

# Comité consultatif de thermométrie (CCT)

Consultative Committee  
for Thermometry (CCT)

Rapport de  
la 19<sup>e</sup> session  
(septembre 1996)  
Report of  
the 19th Meeting  
(September 1996)



Bureau  
international  
des poids  
et mesures

Organisation  
intergouvernementale  
de la Convention  
du Mètre

Comité consultatif de thermométrie ■ 19<sup>e</sup> session (septembre 1996)  
Consultative Committee for Thermometry ■ 19th Meeting (September 1996)

Comité consultatif de thermométrie  
 19<sup>e</sup> session (18-20 septembre 1996)

R. Köhler  
 R. Pello K. Hill  
 G. Bonnier A.I. Pokhodun  
 K.H. Kang P.P.M. Steur  
 E. Méndez M. Durieux  
 B.W. Mangun Duan Yuning S. Duris K. Nara  
 K. Grohmann P. Marcarino  
 R.E. Bedford



R.L. Rusby T.J. Quinn M. de Groot  
 J. Nicholas P. Giacomo H.-J. Jung  
 T. Ricolfi C. Rhee R.P. Hudson J. Valencia P. Bloembergen  
 Wang Li M. Ballico

Bureau international des poids et mesures

# Comité consultatif de thermométrie (CCT)

19<sup>e</sup> session (septembre 1996)

Note sur l'utilisation du texte anglais (*voir* page 57)

Afin de mieux faire connaître ses travaux, le Comité international des poids et mesures publie une version en anglais de ses rapports.

Le lecteur doit cependant noter que le rapport officiel est toujours celui qui est rédigé en français. C'est le texte français qui fait autorité si une référence est nécessaire ou s'il y a doute sur l'interprétation.

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

Conception graphique :  
Monika Jost

Imprimé par : Stedi, Paris

ISSN 0069-6463  
ISBN 92-822-2160-1

## TABLE DES MATIÈRES

Photographie des participants à la 19 <sup>e</sup> session du Comité consultatif de thermométrie	2
États membres de la Convention du Mètre	8
Le BIPM et la Convention du Mètre	9
Liste des membres du Comité consultatif de thermométrie	13
<b>Rapport au Comité international des poids et mesures, par M. Durieux</b>	<b>15</b>
Ordre du jour	16
1 Ouverture de la session ; désignation d'un rapporteur ; approbation de l'ordre du jour	19
2 Documents présentés lors de la session	21
3 Études relatives à l'EIT-90	22
3.1 Non-unicité	22
3.2 Reproductibilité des points fixes	23
3.3 Questions relatives à l'emploi d'instruments d'interpolation	24
3.4 Informations nouvelles sur $(T - T_{90})$	25
3.5 Incertitudes sur la réalisation de l'EIT-90	26
3.6 Rapports des groupes de travail	27
3.6.1 Groupe de travail 1 : points fixes de définition et instruments d'interpolation	27
3.6.2 Groupe de travail 2 : points fixes secondaires et techniques permettant une réalisation approchée de l'EIT-90	27
3.6.3 Groupe de travail 3 : équivalence internationale des mesures de température et comparaisons internationales correspondantes	28

3.6.4	Groupe de travail 4 : détermination des températures thermodynamiques et extension de l'EIT-90 à de plus basses températures	32
3.6.5	Groupe de travail 5 : groupe de travail commun au CCT et au CCPR sur la détermination des températures thermodynamiques des corps noirs à haute température	33
3.6.6	Groupe de travail 6 : mesures d'humidité	34
4	Échelles de température au-dessous de 1 K et extension éventuelle de l'EIT-90 au-dessous de 0,65 K	35
5	Établissement et composition des groupes de travail	37
6	Recommandations et rapport au CIPM	40
7	Questions diverses	41
8	Prochaine session	42
	<b>Recommandations présentées au Comité international des poids et mesures</b>	<b>43</b>
	T 1 (1996) : Échelle de température au-dessous de 1 K	45
	T 2 (1996) : Température des sources à corps noir au-dessus de 2500 K	46
	<b>Annexe T 1. Documents de travail présentés à la 19<sup>e</sup> session du CCT</b>	<b>49</b>
	<b>Liste des sigles utilisés dans le présent volume</b>	<b>53</b>





## ÉTATS MEMBRES DE LA CONVENTION DU MÈTRE

Afrique du Sud	Iran (Rép. islamique d')
Allemagne	Irlande
Argentine	Israël
Australie	Italie
Autriche	Japon
Belgique	Mexique
Brésil	Norvège
Bulgarie	Nouvelle-Zélande
Cameroun	Pakistan
Canada	Pays-Bas
Chili	Pologne
Chine	Portugal
Corée (Rép. de)	Roumanie
Corée (Rép. pop. dém. de)	Royaume-Uni
Danemark	Russie (Féd. de)
Dominicaine (Rép.)	Singapour
Égypte	Slovaquie
Espagne	Suède
États-Unis	Suisse
Finlande	Tchèque (Rép.)
France	Thaïlande
Hongrie	Turquie
Inde	Uruguay
Indonésie	Venezuela

## 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 donc chargé :

- d'établir les étalons fondamentaux et les échelles pour la mesure 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 mesures des constantes physiques fondamentales 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) à laquelle il présente son rapport sur les travaux accomplis par le Bureau international.

La Conférence générale rassemble des délégués de tous les États membres de la Convention du Mètre et se réunit actuellement tous les quatre ans dans le but :

- 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 toutes les décisions importantes concernant la dotation, l'organisation et le développement du Bureau international.

Le Comité international comprend 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. La principale mission du Comité international est d'assurer l'unification mondiale des unités de mesure, en agissant directement, ou en soumettant des propositions à la Conférence générale.

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 et radiométriques (1937), des rayonnements ionisants (1960) et aux échelles de temps (1988). 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.

Environ quarante-cinq physiciens et 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. 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 en 1927, le Comité international a institué, 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 au Comité international des recommandations concernant les unités.

Les Comités consultatifs ont un règlement commun (*BIPM Proc.-verb. Com. int. poids et mesures*, 1963, **31**, 97). Ils tiennent leurs sessions à des intervalles irréguliers. Le président de chaque Comité consultatif est désigné par le Comité international ; il est généralement membre du Comité international.

Les Comités consultatifs ont pour membres des laboratoires de métrologie et des instituts spécialisés, dont la liste est établie par le Comité international, qui envoient des délégués de leur choix. Ils comprennent aussi des membres nominativement désignés par le Comité international, et un représentant du Bureau international (Critères pour être membre des Comités consultatifs, *BIPM Proc.-verb. Com. int. poids et mesures*, 1996, **64**, 6). Ces Comités sont actuellement au nombre de neuf :

1. Le Comité consultatif d'électricité et magnétisme (CCEM), nouveau nom donné en 1997 au 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 CCE s'est occupé des questions de photométrie) ;
3. Le Comité consultatif de thermométrie (CCT), créé en 1937 ;
4. Le Comité consultatif des longueurs (CCL), nouveau nom donné en 1997 au Comité consultatif pour la définition du mètre (CCDM) créé en 1952 ;
5. Le Comité consultatif du temps et des fréquences (CCTF), nouveau nom donné en 1997 au Comité consultatif pour la définition de la seconde (CCDS) créé en 1956 ;
6. Le Comité consultatif des rayonnements ionisants (CCRI), nouveau nom donné en 1997 au Comité consultatif pour les étalons de mesure des rayonnements ionisants (CCEMRI) créé en 1958 (en 1969, ce Comité consultatif a institué quatre sections : Section I (Rayons x et  $\gamma$ , 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 Comité international 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 et des Comités consultatifs sont publiés par les soins du Bureau international 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* ;
- *Rapports des sessions des Comités consultatifs*.

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 par décision du Comité international, de même que le *Recueil de travaux du Bureau international des poids et mesures* (11 volumes publiés de 1966 à 1988).

Les travaux du Bureau international font l'objet de publications dans des journaux scientifiques ; une liste en est donnée chaque année dans les *Procès-verbaux des séances du Comité international*.

Depuis 1965 la revue internationale *Metrologia*, éditée sous les auspices du Comité international des poids et mesures, publie des articles sur la métrologie scientifique, sur l'amélioration des méthodes de mesure, les travaux sur les étalons et sur les unités, ainsi que des rapports concernant les activités, les décisions et les recommandations des organes de la Convention du Mètre.

LISTE DES MEMBRES  
DU COMITÉ CONSULTATIF DE THERMOMÉTRIE

au 18 septembre 1996

Président *ad interim*

T.J. Quinn, Bureau international des poids et mesures [BIPM], Sèvres.

Secrétaire exécutif

R. Köhler, Bureau international des poids et mesures [BIPM], Sèvres.

Membres

Bureau national de métrologie, Paris : Institut national de métrologie [BNM-INM] du Conservatoire national des arts et métiers, Paris.

Conseil national de recherches du Canada [NRC], Ottawa.

CSIRO, National Measurement Laboratory [CSIRO], Lindfield.

Institut de métrologie D.I. Mendéléev [VNIIM], Saint-Pétersbourg.

Institut des mesures physico-techniques 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 : Van Swinden Laboratorium [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.



COMITÉ CONSULTATIF  
DE THERMOMÉTRIE

RAPPORT  
DE LA 19<sup>e</sup> SESSION

(18-20 septembre 1996)

AU COMITÉ INTERNATIONAL  
DES POIDS ET MESURES



## Ordre du jour

- 1 Ouverture de la session ; désignation d'un rapporteur ; approbation de l'ordre du jour.
- 2 Documents présentés lors de la session.
- 3 Études relatives à l'EIT-90 :
  - 3.1 Non-unicité ;
  - 3.2 Reproductibilité des points fixes ;
  - 3.3 Questions relatives à l'emploi d'instruments d'interpolation ;
  - 3.4 Informations nouvelles sur  $(T - T_{90})$  ;
  - 3.5 Incertitudes sur la réalisation de l'EIT-90 ;
  - 3.6 Rapports des groupes de travail :
    - 3.6.1 Groupe de travail 1 : points fixes de définition et instruments d'interpolation,
    - 3.6.2 Groupe de travail 2 : points fixes secondaires et techniques permettant une réalisation approchée de l'EIT-90,
    - 3.6.3 Groupe de travail 3 : équivalence internationale des mesures de température et comparaisons internationales correspondantes,
    - 3.6.4 Groupe de travail 4 : détermination des températures thermodynamiques et extension de l'EIT-90 à de plus basses températures,
    - 3.6.5 Groupe de travail 5 : groupe de travail commun au CCT et au CCPR sur la détermination des températures thermodynamiques des corps noirs à haute température,
    - 3.6.6 Groupe de travail 6 : mesures d'humidité.
- 4 Échelles de température au-dessous de 1 K et extension éventuelle de l'EIT-90 au-dessous de 0,65 K.

- 5 Établissement et composition des groupes de travail.
- 6 Recommandations et rapport au CIPM.
- 7 Questions diverses.
- 8 Prochaine session.



# 1 OUVERTURE DE LA SESSION ; DÉSIGNATION D'UN RAPPORTEUR ; APPROBATION DE L'ORDRE DU JOUR

Le Comité consultatif de thermométrie (CCT) a tenu sa dix-neuvième session au Pavillon de Breteuil, à Sèvres, les 18, 19 et 20 septembre 1996.

Étaient présents : M. Ballico (CSIRO), R.E. Bedford (NRC), P. Bloembergen (NMI-VSL), G. Bonnier (BNM-INM), M. de Groot (NMI-VSL), Duan Yuning (NIM), S. Duris (SMU), K. Grohmann (PTB), K. Hill (NRC), H.-J. Jung (PTB), K.H. Kang (KRISS), B.W. Mangum (NIST), P. Marcarino (IMGC), N. Moiseeva (VNIIM), K. Nara (NRLM), A.I. Pokhodun (VNIIM), T.J. Quinn (directeur du BIPM, président par interim), C. Rhee (KRISS), T. Ricolfi (IMGC), R.L. Rusby (NPL), P.P.M. Steur (IMGC), Zhao Qi (NIM).

Invités : M. Durieux (KOL), P. Huang (NIST), R.P. Hudson, E. Méndez et J. Valencia (CENAM), J. Nicholas (IRL), Wang Li (PSB).

Assistaient aussi à la session : R. Köhler et R. Pello (BIPM).

Absent : VNIIFTRI.

En hommage à Luigi Crovini, président du CCT, décédé soudainement le 21 octobre 1995, M. Quinn donne lecture de l'introduction du numéro spécial de *Metrologia* (1996, **33**, n° 4) qui lui a été dédié. Cette introduction présente les nombreux aspects des travaux de Luigi Crovini dans le domaine de la thermométrie, et en particulier le rôle clé qu'il a joué dans l'élaboration de l'EIT-90 et les activités du CCT.

M. Quinn signale qu'un exemplaire de ce numéro spécial, qui venait de paraître, a été offert à Mme Toya Crovini lors de la réunion Tempmeko'96 à Turin le 11 septembre 1996. Il remercie MM. Ricolfi et Rusby pour l'aide qu'ils ont apportée dans la préparation de ce numéro spécial.

Le CIPM n'ayant pas encore désigné un nouveau président, M. Quinn préside la présente session du CCT par interim, ce dont il serait très heureux dans d'autres circonstances.

M. Durieux est nommé rapporteur.

L'ordre du jour provisoire est légèrement modifié et approuvé.

## 2 DOCUMENTS PRÉSENTÉS LORS DE LA SESSION

Un document du BIPM intitulé « Note for discussion on international equivalence of national measurement standards » ainsi que vingt-huit autres documents ont été envoyés avant la réunion. Six autres documents, ainsi que le rapport du Groupe de travail sur les mesures d'humidité, ont été distribués pendant la réunion. Tous ces documents sont répertoriés dans l'Annexe T 1 ; certains d'entre eux seront discutés aux points de l'ordre du jour auxquels ils se rapportent. Le président signale qu'ils sont conservés au BIPM, où ils pourront être obtenus sur demande. Un volume rassemblant les documents de travail sera envoyé aux membres du CCT.

### 3 ÉTUDES RELATIVES À L'EIT-90

#### 3.1 Non-unicité

Lors de la réunion du CCT en 1993, le concept de non-unicité avait été considéré comme un peu « flou ». M. Mangum explique que le rapport du Groupe de travail 1 (CCT/96-8), préliminaire à une mise à jour de *Supplementary Information*, identifie trois types de non-unicité : les incertitudes sur les valeurs obtenues de  $T_{90}$  provenant de l'emploi de différentes équations d'interpolation dans des domaines qui se chevauchent, alors que le même thermomètre est utilisé (type 1) ; l'emploi de différents types de thermomètres dans des domaines qui se chevauchent (type 2) ; l'utilisation de thermomètres réels (type 3). La non-unicité de type 1 a été décrite précédemment, dans le cas des thermomètres à résistance de platine étalons, comme une incohérence de sous-domaine. La non-unicité de type 3 était la seule considérée dans l'EIPT-68 et les échelles précédentes.

M. Bonnier souligne que la non-unicité mentionnée ici correspond à des différences significatives des valeurs de températures obtenues, supérieures à celles inhérentes aux incertitudes de mesure. M. Bedford attire l'attention sur le document de M. Ancsin (CCT/96-10, 2<sup>e</sup> partie), lequel suggère qu'il est possible de réduire la non-unicité de type 3 des thermomètres à résistance de platine étalons dans le domaine de 0 °C à 660 °C en employant des méthodes d'étalonnage légèrement différentes (traitement par moindres carrés) et, pour les thermomètres étalons de très bonne qualité, c'est-à-dire dont la valeur du rapport  $W(T)$  de résistances est élevé, en utilisant moins de points d'étalonnage. Dans la discussion qui s'ensuit, il est rappelé que l'idée d'utiliser des fonctions d'interpolation par moindres carrés avait été suggérée il y a plusieurs années. Après examen, cette idée avait été repoussée parce que, bien que cette méthode permette de réduire la non-unicité, elle risquait d'entraîner une légère incohérence entre les valeurs assignées aux températures de référence, considérée comme inacceptable.

### 3.2 Reproductibilité des points fixes

Les résultats de deux comparaisons internationales de cellules à point triple de l'eau sont présentés lors de la réunion. Une des comparaisons a été organisée par le BIPM en réponse à la Recommandation T 2 (1993) ; l'autre a eu lieu dans le cadre d'un projet d'EUROMET, avec le BNM-INM comme laboratoire pilote.

M. Köhler explique la méthodologie et les résultats de la comparaison organisée par le BIPM (CCT/96-1). Deux séries de cellules, formées chacune de trois cellules provenant de fabricants différents, ont circulé entre les laboratoires. Une série a circulé du BIPM au NPL (Royaume-Uni), au NIST (États-Unis) et au BNM-INM (France) ; l'autre a circulé du BIPM à l'IMGC (Italie), au KRISS (Rép. de Corée) et au VNIIM (Féd. de Russie). Dans la suite du programme, le MSL (Nouvelle-Zélande), l'IPQ (Portugal), le PSB (Singapour), l'INMETRO (Brésil), le NMi (Pays-Bas) et l'INM (Roumanie) ont aussi envoyé des cellules au BIPM. Les différences entre les températures du point triple de toutes les cellules ont été mesurées au BIPM et, pour chaque série de trois cellules en circulation, dans les trois laboratoires en question. En tout, les différences de température entre vingt cellules provenant de neuf fabricants différents ont été mesurées.

Pour les cellules qui ont circulé, les différences de température entre les cellules mesurées dans quatre laboratoires différents s'accordent à 0,09 mK près (à l'exception d'une cellule apparemment instable) ; pour deux cellules ayant une température du point triple très haute, les différences mesurées dans quatre laboratoires s'accordent même à 0,015 mK près. Les températures du point triple de treize cellules sur vingt se situent à 0,11 mK près de la valeur la plus haute mesurée ; la température des sept autres cellules est plus basse et l'écart plus grand.

Le document CCT/96-1 conclut qu'il serait prudent qu'un laboratoire national conserve, comme références, des cellules d'origines différentes. Cela lui permettrait d'éviter d'éventuelles divergences par rapport aux échelles de température conservées par d'autres laboratoires, et aussi de déceler tout comportement anormal éventuel de ses cellules. Le document suggère aussi d'utiliser une cellule au gallium pour vérifier la stabilité des cellules à point triple de l'eau.

M. Bonnier résume le mode opératoire de la comparaison d'EUROMET (CCT/96-22). Pour ce programme, le BNM-INM a fourni une cellule à point triple de l'eau avec enceinte isotherme. Cet instrument a circulé dans onze



laboratoires européens, chaque laboratoire ayant comparé une ou plusieurs de ses cellules, préparée(s) selon sa méthode habituelle, à l'instrument du BNM-INM, dont la cellule était préparée selon une méthode spécifiée. L'objet de la comparaison n'était pas de comparer les cellules, mais les différentes réalisations du point fixe. Les résultats de la comparaison sont très semblables à ceux de la comparaison du BIPM : les températures du point triple de dix-huit cellules sur vingt-deux se situaient à moins de 0,11 mK de la température la plus haute observée, les quatre autres cellules avaient une température plus basse et un écart plus important. L'analyse ultérieure des résultats n'a pas permis de montrer si les résultats étaient susceptibles d'être influencés par l'âge des cellules ou la procédure employée pour réaliser le manchon de glace. Les résultats complets des deux comparaisons internationales figurent dans les documents CCT/96-1 et CCT/96-22.

Lors d'une discussion ultérieure sur la reproductibilité du point triple de l'eau, M. Nicholas, faisant référence au document CCT/96-14, précise que l'utilisation d'une eau isotopiquement impure dans les cellules permet difficilement de reproduire des températures à mieux que 0,1 mK. M. Köhler signale qu'il est possible de lier les résultats des deux comparaisons parce que deux des cellules étaient communes aux deux comparaisons. Il s'ensuit une discussion centrée sur les incertitudes associées aux résultats de ces comparaisons, sur leur pertinence quant à l'incertitude finale de la réalisation du point triple de l'eau, et les implications pour la définition du kelvin.

### 3.3 Questions relatives à l'emploi d'instruments d'interpolation

M. Marcarino ouvre la discussion par une description de l'« effet d'humidité » dans les thermomètres étalons à résistance de platine à longue tige (CCT/96-7). Cet effet est lié aux pertes électriques, dues à la présence d'eau dans les thermomètres étalons à résistance de platine, présence qui est responsable d'erreurs dans les valeurs indiquées pour la résistance et la température. Cet effet est connu de longue date pour les thermomètres contenant du mica (*Supplementary Information for the ITS-90*, p. 87) mais il se produit aussi dans les thermomètres dont les gaines et les supports de fil sont en silice. L'effet se manifeste, par exemple, par l'allongement du temps nécessaire au thermomètre pour parvenir à indiquer une température constante au point triple de l'eau. Au point de l'argent, une baisse de la valeur de la résistance correspondant à une baisse de température de 20 mK a été observée quand la partie de la tige du thermomètre située hors du four est chauffée de telle façon que l'eau adsorbée se condense dans la tête du thermomètre. M. Marcarino pense que la désorption de l'eau provenant de la silice (ou du mica) est la source principale du problème.

D'autres suggèrent que l'eau peut aussi provenir d'une fuite dans l'enveloppe du thermomètre, de l'emploi d'une flamme alimentée par un mélange d'hydrogène et d'oxygène lors du scellement du thermomètre, ou d'une réaction de l'hydrogène désorbé par le fil de platine à haute température au contact de l'oxygène dans le thermomètre. Les participants pensent, comme M. Marcarino, qu'il serait utile, en particulier pour les thermomètres à résistance de platine à haute température, d'adjoindre une petite valve à la tête du thermomètre pour pouvoir éliminer la vapeur d'eau si nécessaire. Dans la suite de la réunion, les participants chargent M. Marcarino de préparer un modèle de thermomètre avec valve et de l'envoyer à M. Quinn avec une liste de fabricants de thermomètres. M. Quinn est chargé de se mettre en contact avec un fabricant qui accepterait de préparer une série de thermomètres de ce type pour les membres du CCT.

Deux documents sur la thermométrie à rayonnement sont discutés. Le premier (CCT/96-20) décrit un thermomètre à rayonnement avec capteur à photodiode à InGaAs. Il est suggéré qu'il est possible de réaliser l'échelle de température dans le domaine de 300 °C à 660 °C à quelques dizaines de millikelvins près, avec un instrument fonctionnant à une longueur d'onde de 1550 nm. Une comparaison de pyromètres optiques à infrarouge est en cours au sein d'EUROMET. (Au cours de la discussion, il semble que tous les membres ne soient pas informés de toutes les comparaisons figurant au programme d'EUROMET dans le domaine de la thermométrie. M. Quinn suggère de mieux diffuser ce type d'information.) Le second document (CCT/96-21) traite d'une comparaison des échelles de température de luminance entre le NPL et le VNIIM, échelles conservées au moyen de lampes à ruban de tungstène, dans le domaine de 900 °C à 2000 °C. En réponse à une question sur la raison pour laquelle les différences observées entre les lampes sont supérieures à celles de la comparaison de 1972, M. Rusby suggère que les lampes utilisées seraient moins fiables que celles qui avaient été préparées spécialement pour la comparaison de 1972. M. Bloembergen informe les participants qu'une comparaison EUROMET de lampes à ruban débutera en 1997. M. Quinn rappelle que les lampes à ruban de tungstène sont encore très utiles.

### 3.4 Informations nouvelles sur ( $T - T_{90}$ )

Après avoir expliqué pourquoi la PTB a effectué l'expérience décrite dans le document CCT/96-5, M. Jung rappelle, qu'au-dessus de 729 K, l'EIT-90 est fondée principalement sur la thermométrie à rayonnement relative, rapportée à la moyenne des résultats de deux thermomètres à gaz à 729 K, qui diffèrent l'un de l'autre de 30 mK. Cette différence est la source d'une incertitude pour la thermométrie à rayonnement de l'ordre de  $(T/729 \text{ K})^2 \times 15 \text{ mK}$ . Les mesures actuelles de température à rayonnement sont des mesures absolues, c'est-à-dire

qu'elles ne font pas appel à une température de référence. La puissance rayonnée par un corps noir à grande ouverture équipé d'une ouverture de précision, refroidie, de 20 mm de diamètre a été mesurée à l'aide de radiomètres à filtre à bande étroite, deux d'entre eux ayant été étalonnés par rapport à un radiomètre cryogénique. Les résultats peuvent être exprimés par la relation  $T - T_{90} = (T/729 \text{ K})^2 \times 18,15 \text{ mK}$ , où  $T$  est la température déterminée à l'aide du radiomètre. Les incertitudes varient de 17 mK à 773 K jusqu'à 39 mK à 1235 K. Les résultats sont en accord, dans la limite de leurs incertitudes, avec les mesures plus anciennes de thermométrie à rayonnement si on les compare aux résultats d'Edsinger et Schooley à 729 K ; ce n'est pas le cas si on les compare à la moyenne des nouveaux résultats obtenus avec deux thermomètres. Après avoir exprimé leur satisfaction quant aux résultats de ces importants travaux, plusieurs membres prennent part à une discussion sur les incertitudes qui subsistent dans les résultats de la PTB.

### 3.5 Incertitudes sur la réalisation de l'EIT-90

Il est constaté que les incertitudes sur la réalisation pratique de l'EIT-90 proviennent de quatre sources :

1. la non-unicité de l'échelle (non-unicité de type 1 et 2, voir Section 3.1) ;
2. la réalisation des points fixes ;
3. les instruments d'interpolation (comme les incertitudes provenant d'un éventuel effet d'humidité dans les thermomètres à résistance de platine) ;
4. la réalisation de l'échelle au moyen du thermomètre d'interpolation (non-unicité de type 3 et incertitudes propagées à partir des réalisations des points fixes).

Le document CCT/96-11 sur la réalisation de l'EIT-90 au NIST sert de base à la discussion qui suit. Les incertitudes étendues sur les réalisations des points fixes au NIST, qui vont de 0,03 mK pour les points triples de l'oxygène et de l'argon, et de 0,06 mK pour le point triple de l'eau et le point de fusion du gallium, à 1,1 mK pour le point de congélation de l'argent, sont indiquées dans le document. Une longue discussion s'ensuit, au cours de laquelle plusieurs membres suggèrent que les incertitudes seraient sous-estimées, par exemple pour la mesure du point de congélation des métaux, en raison des incertitudes provenant de l'emploi d'échantillons impurs.

En réponse à une demande sur la reproductibilité des mesures de température à l'aide de thermomètres à gaz d'interpolation, M. Mangum cite un document de Tempmeko'96 sur la thermométrie à gaz au NIST. M. Grohmann, faisant référence au document CCT/96-24, donne 0,7 mK comme différence maximale

entre les résultats obtenus avec le thermomètre à gaz à constante diélectrique de la PTB et l'échelle du thermomètre à gaz du NPL entre 4 K et 25 K.

### 3.6 Rapports des groupes de travail

#### 3.6.1 Groupe de travail 1 : points fixes de définition et instruments d'interpolation

M. Mangum (président du Groupe de travail 1) résume le rapport du Groupe de travail 1 (CCT/96-8) qui constitue une étape préliminaire de la mise à jour de *Supplementary Information*. Après avoir défini la non-unicité (Section 3.1), le rapport donne une liste des « Critères généraux pour une réalisation optimale des points fixes de l'EIT-90 ». Suit une longue discussion, assez contradictoire, au cours de laquelle une majorité est d'avis que ces critères sont trop détaillés et restrictifs. La prochaine révision de *Supplementary Information* devrait, comme les éditions précédentes, avoir un caractère « incitatif » et non « obligatoire », ni « restrictif ». Si l'on ne sait pas vraiment quelle est la meilleure méthode pour réaliser un point fixe particulier, il faut en proposer plusieurs.

Le rapport contient aussi une section sur les « Recommandations générales pour les comparaisons de points fixes dans l'EIT-90 au plus haut niveau d'exactitude ». Une version préliminaire de ce texte a été envoyée au Groupe de travail 3 responsable des comparaisons. Les membres pensent que ces recommandations sont elles aussi trop restrictives, qu'elles précisent trop les procédures à suivre pour les comparaisons des points fixes et la conception des cellules à point triple, et qu'elles donnent trop peu de conseils pour une réalisation intégrale des points fixes.

M. Mangum dit que la prochaine édition révisée de *Supplementary Information* ne sera pas prête avant trois ans, c'est pourquoi le Groupe de travail 1 souhaite publier le document CCT/96-8. De nouveau, les avis sont partagés. L'éventualité de publier une Monographie BIPM est discutée. Le choix de l'opportunité d'une publication, et de sa forme, est finalement laissé au Groupe de travail 1.

#### 3.6.2 Groupe de travail 2 : points fixes secondaires et techniques permettant une réalisation approchée de l'EIT-90

Dans le rapport du Groupe de travail 2 (CCT/96-9), quatre tâches sont identifiées :

1. publier une nouvelle liste de points fixes secondaires ;

2. donner des informations sur les techniques permettant une réalisation approchée de l'EIT-90 ;
3. donner des conseils pour la mise en application de l'EIT-90 dans les normes internationales et les tables critiques ;
4. mettre à jour les documents existants.

M. Bedford, président du Groupe de travail 2, signale que la tâche 1 est terminée ; la nouvelle liste de points fixes secondaires a été publiée (*Metrologia*, 1996, **33**, 133-154). Quant aux tâches 2 et 4, la révision de la monographie *Techniques for Approximating the ITS-90* représente un travail conséquent, qui ne sera pas achevé avant plusieurs années. En ce qui concerne la tâche 3, le travail en liaison avec la CEI a permis de publier une version révisée des tables de référence pour les thermocouples et les thermomètres à résistance de platine industriels. M. de Groot fait référence à la mesure de la température du point de fusion du palladium à l'aide du thermomètre à bruit (CCT/96-30).

M. Quinn informe les participants qu'il ne reste plus que 180 exemplaires de la monographie publiée en 1990 sur les 1500 qui avaient été imprimés. Un nouveau tirage sera effectué, avec une liste d'errata et de changements. Toute suggestion à ce sujet doit être faite à M. Bedford avant la fin de 1996. M. Quinn demande aux participants de lui communiquer le nombre d'exemplaires dont ils ont besoin.

### 3.6.3 Groupe de travail 3 : équivalence internationale des mesures de température et comparaisons internationales correspondantes

Dans le rapport du Groupe de travail 3 (CCT/96-23), trois tâches sont identifiées :

1. la collecte des renseignements sur les comparaisons régionales et bilatérales ;
2. l'organisation de comparaisons appropriées entre les groupes régionaux au plus haut niveau d'exactitude ;
3. la mise au point de méthodes d'estimation des incertitudes.

M. Bonnier, président du Groupe de travail 3, rappelle qu'une liste de comparaisons terminées (tâche 1) figure dans le rapport, mais cette liste est loin d'être complète. Pour ce qui concerne la tâche 2, des comparaisons urgentes ont été proposées lors d'une réunion du Groupe de travail à laquelle tous les membres n'étaient pas présents. Quant à la tâche 3, le Groupe de travail envisage de rédiger un document sur le sujet et de le présenter au

Groupe de travail 1. Afin d'obtenir plus d'informations sur les comparaisons en cours ou proposées, un questionnaire sera envoyé aux membres du CCT.

M. Quinn présente, pour discussion, la note sur l'équivalence internationale des étalons nationaux de mesure. Les organismes d'accréditation internationaux ont besoin de documents permettant de rendre compte de « l'équivalence » des étalons nationaux de mesure, à laquelle ils font aussi référence sous le nom de « traçabilité » internationale des étalons de mesure nationaux, et des incertitudes associées. Les groupes les plus qualifiés pour choisir et organiser les comparaisons clés et en publier les résultats dans *Metrologia*, accompagnés d'une interprétation circonstanciée, sont les Comités consultatifs. Il convient de mettre en oeuvre un programme de comparaisons clés d'ici environ deux ans. Une liste des comparaisons clés déjà identifiées par d'autres Comités consultatifs est donnée dans ce document.

Pour ce qui concerne la structure des comparaisons, M. Quinn suggère que quinze à vingt laboratoires participent aux comparaisons internationales du CCT. Il convient d'établir des liens robustes avec les comparaisons régionales organisées par deux ou trois laboratoires primaires dans chaque région. Il précise que des vérifications périodiques sont nécessaires, en particulier en cas de changement de personnel dans les laboratoires. Les autres Comités consultatifs ont proposé que ces vérifications soient répétées avec une périodicité comprise entre cinq et vingt ans.

Il est proposé que des laboratoires non-membres du CCT puissent participer aux comparaisons clés s'ils ont les compétences techniques nécessaires et s'ils sont responsables des étalons nationaux.

La bande d'incertitude dans laquelle les résultats des comparaisons devraient se situer fait l'objet d'une discussion. La note soumise à discussion par M. Quinn suggère d'utiliser deux bandes, l'une suffisamment large pour attester de l'accréditation générale, l'autre, plus étroite, dans laquelle les laboratoires de pointe se situeraient. Les participants craignent que cela ne porte tort aux laboratoires et n'augmente la pression politique pour élargir les bandes d'incertitude. M. Quinn dit qu'il enverra d'ici quelques mois une nouvelle note rassemblant diverses objections soulevées. [Dans une version ultérieure de cette note la suggestion des deux bandes a été supprimée.]

M. Quinn suggère d'inclure, parmi les comparaisons clés éventuelles, une comparaison de thermomètres étalonnés : thermomètres à résistance

rhodium-fer au-dessous du point triple du néon, thermomètres à résistance de platine (du type capsule, à longue tige, et à haute température) du point triple de l'hydrogène au point de l'argent, et, au-dessus du point de l'argent, lampes à ruban de tungstène ou pyromètres optiques. (Un exemple de ce type de comparaison est la comparaison Ward-Compton des échelles nationales de température faite dans les années 1970 au moyen de thermomètres à résistance de platine du type capsule étalonnés.) Plusieurs membres préfèrent que les comparaisons clés portent sur les réalisations des points fixes (comme, par exemple, la comparaison d'EUROMET de réalisations du point triple de l'eau) parce que d'une part les laboratoires nationaux d'étalonnage ne conservent pas leurs échelles à l'aide de thermomètres, d'autre part les incertitudes peuvent être plus facilement spécifiées en effectuant des comparaisons de points fixes (aucune non-unicité supplémentaire ne provient des thermomètres), enfin le coût de ces comparaisons est probablement inférieur. D'autres notent que les comparaisons de réalisations des points fixes ne suffisent pas, car elles ne mettent pas en oeuvre toute la gamme des techniques nécessaires à la réalisation de l'échelle. Il est aussi proposé que chaque laboratoire compare une série de cellules à points fixes secondaires, pour vérifier l'équivalence des réalisations de l'échelle entre les points fixes de définition. (Si l'on est certain que les réalisations des points fixes secondaires sont les mêmes partout, il suffit alors de comparer les températures attribuées par chaque laboratoire aux points fixes secondaires.)

Pour le domaine de température situé au-dessous du point de l'aluminium, les comparaisons de thermomètres, de points fixes de définition ou de points fixes secondaires ne semblent pas poser de problèmes techniques. Pour ces derniers, des comparaisons du point triple du dioxyde de carbone (217 K), du xénon (161 K) ou du krypton (116 K), et du point de congélation du cadmium (321 °C) sont proposées. Cependant le point du dioxyde de carbone est très proche du point triple du mercure et le point du krypton n'est pas le plus reproductible des points fixes à basse température. Dans le domaine allant du point de l'aluminium à celui de l'argent, la situation est plus délicate : faire circuler des thermomètres à résistance de platine à haute température est considéré comme étant trop dangereux pour les thermomètres et tous les membres ne sont pas convaincus que l'utilisation de thermocouples or/platine, comme l'a suggéré M. Mangum, donnera des résultats suffisamment exacts. Il faut aussi noter qu'il y a peu de résultats sur les comparaisons de points de congélation de l'aluminium et de l'argent. M. Bonnier suggère de collecter d'abord des informations sur l'exactitude

(bilan d'incertitude) des réalisations des points de l'aluminium et de l'argent dans chaque laboratoire. Les comparaisons de ces deux points fixes suscitent beaucoup d'intérêt.

Pour les comparaisons clés dans le domaine de la thermométrie à rayonnement, la plupart des membres préfèrent utiliser des lampes à ruban.

Les comparaisons clés suivantes sont proposées, avec les laboratoires pilotes correspondants :

1. réalisation de l'EIT-90 de 0,65 K à 24,5561 K à l'aide de thermomètres à résistance rhodium-fer : NPL ;
2. réalisation de l'EIT-90 de 13,8 K à 273,16 K à l'aide de thermomètres à résistance de platine étalons de type capsule : NRC ;
3. réalisation de l'EIT-90 de 83,8 K à 933,5 K à l'aide de thermomètres à résistance de platine étalons à longue tige : NIST ;
4. comparaison des points fixes de l'aluminium et de l'argent : IMGIC ;
5. réalisation de l'EIT-90 entre le point de l'argent et 1700 °C à l'aide de lampes à ruban de tungstène dans le vide comme étalons de transfert : NMi.

Après un tour de table, le Comité établit comme suit le nombre des laboratoires intéressés par les différentes comparaisons : comparaison de thermomètres rhodium-fer, 6 laboratoires ; thermomètres à résistance de platine du type capsule, 8 laboratoires ; thermomètres à résistance de platine à longue tige, 11 laboratoires ; points fixes de l'aluminium et de l'argent, 10 laboratoires ; lampes à ruban de tungstène, 8 laboratoires.

Les coordonnateurs sont chargés de préparer le protocole des comparaisons dont ils sont responsables et de l'envoyer aux membres du CCT avant la fin de 1996, pour commentaires. Les protocoles approuvés devront être prêts le 1<sup>er</sup> mars 1997. Quand ils seront disponibles, le BIPM demandera aux membres du CCT à quelles comparaisons ils souhaitent participer. Les coordonnateurs se mettront alors au travail afin que les comparaisons soient terminées, ou bien avancées, pour la prochaine session du CCT.

En ce qui concerne l'équation de pression de vapeur de l'hélium 3, les résultats des calculs thermodynamiques faits à la PTB et au KOL sont publiés, ainsi que ceux des nouvelles mesures de pression de vapeur au NIST. L'extension future de l'EIT-90 aux basses températures est traitée à la Section 4.



### 3.6.4 Groupe de travail 4 : détermination des températures thermodynamiques et extension de l'EIT-90 à de plus basses températures

Les attributions spécifiques du Groupe de travail 4 sont les suivantes : proposer de nouvelles valeurs de  $(t_{90} - t_{68})$  de 630 °C à 1064 °C ; mettre à jour les informations sur les nouvelles déterminations de la température thermodynamique fondée sur un thermomètre primaire,  $T$ , et de  $(T - T_{90})$  ; corriger (si nécessaire) l'équation de pression de vapeur de  $^3\text{He}$  dans l'EIT-90 ; collecter des renseignements sur les mesures de température et les échelles de température existantes dans les laboratoires au-dessous de 1 K en vue de proposer au CCT l'extension de l'EIT-90.

M. Rusby, président du Groupe de travail 4, résume le rapport de son groupe (CCT/96-31). Les valeurs corrigées des différences  $(t_{90} - t_{68})$  de 630 °C à 1064 °C ont été publiées (*Metrologia*, 1994, **31**, 149-153). Ces valeurs sont fondées sur des comparaisons de thermocouples Pt-10 % Rh/Pt utilisés pour réaliser l'EIPT-68 avec des thermomètres à résistance de platine étalons et des thermomètres à rayonnement étalonnés selon l'EIT-90. Les nouvelles différences observées sont plutôt inférieures aux anciennes. De nouvelles mesures de température thermodynamique sont en cours et certaines sont terminées. Dans le domaine de la thermométrie à gaz, les révisions de résultats plus anciens de la PTB et du VNIIFTRI ont été publiées. Les résultats des mesures de thermomètres à gaz à constante diélectrique entre 4 K et 27 K obtenus par la PTB ont été publiés récemment (*Metrologia*, 1996, **33**, 341-352 et CCT/96-24) et ceux des thermomètres à gaz à volume constant du NIST (Tempmeko'96) sont disponibles. Les résultats des mesures en thermométrie acoustique en cours au NIST (au-dessous de 693 K) et à l'université de Londres (au-dessous de 430 K) ne sont pas encore disponibles. Des mesures en thermométrie à bruit sont en cours à l'IMGC, au NMI (CCT/96-30), à la PTB, au MSL et au NRLM. Dans le domaine de la thermométrie à rayonnement, la PTB dispose de nouveaux résultats entre 773 K et 1235 K (Section 3.4). De nouvelles mesures de température thermodynamique restent nécessaires, en particulier dans le domaine proche de 150 K. Des études théoriques de la relation entre la résistance et la température du platine dans ce domaine ont été effectuées. M. Quinn rappelle certaines remarques faites lors de Tempmeko'96 sur la possibilité de redéfinir le kelvin à partir d'une valeur admise par définition pour la constante de Boltzmann. Les améliorations attendues en thermométrie à rayonnement total, qui permettraient d'obtenir des incertitudes sur  $T$  meilleures que 0,3 mK à 273 K, rendraient cette redéfinition envisageable dans l'avenir (*Metrologia*, 1996, **33**, 375-381). Pour cela, il serait

indispensable qu'un laboratoire autre que le NPL entreprenne des mesures de thermométrie à rayonnement total.

En ce qui concerne les équations de pression de vapeur de l'hélium 3, les résultats des calculs thermodynamiques effectués à la PTB et au KOL ont été publiés, ainsi que ceux de nouvelles mesures de pression de vapeur au NIST. L'extension à venir de l'EIT-90 à des températures plus basses est traitée à la Section 4.

### 3.6.5 Groupe de travail 5 : groupe de travail commun au CCT et au CCPR sur la détermination des températures thermodynamiques des corps noirs à haute température

M. Quinn rend compte des discussions au sein du Groupe de travail 5. Les corps noirs à haute température dans le domaine de 2500 K à 3200 K sont souvent employés comme sources étalons dans les laboratoires de radiométrie. Pour spécifier la distribution de puissance spectrale d'une source à corps noir de haute qualité, il est souvent souhaitable de mesurer sa température thermodynamique. Le Groupe de travail 5 a été créé pour étudier tous les aspects de ces mesures de température et conseiller les utilisateurs. Les propositions du Groupe de travail 5 (CCT/96-17) sont discutées à la réunion et servent de base à une recommandation soumise au CIPM (Recommandation T 2). Cette recommandation, sur la température des sources à corps noir au-dessus de 2500 K, propose de mettre au point des points fixes à haute température, des corps noirs à haute température, des radiomètres à filtre stables, et des pyromètres. Elle recommande aussi d'employer toutes les méthodes disponibles pour mesurer la température des corps noirs à haute température et en comparer les résultats. Le groupe de travail a distingué trois méthodes différentes pour mesurer ces hautes températures : 1) les mesures selon les méthodes définies dans l'EIT-90, c'est-à-dire la thermométrie à rayonnement quasi-monochromatique aux points de congélation de l'argent, de l'or et du cuivre ; 2) les mesures absolues de flux énergétique avec un radiomètre cryogénique et 3) les mesures du rapport du flux énergétique dans deux ou plusieurs bandes spectrales à une certaine température. Une comparaison des incertitudes des trois méthodes est donnée dans les documents CCT/96-17 et CCT/96-26. De plus, le groupe de travail participera activement à l'organisation des comparaisons internationales restreintes de radiomètres à filtre et de corps noirs ; le NPL et le NIST acceptent d'être les laboratoires pilotes de ces comparaisons.

### 3.6.6 Groupe de travail 6 : mesures d'humidité

M. Huang explique à ses collègues qu'en 1994 le président du CCT de l'époque, M. Luigi Crovini, avait approuvé la création d'un groupe de travail sur les mesures d'humidité, considérant l'importance croissante des mesures et étalons d'humidité dans les laboratoires nationaux. Les activités proposées pour le Groupe de travail 6 sont décrites dans le rapport. Les travaux sur les comparaisons internationales d'hygromètres à point de rosée et de gelée ont débuté ; la comparaison clé sera une comparaison de températures du point de rosée. Les comparaisons régionales en Europe, Amérique du Nord et dans la région Asie-Pacifique seront suivies d'une comparaison internationale. On espère que cette comparaison sera terminée d'ici deux ans. Les autres activités du groupe de travail comprendront un rapport sur les progrès récents des mesures de l'humidité et des basses concentrations de vapeur d'eau.

#### 4 ÉCHELLES DE TEMPÉRATURE AU-DESSOUS DE 1 K ET EXTENSION ÉVENTUELLE DE L'EIT-90 AU-DESSOUS DE 0,65 K

M. Rusby introduit la question de l'extension éventuelle de l'EIT-90 au-dessous de 0,65 K en faisant référence à la section appropriée du rapport du Groupe de travail 4. L'équation de pression de fusion de  $^3\text{He}$  est généralement considérée comme le meilleur candidat pour l'extension de l'EIT-90 aux températures inférieures à 0,65 K. La PTB a publié une nouvelle version de cette équation dans le domaine de 1 mK à 1 K (CCT/96-25). Les températures déduites de cette équation figurent dans l'échelle pour les basses températures de la PTB qui est fondée, au-dessus de 50 mK, sur un thermomètre à susceptibilité magnétique à mono-cristal de nitrate de cérium-magnésium (CMN) étalonné, au-dessus de 1,2 K, par rapport à un thermomètre à résistance de rhodium-fer réalisant l'échelle pratique de température de 1976 (EPT-76) et, entre 50 mK et 1 mK, sur un thermomètre à résonance magnétique nucléaire en platine. Les deux thermomètres ont été comparés entre eux entre 18 mK et 54 mK et avec l'échelle du thermomètre à bruit de la PTB au-dessus de 6,5 mK.

M. Grohmann mentionne la différence entre l'équation de pression de fusion de  $^3\text{He}$  de la PTB et celle du NIST (fondée sur la thermométrie à bruit au-dessus de 6 mK), et la difficulté rencontrée lorsqu'on essaie d'extrapoler l'équation de pression de fusion du NIST entre 6 mK et 1 mK. MM. Grohmann et Rusby espèrent que d'autres laboratoires feront des mesures dans ce domaine de température ; en particulier, ils suggèrent qu'il serait très utile que le NIST poursuive ses mesures.

Des travaux sur les thermomètres à CMN sont en cours au NPL. M. Rusby mentionne le projet d'EUROMET sur la thermométrie à très basse température auquel le BNM-INM, le KOL, le NMI, le NPL, la PTB et deux sociétés privées participent. Ce projet comprend la mise au point de capteurs de pression de fusion de  $^3\text{He}$ , de thermomètres à CMN, de thermomètres en verre à capacité et d'instruments à point fixe de supraconducteur.

Pour relier l'échelle de pression de fusion de  $^3\text{He}$  à l'EIT-90, c'est-à-dire à l'échelle de pression de vapeur de  $^3\text{He}$ , il faudra diminuer l'incertitude sur l'échelle de pression de vapeur au-dessous de 1,2 K. M. Rusby espère disposer de plus de renseignements à ce sujet d'ici deux ou trois ans, ce qui permettra peut-être au groupe de travail de faire des propositions lors de la prochaine session du CCT (*voir* Recommandation T 1).

Les participants sont d'avis que les laboratoires doivent être encouragés à étudier l'influence du champ magnétique sur les thermomètres à basse température et sur les systèmes de référence, parce que la recherche dans le domaine des basses températures est souvent effectuée dans des champs magnétiques intenses.

## 5 ÉTABLISSEMENT ET COMPOSITION DES GROUPES DE TRAVAIL

M. Quinn note que, après délibération, les six groupes de travail sont chargés de mener à bien les tâches spécifiques du CCTou de conseiller le CCT sur des sujets d'un intérêt particulier. Les attributions et la composition de ces groupes de travail sont les suivantes :

Groupe de travail 1 : points fixes de définition et instruments d'interpolation.

Le groupe de travail est chargé :

1. des techniques améliorées pour la réalisation des points fixes de définition et des instruments d'interpolation ( $T_{90} \geq 3 \text{ K}$ ) ;
2. d'étudier la non-unicité ;
3. de la mise à jour de *Supplementary Information*.

Il est composé de : B.W. Mangum (NIST, président), P. Bloembergen (NMi), B. Fellmuth (PTB), A.I. Pokhodun (VNIIM), P. Marcarino (IMGC).

Groupe de travail 2 : points fixes secondaires et techniques permettant une réalisation approchée de l'EIT-90.

Le groupe de travail est chargé :

1. de publier une liste des points fixes secondaires ;
2. de réalisations pratiques approchées de l'EIT-90 ;
3. de donner des conseils pour la mise en application de l'EIT-90 dans les normes internationales et les tables critiques ;
4. de la mise à jour des documents existants.

Il est composé de : R.E. Bedford (NRC, président), F. Edler (PTB), F. Pavese (IMGC), C. Rhee (KRISS), Zhao Qi (NIM).

Groupe de travail 3 : équivalence internationale des mesures de température et comparaisons internationales correspondantes.

Le groupe de travail est chargé :

1. de collecter des renseignements sur les comparaisons et de résumer les résultats ;
2. de mettre à jour la liste des comparaisons clés approuvées par le CCT et de proposer de nouvelles comparaisons si nécessaire ;
3. de donner des conseils sur les méthodes d'estimation des incertitudes.

Il est composé de : G. Bonnier (BNM-INM, président), M.J. Ballico (CSIRO), S. Duris (SMU), M.J. de Groot (NMI), K.H. Kang (KRIS), R. Köhler (BIPM), T. Ricolfi (IMGC), D.C. Ripple (NIST).

Groupe de travail 4 : détermination des températures thermodynamiques et extension de l'EIT-90 à de plus basses températures.

Le groupe de travail est chargé :

1. d'étudier les nouvelles déterminations de la température thermodynamique  $T$  et d'étudier  $(T - T_{90})$  ;
2. d'étudier l'échelle de pression de vapeur de  $^3\text{He}$  au-dessous de 3 K ;
3. d'étudier les échelles de température au-dessous de 0,65 K.

Il est composé de : R.L. Rusby (NPL, président), M. Durieux (KOL), R.P. Hudson (Maryland, États-Unis), K. Grohmann (PTB), H.J. Jung (PTB), J.V. Nicholas (MSL), P.P.M. Steur (IMGC).

Groupe de travail 5 : groupe de travail commun au CCT et au CCPR sur la détermination des températures thermodynamiques des corps noirs à haute température.

Le groupe de travail est chargé :

1. de proposer une meilleure estimation des incertitudes obtenues avec les méthodes actuelles de mesure des températures thermodynamiques pour les températures au-dessus de 1357 K, et en particulier dans le domaine situé entre 2500 K et 3200 K ;
2. d'étudier l'influence éventuelle de ces incertitudes sur les avancées technologiques à venir ;
3. de préparer un rapport écrit sur ses conclusions et de proposer des recommandations au CCT et au CCPR.

Il est composé de : T.J. Quinn (BIPM, président), P. Bloembergen (NMI), C. Johnson (NIST), H.-J. Jung (PTB), R. Köhler (BIPM), D. Nettleton (NPL), F. Sakuma (NRLM).

Groupe de travail 6 : mesures d'humidité.

Le groupe de travail est chargé :

1. d'organiser une comparaison internationale d'étalons d'humidité ;
2. de rédiger un rapport sur la terminologie et les définitions relatives aux mesures d'humidité ;
3. de rédiger un rapport sur les progrès des étalons d'humidité, en portant une attention particulière aux mesures de basses concentrations de vapeur d'eau dans les gaz employés dans la technologie des semiconducteurs ;
4. de rédiger un rapport sur les progrès des étalons de mesure d'humidité à haute température.

Il est composé de : P. Huang (NIST, président), A. Actis (IMGC), S. Bell (NPL), L. Mamontova (VNIIM), C. Takahashi (NRLM).

Les quatre premiers groupes de travail ont été créés en 1993, ou avant. Depuis, les membres présents à l'origine ont quitté ces groupes de travail en raison de leur départ à la retraite ou d'un changement d'affectation, et de nouveaux membres ont été désignés en raison de leurs compétences dans le domaine concerné de la thermométrie. Les attributions du Groupe de travail 3 ont été modifiées afin de délimiter plus clairement ses responsabilités. Le Groupe de travail 5 commun au CCT et au CCPR a été créé en réponse à la Recommandation T 2 (1996). Le Groupe de travail 6 a été formé pour répondre aux besoins croissants dans le domaine des étalons de mesure d'humidité.

M. Quinn rappelle que les groupes de travail doivent envoyer au BIPM un rapport annuel sur leurs activités.



## 6 RECOMMANDATIONS ET RAPPORT AU CIPM

Deux sujets font l'objet des recommandations du CCT au CIPM : ces recommandations soulignent, l'une et l'autre, l'importance croissante des mesures de température, la Recommandation T 1 dans le domaine au-dessous de 1 K et la Recommandation T 2 dans le domaine de température au-dessus de 2500 K. M. Quinn adjoindra ces deux recommandations à son rapport sur la présente session du CCT qu'il présentera au CIPM lors de sa session de septembre 1996.

## 7 QUESTIONS DIVERSES

M. Bloembergen annonce que Tempmeko'99 aura lieu à Delft (Pays-Bas) ; la date n'est pas encore fixée.

Ensuite, les participants expriment leur préoccupation au sujet de la cessation des activités de l'Ispra sur les caloducs (travaux effectués par M. Bassani). Bien que certaines sociétés privées commercialisent ces systèmes, les activités de recherche de l'Ispra en ce domaine sont considérées par de nombreux membres comme essentielles pour satisfaire au besoin croissant de nouveaux caloducs avec système de contrôle à gaz. M. Quinn suggère d'écrire à l'Ispra à ce sujet.

## 8 PROCHAINE SESSION

La prochaine session du CCT se tiendra en mai ou juin 1999. M. Quinn rappelle qu'il est nécessaire que les comparaisons internationales proposées soient prêtes fin 1998. Beaucoup trouvent ce délai trop court.

M. Quinn demande au rapporteur de préparer un rapport bref, car il ne sera pas possible de publier un rapport aussi long que d'habitude.

M. DURIEUX, rapporteur  
juin 1997  
révisé avril 1998

RECOMMANDATIONS DU  
COMITÉ CONSULTATIF  
DE THERMOMÉTRIE  
PRÉSENTÉES AU  
COMITÉ INTERNATIONAL  
DES POIDS ET MESURES



# 1 RECOMMANDATION T 1 (1996) : Échelle de température au-dessous de 1 K\*

Le Comité consultatif de thermométrie,

## considérant

- que de multiples activités de recherche sont en cours à des températures thermodynamiques inférieures à 1 K,
- que ces recherches ont besoin d'une échelle de température admise par convention qui représenterait avec une bonne approximation les températures thermodynamiques,
- que l'EIT-90, avec la pression de vapeur de  $^3\text{He}$ , semble s'écarter de la température thermodynamique entre 1 K et sa limite inférieure de 0,65 K,

notant que plusieurs échelles de température propres à divers laboratoires ont été étudiées au-dessous de 0,65 K et que ces échelles ne concordent pas,

## recommande

- que les écarts entre les valeurs de la température données dans l'EIT-90 par la pression de vapeur de  $^3\text{He}$  et la valeur correspondante de la température thermodynamique, au-dessous de 1 K, soient étudiées plus avant,
- que des recherches soient entreprises pour expliquer les discordances entre les échelles existantes utilisant la pression de fusion de  $^3\text{He}$ ,
- que les laboratoires nationaux se concertent pour mettre au point une relation entre la pression de fusion de  $^3\text{He}$  et la température qui puisse servir de base à une extension de l'EIT-90 vers les basses températures jusque vers 1 mK.

---

\* Lors de sa 85<sup>e</sup> session en 1996, le Comité international des poids et mesures a adopté cette recommandation en tant que Recommandation 3 (CI-1996).

## 2 RECOMMANDATION T 2 (1996) : Température des sources à corps noir au-dessus de 2500 K

Le Comité consultatif de thermométrie,

**considérant**

- le rapport du groupe de travail commun au CCT et au CCPR (document CCT/96-17) sur la mesure des températures thermodynamiques aux hautes températures,
- que, pour établir des étalons de répartition spectrale énergétique, on a besoin de déterminer la température thermodynamique de sources à corps noir au-dessus de 2500 K,
- que les méthodes définies dans l'EIT-90 peuvent être utilisées pour déterminer la température thermodynamique par pyrométrie monochromatique en utilisant comme référence le rayonnement du corps noir au point de congélation de l'argent ou de l'or ou du cuivre, dont la température thermodynamique a été déterminée auparavant,
- que d'autres méthodes, telles que la mesure du flux énergétique dans une bande spectrale bien déterminée ou la mesure du rapport des flux énergétiques dans deux ou plusieurs bandes spectrales bien déterminées, sont en cours de mise au point pour la mesure des températures thermodynamiques,
- qu'il serait hautement désirable de disposer d'un point fixe à une température supérieure à 2300 K, avec une reproductibilité meilleure que 0,1 K,

**recommande**

- que les laboratoires nationaux s'efforcent de mettre au point des points fixes à haute température,

- que les laboratoires nationaux intensifient leurs efforts en vue de caractériser et d'améliorer les corps noirs à haute température et la stabilité des radiomètres à filtre et des pyromètres,
- que les laboratoires nationaux continuent à utiliser toutes les méthodes connues pour mesurer la température du corps noir à haute température et comparer les résultats obtenus.





## ANNEXE T 1.

Documents de travail présentés à la 19<sup>e</sup> session du CCT

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

## Document

## CCT/

- 96-1 BIPM. — Report on the international comparison of water triple point cells, by R. Pello, R. Goebel and R. Köhler, 43 p.
- 96-2 VNIIM (Féd. de Russie). — Analytical and experimental study of the factors determining the temperature gradient during the calibration at the ITS-90 fixed points, by A.G. Ivanova and A.I. Pokhodun, 11 p.
- 96-3 KRISS (Rép. de Corée). — Thermoelectric Properties of the Au/Pd Thermocouple, by Y.G. Kim, K.S. Gam and C. Rhee, 5 p.
- 96-4 KRISS (Rép. de Corée). — Impurity Redistribution Effects on Phase Transition Temperatures in Oxygen as Secondary Fixed Points, by K.H. Kang, J.-J. Kim and C. Rhee, 23 p.
- 96-5 PTB (Allemagne). — Measurement of  $T - T_{90}$  in the Range from 500 °C to 962 °C by Absolute Spectral Radiometry Employing a Cryogenic Radiometer and a Double Heatpipe Black Body, by M. Stock, J. Fischer, R. Friedrich, H.-J. Jung and B. Wende, 8 p.
- 96-6 PTB (Allemagne). — Present Status of Low Temperature Scales, by G. Schuster, A. Hoffmann and D. Hechtfischer, 3 p.
- 96-7 IMGC (Italie). — Humidity effects in long stem Standard Platinum Resistance Thermometers, by P. Marcarino, R. Dematteis and M. Arai, 6 p.

## Document

## CCT/

- 96-8 CCT Working group 1. — Recommended techniques for improved realization and intercomparisons of defining fixed points. Report to the CCT, July 1996, 28 p.  
General Recommendations for intercomparisons of the fixed points of the International Temperature Scale of 1990 at the highest level of accuracy, 13 p.
- 96-9 CCT Working group 2. — Report of Working group 2 to the Comité Consultatif de Thermométrie, July 1996, 2 p.
- 96-10 NRC (Canada). — Proposals, 9 p.
- 96-11 NIST (États-Unis). — Realization of the ITS-90 at the National Institute of Standards and Technology, by B.W. Mangum, G.T. Furukawa, C.W. Meyer, M.L. Reilly, G.F. Strouse and W.L. Tew, 17 p.
- 96-12 NRC (Canada). — Extending the Platinum Resistance Thermometer Range of the ITS-90 to 1064.18 °C by Replacing the Silver Point with the Gold Point, by K.D. Hill, 4 p.
- 96-13 MSL (Nouvelle-Zélande). — On Platinum Thermometry, by J.V. Nicholas, 2 p.
- 96-14 MSL (Nouvelle-Zélande). — On the Definition of the Kelvin, by J.V. Nicholas, 3 p.
- 96-15 NRLM (Japon). — Pressure Dependency of the Liquid-Solid Equilibrium of Indium, by H. Sakurai, 2 p.
- 96-16 NRLM (Japon). — Initial temperature drift of some triple point cells of water, by H. Sakurai, 2 p.
- 96-17 Joint CCT/CCPR working group. — Short report of the Joint CCT/CCPR working group meeting, by R. Köhler, 4 p.  
Note, by H.-J. Jung, 1 p.
- 96-18 NPL (Royaume-Uni). — A powdered CMN thermometer for high accuracy measurements in the range 0.01 to 1 K, by P. Mohandas, D.I. Head and R.L. Rusby, 2 p.
- 96-19 NPL (Royaume-Uni). — Recent measurements of the deuterium triple point at NPL, by D.I. Head, 4 p.

## Document

CCT/

- 96-20 NPL (Royaume-Uni), SIRIM (Malaysia). — An InGaAs radiation thermometer for temperature scale realisation, by R.C. McEvoy, G. Machin, N.P. Fox, E. Theocharous and I.S. Hassan, 6 p.
- 96-21 NPL (Royaume-Uni), VNIIM (Féd. de Russie). — NPL-VNIIM intercomparison of tungsten ribbon lamps, by H.C. McEvoy, K.M. Raven, A.I. Pokhodun and M.S. Matveyev, 5 p.
- 96-22 BNM-INM (France). — Agreed EUROMET Project. Thermometry – Intercomparison of water triple point cell Ref. No. 278, Synthesis report, by E. Renaot, coordinator, 28 p.
- 96-23 CCT Working group 3. — Report of Working group 3 to the CCT – International Traceability in Temperature Measurements, September 1996, 2 p.
- 96-24 PTB (Allemagne). — Interpolating Dielectric-Constant Gas Thermometry, by K. Grohmann, H. Luther and B. Fellmuth, 3 p.
- 96-25 PTB (Allemagne). — Temperature scale extension below ITS-90 based on <sup>3</sup>He melting pressure, by G. Schuster, A. Hoffmann and D. Hechtfisher, 3 p.
- 96-26 PTB (Allemagne). — On the determination of the thermodynamic temperature of high temperature black bodies via ITS-90 or alternative methods, by H.-J. Jung, 10 p.
- 96-27 KRISS (Rép. de Corée). — Temperature standards in KRISS, by C. Rhee, K.H. Kang, K.S. Gam, Y.G. Kim, J.W. Han, S.N. Park and K.H. Kim, 19 p.
- 96-28 NRLM (Japon). — Comments on key comparison of radiation thermometers under CCT, 3 p.
- 96-29 NMi-VSL (Pays-Bas). — Laboratory status of contact thermometry and humidity research, by M.J. de Groot, J. Mooibroek, J.F. Dubbeldam, H. Heimeriks and E. van Dijk, 3 p.
- 96-30 NMi (Pays-Bas), Forschungszentrum Jülich (Allemagne), PTB (Allemagne). — Noise thermometry measurements at fixed points, by M.J. de Groot, J.F. Dubbeldam, H. Brixy, F. Edler and E. Tegeler, 13 p.

## Document

## CCT/

- 96-31 CCT Working group 4. — Working group 4 report to the CCT, August 1996, 8 p.
- 96-32 European ultra-low temperature scale and traceability: A collaborative project supported by the Standards, Measurement and Testing Programme of the European Union, 1 p.
- 96-33 VNIIM (Féd. de Russie), Alma-Ata centre for standardization, metrology and certification (Kazakhstan). — Report on the comparison of the VNIIM (Russia) water triple-point cell and the water triple-point cell of the Alma-Ata centre for standardization, metrology and certification (Kazakhstan), by A.I. Pokhodun and I.M. Pecounova, 2 p.
- 96-34 VNIIM (Féd. de Russie), BNM-INM (France). — ITS-90 Approximation Using a Platinum-Palladium Thermocouple, by A.I. Pokhodun, M.S. Matveyev, G. Bonnier and H. Ronsin, 10 p.

## LISTE DES SIGLES UTILISÉS DANS LE PRÉSENT VOLUME

### 1 Sigles des laboratoires, commissions et conférences

BIPM	Bureau international des poids et mesures
BNM-INM	Bureau national de métrologie : Institut national de métrologie, Paris (France)
CC	Comité consultatif du CIPM
CCPR	Comité consultatif de photométrie et radiométrie
CCT	Comité consultatif de thermométrie
CEI	Commission électrotechnique internationale
CENAM	Centro Nacional de Metrologia, Mexico (Mexique)
CIPM	Comité international des poids et mesures
CSIRO	CSIRO, National Measurement Laboratory, Lindfield (Australie)
*DSIR	Department of Scientific and Industrial Research, Lower Hutt (Nouvelle-Zélande), <i>voir</i> MSL
EUROMET	European Collaboration in Measurement Standards
IMGC	Istituto di Metrologia G. Colonnetti, Turin (Italie)
INM	Institut national de métrologie, Paris (France), <i>voir</i> BNM
INM	Institutul National de Metrologie, Bucarest (Roumanie)
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial, Rio de Janeiro (Brésil)
IPQ	Instituto Português da Qualidade, Lisbonne (Portugal)
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> KRIS

---

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

KRISS	(ex KSRI) Korea Research Institute of Standards and Science, Taejon (Rép. de Corée)
MSL-IRL	(ex DSIR) Measurement Standards Laboratory of New Zealand, Lower Hutt (Nouvelle-Zélande)
*NBS	National Bureau of Standards, Gaithersburg (États-Unis), <i>voir</i> NIST
NIM	Institut national de métrologie, Beijing (Chine)
NIST	(ex NBS) National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg (États-Unis)
NMi	Nederlands Meetinstituut : Van Swinden Laboratorium, Delft (Pays-Bas)
NPL	National Physical Laboratory, Teddington (Royaume-Uni)
NRC	Conseil national de recherches du Canada, Ottawa (Canada)
NRLM	National Research Laboratory of Metrology, Tsukuba (Japon)
PSB	(ex SISIR) Singapore Productivity and Standards Board (Singapour)
PTB	Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig et Berlin (Allemagne)
SIRIM	Standards and Research Institute of Malaysia, Selangor (Malaisie)
*SISIR	Singapore Institute of Standards and Industrial Research (Singapour), <i>voir</i> PSB
SMU	Slovenský Metrologický Ústav, Bratislava (Slovaquie)
VNIIFTRI	Institut des mesures physico-techniques et radiotechniques, Moscou (Féd. de Russie)
VNIIM	Institut de métrologie D.I. Mendéléev, Saint-Pétersbourg (Féd. de Russie)
*VSL	Van Swinden Laboratorium, Delft (Pays-Bas), <i>voir</i> NMi

## 2 Sigles des termes scientifiques

CMN	Nitrate de cérium-magnésium
EIPT-68	Échelle internationale pratique de température de 1968
EIT-90	Échelle internationale de température de 1990
EPT-76	Échelle provisoire de température de 1976
HTPRT	Thermomètre à résistance de platine à haute température
NMR	Résonance magnétique nucléaire
PRT	Thermomètre à résistance de platine
SPRT	Thermomètre à résistance de platine étalon