

BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES



COMITÉ CONSULTATIF  
DE THERMOMÉTRIE

Rapport de la 18<sup>e</sup> session  
Report of the 18th Meeting

1993

**COMITÉ CONSULTATIF DE THERMOMÉTRIE**

SESSION DE 1993

MEETING OF 1993



BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES



# COMITÉ CONSULTATIF DE THERMOMÉTRIE

Rapport de la 18<sup>e</sup> session  
Report of the 18th Meeting

1993

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

ISSN 0069-6463

ISBN 92-822-2135-0

---

LISTE DES SIGLES UTILISÉS DANS LE PRÉSENT VOLUME  
LIST OF ACRONYMS USED IN THE PRESENT VOLUME

---

**1. Sigles des laboratoires, commissions et conférences**  
**Acronyms for laboratories, committees and conferences**

BIPM	Bureau international des poids et mesures
CCT	Comité consultatif de thermométrie
CEI/IEC	Commission électrotechnique internationale/International Electrotechnical Commission
CIPM	Comité international des poids et mesures
CNAM	Conservatoire national des arts et métiers, Paris (France)
CSIRO	(ex NML) CSIRO, Division of Applied Physics, Lindfield (Australie)
EUROMET	European Collaboration in Measurement Standards
IEC	<i>voir</i> CEI
IMEKO	International Measurement Confederation
IMGC	Istituto di Metrologia G. Colonnetti, Turin (Italie)
INM	Institut national de métrologie, Paris (France)
IRL	Industrial Research Limited, Lower Hutt (Nouvelle-Zélande)
KOL	Kamerlingh Onnes Laboratorium, Leiden (Pays-Bas)
*KSRI	Korea Standards Research Institute, Taejon (Rép. de Corée), <i>voir</i> KRISS
KRISS	(ex KSRI) Korea Research Institute of Standards and Science, Taejon (Rép. de Corée)
*NBS	National Bureau of Standards, Gaithersburg (É.-U. d'Amérique), <i>voir</i> NIST
NIM	Institut national de métrologie/National Institute of Metrology, Beijing (Rép. pop. de Chine)
NIST	(ex NBS) National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg (É.-U. d'Amérique)
NMi	(ex VSL) Nederlands Meetinstituut, Delft (Pays-Bas)
*NML	National Measurement Laboratory, Lindfield (Australie), <i>voir</i> CSIRO
NPL	National Physical Laboratory, Teddington (Royaume-Uni)
NRC	Conseil national de recherches du Canada/National Research Council of Canada, Ottawa (Canada)

---

\* Les laboratoires ou organisations marqués d'un astérisque soit n'existent plus soit figurent sous un autre sigle.

\* Organizations marked with an asterisk either no longer exist or operate under a different acronym.

NRLM	National Research Laboratory of Metrology, Tsukuba (Japon)
PTB	Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig et Berlin (Allemagne)
SMU	Slovenský Metrologický Ústav, Bratislava (Rép. slovaque)
VNIIFTRI	Institut des mesures physico-techniques et radiotechniques/All-Russian Research Institute for Physical, Technical and Radio-Technical Measurements, Moscou (Féd. de Russie)
VNIIM	Institut de métrologie D.I. Mendéléev/D.I. Mendelejev Institute for Metrology, Saint-Pétersbourg (Féd. de Russie)
*VSL	Van Swinden Laboratorium, Delft (Pays-Bas), voir NMI

## 2. Sigles des termes scientifiques Acronyms for scientific terms

CMN	Nitrate de cérium-magnésium/Cerium Magnesium Nitrate
EIPT-68/IPTS-68	Échelle internationale pratique de température de 1968/International Practical Temperature Scale of 1968
EIT-90/ITS-90	Échelle internationale de température de 1990/International Temperature Scale of 1990
EPT-76	Échelle provisoire de température de 1976
HTPRT	Thermomètre à résistance de platine à haute température/High-Temperature Platinum Resistance Thermometer
IPRT	Thermomètre à résistance de platine industriel/Industrial Platinum Resistance Thermometer
IPTS-68	voir EIPT-68
ITS-90	voir EIT-90
PRT	Thermomètre à résistance de platine/Platinum Resistance Thermometer

---

---

## LE BIPM

### ET LA CONVENTION DU MÈTRE

---

Le Bureau international des poids et mesures (BIPM) a été créé par la Convention du Mètre signée à Paris le 20 mai 1875 par dix-sept États, lors de la dernière séance de la Conférence diplomatique du Mètre. Cette Convention a été modifiée en 1921.

Le Bureau international a son siège près de Paris, dans le domaine (43 520 m<sup>2</sup>) du Pavillon de Breteuil (Parc de Saint-Cloud) mis à sa disposition par le Gouvernement français ; son entretien est assuré à frais communs par les États membres de la Convention du Mètre\*.

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), des rayonnements ionisants (1960), aux échelles de temps (1988) et à la quantité de matière (1993). Dans ce but, un agrandissement des premiers laboratoires construits en 1876-1878 a eu lieu en 1929 ; de nouveaux bâtiments ont été construits en 1963-1964 pour les laboratoires de la section des rayonnements ionisants, en 1984 pour le travail sur les lasers et en 1988 a été inauguré un bâtiment pour la bibliothèque et des bureaux.

---

\* Au 31 décembre 1994, quarante-huit États sont membres de cette Convention: Afrique du Sud, Allemagne, Amérique (É.-U. d'), Argentine (Rép. d'), 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, Nouvelle-Zélande, Pakistan, Pays-Bas, Pologne, Portugal, Roumanie, Royaume-Uni, Russie (Féd. de), Singapour, Slovaque (Rép.), Suède, Suisse, Tchèque (Rép.), Thaïlande, Turquie, Uruguay, Venezuela.

Une quarantaine de physiciens ou de 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.

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*, 1963, **31**, 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 neuf :

1. Le Comité consultatif d'électricité (CCE), créé en 1927.
2. Le Comité consultatif de photométrie et radiométrie (CCPR), nouveau nom donné en 1971 au Comité consultatif de photométrie (CCP) créé en 1933 (de 1930 à 1933 le Comité précédent (CCE) s'est occupé des questions de photométrie).
3. Le Comité consultatif de thermométrie (CCT), créé en 1937.
4. Le Comité consultatif pour la définition du mètre (CCDM), créé en 1952.
5. Le Comité consultatif pour la définition de la seconde (CCDS), créé en 1956.
6. Le Comité consultatif pour les étalons de mesure des rayonnements ionisants (CEMRI), créé en 1958. En 1969, ce comité consultatif a institué quatre sections : Section I (Rayons x et  $\gamma$ , électrons), Section II (Mesure des radionucléides), Section III (Mesures neutroniques), Section IV (Étalons d'énergie  $\alpha$ ) ; cette dernière section a été dissoute en 1975, son domaine d'activité étant confié à la Section II.
7. Le Comité consultatif des unités (CCU), créé en 1964 (ce comité consultatif a remplacé la « Commission du système d'unités » instituée par le CIPM en 1954).
8. Le Comité consultatif pour la masse et les grandeurs apparentées (CCM), créé en 1980.
9. Le Comité consultatif pour la quantité de matière (CCQM), créé en 1993.

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. KOVALEVSKY

*Président*  
D. KIND

---

LISTE DES MEMBRES

DU

COMITÉ CONSULTATIF DE THERMOMÉTRIE

---

*Président*

L. CROVINI, membre du Comité international des poids et mesures, directeur de l'Istituto di Metrologia G. Colonnetti, Turin.

*Membres*

BUREAU NATIONAL DE MÉTROLOGIE, Paris : Institut national de métrologie [INM] du Conservatoire national des arts et métiers, Paris.

CONSEIL NATIONAL DE RECHERCHES DU CANADA [NRC], Ottawa.

CSIRO, Division of Applied Physics [CSIRO], Lindfield.

INSTITUT DE MÉTROLOGIE D. I. MENDÉLÉEV [VNIIM], Saint-Pétersbourg.

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

INSTITUT NATIONAL DE MÉTROLOGIE [NIM], Beijing.

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

KOREA RESEARCH INSTITUTE OF STANDARDS AND SCIENCE [KRISS], Taejon.

NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY [NIST], Gaithersburg.

NATIONAL PHYSICAL LABORATORY [NPL], Teddington.

NATIONAL RESEARCH LABORATORY OF METROLOGY [NRLM], Tsukuba.

NEDERLANDS MEETINSTITUUT [NMI/VSL], Delft.

PHYSIKALISCH-TECHNISCHE BUNDESANSTALT [PTB], Braunschweig et Berlin.

SLOVENSKÝ METROLOGICKÝ ÚSTAV [SMU], Bratislava.

Le directeur du Bureau international des poids et mesures [BIPM], Sèvres.

---

ORDRE DU JOUR  
de la 18<sup>e</sup> session

---

1. Ouverture de la session.
  2. Désignation d'un rapporteur.
  3. Approbation de l'ordre du jour.
  4. Documents présentés lors de la session.
  5. Réponses à un questionnaire sur la réalisation et la mise en application de l'EIT-90 dans les laboratoires nationaux de métrologie.
  6. Autres problèmes qui résultent de la réalisation de l'EIT-90.
  7. Traçabilité des mesures de température au niveau international et nécessité d'effectuer des comparaisons internationales.
  8. Études relatives à l'EIT-90 :
    - a) non-unicité;
    - b) reproductibilité des points fixes;
    - c) autres problèmes soulevés par l'emploi d'instruments d'interpolation ;
    - d) nouvelles informations sur  $(T - T_{90})$ .
  9. Rapport du Groupe de travail 2 (points fixes secondaires, approximation de l'EIT-90, nouvelles tables internationales pour les thermocouples et pour les thermomètres à résistance de platine industriels).
  10. Incertitudes dans la réalisation de l'EIT-90.
  11. Problèmes qui se posent au-dessous de 1 K et extension de l'échelle au-dessous de 0,65 K.
  12. La thermométrie au BIPM.
  13. Établissement et composition des groupes de travail.
  14. Rapport au CIPM et recommandations.
  15. Questions diverses :
    - a) prochaine session;
    - b) questions diverses.
-

---

RAPPORT  
DU  
COMITÉ CONSULTATIF DE THERMOMÉTRIE  
**(18<sup>e</sup> session — 1993)**  
AU  
COMITÉ INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES  
par M. DURIEUX, rapporteur

---

Le Comité consultatif de thermométrie (CCT) a tenu sa 18<sup>e</sup> session au Pavillon de Breteuil, à Sèvres, les 7, 8 et 9 septembre 1993.

Étaient présents :

L. CROVINI, membre du CIPM, président du CCT.

Les délégués des laboratoires membres :

Bureau national de métrologie, Paris : Institut national de métrologie [INM] du Conservatoire national des arts et métiers (G. BONNIER).

Conseil national de recherches du Canada [NRC], Ottawa (R. E. BEDFORD).

CSIRO, Division of Applied Physics [CSIRO], Lindfield (T. P. JONES).

Institut de métrologie D. I. Mendéléev [VNIIM], Saint-Pétersbourg (A. I. POKHODUN).

Institut national de métrologie [NIM], Beijing (ZHAO Qi).

Istituto di Metrologia G. Colonnetti [IMGC], Turin (T. RICOLFI, F. PAVESE).

Korea Research Institute of Standards and Science [KRISS], Taejon (CHUNGHI RHEE, DAESUNG CHI).

National Institute of Standards and Technology [NIST], Gaithersburg (B. W. MANGUM).

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

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

Nederlands Meetinstituut [NMI/VSL], Delft (P. BLOEMBERGEN).

Physikalisch-Technische Bundesanstalt [PTB], Braunschweig et  
Berlin (H.-J. JUNG, K. GROHMANN).

Slovenský Metrologický Ústav [SMU], Bratislava (M. BOROVIČKA,  
S. DURIS).

Le directeur du Bureau international des poids et mesures [BIPM]  
(T. J. QUINN).

Invités :

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

R. P. HUDSON, Arlington.

J. NICHOLAS, Industrial Research Limited [IRL], Lower Hutt.

Excusé :

Institut des mesures physico-techniques et radiotechniques [VNIIFTRI],  
Moscou.

Assistaient aussi à la session :

P. GIACOMO, directeur honoraire du BIPM ; J. BONHOURE et R. KÖHLER  
(BIPM).

## Résumé

Cette réunion du CCT était la première qui se tenait depuis l'adoption de l'Échelle internationale de température de 1990 (EIT-90), c'est pourquoi l'une des tâches importantes figurant à l'ordre du jour était l'examen des progrès faits dans la réalisation et la dissémination de la nouvelle échelle internationale par les quatorze laboratoires nationaux membres du CCT. Les réponses à un questionnaire *ad hoc* ont montré que tous les laboratoires disséminent l'EIT-90 après l'avoir réalisée directement dans une grande partie de son domaine. Dans les parties où elle n'est pas réalisée, c'est-à-dire principalement aux basses températures, les lacunes qui en résultent sont comblées par une échelle à fil ou par une approximation de l'EIT-90. Des projets sont à l'étude dans les laboratoires pour réduire ces lacunes.

Le CCT a étudié certains problèmes qui se posent dans la mise en application de l'EIT-90, en particulier ceux qui concernent les valeurs recommandées de  $(t_{90} - t_{68})$  de 630 °C à 1064 °C à la lumière d'une nouvelle détermination directe. Le désaccord avec les valeurs données dans l'EIT-90 peut s'expliquer – du moins en partie – en raison de la non-unicité de l'Échelle internationale pratique de température de 1968 (EIP-68) qui spécifie des valeurs séparées d'au moins 0,2 °C. Une note

et une nouvelle table de valeurs recommandées seront prochainement publiées à ce sujet, ainsi qu'une nouvelle table de points fixes secondaires dont il est fait référence dans l'EIT-90.

La nécessité d'une traçabilité des mesures de température au niveau international a été examinée en détail, à la lumière des réponses au questionnaire. Une telle tâche est particulièrement complexe et demande une étroite coopération tant à l'intérieur des groupes régionaux qu'entre ces groupes. Le CCT a exprimé, dans sa Recommandation T 1 (1993), la nécessité de communiquer rapidement, au CCT et au BIPM, les informations sur les comparaisons réalisées au sein de groupes régionaux et d'effectuer des comparaisons entre les différents groupes régionaux au niveau d'exactitude le plus élevé.

Le CCT reconnaît la nécessité d'entreprendre d'autres expériences pour déterminer les limites de l'unicité de l'EIT-90 et étudier les améliorations qu'il est possible d'apporter aux techniques mises en oeuvre pour la réalisation des points fixes de définition. Il convient de porter une attention particulière au point triple de l'eau. La reproductibilité assez pauvre observée dans les expériences faites au BIPM, dans certaines conditions, doit encore être confirmée par d'autres laboratoires et expliquée. Ainsi, dans la Recommandation T 2 (1993), le CCT encourage les laboratoires nationaux à entreprendre les expériences qui s'avèrent nécessaires et à fournir au BIPM des cellules à point triple de l'eau.

Le CCT a discuté de la définition éventuelle d'une échelle internationale dans le domaine situé entre 2 mK et 0,65 K, fondée sur la courbe de fusion de  $^3\text{He}$ , comme le proposent les documents décrivant les expériences réalisées dans certains laboratoires. Une telle échelle devrait se rattacher à l'EIT-90 de façon lisse. La discussion a aussi porté sur l'exactitude thermodynamique de l'EIT-90 à la lumière de certaines déterminations récentes. Cela a conduit le CCT à reprendre la Recommandation T 1 (1987) et à la renforcer : c'est la Recommandation T 3 (1993), dans laquelle il encourage les laboratoires nationaux à poursuivre la mesure de la température thermodynamique dans la région située au-dessous de 0,65 K, dans les régions voisines de 150 K et de 700 K, ainsi qu'aux températures plus élevées, et dans laquelle il recommande au BIPM de mettre à profit l'acquisition d'un radiomètre cryogénique pour contribuer à ce travail.

**Recommandations  
du Comité consultatif de thermométrie  
présentées  
au Comité international des poids et mesures**

Liaison entre les comparaisons régionales en thermométrie

RECOMMANDATION T 1 (1993)

Le Comité consultatif de thermométrie,

*considérant*

— qu'il est nécessaire de faire connaître mondialement les résultats des comparaisons d'étalons thermométriques effectuées sous les auspices de groupes régionaux de laboratoires nationaux et des comparaisons bilatérales effectuées entre laboratoires nationaux,

— que de nombreux laboratoires nationaux ont mis au point de nouveaux étalons thermométriques pour réaliser l'Échelle internationale de température de 1990 (EIT-90),

— que démontrer l'équivalence des mesures entre laboratoires nationaux dans un large domaine de température est une tâche particulièrement complexe,

*tenant compte* de la Recommandation 1 (CI-1992) du Comité international des poids et mesures (CIPM),

*incite* les laboratoires nationaux à

*a)* participer aux comparaisons d'étalons thermométriques organisées au sein des groupes régionaux,

*b)* proposer et soutenir d'autres comparaisons lorsque le besoin s'en fait sentir,

*recommande*

— que les informations et les résultats relatifs aux comparaisons effectuées au sein de groupes régionaux ou dans le cadre d'accords bilatéraux soient communiqués rapidement au Bureau international des poids et mesures (BIPM) et au Comité consultatif de thermométrie (CCT),  
et

— que des liens soient établis entre les groupes régionaux, au plus haut niveau d'exactitude, par l'intermédiaire de comparaisons organisées sous les auspices du CCT en liaison avec le BIPM.

## Cellules à point triple de l'eau

### RECOMMANDATION T 2 (1993)

Le Comité consultatif de thermométrie,

*considérant*

— les résultats obtenus récemment au Bureau international des poids et mesures (BIPM) avec certaines cellules à point triple de l'eau en utilisant des méthodes de préparation différentes,

— le rôle du point triple de l'eau dans la définition du kelvin,

— l'importance d'améliorer l'exactitude de la réalisation du point triple de l'eau pour tirer tous les avantages de la haute reproductibilité de l'Échelle internationale de température de 1990 (EIT-90),

*recommande* aux laboratoires nationaux

- a) d'étudier les effets liés aux types de fabrication différents des cellules,
- b) d'étudier les effets liés à des méthodes différentes de préparation du manchon de glace,
- c) d'échanger des cellules avec d'autres laboratoires y compris des cellules d'origines différentes,
- d) de fournir au BIPM, s'il le demande, des cellules représentatives.



Mesures de la température thermodynamique \*

RECOMMANDATION T 3 (1993)

Le Comité consultatif de thermométrie,

*considérant*

— l'importance des mesures de haute exactitude de la température thermodynamique déjà soulignée dans sa Recommandation T 1 (1987),

— les incompatibilités qui subsistent encore entre les déterminations de la température thermodynamique, en particulier dans les régions voisines de 150 K, 700 K et aux températures plus élevées,

— l'extension souhaitable de l'Échelle internationale de température de 1990 (EIT-90) au-dessous de la limite inférieure actuelle de 0,65 K,

— l'importance pour les laboratoires nationaux et pour le Bureau international des poids et mesures (BIPM) de disposer de mesures de la température thermodynamique utilisant des techniques variées,

*recommande*

— que les laboratoires nationaux poursuivent des recherches en thermométrie fondamentale et en particulier des mesures de la température thermodynamique dans les domaines mentionnés ci-dessus,

— que le BIPM mette à profit l'acquisition d'un radiomètre cryogénique pour participer à ce travail.

---

\* Cette Recommandation a été approuvée comme Recommandation 5 (CI-1993), sous une forme légèrement modifiée, par le Comité international des poids et mesures lors de sa 82<sup>e</sup> session.

**Recommandation  
adoptée par le  
Comité international des poids et mesures**

Mesures de la température thermodynamique

RECOMMANDATION 5 (CI-1993)

Le Comité international des poids et mesures,

*considérant*

— l'importance des mesures de haute exactitude de la température thermodynamique déjà soulignée dans sa Recommandation T 1 (1987),

— les incompatibilités qui subsistent encore entre les déterminations de la température thermodynamique, en particulier dans les régions voisines de 150 K, 700 K et aux températures plus élevées,

— l'extension souhaitable de l'Échelle internationale de température de 1990 (EIT-90) au-dessous de la limite inférieure actuelle de 0,65 K,

— l'importance pour les laboratoires nationaux et pour le Bureau international des poids et mesures de disposer de mesures de la température thermodynamique utilisant des techniques variées,

*recommande* que les laboratoires nationaux poursuivent des recherches en thermométrie fondamentale et en particulier des mesures de la température thermodynamique dans les domaines mentionnés ci-dessus.

---

---

## Compte rendu des séances de la 18<sup>e</sup> session du CCT

---

### 1. Ouverture de la session

Le président ouvre la session et accueille chaleureusement tous les délégués, ainsi que les invités, M. Durieux, M. Hudson et M. Nicholas. Il remercie M. Quinn et le personnel du BIPM pour la préparation de cette réunion.

Le président remarque que le CCT est entré dans une nouvelle période de son existence, depuis l'adoption de l'Échelle internationale de température de 1990 (EIT-90) lors de sa précédente session en 1989. Dans cette période qui fait suite à l'adoption de l'EIT-90, l'attention a été consacrée à la mise au point de techniques améliorées pour la réalisation de l'échelle. La question se pose aussi de savoir dans quelle mesure l'échelle a été réalisée dans les laboratoires nationaux de métrologie (*voir* Point 5 de l'ordre du jour). C'est une tâche importante que de réaliser l'EIT-90 et de rendre sa mise en application possible, de façon générale, en métrologie ; cela demandera beaucoup de travail. Se pose aussi l'importante question de l'extension de l'échelle aux températures plus basses, c'est-à-dire au-dessous de 0,65 K (*voir* Point 11 de l'ordre du jour). En liaison avec ces questions, le CCT devra ré-examiner les missions et la composition des groupes de travail (*voir* Point 13 de l'ordre du jour).

### 2. Nomination d'un rapporteur

M. Durieux est nommé rapporteur.

### 3. Approbation de l'ordre du jour

L'ordre du jour provisoire est approuvé.

### 4. Documents présentés lors de la session

Les documents présentés lors de la session sont répertoriés dans l'annexe T 1 (*voir* p. T 34). Le président dit qu'ils ne seront pas étudiés en détail à ce point de l'ordre du jour, mais qu'ils seront discutés, si nécessaire,

aux points de l'ordre du jour auxquels ils se rapportent. M. Quinn rappelle une décision antérieure du CCT, celle de ne pas publier les documents de travail dans le volume du Comité consultatif de thermométrie. Ceux-ci seront conservés au BIPM où des copies pourront être obtenues sur demande; toutefois, un volume rassemblant les copies de ces documents sera envoyé aux participants.

### **5. Réponses à un questionnaire sur la réalisation et la mise en application de l'EIT-90 dans les laboratoires nationaux de métrologie**

Un « Questionnaire sur la réalisation de l'EIT-90 » a été envoyé au début de 1993 aux laboratoires membres du CCT. Les réponses de quatorze laboratoires à ce questionnaire sont rassemblées dans le document CCT/93-1. Un résumé des réponses préparé par le président et par M. Steur (IMGC) est donné dans le document CCT/93-1(R). Le président explique tout d'abord qu'il est important de savoir jusqu'à quel point les laboratoires nationaux sont parvenus dans la réalisation de l'EIT-90; il ajoute que d'autres laboratoires, qui ne sont pas représentés au CCT, ont aussi réalisé une partie de l'échelle. Il rappelle les questions posées dans ce questionnaire :

1. Information générale sur la réalisation de l'EIT-90 (et réalisations pratiques approchées de l'EIT-90);
2. Information détaillée sur la réalisation de l'EIT-90 (sous-domaines, points fixes et reproductibilité, types et sources de thermomètres à résistance de platine utilisés);
3. Application et utilisation de l'EIT-90 (étalons de transfert les plus exacts qui puissent être étalonnés par un laboratoire);
4. Expériences envisagées ou en cours pour étudier l'exactitude thermodynamique de l'EIT-90.

Une longue discussion s'ensuit sur les réponses au questionnaire. Quelques erreurs typographiques sont corrigées. Le président mentionne que, tout bien considéré, toutes les questions n'ont pas été rédigées de manière suffisamment claire. Par exemple, au point 2.2 du questionnaire, la question relative à la reproductibilité estimée des points fixes de définition a été interprétée de différentes manières, ce qui a entraîné des différences d'un facteur dix ou supérieur dans les réponses.

M. Quinn, faisant référence à la figure 1 du document CCT/93-1(R), qui montre qu'aucun laboratoire national de métrologie n'a réalisé l'EIT-90 dans le domaine situé au-dessous de 14 K, demande si les efforts consacrés à la définition de l'échelle dans ce domaine n'ont pas été mal orientés. M. Rusby pense que cela n'est pas le cas, mais il remarque que la présentation logarithmique met l'accent sur le domaine des basses températures. M. Bonnier souligne que le domaine des basses températures

est très important pour de nombreux chercheurs scientifiques. Le président ajoute que les travaux sur la partie de l'échelle consacrée aux basses températures, comme par exemple sur les thermomètres à gaz d'interpolation, progressent dans de nombreux laboratoires nationaux. Il est donc faux de penser que le domaine des basses températures n'est pas important.

M. Pokhodoun trouve trop optimiste le tableau I du Document CCT/93-1(R), qui mentionne des reproductibilités aussi réduites que 0,1 mK pour certains points fixes de définition. Par exemple, les réponses ne rendent pas compte des travaux effectués actuellement au BIPM, au NRC et au NIST sur le point triple de l'eau. Il pense que la valeur plus élevée de 0,2 mK donnée par le CSIRO pour la reproductibilité est plus réaliste. En ce qui concerne les points de congélation ou les points de fusion, M. Pokhodoun et ses collègues pensent qu'il y a trois sources d'incertitude : la contamination de l'échantillon, les changements de structure en phase solide et les effets des différentes méthodes employées pour amorcer la congélation. Sur ce point, M. Pokhodoun pense que la reproductibilité des points de congélation est bien de 1 mK. M. Bonnier trouve aussi que la reproductibilité des points de congélation et leur définition précise méritent une étude plus approfondie et il suggère de charger un groupe de travail de cette étude. Le président est du même avis. Faisant référence à nouveau au document CCT/93-1(R), le président note qu'un seul laboratoire (le KRISS) utilise un thermomètre à gaz d'interpolation pour réaliser l'EIT-90. M. Rusby ajoute que des thermomètres à gaz d'interpolation sont en construction à la PTB et au VNIIFTRI.

En ce qui concerne l'utilisation de méthodes secondaires de réalisation de l'EIT-90 (Chapitre 3 et figure 7 du document CCT/93-1(R)), M. Quinn note que celles-ci sont utilisées par de nombreux laboratoires dans le domaine des basses températures. À propos de l'utilisation de corps noirs comme points fixes (Tableau I et figure 6 du document CCT/93-1(R)), le président note que les trois points de référence, celui de l'argent, de l'or et du cuivre, sont tous utilisés, mais avec une préférence pour l'argent. Presque tous les laboratoires réalisent tous les autres points fixes au-dessus de 273,15 K (document CCT/93-1(R), figure 5); un nombre plus restreint de laboratoires réalise les points fixes au-dessous de 84 K (document CCT/93-1(R), figure 4). On constate la même tendance pour la réalisation des sous-domaines. Le tableau II et les figures 8, 9 et 10 du document CCT/93-1(R) donnent des détails sur l'utilisation actuelle des thermomètres à résistance de platine étalons. Le tableau III du document CCT/93-1(R) donne la liste des étalons de transfert de l'EIT-90 les plus exacts utilisés par les divers laboratoires. Le président cite l'utilisation de thermomètres rhodium-fer et de thermomètres à germanium aux basses températures, et celle des thermocouples platine-rhodium/platine, palladium/platine et or/platine jusqu'à 1100 °C, et, de plus en plus, celle de thermomètres à rayonnement aux températures plus élevées. M. Quinn remarque que les lampes à ruban de tungstène sont encore largement utilisées bien qu'elles soient devenues difficiles à obtenir. Une liste des expériences envisagées ou

en cours pour étudier l'exactitude thermodynamique de l'EIT-90 figure au chapitre 6 du document CCT/93-1(R). Cette discussion montre clairement qu'il convient de compléter les informations du chapitre 6.

Au vu des remarques précédentes, le président répond qu'une nouvelle version de ce document sera envoyée à tous les membres. M. Bonnier demande si le document sera publié. D'après lui, beaucoup considèrent que l'EIT-90 est simple à réaliser; une telle publication montrera qu'il reste encore beaucoup de travail à faire à l'avenir. Il est décidé qu'une courte note, ou un résumé de ce travail, sera soumise pour publication à *Metrologia*. Le président demande aux membres d'envoyer leurs commentaires, corrections ou suggestions de textes à supprimer avant le 15 octobre 1993.

## 6. Autres problèmes qui résultent de la réalisation de l'EIT-90

Faisant référence à plusieurs documents de travail du CCT, le président ouvre la discussion en mentionnant certains problèmes concernant la réalisation de l'EIT-90 qui demandent une plus ample discussion. Se référant aux documents CCT/93-2 et 3, M. Bedford remarque que M. Ancsin (NRC) a constaté, non pas au cours d'une expérience destinée à cet effet, mais à partir d'observations effectuées sur un fil de chauffage en platine enroulé sur un isolant en fibres de quartz, la preuve d'une réaction eutectique entre le platine et le silicium aux températures supérieures à 830 °C. Pour les thermomètres à résistance de platine à haute température, la réaction entre le platine et le quartz pourrait expliquer l'augmentation de l'instabilité de ces thermomètres de 800 °C au point de l'argent. Le travail n'a pas été poursuivi plus avant. M. Mangum dit que les résultats n'ont pas pu être reproduits au NIST. M. Bedford mentionne aussi un article de MM. Ancsin et Hill (NRC) soumis à *Metrologia*\*, sur la diffusion de l'argent à travers les parois des creusets en graphite et des puits en silice, et la contamination qui en résulte de l'élément sensible du thermomètre à résistance de platine lorsque celui-ci est utilisé dans un four à point de l'argent. M. Bonnier pense aussi que c'est un problème sérieux, qui rend les creusets en graphite inutilisables pour réaliser les points de l'aluminium et de l'argent. À une question du président qui demande si le graphite doit être remplacé par un autre matériau, M. Bedford répond qu'il est possible de trouver une barrière convenable entre la paroi du creuset et le thermomètre.

---

\* ANCSIN J., HILL K. D., Contamination of Platinum Resistance Thermometers by Silver, *Metrologia*, 1993/94, **30**, 507-509.

S'ensuit une discussion sur l'utilisation des thermocouples platine/palladium. M. Rhee mentionne des recherches faites au KRISS sur ces thermocouples dans le domaine de température de 962 °C à 1300 °C. Le NIST et le NMI/VSL ont aussi commencé un travail similaire. M. Chattle dit que les laboratoires secondaires n'utilisent pas ces couples parce que les fabricants n'en proposent pas. M. Bonnier considère qu'il n'est pas nécessaire d'utiliser du palladium de la plus grande pureté et qu'il n'est pas prouvé que celui-ci donne de meilleurs résultats. Toutefois, le président pense que les tables de référence pour les thermocouples devraient se référer aux matériaux de la plus haute pureté. On discute aussi de l'utilisation des thermocouples dans l'air ou dans l'argon. M. Bonnier pense qu'il faudrait rappeler à l'attention du CIPM une recommandation précédente du CCT sur l'étude du thermocouple platine/palladium. M. Jung remarque que l'utilisation de palladium de différentes provenances donne des résultats différents, mais que les écarts varient linéairement avec la température. Il dit aussi qu'il arrive quelquefois que ces thermocouples cassent à la jonction à haute température en raison des coefficients de dilatation différents des fils. L'utilisation d'un ressort mince à la jonction réduit le risque de cassure. M. Bedford rappelle que cette technique est aussi celle qui a été utilisée par M. McLaren au NRC pour les thermocouples or/platine. M. Bonnier pense que la cause principale de rupture n'est pas la différence des coefficients de dilatation mais la recristallisation des fils. La dislocation du cristal peut occasionner la rupture des fils. L'emploi de fils de très grande pureté risque de favoriser la recristallisation et la rupture des fils.

Le président demande à M. Rusby ses commentaires sur le document CCT/93-29 du NPL, qui traite de la concordance des températures attribuées au point triple du mercure et au point de fusion du gallium dans l'EIT-90. M. Rusby dit qu'une relation linéaire entre les valeurs de  $W_{90}$  (Hg) et  $W_{90}$  (Ga) a été constatée sur cinquante thermomètres à résistance de platine étalonnés au NPL, au NIST et à l'IMGC. Les valeurs de  $W_r(T_{90})$  pour le mercure et le gallium données par les fonctions de référence de l'EIT-90 ne s'inscrivent pas sur cette ligne; leurs points se situent environ 1 mK au-dessus de la ligne. De même, on a constaté au NPL lors de l'étalonnage des thermomètres à résistance de platine pour les domaines de température situés juste au-dessous et juste au-dessus du point triple de l'eau, que les valeurs du coefficient  $a$  des fonctions écarts correspondantes diffèrent d'environ  $3 \times 10^{-5}$ . Cette différence conduit à une non-unicité d'environ 1 mK, qui provient des valeurs assignées aux températures des points fixes du mercure et du gallium dans l'EIT-90. M. Bonnier rappelle que la température du point du mercure a été ajustée pour se conformer à l'EIT-90, mais M. Rusby remarque que la différence n'était que de 0,3 mK. Le président rappelle que le point du gallium a été introduit essentiellement pour permettre des mesures de température très exactes au voisinage de la température ambiante dans d'autres domaines de la métrologie tels que les mesures électriques et les mesures de longueur. Le CCT visait ainsi à limiter la non-unicité de l'échelle à 0,1 mK de 0 °C

à 30 °C. A-t-il obtenu le résultat recherché? M. Bonnier et M. Rusby émettent des doutes quant à la possibilité de garantir une non-unicité aussi faible et ils demandent s'il est nécessaire que l'exactitude de la température soit supérieure à 1 mK pour les mesures de longueur. Le président répond que la longueur des cales étalons peut varier significativement si la variation de température est supérieure à 1 mK, aussi convient-il de préciser clairement quelle exactitude peut être obtenue au voisinage de 30 °C.

Le président demande ensuite à M. Pokhodoun de commenter les travaux réalisés dans son laboratoire sur la relation  $R$  en fonction de  $T_{90}$  des thermomètres à résistance de platine pour la mesure des hautes températures entre 962 °C et 1085 °C (document CCT/93-9). M. Pokhodoun indique en résumé que le VNIIM a essayé de répéter ce qui a été effectué précédemment au NPL et à la PTB lorsque ces laboratoires ont comparé des thermomètres à résistance de platine au pyromètre optique. Les thermomètres sont de conception nouvelle, le fil de platine est enroulé en spirale autour d'une cavité qui rentre à l'intérieur et sert de corps noir. À 1085 °C, l'incertitude totale de la comparaison est estimée à 0,19 °C; elle est due pour l'essentiel au pyromètre optique utilisé par le VNIIM. Le travail décrit dans le document CCT/93-9 était surtout un travail préliminaire et les mesures se poursuivent à l'IMGC avec un pyromètre de meilleure qualité. Toutefois, l'IMGC éprouve des difficultés à reproduire les résultats obtenus précédemment à la PTB. Des comparaisons de thermocouples et de thermomètres à rayonnement sont envisagées. M. Bloembergen demande quelle température de référence a été utilisée pour le pyromètre optique; M. Ricolfi répond qu'il s'agit de celle du point de l'argent. M. Jung demande quelles peuvent être les différences de température entre la bobine du thermomètre à résistance de platine et le fonds du corps noir. Il suggère de modifier l'ouverture du corps noir pour voir si les résultats en sont affectés. M. Ricolfi remarque qu'à l'IMGC un caloduc a été utilisé dans le four. La position dans le caloduc du thermomètre à résistance de platine a été modifiée par pas de 1 cm et, sur une distance de 9 cm, la différence de température indiquée par le thermomètre à résistance de platine et par le thermomètre à rayonnement n'a pas varié de plus de 0,1 °C. Le président clôt la discussion, suggérant de discuter en privé des divers problèmes techniques.

La discussion suivante porte sur les résultats de nouvelles mesures de  $(t_{90} - t_{68})$  entre 630 °C et 1064 °C (document CCT/93-18), qui donnent des valeurs sensiblement différentes de celles données dans le tableau VI du texte de l'EIT-90. M. Mangum résume ce travail. Au total vingt-quatre thermocouples Pt-10% Rh/Pt, étalonnés dans l'EIPT-68, ont été comparés dans sept laboratoires à des thermomètres à résistance de platine pour les hautes températures étalonnés selon l'EIT-90. Comme ces mesures représentent une comparaison directe entre les deux échelles de température, on en déduit que les résultats représentent mieux  $(t_{90} - t_{68})$  que ceux donnés dans le tableau VI de l'EIT-90. Le président remarque



que les nouvelles valeurs montrent le degré d'incertitude de  $t_{68}$ , tel qu'il résulte des étalonnages de thermocouples. L'incertitude sur  $t_{68}$  est supposée expliquer, en partie, les différences entre les nouvelles valeurs et celles données au tableau VI. Deux questions se posent : quelle est la raison de ces différences et que faire au sujet du tableau VI et des nouvelles valeurs. M. Rusby résume la manière dont le Groupe de travail 4 a obtenu les valeurs de  $(t_{90} - t_{68})$  du tableau VI, au-dessus de 630 °C. Les différences entre les températures thermodynamiques, obtenues à partir de mesures de thermomètres à rayonnement et de thermomètres à bruit, et  $t_{68}$ , mesurée à partir de thermocouples Pt-10 % Rh/Pt, ont été représentées entre 630 °C et 1085 °C, et la courbe  $(t - t_{68})$  en fonction de  $t$  a été tracée. Les mesures directes de  $(t_{90} - t_{68})$  n'étant alors pas disponibles,  $(t - t_{68})$  a été considéré comme assimilable à  $(t_{90} - t_{68})$ . M. Rusby pense que les grandes différences entre ces valeurs et les valeurs nouvellement déterminées (document CCT/93-18) peuvent provenir de la différence appréciable entre les anciennes mesures de température thermodynamique et les résultats des mesures thermodynamiques plus récentes de la PTB sur lesquelles  $t_{90}$  est fondée. M. Mangum souligne que les nouvelles comparaisons ont été, en fait, conçues pour établir de nouvelles tables de thermocouples dans l'EIT-90, et non pour mesurer  $(t_{90} - t_{68})$ . Dans le passé, M. Evans (NIST) a établi des tables d'approximation de  $(t - t_{68})$ ; celles-ci sont en meilleur accord avec les anciennes valeurs du tableau VI. M. Rusby remarque que, pour obtenir la courbe de différence de la figure 1 de l'EIT-90, on a utilisé, en plus des valeurs de  $(t - t_{68})$ , la discontinuité dans la pente de  $t_{68}$  en fonction de  $t$  à 630 °C déterminée par Evans et Woods et par Bedford.

M. Bonnier demande combien de thermocouples ont été utilisés pour obtenir la courbe finale de la figure 1 du document CCT/93-18 (puisque'un seul thermocouple a été utilisé pour obtenir la fonction de référence des thermocouples). Il dit aussi que les ajustements par régression par la méthode des moindres carrés, ajustements pondérés de manière itérative, ont éliminé beaucoup de résultats et n'ont pas pris en compte toutes les incertitudes liées aux différents résultats. M. Bloembergen note que si tous les résultats avaient été pris en compte, peut-être les anciennes et les nouvelles valeurs auraient-elles été en accord. M. Hudson donne des détails sur les délibérations du Groupe de travail 4 pour obtenir les valeurs de  $(t - t_{68})$  (*Metrologia*, 1991, **28**, 9). Il souligne l'importance des incertitudes sur  $t$  et  $t_{68}$ . Faute de disposer de meilleures valeurs,  $t$  a simplement été appelée  $t_{90}$ . Il ajoute que, comme l'a dit M. Rusby, il y a peu de corrélation entre le graphe  $(t_{90} - t_{68})$  de l'EIT-90 et le nouveau graphe du document CCT/93-18. Le président note que, selon les nouvelles valeurs, les changements entre  $t_{68}$  et  $t_{90}$  sont bien moindres que prévu. M. Mangum dit que l'écart-type de l'ajustement pondéré de manière itérative aux valeurs de  $(t_{90} - t_{68})$  était de 63 mK pour le modèle initial qui prenait en compte toutes les valeurs des vingt-quatre thermocouples, mais cet écart-type était réduit à 18 mK après cinq itérations, processus au

cours duquel la courbe d'ajustement variait d'environ 0,02 K. M. Bonnier souligne que l'écart-type de 18 mK ne tient pas compte de l'incertitude de mesure de  $t_{68}$  et il pense que les valeurs de tous les thermocouples devraient être prises en compte dans l'estimation de l'incertitude.

Le président résume la discussion à ce point : les valeurs de  $(t_{90} - t_{68})$  ont été recommandées dans l'EIT-90 sous forme de graphe et de tableau et leur origine a été décrite. L'incertitude de la nouvelle courbe du document CCT/93-18 a été discutée. Les nouvelles valeurs de  $(t_{90} - t_{68})$  doivent être préférées aux anciennes et il convient de les publier.

Suit une longue discussion entre de nombreux participants. M. Quinn souligne que, bien que les techniques d'analyse appliquées aux nouvelles valeurs donnent un écart-type de 18 mK, une valeur aussi faible peut porter à confusion. La dispersion des résultats indique que les températures  $t_{68}$  des thermocouples peuvent diverger de 0,3 K ou 0,4 K. L'incertitude d'une nouvelle courbe  $(t_{90} - t_{68})$  en fonction de  $t$  serait encore en fait de l'ordre de 0,2 K. Commentant les mesures de thermométrie à rayonnement du NPL, qui étaient à la base des anciennes valeurs, il remarque qu'à une température d'environ 800 °C, là où se trouve le pic de l'ancienne courbe, les mesures par rayonnement étaient loin d'être aussi exactes qu'à proximité du point de référence de l'or. Selon lui, la principale incertitude de  $(t - t_{68})$  provient des mesures de température thermodynamique. Les thermocouples (de type R) n'étaient pas utilisés à haute température pendant des périodes très longues, mais leur stabilisation thermique n'était pas aussi bonne qu'aujourd'hui. Les forces électromotrices au point de l'or, mesurées avant et après les comparaisons entre thermomètres à rayonnement et thermocouples, ne différaient pas de plus de 1  $\mu$ V (0,1 °C). Il est quelque peu surpris que les valeurs actuelles de  $(t_{90} - t_{68})$  diffèrent de plus de 0,25 K des anciennes valeurs. Le président dit que l'incertitude des mesures de  $(t - t_{68})$  des thermomètres à bruit de l'IMGC était peut-être aussi de 0,25 K, alors que l'incertitude de  $t_{68}$  n'était peut-être pas supérieure à 0,1 K. Quant aux valeurs les plus récentes des thermomètres à rayonnement, M. Jones remarque que les résultats du CSIRO sont en accord avec ceux de la PTB, aussi est-il peu probable que l'erreur attachée à ces valeurs soit grande.

M. Bonnier n'est pas convaincu que, dans le document CCT/93-18,  $(t_{90} - t_{68})$  soit fondée sur les vingt-quatre thermocouples. De plus, l'incertitude donnée n'est que statistique. Il signale qu'il pourrait y avoir d'autres composantes plus grandes. M. Mangum précise que les thermocouples du NIST ont été fabriqués à partir des mêmes lots de fils que ceux utilisés pour les couples de type S de la table de référence de l'EIPT-68.

Suit une longue discussion sur la manière de publier les nouvelles valeurs de  $(t_{90} - t_{68})$ . M. Rusby demande si les nouvelles valeurs de  $(t_{90} - t_{68})$  sont en bon accord avec les différences entre la table pour les thermocouples de type S fondée sur l'EIT-90 et celle fondée sur l'EIPT-68

(en fait elles concordent, pas exactement, mais dans une limite d'environ 0,05 K). Il est finalement décidé que le Groupe de travail 4 préparera un projet de document avec les nouvelles valeurs de  $(t_{90} - t_{68})$ , expliquant pourquoi elles diffèrent de celles données dans l'EIT-90. Le président du Groupe de travail 4, parlant à ce sujet de « cadeau empoisonné », dit que le Groupe de travail 4 préparera ce document, mais que cette tâche sera longue.

## **7. Traçabilité des mesures de température au niveau international et nécessité d'effectuer des comparaisons internationales**

Le président attire l'attention sur la recommandation générale du CIPM concernant le besoin d'une traçabilité internationale en métrologie, qui, à son tour, rend nécessaire d'effectuer des comparaisons d'étalons de mesure. Le président souligne que la température tient une place à part en métrologie; il est difficile d'effectuer des comparaisons significatives et celles-ci sont nécessaires dans tous les domaines de température. Des comparaisons directes au niveau international sont impossibles à réaliser d'un point de vue pratique. En conséquence, des comparaisons régionales sont nécessaires, et elles seront effectuées sous la responsabilité d'organisations telles qu'EUROMET. Ces comparaisons doivent cependant être reliées entre elles au plus haut niveau d'exactitude. Le président suggère que, tout d'abord, le BIPM soit tenu informé des comparaisons régionales ou bilatérales; ensuite, que les domaines où il est nécessaire d'effectuer des comparaisons entre groupes régionaux soient identifiés; enfin, que les comparaisons et la traçabilité au niveau international des étalons de mesure rendent nécessaire l'usage d'une terminologie bien définie de manière à garantir que tous les résultats de mesure seront analysés selon les mêmes bases. Il propose qu'un groupe de travail soit chargé de ces questions, puis il ouvre la discussion.

Alors que la plupart des comparaisons effectuées en thermométrie dans le passé répondaient aux besoins spécifiques de la science, M. Quinn remarque qu'il est devenu aujourd'hui nécessaire de démontrer l'équivalence, au niveau international, des étalonnages effectués selon l'EIT-90. Il revient au CCT d'identifier quelles comparaisons internationales sont nécessaires pour montrer que la Convention du Mètre remplit la tâche qui lui a été impartie d'unifier les étalons de mesure de température dans le monde. Il donne lecture de la Recommandation 1 (CI-1992) du CIPM au sujet de la reconnaissance mondiale des résultats de comparaisons d'étalons de mesure.

M. Bonnier souligne trois points :

1. Les comparaisons ne sont pas spontanées, mais doivent être organisées par un laboratoire. Le BIPM, tout comme les laboratoires nationaux de métrologie, a moins de ressources que par le passé pour ce faire ;
2. Les comparaisons peuvent durer longtemps, parfois plusieurs années, et il est nécessaire d'identifier dès le début les équipements qui seront nécessaires ;
3. Les missions de ces comparaisons doivent être clairement définies. Sinon, les résultats risquent de ne pas être comparables au niveau international.

Le président pense aussi qu'il est certainement difficile d'organiser des comparaisons. Il se demande si chaque comparaison ne devrait pas être confiée à un groupe de travail spécifique qui prendrait en compte les points soulevés par M. Bonnier et réduirait au minimum les efforts demandés aux laboratoires participants. M. Jones fait un parallèle avec un groupe de travail de la région Asie/Pacifique qui a été mis en place pour organiser une comparaison de calibres. La comparaison s'est bien déroulée, mais il pense que les comparaisons organisées en thermométrie posent plus de difficultés. M. Quinn suggère que les comparaisons aient lieu entre, par exemple, deux laboratoires appartenant à chaque groupe régional, et qu'ensuite les groupes régionaux comparent leurs résultats pour obtenir un résultat au niveau international. Cette méthode serait plus rapide. M. Grohmann trouve sympathique l'idée d'un effort minimal. Il propose de commencer par un échange d'informations, et mentionne qu'EUROMET a invité à transmettre au BIPM toutes les informations concernant les comparaisons. M. Ricolfi dit que les comparaisons en thermométrie ne demandent pas nécessairement un investissement en temps considérable si elles sont bien planifiées, comme on a pu le voir récemment au cours d'une comparaison de thermomètres à rayonnement entre 800 °C et 2000 °C à laquelle ont participé quatre laboratoires, et dans laquelle un thermomètre à rayonnement, étalonné au NRLM, a été transporté dans les autres laboratoires. Ceci conforte M. Bonnier dans ses positions ; la comparaison n'a pu être réalisée rapidement que grâce aux efforts du laboratoire pilote qui a préparé le projet et analysé les résultats. Il souligne à nouveau qu'un laboratoire doit être chargé de la comparaison et, en général, ce n'est pas au BIPM que revient le rôle de laboratoire pilote. M. Pokhodoun souligne l'importance des comparaisons pour améliorer les techniques de réalisation de l'échelle, ainsi que pour améliorer le document *Supplementary Information for the ITS-90*. Il souligne, en particulier, la nécessité de disposer de techniques uniformes pour la réalisation des points fixes ; cette tâche pourrait être confiée à un groupe de travail. Le président pense, comme M. Grohmann, que dans un premier temps il convient de se renseigner pour savoir quelles comparaisons internationales sont nécessaires. Il clôt la discussion sur ce sujet en disant que le but de

chaque comparaison doit être très clairement défini ; il sera inscrit dans les missions de chaque nouveau groupe de travail.

## 8. Études relatives à l'EIT-90

Le président ouvre la discussion en attirant l'attention sur le grand nombre de documents qui traitent de l'EIT-90 – preuve de son importance. Il y a eu bien sûr beaucoup d'informations à ce sujet en 1989 quand l'EIT-90 a été approuvée, mais il était alors évident que des informations complémentaires étaient attendues.

### 8.1 Non-unicité

Le président dit qu'un des problèmes importants est de déterminer la non-unicité de l'EIT-90, en particulier dans le domaine de définition du thermomètre à résistance de platine. Le concept de non-unicité est peut-être devenu un peu flou, toutefois, et la sémantique y joue peut-être un rôle. Dans l'EIT-90 il y a de nouveaux domaines de température avec des définitions qui se chevauchent et des instruments qui eux aussi se chevauchent. La distinction entre la non-unicité et d'autres types d'incertitude n'est peut-être pas si claire, par exemple en ce qui concerne les incertitudes dans la réalisation des points fixes ou les désaccords entre les sous-domaines. Il semble qu'il existe peu d'informations sur l'incertitude due au chevauchement des domaines du thermomètre à résistance de platine et du thermomètre à gaz, ou sur la non-unicité due au libre choix de trois points fixes de définition différents pour le domaine du thermomètre à rayonnement. Des études sont nécessaires pour identifier la précision la plus grande que l'EIT-90 permet d'atteindre. Le CCT doit continuer à suivre cette question. S'ouvre ensuite une discussion générale sur le sujet.

M. Bonnier pense que le niveau de non-unicité de l'EIT-90 est encore à établir et, en fait, il se pourrait bien qu'il soit proche de zéro. Pour détecter la non-unicité, il faut tout d'abord déterminer correctement toutes les autres sources d'incertitude, même si l'on n'utilise qu'un seul thermomètre. Il cite les documents CCT/93-1 et CCT/93-1(R), qui font état de plusieurs estimations d'incertitudes dans les laboratoires, lesquelles sont parfois de l'ordre de 0,1 mK pour certains points fixes. Il est pratiquement impossible selon lui de détecter des différences au niveau de 0,1 mK. M. Bonnier suggère aussi de mettre au point une méthode pour déterminer les incertitudes de toutes les températures de l'EIT-90 situées entre les différents points fixes. M. Bloembergen approuve en principe certains des points soulevés par M. Bonnier, mais il pense que ce travail a déjà été en partie réalisé. Il pense aussi que la non-unicité et le manque de cohérence entre les sous-domaines existent réellement, qu'ils ne sont pas négligeables et qu'ils diffèrent d'un domaine à l'autre. M. Mangum

est d'accord sur ce dernier point. M. Pavese dit qu'il faut distinguer entre la non-unicité et la propagation des incertitudes des points fixes. Il pense que la non-unicité provient des instruments de définition et des relations d'interpolation, et qu'elle n'est qu'une des trois composantes de l'incertitude globale. Le président est d'accord avec M. Pavese. Faisant référence aux expériences de Ward-Compton, il dit que la non-unicité de l'EIPT-68 a été établie, mais seulement pour un domaine particulier de température. Dans certaines parties de l'EIT-90 il n'est pas possible d'appliquer de semblables conditions; par exemple, dans le domaine compris entre les points de l'aluminium et de l'argent, il est difficile de comparer les thermomètres à résistance de platine à mieux que 1 mK, même dans un caloduc à sodium. Il est aussi difficile de réduire les erreurs dues aux points fixes au-dessous du millikelvin. Il en découle que la détection de la non-unicité au-dessous du millikelvin sera donc très difficile. Répondant aux remarques de M. Bonnier, M. Quinn suggère que des expériences soient faites pour déterminer la non-unicité et qu'il n'est peut-être pas si difficile que semble le dire M. Bonnier de distinguer entre la non-unicité et la propagation de l'incertitude des points fixes. M. Bloembergen pense que la non-unicité vient des thermomètres et le manque de cohérence des sous-domaines des relations d'interpolation.

M. Ricolfi attire l'attention sur un projet d'EUROMET auquel participent actuellement quatre laboratoires européens, ainsi que le NIST et le NIM. Des informations sur la non-unicité entre les points de l'aluminium et de l'argent devraient être communiquées au CCT, mais aucun résultat n'a été obtenu pour le moment. M. Bedford dit que des études sont aussi en cours au NRC. Mme Zhao relate certaines expériences faites au NIM entre les points de l'argon et de l'eau avec une non-unicité très faible. M. Durieux dit qu'entre 2 K et 4 K les échelles de  $^3\text{He}$  et  $^4\text{He}$  s'accordent à 0,2 mK près, ce qui est la limite de l'incertitude expérimentale. Plusieurs membres pensent que le document CCT/93-32 peut donner des informations pertinentes. En réponse à des questions, M. Sakurai dit que les incertitudes des points fixes (mesures faites avec cinq thermomètres à résistance de platine) sont inférieures aux différences des thermomètres à résistance de platine entre les points fixes, mais il est difficile de dissocier les composantes appartenant à l'EIPT-68 et à l'EIT-90. M. Rusby remarque que certaines ambiguïtés peuvent survenir lors de l'interprétation des résultats parce que, par exemple, l'EIT-90 utilise le point triple du néon comme point de définition alors que l'EIPT-68 ne le fait pas.

M. Pokhodoun fait ensuite le point sur les expériences en cours au VNIIM où des études sur la non-unicité et les incertitudes de l'échelle sont prioritaires. Les incertitudes des points fixes devraient être dissociées de la question de la non-unicité des thermomètres à résistance de platine. Il pense que la méthode de réalisation des points fixes peut affecter les valeurs des températures qui en résultent, donc les incertitudes. Une méthode plus uniforme de réalisation des points fixes dans les laboratoires nationaux

permettrait de réduire les différences entre les réalisations de ces points dans les différents laboratoires. Il pense que les faibles incertitudes citées dans le document CCT/93-1 représentent peut-être les incertitudes obtenues à l'intérieur d'un laboratoire, mais les différences entre les laboratoires sont certainement plus grandes. Par ailleurs, la non-unicité dépend des caractéristiques des thermomètres à résistance de platine, comme par exemple la dilatation du platine, la structure cristalline, la variabilité des défauts... La contribution due à chacune de ces caractéristiques est inconnue. Il propose qu'un programme expérimental soit mis en oeuvre dans chaque laboratoire national, sous les auspices du BIPM, pour examiner en détail les performances des thermomètres à résistance de platine de différentes fabrications. Le VNIIM est d'accord pour participer à ce travail en offrant des thermomètres. Une telle étude devrait permettre d'obtenir plus de résultats concrets que des études théoriques fondées sur des principes physiques.

Le président résume la discussion : bien que tous les membres soient d'avis que la non-unicité peut être bien définie, les expériences pour la mesurer sont difficiles à mettre en oeuvre avec une précision suffisante ; certaines études sont en cours ; toutes ne peuvent être réalisées dans un même laboratoire ; le CCT doit encourager les laboratoires à poursuivre les études, il n'a aucun moyen de les aider par une participation active, mais il peut néanmoins aider à éclaircir certaines questions théoriques.

## **8.2 Reproductibilité des points fixes**

Le président ouvre la discussion sur le point 8b de l'ordre du jour, et remarque que la réalisation des points fixes avec un haut degré d'exactitude semble s'avérer plus difficile que prévu. Par exemple, certains documents présentés à cette session traitent de l'exactitude de la réalisation du point triple de l'eau, et laissent entendre que celle-ci n'est pas aussi élevée qu'on l'avait dit précédemment. D'une manière ou d'une autre, il faut revenir à une vue plus réaliste de l'exactitude de réalisation des points fixes. Il pense que la température est une grandeur plus complexe que d'autres en ce qui concerne la réalisation des unités. De nombreux utilisateurs réclament une précision élevée ; peut-être le CCT devrait-il examiner les méthodes disponibles pour voir si elles donnent la même précision et, si ce n'est pas le cas, recommander des méthodes spécifiées.

M. Mangum rappelle l'importance de mesurer les caractéristiques d'immersion des thermomètres à résistance de platine aux points de congélation des métaux pour s'assurer que le gradient hydrostatique est mesurable, et donc qu'un bon équilibre thermique a été atteint. Ceci impose une bonne conception du four et une bonne isolation thermique. M. Bonnier demande si on mesure la reproductibilité de la transition de phase, ou seulement celle d'un dispositif particulier. Que recouvre réellement le terme « reproductibilité d'un point fixe » ? Il faut distinguer entre

l'instabilité du thermomètre à résistance de platine et la non-reproductibilité du point fixe. M. Pavese dit qu'il serait plus compréhensible de parler de la reproductibilité de la réalisation du point fixe, ce qui inclut une composante expérimentale en plus du phénomène physique, la transition. Faisant référence aux remarques précédentes de M. Pokhodoun, il dit qu'on peut obtenir une meilleure reproductibilité en adoptant des méthodes communes, mais ce n'est pas le but recherché. Le président souligne que *Supplementary Information* propose d'autres méthodes de réalisation. Faut-il être plus restrictif et définir des techniques de réalisation spécifiées ? M. Pavese dit qu'il serait préférable de résoudre les problèmes physiques, et fait un parallèle avec les comparaisons internationales de cellules scellées à points triples cryogéniques qui ont eu lieu précédemment. M. Bedford pense qu'il serait dangereux de restreindre les méthodes de réalisation ; par exemple, des points triples de métaux sont maintenant réalisés à la fois au moyen de cellules scellées utilisées en mode adiabatique et au moyen de techniques conventionnelles, et, à des températures plus hautes, au moyen de méthodes de réalisation pseudo-adiabatiques et de méthodes conventionnelles. Il y a beaucoup d'avantages à ne pas restreindre les méthodes de réalisation. M. Jung approuve le point de vue de M. Bedford, disant qu'il vaut mieux étudier les problèmes physiques que de réécrire *Supplementary Information*. M. Quinn demande s'il convient maintenant de s'intéresser à l'exactitude, ou en d'autres termes de se rapprocher de la définition. Pour ce qui concerne les points triples, la question de la définition ne se pose pas, mais pour les points de fusion ou de congélation, a-t-on une définition ? *Supplementary Information* traite cette question d'un point de vue expérimental. Doit-on être plus précis ? Ceci pourrait entraîner une étude plus approfondie des définitions des points fixes. M. Bonnier pense aussi qu'il est difficile de donner des définitions parfaitement correctes. Par exemple, des changements de composition isotopique peuvent avoir un effet sur les points triples de l'eau et du néon, mais apparemment pas sur le point de congélation de l'étain, bien que celui-ci ait naturellement une distribution isotopique semblable à celle du néon. Le président pense aussi qu'il est extrêmement important d'avoir une définition correcte et dit qu'il n'est pas toujours possible de donner une définition des points fixes qui soit applicable dans tous les cas. La définition doit pouvoir être aménagée en fonction de tests critiques. Il est inutile d'élaborer une définition « élégante mais inapplicable » ! M. Rhee pense que les définitions des points fixes comme états d'équilibre thermodynamique sont claires. En ce qui concerne la reproductibilité et l'exactitude, toutefois, cette dernière dépend de la pureté et de bien d'autres choses. Les reproductibilités citées dans le document CCT/93-1 correspondent à des instruments déterminés utilisés dans certains laboratoires. Peut-être faudrait-il mieux définir l'exactitude. M. Grohmann approuve la suggestion de M. Pavese d'effectuer plus de comparaisons entre les laboratoires. Cela aiderait à élucider certains problèmes clés. Cependant, il faut préciser clairement de quelle comparaison il s'agit.



Après plus ample discussion entre les membres du CCT, M. Hudson note que bien des points ont été traités. Il serait préférable de se concentrer sur les besoins actuels en vue de satisfaire les objectifs fixés pour l'avenir. Convient-il de former un groupe de travail pour préparer la discussion? Le président est de cet avis. Il propose d'inclure ce point dans les missions d'un nouveau groupe de travail à long terme.

### **8.3 Autres problèmes soulevés par l'emploi d'instruments d'interpolation**

Le président demande d'en venir au point de l'ordre du jour qui concerne les autres problèmes soulevés par l'emploi des instruments d'interpolation. M. Bedford résume brièvement les résultats des recherches faites au NRC sur la contamination des thermomètres à résistance de platine par l'argent après des périodes prolongées dans des lingots d'argent. Il mentionne aussi l'indisponibilité croissante dans le commerce d'instruments étalons. M. Rhee cite en particulier le nombre trop restreint de fabricants de thermomètres à résistance de platine pour les hautes températures et, par conséquent, les difficultés à obtenir ces instruments. Il trouve aussi que la reproductibilité de certains thermomètres à résistance de platine pour les hautes températures n'est pas bonne. D'autres difficultés sont aussi évoquées par d'autres membres du CCT.

### **8.4 Nouvelles informations sur ( $T - T_{90}$ )**

M. Rusby résume le rapport du Groupe de travail 4 (document CCT/93-25) qui n'a pas pu être distribué avant la session. Ce rapport traite essentiellement des mesures de température thermodynamique faites depuis 1989. M. Rusby mentionne le travail de Weber (PTB) qui est maintenant publié. Ses mesures provisoires précédentes d'isothermes (thermomètre à gaz) à 90 K, 54 K et 27 K sont cohérentes avec les autres valeurs thermodynamiques sur lesquelles l'EIT-90 est fondée. Une nouvelle analyse des données a montré qu'une correction était nécessaire pour le volume de l'espace nuisible, d'où il résulte que les températures des trois isothermes publiées par M. Weber sont inférieures respectivement de 9,1 mK, 7,4 mK et 3,5 mK. Pour comparer différentes mesures en thermométrie à gaz réalisées avec des réservoirs en cuivre, il faut aussi utiliser partout le même coefficient de dilatation thermique du cuivre. Kemp *et al.* ont utilisé le coefficient de dilatation de Kroeger et Swenson. Les valeurs données par Weber, qui ont été recalculées avec le coefficient de dilatation de Kroeger et Swenson (alors que Weber avait d'abord utilisé un coefficient, légèrement différent, déterminé à la PTB), ont été légèrement augmentées (de 2,7 mK à 90 K). Par ailleurs, le coefficient de dilatation du cuivre utilisé dans les expériences d'Astrov *et al.* (VNIIFTRI) est très différent de celui de Kroeger et Swenson. Le Groupe de travail 4, après de nouveaux calculs, a

trouvé que les valeurs de  $T$  sont inférieures à celles qui avaient été publiées, et que, de plus, elles concordent avec les valeurs recalculées de Weber. Ce changement a été plus ou moins confirmé (mais pas l'accord avec Weber) dans un document récent du VNIIFTRI (document CCT/93-38) qui décrit de nouvelles mesures de dilatation proches de celles de Kroeger et Swenson, ainsi que de nouvelles valeurs de  $T$  proches de celles calculées par le Groupe de travail 4. Tout ceci diminue notablement la valeur moyenne de  $(T - T_{68})$  aux températures situées entre 90 K et 200 K, et les valeurs de Kemp *et al.* deviennent sensiblement plus élevées que celles du VNIIFTRI et de la PTB, tout comme les mesures de thermométrie à rayonnement de Quinn et Martin. Les résultats des mesures de thermométrie à gaz qui ont été recalculés sont confirmés par de nouvelles mesures de thermométrie acoustique (document CCT/93-28). Les nouveaux résultats de mesures de thermométrie acoustique du NIST (en cours de publication) devraient aussi se situer à mi-chemin entre ces nouvelles valeurs et les anciennes.

M. Rusby résume aussi les informations récentes sur  $(T - T_{68})$  au-dessus de 0 °C. Il a été mis fin à l'expérience fondée sur la thermométrie à rayonnement total du NPL. Les mesures de radiométrie spectrale de la PTB se situent dans les limites des incertitudes de mesure de l'EIT-90, de même que les mesures de radiométrie absolue fondées sur des radiomètres cryogéniques. D'autres expériences de ce type sont envisagées. Les résultats des mesures de thermométrie à bruit de Brixey *et al.* au point du zinc ont des incertitudes assez grandes pour accepter les mesures de thermométrie à gaz d'Edsinger et Schooley et de Guildner et Edsinger. D'autres mesures de thermométrie à bruit sont envisagées à proximité du point de l'argent (Brixey *et al.*) et du point du cuivre (Crovini *et al.*).

Le président demande ce que l'on peut faire de tous ces nouveaux résultats qui ne concordent pas avec ceux de 1989, et il estime qu'il est nécessaire d'obtenir d'autres résultats. M. Bedford remarque que les nouveaux résultats de  $(T - T_{68})$  au-dessous de 0 °C confirment les anciens résultats de Preston-Thomas et de Kirby au NRC, sur lesquels l'EIP-68 était fondée. Il demande si le Groupe de travail 4 pense que les nouvelles valeurs au-dessous de 0 °C sont plus fiables que les anciennes, comme semble l'indiquer le rapport, et si cela est vrai, pourquoi. M. Rusby répond par la négative, le Groupe de travail 4 a simplement décrit les résultats disponibles. M. Nicholas dit que les nouvelles valeurs s'accordent mieux avec ses tentatives d'établir une relation thermodynamique entre la température et la résistivité électrique du platine entre 100 K et 300 K. Suit une discussion assez générale sur l'état des connaissances au sujet de  $(T - T_{90})$  au-dessous de 0 °C.

Le président conclut ensuite que, de toute évidence, de nouvelles valeurs sont nécessaires pour éliminer les désaccords dans ce domaine; il est nécessaire de trouver une explication aux incertitudes des valeurs actuelles, et le CCT ne devrait pas agir avec précipitation. M. Rusby dit que le Groupe de travail 4 continuera à suivre la situation et

publiera les valeurs recommandées de  $(T - T_{90})$  le moment venu, quand il disposera d'informations suffisamment fiables. M. Pokhodoun propose qu'une comparaison internationale de mesures du coefficient de dilatation thermique du cuivre soit réalisée; le VNIIM est volontaire pour fournir des échantillons de cuivre. La suggestion est favorablement accueillie, mais ne reçoit aucune proposition précise. Il semble que des échantillons de cuivre aient déjà été échangés de manière bilatérale (entre le CSIRO et le VNIIFTRI, et entre l'IMGC et le CSIRO). On ne dispose d'aucune information sur la première comparaison bilatérale, quant à la seconde, les résultats ont confirmé les valeurs connues.

Le président conclut la discussion sur ce point en répétant que le CCT ne devrait pas pour le moment publier de nouvelles valeurs recommandées de  $(T - T_{90})$  au-dessous de 0 °C.

## 9. Rapport du Groupe de travail 2

### **(points fixes secondaires, approximation de l'EIT-90, nouvelles tables internationales pour les thermocouples et pour les thermomètres à résistance de platine industriels)**

M. Bedford résume brièvement le rapport du Groupe de travail 2, présenté en deux parties (documents CCT/93-16a et 16b). Lors de sa session de 1989, le CCT avait chargé le Groupe de travail 2 de trois missions. Le groupe s'est réuni trois fois depuis lors, en 1991 à Paris, en 1992 à Toronto, et le 6 septembre 1993 au BIPM. La première des missions dont il avait été chargé, la rédaction de la monographie *Techniques for Approximating the International Temperature Scale of 1990* a été menée à bien; celle-ci a été publiée par le BIPM en 1990. Elle a été un succès: imprimée en 1500 exemplaires, il n'en reste aujourd'hui que 260. Elle a été traduite en français et en italien. Le Groupe de travail 2 envisage une éventuelle révision. La deuxième mission, aider à la publication de nouvelles tables pour les thermocouples et les thermomètres à résistance de platine industriels, a aussi été menée à bien. Après avoir commencé la préparation de nouvelles tables pour les thermocouples, M. Burns (NIST) a constaté qu'il était nécessaire d'obtenir de nouvelles valeurs expérimentales pour la force électromotrice de Pt-10% Rh/Pt en fonction de  $t_{90}$  dans la région de 600 °C à 1000 °C. C'est aussi ce qu'avait suggéré M. Rusby lors de la session de 1989 du CCT. Ceci a fait l'objet d'une discussion approfondie lors d'une réunion qui s'est tenue au NIST en 1990; ensuite M. Bedford a présenté des recommandations à tous les laboratoires membres du CCT et les a invités à participer aux mesures. Finalement, huit laboratoires ont fourni des valeurs, dont l'analyse a été faite au NIST; les résultats de cette étude ont été publiés dans les comptes rendus du

symposium sur la thermométrie qui s'est tenu à Toronto en 1992. Pendant ce temps, M. Bedford a tenu le Groupe de travail 5 de la CEI SC65B informé des progrès en cours. De nouvelles tables pour les thermocouples, fondées sur l'EIT-90, pour tous les thermocouples en métaux ordinaires et en métaux nobles (désignés par des lettres) couramment utilisés, ont ensuite été publiées par Burns *et al.* (*NIST Monograph* 175, avril 1993), ainsi que par l'American Society for Testing and Metals. Simultanément, de nouvelles tables pour les thermomètres à résistance de platine industriels ont été préparées par Crovini *et al.*, fondées en grande partie sur les valeurs obtenues à l'IMGC avec une grande variété de thermomètres. Elles ont aussi été publiées dans les comptes rendus du symposium sur la thermométrie qui s'est tenu à Toronto en 1992. En juin 1992, M. Bedford a représenté le Groupe de travail 2 du CCT à une réunion du Groupe de travail 5 de la CEI SC65B qui s'est tenue au NIST. Lors de cette réunion, après une longue discussion, le Groupe de travail 5 a recommandé à l'approbation de la CEI les nouvelles tables pour les thermocouples ainsi qu'une version légèrement modifiée des tables pour les thermomètres à résistance de platine industriels. Le CCT a ensuite approuvé ces tables ; la CEI devrait les approuver officiellement fin 1993 et les publier début 1994.

M. Bedford explique ensuite que la troisième mission qui a été confiée au Groupe de travail 2, réviser et mettre à jour les valeurs des températures des points de référence secondaires, est celle qui lui a demandé le plus de temps. Un projet de révision de cette publication fait l'objet du document CCT/93-16*b*. M. Bedford invite les membres du CCT à commenter, et critiquer, ce projet. Il souligne certains détails techniques entrant dans la préparation de cette table et résume comment cette table a été établie, notant les différences entre ce projet et la publication de 1984. Il attire aussi l'attention sur quelques coquilles. M. Bedford décrit ensuite une difficulté particulière qui influe sur les incertitudes des températures des points fixes secondaires de l'EIT-90. Presque toutes les mesures sur lesquelles les valeurs de cette table sont fondées ont été faites dans l'EIPT-68. Beaucoup de points au-dessous de 500 °C ont une incertitude inférieure au millikelvin dans l'EIPT-68. Cependant, les incertitudes inhérentes aux relations utilisées pour convertir  $T_{68}$  en  $T_{90}$  sont supérieures à cette valeur et elles ne sont pas exactement connues. Nous nous trouvons donc devant l'anomalie suivante : de nombreuses températures de référence secondaires sont connues avec une précision supérieure dans l'EIPT-68, qui est l'échelle la moins précise. Une solution à ce dilemme consiste à établir uniquement, dans la version finale, la liste des températures des points fixes secondaires qui se situent dans la limite de 1 mK, ce qui devrait suffire à la plupart des besoins. Une autre petite difficulté dans la conversion à  $T_{90}$  est que les relations pour les domaines situés au-dessus et au-dessous de 83 K ne donnent pas exactement la même valeur à 83 K. De manière rétrospective, cette singularité a dû être supprimée, et la jonction réalisée à proximité de 63 K, au lieu du milieu du domaine de la pression de vapeur saturante de l'oxygène, conformément à l'analyse faite par M. Pavese lors de la

préparation de la conversion des relations de pression de vapeur à  $T_{90}$  (documents CCT/93-16b et CCT/93-4).

M. Bedford conclut par les suggestions suivantes du Groupe de travail 2 :

1. Les commentaires, ou critiques, sur le projet du CCT devraient parvenir à M. Bedford sous forme écrite avant le 15 octobre 1993 ;
2. Le Groupe de travail 2 préparera alors une version révisée de ce projet qui sera distribuée aux membres du CCT, d'ici quelques mois ;
3. Après une prise en compte des commentaires sur cette version révisée, un article sera soumis pour publication à *Metrologia*.

Suit une longue discussion sur le rapport du Groupe de travail 2 portant sur plusieurs points : faut-il inclure les points au-dessous du domaine de l'EIT-90 (la décision est non) ; comment faut-il traiter les déclarations d'incertitude (l'opinion de la majorité est de ne pas donner  $T_{90}$  à mieux que 1 mK, comme l'a suggéré le Groupe de travail 2, mais certains membres proposent de donner deux valeurs pour l'incertitude, l'une tenant compte de l'incertitude de conversion et l'autre pas) ; comment obtenir avec plus d'exactitude ( $t_{90} - t_{68}$ ), par exemple par la conversion des étalonnages des thermomètres à résistance de platine utilisés pour les mesures des points fixes, de l'EIPT-68 à l'EIT-90 (selon M. Bedford, c'est possible en principe, mais impossible en pratique, pour diverses raisons) ; singularité à 83 K entre les deux relations ( $t_{90} - t_{68}$ ) (différentes relations pourraient être utilisées, mais maintenant les relations originales sont largement diffusées).

## 10. Incertitudes dans la réalisation de l'EIT-90

Le président ouvre la discussion en faisant remarquer que cette question pourrait prendre beaucoup d'importance à l'avenir. Il est nécessaire d'utiliser une terminologie et des méthodes d'estimation des incertitudes communes et concrètes, en particulier en vue des prochaines comparaisons internationales qui sont envisagées entre les laboratoires et les groupes régionaux. Il n'est pas très utile selon lui de débattre de ce sujet, car cela ne peut qu'entraîner une discussion sans fin. Il propose plutôt de l'inclure dans les missions du nouveau Groupe de travail 3, qui sera créé au cours de cette session. M. Bonnier recommande d'ajouter, lors de la révision de *Supplementary Information*, une formule mathématique pour tenir compte de la propagation des erreurs des points fixes, comprenant les covariances. M. Bloembergen est d'accord sur le principe. Le président dit que de telles considérations pourraient faire partie des missions du Groupe de travail 3. M. Quinn remarque qu'une semblable discussion a eu lieu lors de la session de 1989 du CCT. Il recommande que les laboratoires préparent et publient leurs propres rapports sur le sujet, qui seront publiés comme documents du CCT.

## 11. Problèmes qui se posent au-dessous de 1 K et extension de l'échelle au-dessous de 0,65 K

M. Rusby résume les problèmes qui se posent actuellement au-dessous de 1 K et évoque ceux que pose l'extension de l'échelle au-dessous de 0,65 K, en se référant au document CCT/93-25, ainsi qu'aux documents CCT/93-6 à 8, 27, 30 à 32, 39 et 40. Il propose de discuter du domaine situé au-dessous de 1 K en deux parties, au-dessus et au-dessous de 0,5 K. Dans le premier cas, des thermomètres rhodium-fer utilisés pour réaliser l'échelle  $T_{X1}$  ont été comparés aux échelles à nitrate de cérium-magnésium (CMN) à la PTB et aux É.-U. d'Amérique; on a trouvé que ces nouvelles échelles CMN divergeaient systématiquement de  $T_{X1}$  au-dessous de 1,2 K, jusqu'à 1,2 mK à proximité de 0,5 K, ce qui laisse à penser que l'échelle  $T_{X1}$  est fautive. Les calculs thermodynamiques des pressions de vapeur saturante de  $^3\text{He}$  à la PTB et au KOL, qui comprennent les résultats de récentes mesures, sont aussi en accord avec les mesures de CMN. Il en résulte que  $T_{90}$ , qui est en accord avec  $T_{X1}$ , peut aussi être fautive. De nouvelles mesures de pression de vapeur saturante de  $^3\text{He}$  sont envisagées (PTB, NMI/VSL) afin de confirmer, ou d'infirmer, cette erreur possible dans l'EIT-90. M. Grohmann souligne que c'est en réalité  $T_{X1}$  qui est fautive, et pas nécessairement l'EIT-90. Les nouvelles mesures de pression de vapeur envisagées permettront de vérifier si  $T_{90}$  comporte aussi des erreurs, c'est-à-dire si elle s'éloigne des températures thermodynamiques. Simultanément à ces nouvelles mesures de pression de vapeur de la PTB, des mesures sur la courbe de fusion de  $^3\text{He}$  seront effectuées. M. Rusby en vient ensuite au second cas (au-dessous de 0,5 K). Il rappelle les expériences de fusion de  $^3\text{He}$  faites au Lawrence Berkeley et au Naval Research Laboratory (document CCT/93-27) et l'échelle de température qui en découle au-dessous du domaine de l'EIT-90 jusqu'à environ 6 mK. La PTB (document CCT/93-7) a établi une échelle magnétique similaire jusqu'à environ 50 mK. Ces échelles pourraient servir de point de départ pour l'extension de l'EIT-90 aux basses températures. Faisant référence au document CCT/93-25, il dit qu'une extension fondée sur les pressions de fusion de  $^3\text{He}$  pourraient fournir la base la plus pratique. Avec un chevauchement convenable avec l'EIT-90, ce pourrait être la base d'une échelle de 1 mK à 1 K.

Le président ouvre ensuite la discussion. M. Bloembergen demande si le CCT a l'intention de recommander l'extension de l'EIT-90 lors de cette session. M. Durieux répond par la négative, car beaucoup d'expériences ne sont pas encore terminées. Plusieurs membres sont de cet avis. Toutefois, cette question soulève une discussion sur la marche à suivre, des analogies étant faites avec les précédentes échelles de pression de vapeur saturante de l'hélium et l'EPT-76 dans le passé. Suit une longue discussion sur la nécessité d'une telle extension, sur les meilleurs moyens de la réaliser, sur la manière d'effectuer au mieux la liaison avec l'EIT-90, sur l'opportunité d'avoir un chevauchement avec l'EIT-90, sur la

nature pseudo-thermodynamique de l'extension proposée, et sur le fait de savoir si les valeurs de  $(T - T_{90})$  dans ce domaine de température général devraient être publiées maintenant. M. Quinn suggère finalement qu'il est manifestement trop tôt pour faire des propositions sérieuses; il faut demander au Groupe de travail 4 d'analyser la situation et de présenter à la prochaine session du CCT une proposition précise. M. Rusby suggère de proposer au CIPM un projet de recommandation pour encourager d'autres recherches dans ce domaine. Le président clôt la discussion sur ce sujet en chargeant le Groupe de travail 4 d'étudier l'éventuelle extension de l'EIT-90 au-dessous de 0,65 K.

## 12. La thermométrie au BIPM

M. Quinn rappelle qu'il est habituel de demander l'avis du CCT sur le programme de travail du BIPM en thermométrie. Celui-ci a été considérablement restreint ces dernières années, une bonne partie des moyens financiers ayant été transférés à la radiométrie. Le programme de travail ne couvre maintenant que le domaine proche de la température ambiante, les moyens faisant défaut pour travailler à plus hautes ou à plus basses températures. Il demande aux membres du CCT de faire des commentaires. M. Bonnier suggère d'envoyer une lettre au CIPM pour se plaindre de la réduction du programme de travail en thermométrie. Si les comités consultatifs n'envoient pas ce type de lettres, le CIPM n'a pas l'opportunité d'entendre leurs objections. M. Quinn, répond que, bien entendu, le CCT peut faire ce qui lui plaît, mais qu'une telle lettre ne doit pas se contenter de faire des recommandations banales; elle doit aussi expliquer pourquoi tel domaine est plus prioritaire qu'il y a cinq ans. De l'avis du président, ce n'est pas au CCT de mettre en question maintenant les priorités établies par le BIPM avec l'approbation du CIPM. M. Jones rappelle que le BIPM disposera bientôt d'un radiomètre cryogénique. Celui-ci ne pourrait-il pas aussi être utilisé pour la mesure des températures thermodynamiques, en particulier pour établir les incertitudes actuelles sur  $(T - T_{90})$  à proximité de 100 K? M. Quinn pense qu'il pourrait être possible de faire quelques mesures en thermométrie à rayonnement, en considérant en particulier les améliorations récentes de la qualité des corps noirs. Avec l'accord du CCT, M. Jones se propose de faire un projet de recommandation pour que le BIPM, et les laboratoires nationaux de métrologie qui possèdent un tel radiomètre cryogénique, utilisent au mieux cet instrument pour mesurer aussi les températures thermodynamiques.

[À l'invitation du personnel du BIPM, un petit sous-groupe du CCT visite le laboratoire de thermométrie pour voir les résultats de certaines comparaisons de cellules à point triple de l'eau. Parmi les cellules concernées, deux ont montré une dérive à long terme anormale

– phénomène jamais signalé jusqu’à présent – plusieurs jours après la formation du manchon.]

Le président résume la visite du laboratoire du point triple de l’eau effectuée par ce sous-groupe. Le personnel du BIPM a montré les résultats d’une comparaison de cinq cellules provenant de trois fabricants différents. La stabilité à long terme de la température du point triple après la formation du manchon était au centre de la comparaison. Deux techniques ont été utilisées pour préparer le manchon: l’insertion d’une tige refroidie à l’azote liquide ou l’insertion de neige carbonique ( $\text{CO}_2$  solide) dans le puits du thermomètre. En utilisant la tige refroidie à l’azote liquide deux des cellules (une de fabrication allemande et l’autre de fabrication japonaise), d’abord en accord avec les trois autres pendant une durée assez longue, se sont mises à s’écarter de quantités significatives pour atteindre un écart plus ou moins stable de 0,5 mK après plusieurs jours. Cet effet ne s’est pas produit lorsque le manchon était préparé avec de la neige carbonique. Aucun autre laboratoire n’a signalé un comportement semblable. Le président conclut que le CCT devrait recommander aux laboratoires nationaux de métrologie *a)* d’étudier la stabilité à long terme des cellules à point triple de l’eau; *b)* d’échanger des cellules avec le BIPM pour comparer les différentes techniques. Il conviendrait d’échanger, en particulier, des cellules présentant des anomalies.

### 13. Établissement et composition des groupes de travail

Au cours de la session, plusieurs tâches sont apparues comme pouvant être confiées de manière appropriée et efficace à de petits groupes de travail; ces groupes devront présenter un rapport lors de la prochaine session du CCT et un rapport préliminaire un an avant la prochaine session. Après discussion, il est convenu de créer quatre groupes de travail. Deux d’entre eux (le Groupe de travail 2 et le Groupe de travail 4) continueront avec sensiblement les mêmes missions et les mêmes membres que précédemment. Les nouveaux groupes de travail 1 et 3 remplaceront deux anciens groupes de travail dont les tâches ont été menées à leur terme. Après plus ample discussion, les attributions et la composition des groupes de travail sont les suivantes:

*Groupe de travail 1.* — Définition des points fixes et des instruments d’interpolation: techniques améliorées pour la réalisation des points fixes de définition et des instruments d’interpolation ( $T_{90} \geq 3$  K); non-unicité; mise à jour de *Supplementary Information*.

B. W. Mangum (président)

P. Bloembergen

M. V. Chattle



A. I. Pokhodoun

P. Marcarino

*Groupe de travail 2.* — Points fixes secondaires et techniques permettant d'approcher l'EIT-90 : points fixes secondaires; réalisations pratiques approchées de l'EIT-90; conseils pour la mise en application de l'EIT-90 dans les normes internationales et les tables critiques; mise à jour des documents existants.

R. E. Bedford (président)

H. Maas

F. Pavese

C. Rhee

Zhao Qi

*Groupe de travail 3.* — Traçabilité internationale des mesures de température : collecte de renseignements sur les comparaisons régionales et bilatérales; organisation de comparaisons appropriées au plus haut niveau d'exactitude entre les groupes régionaux; méthodes d'estimation des incertitudes.

G. Bonnier (président)

T. P. Jones

T. Ricolfi

D. C. Ripple

H. Sakurai

*Groupe de travail 4.* — Détermination des températures thermodynamiques et extension de l'EIT-90 à de plus basses températures : nouvelles déterminations de  $T$  et de  $(T - T_{90})$ ; informations sur  $(T_{90} - T_{68})$ ; échelle de pression de vapeur saturante de  $^3\text{He}$  au-dessous de 3 K; échelles de température au-dessous de 0,65 K.

R. L. Rusby (président)

M. Durieux

R. P. Hudson

K. Grohmann

H.-J. Jung

P. P. M. Steur

M. Bedford rappelle que le projet de table de températures de référence secondaires a été préparé par les anciens membres du Groupe de travail 2. La version finale devrait être prête prochainement et publiée. Il propose que les anciens membres du Groupe de travail 2 figurent comme auteurs de cette publication. Les membres approuvent cette proposition. Le président

dit qu'il en est de même pour la publication future du Groupe de travail 4 sur ( $t_{90} - t_{68}$ ) de 630 °C à 1064 °C.

#### **14. Rapport au CIPM et recommandations**

Au cours de la session, le CCT a retenu trois sujets qui font l'objet de recommandations au CIPM: la Recommandation T 1, sur la liaison entre les comparaisons régionales en thermométrie; la Recommandation T 2, sur le comportement des cellules à point triple de l'eau; la Recommandation T 3, sur les mesures de la température thermodynamique. Différents projets sont préparés et discutés dans le détail pour aboutir à l'adoption d'un texte final en français et en anglais. Le président dit qu'il préparera le texte de son rapport au CIPM à la fin du mois de septembre 1993. Les trois recommandations seront jointes en annexe à ce rapport.

#### **15. Questions diverses**

##### **15.1 Prochaine session**

Le président recommande que la prochaine session du CCT ait lieu en 1996. Les membres approuvent cette proposition. La date précise sera décidée ultérieurement, en fonction d'autres événements tels que le symposium d'IMEKO sur les mesures de température qui aura lieu à Turin en 1996. Le président rappelle aux présidents des groupes de travail qu'ils doivent envoyer leur rapport préliminaire en temps voulu pour la préparation du rapport à la vingtième Conférence générale.

##### **15.2 Questions diverses**

M. Rusby, se référant au document CCT/93-23, décrit les travaux récents sur la réalisation du point triple du deutérium en cellules scellées. Trois cellules d'origines différentes ont été comparées au NPL, à l'IMGC et au VNIIFTRI: elles sont en accord à environ 1 mK. La possibilité d'utiliser le point triple du deutérium dans l'EIT-90 au lieu des deux points d'ébullition de l'hydrogène est donc séduisante. Il pourrait certainement être utilisé pour des réalisations secondaires. M. Mangum demande s'il existe plus d'une source d'approvisionnement en deutérium de pureté suffisante. M. Pavese répond qu'il n'existe actuellement qu'un seul fabricant industriel (Monsanto), mais qu'une autre source d'approvisionnement d'origine russe est aussi prévue. Il s'ensuit une brève discussion entre MM. Rusby, Pavese, Bloembergen et Mangum

sur les sources de deutérium, sur les moyens de le produire, sur l'efficacité des différents catalyseurs, sur la reproductibilité à long terme du point triple, et sur l'effet de non-unicité de l'EIT-90 au cas où les points fixes à 17 K et à 20 K seraient remplacés par le seul point triple du deutérium. M. Pavese dit aussi que l'IMGC a en réserve 100 litres de deutérium (Monsanto) conservés dans un conteneur stabilisé en température.

Le président informe le CCT que M. Bonhoure prendra sa retraite du BIPM en octobre 1993. Il le remercie pour sa contribution considérable au travail du CCT pendant des années – pour ses études sur la thermométrie à rayonnement, sur la thermométrie des basses températures, sur les mesures de pression et pour l'aide qu'il a apportée à traduire du mauvais anglais en bon français. M. Quinn rend aussi hommage à M. Bonhoure pour la carrière qu'il a menée au BIPM et, notamment, pour avoir mis en route l'étude sur la thermométrie à rayonnement dans les années 1960 lors de la venue de M. Hall du NPL. En réponse, M. Bonhoure conclut en disant qu'il a assisté à une réunion du CCT pour la première fois en 1954, que les discussions étaient centrées sur le point triple de l'eau, et que, lors de la dernière session du CCT à laquelle il assiste en 1993, le point triple de l'eau est à nouveau un des points importants à l'ordre du jour. Le CCT applaudit M. Bonhoure.

Le président clôt la session; il remercie les membres du CCT pour leur soutien, leurs contributions et l'efficacité avec laquelle ils ont traité les nombreux points à l'ordre du jour. Il remercie aussi le personnel du BIPM pour son aide précieuse lors de cette session. M. Quinn félicite M. Crovini pour la manière brillante dont il a mené ce premier CCT en qualité de président.

Janvier 1994

---

## ANNEXE T 1

---

### Documents de travail présentés à la 18<sup>e</sup> session du CCT

---

Ces documents de travail peuvent être obtenus dans leur langue originale sur demande adressée au BIPM.

Document  
CCT/

- 93-1 Questionnaire on the realization of the ITS-90, 4 p.  
Answers received to the questionnaire, 57 p.  
(R) ITS-90 realisation in 14 national laboratories. Results of a CCT inquiry, by L. Crovini and P.P.M. Steur, 17 p.
- 93-2 NRC (Canada). — Platinum Resistance Thermometry Beyond 830 °C, the Pt-Si Eutectic Point?, by J. Ancsin, 4 p.
- 93-3 NRC (Canada). — Observations Concerning Ag-Al Eutectic and their Relevance to Pt-Si Reaction, by J. Ancsin, 5 p.
- 93-4 IMGc (Italie). — Recalculation on ITS-90 of Accurate Vapour-Pressure Equations for e-H<sub>2</sub>, Ne, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, Ar, CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub>, by F. Pavese. *J. Chem. Thermodynamics*, 1993, **25**, 1351-1362.
- 93-5 PTB (Allemagne) et INM (France). — A provisional reference function for platinum versus palladium thermocouples in the range 0 °C until 1084 °C, by F. Edler, H. J. Jung, H. Maas and J. Y. Le Pommelec, 12 p.
- 93-6 PTB (Allemagne). — Comments on the <sup>3</sup>He vapour-pressure scale, by B. Fellmuth and G. Schuster, 2 p.
- 93-7 PTB (Allemagne). — PTB-92: A temperature scale below ITS-90, by G. Schuster and D. Hechtfisher, 2 p.
- 93-8 PTB (Allemagne). — Remarks on a future <sup>3</sup>He melting-pressure scale, by B. Fellmuth, W. Buck and G. Schuster, 3 p.
- 93-9 VNIIM (Féd. de Russie). — Determination of the relationship between the resistance ratio and the temperature of a platinum resistance thermometer above the freezing point of silver, by A. I. Pokhodoun, M. S. Matveyev and N. P. Moiseyeva, 15 p.

Document  
CCT/

- 93-10 NIM (Rép. pop. de Chine). — The Realization of ITS-90 (1,2 K - 273,16 K) at NIM, by Zhang GuoQuan, Liu Yang, Huang NingSheng, Wu HeLian and Wu BiQin, 2 p.
- 93-11 NIM (Rép. pop. de Chine). — Note: Remark of Radiation Thermometry, by Zhao Qi, Yuan Zundong, Duan Yuning, 2 p.
- 93-12 NIM (Rép. pop. de Chine). — The present state of the International Temperature Scale of 1990 between 0 °C and 961,78 °C in China, by Li Xumo, 2 p.
- 93-13 INM-CNAM (France). — About the accuracy of the mercury triple point, by Y. Hermier and G. Bonnier, 7 p.
- 93-14 INM-CNAM (France). — About the "strange" behaviour of a water triple-point cell, by Y. Hermier and G. Bonnier, 5 p.
- 93-15 NPL (Royaume-Uni). — A EUROMET intercomparison of rhodium-iron resistance thermometers, by D. I. Head and R. L. Rusby, 8 p.
- 93-16a Report of Working Group 2 to the Comité Consultatif de Thermométrie, July 1993, 6 p.  
b Report 2 of Working Group 2 to the Comité Consultatif de Thermométrie, September 1993, 30 p.
- 93-17 IMGc (Italie). — On the behaviour of Platinum Palladium thermocouple from 600 °C to 1 300 °C, by L. Crovini, A. Actis, V. Fericola and R. Galleano, 5 p.
- 93-18 NIST (É.-U. d'Amérique), IMGc (Italie), KRISS (Rép. de Corée), NPL (Royaume-Uni), NRLM (Japon), VNIIM (Féd. de Russie) et VSL (Pays-Bas). — Determination of ( $t_{90} - t_{68}$ ) between 630,615 °C and 1 064,18 °C, by G. W. Burns, G. F. Strouse and B. W. Mangum, P. Marcarino and M. Battuello, H. K. Lee, J. C. Kim, K. S. Gam and C. Rhee, M. Chattle, M. Arai and H. Sakurai, A. I. Pokhodun, N. P. Moiseeva and S. A. Perevalova, and M. J. de Groot, 7 p.
- 93-19 NPL (Royaume-Uni). — Measurements on Triple Point of Water Cells Following Different Preparation Methods, by M. V. Chattle and Miss J. Butler, 5 p.
- 93-20 NIST (É.-U. d'Amérique). — The Effect of Hydrostatic Head on the Liquid/Solid Equilibrium Temperature of Mercury During Freezing and Melting, by G. T. Furukawa, 5 p.

Document  
CCT/

- 93-21 NIST (É.-U. d'Amérique). — A Progress Report on the Primary Realization of the International Temperature Scale of 1990 from 0,65 K to 83,8 K at the National Institute of Standards and Technology, by C. W. Meyer and M. L. Reilly, 6 p.
- 93-22 NIST (É.-U. d'Amérique) et PTB (Allemagne). — A Direct Comparison of Three PTB Silver Fixed-Point Cells with the NIST Silver Fixed-Point Cell, by G. F. Strouse and B. W. Mangum, H. G. Nubbemeyer and H. J. Jung, 9 p.
- 93-23 NPL (Royaume-Uni), VNIIFTRI (Féd. de Russie) et IMGC (Italie). — Measurement of a VNIIFTRI Deuterium Triple Point Cell at IMGC and NPL, by D. I. Head, D. N. Astrov, V. M. Khnykov and F. Pavese, 5 p.
- 93-24 NIST (É.-U. d'Amérique). — Preliminary Results of a Comparison of Water Triple-Point Cells Prepared by Different Methods, by G. F. Strouse, G. T. Furukawa and B. W. Mangum, 23 p.
- 93-25 Information on Measurements of Thermodynamic Temperature. Report to the CCT by Working Group 4, August 1993, 11 p.
- 93-26 PTB (Allemagne). — Examination of the Thermodynamic Accuracy of ITS-90 in the Range 4,2 K to 24,5 K by Means of a Dielectric Constant Gas Thermometer, by K. Grohmann and H. Luther, 3 p.
- 93-27 Lawrence Berkeley Laboratory et Naval Research Laboratory (É.-U. d'Amérique). — A Summary of Experimental Results Supporting an Extension of the International Temperature Scale to the Millikelvin Region, by W. E. Fogle, R. J. Soulen Jr. and J. H. Colwell, 10 p.
- 93-28 University College London et Imperial College of Science, Technology and Medicine (Royaume-Uni). — Primary Acoustic Thermometry Between 100 K and 300 K, by M. B. Ewing and J. P. M. Trusler, 6 p.
- 93-29 NPL (Royaume-Uni). — The Mercury Point in the ITS-90, by R. L. Rusby, 3 p.
- 93-30 MSL (Nouvelle-Zélande). — Thermodynamic Smoothness of the ITS-90 as Compared with a Thermodynamic Model for the Resistance, by J. V. Nicholas, 9 p.
- 93-31 KRISS (Rép. de Corée). — Report to the 18th Meeting of CCT, by C. Rhee, D. Chi, K. H. Kang, K. S. Gam, Y. G. Kim, J. W. Hahn and S. N. Park, 13 p.

Document  
CCT/

- 93-32 NRLM (Japon). — Remarks on the difference equations between the IPTS-68 and the ITS-90, by H. Sakurai, 4 p.
- 93-33 NRLM (Japon). — Long-term stability of the gallium triple point by sealed glass cells, by M. Arai and H. Sakurai, 2 p.
- 93-34 NRLM (Japon). — Some Characteristics on High-Temperature Industrial Platinum Resistance Thermometers, by M. Arai and H. Sakurai, 2 p.
- 93-35 VNIIM (Féd. de Russie). — The effects of the conditions of the tin fixed point realization in the ITS-90 on ITS nonuniqueness, by Yu. V. Tarbeyev, V. V. Kukhar and A. I. Pokhodun, 11 p.
- 93-36 VNIIM (Féd. de Russie). — Realization of the freezing point of indium, by A. G. Ivanova and A. I. Pokhodun, 9 p.
- 93-37 VNIIM (Féd. de Russie). — Ga-Sn eutectic alloy melting fixed point, by A. G. Ivanova, 5 p.
- 93-38 VNIIFTRI (Féd. de Russie). — On the thermal expansion correction of gas-thermometry measurement of VNIIFTRI, by D. N. Astrov, L. B. Belyansky and Y. A. Dedikov, 3 p.
- 93-39 KOL (Pays-Bas). — Noise thermometry and  $^3\text{He}$  melting pressure thermometry, by J. Bremer, A. Reesink and M. Durieux, 2 p.
- 93-40 KOL (Pays-Bas). — A thermodynamic calculation of the vapour pressure vs. temperature relation of  $^3\text{He}$ , by A. L. Reesink and M. Durieux, 2 p.
-

---

TABLE DES MATIÈRES  
TABLE OF CONTENTS

---

COMITÉ CONSULTATIF  
DE THERMOMÉTRIE

18<sup>e</sup> session (1993)  
18th Meeting (1993)

---

	Pages
Liste des sigles utilisés dans le présent volume .....	V
List of acronyms used in the present volume .....	V
Le BIPM et la Convention du Mètre .....	VII
Liste des membres du Comité consultatif de thermométrie .....	IX
Ordre du jour .....	XII
<b>Rapport au Comité international des poids et mesures, par M. Durieux. ....</b>	<b>T 1</b>
Résumé.....	T 2
Recommandations présentées au Comité international des poids et mesures	
T 1 (1993) : Liaison entre les comparaisons régionales en thermométrie ..	T 4
T 2 (1993) : Cellules à point triple de l'eau .....	T 5
T 3 (1993) : Mesures de la température thermodynamique.....	T 6
Recommandation adoptée par le Comité international des poids et mesures	
5 (CI-1993) : Mesures de la température thermodynamique.....	T 7
<b>Compte rendu des séances de la 18<sup>e</sup> session du CCT. ....</b>	<b>T 9</b>
1. Ouverture de la session. ....	T 9
2. Nomination d'un rapporteur .....	T 9
3. Approbation de l'ordre du jour.....	T 9



4. Documents présentés lors de la session .....	T 9
5. Réponses à un questionnaire sur la réalisation et la mise en application de l'EIT-90 dans les laboratoires nationaux de métrologie .....	T 10
6. Autres problèmes qui résultent de la réalisation de l'EIT-90 .....	T 12
7. Traçabilité des mesures de température au niveau international et nécessité d'effectuer des comparaisons internationales .....	T 17
8. Études relatives à l'EIT-90 .....	T 19
8.1 Non-unicité .....	T 19
8.2 Reproductibilité des points fixes .....	T 21
8.3 Autres problèmes soulevés par l'emploi d'instruments d'interpolation. ....	T 23
8.4 Nouvelles informations sur $(T - T_{90})$ .....	T 23
9. Rapport du Groupe de travail 2 (points fixes secondaires, approximation de l'EIT-90, nouvelles tables internationales pour les thermocouples et pour les thermomètres à résistance de platine industriels) .....	T 25
10. Incertitudes dans la réalisation de l'EIT-90 .....	T 27
11. Problèmes qui se posent au-dessous de 1 K et extension de l'échelle au-dessous de 0,65 K .....	T 28
12. La thermométrie au BIPM .....	T 29
13. Établissement et composition des groupes de travail .....	T 30
14. Rapport au CIPM et recommandations .....	T 32
15. Questions diverses .....	T 32
15.1 Prochaine session .....	T 32
15.2 Questions diverses .....	T 32

## **Annexe**

T 1. Documents de travail présentés à la 18 <sup>e</sup> session du CCT.....	T 34
------------------------------------------------------------------------------	------

## **English text of the report**

<b>Note on the use of the English text.</b> Note sur l'utilisation du texte anglais .....	T 39
The BIPM and the Convention du Mètre .....	T 41
Members of the Comité Consultatif de Thermométrie .....	T 43
Agenda .....	T 46
<b>Report to the Comité International des Poids et Mesures, by M. Durieux</b> ....	T 47
Introduction .....	T 48
Recommendations submitted to the Comité International des Poids et Mesures	
T 1 (1993): Links between regional comparisons of temperature standards	T 50

T 2 (1993): Triple point of water cells.....	T 51
T 3 (1993): Thermodynamic temperature measurements.....	T 52
Recommendation adopted by the Comité International des Poids et Mesures	
5 (CI-1993): Thermodynamic temperature measurements .....	T 53

### **Minutes of the 18th meeting of the CCT**

1. Opening of the meeting .....	T 55
2. Appointment of the rapporteur .....	T 55
3. Approval of the agenda .....	T 55
4. Documents presented to the meeting .....	T 55
5. Results of the inquiry on the realization and application of the ITS-90 in the national standards laboratories .....	T 56
6. Further problems arising from the application of the ITS-90 .....	T 58
7. International traceability in temperature measurements and the need for international comparisons .....	T 62
8. Studies concerning the ITS-90 .....	T 63
8.1 Non-uniqueness .....	T 64
8.2 Reproducibility of the fixed points .....	T 66
8.3 Other problems stemming from the interpolating instruments .....	T 67
8.4 New information on $(T - T_{90})$ .....	T 67
9. Working Group 2 report (secondary fixed points, approximations to the ITS-90, new international thermocouple tables and industrial platinum resistance thermometer tables) .....	T 69
10. Uncertainties of the ITS-90 realization .....	T 71
11. Problems arising below 1 K and extension of the scale below 0,65 K ....	T 71
12. Thermometry at the BIPM .....	T 72
13. Establishment and composition of working groups .....	T 74
14. Report to the CIPM and recommendations .....	T 75
15. Other business .....	T 75
15.1 Next meeting .....	T 75
15.2 Other business .....	T 76

### **Appendix**

T1. Working documents submitted to the CCT at its 18th Meeting ( <i>see page</i> T 34) .....	T 77
-------------------------------------------------------------------------------------------------	------

---

Imprimerie GAUTHIER-VILLARS, Paris  
Dépôt légal, Imprimeur, n° 4388

Dépôt légal : mars 1995

*Imprimé en France*