Le Groupe de travail 2 pense que cette version D, qui a été distribuée aux membres du CCT en mars 1987 et qui constitue la base de ce rapport, est proche de sa forme finale.

Le président du Groupe de travail 2 attend les critiques, commentaires et suggestions des membres du CCT sur ce texte. Il serait utile qu'ils lui parviennent, sous forme écrite, avant septembre 1987. Une version E sera préparée à la fin de 1987: elle constituera, après un examen approfondi du Groupe de travail 2, la version finale qui devrait être publiée vers la fin de 1988.

Mars 1987

* 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).

ANNEXE T 4

Rapport du Groupe de travail 3*

(Domaine du thermomètre à résistance de platine)

(Traduction du document CCT/87-7)

1. Introduction

Les membres du groupe de travail se sont réunis au National Bureau of Standards (NBS), Gaithersburg, du 7 au 10 octobre 1985. À cette occasion, le groupe de travail a organisé un « Atelier » sur les thermomètres à résistance de platine pour la mesure des hautes températures, auquel ont participé des experts appartenant à neuf laboratoires nationaux et privés. Ce sont :

R. J. Berry, NRC	R. C. Kemp, CSIRO
M. V. Chattle, NPL	B. W. Mangum, NBS
J. L. Cross, Jarrett (É.-U. d'Amérique)	P. Marcarino, IMG C
L. Crovini, IMG C	E. R. Pfeiffer, NBS
J. P. Evans, NBS	H. Sakurai, NRLM
G. T. Furukawa, NBS	J. F. Schooley, NBS
H.-J. Jung, PTB	H. E. Sostman, YSI**

R. P. Hudson (BIPM) a assisté à une partie de cet Atelier et a présenté le travail du BIPM dans ce domaine.

Lors de cette réunion, le Groupe de travail 3 a étudié, avec trois membres du Groupe de travail 4 (R. P. Hudson, R. J. Soulen et C. A. Swenson), les problèmes communs aux deux groupes, c'est-à-dire la limite de l'échelle du thermomètre à résistance de platine aux basses

* Les membres de ce Groupe de travail sont MM. L. CROVINI, président, Istituto di Metrologia G. Colonnetti (Italie); R. C. KEMP, CSIRO, Division of Applied Physics (Australie); LING SHANKANG, Institut national de métrologie (Rép. Pop. de Chine); H. SAKURAI, National Research Laboratory of Metrology (Japon); J. F. SCHOOLEY, National Bureau of Standards (É.-U. d'Amérique).

** Yellow Springs Instruments (É.-U. d'Amérique).

températures et les résultats de déterminations des températures thermodynamiques.

Les tâches du Groupe de travail 3 sont les suivantes :

- 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 échelle internationale de température (EIT) ;
- 2) Étude des méthodes d'interpolation dans le domaine du thermomètre à résistance de platine.

Pour assurer ces deux tâches, le groupe de travail a besoin de résultats fiables sur les températures thermodynamiques.

Le Groupe de travail 3 a pu examiner en détail, au cours de sa réunion et de celle de son Atelier, la possibilité de réaliser l'échelle du thermomètre à résistance de platine, des températures les plus basses (13,8 K) au point de l'or. Les résultats de cette étude sont décrits dans la suite de ce rapport.

2. Formule d'interpolation pour les thermomètres à résistance de platine entre 13,8 K et 273 K

Les résultats d'une enquête récente [1] font apparaître que :

- a) les nouvelles déterminations des températures thermodynamiques sont nombreuses et couvrent complètement l'intervalle de température considéré ;
- b) l'accord entre différentes déterminations est bien à l'intérieur de ± 2 mK ;
- c) il est possible de dessiner une courbe passant à moins de ± 2 mK des résultats ;
- d) il est possible d'établir une fonction de référence en utilisant la relation entre la résistance réduite d'un thermomètre particulier et la température déterminée au moyen d'une courbe passant par les points expérimentaux ;
- e) une fonction écart unique couvrant tout le domaine conduit à l'incertitude minimale due à la non-unicité de l'échelle [2].

Un nouveau document, destiné au CCT, décrivant l'échelle, sa réalisation et les essais de mise au point est en préparation.

[1] KEMP, R. C., BESLEY, L. M. et KEMP, W. R. G. *Metrologia*, **21**, 1985, pp. 139-146.

[2] KEMP, R. C., Document CCT/84-11.

3. Propositions et expérience de l'Atelier concernant la conception et les caractéristiques des thermomètres à résistance de platine pour la mesure des hautes températures

Les recherches effectuées par les participants à cet Atelier ont permis de faire des propositions sur certains paramètres des thermomètres à résistance. Pour d'autres paramètres, on peut seulement résumer l'expérience des experts.

a) R_0

En ce qui concerne R_0 , les participants pensent que le domaine le plus utile va de $0,2 \Omega$ à $2,5 \Omega$. Aux valeurs les plus basses de R_0 il faut que les erreurs dues aux courants de fuite soient plus faibles et (pour des fils de plus grand diamètre) la stabilité meilleure. Aux valeurs les plus élevées de R_0 , il faut une meilleure résolution de température pour un instrument de mesure de résistance donné.

La stabilité à long terme de R_0 est profondément influencée par le passé du thermomètre. Après un emploi initial à une température t_{\max} supérieure à 480°C , le thermomètre doit être recuit à $(t_{\max} + 50^\circ\text{C})$, sans dépasser 1100°C , jusqu'à ce que la vitesse d'évolution de R_0 devienne inférieure à 10 mK pour 100 h à t_{\max} . Pour déterminer $W(t)$ à une température supérieure à 450°C , la bonne valeur de R_0 est obtenue après un procédé de « recuit-trempe ». Le procédé le plus satisfaisant peut varier d'un thermomètre à l'autre. Toutefois, les procédés les plus représentatifs sont les suivants :

- Réduction de la température du thermomètre de 800°C à 500°C par pas de 50°C d'environ 30 min chacun, suivie d'un refroidissement rapide dans l'air ;
- Refroidissement du thermomètre à une vitesse qui n'excède pas 80°C par heure de 950°C à 525°C , suivi d'un refroidissement rapide dans l'air ;
- Recuit à 650°C pendant 30 min, puis à 450°C pendant 30 min, suivi d'un refroidissement rapide dans l'air.

À une température supérieure à 450°C , plus le refroidissement est lent, meilleur est le recuit.

On peut obtenir une stabilité à court terme de R_0 , évaluée après 10 cycles au point de l'aluminium suivis du procédé de recuit-trempe adéquat, correspondant à des changements de température aussi petits que $0,3 \text{ mK}$ par cycle (moyenne quadratique) et à des changements de température de R_0 successifs n'excédant pas $\pm 1 \text{ mK}$. Pour des cycles au point de l'argent, les limites accessibles sont $0,5 \text{ mK}$ et $\pm 1,5 \text{ mK}$.

b) $W(t)$

En ce qui concerne la stabilité de $W(t)(\equiv R(t)/R_0)$ après chauffage des thermomètres à 1 100 °C pendant 100 h, l'expérience peut être résumée sous la forme de la dérive type et de la plus petite dérive :

T	Dérive type	Plus petite dérive
Al	± 1 à 3 mK	± 1 mK
Ag	± 10 à 15 mK	± 2 mK
Au	± 10 à 15 mK	± 3 mK

c) α

En ce qui concerne α , il semble que les thermomètres conviennent tant que α n'est pas inférieur à $0,003920 \text{ K}^{-1}$. Toutefois, la valeur traditionnelle de α , égale ou supérieure à $0,0039250 \text{ K}^{-1}$, est conseillée pour s'assurer d'une pureté des fils et d'un recuit convenables.

d) Élément sensible

La longueur maximale conseillée pour l'élément sensible est de 4 cm. Cette limite est particulièrement importante lorsque le thermomètre doit être utilisé avec un rayonnement corps noir.

Le choix du meilleur thermomètre à résistance de platine pour les mesures horizontales n'a pas été résolu. C'est une question très importante, car il est nécessaire d'utiliser les thermomètres en position horizontale pour le transfert des températures des cavités corps noir lors de la détermination par rayonnement des températures thermodynamiques au-dessus de 660 °C. Toute comparaison similaire rayonnement-thermomètre rend nécessaire une utilisation horizontale du thermomètre. On considère que la géométrie de l'élément sensible est très importante à ce point de vue et il n'est pas évident qu'une géométrie convenable ait été conçue à ce jour (de nombreuses mesures en position horizontale ont été effectuées au CSIRO).

e) Gaine

Le diamètre extérieur conseillé est de 7,0 mm et le diamètre maximal ne doit pas excéder 7,4 mm. La longueur de la gaine doit se situer entre 60 et 80 cm. La stabilité mécanique, la durée de vie de la gaine et la température de ramollissement de la silice sont améliorées si la teneur en hydroxyle de la silice est réduite.

Un problème majeur pour la stabilité des thermomètres est la migration d'impuretés métalliques à travers la gaine. Il semble toutefois que le graphite puisse faire barrière à cette migration. À son tour, le graphite peut être protégé par une mince couche de carbure de silicium.

f) Gaz de remplissage

Le gaz qui convient le mieux est, soit de l'air sec, soit de l'argon avec 10 % d'oxygène, à une pression proche de 101 kPa à 1 100 °C.

g) Résistance d'isolement

La résistance d'isolement des thermomètres dépend beaucoup de la température à laquelle ils sont utilisés et du circuit de mesure de la résistance. Les valeurs obtenues varient de plus de 10^5 M Ω à 0,1 M Ω (mesures en courant alternatif avec mise à la terre). Les valeurs les plus élevées correspondent à des mesures en courant continu sans mise à la terre du circuit du thermomètre, pour des températures inférieures à 400 °C ; à 1 064 °C, on a obtenu une valeur de 10 M Ω avec une mesure en courant continu sans mise à la terre. Une erreur due à des fuites électriques peut être détectée par plusieurs méthodes : en passant du courant alternatif au courant continu, en changeant la profondeur d'immersion ou en ajoutant une garde interne ou une grille externe mise à la terre.

h) Profondeur d'immersion

À l'exception de l'effet de pression hydrostatique, le changement de la température indiquée ne doit pas excéder 0,2 mK lorsque l'on déplace le thermomètre, tant que le point milieu de l'élément sensible se situe à 10 cm au moins au-dessous de la surface du liquide dans une cellule à point de congélation du zinc.

4. Propositions et expérience de l'Atelier sur la définition d'une nouvelle échelle internationale de température au-dessus de 0 °C avec les thermomètres à résistance de platine pour la mesure des hautes températures

a) Bien-fondé du choix des températures thermodynamiques

Pour caractériser une échelle avec les thermomètres à résistance de platine pour la mesure des hautes températures, il est souhaitable de réaliser les températures thermodynamiques avec une incertitude inférieure à 100 mK dans le domaine de 0 °C à 1 064 °C. Actuellement, cela n'est possible que pour les températures de 0 °C à 660 °C, y compris pour les points fixes de l'étain, du zinc et de l'aluminium (ou de l'antimoine). On pense que les mesures de thermométrie à gaz, en cours au NBS dans le domaine de 457 °C à 660 °C, pourraient être terminées d'ici deux ans ; la thermométrie à bruit effectuée à 1 084 °C à l'IMGC pourrait être achevée vers la même époque et, d'ici trois ans, les mesures par rayonnement spectral prévues à la PTB et au CSIRO pourraient l'être aussi. Les résultats des mesures par rayonnement total, au NPL,

se feront attendre encore plus longtemps. Les mesures par rayonnement spectral faites au BIPM, dans le domaine de 420 °C à 630 °C, pourraient être terminées d'ici deux ans.

b) Température de passage de la thermométrie à résistance de platine à la thermométrie par rayonnement dans la nouvelle échelle internationale de température

On estime que le niveau d'imprécision de la thermométrie par rayonnement dans les laboratoires nationaux, entre 960 °C et 1 060 °C, est habituellement d'environ $\pm 0,02$ °C. Celui des thermomètres à résistance de platine dans le même domaine est légèrement inférieur (voir Chapitre 3.b). En conséquence, le niveau d'imprécision n'est pas le critère qui permet de choisir entre la température de l'argent et celle de l'or pour le passage du thermomètre à résistance de platine à la thermométrie par rayonnement dans une nouvelle échelle internationale de température. Le coût élevé de la réalisation du point de l'or conduit à mettre soigneusement en balance la durée de vie des thermomètres et les services étendus qu'ils peuvent rendre à cette température.

c) Points fixes

Les points fixes nécessaires à l'emploi des thermomètres sont ceux de l'étain, du zinc, de l'aluminium (ou de l'antimoine), de l'argent et de l'or (ou du cuivre). L'eutectique cuivre-argent paraît fournir une précision bien plus faible que les métaux cités précédemment. Un caloduc à sodium à bouchon de gaz, qui fonctionne comme une chaudière à point d'ébullition, peut fournir des points fixes dans le domaine de 750 °C à 960 °C ; il permet d'obtenir couramment une reproductibilité de température inférieure à 5 mK.

d) Uniformité des points fixes

Du fait de l'absence de comparaisons récentes de points fixes aux hautes températures, il faut examiner si l'uniformité des températures offerte par les cellules à points fixes existant dans le monde est suffisante pour permettre une comparaison réaliste des performances des thermomètres aux points fixes. On pourrait peut-être évaluer d'abord l'accord des valeurs de t' (EIPT-68) aux points fixes à hautes températures, d'un laboratoire à l'autre. Toutefois, il faut retenir que les légères erreurs lors des étalonnages à l'étain et au zinc sont amplifiées aux températures plus élevées.

L'attention du Groupe de travail 3 a été attirée sur le fait que l'eau effectivement utilisée dans le remplissage des cellules à point triple actuelles n'a généralement pas la composition isotopique spécifiée dans l'EIPT-68. L'écart de température résultant du changement de composition isotopique noté ci-dessus est estimé à 40-70 μ K. Compte tenu qu'à ce

niveau de température l'incidence d'un tel changement peut être sensible sur une échelle secondaire de grande précision à domaine restreint, échelle qui a été discutée lors des réunions du CCT, le Groupe de travail 3 suggère au CCT d'étudier ce problème avant de remplacer l'EIPT-68.

e) Procédés d'interpolation possibles

Bien qu'on ne puisse conseiller à l'heure actuelle aucun procédé d'interpolation précis, il semble qu'il y ait avantage à autoriser l'utilisation des thermomètres avec des températures maximales limitées à la température du point du zinc, à celle de l'antimoine ou à celle de l'argent.

f) Thermocouple or-platine

Les plus récents résultats obtenus au NRC (Canada) indiquent que les thermocouples à fils d'or et de platine purs (tous deux à 99,999 %) peuvent être construits de manière à être insensibles à des gradients de température d'environ 0,01 °C par 10 cm, lorsqu'ils fonctionnent entre 0 °C et 1 000 °C. Leur pouvoir thermoélectrique varie de 10,8 $\mu\text{V/K}$ à environ 160 °C à 24,8 $\mu\text{V/K}$ à environ 962 °C. Sur cette base, il est possible que le thermocouple or-platine soit au moins dix fois plus exact que le thermocouple platine/platine rhodié à 10 % utilisé jusqu'au point de congélation de l'argent. Il est nécessaire d'obtenir plus de précisions sur sa reproductibilité.

5. Travail restant à accomplir sur les thermomètres à résistance de platine pour la mesure des hautes températures

Dans l'intervalle de temps qui nous sépare de l'achèvement des déterminations des températures thermodynamiques jusqu'à 1 064 °C, il est très important de continuer les études sur les thermomètres à résistance de platine pour la mesure des hautes températures. Certains problèmes liés à la conception et aux performances des thermomètres à haute température n'ont pas encore été résolus, notamment les questions concernant le passage des mesures effectuées par thermométrie par rayonnement à celles réalisées avec des thermomètres à résistance, la migration des impuretés à travers la gaine des thermomètres, la réduction des erreurs dues aux fuites électriques dans les thermomètres, la stabilité et la durée de vie des thermomètres jusqu'à 1 084 °C. Il y a, de plus, les problèmes liés à l'établissement d'une échelle pour les thermomètres à résistance de platine (essais de procédés d'interpolation acceptables et évaluation de la précision des relations d'interpolation à toutes les températures par exemple).

6. Propositions au CCT

Le Groupe de travail 3 considère qu'il est maintenant possible de définir une échelle internationale de température de 13,8 K à 273 K à l'aide du thermomètre à résistance de platine, avec une seule fonction de référence et une seule fonction écart. En conséquence, il propose que le CCT encourage les laboratoires nationaux à effectuer des essais sur ce domaine de l'échelle, ainsi que sur les raccordements aux autres domaines sans discontinuité de pente.

Le Groupe de travail 3 propose que l'on continue à utiliser la loi de Planck pour la définition des températures supérieures à celles définies par le thermomètre à résistance de platine. Toutefois, il presse le CCT pour qu'il encourage la comparaison de thermomètres à résistance de platine et de thermomètres à rayonnement dans un domaine de température plus large. Il faut noter que l'on considère généralement que la thermométrie par rayonnement est aussi précise au point de l'argent qu'au point de l'or.

D'après les discussions lors de l'Atelier sur les thermomètres à résistance de platine pour la mesure des hautes températures, le Groupe de travail 3 pense que, pour le moment, aucun argument technique ne permet de choisir entre le point de l'argent et celui de l'or comme température de jonction entre l'échelle du thermomètre à résistance et l'échelle fondée sur le rayonnement.

7. Réunion commune des Groupes de travail 3 et 4

Lors des discussions sur les sujets d'intérêt commun aux Groupes de travail 3 et 4, deux membres seulement du Groupe de travail 4 étaient présents. La suggestion du Groupe de travail 3 d'un « point de jonction » à 13,81 K (à la lumière de la nouvelle échelle proposée) leur a semblé très recevable et susceptible d'obtenir l'accord général du Groupe de travail 4 lors de la réunion de 1986 du CCT, en l'absence de toute information contraire.

8. Documents de l'Atelier à communiquer au CCT (réunion de 1986)

Les documents soumis à l'Atelier sur les thermomètres à résistance de platine pour la mesure des hautes températures sont joints à ce rapport pour être portés à la connaissance du CCT lors de sa prochaine réunion.

ANNEXE T 5

Additif au rapport du Groupe de travail 3 *

(Domaine du thermomètre à résistance de platine)

(Traduction du document CCT/87-64)

1. Avant-propos

Le Groupe de travail 3 s'est réuni au NBS (Gaithersburg) en octobre 1985, à l'occasion de l'Atelier sur les thermomètres à résistance de platine pour la mesure des hautes températures. Il a examiné le travail expérimental accompli pour l'établissement d'une nouvelle échelle de température dans le domaine du thermomètre à résistance de platine. Ses principales conclusions sont les suivantes :

- 1) L'échelle internationale de température (EIT) peut être définie de 13,8 K à 273 K à l'aide du thermomètre à résistance de platine, avec une seule fonction de référence et une seule fonction écart [1, 2].
- 2) Les thermomètres à résistance de platine pour la mesure des hautes températures peuvent reproduire l'EIT au point de congélation de l'argent avec une exactitude de ± 10 à 15 mK dans la situation la plus défavorable et de ± 2 mK dans le meilleur des cas.
- 3) Les résultats expérimentaux produits lors de la réunion montrent que l'échelle du thermomètre à résistance de platine est probablement la plus reproductible entre 13,8 K et 24,6 K mais, en revanche, que sa non-unicité serait beaucoup plus importante si l'échelle se terminait à 24,5 K. Lors d'une réunion avec le Groupe de travail 4, les mérites respectifs du thermomètre à résistance de platine et du thermomètre à gaz comme instruments d'interpolation ont été discutés en détail.

* Les membres de ce Groupe de travail sont : L. CROVINI, président, Istituto di Metrologia G. COLONNETTI (Italie); R. C. KEMP, CSIRO, Division of Applied Physics (Australie); LING SHANKANG, Institut national de métrologie (Rép. Pop. de Chine); H. SAKURAI, National Research Laboratory of Metrology (Japon); J. F. SCHOOLEY, National Bureau of Standards (É.-U. d'Amérique).

Le Groupe de travail 3 a alors reconnu qu'il était de son devoir de recommander la meilleure échelle, celle du thermomètre à résistance de platine, mais il a aussi admis l'emploi du thermomètre à gaz d'interpolation au-dessous de 24,5 K, de façon à pouvoir disposer d'autres définitions de l'échelle entre 13,8 K et 24,5 K.

L'Atelier sur les thermomètres à résistance de platine pour la mesure des hautes températures s'est penché sur quelques questions clés, telles que les fuites électriques au-dessus de 660 °C, la migration des impuretés dans un environnement métallique, la qualité et l'uniformité des points fixes aux hautes températures et le besoin d'une transition lisse entre la thermométrie à résistance de platine et la thermométrie par rayonnement. Le choix entre les points de congélation de l'argent et de l'or pour établir le « point de jonction » n'a pas été établi lors de cet Atelier.

2. Activité après octobre 1985

2.1. Thermomètres à résistance de platine pour la mesure des hautes températures

Les nouveaux progrès réalisés dans le domaine des thermomètres à résistance de platine ont fait l'objet de publications depuis la réunion d'octobre 1985, en particulier à l'occasion du symposium sur les mesures de températures qui s'est tenu à Beijing [3-5]. Sawada *et al.* [5] ont remarqué que la stabilité des thermomètres s'améliorait quand α augmentait (*voir aussi* document CCT/87-11); ils proposent un seuil de 0,003927. Un examen des thermomètres en cours d'étude dans de nombreux laboratoires a montré que, le plus souvent, α était supérieur à 0,003926, ce qui est significatif pour le choix d'une fonction de référence.

La migration des impuretés métalliques des surfaces en Inconel vers un fil en platine à travers une ou deux gaines de silice a été confirmée, en utilisant des traceurs radioactifs, au cours d'expériences menées conjointement par l'IMGC et le Centro di Radiochimica du Conseil national de recherches (Pavie). Il en résulte que les thermomètres ne doivent pas être en contact avec des surfaces métalliques (en particulier avec le cuivre, les alliages à base de cuivre, l'Inconel, l'acier inoxydable et les alliages nickel/chrome), à une température supérieure à 660 °C, pendant un temps d'exposition prolongé (par exemple pendant plus d'une heure). La migration des impuretés risque d'affecter la reproductibilité des cellules à point fixe utilisées à hautes températures dans des blocs en Inconel. Bien qu'il n'ait pas été possible de mettre cette contamination en évidence, il est préférable de se servir des cellules pendant le temps minimal nécessaire et d'éviter de les maintenir à haute température pendant une longue période.

2.2. Points fixes

Le point de fusion de l'alliage eutectique cuivre-argent (779,6 °C) a été étudié dans plusieurs laboratoires, en particulier au NRC [6] et au CSIRO [7, 8]. Les résultats ont confirmé ceux obtenus précédemment à l'IMGC [9], qui indiquaient une reproductibilité à court terme meilleure que ± 10 mK. Des études sur un caloduc au sodium à bouchon de gaz [10] montrent qu'un même appareil peut reproduire une température proche du point d'ébullition du sodium (880 °C) à $\pm 1,5$ mK, mais que la reproductibilité de plusieurs appareils n'est pas encore connue. Les recherches sur le sujet se poursuivent à l'IMGC en collaboration avec l'Ispra European Joint Research Center.

Le besoin de vérifier l'uniformité des températures données par les cellules à point fixe existant dans le monde a été souligné au cours de l'Atelier sur les thermomètres à résistance de platine pour la mesure des hautes températures. Plus récemment, Jung et Li Xumo [11] ont montré que les cellules à point de congélation de l'aluminium utilisées au NBS, au NIM, au NPL et à la PTB donnaient des valeurs de t' au point de liquidus comprises dans un domaine d'environ 27 mK. Ce domaine est bien supérieur à celui que l'on peut attendre des incertitudes d'étalonnage et des propriétés des thermomètres. Une comparaison directe entre le NIM et la PTB a confirmé la différence.

La comparaison entre le NBS et l'IMGC au point de congélation de l'argent est en cours ; les résultats seront bientôt disponibles. La comparaison est réalisée avec une cellule scellée transportable.

2.3. Méthode d'interpolation entre 0 °C et 962 °C

Il est très souhaitable de pouvoir étalonner un thermomètre à résistance de platine étalon seulement dans le domaine de température où il sera utilisé. Une échelle divisée en sous-domaines peut permettre de répondre à ce besoin. Le procédé d'interpolation de Jung et Li Xumo [11] n'y répond pas car il requiert l'étalonnage à six points fixes, du point triple de l'eau au point de congélation de l'argent. Il reste alors les deux possibilités suivantes :

1) une forme paramétrique du type :

$$W(t) = 1 + A\theta + B\theta + C(\theta - \theta_{Sn})^3 + C'(\theta - \theta_{Zn})^3 + C''(\theta - \theta_{Al})^3$$

et $t = F(\theta)$,

où C , C' , C'' sont égaux à zéro pour θ inférieur ou égal à θ_{Sn} , θ_{Zn} et θ_{Al} respectivement. t est égal à θ au point de congélation de l'étain, du zinc et de l'aluminium ;

2) une fonction de référence du type :

$$W(t) - W_{\text{ref}}(t) = a(W_{\text{ref}} - 1) + b(W_{\text{ref}} - 1)^2 + C [W_{\text{ref}} - W_{\text{ref}}(\text{Sn})]^3 \\ + C' [W_{\text{ref}} - W_{\text{ref}}(\text{Zn})]^2 \\ + C'' [W_{\text{ref}} - W_{\text{ref}}(\text{Al})]^2$$

et $W_{\text{ref}} = f(t)$,

où C, C', C'' sont égaux à zéro pour t inférieur ou égal à $t_{\text{Sn}}, t_{\text{Zn}}$ et t_{Al} respectivement.

Les deux procédés ont les caractéristiques suivantes :

- a) quatre sous-domaines qui se chevauchent partiellement sont créés, chacun n'exigeant qu'un seul point fixe supplémentaire par rapport au domaine inférieur ;
- b) il faut jusqu'à six points fixes au total ;
- c) la continuité de la dérivée première est assurée à chaque point de jonction intermédiaire. La continuité de la dérivée seconde l'est aussi par la forme paramétrique sur tout le domaine et par la fonction de référence jusqu'à t_{Zn} ;
- d) seule la fonction $F(\theta)$, ou $f(t)$, doit être définie à partir des résultats thermodynamiques les plus exacts.

De plus, la fonction de référence assure la continuité des dérivées première et seconde à 0 °C pour chaque thermomètre à résistance de platine, si W_{ref} est à son tour continu. Cette continuité n'est pas facilement atteinte avec la forme paramétrique. La fonction de référence permet aussi d'introduire facilement des définitions équivalentes dans des domaines restreints. Par exemple, la différence en W peut être déterminée avec une simple relation du second degré passant par les points triples du mercure, de l'eau et du gallium et fournissant une excellente reproductibilité dans le domaine de - 40 °C à + 40 °C.

Une autre méthode d'interpolation, toujours fondée sur une fonction de référence, a été récemment proposée par Connolly *et al.* [12]. Elle comporte une fonction de référence continue de 0 °C à t_{Ag} et une fonction écart $\Delta W(t)$ exprimée par un polynôme du second degré en t , dont les coefficients sont déterminés à partir des points fixes suivants, avec les incertitudes probables correspondantes :

0-460 °C	Sn-Zn	± 0,5 mK
0-660 °C	Cd (ou Zn)-Al	$\left\{ \begin{array}{l} \pm 2 \text{ mK jusqu'à } 460 \text{ °C} \\ \pm 5 \text{ mK de } 460 \text{ à } 700 \text{ °C} \end{array} \right.$
0-962 °C	Zn-Ag	

Cette technique produit une certaine non-unicité et une discontinuité possible de la pente à 0 °C.

Il est nécessaire de procéder en deux étapes au moins pour réaliser une fonction de référence de 0 °C à 962 °C. Au cours de la première étape, on établira une fonction $W(t)$ continue sur tout le domaine de température, à partir d'un thermomètre à résistance de platine très stable et possédant autant que possible les meilleures propriétés d'un thermomètre conçu pour ce domaine de température. En particulier, il doit présenter un minimum de fuites électriques à haute température. Une méthode d'interpolation comme celle décrite par Jung et Li Xumo peut être utile. Ensuite, on modifiera la fonction $W(t)$ pour qu'elle soit en accord avec la fonction de référence au-dessous de 0 °C. La règle consiste à déterminer le tracé des différences en W pour le thermomètre de référence utilisé à basse température par rapport à celui employé à haute température en fonction de W , puis à étendre ce tracé jusqu'à $W(\text{Ag})$ de manière plausible sur la base des fonctions écarts courantes des groupes de thermomètres à résistance de platine pour la mesure des hautes températures. En clair, la fonction résultante $W_{\text{ref}} = f(t)$ sera d'une certaine manière arbitraire. Toutefois, comme la règle de transformation est définie de façon unique, il reste toujours possible de revenir de la fonction de référence au thermomètre de référence. Le désaccord en α entre le thermomètre de référence employé à haute température et celui utilisé à basse température peut être considérablement réduit en utilisant pour ce dernier un thermomètre ayant un α supérieur ou égal à $0,0039265 \text{ K}^{-1}$. Il semble réalisable de réduire le désaccord à mieux que $\pm 10^{-7} \text{ K}^{-1}$.

$W_{\text{ref}}(t)$ peut aussi être défini en donnant des valeurs à α et à δ [12]. Elles permettent d'obtenir $W(\text{Sn})$ et $W(\text{Zn})$. $W(\text{Al})$ et $W(\text{Ag})$ sont alors déterminés à l'aide des valeurs appropriées t' pour ces points fixes. Toutefois, on ne sait pas encore avec certitude si les valeurs t' disponibles sont uniques ou pas.

La façon d'établir la fonction de référence repose sur l'hypothèse que le thermomètre de référence, artificiel ou réel, représente bien le comportement de tous les autres thermomètres à résistance de platine. Cette hypothèse peut être démentie à haute température, cas dans lequel on sait que les thermomètres montrent dans une certaine mesure des effets indésirables, comme, par exemple, des fuites électriques. Une fonction de référence fondée sur un thermomètre présentant des fuites électriques pourra se révéler inappropriée le jour où de meilleurs thermomètres à résistance de platine seront disponibles.

Pour résoudre ce problème et conserver la façon d'établir la fonction de référence, il faut être capable de corriger, ou de modifier, la fonction de référence si nécessaire, sans bien sûr créer une nouvelle échelle internationale de température.

La solution paramétrique ne soulève pas cette difficulté, parce que meilleur est le thermomètre et meilleure est l'échelle qui lui est associée,

à partir du moment où le point fixe est bon. Malheureusement, il n'est pas possible d'harmoniser les deux méthodes, en combinant leurs avantages respectifs.

Avril 1987

Bibliographie

- [1] KEMP, R. C. *In* : Temperature measurement 1986, Beijing, China Academic Publishers, Wang, L. et Ling, S. eds, 1986, pp. 85-90.
 - [2] KEMP, R. C., BESLEY, L. M. et KEMP, W. R. G. *Metrologia*, **21**, 1985, pp. 139-146.
 - [3] ZHANG, J. et BERRY, R. J. *In* : Temperature measurement 1986, Beijing, China Academic Publishers, Wang, L. et Ling, S. eds, 1986, pp. 151-156.
 - [4] BERRY, R. J. *In* : Temperature measurement 1986, Beijing, China Academic Publishers, Wang, L. et Ling, S. eds, 1986, pp. 157-163.
 - [5] SAWADA, S., ARAI, M. et SAKURAI, H. *In* : Temperature measurement 1986, Beijing, China Academic Publishers, Wang, L. et Ling, S. eds, 1986, pp. 232-237.
 - [6] Bedford, R. E. et Ma, C. K. *In* : Temperature, Its Measurement and Control in Science and Industry, New York, American Institute of Physics, Schooley, J. F. ed, Vol. 5, Part 1, 1982, pp. 361-369.
 - [7] Mc ALLAN, J. V. *In* : Temperature, Its Measurement and Control in Science and Industry, New York, American Institute of Physics, Schooley, J. F. ed, Vol. 5, Part 1, 1982, pp. 371-376.
 - [8] Jones, T. P. et Tapping, J. The determination of the thermodynamic temperature of thermometry fixed points in the range 660 to 1064 °C (Document CCT/87-15).
 - [9] BONGIOVANNI, G., CROVINI, L. et MARCARINO, P. *High Temp. — High Pressure*, **4**, 1972, p. 573.
 - [10] CROVINI, L. et MARCARINO, P. Reference points between aluminium and silver freezing points. Texte présenté à l'occasion de l'Atelier sur les thermomètres à résistance de platine pour la mesure des hautes températures, NBS, Gaithersburg, 7-10 octobre 1985.
 - [11] JUNG, H.J. et LI, X. Proposal of an Interpolating Procedure for Standard Platinum Resistance Thermometers in the Range 0 °C until 961 °C (Document CCT/87-8).
 - [12] CONNOLLY, J. J., JONES, T. P. et TAPPING, J. A Proposed Definition of an International Temperature Scale in the Range 0 °C to 962 °C. (Document CCT/87-46).
-

ANNEXE T 6

Rapport du Groupe de travail 4*

(EIPT au-dessous de 24 K —
Températures thermodynamiques au-dessous de 1 064 °C)

(Traduction du document CCT/87-13)

L'une des tâches principales du Groupe de travail 4 a été de préparer un document sur les valeurs recommandées de $T - T_{68}$ à discuter au sein du CCT et, à terme, à publier dans *Metrologia* [1]. Un premier projet avait été préparé en juillet 1984 et envoyé aux membres du Groupe de travail 4 pour stimuler leur réflexion ; par la suite, il y eut plusieurs versions du document. Le président du CCT et le président du Groupe de travail 3 ont été régulièrement tenus informés. De plus, le Groupe de travail 4 a pu tirer profit de la participation de plusieurs de ses membres à différentes conférences sur la thermométrie qui se sont tenues en 1985 et 1986, entre autres : High-Temperature Platinum Resistance Thermometry Workshop (voir rapport du Groupe de travail 3, p. T 43), NBS (Washington), 7-10 octobre 1985 (R. P. Hudson, R. J. Soulen Jr et C. A. Swenson) ; Measurement and Control of Low Temperatures, Institute of Physics (Londres), 6 mars 1986 (M. Durieux, R. P. Hudson et R. L. Rusby) ; Refrigeration and Thermometry below 1 K, PTB (Berlin), 12-13 septembre 1986 (R. P. Hudson, R. L. Rusby et R. J. Soulen Jr). Une avant-dernière version a été diffusée à tous les membres ainsi qu'aux présidents des Groupes de travail 1, 2 et 3 en décembre 1986 et l'article terminé (document CCT/87-9) a été officiellement soumis au BIPM peu après.

À la fin de l'« Atelier » mentionné ci-dessus, les membres des Groupes de travail 3 et 4 présents au NBS se sont réunis pour discuter des points d'intérêt commun. On a rendu compte brièvement de l'avancement des travaux du Groupe de travail 4 (voir ci-dessus). On a pris note de l'absence de nouveaux développements permettant au CCT d'aller au-

* 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.

delà des conclusions auxquelles il était parvenu lors de sa 15^e session (juin 1984) au sujet de la révision de l'EIPT au-dessous de 30 K. On a reconnu le rôle vraisemblablement important que jouera dans toute nouvelle échelle la fonction de référence du CSIRO [2] pour l'interpolation, avec le thermomètre à résistance de platine, dans le domaine compris entre 13,8 K et 273 K. Toutefois les membres du Groupe de travail 4 ont mis tous leurs soins à souligner qu'un tel rôle ne modifierait en rien — pour autant qu'on puisse s'en rendre compte à l'heure actuelle — les propositions préliminaires [3] discutées lors de la session de 1984 du CCT, portant sur la définition de l'échelle au-dessous de 25 K au moyen, soit d'un thermomètre à gaz d'interpolation, soit d'un thermomètre à résistance de platine; ces mêmes soins n'ont évidemment servi à rien puisque le compte rendu de la session n'en a pas fait mention!

Comme le lui avait demandé le Groupe de travail 1, le Groupe de travail 4 a brièvement fait état de la situation du thermomètre à gaz d'interpolation entre 3 K et 25 K. De plus, le président a pu aider le Groupe de travail 1 lors de certaines de ses réunions au BIPM.

Les réunions des spécialistes des basses températures mentionnées ci-dessus n'ont rien apporté de nouveau ou de pressant aux membres du CCT. À Berlin, on a manifesté un certain intérêt général pour déterminer de façon définitive la courbe de fusion de ³He et pour produire une échelle pratique convenable dans le domaine allant de 0,001 K jusqu'au voisinage de 1 K. Les deux conférences avaient prévu des exposés sur le CCT et son action mais les retombées ont été négligeables pour les intérêts actuels du CCT.

Mars 1987

Bibliographie

- [1] *BIPM Com. Cons. Thermométrie*, 15, 1984, p. T 31.
 - [2] R. C. KEMP, L. M. BESLEY and W. R. G. KEMP. A Reference Function for Platinum Resistance Thermometer Interpolation Between 13.8 K and 273.15 K, Document CCT/84-8 soumis à la 15^e session du CCT en 1984 et *Metrologia*, 21, 1985, pp. 139-146.
 - [3] Voir par exemple : *BIPM Com. Cons. Thermométrie*, 15, 1984, Annexe T 2, pp. T 44-48.
-

**Écart de l'Échelle internationale pratique de température de 1968
et de l'Échelle pratique de température de 1976 par rapport
aux températures thermodynamiques**

R. P. HUDSON, M. DURIEUX, R. L. RUSBY, R. J. SOULEN et C. A. SWENSON
(Groupe de travail 4 du Comité Consultatif de Thermométrie)

(Traduction du document CCT/87-9)

1. Introduction

Il y a dix ans environ, le CCT avait estimé que le moment était venu de publier une évaluation des différences entre l'Échelle internationale pratique de température de 1968, l'EIPT-68 [1], et les températures thermodynamiques au-dessus de 0 °C. Un article avait été préparé au moment opportun par le Groupe de travail 3 du CCT et publié dans *Metrologia* [2]. Depuis lors, des expériences ont été poursuivies au-dessus de 0 °C alors que de nouveaux efforts de recherche au-dessous de 0 °C commençaient à donner des résultats intéressants et importants. À sa session de juin 1984, le CCT a chargé le Groupe de travail 4 de mettre à jour la publication de 1977 citée ci-dessus, afin de traiter tout le domaine couvert par l'EIPT-68 et d'étendre l'étude au domaine des basses températures représenté par l'Échelle provisoire de température de 1976, l'EPT-76 [3], en examinant les conséquences des récentes recherches expérimentales sur cette dernière.

Les nouveaux résultats considérés ci-dessous comprennent : la thermométrie à bruit de 2,2 K à 4,2 K et à 84 K ; la thermométrie acoustique de 4,2 K à 20 K ; la thermométrie à gaz à constante diélectrique dans le domaine de 4,2 K à 27,1 K ; la thermométrie à gaz à volume constant au-dessus et au-dessous de 0 °C ; la thermométrie isothermale relative au-dessous de 0 °C ; les mesures magnétothermodynamiques aux environs de 1 K ; la thermométrie magnétique de 0,5 K à 83 K ; la thermométrie à rayonnement total de - 40 °C à 100 °C ; la thermométrie à bruit de 630 °C à 962 °C ; la thermométrie à rayonnement spectral de 430 °C au point de l'or. Les résultats seront considérés par ordre de températures croissantes.

2. Températures au-dessous de 273 K

Un certain nombre d'études faites ces dernières années peuvent servir à établir les différences entre les échelles de température couramment utilisées et les températures thermodynamiques. Aux basses températures, ces études sont cohérentes (à ± 1 mK) avec la thermométrie à gaz de Berry (échelle NPL-75 de 2,6 K à 27,1 K) [4]. Aux hautes températures, les différents résultats sont bien représentés par la relation de référence du thermomètre à résistance de platine proposée par Kemp, Besley et Kemp [5], qui est aussi cohérente avec l'échelle NPL-75 de 13,8 K à 27 K. Ces deux échelles de température sont supposées représenter la température thermodynamique T et servent de base (avec l'EPT-76 au-dessous de 2,6 K, Durieux *et al.* [6]) au résumé des différences entre les échelles (Fig. 1) et aux comparaisons des résultats actuels (Fig. 2). Elles présentent une incertitude (écart-type) de $\pm 0,7$ mK sur tout le domaine.

Les différents résultats expérimentaux sont reliés par des déterminations de points fixes ou par des comparaisons de thermomètres étalons. Sous les auspices du CCT [6a], on a comparé entre eux des points fixes par échange de cellules à point triple. Les thermomètres préférés sont

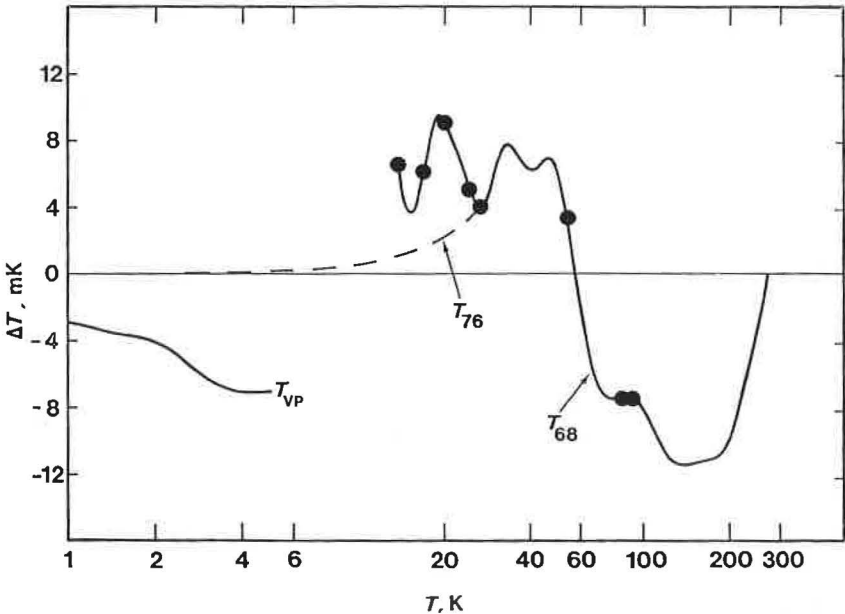


Fig. 1. — Écart ΔT de diverses échelles à basse température T' par rapport à T_{ref} , meilleure estimation des températures thermodynamiques dans le domaine de 1 K à 273 K, suivant Kemp *et al.* [5]. T_{ref} repose à la fois sur T_{76} de 1 K à 2,6 K, T_{NPL-75} de 2,6 K à 13,81 K et sur la fonction de référence du NML/CSIRO [5] de 13,81 K à 273,15 K.

T' comprend : T_{vp} , les échelles à pression de vapeur de ^4He , T_{35} [10], et de ^3He , T_{62} [11]; T_{68} , l'EIPT-68 [1]; et T_{76} , l'EPT-76 [3]. Les cercles noirs indiquent les points fixes à (approximativement) 14 K, 17 K, 20 K, 25 K, 27 K, 54 K, 84 K et 90 K.

généralement des thermomètres rhodium-fer [7] aux basses températures et des thermomètres à résistance de platine étalons aux températures supérieures à 13,8 K [8]. Les relations entre les différentes réalisations de l'EIPT-68 qui sont conservées par les divers laboratoires de métrologie à l'aide de thermomètres à résistance de platine ont été déterminées lors d'une comparaison internationale faite au NPL (Royaume-Uni) par Ward et Compton en 1975-1977 [9]. Ces relations ont été utilisées par Kemp *et al.* [5] pour réduire les différents résultats sur une base commune et calculer les différences $T - T_{68-NPL}$ représentées à la figure 1.

Les écarts des échelles à pression de vapeur de l'hélium (T_{58} [10] pour ^4He , T_{62} [11] pour ^3He) et de l'EIPT-68 avec T (Fig. 1) sont de signes opposés et illustrent les incohérences entre ces échelles qui sont une des raisons de l'adoption de l'EPT-76 [3]. La figure 1 montre aussi que les écarts entre T_{68} et T sont particulièrement irréguliers au-dessous de 30 K et que la limite supérieure de l'EPT-76 a été choisie pour recouvrir partiellement cette région. L'écart à température élevée entre

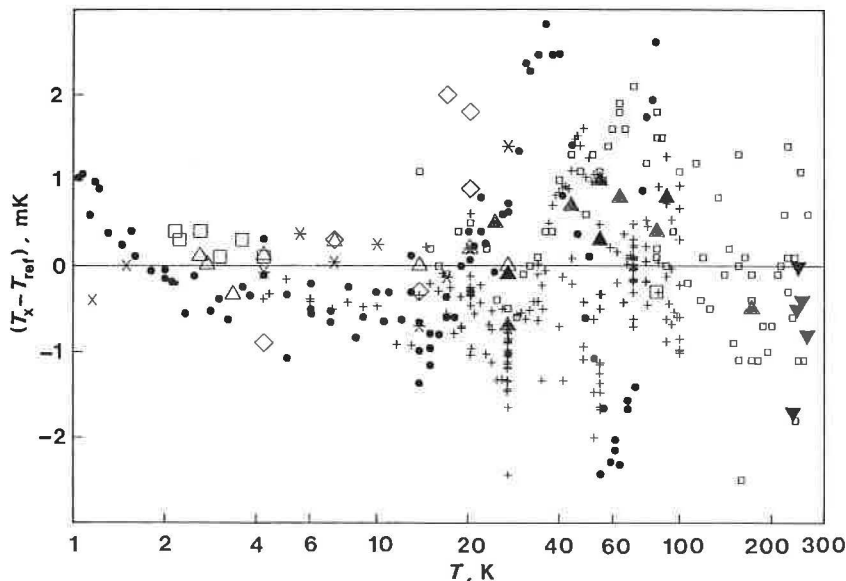


Fig. 2. — Écart des points représentant les résultats, T_x , de différents auteurs par rapport à la température de la fonction de référence du CSIRO [5] :

- × Fisher et Brodale [13],
- △ isothermes NPL-75 [4],
- thermométrie à bruit de Munster [16],
- ◇ thermométrie acoustique de Colclough [17],
- * thermométrie à gaz à constante diélectrique de Gugan [18, 19],
- ▲ isothermes de la PTB [22],
- ▼ thermométrie à rayonnement total du NPL [25],
- thermométrie magnétique de Cetas [24],
- + thermométrie à gaz du KOL, référence à 84 K [20],
- thermométrie à gaz du NML/CSIRO, référence à 273,15 K [15],
- △ isothermes du NML/CSIRO, référence directe ou indirecte à 273,15 K [15].

T_{76} et T a été réalisé intentionnellement dans l'échelle puisque l'objectif de départ était de rejoindre de façon lisse T_{68} aux environs de 30 K. Des résultats par thermométrie magnétique jusqu'à 0,5 K, qui avaient pour référence l'échelle NPL-75, ont été utilisés avec de nouveaux résultats de pression de vapeur [12] pour étendre l'EPT-76 à cette limite inférieure de température. Des résultats supplémentaires sont disponibles aux environs de 1 K grâce aux mesures magnétothermodynamiques de Fisher et Brodale [13] (sur le sel de Tutton cuivre-potassium) dans lesquelles la calorimétrie a été associée à la cryogénie magnétique. De nouvelles relations de pression de vapeur destinées à remplacer T_{58} et T_{62} ont été incorporées à l'EPT-76; elles ont ensuite été publiées sous forme analytique [14].

La figure 2 montre les diverses déterminations récentes des températures thermodynamiques dans le domaine de 1 K à 273 K. La meilleure estimation des températures thermodynamiques mise au point par Kemp *et al.* [5, 15] comme moyenne des résultats expérimentaux est prise pour base de référence. Les résultats par thermométrie à gaz isothermale de Berry sont en accord avec les résultats par thermométrie à bruit de Klein, Klempt et Storm de 2 K à 4 K [16] et avec ceux des mesures de la vitesse de propagation du son de Colclough (4 K à 20 K) [17]. La détermination directe du point d'ébullition de l'hydrogène en équilibre de Berry par rapport au point triple de l'eau ($20,271 2 \pm 0,000 9$) K a été employée comme température de référence pour un grand nombre de travaux en thermométrie aux basses températures. Parmi ceux-ci, il y a la thermométrie à gaz à constante diélectrique de Gugan et Michel (4 K à 27 K) [18], les analyses de Gugan [19], la thermométrie à gaz de Steur et Durieux (4 K à 100 K) [20] et celle de Kemp *et al.* (14 K à 285 K) [15]. Les travaux de Kemp *et al.* font appel à la fois à la thermométrie à gaz à volume constant et à la thermométrie à gaz isothermale. Les travaux sur les isothermes ont fourni les températures et les seconds coefficients du viriel nécessaires à l'analyse des études en thermométrie à gaz à volume constant. Ces isothermes ont été à l'origine rattachées à l'échelle NPL-75 à 20 K. Lorsqu'elles sont ramenées au point triple de l'eau, elles donnent une valeur du point d'ébullition de l'hydrogène (20,271 6 K) qui est encore en accord (+ 0,4 mK) avec la valeur donnée par Berry. Cette nouvelle valeur a été choisie, de préférence à celle de Berry, par Kemp *et al.* [15] comme température de référence dans le calcul de leurs résultats illustrés à la figure 2. Steur et Durieux [20] ont rattaché leurs résultats en thermométrie à gaz à volume constant au point 20 K de Berry et ont utilisé des coefficients du viriel [21] légèrement différents de ceux de Kemp *et al.*

La figure 2 montre que tous ces résultats sont cohérents à mieux que ± 2 mK avec les isothermes rattachées au point triple de Weber à 27 K, 54 K et 90 K [22], et avec la thermométrie à bruit de Storm à 83 K [23]. La figure 2 comprend, de plus, les résultats par thermométrie magnétique de Cetas [24], dont les quatre paramètres ont été déterminés

par ajustement à la relation de référence de Kemp *et al.* [5]. Aux températures plus élevées, Quinn et Martin [25] ont utilisé la thermométrie à rayonnement absolue pour déterminer les températures de 233 K à 373 K, méthode dont les résultats sont particulièrement intéressants parce qu'ils ont pour origine des travaux très différents de la thermométrie à gaz à volume constant et qu'ils recouvrent partiellement les domaines de la thermométrie à gaz aux basses températures [15] et aux hautes températures [26]. Ces résultats sont pris en compte pour $T \leq 273$ K à la figure 2.

La figure 2 montre un très bon accord entre les différents types de résultats sur tout le domaine de température de 1 K à 273 K. Alors que notre choix de départ de l'échelle NPL-75 et de la fonction de référence de Kemp *et al.* comme ligne de base de cette comparaison (voir ci-dessus) était quelque peu arbitraire, les résultats montrent qu'elles représentent de manière très satisfaisante (à ± 2 mK) les résultats expérimentaux actuels.

3. Le domaine de 273 K à 900 K

Dans ce domaine, les seuls résultats thermodynamiques primaires récents sont ceux de Quinn et Martin [25], résultats en accord dans la limite des incertitudes combinées avec ceux du thermomètre à gaz à volume constant de Guildner et Edsinger [26], tout en donnant toujours des différences $|\Delta T|$ plus grandes.

Dans le domaine de température allant de 373 K (100 °C) au point de congélation du zinc (693 K, 420 °C), nous ne disposons d'aucune détermination nouvelle pour effectuer une comparaison avec les résultats présentés par Guildner et Edsinger en 1976 [26]. C'est de toute évidence un domaine de température qui a besoin d'être confirmé, puisque les mesures par pyrométrie à rayonnement spectral réalisées au-dessus du point de congélation du zinc reposent largement sur les résultats de Guildner et Edsinger. La figure 3 représente les résultats décrits dans la référence [25], ceux de la référence [15] au-dessus de 250 K et ceux de la référence [26]. Le tracé à travers les résultats s'efforce de donner la meilleure courbe au-dessous de 370 K et est identique à celui de Guildner et Edsinger au-dessus de ce point. Il nous semble raisonnable de fixer l'écart-type à 1 mK à 200 K et à 3 mK à 730 K.

Des valeurs des températures thermodynamiques déterminées par thermométrie à rayonnement spectral dans le domaine de 410 °C (683 K) à 630 °C (903 K) ont été publiées par Jung [27], Bonhoure et Pello [28] et Coates, Andrews et Chattle [29]. Ces auteurs ont pris comme référence une valeur de la température thermodynamique dans le domaine de 420 °C à 460 °C (693 K à 733 K) obtenue en corrigeant les valeurs de l'EIPT-68 en fonction des différences publiées par Guildner et Edsinger [26]. Bien qu'ils aient tous employé une méthode reposant sur les

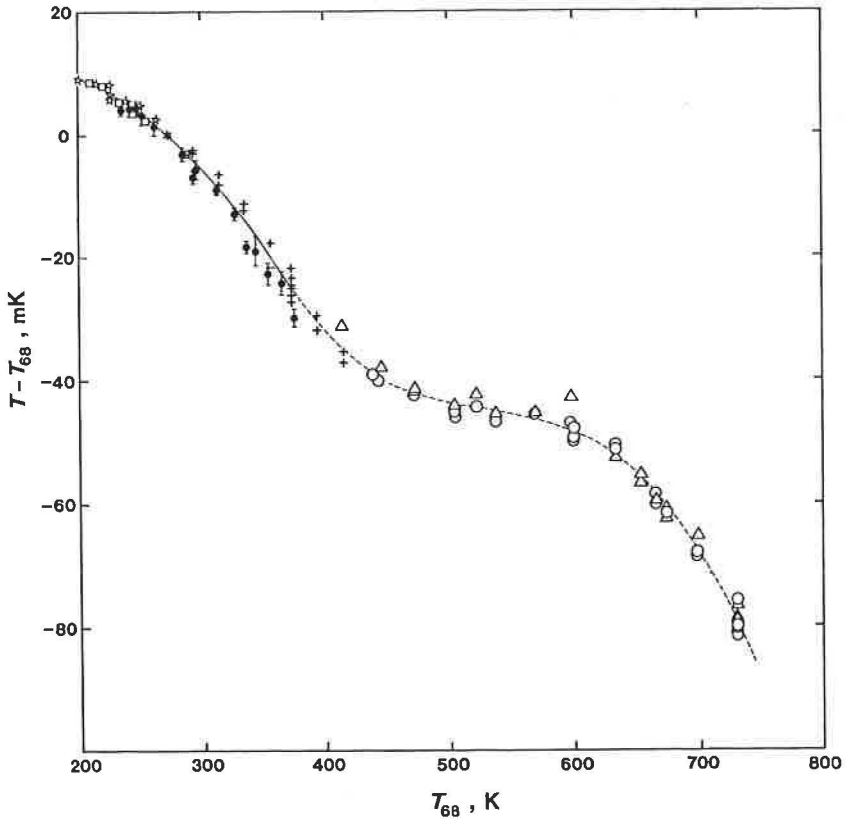


Fig. 3. — Graphe $T - T_{68}$ représentant les résultats de différents auteurs, de 200 K à 730 K :

- * , □ : Kemp *et al.* [15],
- : Quinn et Martin [25],
- + , Δ , ○ : Guildner et Edsinger [26].

La ligne en trait plein représente arbitrairement la « meilleure courbe » à travers les différents résultats au-dessous de 370 K et le point triple de l'eau (*); elle se raccorde de façon lisse à la courbe de Guildner et Edsinger (ligne en pointillé).

mêmes principes, ils ont utilisé des pyromètres et des procédures expérimentales profondément différents. Les résultats, résumés sur la figure 4, sont en accord entre eux. Ils donnent une valeur de $(T - T_{68})$ à 630 °C de $(-0,15 \pm 0,008)$ °C. La courbe est semblable à celle publiée dans la référence [27], avec une information à son extrémité droite sur le début du domaine du thermocouple (*voir ci-dessous*). Suivant Jung [27], on admet que l'écart-type s'élève de façon à peu près proportionnelle à la température, de 3,5 mK à 730 K jusqu'à 7 mK à 900 K, à combiner avec un écart-type de 3 mK associé à la valeur de la température de référence à 730 K.

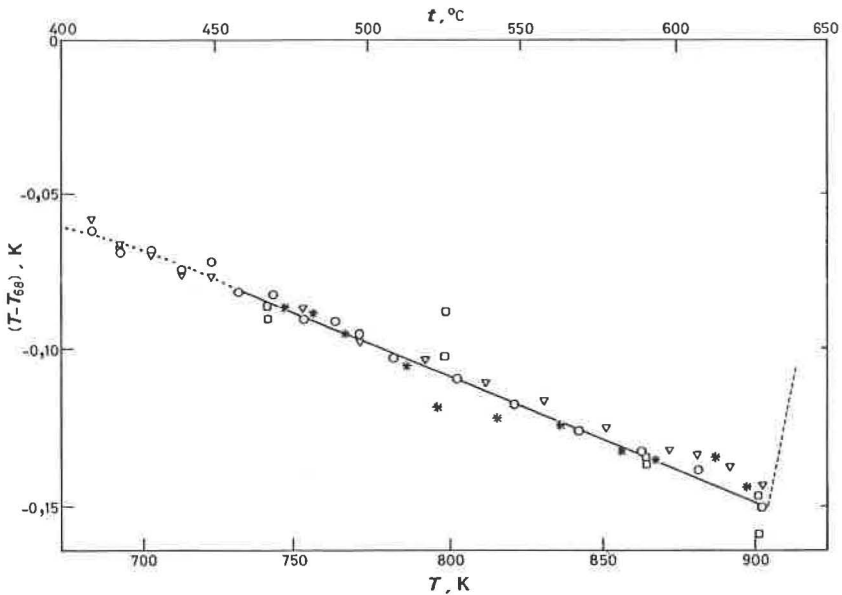


Fig. 4. — Graphe $T - T_{68}$ représentant les résultats de différents auteurs, de 680 K à 900 K :

- , ▽ : Jung [27],
- : Bonhoure et Pello [28], résultats préliminaires,
- * : Coates, Andrews et Chattle [29].

La ligne en pointillé ascendante à droite indique la discontinuité $d(T - T_{68})/dT$ à la jonction des deux domaines d'instruments d'interpolation différents, à 904 K, suivant Bedford *et al.* [39]. La ligne en trait plein représente la fonction $0,2154 \text{ K} - 0,4038 \times 10^{-3} T_{68}$ donnée par Jung [27]; la continuation en pointillé sur la gauche appartient à la courbe obtenue par Guildner et Edsinger [26].

4. Températures au-dessus de 900 K

La pyrométrie à rayonnement spectral aux températures élevées se réfère généralement au point de l'or en utilisant la valeur de l'EIPT-68. Bedford [30] a résumé (et ajusté) plusieurs séries de résultats pour l'important intervalle argent-or. Les cinq mesures considérées sont en bon accord et, si l'on prend pour le point de l'or $1064,43 \text{ }^\circ\text{C}$, donnent pour le point de l'argent $962,05 \text{ }^\circ\text{C}$ et non $961,93 \text{ }^\circ\text{C}$. Jones et Tapping [31], toutefois, ont trouvé peu après une valeur de $(961,98 \pm 0,015) \text{ }^\circ\text{C}$.

Deux études seulement ont donné des valeurs pour les points de l'argent et de l'or, à partir de la température de référence de $630 \text{ }^\circ\text{C}$. Bonhoure [32] a calculé ses valeurs en admettant que l'EIPT-68 était correcte à $630 \text{ }^\circ\text{C}$, tandis qu'Andrews et Gu Chuanxin [33] ont appliqué une correction de $-0,029 \text{ }^\circ\text{C}$ à cette température. Ces deux valeurs

doivent être recalculées sur la base de $T - T_{68} = -0,15\text{ °C}$ à 630 °C , ce qui fournit les résultats suivants :

	Point de congélation de l'argent (°C) (961,93 °C dans l'EIPT-68)	Point de congélation de l'or (°C) (1064,43 °C dans l'EIPT-68)
Bonhoure [32]	961,73 ± 0,13	1 064,05 ± 0,16
Andrews et Gu Chuanxin [33]	961,82 ± 0,10	1 064,17 ± 0,11

Les incertitudes indiquées correspondent à l'écart-type de la moyenne. Ces résultats sont reportés sur la figure 5. Remarquez que les valeurs de Bonhoure donnent un intervalle argent-or marginalement inférieur à celui des autres auteurs (*voir* résumé de Bedford), alors que les valeurs de Andrews et Gu Chuanxin n'ont pas encore été fixées de façon définitive.

D'autres résultats pour les points de l'or et de l'argent sont fournis par la thermométrie à bruit de Crovini et Actis [34] et par la radiométrie absolue de Blevin et Brown [35], *voir* figure 5. Ces résultats sont intéressants (même avec leurs incertitudes relativement élevées) parce que ce sont les seules mesures récentes des températures thermodynamiques dans ce domaine sans utilisation de la pyrométrie à rayonnement spectral et parce qu'ils ne nécessitent pas de point de référence à haute température. Crovini et Actis ont obtenu une valeur pour le point de l'argent de $(962,00 \pm 0,34)\text{ °C}$ et Blevin et Brown une valeur de $(1064,12 \pm 0,40)\text{ °C}$ pour le point de l'or.

L'instrument étalon de l'EIPT-68 de $630,74\text{ °C}$ à $1\ 064,43\text{ °C}$ est le thermocouple Pt/Pt-10 % Rh. Une détermination complète de la différence $(T - T_{68})$ dans ce domaine implique une comparaison directe ou indirecte avec des thermocouples de ce type. Quinn, Chandler et Chattle [36] ainsi que Bonhoure [32] ont utilisé la pyrométrie à rayonnement spectral au-dessous du point de l'or associée à des thermocouples pour étudier les écarts dans l'échelle. Par ailleurs, Bedford et Ma [37] ont obtenu des valeurs pour le point de fusion de l'eutectique cuivre-71,9 % argent avec des thermocouples et un pyromètre à rayonnement, d'où une valeur de $(T - T_{68})$ à la température de 780 °C . Tous ces résultats sont représentés sur la figure 5, ainsi que ceux mentionnés précédemment, les résultats de la pyrométrie à rayonnement étant recalculés pour donner $(T - T_{68}) = -0,15\text{ °C}$ à 630 °C ou, si aucune mesure n'a été faite à cette température (par exemple pour Quinn *et al.*, et pour Bedford et Ma), en admettant que la température du point de l'or est $1\ 064,12\text{ °C}$. Remarquez que ce n'est pas exactement la moyenne des deux valeurs données ci-dessus, d'autres valeurs de l'intervalle argent-or (pour le détail *voir* référence [30]) ayant été prises en compte. Avec la réduction des valeurs des températures au point de l'or et au point de l'argent,

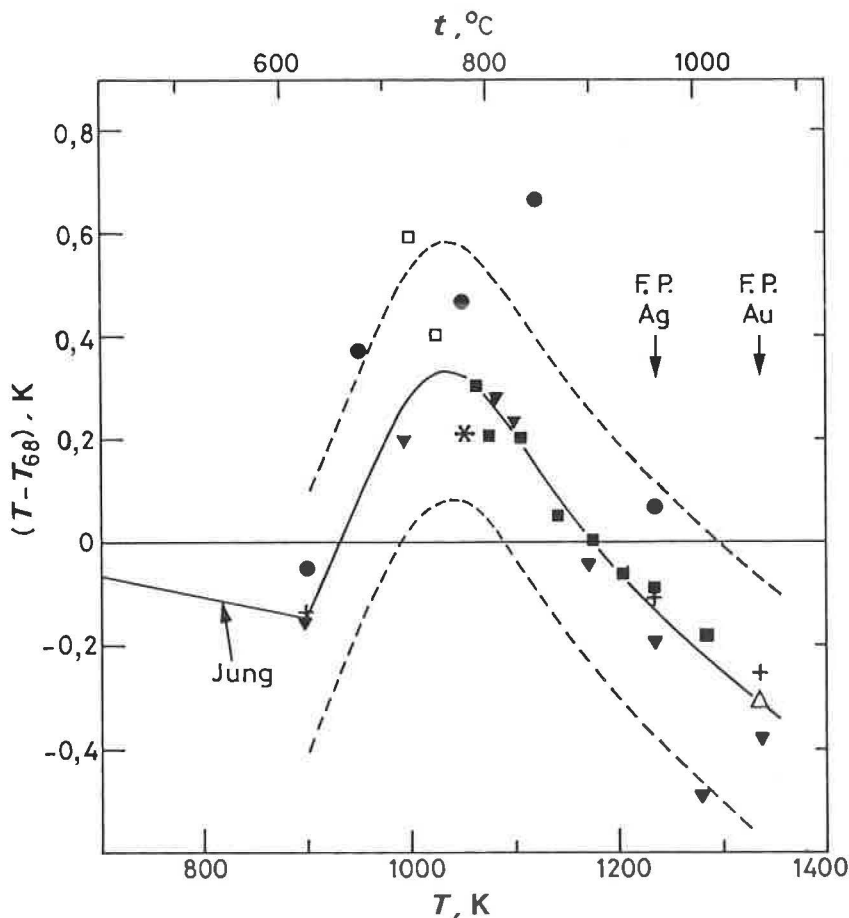


Fig. 5. — Graphe $T - T_{68}$ représentant les résultats de différents auteurs, de 900 K à 1337 K :

▼ Bonhoure [32] et + Andrews et Gu Chuanxin [33], tous deux ramenés à la condition $T - T_{68} = -0,15^{\circ}\text{C}$ à 630°C ; ● Crovini et Actis [34]; △ Blevin et Brown [35]; □, ■ Quinn *et al.* [36], les carrés blancs signalant que les auteurs ont attribué une incertitude plus grande à ces points; * Bedford et Ma [37].

La portion droite de la ligne en trait plein, à gauche du diagramme, est due à Jung [27] (voir Fig. 4); la portion restante (courbe) représente le passage au mieux (arbitraire) à travers les résultats expérimentaux des auteurs. Les lignes en pointillé délimitent une bande d'incertitude de $\pm 0,25$ K (voir le texte).

l'intervalle devient $102,35^{\circ}\text{C}$ au lieu de $102,50^{\circ}\text{C}$ dans l'EIPT-68. Notre ré-évaluation est semblable à celle de Tischler et Jimenez Rebagliati [38].

La figure 5 montre des différences négatives importantes jusqu'à 630°C (comme la figure 4), ainsi qu'au-dessus de 900°C , et de grandes différences positives entre 630 et 900°C . Ces dernières proviennent probablement en partie d'erreurs lorsqu'on assigne des températures aux points de l'argent et de l'or, mais aussi du fait que la formule

d'interpolation quadratique ne représente pas correctement les caractéristiques du thermocouple. La dispersion et l'incertitude des résultats proviennent principalement des limites dans l'étalonnage et l'utilisation des thermocouples pour les mesures de précision. Nous considérons subjectivement que la courbe dessinée en trait plein sur la figure 5 est la meilleure. La bande d'incertitude (lignes en pointillé) s'écarte de cette courbe de $\pm 0,25\text{ }^{\circ}\text{C}$; elle ne résulte pas d'une analyse statistique ni d'une évaluation minutieuse faite à partir de recherches individuelles, mais a principalement pour but d'aider le lecteur à évaluer la dispersion des résultats.

Une autre difficulté de l'EIPT-68 réside dans la discontinuité de la dérivée première, $d(T - T_{68})/dT$, à $630,74\text{ }^{\circ}\text{C}$, lorsque le thermocouple remplace le thermomètre à résistance de platine. La discontinuité relative dT/dT_{68} a été récemment mesurée par Bedford *et al.* [39] comme égale à $0,0051 \pm 0,0010$ (écart-type). Elle est plus élevée que la discontinuité (0,001) évaluée par Evans et Wood [40], mais elle est en accord avec les résultats de la thermométrie à bruit et de la pyrométrie à rayonnement (voir Fig. 5). Ce résultat et la valeur de Jung [27] (-4×10^{-4}) pour la dérivée juste au-dessous de $630,74\text{ }^{\circ}\text{C}$ permettent d'obtenir la valeur $+4,7 \times 10^{-3}$ pour la région immédiatement supérieure (voir Fig. 5).

Pour remédier aux problèmes dans cette région de l'EIPT-68, on a déjà proposé de supprimer le thermocouple comme instrument d'interpolation. On devrait y parvenir en étendant le domaine du thermomètre à résistance de platine à des températures plus élevées de façon à rejoindre le domaine de la pyrométrie à rayonnement au point de congélation de l'argent ou de l'or. Des efforts importants ont été consacrés à la mise au point et à l'évaluation de thermomètres à résistance de platine satisfaisants à haute température. Il est de toute évidence plus utile de mesurer la résistance de ces thermomètres en fonction de la température thermodynamique que d'essayer d'effectuer de meilleures mesures des écarts de l'EIPT-68 par interpolation à partir de thermocouples.

Janvier 1987

Bibliographie

- [1] The International Practical Temperature Scale of 1968 (édition amendée 1975). *Metrologia*, **12**, 1976, pp. 7-17.
- [2] QUINN, T.J., GUILDNER, L.A et THOMAS, W., *Metrologia*, **13**, 1977, pp. 175-176; *ibid.*, 1977, pp. 177-178.
- [3] The 1976 Provisional 0.5 K to 30 K Temperature Scale. *Metrologia*, **15**, 1979, pp. 65-68.

- [4] BERRY, K.H., *Metrologia*, **15**, 1979, pp. 89-115.
- [5] KEMP, R.C., BESLEY, L.M. et KEMP, W.R.G., *Metrologia*, **21**, 1985, pp. 139-146.
- [6] DURIEUX, M., ASTROV, D.N., KEMP, W.R.G. et SWENSON, C.A., *Metrologia*, **15**, 1979, pp. 57-63.
- [6a] PAVESE, F., International Intercomparison of Fixed Points by Means of Sealed Cells (13.81 K to 90.686 K). *BIPM Monographie 84/4*, 1984 ; PAVESE, F. *et al.*, *Metrologia*, **20**, 1984, pp. 127-144.
- [7] RUSBY, R.L., *In* : Temperature Measurement, 1975, London, Institute of Physics, Conference Series N° 26, 1975, pp. 125-130.
- [8] Voir par exemple : QUINN, T.J., Temperature, London, Academic Press, 1983, pp. 187-189 ; PRESTON-THOMAS, H., BLOEMBERGEN, P. et QUINN, T.J., Supplementary Information for the IPTS-68 and the EPT-76. *BIPM Monographie*, 1983, pp. 103-117.
- [9] WARD, S.D. et COMPTON, J.P., *Metrologia*, **15**, 1979, pp. 31-46.
- [10] BRICKWEDDE, F. G., VAN DIJK, H., DURIEUX, M., CLEMENT, J.R. et LOGAN, J.K., *J. Res. Natl. Bur. Stand.*, **64A**, 1960, pp. 1-17.
- [11] ROBERTS, T.R., SHERMAN, R.H. et SYDORIAK, S.G., Les auteurs ont participé diversement à 4 publications : *J. Res. Natl. Bur. Stand.*, **68A**, 1964, pp. 547-558, pp. 559-565, pp. 567-578, pp. 579-588.
- [12] RUSBY, R.L. et SWENSON, C.A., *Metrologia*, **16**, 1980, pp. 73-87.
- [13] FISHER, R.A. et BRODALE, G.E., *Physica*, **109** et **110B**, 1982, pp. 2126-2128.
- [14] DURIEUX, M. et RUSBY, R.L., *Metrologia*, **19**, 1983, pp. 67-72.
- [15] KEMP, R.C., KEMP, W.R.G. et BESLEY, L.M., *Metrologia*, **23**, 1986, pp. 61-86.
- [16] KLEIN, H.-H., KLEMP, G. et STORM, L., *Metrologia*, **15**, 1979, pp. 142-154.
- [17] COLCLOUGH, A.R., *Proc. Roy. Soc. London A*, **365**, 1979, pp. 349-370 ; Temperature, vol. 4, Plumb, H.H. ed., Pittsburgh, Instrum. Soc. of America, 1972, pp. 365-372.
- [18] GUGAN, D. et MICHEL, G.W., *Metrologia*, **16**, 1980, pp. 149-167.
- [19] GUGAN, D., *Metrologia*, **19**, 1984, pp. 147-162.
- [20] STEUR, P.P.M. et DURIEUX, M., *Metrologia*, **23**, 1986, pp. 1-18 ; STEUR, P.P.M. Thèse, Université de Leyde, 1983 (non publiée).
- [21] STEUR, P.P.M., DURIEUX, M. et McCONVILLE, G.T., *Metrologia*, **24**, 1987, pp. 69-77.
- [22] WEBER, F., *BIPM Com. Cons. Thermométrie*, **15**, 1984 (Document CCT/84-6).
- [23] STORM, L., non publié, cité Réf. [5].
- [24] CETAS, T.C., *Metrologia*, **12**, 1976, pp. 27-40.
- [25] QUINN, T.J. et MARTIN, J.E., *Metrologia*, **20**, 1984, pp. 163-164 ; *Phil. Trans. Roy. Soc. London A*, **316**, 1985, pp. 85-189.
- [26] GUILDNER, L.A. et EDSINGER, R.E., *J. Res. Natl. Bur. Stand.*, **80A**, 1976, pp. 703-738.
- [27] JUNG, H.J., *Metrologia*, **20**, 1984, pp. 67-69 ; *ibid.*, **23**, 1986, pp. 19-31.
- [28] BONHOURE, J. et PELLO, R., *BIPM Com. Cons. Thermométrie*, **15**, 1984 (Document CCT/84-21).
- [29] COATES, P.B., ANDREWS, J.W. et CHATTLE, M.V., *Metrologia*, **21**, 1985, pp. 31-35.
- [30] BEDFORD, R.E., *Metrologia*, **18**, 1982, pp. 169-170.
- [31] JONES, T.P. et TAPPING, J. *In* : Temperature, vol. 5, Schooley, J.F. ed., New York, American Institute of Physics, 1982, pp. 169-174.

- [32] BONHOURS, J., *Metrologia*, **11**, 1975, pp. 141-150.
- [33] ANDREWS, J.W. et GU CHUANXIN. *BIPM Com. Cons. Thermométrie*, **15**, 1984 (Document CCT/84-39).
- [34] CROVINI, L. et ACTIS, A. *Metrologia*, **14**, 1978, pp. 69-78.
- [35] BLEVIN, W.R. et BROWN, W.J., *Metrologia*, **7**, 1971, pp. 15-29.
- [36] QUINN, T.J., CHANDLER, T.R.D. et CHATTLE, M.V., *Metrologia*, **9**, 1973, pp. 44-46 ; QUINN, T.J., *Metrologia*, **10**, 1974, p. 115.
- [37] BEDFORD, R.E. et MA, C.K., *In* : Temperature, vol. 5, Schooley, J.F. ed., New York, American Institute of Physics, 1982, pp. 361-369.
- [38] TISCHLER, M. et JIMENEZ REBAGLIATI, M., *Metrologia*, **21**, 1985, pp. 93-96.
- [39] BEDFORD, R.E., MA, C.K. et MACREADY, W., *In* : Temperature Measurement, Da Jie ed., Beijing, China Acad. Publishers, 1986, pp. 110-115 ; BEDFORD, R.E., MA, C.K., MACREADY, W. et STESKI, D., *Metrologia*, **23**, 1986/87, pp. 197-205.
- [40] EVANS, J.P. et WOOD, S.D., *Metrologia*, **7**, 1971, pp. 108-130.
-

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 m²) 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 resolutions 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.

* As of 31 December 1987 forty-seven 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, Israel, 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.

Some forty physicists or technicians are working in the BIPM 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 15 692 500 gold francs, approximately 28 475 000 French francs (in 1987).

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 units. In order to ensure world-wide 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 γ rays, electrons); Section II (Measurement of radionuclides); Section III (Neutron measurements); Section IV (α -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).

The *Bureau International* also publishes monographs on special metrological subjects and, under the title « *Le Système International d'Unités (SI)* », a booklet, periodically up-dated, in which all the decisions and recommendations concerning units are collected.

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 16th Meeting

1. Opening of the meeting. Designation of a rapporteur.
2. Approval of the minutes of the 15th meeting of the CCT (1984).
3. Documents submitted to the 16th meeting of the CCT : classification into items of the agenda.
4. Replacement of the IPTS-68 :
 1. Climate for acceptance of a new scale.
 2. Timetable for preparation of a new scale (general).
5. Working Groups :
 1. WG1 :
 1. Preliminary remarks on draft ITS.
 2. Second edition of « Supplementary Information for the IPTS-68 and the EPT-76 » (Supplementary Information for the ITS-90).
 2. WG2 : Draft of monograph « Techniques for Approximating the IPTS-68 and the EPT-76 ».
 3. WG3 : Proposals for platinum resistance thermometer reference function, interpolation procedures and ranges.
 4. WG4 :
 1. Differences $T - T_{68}$ and $T - T_{76}$.
 2. Specifications for interpolating gas thermometer.
6. Replacement of the IPTS-68 (continued) :
 1. Present status of the high-temperature platinum resistance thermometer.
 2. Possible extension of the ITS-90 below 1 K.
 3. Miscellaneous problems.
 4. Actions required.
7. Announcement to users of forthcoming changes in the IPTS.
8. Discussion of CIPM Resolution draft to the CGPM.

9. Working Groups : Future work and membership.
10. Replacement of the IPTS-68 (continued) : timetable for preparation of a new scale (detailed).
11. CIPM decision of 1985 on thermometry work at BIPM.
12. Publication of documents.
13. Miscellaneous subjects.
14. Next meeting of the CCT.

REPORT
OF THE
COMITÉ CONSULTATIF DE THERMOMÉTRIE
(16th Meeting - 1987)
TO THE
COMITÉ INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES

by M. DURIEUX, rapporteur

The 16th Meeting of the CCT took place at the Pavillon de Breteuil on the 9th, 10th and 11th of June 1987.

Present :

H. PRESTON-THOMAS, member of the 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 (T. P.
JONES, R. C. KEMP, J. J. CONNOLLY).

Institut de métrologie D. I. Mendéléev [VNIIM], Leningrad
(A. POKHODOUN).

Institut national de métrologie [INM], Paris (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], Washington (R. J. SOULEN,
Jr.).

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 (H. SAKURAI).
Physikalisch-Technische Bundesanstalt [PTB], Braunschweig (W. BLANKE, H.-J. JUNG).
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 (present the first half-session) ; T. J. QUINN, Deputy Director ; J. BONHOURE, R. P. HUDSON and G. GIRARD, Assistants to the director of the BIPM ; A. SATRAPINSKY (interpreter).

Absent : Institut des mesures physico-techniques et radiotechniques [VNIIFTRI], Moscou ; F. G. BRICKWEDDE (Pennsylvania), member by appointment.

The meeting commenced with the reports of the chairmen of the Working Groups :

- WG1 — Introduced a draft of a replacement temperature scale (here called ITS-90).
- WG2 — Introduced a draft of the monograph « Techniques for Approximating the IPTS-68 and the EPT-76 ». Comments from CCT members on this draft should reach WG2 chairman (R. E. Bedford) by September 1987.
- WG3 — Summarized recent developments concerning high-temperature platinum resistance thermometers (HTPRTs). These included : a workshop in October 1985 ; the confirmation of Ni migration through SiO₂ sheaths ; the unsuitability of Cu/Ag eutectic, or heat-pipe vapour pressure, as a defining fixed point near 800 °C ; recent improvements in HTPRT performance ; various interpolation schemes under study ; the general agreement that the range limit should be the Ag rather than the Au fixed point.
- WG4 — Suggested that a paper summarizing current knowledge of ($T - T_{68}$), originally intended for publication in *Metrologia*, should instead be treated as a private (and correctable) communication to members of this CCT meeting. Recommen-

ded : use of a gas thermometer as defining instrument of ITS-90 from 4 K (not 3 K) to ~ 24 K ; that He v.p. scales be used over the widest possible range, but those for ^4He not below the λ -point ; that the lower limit of ITS-90 be decided later.

There followed an extensive discussion, arising largely out of the WG1 report in conjunction with the resolution proposed by the CIPM to the 18th CGPM, as to whether the CCT is really in a position to formalize the ITS-90 by 1989 for promulgation in 1990. It was pointed out that important experiments bearing on the ITS-90 and its relationship to thermodynamic temperature are in progress in a number of laboratories, and that the results of these experiments will not be available by 1989. In consequence, numerical errors in ITS-90 are likely to be significantly larger than would be those for a scale of later date ; moreover, the possibility exists of laboratories' curtailing resources for these experiments if it is known that the ITS-90 is to be promulgated before the experiments can be completed. On the other hand, a similar state of affairs can be said to exist at almost any time. Most of the members agreed that, in view of the steadily increasing reluctance (although the existence of such an increase is arguable) to make numerical changes in measurement systems, and the current opportunity to merge the ITS-90 disruption with the proposed simultaneous change in electrical units, it is important to put forward the ITS-90 and that it will undoubtedly be far superior to the IPTS-68. Future, non-numerical amendments are always possible with little difficulty. It was agreed to proceed with the majority view, and attempt to meet the 1990 schedule with the realization that withdrawal in 1989 is possible, although undesirable.

Several aspects of the HTPRT as a defining instrument of the ITS-90 were considered. Possible interpolation equations, referred to specific documents, were discussed. The most suitable form is likely to be a reference function together with several deviation functions. There have been recent improvements in HTPRT performance, but some disturbing shortcomings are still in evidence. It appears that the Chinese HTPRTs are stable to within about ± 5 mK to as high as $1\,064$ °C, at least for short terms. Experience with Japanese HTPRTs suggests a close correlation between high α coefficient and good high-temperature stability. The problems associated with electrical leakage in HTPRT insulating components and its dependence upon measuring-system frequency were noted as demanding attention. With the improved HTPRT performance,

there is some evidence that high-temperature freezing points are less reproducible than was previously supposed. Some interlaboratory comparisons at the Ag and Al points may be arranged. The lack of commercially-manufactured HTPRTs caused some concern.

The question of having a lower limit for the ITS-90 below 1 K was discussed briefly. Possible techniques include ^3He melting curve thermometry, superconductive transition points, ^3He gas thermometry. At present it seems advisable to keep the lower limit of the ITS-90 initially moderately high (say 1 K); a later downward extension is always a possible and relatively simple procedure. A retraction of an ill-considered initial definition is both difficult and embarrassing.

Some other peripheral topics were raised. Measurements of various secondary fixed points (notably Ga, In, Cd, Sb) with groups of large numbers of PRTs have given plausible numerical values for IPTS-68 uniqueness in the temperature range 0°C and 650°C . The importance of the newly-developed Au/Pt thermocouple as a highly precise (about ± 10 mK) temperature sensor up to $1\,000^\circ\text{C}$ was acknowledged. This thermocouple is likely to be used as a transfer standard in connection with the ITS-90 and may even be a rival to the HTPRT as a defining instrument above 600°C . While less precise than the HTPRT, it is considerably simpler and much cheaper. The Pd/Pt thermocouple appears to be similarly important above $1\,000^\circ\text{C}$. The desirability of having a highly-precise, alternative definition of the ITS-90 from about -40°C to $+40^\circ\text{C}$ was emphasized. Irreproducibility of the O_2 triple point observed amongst laboratories has been confirmed as being due to argon contamination. Previous problems of HD contamination of D_2 appear to have been largely resolved, allowing us to consider using the D_2 triple point as a defining point of the ITS-90.

The draft text of the ITS-90 was considered in detail: several points were raised concerning the text itself, details of the definitions, and the time that will be required to fill in the blanks and to resolve outstanding issues. The questions of detail included: ensuring thermodynamic smoothness; the choice between 3,2 K and 4,2 K for the lower limit of the gas thermometer; the choice of fixed points; the question of overlapping ranges in the definitions; methods of interpolation; the

undesirability of mandatory calibration points well outside a thermometer's usual range of use. Most of these matters were left with WG3 to resolve, whereafter it would submit its proposals to the CCT for its consideration.

In the morning of June 11 the working groups met, both separately and in various combinations, to consider several of the questions raised up to that time.

The terms of reference for, tasks of, and composition of the WGs were discussed in detail with the following result :

WG1 — Preparation of text of ITS-90 and revision of the monograph « Supplementary Information for the ITS-90 ».

H. Preston-Thomas (Chairman)

P. Bloembergen

T. J. Quinn

WG2 — Completion of monograph « Techniques for Approximating the ITS ».

R. E. Bedford (Chairman)

G. Bonnier

H. Maas

F. Pavese

WG3 — Resolution of the definition of the PRT range of the ITS-90.

L. Crovini (Chairman)

H.-J. Jung

R. C. Kemp

Ling Shankang

H. Sakurai

J. F. Schooley

WG4 — Preparation of best values for $(T - T_{68})$ and provision thereof to WG3, and resolution of the definition of the gas thermometer range of the ITS-90. (These tasks were to be handled by two sub-groups of this working group.)

R. P. Hudson (Chairman)

M. Durieux

R. L. Rusby

R. J. Soulen

P. P. M. Steur

C. A. Swenson

The texts of two Recommendations to the CIPM, T1 and T2 were intensively scrutinized : T1 emphasises the need for continuing work on

fundamental thermometry; T2 refers to the importance of the further development of simple and economical methods of temperature measurement.

The text of a declaration (1987/1) concerns the stultifying effect of the recent widespread decrease in support of thermometric research in national laboratories.

The recent decision of the CIPM to transfer resources at the BIPM from thermometry to radiometry, essentially curtailing research and services in thermometry, was noted and regretted.

There are difficulties in the art of precision temperature measurement that, although in principle resolvable, are as yet far from being resolved.

During the last few years, five of the major national standards laboratories, and also the Bureau International des Poids et Mesures, have significantly reduced the amount of their research on thermometric standards. This fortuitous concurrence has severely impeded the introduction of a new temperature scale, and reduced the degree of confidence in its numerical accuracy. Its effect in the future will be to slow down the extremely important continuous acquisition of more accurate thermodynamic values on the International Temperature Scale of 1990 [ITS-90] (i.e., the determination of its errors), and also to slow down the process of refining, supporting and exploiting the potentialities of the ITS-90.

In the light of the above factors, the Comité Consultatif de Thermométrie wishes to apprise the Comité International des Poids et Mesures of the great importance it attaches to the avoidance of any further net reduction in the world's precision thermometric research, and to the desirability of reversing the recent, adventitious decline if and when such a reversal becomes feasible.

A rough timetable for the preparation of the ITS-90 was established : ITS-90 to be completed by September 1989 ; in effect, it should be complete by autumn 1988 to allow adequate time for study and testing by CCT members. Table of $(T - T_{68})$ to be ready by January 1, 1989. WGs to give progress reports by March 1988. Monograph being prepared by WG2 to be ready for publication in late 1988, suitably revised to be pertinent to ITS-90.

It was agreed that the documents to be published in the report of the 16th CCT meeting would be confined to the WG reports, recalling that the WG4 summary report was supplemented by a report on the differences $T - T_{68}$, that the WG3 report was submitted in two parts and that the WG2 published report will be a brief statement with reference to the monograph under preparation.

It was agreed that the CCT should next meet in September 1989. The merits of a prior meeting in 1988 were debated ; a vote on the

matter gave only a small minority supporting the idea of a 1988 meeting. It is clear, however, that a number of working-group meetings, and very many working-group consultations, will be necessary between now and September 1989.

A few miscellaneous items were briefly discussed: should ITS-90 define W as $R/R(0\text{ }^{\circ}\text{C})$ or $R/R(0,01\text{ }^{\circ}\text{C})$? Should α be derived from $W(\text{Ga})$? Should comparisons be carried out of sealed cells of silver, and also of aluminium? How will the problem of leakage errors in HTPRTs be resolved now that the NRC program has been curtailed? ASMW asked for and received CCT endorsement for an intercomparison of superconductive fixed points.

9 July 1987

**Recommendations
of the Comité Consultatif de Thermométrie
submitted
to the Comité International des Poids et Mesures**

The necessity for continuing work on fundamental thermometry

RECOMMENDATION T 1 (1987)

The Comité Consultatif de Thermométrie,

while acknowledging that the value T_{90} of the temperature measured on the International Temperature Scale of 1990 (ITS-90) will be as close to the thermodynamic temperature T as present knowledge allows,

recognizes

— that the adoption of ITS-90 will by no means signify that our knowledge of the numerical values of thermodynamic temperature is complete,

— that the generation of such fundamental knowledge by the direct determination of thermodynamic temperature is a difficult, complex and lengthy task,

— that it is necessary to anticipate future requirements for increased accuracy and precision, and therefore

proposes to keep under continuous review the agreement between T_{90} and T as knowledge advances, and

emphazises the importance of the continuation within the national laboratories of work directed towards the determination of thermodynamic temperature by the development and exploitation of novel and more accurate methods over the whole range of ITS-90 and also towards temperatures as low as a few millikelvins.

Simplified and economical methods of temperature measurement

RECOMMENDATION T 2 (1987)

The Comité Consultatif de Thermométrie,

while recognizing that its primary task is the improvement and periodic updating of the international temperature scale, has in recent years become concerned to meet the requirements of those scientists, engineers and other users whose interest is in good, rather than the very highest level of, temperature measurement, and

has taken note of recent work on gold/platinum and palladium/platinum thermocouples which has indicated that they can have significant advantages, for many applications, over the widely used platinum-rhodium/platinum thermocouples.

The Comité Consultatif de Thermométrie therefore

encourages national laboratories to pursue their investigations on simplified and economical methods of temperature measurement, and in particular on these novel thermocouple combinations to determine their emf/temperature relations and those practical details of construction and operation that will allow their potential advantages to be exploited to the full.

Minutes of the 16th Meeting of the CCT

1. Opening of the Meeting. Designation of a rapporteur

The President calls the meeting to order, welcoming all members and delegates — in particular Mr. Kemp and Mr. Connolly (CSIRO), Mr. Sakurai (NRLM), Mr. Pokhodoun (VNIIM) and his interpreter (Mr. Satrapinsky), and Mr. Jung (PTB, Berlin) who are attending for the first time.

Mr. Durieux is appointed as rapporteur. English is chosen as the working language. Draft 2 of the (original) agenda is approved.

2. Approval of the Minutes of the 15th Meeting of the CCT (1984)

The minutes of the 15th Meeting are approved.

3. Documents submitted to the 16th Meeting of the CCT : Classification into items of the Agenda

Because there are more than sixty documents, many of which have just now been submitted, it is not practicable to classify them immediately into the various agenda items. It will be less time-consuming to sort them and discuss them as the meeting proceeds.

4. Replacement of the IPTS-68

4.1. Climate for acceptance of a new scale

The President begins by summarizing the current situation. He outlines the reasons why this 16th Meeting of the CCT is unusually important. The CCT has before it the possibility of setting a timetable

for the introduction of a revised International Temperature Scale (ITS). The President draws a parallel in this regard to various other meetings in the past. He says that for a new scale to go forward, there must be near unanimity within the CCT since the CIPM, to whom the CCT reports, is likely to judge a scale change premature if the opinions within the CCT are discordant. If the CCT unanimously advises a scale change, the CIPM members will then have to judge if it is in accord with the best interest of the *Système International* and with various national interests. Thus a scale change requires also prospective acceptance in the world at large, especially by industry.

The President reminds the CCT of a proposal currently pending to the effect that the maintained values of the ohm and the volt be revised in January 1, 1990, the numerical details of which will be put forward on January 1, 1989. This revision in electrical units is likely to be accepted, but with some opposition. Although such revision will bring the maintained units closer to their true SI values, many commercial users are more interested in continuity than in fundamental accuracy. Were it not for there being three values worldwide of, for example, the maintained volt, there could have been extensive opposition to the proposal. In the President's view, had the change been proposed several years earlier, opposition would have been much less because, at the level of measurement accuracy then found in industry, the change (of about 1 in 10^5) would have been unnoticeable. That is now not the case. The President likens this situation with the electrical units to that occurring in thermometry. The proposed change in the ITS will be noticeable and so cause inconvenience to (chiefly) industrial users. It is reported, for example, that in some special instances where consistency is paramount the IPTS-48 is still used in preference to the IPTS-68. Scientists will probably accept a change. Thus the CCT faces a dilemma : it can urge a scale change now even though it may be slightly unsatisfactory with regard to thermodynamic accuracy ; or it can wait until a better scale is devised with the likelihood of more extreme opposition from prospective users, and hence also from the CIPM. We must balance perfection against urgency.

4.2. Timetable for preparation of a new scale (general)

In the President's view, if a new temperature scale is generated, it will be more readily accepted if the change is coincident with the change in the electrical units than if it occurs, say, two years later,

producing an additional measurement disruption. If a scale is generated for promulgation in 1990, the CCT would have to meet in 1989 to endorse it. Failing such endorsement, the proposal for a new scale would be withdrawn. Thus we can, in a sense, propose a scale now and withdraw it, though with difficulty, as late as the summer of 1989. If a new scale does go forward, the subsequent tasks of the CCT are likely to be three: *a*) to modify the text as imperfections are uncovered or if, for example, interpolation formulae must be changed; *b*) to revise and keep up to date any supporting documents, such as the Supplementary Information for the ITS or Techniques for Approximating the ITS; *c*) to monitor and record continually all departures of the ITS from thermodynamic temperature. This last is a highly important task that can only be done as a result of research in the national laboratories or the BIPM, and should be the subject of a strong recommendation to the CIPM.

There are no specific comments from members on the President's remarks.

5. Working Groups

5.1. Working Group 1

5.1.1. Preliminary remarks on draft ITS

The President, as Chairman of WG 1, says that a preliminary draft of the ITS-90 that resulted from several meetings of WG 1 was circulated to members earlier (Document 22) with a request for comments and suggestions. Those received, especially some extremely useful ones from Mr. Rusby (Document 33), were incorporated in a second draft, together with a note that some Australian interpolation proposals concerning high-temperature platinum resistance thermometers (HTPRTs) (Document 46) could likely be included. This second draft was distributed to the meeting (Document 22 A) *. WG 1 is, or has been, preparing other documents. One of them is a recommendation to go from the CIPM to the 18th meeting of the CGPM (1987) to the effect that a new ITS should be introduced in 1990. Such recommendations have to go to the member countries of the Convention du Mètre six months

(*) See Section 6.4.

before the conference, so the CCT has not had a chance to see it. Once submitted, the recommendation cannot be changed but it can be withdrawn. This text, also, was distributed to the meeting (Document 54). To a question from Mr. Rusby if the recommendation being referred to is Document 23, the President replies «no», that it is similar in form to the proposal for a change in the electrical units and proposes implementation of a new ITS on January 1, 1990 with the appropriate details being available a year earlier. Mr. Quinn says, for clarification, that the item in question is a recommendation adopted by the CIPM in 1986 and formally submitted to the CGPM. Mr. Rusby asks what, then, is the status and purpose of Document 23 entitled «Replacement of the International Practical Temperature Scale of 1968». Is it solely for discussion at this CCT meeting? The President replies that if the CCT proposes a change in the temperature scale a justification must be presented to the nations adhering to the Convention du Mètre. The justification will emanate in practice, though not in principle, from the CCT, and Document 23 was simply a draft to serve as a starting point.

5.1.2. Second edition of «Supplementary Information for the IPTS-68 and the EPT-76» (Supplementary Information for the ITS-90)

The President concludes the WG 1 report by remarking that a minimal amount of work (including some preliminary drafting and rewording) was done on revising «Supplementary Information for the IPTS-68 and the EPT-76» because any changes therein will either have to be adapted to the forthcoming ITS-90 or rewritten to be still applicable to the IPTS-68. If the ITS-90 is introduced, some sections will disappear and some new ones must be generated, notably regarding HTPRTs and gas thermometers. In the event of an ITS-90, the revision *must* be ready by 1990; otherwise there is less urgency but it will likely be ready by about 1990 in any event.

5.2. Working Group 2: Draft of monograph «Techniques for Approximating the IPTS-68 and the EPT-76»

The Chairman, Mr. Bedford, reminds the CCT that the task of WG 2 is to prepare a document describing ways in which the IPTS-68 and the EPT-76 can be approximated at modest levels of accuracy. The lengthy current draft (Version D) forming the basis of the WG 2 report has been submitted as Document 21. The draft which the CCT saw in

1984 has been revised three times: late in 1984 (Version B), and following meetings of WG 2 in Turin in 1985 (Version C) and in Berlin in 1986 (Version D). WG 2 feels that the document is now approaching publishable form. There are still some obvious but easily-remedied deficiencies, mostly missing sections, figures, and references. Some extensive textual revision was suggested during a meeting of WG 2 at the BIPM, June 8, 1987. WG 2 now asks the CCT members for written comments and criticism which can be considered for inclusion. WG 2 expects that a publishable version should be ready late in 1988 and asks whether it should be then published (as a BIPM monograph) or should await the possible appearance of the ITS-90. In the latter case, some obvious but not extensive textual changes regarding scale designations will be necessary. To some questions of detail Mr. Bedford replies that he will look forward to the comments from NPL, that the deadline for comments will be September 1987, and that WG 2 is aware of the possible overlap of, and exchange of material between, the Supplementary Information and this document. To questions of Mr. Quinn and Mr. Giacomo as to whether the text can even now be phrased so as to anticipate the ITS-90, Mr. Bedford replies «yes it can, and relatively easily». The consensus is then that the document should be so-phrased and published as soon as it is ready, and not wait for the possible promulgation of an ITS-90.

5.3. Working Group 3: Proposals for platinum resistance thermometer reference function, interpolation procedures and ranges

The Chairman, Mr. Crovini, summarizes the work of WG 3 since 1984. WG 3 organized, with the cooperation of NBS, a Workshop in Gaithersburg in 1985 to collect and collate as much information as possible on HTPRTs. Subsequently a report (*see* Appendix T4, p. T 118) was issued. On the same occasion WG 3 met with WG 4 to discuss the lowest temperature range of the PRT and its merging with the range of the interpolating gas thermometer. At that time WG 3 recognized that the gas thermometer was perfectly acceptable to 24,5 K, but also felt that the PRT was sufficiently accurate down to 13,8 K and favoured

its retention in an alternative definition. Returning to the subject of HTPRTs, Mr. Crovini says there has been considerable progress since 1985. The currently preferred interpolation scheme over the whole range of the PRT is described in an addendum to the WG 3 report (see Appendix T5, p. T 126). NRLM has introduced a new type of thermometer and also suggests that HTPRT stability is best when $\alpha > 3,927 \times 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. At IMGCC the migration of Cr, Ni, or Cu through silica, with subsequent possible contamination of the sensor, has been confirmed. Consequently, HTPRTs should not be used in close contact with these metals above 600 °C. It also seems necessary to assess high-temperature fixed points. There is no sufficiently reproducible point between the Al and Ag freezing points because the Cu-Ag eutectic is not reproducible to better than ± 10 mK, and gas-controlled Na heat pipes do not reproduce sufficiently well from one device to another. In addition, further study of the Al and Ag points is desirable because of recent indications of discrepancies. An intercomparison of Ag freezing points using transportable cells is under way between NBS and IMGCC.

Regarding interpolation schemes, Mr. Crovini described several, based upon a reference function and various deviation functions, that are being considered up to the Ga triple point. Above 0 °C either a similar technique or a polynomial approximation can be used — the latter could include a parametric scheme involving a parameter such as t' that can be transformed to t through a thermometer-independent function. WG 3 recommends the reference function scheme which has the advantages that: a) the range from 0 °C to 962 °C can be broken to accommodate calibration needs in various sub-ranges, which is very important because no PRT should be heated to a temperature much above its range of use; b) it can supply an acceptably small non-uniqueness; c) it can allow continuity, even in the first and second derivatives. Two proposals of this type, differing in detail, are described in Documents 46 and 53 and will be studied later. Although the reference-function scheme provides the best flexibility, a possible weakness occurs at high temperatures. The scheme implicitly assumes that the

reference function approximates the reduced resistance of a typical PRT. With HTPRTs there are three causes of imperfection : electrical leakage, instability at high temperature, and immersion (thermal conductance) errors. As a result of future improvements in construction, a reference function chosen today might not be properly representative later, possibly leading to, for example, non-uniqueness. Such an event could be accommodated, however, by revising the reference function in a minor scale amendment.

Mr. Bloembergen alludes to Document 8, which considers cubic-spline interpolation functions, and asks what is the current opinion of WG 3 regarding the upper temperature limit of the PRT range. Mr. Crovini replies that, whereas at the time of the 1985 Workshop it was not clear whether the Ag or Au freezing point would be preferable, WG 3 now accepts the Ag point as the better limit. The resistance drift of HTPRTs is very much smaller at the Ag point than at the Au point and, moreover, the use of the Ag point as the upper limit of the PRT range means that continuity with the radiation range can be more easily obtained.

5.4. Working Group 4

5.4.1. Differences $T - T_{68}$ and $T - T_{76}$

The Chairman, Mr. Hudson, says that originally the task of WG 4 was to update a 1977 paper on the differences $T - T_{68}$ and, with CCT approval, to publish it in *Metrologia*. WG 4 now feels, however, that with new results likely to appear soon, the paper (Document 9) might better be considered a source document for publication after a new scale is formulated. WG 4 recommends that Document 9 be included in the report of this 16th meeting of the CCT (*see* Appendix T7, p. T 134). Mr. Hudson thanks Mr. Bedford and Mr. Kemp for their contributions.

5.4.2. Specifications for interpolating gas thermometer

Mr. Hudson says that specifications for an interpolating gas thermometer have been considered in previous reports of WG 4 and again in the present report (*see* Appendix T6, p. T 132). An updated review was supplied to WG 1 earlier. As a result of a meeting on

June 8, 1987 WG 4 now recommends a low temperature limit for the gas thermometer of 4,2 K and not 3,2 K. There is no clear advantage for the lower limit, which entails the disadvantage that corrections become increasingly important from 4,2 K to 3,2 K. Furthermore, the gas thermometer is not the simplest of instruments and its use should be avoided where an alternative of high quality and practicality is available. WG 4 recommends that the helium vapour pressures, which offer precision and reproducibility within 0,1 mK, be used below 4,2 K, but with the restriction that only ^3He be used below T_λ because of practical difficulties that arise with ^4He in that range. To a question of Mr. Pavese as to the recommended lower limit for the new scale, Mr. Hudson replies that this was discussed and, until reasons for another preference are advanced, 0,5 K is a satisfactory compromise. Mr. Pavese asks if the ^3He vapour pressure is accurate within 0,1 mK below 1 K, and Mr. Rusby gives his opinion that vapour-pressure measurements are not accurate to better than 1 mK at 0,5 K although the equation can be valid down to 0,2 K. To Mr. Pavese's question if multiple definitions are to be excluded below 24 K, Mr. Hudson replies that WG 4 would accept alternative forms only if they are equivalent, i.e. equally good.

6. Replacement of the IPTS-68 (continued)

Mr. Quinn opens the discussion with some general comments on the proper time for replacement of the IPTS-68, the pressures upon the CCT, and the technical aspects for introducing a new temperature scale. He reviews at some length the enormous progress made in almost all aspects of temperature standards since 1968, concluding that in his opinion there is certainly enough information available now, or there will be within two years, to produce a new scale that, although not perfect, will be vastly superior to the present IPTS-68 and EPT-76. While the technical questions are the most important for the CCT, we must weigh the disadvantage of a not-quite-perfect scale against the advantage of introducing it now when the timing is suitable with priorities in national standards laboratories changing and with electrical standards about to be changed. If the scale is not changed now, its change may be extremely difficult later.

The President, in asking for comments, reiterates that if the CCT decides to proceed with the attempt to formulate a new scale for 1990, and if insuperable difficulties arise, the attempt can always be abandoned at any time before 1990. Centering his remark around Document 54 (Draft Resolution from the CIPM to the CGPM), Mr. Rusby understands it is a proposal which the CCT must either accept or withdraw. He sees no reason for linking a change in temperature standards to the forthcoming one in electrical standards and, furthermore, has grave doubts as to there being sufficient time to produce the scale by, essentially, early 1989. When the CCT meets in 1989 it will be faced with almost a *fait accompli*. Mr. Rusby would have preferred a proposal that allowed more manoeuvrability. The President points out that the resolution (Document 54) has already gone forward ; its wording cannot therefore be changed, but it could be withdrawn. In any case the CCT is committed, not to producing a new scale for 1990, but to attempting to produce one. Also, some of the precise details (values of $T - T_{68}$, PRT reference function) need not be ready by January 1989 ; minor changes could be made until January 1990, and withdrawal of the scale is always possible although undesirable. Mr. Quinn points out that without such a resolution there would have been no possibility at all for a new scale in 1990.

Several members express concern about the apparently short time in which to formulate the scale. Experiments are in progress in many laboratories, the results of which may not be available before 1989. What is the deadline for submitting new information ? There is a real possibility that financial support for work in progress may be withdrawn if it cannot be concluded before the introduction of the new scale. Mr. Jung, for example, will begin in 1988 measurements of $T - T_{68}$ from 660 °C to 960 °C. He may have some results by 1989, but they would certainly not have been formally published by then. Could they be used ? The President and Mr. Quinn think « probably », given the excellent reputation of the PTB, unless they are substantially at variance with already existing values. Mr. Hudson, on the other hand, thinks the time frame is such that there would be absolutely no chance of using them.

Mr. Jones says that CSIRO supports the proposal to attempt to submit a new scale for 1990, especially in view of the withdrawal option. Otherwise there is unlikely to be a new scale for several years thereafter.

Mr. Crovini disapproves of the sentence in Document 54 that says, in effect, that values of $T - T_{90}$ would « for many years in the future, be negligible ». He says this is a very strong statement that presently

available data do not support. Furthermore, it might be taken to mean that in the future measurements of thermodynamic temperature are no longer required, which is absurd. Mr. Quinn replies that «negligible» is meant for industrial users, not metrologists. The President says the wording cannot now be changed but that, regarding the need for future measurements of T , he will strongly suggest to the CIPM in his report that they be continued. Indeed, this is the subject of a recommendation to the CIPM (*see* p. T 87).

There follows additional discussion, involving many members, on the proposed timetable: interpolation formulae for PRTs and the gas thermometer have still to be devised; differences $T - T_{68}$ have to be evaluated; a reference function for the PRT must be formulated; Mr. Jung is considering an HTPRT with different shielding which may produce new and different results. All of this will require considerable time.

In spite of all these difficulties that are foreseen, it appears that there is general agreement to press on with the attempt to formulate a new ITS for 1990.

6.1. Present status of the high-temperature platinum resistance thermometer

Mr. Jones opens the discussion by drawing attention first to Document 15 which describes thermodynamic measurements of the Au, Ag, and CuAg-eutectic points relative to Al, the results agreeing well with previous determinations, and secondly to Document 46 that describes a HTPRT interpolation scheme fitted to data from comparisons between HTPRTs and optical pyrometers.

Mr. Crovini says the interpolation proposed in Document 53 offers several advantages over those in Document 46. It also uses a reference function and deviation functions, but the latter are expressed as functions of W rather than t , and in such a way as to both allow for sub-ranges from 0 °C to each of several higher temperatures and to provide continuity in first and second derivatives up to the Al point. Furthermore, by having the Ga point common to the calibration equations above and below 0 °C, continuity in these derivatives is also obtained at 0 °C without extreme mathematical forcing. Mr. Crovini goes on to describe many of the technical details in Document 53, saying that with more analysis the scheme can be further improved.

Mr. Ling describes recent experience with the Chinese-constructed HTPRTs (Document 57). They appear to be reliable up to the Ag point

within 5 mK after more than 200 cycles between 0 °C and 962 °C. Larger irreproducibility (10-20 mK) may be associated with the fixed points themselves. Differences between ac and dc measurements are negligible below 660 °C but can be as large as 20 mK at higher temperature, depending upon the frequency (maximum used : 75 Hz). The dc results are the correct ones.

Mr. Bedford summarizes Mr. Berry's findings at NRC (Document 45), especially those pertaining to insulation leakage problems which are now supported by the Chinese results. Leakage errors can be extreme if not eliminated or properly accounted for, and they are especially troublesome in thermometers with guards. Some information not contained in the document is that Mr. Berry warns that in comparing ac and dc results one must wait a considerable time between measurements to properly assess the differences. It takes a long time for the thermometer to recover between grounded and ungrounded states, so moderately fast switching back and forth will give erroneous results.

Mr. Sakurai, drawing on Document 11, says that experience with Japanese-constructed HTPRTs shows that very good long-term stability at the Au point is obtained only if $\alpha > 3,927 \times 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. On the other hand, if the upper limit is to be the Ag point, thermometers with $\alpha < 3,927 \times 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ can be satisfactorily stable. Moving on to Document 34, Mr. Sakurai says there appear to be difficulties in realizing stable Ag and Al points, perhaps related to oxidation. Ag cells are being compared at NBS and IMGC and he proposes a more extensive comparison. Mr. Jung follows up with recent results on Ag and Al point comparisons between NIM and PTB. The 24 mK difference between two Al cells (Document 8) has been definitely traced to a defective Al sample, but the exact defect is unknown and is unusual because the melting and freezing points of the defective sample agree well and the melting range is remarkably small. Mr. Jung says agreement at Al (as provided by two new cells) is now within 1 mK, but differences at Ag may be as high as 10 mK (with the Chinese cell higher). Mr. Bonnier suggests that it may be differences in the furnaces rather

than in the silver ingots that is causing the problem. Mr. Jung thinks not but hopes to resolve the problem by measurement of all the cells in one laboratory.

There follows an exchange between Mr. Bloembergen and Mr. Jung on the relative merits of using resistance ratios or resistance differences for interpolation with HTPRTs. Mr. Jung prefers resistance ratios. He goes on to describe the cubic-spline interpolation equations of Document 63 in considerable detail, concluding that they compare favourably with the method described by Mr. Crovini. There is about 0,7 mK non-uniqueness below 420 °C and a maximum of about 3 mK above; in the latter case there is a 300 °C interval bridged by the spline which is why the interpolation deviates from T by several millikelvins. Mr. Jones points to the desirability of having only two calibration points in any interval, whereas cubic splines require about five. Mr. Soulen remarks that evidence regarding non-uniqueness with HTPRTs is now accumulating. What about thermodynamic temperatures in this range? At NBS Mr. Reilly will compare HTPRTs with optical-fibre thermometers and conventional optical pyrometers using a tube furnace containing a black body but not metal freezing points. With luck, results should be available before 1989. The gas-thermometry experiments at NBS are finished; once Mr. Schooley measures the thermal expansion of the bulb, the results will be published. Mr. Soulen invites enquiries from anyone interested in using their high-quality manometer. At NPL, Mr. Chattle will carry out a HTPRT/optical-pyrometer comparison from 630 °C to 962 °C using a pressure-controlled heat-pipe furnace. Mr. Crovini hopes to complete a measurement of the Cu point by noise thermometry within a year. Mr. Quinn points out that the recent CSIRO value for the Au point (Document 15) of 1064,14 °C is based indirectly upon the NBS gas thermometry at 456 °C. Mr. Blevin's absolute value many years ago, based upon the Stefan-Boltzmann constant, was 1064,12 °C with 0,4 K uncertainty at 99 % confidence, in excellent agreement, which indicates that the Guildner/Edsinger temperatures are correct, at least to ± 30 mK.

Mr. Connolly and others express concern over the small number of commercial suppliers of HTPRTs. Mr. Bedford, pointing to Document 51,

says that there is a possible alternative available in the Pt/Au thermocouple developed by Mr. McLaren and Mr. Murdoch. They have shown it to have a precision within 10 mK from 0 °C to 1 000 °C, and it is simpler, and considerably less costly than a HTPRT. Although they see it as a particularly accurate secondary thermometer, it could probably, if necessary, define the scale accurately enough. The President points out that an interim approach could be to construct a scale around the W versus T_{90} relations generated for a HTPRT, interpolate with the Pt/Au thermocouple, and await the emergence of a readily-available HTPRT. The scale could then later be amended without numerical change. Mr. Maas says the NRC work is supported by similar experiments with a Pt/Pd thermocouple at ASMW where accuracies within about 20 mK at 1 100 °C and 50 mK at 1 300 °C have been achieved. Both of these thermocouples are more sensitive than Pt-10 % Rh/Pt. Mr. Hudson expresses amazement that there was no reaction from members to Mr. Bedford's description of the Pt/Au thermocouple. In view of the tight timetable and possible lack of supply of HTPRTs, he cannot understand why the possibility of an instrument that is far cheaper, simpler, more stable, and marginally less accurate did not generate more reaction. Mr. Chattle says little is yet published and he must read the details; Mr. Crovini says it would require extensive development and, although good, is still substantially less accurate than a HTPRT; Mr. Jones says that below 800 °C the HTPRT is considerably more accurate. Mr. Bonnier suggests that, since many HTPRTs need a guard, a Au guard wire be used so that then a Pt/Au thermocouple and a HTPRT can be compared directly. There follows further discussion related to the Pt/Au thermocouple, concluded by Mr. Bedford's saying that a detailed Pt/Au paper is already prepared and preprints will be sent to those requesting it.

6.2. Possible extension of the ITS-90 below 1 K

The President says a lower limit of 0,5 K has already been suggested and reminds the CCT that there is really no difficulty in adopting a scale with a rather high lower limit because a low-temperature extension can easily be added later. Mr. Soulen, referring to Document 44, says that some sort of universal temperature scale for laboratories working

to very low temperatures might help resolve controversies over physical laws and properties where temperature measurement uncertainties are currently causing difficulties. The joint NBS/PTB proposal here, although not original with them, is to use the melting curve of ^3He . He goes on to give many details of the programs in these and other laboratories, saying they are hoping to achieve accuracies within 0,1 % and precisions within 0,01 %. Mr. Jung concurs and adds that the ^3He melting curve is less sensitive to interference than, say, carbon or germanium resistors, while it can likely also be made superior to superconductive devices. Several members join in a discussion centred largely around the necessary pressure measurements, the number of calibration points needed, and the probable upper limit ($\sim 0,8$ K).

Mr. Pavese turns to the possibility of using a ^3He gas thermometer (Documents 10A,B) from 0,8 K to 24,6 K. This would join with the ^3He melting curve thermometer near 0,8 K and also remove the necessity for incorporating helium-vapour-pressure equations in the ITS-90. From 0,8 K to 2,2 K it would be used in the absolute mode with the λ -point (2,2 K) as reference ; above, it would be used in the interpolating mode. He discusses other technical details, concluding that an accuracy within 0,3 mK is achievable ; however this is not yet supported by experimental results. Mr. Pavese goes on to say that although Document 22 extends the gas thermometer range downwards to 3,2 K, Document 22 A sets the lower limit at 4,2 K even when ^3He is used. It would be more logical to allow 3,2 K (the ^3He boiling point) for calibration of a ^3He gas thermometer. Mr. Rusby gives the reason for the 4,2 K limit as follows : The interpolating gas thermometer is sensitive to virial-coefficient corrections which cause deviations from simple linear or quadratic behaviour, the deviations increasing rapidly as the temperature decreases. Hence its range should be no wider than necessary. Above 4,2 K there is no alternative, but below 4,2 K the helium vapour-pressure relations are a more precise alternative. There is a lengthy debate on these statements involving several members. Mr. Pavese does not agree entirely with Mr. Rusby's remarks and insists that, for reasons of both convenience and symmetry, 3,2 K should be allowed as the lower calibration temperature for a ^3He gas thermometer. Several members agree that there is no objection in principle. Another possibility is

raised : in such a case, would the ^3He gas thermometer define temperatures to 3,2 K, or would it only define temperatures to 4,2 K with 3,2 K as a point outside the calibration range? All of this is left for WG 4 to resolve and report back.

Later, Mr. Hudson reports that WG 4, requested to solve this problem, has considered it at length without resolving it. To be specific, WG 4 considered Mr. Pavese's proposal to recast the scale definition so as to allow a ^4He or, entirely equivalent, a ^3He thermometer with its lowest calibration point at 3,2 K. WG 4 was unanimous that above 4,2 K the two definitions would be equivalent. The Pavese proposal would also eliminate the need for the ^4He vapour-pressure thermometer and on this point WG 4 was split, so that finally two members agreed to the proposal, two rejected it, and one was neutral. In more detail, those against the proposal felt that helium vapour pressures (be they ^3He or ^4He) are both more sensitive and reproducible than the gas thermometer and should therefore be preferred. Those in favour of the proposal accepted the opposing position but thought that the principle of not allowing alternative definitions unless they are of equal quality had already been compromised in other ranges and so could be compromised again! As well, they said that the clear superiority expressed for the vapour-pressure thermometer had yet to be proved. A possibility suggested was to formulate the scale tentatively allowing the alternatives, the ^3He gas thermometer to be retained only if appropriate documentary results subsequently appeared. The possibility of the ^3He gas thermometer being calibrated at 3,2 K but used only above 4,2 K was not discussed by WG 4.

Mr. Pavese takes exception to the WG 4 report, suggesting that there has been confusion between reproducibility and accuracy in their comparisons of the relative merits of the two thermometers. He agrees that the vapour-pressure thermometer may be more reproducible but says its quality, that is to say accuracy, is equivalent. There follows a lengthy discussion amongst many members as to the distinction between accuracy and reproducibility, whether in this context accuracy means accuracy in representing thermodynamic temperatures, and whether accuracy and quality are synonymous. The question is left for a new WG 4 to resolve.

6.3. Miscellaneous problems

Mr. Bedford responds to the request made at the 15th Meeting (1984) of the CCT that he coordinate a study of non-uniqueness of the PRT between 0 °C and 420 °C, concentrating first upon measurements

of the Ga, In and Cd points. He thanks the seven laboratories who supplied data for this study, the results of which appear in Document 38, and briefly describes the measurements that were made. On the basis of these data it appears that non-uniqueness is significantly different from imprecision (0,2 mK) at 30 °C; lies between 0,5 mK and 1 mK at 156 °C; and lies between 1 mK and 1,5 mK at 321 °C.

Mr. Crovini introduces the subject of an alternative, especially precise scale definition near room temperature for accurate metrological work such as establishing electrical units. He suggests a special sub-range from - 40 °C to 40 °C based upon a PRT calibrated at the Hg, H₂O, and Ga triple points. Study (Document 53) has shown that such a scale would be precise to within 0,1 mK and would not differ from the wider-range scale by more than 0,1 mK.

Mr. Bonnier mentions a method of measuring α for a PRT using the Ga or In triple point. Since the same value of α is obtained as from the IPTS-68 definition, the implication is that scale non-uniqueness is very low at these temperatures.

- Mr. Pavese, referring to Document 48, warns of the danger of Ar contamination of the O₂ triple point. It has now been confirmed that the cause of scatter in O₂-triple-point measurements in an earlier intercomparison was the differing concentrations of Ar in the O₂. One of the reasons for this difficulty is the unreliability of manufacturers' analyses, which can be wildly incorrect. The problem is particularly troublesome because most oxygen is prepared by distillation from air where it is difficult to avoid argon contamination. Mr. Blanke disagrees; he has had good success, both with O₂ distilled from air and with manufacturers' analyses. Mr. Bonnier says that in his experience the bottled O₂ can also be contaminated by something from the container. There follows a discussion of the relative merits of steel, aluminium and specially-coated aluminium for containing D₂.

A discussion of the D₂ triple point follows. Mr. Pavese says he has now succeeded, in cooperation with the Monsanto Research Corporation, in obtaining reproducibility within 0,1 mK and accuracies within 0,2 mK as a result of limiting HD contamination below 100×10^{-6} (Document 49). He has also used a specially-prepared ferric oxide catalyst to inhibit contamination, but its efficiency is low. The D₂ triple point is interesting as a possible substitute for the two H₂ boiling points in a scale formulation. Mr. Bedford reviews Mr. Ancsin's recent experiments with

D₂ (Document 52) using an open cryostat. A sample contaminated by as much as 1 % with H₂ will yield the true D₂ triple-point value by extrapolation on a vapour-to-condensed-sample ratio plot. Furthermore, Mr. Ancsin has measured the IMGCC cell and obtains the same triple-point value, but finds the IMGCC catalyst exceedingly slow (days as compared to hours with normal ferric oxide).

6.4. Actions required

The President opens the discussion by listing several points already identified in the meeting as requiring further action, probably chiefly by appropriate Working Groups: Supplementary Information; WG 2 document; text of ITS-90; values of $T - T_{68}$; interpolation procedures. Further points requiring action are the setting up of Working Groups, perhaps five in number and possibly with new terms of reference, and the recommendations to the CIPM, including one dealing with further work on the Pt/Au thermocouple and similar instruments. The meeting then proceeds to a clause-by-clause reading of Document 22A (the draft text of the ITS-90) to identify points of disagreement or requiring resolution and to improve the text itself. This leads to lengthy debate on many of the details of the definitions in the text, including editorial revision of the wording itself, involving all of the members. Some of the topics debated include: omission of the word « practical » from the title; thermodynamic smoothness; significance and uniqueness of alternative definitions; lower limit (0,5 K ?) and range junction temperatures (for example 3,2 K versus 4,2 K); °C versus K; specification of range junctions by values of temperature or by fixed-point titles; the term « equilibrium states » used with vapour-pressure and gas thermometers; the most efficient way of referring to Supplementary Information in the text; whether the ³He gas thermometer should be admitted to 3,2 K; whether helium virial coefficients have to be stipulated and, if so, whether they should appear in the text or in the Supplementary Information; dependence of the magnitude of the virial-coefficient correction on density of gas; possibility of the triple point of equilibrium D₂ as an alternative to the two calibration points at 17 K and 20 K, of the triple point of CO₂ as an alternative to the triple point of Ga, and of the freezing point of Sb as an alternative to that of Al;

formulation of PRT interpolation methods, both reference function and deviation functions; which of the many fixed points between about -100°C and 420°C should be allowed in the scale; non-uniqueness versus inaccuracy; a high-precision range of restricted size around room temperature usable with both capsule and long-stem PRTs; whether the appendices should be retained; whether and in what form scale differences should appear. The detailed discussion of Document 22A concludes with two observations by Mr. Giacomo on its format. He points out that there are so many different references to the Supplementary Information that the final paragraph describing it should instead appear at the beginning. Also, there are so many alternative definitions that he would prefer a straightforward text with no mention of the alternatives until they are all collected together at the end.

7. Announcement to users of forthcoming changes in the IPTS-68

No action was taken on this item of the agenda.

8. Discussion of CIPM draft resolution to the CGPM

There was considerable discussion of this draft resolution (Document 54) earlier in the meeting. Mr. Rusby, still concerned about the timetable which is explicit in it, asks for clarification. Does it in fact mean that the new scale can be introduced at any time after the CIPM meets? The President replies that this depends upon the type of authority given to the CIPM by the CGPM; it may be sufficiently broad to allow that. Also, it depends upon whether the CIPM feels it can obtain international acceptance, which is something we here cannot predict. If the CCT cannot meet the 1990 date, it can always abandon the scale or withdraw it and suggest a date extension. The latter would require at least CIPM approval. Mr. Rusby would like some options left open and would prefer that a modified proposal go forward with a less specific timetable. The President asks for other opinions. He points out that the resolution has already gone to the CGPM and cannot be

changed, but perhaps the CGPM can, if it wishes, accept a modified form of it (he is not sure). Mr. Quinn says the CIPM can make another proposal to the CGPM in full session. Mr. Hudson says individual members of the CGPM can propose amendments, and Mr. Giacomo says it is certainly possible to alter the wording, easier in fact than to propose a completely different resolution. Mr. Rusby asks if any other members share his reservations. The only reply is from the President who thinks that the scale can be ready in time except for some additional data regarding thermodynamic temperatures. Moreover, he is convinced that because of pressure groups, public perception, and resistance to change, postponement is likely to lead to inability to introduce a new scale at all. Mr. Soulen suggests that the Working Groups estimate the amounts of time they will require and report back, and this is agreed.

Again, the President reiterates that the resolution cannot go forward without endorsement by the CCT. Otherwise, by default, it will be withdrawn. If it is endorsed but it turns out that it must subsequently be withdrawn, that can be done up until October 1989. It is conceivably possible that an extension could be obtained in 1990 if the scale were almost, but not quite, ready but if such a request were inserted in the original resolution he is confident the resolution would be rejected by the CIPM. The proposition therefore is: does the CCT endorse the resolution (as it stands) to the effect that the ITS-90 will likely be ready by 1989 with a view to adoption on January 1, 1990, or does the CCT withdraw it? Endorsement will, of course, implicitly include the right to withdraw the scale if it turns out that the timetable cannot be met. Mr. Jones endorses the resolution. There follows some discussion as to how firm some of the dates really are. It is confirmed that the resolution has a wording similar to that in the one put forward by the CCE regarding a change in electrical units. Mr. Rusby asks the President if, when the matter is discussed, he will draw the attention of the CIPM to the complexity of the situation regarding the ITS-90 and warn them that it is not yet as far advanced as the corresponding electrical change. The President agrees. Mr. Bloembergen thinks a rewording of the resolution would be dangerous and endorses the existing wording. Following some further discussion the CCT endorses the resolution.

9. Working Groups : future work and membership

The President suggests that five Working Groups may be required to deal with all of the outstanding work, with the tasks divided roughly as follows :

- WG 1 : Preparation of the text of ITS-90 and revision of the monograph « Supplementary Information for the ITS-90 ».
- WG 2 : Completion of monograph « Techniques for Approximating the ITS ».
- WG 3 : Resolution of the definition of the PRT range of the ITS-90.
- WG 4 : Provide all of the information regarding thermodynamic temperatures and $T - T_{68}$ on which the ITS-90 will be based.
- WG 5 : Settle all outstanding questions regarding the gas-thermometer and helium-vapour-pressure ranges of the ITS-90.

Considerable discussion follows. Mr. Rusby suggests there is little difference between the President's outline and the presently existing Working Groups, that the proposed task for WG 4 is not likely to be onerous, and that there may be too much shuffling of papers between WGs 3 and 4. Mr. Hudson says most new measurements of T will likely be at high temperatures where WG 3, not WG 4, is expert. In connection with the work of WG 3, Mr. Quinn advises that in the final formulation of the reference functions and deviation functions, attention be paid to their mathematical elegance and formalism. The best analytical methods should be used for expressing them. Mr. Hudson's request for clarification of the duties of WG 5 leads to a lengthy discussion, following which Mr. Rusby is proposed as chairman if, indeed, a WG 5 is set up. Mr. Rusby accepts.

The President says it is apparent that the membership of WGs 1 and 2 should remain as before. Mr. Crovini says WG 3 believes its forthcoming program would benefit greatly if Mr. Jung were added to WG 3. Mr. Hudson proposes a solution to the WG 4/WG 5 dilemma that has already been agreed to by some members. Briefly, it is that Mr. Steur be added to WG 4; that the tasks earlier ascribed to WGs 4

and 5 be handled within a single WG 4; that Mr. Rusby (with primary responsibility) and Mr. Soulen will evaluate thermodynamic temperature data and maintain a close liaison with WG 3; that Mr. Swenson (as operational leader), Mr. Durieux, and Mr. Steur will attempt to solve the outstanding question regarding use of the gas thermometer; and that Mr. Hudson will act as internal group liaison officer with responsibility to report to the CCT. These tasks and compositions are agreed to, so that membership becomes :

WG 1 — Preparation of the text of ITS-90 and revision of the monograph « Supplementary Information for the ITS-90 ».

H. Preston-Thomas (Chairman)
P. Bloembergen
T.J. Quinn

WG 2 — Completion of monograph « Techniques for Approximating the ITS ».

R.E. Bedford (Chairman)
G. Bonnier
H. Maas
F. Pavese

WG 3 — Resolution of the definition of the PRT range of the ITS-90

L. Crovini (Chairman)
H.-J. Jung
R.C. Kemp
Ling Shankang
H. Sakurai
J.F. Schooley

WG 4 — Preparation of the best values for $(T - T_{68})$ and provision thereof to WG3, and resolution of the definition of the gas thermometer range of the ITS-90. (These tasks were to be handled by two sub-groups of this working group.)

R.P. Hudson (Chairman)
M. Durieux
R.L. Rusby
R.J. Soulen
P.P.M. Steur
C.A. Swenson

10. Replacement of the IPTS-68 (continued): timetable for preparation of the new scale (detailed)

The President summarizes the situation. It is required to have a completed scale by September 1989. Consequently the bulk of the work must be done by October 1988 to allow time for testing by CCT members. We must present to the CIPM in October 1987, if not a first draft, at least a communication to the national laboratories advising them of the impending change. The two major supporting documents must also be ready by 1989.

Mr. Quinn suggests that the Working Groups issue progress reports to the CCT by March 1988, by which time substantial progress will have to have been made on all of the details of the definition of ITS-90. If not, we will certainly exercise our option to withdraw. By October 1988 we are only three months away from the January 1989 deadline when the scale, in effect, has to be ready. After some discussion it is agreed that the Working Groups will submit progress reports in March 1988; in the case of the Supplementary Information and the WG 2 report, these reports will simply indicate what has been done to that point. It is recalled that the WG 2 monograph is to be published as soon as it is ready, which Mr. Bedford hopes will be by late 1988 with, as far as is possible, the text written so as to pertain to the ITS-90 instead of the IPTS-68.

An announcement of the numerical changes in temperature values that will occur with the introduction of ITS-90 has to be prepared for January 1, 1989; that is, values of $T - T_{68}$, which will become $T_{90} - T_{68}$, must be ready. It is agreed that only approximate values, say in the form of a graph, will be required for the 1989 preliminary announcement.

11. CIPM decision of 1985 on thermometry work at BIPM

The President introduces the item with the comment that it has always been the practice of the CCT to take account of, and comment on, the work in thermometry at the BIPM. Thermometry at the BIPM has had a long and excellent history. Recently, in its long-term plan for scientific work at the BIPM, the CIPM (in consultation with the Director of the BIPM) reallocated some of the personnel and financial resources that had been devoted to thermometry. Mr. Quinn elaborates:

the CIPM has for some time been under strong pressure to increase the effort at the BIPM in photometry and radiometry, especially the latter. Since overall resources could not be increased, reallocation had to occur. After much deliberation it was decided that most of the present thermometry resources would be transferred to radiometry. Henceforth, thermometry at the BIPM will be restricted essentially to the provision of thermometer calibrations in a range near room temperature. The work of Mr. Bonhoure on measurements of $T - T_{68}$ has now been completed (Document 39) and will be published in due course. Mr. Bonhoure's research will henceforth be carried out in radiometry, initially in spectral irradiance comparisons. The President points out that each Consultative Committee habitually proposes a continuation or expansion of work in its particular field and this, of course, is impossible when the amount of resources is not increasing.

Mr. Jung deplores this reduction in thermometry, especially the important work in pyrometry, wonders what alternatives were considered, and what future research has been sacrificed. Mr. Jones expresses concern about the cuts in thermometry, and says the CCT should acknowledge the very fine research Mr. Bonhoure has done in thermometry over the years. Mr. Bedford says the whole problem of reduction of research in temperature measurement is of much wider concern and not restricted to the BIPM. Many national laboratories including NRC are faced with this problem. He deplores these widespread reductions. Mr. Giacomo says that all measurements require excellent temperature measurements. He is sure that in 10 to 20 years wrong temperature measurements will be made at the BIPM. In any field, cessation of research leads to bad measurements. Temperature measurements are of great importance for most metrology and so should not be neglected. Mr. Pokhodoun says the work at the BIPM is very important and it is a pity to stop it. Stopping it could affect the progress of the new temperature scale so it is important to continue it.

The President will forward these expressions of concern to the CIPM in the form of a declaration.

12. Publication of documents

The President reminds the CCT that few documents other than the Working Group reports are published with the minutes. He asks what documents to this meeting require to be published. Mr. Swenson suggests

that three documents (4, 6, 42) that bear on $T - T_{68}$ should be considered. Others feel the data in these, since they are to some extent preliminary, may be slightly altered when the experiments are concluded and two sets of values in print would be confusing. It is agreed that only certain reports of the Working Groups will be published, that is, Documents 7 and 64 (WG 3), 9 and 13 (WG 4). In place of the monograph Document 21 (WG 2), Mr. Bedford will submit a brief report for publication. Mr. Giacomo remarks that the BIPM receives few requests for copies of documents. Mr. Quinn says that the BIPM is willing and happy to permit translations of any of their monographs and documents with no restrictions, in particular the forthcoming WG 2 monograph. Mr. Bedford remarks that Mr. Ling informed him that the Supplementary Information has been translated into Chinese and 20 000 copies distributed. Mr. Giacomo feels that it will be difficult to compete with that.

13. Miscellaneous subjects

A draft of recommendation T1 (1987) from the CCT to the CIPM concerning the desirability of measurements of thermodynamic temperature continuing in national laboratories after the promulgation of the ITS-90 is read. There follows a lengthy discussion on the details of the wording, following which two more drafts are criticized before a final wording in both French and English is accepted.

A draft of recommendation T2 (1987) concerning the encouragement for national laboratories to pursue investigations on simplified methods of temperature measurement undergoes similar close scrutiny before the wording is satisfactory.

A document in the form of a table is introduced by Mr. Soulen on behalf of WG 4. It shows approximate values of $T - T_{68}$ with estimates of 3σ uncertainties at 16 fixed points from the helium-vapour-pressure region to the freezing point of gold. Mr. Soulen says this is roughly what will be embodied in the ITS-90, but it is obviously not in final form, should not be published with the minutes, but may appear in WG 4's March 1988 progress report.

Mr. Crovini asks whether the CCT has accepted the view expressed in Document 1 that resistance ratios of PRTs should be expressed in terms of the water triple point, i.e. using $R(0,01\text{ }^\circ\text{C})$ instead of $R(0\text{ }^\circ\text{C})$,

adding that it is not difficult to do this in the reference function as well as in the deviation functions. However, several members point out that industrial users and, in fact, all users of liquid-in-glass thermometers and thermocouples will continue to use the ice point as a reference point. Mr. Blanke feels that $R(0,01\text{ }^{\circ}\text{C})$ could be used in the scale definition and $R(0\text{ }^{\circ}\text{C})$ for technical purposes. The President, Mr. Connolly, and Mr. Quinn express their concern for confusion which may arise from such a situation. The President emphasizes that although experts usually prefer elegance, users prefer simplicity and continuity. He proposes that WG 3 make every preparation for the change but urges WG 3, and other members of the CCT, to invite reactions from users of the scale. Mr. Crovini further asks whether the CCT accepts that in the new scale the value of α will no longer be used for qualifying PRTs but, instead, one will use the resistance ratio at a fixed point for which Mr. Crovini suggests the Ga point. Mr. Bedford and Mr. Connolly remark that the α value can easily be calculated using the calibration at the Ga point to which Mr. Bonnier adds that the uncertainty in δ causes an uncertainty in the α value equivalent to only 0,2 mK. Mr. Jones points out that for HTPRTs it may be desirable that the resistance ratio be specified at a particular fixed point which is used in the calibration instead of at the Ga point. He proposes that the matter be left to WG 3. The President agrees with this and asks Mr. Crovini to select what is, according to WG 3, the best system.

Mr. Bloembergen remarks that existing discrepancies among realizations of the Al and Ag freezing points in national laboratories (see Sections 5.3 and 6.1) make it desirable that a systematic comparison be arranged by circulating sealed cells. Mr. Bonnier agrees with this and adds that it will be necessary that the associated furnaces also be circulated. Mr. Bloembergen also draws attention to the ac leakage problem in HTPRTs and asks who is going to pursue fundamental research on this problem in the next two years. Mr. Bedford remarks that, although experimental work on HTPRTs has been stopped at NRC, at least one publication from Mr. Berry will appear which will include his results on the ac leakage problem.

Mr. Maas draws attention to a proposal (see Document 32) for international comparisons of measurements with superconductive reference point devices. There is interest for such comparisons among CCT

members and Mr. Maas asks the CCT officially to accept the proposal and to give ASMW the mandate for organizing it. The President confirms acceptance and endorsement of the proposal.

14. Next meeting of the CCT

The President recommends that the next meeting of the CCT be held in September 1989, shortly before the CIPM meeting, when the ITS-90 must be essentially completed. Mr. Soulen prefers to have a meeting in 1988 because by 1989 everything has to be almost completed so there is no time for CCT discussion along the way. Merits of this versus costs, difficulties of circulating minutes, BIPM calendar, etc. are debated. Finally a vote is taken with the result (8 to 4, 2 abstentions) favouring a next meeting in September 1989. It is clear, however, that several Working Group meetings and many Working Group consultations must be held during the intervening two years.

In summing up, the President says that because of the special importance of this meeting, the minutes should be circulated as soon as possible. They will be prepared by Mr. Durieux and Mr. Bedford, but this is not likely possible before October. Before that he will circulate to the members a report giving a summary of the results of the meeting.

*
* *

Before closing the meeting the President thanks the members of BIPM for their hospitality and for the very good care taken of the CCT by BIPM under exceptionally difficult circumstances.

Received : November 9, 1987
and in revised form January 5, 1988

APPENDIX T 1

Working documents submitted to the CCT at its 16th Meeting

(*see* the list of documents on page T 35)

APPENDIX T 2

Report of Working Group 1 *

(Revision of the IPTS and Supplementary Information)

Working Group 1 has prepared a draft of the text of the future International Temperature Scale of 1990 (Document 22A). This document will be discussed at the 16th meeting of the Comité Consultatif de Thermométrie (June 9-11, 1987).

June 1, 1987

(*) The members of this Working Group are: MM. H. PRESTON-THOMAS, Chairman, National Research Council of Canada (Canada); P. BLOEMBERGEN, Van Swinden Laboratorium (Netherlands); T. J. QUINN, Bureau International des Poids et Mesures.

APPENDIX T 3

Report of Working Group 2 *

(Secondary measurement techniques for determining international temperatures)

The task of WG 2 is to prepare a document on secondary measurement techniques for determining international temperatures. A first, very rough draft of such a document was submitted to the CCT at its 15th meeting in 1984. Substantial additions and revisions were incorporated into a Version B which was circulated to WG 2 members in May 1985, and which underwent a critical review at a meeting of WG 2 at IMGC (Torino) in October 1985. Based upon this review Version C was prepared, circulated in September 1986, and critically reviewed at a meeting of WG 2 at ASMW (Berlin) in November 1986. The changes recommended at that meeting were made for Version D, entitled « Techniques for Approximating the IPTS-68 and the EPT-76 ». WG 2 feels that version D, which was circulated to the CCT in March 1987 and forms the basis of this report, is nearing the final form for the document.

WG 2 hopes to receive criticism of, and comments and suggestions on, the manuscript from CCT members. To be of most use such material should be in written form and should reach the chairman by September 1987. A Version E will be prepared in late 1987 that we hope, after critical scrutiny by WG 2 in 1988, will lead to a final publishable manuscript towards the end of 1988.

March 1987

(*) 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 (G.D.R.); F. PAVESE, Istituto di Metrologia G. Colonnetti (Italy).

APPENDIX T 4

Report of Working Group 3 *

(Platinum resistance thermometer range)

(Document CCT/87-7)

1. Introduction

The members of the Working Group met at the National Bureau of Standards (NBS), Gaithersburg, from October 7 to October 10, 1985. On this occasion the Working Group organized a Workshop on high temperature resistance thermometry with the participation of experts from nine national laboratories and industries. The following representatives attended the workshop :

R. J. Berry, NRC	R. C. Kemp, CSIRO
M. V. Chattle, NPL	B. W. Mangum, NBS
J. L. Cross, Jarrett (USA)	P. Marcarino, IMGC
L. Crovini, IMGC	E. R. Pfeiffer, NBS
J. P. Evans, NBS	H. Sakurai, NRLM
G. T. Furukawa, NBS	J. F. Schooley, NBS
H.-J. Jung, PTB	H. E. Sostman, YSI**

Dr. R. P. Hudson of BIPM attended part of the workshop, presenting the activity of this laboratory in the field of HTPRTs.

During the meeting WG 3 examined with three members of WG 4 (R. P. Hudson, R. J. Soulen, and C. A. Swenson) the common problems of the two groups, i.e., the low-temperature termination of the platinum

(*) Members of this Working Group are : MM. L. CROVINI, Chairman, Istituto di Metrologia G. Colonnetti (Italy); R. C. KEMP, CSIRO, Division of Applied Physics (Australia); LING SHANKANG, National Institute of Metrology (People's Rep. of China); H. SAKURAI, National Research Laboratory of Metrology (Japan); J. F. SCHOOLEY, National Bureau of Standards (USA).

(**) Yellow Springs Instruments (USA).

resistance scale and the results of the thermodynamic temperature determinations.

The terms of reference of WG 3 are the following :

- 1) Choice of fixed points and interpolation instruments (in particular, the HTPRT) for the new International Temperature Scale (ITS) ;
- 2) Study of interpolation procedures for the ITS in the PRT range.

For both tasks it is necessary that the Working Group be supplied with critically assessed data on thermodynamic temperatures.

During both the WG 3 meeting and the Workshop it was possible to examine in detail the possibility of the realization of a platinum resistance scale from the lowest temperature (13,8 K) up to the gold point. The results of this examination are reported in the following sections.

2. PRT interpolation equation between 13,8 K and 273 K

As a result of a recent investigation [1], it appears that :

- a) the new determinations of thermodynamic temperatures are numerous and cover thoroughly the temperature interval here considered ;
- b) the agreement among different determinations is well within ± 2 mK ;
- c) it is possible to draw a line fitting the results to within ± 2 mK ;
- d) it is possible to derive a reference function using the relationship between the reduced resistance of a particular thermometer and the temperature that is determined by means of the line fitted to the experimental points ;
- e) it appears that a single deviation function covering the whole range will provide the minimum uncertainty due to the non-uniqueness of the scale [2].

A new document describing the scale and its realization and testing is in preparation for use by the CCT.

[1] R. C. KEMP, L. M. BESLEY, and W. R. G. KEMP, *Metrologia*, **21**, 1985, pp. 139-146.

[2] R. C. KEMP, Document CCT/84-11.

3. Workshop propositions and experience with respect to the design and characteristics of HTPRTs

On the basis of the investigations of the workshop participants, propositions could be made with respect to certain HTPRT parameters. In other cases, it was possible only to summarize the experience of the investigators.

a) R_0

With respect to R_0 , the participants' opinion is that the most useful range of R_0 is $0,2 \Omega$ to $2,5 \Omega$. The smaller values of R_0 imply lower leakage-current errors and (for larger diameter wire) better stability. The larger values of R_0 imply better temperature resolution for a given resistance-measurement apparatus.

The long-term stability of R_0 is profoundly influenced by the thermal history of the PRT. For initial use at any temperature t_{\max} above 480°C , the PRT should be tempered at $(t_{\max} + 50^\circ\text{C})$ (but not above $1\ 100^\circ\text{C}$) until the rate of change in R_0 no longer exceeds an amount corresponding to $10\ \text{mK}$ per $100\ \text{h}$ at t_{\max} . To determine $W(t)$ for $t > 450^\circ\text{C}$, the required value of R_0 should be obtained after a « quench-anneal » procedure. The most satisfactory quench-anneal procedure may vary from PRT to PRT; however, representative procedures are as follows :

- Reduction in PRT temperature from 800°C to 500°C in steps of 50°C that last about $30\ \text{min}$ each, followed by rapid cooling in air ;
- Cooling of the PRT at a rate not in excess of $80^\circ\text{C}/\text{h}$ from 950°C to 525°C , followed by rapid cooling in air ;
- Tempering at 650°C for $30\ \text{min}$, then at 450°C for $30\ \text{min}$, then rapid cooling in air.

For temperatures above 450°C , the slower the cooling, the more thorough the annealing.

The achievable short-term stability of R_0 , as evaluated after 10 cycles to the Al point followed by suitable quench-anneal procedures, can correspond to temperature shifts as small as $0,3\ \text{mK}$ (root mean square) per cycle and successive R_0 shifts no larger than those corresponding to $\pm 1\ \text{mK}$. For cycles to the Ag point, corresponding achievable limits are $0,5\ \text{mK}$ and $\pm 1,5\ \text{mK}$.

b) $W(t)$

With respect to the stability of $W(t)(\equiv R(t)/R_0)$ after heating for 100 h at 1 100 °C, the experience can be summarized in terms of « typical » PRT performance as well as « best » performance ;

T	Typical Drift	Smallest Drift
Al	$\pm 1-3$ mK	± 1 mK
Ag	$\pm 10-15$ mK	± 2 mK
Au	$\pm 10-15$ mK	± 3 mK

c) α

With respect to α , it appears that thermometers still can be useful with α as low as $0,003920 \text{ K}^{-1}$. However, the traditional level of α of $0,0039250 \text{ K}^{-1}$ or higher is recommended to ensure adequate wire purity and annealing.

d) Sensor

The maximum recommended sensor coil length is 4 cm. This length limit is especially important whenever the sensor is to be used with a black-body radiation.

A major unsolved question is the optimum PRT design for use in horizontal measurements. This question is of great importance, since it is necessary to use PRTs in the horizontal mode to transfer temperatures from the black-body cavities that enclose the radiation thermometers during thermodynamic-temperature determinations in the range above 660 °C. Any similar PRT-radiation comparison will require such horizontal use of the PRT. It is believed that the influence of the sensor winding geometry is very important in this respect, and that no clear evidence of a successful geometry has emerged from the studies conducted so far (many horizontal-mode measurements have been made at CSIRO).

e) Sheath

The recommended sheath outer diameter is 7,0 mm. The maximum diameter should not exceed 7,4 mm. The sheath length should lie in the range 60-80 cm. Mechanical stability, sheath life, and the silica softening temperature all are enhanced if the hydroxyl content of the silica is minimized.

A major problem with PRT stability is the migration of metal impurities through the sheath. It appears that graphite can provide a barrier to this migration, however. In turn, the graphite can be protected by a thin coating of SiC.

f) Gas filling

Adequate gas filling for HTPRTs appears to be provided by dry air or (Ar + 10 % O₂), at a pressure adjusted so as to approximate 101 kPa at 1 100 °C.

g) Insulation resistance

The insulation resistance of HTPRTs is very dependent upon the temperature of use and the resistance-measurement circuitry. The actual values achieved can vary from more than 10⁵ MΩ to 0,1 MΩ (made by grounded ac measurement). The highest values are found in dc measurements with no ground in the thermometer circuit and at PRT temperatures below 400 °C. A value of 10 MΩ has been achieved at 1 064 °C with an ungrounded dc measurement. The presence of insulation leakage error can be detected by several methods: a change from ac measurement to dc, immersion-depth measurements, and the introduction of an internal guard or a grounded external mesh.

h) Immersion depth

Except for the hydrostatic-pressure effect, the change in indicated temperature should not exceed 0,2 mK whenever the position of the midpoint of the sensor is varied, so long as the midpoint is at least 10 cm below the surface of the liquid in a zinc freezing-point cell.

4. Workshop recommendations and experience with respect to defining a new ITS above 0 °C with HTPRTs

a) Adequacy of thermodynamic temperature assignments

In order to specify a scale with HTPRTs, it is desirable to realize the thermodynamic temperature with an uncertainty less than 100 mK in the range 0 °C to 1 064 °C. At the present time, this is possible only for temperatures from 0 °C to 660 °C, including the fixed points Sn, Zn, and Al (or Sb). It is estimated that gas-thermometry measurements at NBS in the range 457 °C to 660 °C might become final within 2 years; noise thermometry at 1 084 °C at IMGIC might be complete within the same time; and 3 years might elapse before spectral radiation measurements from either PTB-Berlin or CSIRO are complete. An even

longer time is expected to precede further results from total radiation thermometry at NPL. Spectral radiation measurements at BIPM, in the range from 420 °C to 630 °C, might be completed within two years.

b) Transition temperature from PRT to radiation thermometry in a new ITS

It is estimated that the current level of imprecision characteristic of National-Laboratory radiation thermometry in the 960 °C to 1 060 °C range is about $\pm 0,02$ °C. Current estimates of PRT imprecision levels in the same temperature range are slightly smaller. (See Section 3.b) Therefore, current imprecision levels provide no basis for choosing between Ag and Au as a transition temperature from PRT to radiation thermometry in a new ITS. The great expense connected with the realization of the Au point suggests that careful attention be paid to PRT lifetimes, which will be substantially shortened by extended service at that temperature.

c) Necessary fixed points

Fixed points to be considered for utilization in HTPRT thermometry include Sn, Zn, Al (or Sb), Ag, and Au (or Cu). The Cu-Ag eutectic appears to provide a markedly poorer precision than those listed above. A prospective source of fixed points in the range 750 °C to 960 °C is the pressure-regulated sodium heat pipe, which functions in a manner that is similar to a boiling-point apparatus; its demonstrated temperature reproducibility currently is better than 5 mK.

d) Uniformity of fixed points

Owing to the lack of recent high-temperature fixed-point comparisons, it is necessary to consider whether the uniformity of temperatures provided by existing fixed-point cells throughout the world is sufficiently good to permit a realistic comparison of HTPRT performance at the fixed points. It is suggested that a first effort in this respect can consist simply of evaluating the constancy of t' (IPTS-68) values at the high-temperature fixed points from laboratory to laboratory. It is noted, however, that slight errors in the Sn and Zn calibrations are magnified several fold at the higher temperatures.

It has been brought to the attention of WG 3 that the water actually used in the construction of present-day triple-point cells generally does not reflect the isotopic composition specified in the text of IPTS-68. The deviation of triple-point temperature arising as a result of variation in the isotopic composition noted above is estimated to be 40-70 μ K.

Inasmuch as this level of temperature variation may become noticeable in a high-precision, narrow-range secondary scale that has been discussed during meetings of the CCT, WG 3 suggests to the CCT that consideration be given to this problem prior to the replacement of the IPTS-68.

e) Possible interpolation schemes

Although no interpolation scheme can be recommended at this time, there appears to be an advantage to allowing the use of thermometers with maximum temperatures limited to the Zn-point temperature, the Sb-point temperature, or the Ag-point temperature.

f) Pt/Au thermocouple

The most recent results obtained at NRC, Canada, indicate that thermocouples made of pure platinum and gold wires (both 99,999 %) can be realized in such a way as to be insensitive to temperature gradients to within $\pm 0,01$ °C per 10 cm, for operation between 0 °C and 1 000 °C. Their thermoelectric power varies from 10,8 $\mu\text{V/K}$ at about 160 °C to 24,8 $\mu\text{V/K}$ at about 962 °C. On these grounds, it is possible that the Pt/Au thermocouple is at least ten times more accurate than the Pt-10 % Rh/Pt thermocouple for use up to the freezing point of silver. More data on its reproducibility are required.

5. Work remaining to be done on HTPRTs

During the time remaining before the completion of thermodynamic temperature determinations up to 1 064 °C, it is of great importance that developmental studies of HTPRTs be continued. There remain several problems of design and high-temperature performance to be solved. These include the ability to transfer measurements made by radiation thermometry to HTPRTs, the migration of impurities through the PRT sheath, the minimization of electrical leakage errors in PRTs, and the stability and lifetime of PRTs at temperatures as high as 1 084 °C. In addition, there are problems remaining with respect to the generation of an actual PRT scale ; these include the testing of suitable interpolation schemes, and the evaluation of the precision of interpolation relations at all temperatures.

6. Proposals to the CCT

WG 3 considers that it is now possible to define ITS temperatures from 13,8 K to 273 K using PRTs with a single reference function and a single deviation function. Consequently, WG 3 proposes that the CCT promote the testing of this portion of the scale by various national laboratories, including the joining to other portions of the scale with no discontinuity in slope.

WG 3 proposes that the Planck Law continue to be specified for the definition of temperatures greater than those to be defined by the PRT. However, it urges the CCT to promote the comparison of PRTs with radiation thermometers over an extended range of temperatures. It should be stated that radiation thermometry at the Ag point currently is thought to be as precise as that at the Au point.

On the basis of the discussions that took place during the HTPRT Workshop, WG 3 finds that there exists at this time no technical evidence that would permit a choice to be made between the Ag and Au points as the transition temperature from a PRT to a radiation-based scale.

7. WG 3-WG 4 Joint Meeting

At the time of discussion of the items of mutual concern to WGs 3 and 4, only 2 members of WG 4 could still be present. To these members, the WG 3 suggestion of a «junction point» at 13,81 K (in light of the new scale proposed) seemed to be very sound and likely to receive general acceptance by the full Working Group by the time of the 1986 meeting of the CCT in the absence of any new information to the contrary.

8. Workshop documents forwarded to the CCT (1986 meeting)

Documents submitted to the HTPRT Workshop are submitted herewith for consideration by the CCT at its next meeting.

October 1985

APPENDIX T 5

Addendum to Working Group 3 Report*

(Platinum Resistance Thermometer Range)

(Document CCT/87-64)

1. Foreword

Working Group 3 met at NBS, Gaithersburg, in October 1985, during the Workshop on High Temperature Platinum Resistance Thermometry. On that occasion the experimental work for establishing a new platinum resistance scale carried out up to that time was reviewed. The main conclusions were as follows :

- 1) An ITS could be defined from 13,8 K to 273 K using PRTs with a single reference function and a single deviation function [1, 2].
- 2) High-temperature PRTs could reproduce the ITS at the silver freezing point to within $\pm 10 - 15$ mK, in the worst case, and to within ± 2 mK, in the best case.
- 3) The experimental evidence produced at the time of the meeting showed that the PRT scale was quite probably the most reproducible between 13,8 K and 24,6 K and, on the contrary, its non-uniqueness at higher temperatures would be quite evidently increased if this scale were terminated at 24,5 K. A meeting with Working Group 4 produced a thorough discussion of the relative merits of the platinum resistance thermometer and the gas thermometer as interpolating

* Members of this Working Group are: MM. L. CROVINI, Chairman, Istituto di Metrologia G. Colonnetti (Italy); R. C. KEMP, CSIRO, Division of Applied Physics (Australia); LING SHANKANG, National Institute of Metrology (People's Rep. of China); H. SAKURAI, National Research Laboratory of Metrology (Japan); J. F. SCHOOLEY, National Bureau of Standards (USA).

instruments. At this point WG3 recognized that it was its duty to recommend the best platinum resistance scale, but also recognized the use of an interpolating gas thermometer below 24,5 K, so that between 13,8 K and 24,5 K alternative definitions of the scale would be allowed.

The workshop on HTPRTs focused attention on a few key points, such as leakages above 660 °C, the migration of impurities in a metallic environment, the quality and the uniformity of high-temperature fixed points, and the need of a smooth transition from PRT to radiation thermometry. The choice between silver and gold freezing points for the «junction point» was not decided at the workshop.

2. Activity after October 1985

2.1. Developments of HTPRTs

New developments of HTPRTs have been published since the Workshop, particularly in the Beijing Conference on Temperature Measurements [3-5]. Sawada *et al.* [5] found that the higher is α the better is the high-temperature stability of a PRT (*see also Document CCT 87-11*). A selection threshold of 0,003927 is proposed. A survey of the PRTs used for experiments in various laboratories has shown that the large majority of them exceeds 0,003926. This fact has some significance for the selection of a reference function.

The migration of metallic impurities from Inconel surfaces to a platinum wire through one or two sheaths of silica was confirmed by experiments employing radioactive tracers and jointly carried out by IMGC and the Centro di Radiochimica of the Consiglio Nazionale delle Ricerche (Pavia). It is thus recommended that HTPRTs not come in contact with metal surfaces (particularly copper, copper alloys, Inconel, stainless steel and Ni/Cr alloys) at a temperature above 660 °C for a long exposure (e.g., more than one hour). This impurity migration would possibly affect the reproducibility of high-temperature fixed-point cells when operated in Inconel blocks. Although no direct evidence of a contamination has been produced so far, it is advisable to operate fixed-point cells in high-temperature metal blocks for the minimum time necessary, avoiding long-time, high-temperature soaking.

2.2. Fixed Points

The melting point of the eutectic alloy Cu-Ag (779,6 °C) was studied in several laboratories and particularly at NRC [6] and CSIRO [7, 8]. Their results agreed with those previously obtained at IMGC [9], which indicated a short-term reproducibility not better than ± 10 mK. Studies on a pressure-controlled sodium heat pipe [10] show that one device can reproduce a temperature close to the sodium boiling point (880 °C) to within $\pm 1,5$ mK, but the reproducibility of different devices is not yet known. Research on this subject is in progress at IMGC in cooperation with Ispra European Joint Research Center.

The need of verifying the uniformity of the temperatures provided by existing fixed-point cells throughout the world was pointed out during the Workshop on HTPRTs. More recently, Jung and Li Xumo [11] showed that the cells for the aluminium freezing point used at NBS, NIM, NPL and PTB produced t' values of their liquidus points lying within a range of about 27 mK. This range is considerably greater than what can be expected from the calibration uncertainties and the properties of the thermometers. A direct intercomparison between NIM and PTB confirmed the difference.

An intercomparison between NBS and IMGC concerning the silver freezing point is in progress. The results should be soon available. The intercomparison is carried out by means of a transportable sealed cell.

2.3. Interpolating scheme between 0 °C and 962 °C

It is highly desirable that a standard platinum resistance thermometer can be calibrated simply in the temperature range where it will be used. A scale divided in subranges can accommodate this need. The interpolating scheme of Jung and Li Xumo [11] does not fit this need, as it requires calibration at all six points, from the triple point of water to the silver freezing point. We are then left with two basic possibilities :

- 1) A parametric interpolating scheme of the type :

$$\begin{aligned}
 W(t) = 1 + A\theta + B\theta + C(\theta - \theta_{Sn})^3 \\
 + C'(\theta - \theta_{Zn})^3 \\
 + C''(\theta - \theta_{Al})^3
 \end{aligned}$$

and $t = F(\theta)$,

with C , C' , C'' equal to zero for $\theta \leq \theta_{Sn}$, θ_{Zn} , and θ_{Al} respectively. t is identical to θ at the tin, zinc and aluminium freezing points.

2) A reference-function scheme of the type :

$$\begin{aligned}
 W(t) - W_{\text{ref}}(t) = & a(W_{\text{ref}} - 1) + b(W_{\text{ref}} - 1)^2 + C [W_{\text{ref}} - W_{\text{ref}}(\text{Sn})]^3 \\
 & + C' [W_{\text{ref}} - W_{\text{ref}}(\text{Zn})]^2 \\
 & + C'' [W_{\text{ref}} - W_{\text{ref}}(\text{Al})]^2
 \end{aligned}$$

and $W_{\text{ref}} = f(t)$.

C, C', C'' are zero for $t \leq t_{\text{Sn}}, t_{\text{Zn}}$ and t_{Al} respectively.

Both schemes have the following features :

- a) four partially overlapping subranges are generated, each subrange requiring only one extra fixed point with respect to the lower one ;
- b) a total of up to six fixed points is required ;
- c) first-derivative continuity is secured at every intermediate junction point. The second-derivative continuity is also provided by the parametric scheme over the whole range and by the reference function scheme up to t_{Zn} ;
- d) only the functional relationship $F(\theta)$, or $f(t)$, has to be defined with the most accurate thermodynamic data.

In addition, the reference-function scheme provides first and second-derivative continuity at 0 °C for every particular PRT, if W_{ref} is in its turn continuous. This continuity is not so easily achieved with the parametric scheme. Moreover, with the reference-function scheme, alternative definitions in restricted ranges can be readily introduced. For instance, the W -difference can be determined with a simple quadratic equation passing through calibrations at the triple points of Hg, water and Ga and providing from, say, - 40 °C to + 40 °C an excellent reproducibility.

An alternative interpolation scheme, still based on a reference function, was recently proposed by Connolly *et al.* [12]. It entails a continuous reference function from 0 °C to t_{Ag} and a deviation function $\Delta W(t)$ expressed by a second-order polynomial in t , with coefficients determined using the following points, with the listed probable uncertainties :

0-460 °C	Sn-Zn	$\pm 0,5 \text{ mK}$
0-660 °C	Cd (or Zn)-Al	$\left\{ \begin{array}{l} \pm 2 \text{ mK up to } 460 \text{ °C} \\ \pm 5 \text{ mK from } 460 \text{ to } 700 \text{ °C} \end{array} \right.$
0-962 °C	Zn-Ag	

This scheme produces some non-uniqueness and a possible discontinuity in slope at 0 °C.

To generate a reference function from 0 °C to 962 °C will require at least two steps. In the first one a function W vs. t , continuous over the whole range, will be generated using a PRT of high stability and possessing as far as possible the best properties of a PRT designed for this temperature range. Particularly, it should exhibit a minimum amount of electrical leakage at high temperature. An interpolating scheme of the type described by Jung and Li Xumo can be useful for this purpose. Then, the W vs. t function will be transformed to match the reference function below 0 °C. The transformation rule consists in plotting the W -difference of the low-temperature reference PRT with respect to the high-temperature one as a function of W and then extending this plot up to W (Ag) in a way that is plausible in the light of the current difference functions of groups of HTPRTs. Clearly, the resulting $W_{\text{ref}} = f(t)$ will be to some extent arbitrary. However, as the transformation rule is uniquely defined, it would always be possible to trace the reference function back to the reference thermometer. The mismatch in α between the high-temperature reference thermometer and the low-temperature one can be considerably reduced using for the latter a PRT with $\alpha \geq 0,0039265 \text{ K}^{-1}$. It seems feasible that the mismatch can be reduced to within $\pm 10^{-7} \text{ K}^{-1}$.

$W_{\text{ref}}(t)$ can also be defined assuming two values for α and δ [12]. From them, $W(\text{Sn})$ and $W(\text{Zn})$ are readily obtained. $W(\text{Al})$ and $W(\text{Ag})$ are then determined using appropriate t' -values for these fixed points. However, it has not yet been established whether available t' -values are unique or not.

The reference-function approach rests on the assumption that the reference thermometer, either artificial or real, well represents the behaviour of all other PRTs. This assumption may fail at high temperature, where we know that PRTs exhibit, to some extent, undesirable effects such as electrical leakages. A reference function based on a partially leaking PRT may be inadequate when better PRTs will be available.

To solve this problem and still retain the reference-function approach it is necessary to be able to modify the reference function when it becomes necessary, but without, of course, issuing a new ITS.

The parametric approach does not encounter this difficulty because

the better is the PRT the better is the associated scale, provided that the fixed points are good. Unfortunately, it is not possible to match the two schemes, combining the best features of both.

April 1987

References

- [1] KEMP, R. C. *In* : Temperature measurement 1986, Beijing, China Academic Publishers, Wang, L. and Ling, S. eds, 1986, pp. 85-90.
 - [2] KEMP, R. C., BESLEY, L. M. and KEMP, W. R. G. *Metrologia*, **21**, 1985, pp. 139-146.
 - [3] ZHANG, J. and BERRY, R. J. *In* : Temperature measurement 1986, Beijing, China Academic Publishers, Wang, L. and Ling, S. eds, 1986, pp. 151-156.
 - [4] BERRY, R. J. *In* : Temperature measurement 1986, Beijing, China Academic Publishers, Wang, L. and Ling, S. eds, 1986, pp. 157-163.
 - [5] SAWADA, S., ARAI, M. and SAKURAI, H. *In* : Temperature measurement 1986, Beijing, China Academic Publishers, Wang, L. and Ling, S. eds, 1986, pp. 232-237.
 - [6] BEDFORD, R. E. and MA, C. K. *In* : Temperature, Its Measurement and Control in Science and Industry, New York, American Institute of Physics, Schooley, J. F. ed., Vol. 5, Part 1, 1982, pp. 361-369.
 - [7] MC ALLAN, J. V. *In* : Temperature, Its Measurement and Control in Science and Industry, New York, American Institute of Physics, Schooley, J. F. ed., Vol. 5, Part 1, 1982, pp. 371-376.
 - [8] JONES, T. P. and TAPPING, J. The determination of the thermodynamic temperature of thermometry fixed points in the range 660 to 1064 °C (Document CCT/87-15).
 - [9] BONGIOVANNI, G., CROVINI, L. and MARCARINO, P. *High Temp. — High Pressure*, **4**, 1972, p. 573.
 - [10] CROVINI, L., and MARCARINO, P. Reference points between aluminium and silver freezing points. Text presented at the workshop on HTPRTs, NBS, Gaithersburg, October 7-10, 1985.
 - [11] JUNG, H. J. and LI, X. Proposal of an Interpolating Procedure for Standard Platinum Resistance Thermometers in the Range 0 °C until 961 °C (Document CCT/87-8).
 - [12] CONNOLLY, J. J., JONES, T. P. and TAPPING, J. A Proposed Definition of an International Temperature Scale in the Range 0 to 962 °C (Document CCT/87-46).
-

APPENDIX T 6

Report of Working Group 4*

(IPTS below 24 K — Thermodynamic temperatures below 1 064 °C)

(Document CCT/87-13)

A major task for the WG has been that of preparing a document on recommended values of $T - T_{68}$, for discussion within the CCT and, ultimately, publication in *Metrologia* [1]. A rough draft was prepared in July 1984 and circulated to WG members to stimulate ideas; after that, the document evolved through many versions. The president of the CCT and the chairman of WG 3 were kept informed of progress. The WG was able to profit, in pursuit of its task, from attendance of several members at a time at various thermometry conferences during 1985/86, viz., High-Temperature Platinum Resistance Thermometry Workshop (see report of WG 3, p. T 126), National Bureau of Standards, Washington, October 7-10, 1985 (R.P. Hudson, R.J. Soulen, Jr. and C.A. Swenson); Measurement and Control of Low Temperatures, Institute of Physics (London), March 6, 1986 (M. Durieux, R.P. Hudson and R.L. Rusby); Refrigeration and Thermometry below 1 K, PTB Berlin, September 12-13, 1986 (R.P. Hudson, R.L. Rusby and R.J. Soulen, Jr.). A penultimate document was circulated to all members and to the chairmen of WGs 1, 2 and 3 in December 1986 and the finished article was formally submitted [Document CCT/87-9] to the BIPM shortly thereafter.

At the end of the HTPRT Workshop mentioned above, members of WGs 3 and 4 able to be present at NBS that day met to discuss topics of mutual interest. Progress in the WG 4 task (above) was briefly reviewed. The absence of any further developments to enable the CCT

(*)The members of this Working Group are: M.M. 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.

to proceed beyond its conclusions reached in June 1984 at its 15th meeting, on the subject of revising the IPTS below 30 K, was noted. The probable important rôle in any new scale of the CSIRO reference function [2] for PRT interpolation in the range 13,8 K to 273 K was recognized by all. WG 4 members were at pains to emphasize, however, that such a rôle would not — as far as could be seen at present — in any way modify the tentative proposals [3] discussed at the CCT meeting in 1984 for scale-definition below 25 K by either an interpolating gas thermometer *or* a PRT, pains that came to naught, evidently, in view of the omission of this emphasis from the minutes of the meeting!

Working Group furnished, on request, an updated, brief review of the interpolating gas thermometer, 3 K to 25 K, to WG 1; in addition, the chairman was able to assist WG 1 in some of its deliberations at the BIPM.

The specialist Low Temperature conferences mentioned earlier generated nothing new or urgent for members of the CCT. A certain general interest was expressed at Berlin in tying down the ³He melting curve definitively, to give a convenient practical scale for the range from 0,001 K up to the region of 1 K. Both meetings organized reviews of the CCT and its work, but there was a negligible feedback re the CCT's present concerns.

March 1987

References

- [1] *BIPM Com. Cons. Thermométrie*, **15**, 1984, p. T119.
 - [2] R.C. KEMP, L.M. BESLEY and W.R.G. KEMP. A Reference Function for Platinum Resistance Thermometer Interpolation Between 13.8 K and 273.15 K, Document CCT/84-8 submitted to the 15th meeting of the CCT in 1984 and *Metrologia*, **21**, 1985, pp. 139-146.
 - [3] See for example: *BIPM Com. Cons. Thermométrie*, **15**, 1984, Appendix T2, pp. T128-131.
-

APPENDIX T 7

Deviation of IPTS-68 and EPT-76 from Thermodynamic Temperature

R. P. HUDSON, M. DURIEUX, R. L. RUSBY, R. J. SOULEN and C.A. SWENSON
(Working Group 4 of the Comité Consultatif de Thermométrie)

(Document CCT/87-9)

1. Introduction

Some ten years ago the Comité Consultatif de Thermométrie (CCT) decided that the moment was opportune for publishing an assessment of the differences between the International Practical Temperature Scale of 1968, IPTS-68 [1] and thermodynamic temperature above 0 °C. An article was duly prepared by Working Group 3 of the CCT and published in *Metrologia* [2]. Since that time, experimental efforts have continued above 0 °C while new research efforts below 0 °C have yielded interesting and important results. At its meeting in June 1984, the CCT charged its present Working Group 4 with updating the 1977 publication referred to above, to cover the entire range of the IPTS-68 and to further extend the study to include the low-temperature region spanned by the provisional temperature scale EPT-76 [3], examining the significance for the latter of the latest experimental investigations.

New data which are considered herein include: noise thermometry from 2,2 K to 4,2 K and at 84 K; acoustic thermometry from 4,2 K to 20 K; dielectric-constant gas thermometry in the range 4,2 K to 27,1 K; constant-volume gas thermometry above and below 0 °C; relative-isotherm thermometry below 0 °C; magnetothermodynamic measurements near 1 K; magnetic thermometry, 0,5 - 83 K; total-radiation thermometry, - 40 °C to 100 °C; noise thermometry, 630 °C to 962 °C; spectral-radiation thermometry, 430 °C to the gold point. These will be taken in the order of increasing temperature.

2. Temperatures below 273 K

A number of experiments in recent years can be used to establish the differences between currently-used temperature scales and thermodynamic temperatures. At low temperatures, these experiments are consistent (within ± 1 mK) with the gas thermometry of Berry (the NPL-75 scale, 2,6 K to 27,1 K) [4], while at higher temperatures, the various results are represented well by the platinum resistance thermometer (PRT) reference relation proposed by Kemp, Besley and Kemp [5], which also is consistent with NPL-75 from 13,8 to 27 K. These two temperature scales are assumed to represent thermodynamic temperature, T , and they serve as the baselines (augmented by EPT-76 below 2,6 K, as discussed by Durieux *et al.* [6]) in the summary of scale differences which is given in figure 1 and in the comparisons of actual data which are given in figure 2. These baselines may be assessed to be uncertain — at the level of one standard deviation (1 s.d.) — to $\pm 0,7$ mK, throughout the range.

The various experimental data are related through fixed-point determinations, or through comparisons of standard thermometers. Fixed points have been intercompared through exchange of sealed triple-point cells under the auspices of the CCT [6a]. The preferred thermometers

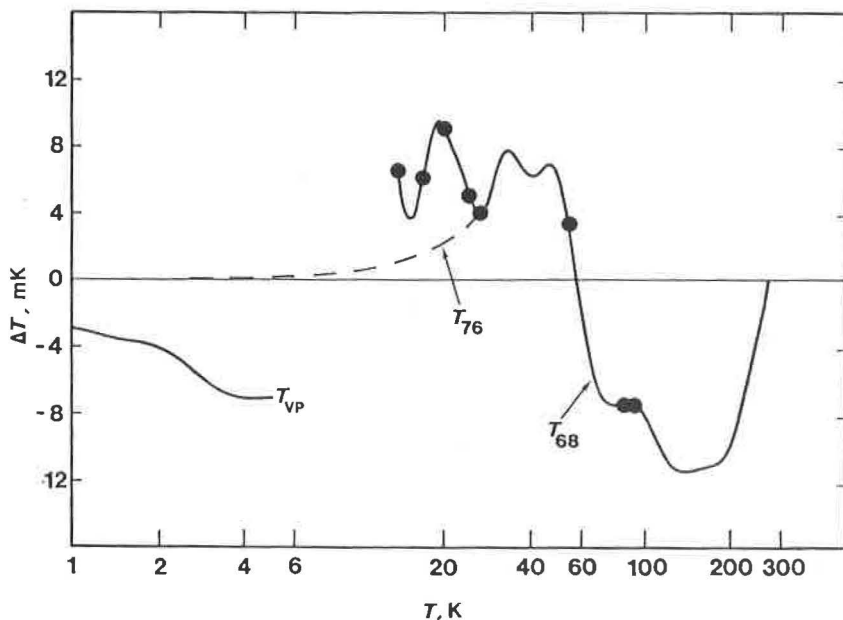


Fig. 1. — Deviation ΔT of various low-temperature scales T' from T_{ref} , the best estimate of thermodynamic temperature in the range 1 K to 273 K, as devised by Kemp *et al.* [5]. The base line is a composite of T_{76} from 1 K to 2,6 K, T_{NPL-75} from 2,6 K to 13,81 K and the NML/CSIRO reference function [5] from 13,81 K to 273,15 K.

The scales T' comprise: T_{vp} , vapour pressure scales for ^4He , T_{34} [10] and ^3He , T_{62} [11]; T_{68} , the IPTS-68 [1]; and T_{76} , the EPT-76 [3]. The dots indicate the fixed points at (approximately) 14 K, 17 K, 20 K, 25 K, 27 K, 54 K, 84 K and 90 K.

are usually rhodium-iron thermometers [7] at low temperature, and standard platinum resistance thermometers (SPRTs) for temperatures above 13,8 K [8]. The relationships between versions of the IPTS-68 which are maintained at the various standards laboratories by means of PRTs have been determined in an international comparison carried out at the U.K. National Physical Laboratory by Ward and Compton in 1975-1977 [9]. These relationships were used by Kemp *et al.* [5] to reduce the various data to a common basis to give the $T - T_{68-NPL}$ differences which are plotted in figure 1.

The deviations from T of the helium vapour pressure scales (T_{58} [10] for ^4He , T_{62} [11] for ^3He) and of the IPTS-68 (Fig. 1) are of opposite sign and illustrate the inconsistencies between these scales which provided one of the motivations for the adoption of the EPT-76 [3]. Figure 1 also shows that the deviations of T_{68} from T are particularly erratic below 30 K, and the upper limit of the EPT-76 was chosen to overlap this region. The high-temperature deviation of T_{76} from T was intentionally

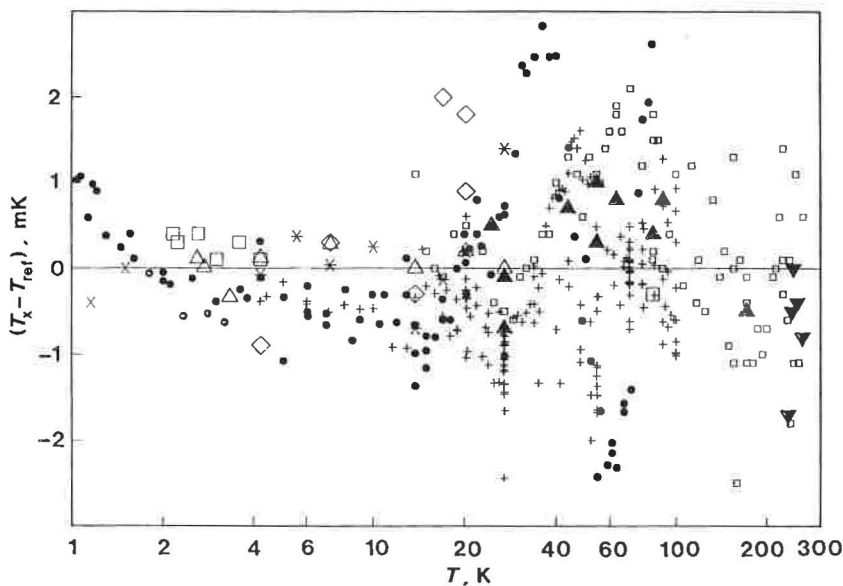


Fig. 2. — Deviation of data points, T_x , of various authors from the CSIRO reference function temperature [5]:

- × Fisher and Brodale [13],
- △ NPL-75 isotherms [4],
- Munster noise thermometry [16],
- ◇ Colclough acoustic thermometry [17],
- * Gagan dielectric-constant gas thermometry [18, 19],
- ▲ PTB isotherms [22],
- ▼ NPL total radiation results [25],
- Cetas magnetic thermometry [24],
- + KOL gas thermometry referenced to 84 K [20],
- NML gas thermometry referenced to 273,15 K [15],
- △ NML isotherms referenced indirectly or directly to 273,15 K [15].

built into the scale since a primary objective was that it join smoothly on to T_{68} near 30 K. Magnetic thermometry data down to 0,5 K which were referred to NPL-75 were used with new vapour pressure data [12] to extend EPT-76 to this lower temperature limit. Additional data are available near 1 K from the magnetothermodynamic measurements of Fisher and Brodale [13] (on copper potassium Tutton salt) in which calorimetry was combined with the magnetic cooling technique. New vapour pressure relations to replace T_{58} and T_{62} were incorporated into EPT-76; subsequently, analytical forms of these relations were published [14].

Figure 2 provides a comparison of the various recent determinations of thermodynamic temperature in the range 1 K to 273 K. The baseline is a best estimate of thermodynamic temperature devised by Kemp *et al.* [5, 15] as a mean of the experimental data. Berry's isotherm gas thermometry results are in good agreement with the noise thermometry of Klein, Klempt and Storm from 2 K to 4 K [16] and the acoustic velocity measurements by Colclough (4 K to 20 K) [17]. Berry's direct determination of the boiling point of equilibrium hydrogen with respect to the triple point of water ($20,271\ 2 \pm 0,000\ 9$) K was used as a reference temperature for a number of other low-temperature thermometry experiments. These include the dielectric-constant gas thermometry by Gugan and Michel (4 K to 27 K) [18] and analyses by Gugan [19], and the gas thermometry of Steur and Durieux (4 K to 100 K) [20] and of Kemp *et al.* (14 K to 285 K) [15]. The experiments of Kemp *et al.* involved both constant volume (CVGT) and isothermal gas thermometry. The isotherm experiments provided both temperatures and the second virial coefficients which are required for the analysis of the CVGT experiments. These isotherms were originally referenced to NPL-75 at 20 K. When they are instead referenced to the triple point of water, they lead to a value of the hydrogen boiling point (20, 271 6 K) which is still in close agreement (0,4 mK higher) with that given by Berry. This new value, rather than that of Berry, has been used by Kemp *et al.* [15] as the reference temperature in the calculation of their data as displayed in figure 2. Steur and Durieux [20] referenced their CVGT data to Berry's 20 K point and used virial coefficients [21] slightly different from those of Kemp *et al.*

Figure 2 shows that all these results are consistent to better than ± 2 mK with the triple-point-referenced isotherms of Weber at 27 K, 54 K and 90 K [22], and with noise thermometry of Storm at 83 K [23]. Figure 2 contains, in addition, magnetic thermometry data due to Cetas [24], for which the four adjustable parameters were determined by fits to the

reference relation of Kemp *et al.* [5]. At higher temperatures, Quinn and Martin [25] have used absolute radiation thermometry to determine temperatures from 233 K to 373 K, results which are of particular interest because they stem from experiments quite different from CVGT and because they overlap the ranges of low-temperature [15] and high-temperature [26] gas thermometry. We include their data for $T \leq 273$ K in figure 2.

Figure 2 shows excellent agreement between various types of data over the entire temperature range from 1 K to 273 K. While our initial choice of NPL-75 and the reference function of Kemp *et al.* for the base line of this comparison (*see above*) was somewhat arbitrary, the results indicate that they are very satisfactory representations (within ± 2 mK) of current experimental data.

3. The range 273 K to 900 K

In this region the only recent primary thermodynamic data are those of Quinn and Martin [25], data which agree within the combined uncertainties with the CVGT data of Guildner and Edsinger [26] while indicating ΔT s that are everywhere somewhat larger in magnitude.

In the temperature range from 373 K (100 °C) to the freezing point of zinc (693 K; 420 °C), no new thermodynamic determinations are available for comparison with those reported in 1976 by Guildner and Edsinger [26]. This is clearly a temperature region in need of independent confirmation, especially since spectral radiation pyrometry measurements extending upward from the zinc melting point rely heavily on the results quoted by Guildner and Edsinger. In figure 3 we have plotted the data of Ref. [25], those of Ref. [15] above 250 K, and the data of Ref. [26]. The line through the data is our attempt at a «best» curve below 370 K and is identical with Guildner and Edsinger's own curve above this point. It seems to us reasonable to assess a 1 s.d. uncertainty as ranging from 1 mK at 200 K to 3 mK at 730 K.

Thermodynamic temperatures as determined by spectral radiation thermometry in the range 410 °C (683 K) to 630 °C (903 K) have been published by Jung [27], Bonhoure and Pello [28] and Coates, Andrews and Chattle [29]. Each took as the reference a value of thermodynamic temperature in the range 420 °C to 460 °C (693 K to 733 K) obtained by correcting IPTS-68 values according to the differences published by Guildner and Edsinger [26]. Although the principle of the method used

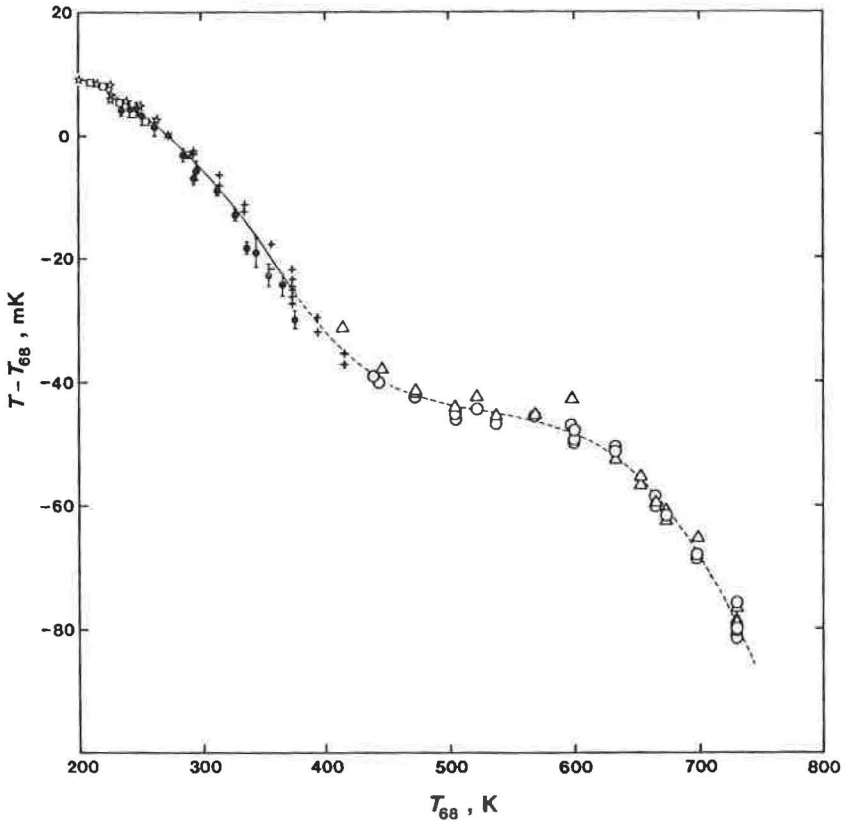


Fig. 3. — Plot of $T - T_{68}$ for the data of several authors, 200 K to 730 K :

- * , □ : Kemp *et al.* [15],
- : Quinn and Martin [25],
- + , △ , ○ : Guildner and Edsinger [26].

The full line is an arbitrary « best curve » through the data below 370 K and the triple point of water (*), drawn to join smoothly on to the curve of Guildner and Edsinger (dotted line).

was the same in each case, the pyrometers themselves and the experimental procedures were significantly different. The results are in good agreement and are summarized in figure 4; they lead to a value for $(T - T_{68})$ at 630 °C of $(-0,15 \pm 0,008) ^\circ\text{C}$. The drawn line is as published in Ref. [27], with an indication at the high-temperature end of the beginning of the thermocouple region (*see below*). Following Jung [27], we assess the 1 s.d. uncertainty as rising approximately linearly with temperature from 3,5 mK at 730 K to 7 mK at 900 K, which uncertainties must be combined with one of 3 mK in the value of the reference temperature at 730 K.

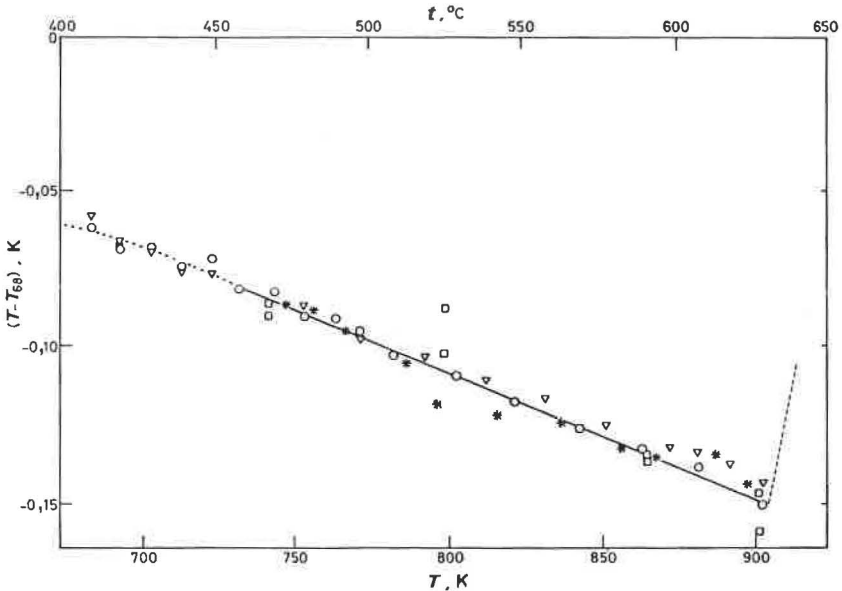


Fig. 4. — Plot of $T - T_{68}$ for the data of several authors, 680 K to 900 K :

- , ▽ : Jung [27],
- : Bonhoure and Pello [28], preliminary results,
- * : Coates, Andrews and Chattle [29].

The rising dashed line at the right indicates the discontinuity in $d(T - T_{68})/dT$ at the junction of the two different «interpolating-instrument regions», 904 K, as measured by Bedford *et al.* [39]. The solid line is the function $0,2154 \text{ K} - 0,4038 \times 10^{-3} T_{68}$ as derived by Jung [27] and the dotted continuation to the left is part of the curve developed by Guildner and Edsinger [26].

4. Temperatures above 900 K

Spectral radiation pyrometry at higher temperatures is usually referred to the gold point using the IPTS-68 value. Bedford [30] has summarized (and adjusted) several sets of data for the important “silver-gold interval”. The five experiments considered are in close agreement that, taking the gold point to be 1 064,43 °C, the silver point should be 962,05 °C, not 961,93 °C. Jones and Tapping [31], however, reported shortly thereafter a value of $(961,98 \pm 0,015)$ °C.

Only two experiments have yielded values for the silver and gold points based on a reference at 630 °C. Bonhoure [32] calculated his values on the assumption that IPTS-68 is correct at 630 °C, while Andrews and Gu Chuanxin [33] applied a correction of $-0,029$ °C at that temperature. Both of these must now be recalculated on the basis

that $T - T_{68} = -0,15\text{ }^{\circ}\text{C}$ at $630\text{ }^{\circ}\text{C}$, and this leads to the following results :

	F.P. Ag/ $^{\circ}\text{C}$ (961,93 $^{\circ}\text{C}$ on IPTS-68)	F.P. Au/ $^{\circ}\text{C}$ (1 064,43 $^{\circ}\text{C}$ on IPTS-68)
Bonhoure [32]	961,73 \pm 0,13	1 064,05 \pm 0,16
Andrews and Gu Chuanxin [33]	961,82 \pm 0,10	1064,17 \pm 0,11

the quoted uncertainties indicating the standard deviation of the mean. These results are plotted in figure 5. Note that Bonhoure's values give a silver-gold interval marginally below that of other authors (*see* Bedford's summary), while Andrews and Gu Chuanxin's values have not yet been finalized.

Further data for the silver and gold points are available from the noise thermometry of Crovini and Actis [34] and the absolute radiometry of Blevin and Brown [35], *see* figure 5. These are of special significance (even with their relatively large uncertainties) because they are the only recent measurements of thermodynamic temperatures in this range in which spectral radiation pyrometry was not used, and because they do not require a high-temperature reference point. Crovini and Actis obtained a value for the silver point of $(962,00 \pm 0,34)\text{ }^{\circ}\text{C}$ and Blevin and Brown obtained $(1\ 064,12 \pm 0,40)\text{ }^{\circ}\text{C}$ for the gold point.

The defining instrument of the IPTS-68 from $630,74\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $1\ 064,43\text{ }^{\circ}\text{C}$ is the Pt-10 % Rh/Pt thermocouple, and a complete assessment of the deviation ($T - T_{68}$) in this range therefore involves direct or indirect comparison with thermocouples of this type. Quinn, Chandler and Chattle [36] and Bonhoure [32] both used spectral radiation pyrometry below the gold point in conjunction with thermocouples in order to investigate the deviations in the scale. In addition, Bedford and Ma [37] obtained values for the melting point of copper-71,9 % silver eutectic with thermocouples and a radiation pyrometer and hence obtained a value of ($T - T_{68}$) at that temperature ($780\text{ }^{\circ}\text{C}$). All these data are plotted in figure 5, together with results mentioned earlier, with the radiation pyrometry data recalculated either so as to give ($T - T_{68}$) = $-0,15\text{ }^{\circ}\text{C}$ at $630\text{ }^{\circ}\text{C}$ or — if this temperature was not measured (*i.e.*, for Quinn *et al.* and for Bedford and Ma) — on the assumption that the gold-point temperature is $1\ 064,12\text{ }^{\circ}\text{C}$. Note that this is not exactly the average of the two values given above; this is because other data for the silver-gold interval (detailed in Ref. [30]) have been taken into account. With the reduction of the gold-point

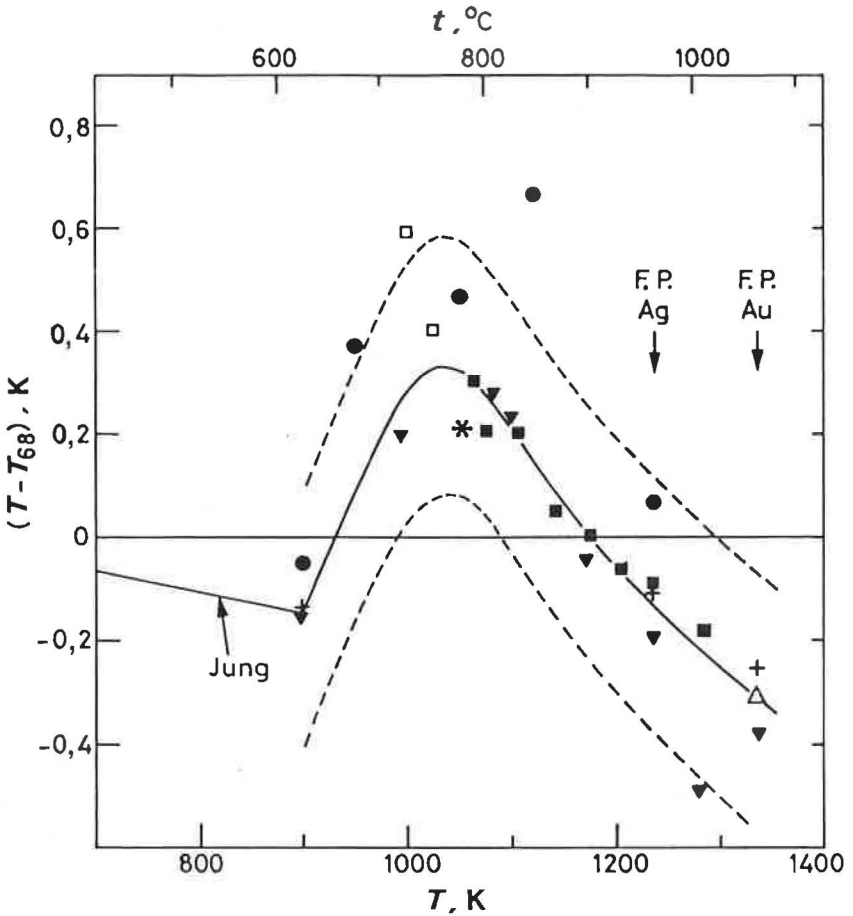


Fig. 5. — Plot of $T - T_{68}$ for the data of various authors, 900 K to 1337 K :

▼ Bonhoure [32] and + Andrews and Gu Chuanxin [33], both adjusted to the condition $T - T_{68} = -0,15\text{ }^{\circ}\text{C}$ at $630\text{ }^{\circ}\text{C}$; ● Crovini and Actis [34]; △ Blevin and Brown [35]; □, ■ Quinn *et al.* [36], the open squares signalling that the authors attributed a larger uncertainty to these points; * Bedford and Ma [37].

The linear portion of the solid line, on the left of the diagram, is due to Jung [27], see figure 4; the remaining (curved) portion is the authors' arbitrary fit to the experimental data points. The dashed lines delimit an uncertainty band of $\pm 0,25\text{ K}$ (see text).

and silver-point temperature values by different amounts, the interval becomes $102,35\text{ }^{\circ}\text{C}$ rather than the $102,50\text{ }^{\circ}\text{C}$ of the IPTS-68. Our re-evaluation is similar to that carried out by Tischler and Jimenez Rebagliati [38].

Figure 5 shows substantial negative differences up to $630\text{ }^{\circ}\text{C}$ (as in figure 4) and again above $900\text{ }^{\circ}\text{C}$, with large positive differences in between. The latter presumably arise in part because of errors in assigning temperatures to the silver and gold points and also because

the quadratic interpolation formula does not adequately represent the thermocouple characteristic. The scatter and uncertainty of the data mainly stem from limitations in the calibration and use of thermocouples in accurate measurements. The solid curve drawn through the data in figure 5 is our admittedly subjective « best curve ». The « uncertainty band » (dashed lines) is drawn about this curve at $\pm 0,25$ °C, not as a result of any statistical analysis or of a careful assessment of individual researches, but chiefly to help the reader assess the scatter in the data presented.

A further difficulty in the IPTS-68 is the discontinuity in the first derivative, $d(T - T_{68})/dT$, at 630,74 °C where the thermocouple takes over from the platinum resistance thermometer. The relative discontinuity in dT/dT_{68} has recently been measured by Bedford *et al.* [39] to be $0,0051 \pm 0,0010$ (one standard deviation). This is larger than the 0,001 deduced by Evans and Wood [40] but accords well with what would be inferred from the noise thermometry and radiation pyrometry results in figure 5. From this result and using Jung's value [27] of -4×10^{-4} for the derivative just below 630,74 °C, we obtain the value $+4,7 \times 10^{-3}$ for the region just above (see figure 5).

In order to overcome the deficiencies in this region of the IPTS-68 it has long been proposed that the thermocouple should be replaced as the interpolating instrument. This could be achieved by extending the range of the platinum resistance thermometer to higher temperatures so as to meet the radiation pyrometry range at the freezing point either of silver or of gold. Therefore a great deal of effort has been expended in the development and evaluation of platinum resistance thermometers suitable for practical use at these elevated temperatures. It is clearly more useful to measure the resistance of such thermometers as a function of thermodynamic temperature than to attempt better measurement of the deviation of IPTS-68 as interpolated by thermocouples.

January 1987

References

- [1] The International Practical Temperature Scale of 1968 (Amended Edition 1975). *Metrologia*, **12**, 1976, pp. 7-17.
- [2] QUINN, T.J., GUILDNER, L.A and THOMAS, W., *Metrologia*, **13**, 1977, pp. 175-176 ; *ibid.*, 1977, pp. 177-178.
- [3] The 1976 Provisional 0.5 K to 30 K Temperature Scale. *Metrologia*, **15**, 1979, pp. 65-68.
- [4] BERRY, K.H., *Metrologia*, **15**, 1979, pp. 89-115.

- [5] KEMP, R.C., BESLEY, L.M. and KEMP, W.R.G., *Metrologia*, **21**, 1985, pp. 139-146.
- [6] DURIEUX, M., ASTROV, D.N., KEMP, W.R.G. and SWENSON, C.A., *Metrologia*, **15**, 1979, pp. 57-63.
- [6a] PAVESE, F., International Intercomparison of Fixed Points by Means of Sealed Cells (13.81 K to 90.686 K). *BIPM Monographie 84/4*, 1984 ; PAVESE, F. *et al.*, *Metrologia*, **20**, 1984, pp. 127-144.
- [7] RUSBY, R.L., *In*: Temperature Measurement, 1975, London, Institute of Physics, Conference Series N° 26, 1975, pp. 125-130.
- [8] See, for example: QUINN, T.J., Temperature, London, Academic Press, 1983, pp. 187-189 ; PRESTON-THOMAS, H., BLOEMBERGEN, P. et QUINN, T.J., Supplementary Information for the IPTS-68 and the EPT-76. *BIPM Monographie*, 1983, pp. 103-117.
- [9] WARD, S.D. and COMPTON, J.P., *Metrologia*, **15**, 1979, pp. 31-46.
- [10] BRICKWEDDE, F. G., VAN DIJK, H., DURIEUX, M., CLEMENT, J.R. and LOGAN, J.K., *J. Res. Natl. Bur. Stand.*, **64A**, 1960, pp. 1-17.
- [11] ROBERTS, T.R., SHERMAN, R.H. and SYDORIAK, S.G., Authors combined variously in 4 publications : *J. Res. Natl. Bur. Stand.*, **68A**, 1964, pp. 547-558, pp. 559-565, pp. 567-578, pp. 579-588.
- [12] RUSBY, R.L. and SWENSON, C.A., *Metrologia*, **16**, 1980, pp. 73-87.
- [13] FISHER, R.A. and BRODALE, G.E., *Physica*, **109** and **110B**, 1982, pp. 2126-2128.
- [14] DURIEUX, M. and RUSBY, R.L., *Metrologia*, **19**, 1983, pp. 67-72.
- [15] KEMP, R.C., KEMP, W.R.G. and BESLEY, L.M., *Metrologia*, **23**, 1986, pp. 61-86.
- [16] KLEIN, H.-H., KLEMP, G. and STORM, L., *Metrologia*, **15**, 1979, pp. 142-154.
- [17] COLCLOUGH, A.R., *Proc. Roy. Soc. London A*, **365**, 1979, pp. 349-370 ; Temperature, vol. 4, Plumb, H.H. ed., Pittsburgh, Instrum. Soc. of America, 1972, pp. 365-372.
- [18] GUGAN, D. and MICHEL, G.W., *Metrologia*, **16**, 1980, pp. 149-167.
- [19] GUGAN, D., *Metrologia*, **19**, 1984, pp. 147-162.
- [20] STEUR, P.P.M. and DURIEUX, M., *Metrologia*, **23**, 1986, pp. 1-18 ; STEUR, P.P.M. Thesis, University of Leiden, 1983 (unpublished).
- [21] STEUR, P.P.M., DURIEUX, M. and McCONVILLE, G.T., *Metrologia*, **24**, 1987, pp. 69-77.
- [22] WEBER, F., *BIPM Com. Cons. Thermométrie*, **15**, 1984 (Document CCT/84-6).
- [23] STORM, L., unpublished, quoted in Ref. [5].
- [24] CETAS, T.C., *Metrologia*, **12**, 1976, pp. 27-40.
- [25] QUINN, T.J. and MARTIN, J.E., *Metrologia*, **20**, 1984, pp. 163-164 ; *Phil. Trans. Roy. Soc. London A*, **316**, 1985, pp. 85-189.
- [26] GUILDNER, L.A. and EDSINGER, R.E., *J. Res. Natl. Bur. Stand.*, **80A**, 1976, pp. 703-738.
- [27] JUNG, H.J., *Metrologia*, **20**, 1984, pp. 67-69 ; *ibid.*, **23**, 1986, pp. 19-31.
- [28] BONHOURE, J. and PELLO, R., *BIPM Com. Cons. Thermométrie*, **15**, 1984 (Document CCT/84-21).
- [29] COATES, P.B., ANDREWS, J.W. and CHATTLE, M.V., *Metrologia*, **21**, 1985, pp. 31-35.
- [30] BEDFORD, R.E., *Metrologia*, **18**, 1982, pp. 169-170.

- [31] JONES, T.P. and TAPPING, J. *In* : Temperature, vol. 5, Schooley, J.F. ed., New York, American Institute of Physics, 1982, pp. 169-174.
 - [32] BONHOURE, J., *Metrologia*, **11**, 1975, pp. 141-150.
 - [33] ANDREWS, J.W. and GU CHUANXIN, *BIPM Com. Cons. Thermométrie*, **15**, 1984 (Document CCT/84-39).
 - [34] CROVINI, L. and ACTIS, A. *Metrologia*, **14**, 1978, pp. 69-78.
 - [35] BLEVIN, W.R. and BROWN, W.J., *Metrologia*, **7**, 1971, pp. 15-29.
 - [36] QUINN, T.J., CHANDLER, T.R.D. and CHATTLE, M.V., *Metrologia*, **9**, 1973, pp. 44-46; QUINN, T.J., *Metrologia*, **10**, 1974, p. 115.
 - [37] BEDFORD, R.E. and MA, C.K., *In* : Temperature, vol. 5, Schooley, J.F. ed., New York, American Institute of Physics, 1982, pp. 361-369.
 - [38] TISCHLER, M. and JIMENEZ REBAGLIATI, M., *Metrologia*, **21**, 1985, pp. 93-96.
 - [39] BEDFORD, R.E., MA, C.K. and MACREADY, W., *In* : Temperature Measurement, Da Jie ed., Beijing, China Acad. Publishers, 1986, pp. 110-115; BEDFORD, R.E., MA, C.K., MACREADY, W. and STESKI, D., *Metrologia*, **23**, 1986/87, pp. 197-205.
 - [40] EVANS, J.P. and WOOD, S.D., *Metrologia*, **7**, 1971, pp. 108-130.
-

TABLE DES MATIÈRES

COMITÉ CONSULTATIF DE THERMOMÉTRIE

16^e session (1987)

	Pages
Notice sur les organes de la Convention du Mètre	v
Liste des membres	vii
Ordre du jour	x
Rapport au Comité International des Poids et Mesures, par M. Durieux	T 1
Rapport des présidents des groupes de travail. Projet de résolution proposé par le CIPM à la 18 ^e CGPM. Étude du projet de rédaction de l'EIT-90. Composition et tâches des groupes de travail. Déclaration (1987/1). Échéancier pour la préparation de l'EIT-90	2
Recommandation T1 (1987): Nécessité de travaux fondamentaux en thermométrie	7
Recommandation T2 (1987): Méthodes simplifiées et économiques de mesure des températures	8
Compte rendu des séances de la 16^e session du CCT	9
1. Ouverture de la session. Nomination d'un rapporteur	9
2. Approbation du compte rendu des séances de la 15 ^e session du CCT (1984)	9
3. Documents présentés à la 16 ^e session du CCT	9
4. Remplacement de l'EIPT-68	9
4.1. Acceptation d'une nouvelle échelle; état d'esprit à cet égard	9
4.2. Échéance pour la préparation d'une nouvelle échelle (généralités)	10
5. Groupes de travail	11
5.1. Groupe de travail 1	11
5.1.1. Remarques préliminaires sur le projet d'EIT	11
5.1.2. Deuxième édition de « Supplementary Information for the IPTS-68 and the EPT-76 » (Supplementary Information for the ITS-90)	12
5.2. Groupe de travail 2: Projet de monographie « Techniques for Approximating the IPTS-68 and the EPT-76 »	12

5.3. Groupe de travail 3 : Propositions pour une fonction de référence, des méthodes d'interpolation et des domaines de température pour le thermomètre à résistance de platine	13
5.4. Groupe de travail 4	15
5.4.1. Différences $T - T_{68}$ et $T - T_{76}$	15
5.4.2. Spécifications pour le thermomètre à gaz d'interpolation	15
6. Remplacement de l'EIPT-68 (suite)	16
6.1. Situation actuelle du thermomètre à résistance de platine pour la mesure des hautes températures	18
6.2. Extension éventuelle de l'EIT-90 au-dessous de 1 K	21
6.3. Problèmes divers	23
6.4. Mesures à prendre	25
7. Annonce aux utilisateurs des modifications à venir de l'EIPT	26
8. Discussion du projet de résolution du CIPM à présenter à la CGPM	26
9. Groupes de travail : travaux futurs et composition	28
10. Remplacement de l'EIPT-68 (suite) : préparation d'une nouvelle échelle (détail des échéances)	30
11. Décision prise en 1985 par le CIPM sur les travaux thermométriques du BIPM	30
12. Publication des documents	31
13. Questions diverses	32
14. Prochaine session du CCT	34
Annexes	35
T 1. Documents de travail présentés à la 16 ^e session du CCT	35
T 2. Rapport du Groupe de travail 1 (Révision de l'EIPT et Renseignements complémentaires)	41
T 3. Rapport du Groupe de travail 2 (Méthodes secondaires de mesure des températures internationales)	42
T 4. Rapport du Groupe de travail 3 (Domaine du thermomètre à résistance de platine)	43
T 5. Additif au rapport du Groupe de travail 3	51
T 6. Rapport du Groupe de travail 4 (EIPT au-dessous de 24 K - Températures thermodynamiques au-dessous de 1064 °C)	57
T 7. Écart de l'Échelle internationale pratique de température de 1968 et de l'Échelle pratique de température de 1976 par rapport aux températures thermodynamiques	59
Notice for the reader of the English version. Avertissement au lecteur de la version anglaise	73
Note on the organs of the Convention du Mètre	75
Agenda	78

Report to the Comité International des Poids et Mesures, by M. Durieux	81
Reports of the chairmen of the WGs. Draft resolution submitted by the CIPM to the 18th CGPM. Discussion of the draft text of the ITS-90. Composition and terms of reference of the WGs. Declaration (1987/1). Timetable for the preparation of the ITS-90	82
Recommendation T1: The necessity for continuing work on fundamental thermometry	87
Recommendation T2: Simplified and economical methods of temperature measurement	88
Minutes of the 16th Meeting of the CCT	89
1. Opening of the Meeting. Designation of a rapporteur	89
2. Approval of the Minutes of the 15th Meeting of the CCT (1984)	89
3. Documents submitted to the 16th Meeting of the CCT	89
4. Replacement of the IPTS-68	89
4.1. Climate for acceptance of a new scale	89
4.2. Timetable for preparation of a new scale (general)	90
5. Working Groups	91
5.1. Working Group 1	91
5.1.1. Preliminary remarks on draft ITS	91
5.1.2. Second edition of « Supplementary Information for the IPTS-68 and the EPT-76 » (Supplementary Information for the ITS-90).	92
5.2. Working Group 2: Draft of monograph « Techniques for Approximating the IPTS-68 and the EPT-76 »	92
5.3. Working Group 3: Proposals for platinum resistance thermometer reference function, interpolation procedures and ranges	93
5.4. Working Group 4	95
5.4.1. Differences $T - T_{68}$ and $T - T_{76}$	95
5.4.2. Specifications for interpolating gas thermometer	95
6. Replacement of the IPTS-68 (continued)	96
6.1. Present status of the high-temperature platinum resistance thermometer.	98
6.2. Possible extension of the ITS-90 below 1 K	101
6.3. Miscellaneous problems	103
6.4. Actions required	105
7. Announcement to users of forthcoming changes in the IPTS-68	106
8. Discussion of CIPM draft resolution to the CGPM	106
9. Working Groups: future work and membership	108
10. Replacement of the IPTS-68 (continued): timetable for preparation of the new scale (detailed)	110
11. CIPM decision of 1985 on thermometry work at BIPM	110
12. Publication of documents	111
13. Miscellaneous subjects	112
14. Next meeting of the CCT	114

Appendices	115
T 1. Working documents submitted to the CCT at its 16th Meeting (<i>see</i> page T 35)	115
T 2. Report of Working Group 1 (Revision of the IPTS and Supplementary Information)	116
T 3. Report of Working Group 2 (Secondary measurement techniques for determining international temperatures)	117
T 4. Report of Working Group 3 (Platinum Resistance Thermometer Range) .	118
T 5. Addendum to Working Group 3 Report	126
T 6. Report of Working Group 4 (IPTS below 24 K-Thermodynamic temperatures below 1 064 °C)	132
T 7. Deviation of IPTS-68 and EPT-76 from Thermodynamic Temperature ...	134



IMPRIMERIE DURAND

28600 LUISANT (FRANCE)

Dépôt légal, Imprimeur, 1988, n° 6390
ISBN 92-822-2101-6

ACHEVÉ D'IMPRIMER : SEPTEMBRE 1988

Imprimé en France