

COMITÉ CONSULTATIF DE THERMOMÉTRIE

SESSION DE 1980

COMITÉ INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES

COMITÉ CONSULTATIF
DE THERMOMÉTRIE

13^e SESSION – 1980

(17-19 juin)



BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES

Pavillon de Breteuil, F-92310 SÈVRES, France

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

ISBN 92-822-2068-0

NOTICE HISTORIQUE

Les organes de la Convention du Mètre

Le Bureau International, le Comité International et la Conférence Générale des Poids et Mesures

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

Le Bureau International a son siège près de Paris, dans le domaine (43 520 m²) du Pavillon de Breteuil (Parc de Saint-Cloud) mis à sa disposition par le Gouvernement français ; son entretien est assuré à frais communs par les États membres de la Convention du Mètre ⁽¹⁾.

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

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

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

La Conférence Générale est formée des délégués de tous les États membres de la Convention du Mètre et se réunit actuellement tous les quatre ans. Elle reçoit à chacune de ses sessions le Rapport du Comité International sur les travaux accomplis, et a pour mission :

- de discuter et de provoquer les mesures nécessaires pour assurer la propagation et le perfectionnement du Système International d'Unités (SI), forme moderne du Système Métrique ;
- de sanctionner les résultats des nouvelles déterminations métrologiques fondamentales et d'adopter les diverses résolutions scientifiques de portée internationale ;
- d'adopter les décisions importantes concernant l'organisation et le développement du Bureau International.

Le Comité International est composé de dix-huit membres appartenant à des États différents ; il se réunit actuellement tous les ans. Le bureau de ce Comité adresse aux Gouvernements des États membres de la Convention du Mètre un *Rapport Annuel* sur la situation administrative et financière du Bureau International.

Limitées à l'origine aux mesures de longueur et de masse et aux études métrologiques en relation avec ces grandeurs, les activités du Bureau International ont été étendues aux étalons de mesure électriques (1927), photométriques (1937) et des rayonnements ionisants (1960). Dans ce but, un agrandissement des premiers laboratoires construits en 1876-1878 a eu lieu en 1929 et deux nouveaux bâtiments ont été construits en 1963-1964 pour les laboratoires de la Section des rayonnements ionisants.

Une trentaine de physiciens ou techniciens travaillent dans les laboratoires du Bureau International ; ils font des recherches métrologiques ainsi que des mesures dont les résultats sont consignés dans des certificats portant sur des étalons des grandeurs ci-dessus. La dotation annuelle du Bureau International est de l'ordre de 7 500 000 francs-or (en 1980), soit environ 2 950 000 dollars U.S.

⁽¹⁾ Au 31 décembre 1980, quarante-cinq États sont membres de cette Convention : Afrique du Sud, Allemagne (Rép. Fédérale d'), Allemande (Rép. Démocratique), Amérique (É.-U. d'), Argentine (Rép.), Australie, Autriche, Belgique, Brésil, Bulgarie, Cameroun, Canada, Chili, Chine (Rép. Pop. de), Corée (Rép. de), Danemark, Dominicaine (Rép.), Égypte, Espagne, Finlande, France, Hongrie, Inde, Indonésie, Iran, Irlande, Italie, Japon, Mexique, Norvège, Pakistan, Pays-Bas, Pologne, Portugal, Roumanie, Royaume-Uni, Suède, Suisse, Tchécoslovaquie, Thaïlande, Turquie, U.R.S.S., Uruguay, Venezuela, Yougoslavie.

Devant l'extension des tâches confiées au Bureau International, le Comité International a institué depuis 1927, sous le nom de *Comités Consultatifs*, des organes destinés à le renseigner sur les questions qu'il soumet, pour avis, à leur examen. Ces Comités Consultatifs, qui peuvent créer des « Groupes de travail » temporaires ou permanents pour l'étude de sujets particuliers, sont chargés de coordonner les travaux internationaux effectués dans leurs domaines respectifs et de proposer des recommandations concernant les modifications à apporter aux définitions et aux valeurs des unités, en vue des décisions que le Comité International est amené à prendre directement ou à soumettre à la sanction de la Conférence Générale pour assurer l'unification mondiale des unités de mesure.

Les Comités Consultatifs ont un règlement commun (*Procès-Verbaux CIPM*, 31, 1963, p. 97). Chaque Comité Consultatif, dont la présidence est généralement confiée à un membre du Comité International, est composé de délégués de chacun des grands Laboratoires de métrologie et des Instituts spécialisés dont la liste est établie par le Comité International, de membres individuels désignés également par le Comité International et d'un représentant du Bureau International. Ces Comités tiennent leurs sessions à des intervalles irréguliers ; ils sont actuellement au nombre de huit :

1. Le *Comité Consultatif d'Électricité* (CCE), créé en 1927.
2. Le *Comité Consultatif de Photométrie et Radiométrie* (CCPR), nouveau nom donné en 1971 au *Comité Consultatif de Photométrie* (CCP) créé en 1933 (de 1930 à 1933 le Comité précédent (CCE) s'est occupé des questions de photométrie).
3. Le *Comité Consultatif de Thermométrie* (CCT), créé en 1937.
4. Le *Comité Consultatif pour la Définition du Mètre* (CCDM), créé en 1952.
5. Le *Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde* (CCDS), créé en 1956.
6. Le *Comité Consultatif pour les Étalons de Mesure des Rayonnements Ionisants* (CCEMRI), créé en 1958. En 1969, ce Comité Consultatif a institué quatre sections : Section I (Rayons X et γ , électrons), Section II (Mesure des radionucléides), Section III (Mesures neutroniques), Section IV (Étalons d'énergie α) ; cette dernière Section a été dissoute en 1975, son domaine d'activité étant confié à la Section II.
7. Le *Comité Consultatif des Unités* (CCU), créé en 1964 (ce Comité Consultatif a remplacé la « Commission du Système d'Unités » instituée par le CIPM en 1954).
8. Le *Comité Consultatif pour les Masses et les grandeurs apparentées* (CCM), créé en 1980.

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

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

Le Bureau International publie de temps en temps, sous le titre *Les récents progrès du Système Métrique*, un rapport sur les développements du Système Métrique (SI) dans le monde.

La collection des *Travaux et Mémoires du Bureau International des Poids et Mesures* (22 tomes publiés de 1881 à 1966) a été arrêtée en 1966 par décision du Comité International.

Depuis 1965 la revue internationale *Metrologia*, éditée sous les auspices du Comité International des Poids et Mesures, publie des articles sur les principaux travaux de métrologie scientifique effectués dans le monde, sur l'amélioration des méthodes de mesure et des étalons, sur les unités, etc., ainsi que des rapports concernant les activités, les décisions et les recommandations des organes de la Convention du Mètre.

Comité International des Poids et Mesures

Secrétaire
J. DE BOER

Vice-Présidents
P. HONTI, D. KIND

Président
J. V. DUNWORTH

LISTE DES MEMBRES

DU

COMITÉ CONSULTATIF DE THERMOMÉTRIE

Président

H. PRESTON-THOMAS, Membre du Comité International des Poids et Mesures; Directeur associé de la Division de Physique du Conseil National de Recherches, *Ottawa*.

Membres

AMT FÜR STANDARDISIERUNG, MESSWESEN UND WARENPRÜFUNG [ASMW],
Berlin.

BUREAU NATIONAL DE MÉTROLOGIE, *Paris* : Institut National de Métrologie [INM] du Conservatoire National des Arts et Métiers.

CONSEIL NATIONAL DE RECHERCHES [NRC], *Ottawa*.

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

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

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

KAMERLINGH ONNES LABORATORIUM [KOL], *Leiden*.

NATIONAL BUREAU OF STANDARDS [NBS], *Washington*.

NATIONAL MEASUREMENT LABORATORY [NML], *Lindfield* (Australie).

NATIONAL PHYSICAL LABORATORY [NPL], *Teddington* (Grande-Bretagne).

NATIONAL RESEARCH LABORATORY OF METROLOGY [NRLM], *Tsukuba*
(Japon).

PHYSIKALISCH-TECHNISCHE BUNDESANSTALT [PTB], *Braunschweig*.

J. DE BOER, Secrétaire du Comité International des Poids et Mesures;
Directeur, Instituut voor Theoretische Fysica, *Amsterdam*.

F. G. BRICKWEDDE, Professor of Physics, Pennsylvania State University,
Pennsylvania.

M. COLOMINA, Institut National de Chimie Physique Antonio de Gregorio
Rocasolano, *Madrid*.

J. SKAKALA, Directeur de Recherche, Institut Métrologique Tchécoslova-
que, *Bratislava*.

C. A. SWENSON, Iowa State University, *Ames* (États-Unis d'Amérique).

Le directeur du Bureau International des Poids et Mesures [BIPM],
Sèvres.

ORDRE DU JOUR DE LA SESSION

1. Approbation du compte rendu des séances de la 12^e session du CCT (1978).
2. Travaux faisant suite à la 12^e session du CCT :
 - a) Publication de l'EPT-76 et du document joint.
 - b) Adoption des principes d'une nouvelle EIPT.
 - c) État actuel de la valeur de la constante des gaz.
 - d) Comparaison des échelles du thermomètre à résistance de platine et du pyromètre optique.
 - e) État d'avancement des comparaisons de cellules scellées à point triple.
 - f) Nouvelles équations de pression de vapeur de l'hélium.
 - g) Préparation d'une monographie donnant des renseignements complémentaires pour la réalisation de l'EIPT.
 - h) Distribution des thermomètres à résistance de platine pour la mesure des hautes températures, fabriqués au NBS.
 - i) Éventualité d'une différence importante entre la température thermodynamique et T_{68} au point triple de l'oxygène.
3. Présentation des rapports des Groupes de travail :
 - a) Rapport du Groupe de travail 1 : Révision de l'EIPT.
 - b) Rapport du Groupe de travail 2 : Points fixes secondaires et échelles secondaires.
 - c) Rapport du Groupe de travail 3 : Températures supérieures à 100 K.
 - d) Rapport du Groupe de travail 4 : Températures inférieures à 100 K.
 - e) Rapport du Groupe de travail 5 : Thermomètres pratiques aux températures inférieures à 30 K.
 - f) Discussion commune des rapports du GT4 et du GT5.
4. État d'avancement des travaux en relation avec la Recommandation T 1 (1978) (Mise au point de thermomètres à résistance de platine pour la mesure des hautes températures).
5. Principes d'une nouvelle EIPT, sur lesquels doit reposer le projet d'échelle prévu pour 1982 (autres que ceux traités en 4) :
 - a) Lettre de la Commission I.4 de l'UICPA.
 - b) Établissement éventuel des extrémités de l'échelle sur des principes thermodynamiques et abaissement éventuel de sa limite inférieure de 0,5 K à 10 mK.

- c) Point de congélation du cuivre en remplacement du point de congélation de l'or.
- d) Limite inférieure du domaine du thermomètre à résistance de platine.
- e) Points fixes dans le domaine du thermomètre à résistance de platine (probablement 14 K-1 085 °C).
- f) Méthodes d'interpolation pour le domaine du thermomètre à résistance de platine (probablement 14 K-1 085 °C).
- g) Domaine des basses températures (probablement 0,5 K-14 K).

6. Programmes futurs du CCT et des Groupes de travail :

- a) Programme futur du CCT.
- b) Prochains travaux des Groupes de travail.
- c) Composition des Groupes de travail.

7. Publication des Documents.

8. Questions diverses :

- a) Rapport et Recommandation du CCT au CIPM.
 - b) Prochaine session du CCT et « 6th Temperature Symposium » (États-Unis d'Amérique, mars 1982).
 - c) Remarques diverses.
-

RAPPORT
DU
COMITÉ CONSULTATIF DE THERMOMÉTRIE
(13^e Session – 1980)
AU
COMITÉ INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES
par M. DURIEUX, Rapporteur

Le Comité Consultatif de Thermométrie (CCT) s'est réuni pour sa 13^e session au Bureau International des Poids et Mesures, à Sèvres, où il a tenu cinq séances les 17, 18 et 19 juin 1980.

Étaient présents :

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

Les délégués des laboratoires membres :

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

Bureau National de Métrologie, Paris : Institut National de Métrologie [INM] du Conservatoire National des Arts et Métiers (A. MOSER, G. BONNIER).

Conseil National de Recherches [NRC], Ottawa (R. E. BEDFORD).
Istituto di Metrologia G. Colonnetti [IMGC], Turin (L. CROVINI, F. PAVESE).

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

National Bureau of Standards [NBS], Washington (J. F. SCHOOLEY, R. P. HUDSON).

National Measurement Laboratory [NML], Lindfield (W. R. G. KEMP, L. M. BESLEY).

National Physical Laboratory [NPL], Teddington (P. B. COATES, R. L. RUSBY, J. R. GOTT).

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

Le directeur du BIPM (P. GIACOMO).

Invités : Institut National de Métrologie [NIM], Beijing (LING Shan-Kang); Van Swinden Laboratorium [VSL], Delft (P. BLOEMBERGEN).

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

Excusés : J. DE BOER (Amsterdam), F. G. BRICKWEDDE (Pennsylvania), J. SKAKALA (Bratislava), C. A. SWENSON (Ames), membres nominativement désignés; Polski Komitet Normalizacji i Miar, Varsovie (invité).

Absents : Institut de Métrologie D. I. Mendéléev [IMM], Leningrad; Institut des Mesures Physicotechniques et Radiotechniques [IMPR], Moscou; National Research Laboratory of Metrology [NRLM], Tokyo; M. COLOMINA (Madrid), membre nominativement désigné.

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

Remplacement de l'Échelle Internationale Pratique de Température (EIPT)

L'échéance de 1987, retenue lors de la précédente session pour le remplacement de l'EIPT, semble pouvoir encore être tenue. Toutefois, cela dépend de la solution apportée à temps à un certain nombre de problèmes importants. Les membres du CCT sont tous d'accord pour penser qu'il ne faut pas sacrifier la qualité d'une nouvelle version de l'EIPT à la satisfaction d'un calendrier déterminé à l'avance; les laps de temps nécessaires pour trouver des solutions à des problèmes particuliers risquent d'entraîner des retards dans la mise en œuvre d'une nouvelle échelle.

Rapports des Groupes de travail

GT1 : Ce Groupe a étudié un projet préliminaire des Renseignements complémentaires à l'EIPT-68. On pense que ce projet pourra, dans une large mesure, être valable aussi avec la nouvelle version de l'EIPT.

GT2 : Ce Groupe a donné quelques mises à jour concernant les points de référence secondaires. Il a discuté l'exactitude et la précision d'un certain nombre d'échelles secondaires de température, en mettant l'accent sur les échelles définies au moyen des thermocouples en différents alliages platine-rhodium dans le domaine de 0 °C à 1 800 °C.

GT3 : Ce Groupe a rendu compte des travaux en cours concernant la mesure des températures thermodynamiques au-dessus de 100 K. Il a parlé de la situation actuelle au NBS des thermomètres à résistance pour les hautes températures et de l'emploi éventuel de ces thermomètres comme instruments de mesure appropriés dans la nouvelle EIPT.

GT4 : Ce Groupe a discuté des points suivants : réalisations dans différents laboratoires de l'EPT-76 qui a été promulguée en 1978, travaux en cours pour la mesure des températures thermodynamiques au-dessous de 100 K, formes que pourrait revêtir une nouvelle EIPT dans le domaine de température inférieur à 100 K.

GT5 : Ce Groupe a passé en revue les avantages et les inconvénients des différents thermomètres utilisés à des températures inférieures à 30 K, en insistant en particulier sur les thermomètres à résistance, le thermomètre à gaz à volume constant et les thermomètres magnétiques.

Thermomètres à résistance de platine pour les hautes températures

Depuis plus d'une décennie le CCT pense qu'on ne devrait pas utiliser le thermocouple platine à 10 % de rhodium comme instrument d'interpolation de l'EIPT; le thermomètre à résistance de platine, susceptible de mesures plus exactes, devrait le remplacer sur tout ou presque tout le domaine de température, de 630 °C à 1 064 °C. Dans la pratique, toutefois, en dépit de nombreux essais, on n'a pas réussi à produire, pour le domaine de 630 °C à 1 064 °C, de thermomètres à résistance de platine assurant une bonne exactitude, durables et d'un prix raisonnable.

Un nouveau modèle conçu au NBS promet maintenant de modifier cette situation. Le CCT en a discuté très longuement; il en est arrivé à la conclusion que ce modèle semblait promettre d'être à la fois satisfaisant et disponible pour la promulgation d'une nouvelle EIPT en 1987; le CCT a chaudement encouragé la mise au point finale, la production à petite échelle et les essais de ce thermomètre. Les résultats du programme d'essais devraient permettre au CCT de déterminer si la température de jonction avec le pyromètre optique devrait être maintenue à 1 064 °C ou devrait être ramenée à 960 °C.

Extension de l'EIPT vers les basses températures

L'EPT-76 couvre le domaine de 0,5 K à 30 K, et la limite inférieure actuelle de l'EIPT se situe approximativement à 14 K. Le CCT a passé un temps considérable à discuter de ce domaine de température et du choix de la limite inférieure de température pour la prochaine version de l'EIPT.

Un groupe de travail présentera à la prochaine session du CCT un rapport portant sur cette discussion et sur la poursuite de l'étude de cette question. Les contributions apportées à ce groupe de travail par les experts intéressés seront particulièrement appréciées.

Réalisations secondaires de l'EIPT

Le CCT a longuement discuté la possibilité d'avoir diverses réalisations secondaires de l'EIPT. Tout le monde a été d'accord pour dire qu'on

devrait fournir des conseils pour des réalisations de ce genre ; mais on ne s'est pas mis d'accord sur la façon précise dont cela devrait être fait. A partir de cette discussion et des renseignements fournis par le rapport du GT2, le CCT a recommandé l'utilisation du thermocouple platine/platine à 13 % de rhodium comme base d'une réalisation secondaire de l'EIPT entre 0 °C et 1 100 °C environ, et le thermocouple platine/platine à 30 % de rhodium entre 1 000 °C et 1 800 °C environ. Ce sujet sera approfondi et un rapport sera présenté au CCT par un groupe de travail.

Comparaison de cellules scellées à point triple

F. Pavese, coordonnateur de la comparaison, a rendu compte d'une réunion des représentants de divers laboratoires participants qui s'est tenue juste avant la session du CCT. Les résultats provisoires indiquent que les cellules fonctionnent mieux que prévu, probablement suffisamment bien pour être utilisées pour des réalisations primaires de points fixes.

Les résultats font apparaître aussi un accord satisfaisant entre les réalisations de l'EIPT dans les différents laboratoires. Étant donné ces résultats favorables, le champ de la comparaison a été élargi ; toutefois, on espère encore achever cette comparaison d'ici à la fin de 1981.

Réorganisation des Groupes de travail

Les tâches assignées aux Groupes de travail du CCT au cours des dernières années sont, ou presque, achevées avec succès. Les Groupes de travail ont par conséquent été reconstitués afin de faciliter l'accomplissement d'une nouvelle série de tâches, comportant en particulier celles qui ont trait à la mise au point du texte, aux définitions techniques et à la documentation nécessaire pour la nouvelle EIPT envisagée. Les Groupes de travail sont maintenant au nombre de quatre (au lieu de cinq) et les tâches ont été réparties comme suit :

GT1 : Préparation des grandes lignes du projet d'une nouvelle EIPT sous une forme permettant sa discussion par le CCT en 1982.

Préparation d'un document contenant les renseignements complémentaires à l'EIPT, document devant être prêt à publier après discussion par le CCT en 1982, avec révisions périodiques ultérieures.

GT2 : Poursuite de l'étude des températures de référence secondaires (celles disponibles et celles proposées).

Préparation d'un document décrivant une bonne pratique en thermométrie, portant sur les techniques secondaires, y compris les réalisations secondaires de l'EIPT mais excluant les sujets traités dans le document du GT1. Un premier projet doit être présenté au CCT en 1982.

GT3 : En vue de la nouvelle EIPT, préparation des équations d'interpolation pour le domaine de température (éventuellement de 14 K à 1 064 °C) couvert par les thermomètres à résistance de platine.

Choix d'une température de jonction entre le domaine du thermomètre à résistance de platine et celui du pyromètre optique.

Choix des points fixes dans le domaine du thermomètre à résistance de platine.

Choix, en liaison avec le GT4, d'une limite inférieure pour le domaine de température dans lequel le thermomètre à résistance de platine définira l'EIPT.

Organisation d'une comparaison et évaluation du comportement des thermomètres à résistance de platine aux températures élevées, actuellement à l'étude ou de ceux prochainement construits.

Étude des mesures de température thermodynamique supérieures à 14 K.

GT4 : Établissement des recommandations sur tous les aspects du changement de l'EIPT au-dessous du domaine du thermomètre à résistance de platine et concertation avec le GT3 pour déterminer la limite inférieure du domaine du thermomètre à résistance de platine.

(Septembre 1980).

**Recommandation
du Comité Consultatif de Thermométrie
présentée
au Comité International des Poids et Mesures**

RECOMMANDATION T 1 (1980)

Le Comité Consultatif de Thermométrie,

1. *considérant*

– qu'il a la charge de la rédaction d'une nouvelle version de l'Échelle Internationale Pratique de Température,

– que dans plusieurs domaines de température les informations actuelles sur les températures thermodynamiques ne sont pas suffisantes, soit parce que les résultats expérimentaux sont trop rares, soit parce que les incertitudes sont excessivement grandes, et que l'on a un besoin urgent de ces informations,

recommande que les travaux sur la mesure des températures thermodynamiques soient développés, principalement dans les domaines de température de 14 à 90 K et de 0 à 1 100 °C.

2. *considérant* que la possibilité de définir une nouvelle échelle pour la mesure des hautes températures est limitée par le manque de thermomètres à résistance de platine dont les caractéristiques soient bien définies et bien reproductibles,

recommande que l'on entreprenne des travaux visant à la construction et à l'étude des thermomètres à résistance de platine pour les températures Celsius jusqu'à 1 100 °C, puis des comparaisons internationales de ces thermomètres.

3. *considérant* que la méthode actuelle de détermination des températures dans l'Échelle Internationale Pratique de Température entre les points fixes de définition n'est pas suffisamment précise et qu'elle est à certains égards discontinue,

recommande que des recherches soient entreprises pour trouver entre les points fixes des méthodes d'interpolation qui améliorent la précision et la continuité des échelles à venir en fonction de la température thermodynamique.

4. *considérant* le besoin d'un point fixe de référence entre 7 et 14 K,

recommande que l'on étudie le point de transition du niobium de l'état normal à l'état supraconducteur.

**Compte rendu des séances
de la 13^e Session du CCT**

Le Président souhaite la bienvenue à tous les membres et délégués, en particulier à ceux qui assistent à la réunion du CCT pour la première fois : Mr L. M. Besley (NML), Mr P. Bloembergen (VSL), Mr G. Bonnier (INM), Mr G. R. Gott (NPL) et Mr F. Pavese (IMGC).

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

L'ordre du jour provisoire est approuvé après une petite modification au point 6.

Le *Président* indique que seuls les documents 1 à 26 ont été reçus avant la date limite du 17 avril.

**1. Approbation du compte rendu des séances
de la 12^e Session du CCT (1978)**

Le compte rendu de la 12^e session du CCT est approuvé.

2. Travaux faisant suite à la 12^e Session du CCT

Il est convenu que la plupart des points a à i ci-dessous seront discutés en détail sous d'autres points de l'ordre du jour.

a) *Publication de l'EPT-76 et du document joint*

L'Échelle Provisoire de Température de 1976 entre 0,5 K et 30 K (EPT-76) a été publiée dans *Comité Consultatif de Thermométrie*, 12^e session, 1978, p. T 7, et dans *Comptes Rendus*, XV^e Conférence Internationale sur la Physique à Basse Température, Grenoble, 1978, C6, p. 1631. L'EPT-76 et le document sur son historique et son élaboration ont aussi été publiés en anglais dans *Metrologia*, **15**, 1979, p. 65 et p. 57.

b) *Adoption des principes d'une nouvelle EIPT*

La discussion est reportée aux points 3 et 5.

c) *État actuel de la valeur de la constante des gaz*

Le *Président* demande s'il y a d'autres commentaires que ceux qui ont été faits lors de la 12^e session du CCT (1978).

Mr *Quinn* indique que de nouvelles mesures et de nouveaux calculs de la constante des gaz, effectués par la méthode acoustique au NPL (maintenant publiés), donnent des résultats en bon accord avec la valeur $(8,314\ 41 \pm 0,000\ 26) \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ qui figure dans la liste des valeurs recommandées pour les constantes fondamentales (Taylor et Cohen, 1973).

Mr *Thomas* indique que le groupe de L. Storm à Münster a entrepris une détermination de la constante de Boltzmann avec un thermomètre à bruit.

Le *Président* espère que de nouvelles valeurs expérimentales de la constante des gaz seront connues à temps pour qu'il en soit tenu compte lors de l'établissement et de la publication prévus en 1982 d'une nouvelle série de valeurs recommandées des constantes fondamentales ; il serait en fait souhaitable que ces nouvelles valeurs expérimentales soient connues avant la conférence sur les constantes fondamentales qui doit se tenir au NBS en 1981.

d) *Comparaison des échelles du thermomètre à résistance de platine et du pyromètre optique*

La discussion est reportée au point 3c.

e) *État d'avancement des comparaisons de cellules scellées à point triple*

Lors de sa 12^e session (1978), le CCT avait accepté une proposition de l'IMGC : entreprendre une comparaison internationale de cellules scellées à point triple. Mr *Pavese* dit que cette comparaison se déroule de façon satisfaisante et que des représentants des laboratoires participants se sont réunis le 16 juin au BIPM pour en discuter. Mr *Pavese* présente le rapport suivant :

On a utilisé vingt-et-une cellules au total, fournies par six laboratoires et contenant cinq gaz (CH_4 , Ar, O_2 , Ne et e- H_2) ; les cellules sont allées dans huit laboratoires. La réunion du 16 juin a permis d'échanger des renseignements sur les travaux effectués jusqu'à cette date et de prendre des décisions concernant la dernière partie de la comparaison. Les résultats déjà obtenus sont présentés dans le Document CCT/80-55, mais ils ne le sont pas encore d'une façon uniforme. On est d'accord pour terminer la comparaison si possible en automne 1981, et de toute façon avant la prochaine session du CCT. La comparaison sera complétée par l'envoi des cellules à l'ASMW, au NRLM et à l'IMPR, et on y ajoutera les points triples de Kr, N_2 et e- D_2 .

A l'origine, le but était de comparer les réalisations des points fixes de l'EIPT-68 dans divers laboratoires nationaux ; mais maintenant il est aussi possible d'étudier la reproductibilité des cellules à point triple utilisées. Le rapport final comportera des renseignements sur les cellules, leur conception, les méthodes d'utilisation et les valeurs des températures mesurées avec ces cellules. Un rapport complet, élaboré par tous les participants, sera publié soit par le BIPM, soit par l'Italian Standards Organization ; un rapport résumé paraîtra dans *Metrologia*. Les résultats seront aussi présentés au « 6.th Temperature Symposium », à Washington, en 1982.

Mr *Schooley*, à la requête de Mr *Furukawa* du NBS (Document CCT/80-33) demande que, si le programme est élargi, on inclue dans les comparaisons le point triple de ^{20}Ne . Le gaz coûte environ 50 dollars le litre (sous conditions normales de température et de pression). Mr *Rusby* appuie l'idée d'inclure le ^{20}Ne et tout autre gaz qui pourrait être utile comme point de référence primaire dans la nouvelle EIPT.

Le *Président* fait remarquer que le plan général de la future EIPT doit être prêt en 1982 ; cependant, des modifications telles que l'incorporation du point triple de ^{20}Ne à la place de celui du néon naturel pourraient être faites jusqu'à la fin de 1983. Si cela paraît souhaitable, la durée de la comparaison peut être prolongée. Mr *Pavese* pense qu'il ne devrait y avoir aucune difficulté à poursuivre le programme après 1982. Les suggestions concernant d'autres gaz doivent être faites à Mr *Pavese*.

Mr *Giacomo* considère que, dans des comparaisons internationales de ce genre, il vaut mieux en général entreprendre un nouveau programme qu'étendre celui qui existe.

Mr *Coates* demande si les résultats des comparaisons sont en accord avec ceux de la comparaison de thermomètres à résistance de platine faite par Ward et Compton. Mr *Pavese* estime difficile de répondre à cette question dès maintenant parce que tous les résultats n'ont pas encore été analysés complètement : la différence maximale entre les cellules d'argon est de 0,3 mK ; en revanche, pour l'oxygène, il y a des problèmes avec la pureté du gaz.

f) *Nouvelles équations de pression de vapeur de l'hélium*

Lors de sa 12^e session (1978), le CCT a décidé qu'il fallait préparer de nouvelles équations, en accord avec l'EPT-76, de la pression de vapeur de ^4He et de ^3He . La discussion est reportée au point 3d.

g) *Préparation d'une monographie donnant des renseignements complémentaires pour la réalisation de l'EIPT*

La discussion est reportée au point 3a.

h) *Distribution des thermomètres à résistance de platine pour la mesure des hautes températures, fabriqués au NBS*

Mr Schooley indique que Mr Evans (NBS) considère qu'on a maintenant bien compris les méthodes à suivre pour fabriquer des thermomètres à résistance de platine qui soient fiables pour la mesure des hautes températures (Documents CCT/80-31, CCT/80-32). Mr Evans propose que tous les laboratoires qui le peuvent envoient un technicien au NBS pour une période de trois ou quatre mois; ce technicien pourrait aider à fabriquer et à essayer quelques thermomètres qui deviendraient ensuite la propriété de son laboratoire. Cela permettrait de communiquer l'expérience technique du NBS aux autres laboratoires. Une comparaison des échelles entre 630 °C et 1 064 °C au moyen de thermomètres à résistance de platine, ainsi que l'a proposé le GT3 en 1978, pourrait ensuite avoir lieu.

Le *Président* souligne qu'il est important de disposer de thermomètres à résistance de platine pour la mesure des hautes températures, pour la définition d'une nouvelle EIPT. Il propose de poursuivre cette discussion au point 5 de l'ordre du jour, en prenant les remarques de Mr Schooley comme base de discussion.

i) *Éventualité d'une différence importante entre la température thermodynamique et T_{68} au point triple de l'oxygène*

Aucune information nouvelle n'a été publiée sur ce point.

3. Présentation des rapports des Groupes de travail

a) *Rapport du GT1 (Révision de l'EIPT)*

Le rapport du GT1 est l'avant-projet d'une monographie sur les renseignements complémentaires pour réaliser l'EIPT-68 et l'EPT-76. En tant que président du GT1, Mr *Preston-Thomas* rappelle l'historique du document. Lors de la 10^e session du CCT (1974), Mr *Kemp* a proposé que les renseignements complémentaires ne soient pas inclus dans le texte des futures échelles de façon à en faciliter la mise à jour. Lors de la 11^e session du CCT (1976), le GT1 a été chargé de préparer une monographie sur les renseignements complémentaires. L'obtention des informations nécessaires s'est avérée difficile et la question fut à nouveau soulevée lors de la 12^e session du CCT (1978, p. T 29). A cette réunion, le NML proposa de fournir les informations pour le domaine de 10 K à 100 K.

Le projet actuel contient des contributions de sources différentes; le document est encore incomplet et sous une forme très schématique. Le document final devrait comporter une centaine de pages dactylographiées. Le *Président* sollicite les commentaires sur ce premier projet, y compris sur les erreurs, les omissions et les parties qui doivent être à nouveau rédigées.

Il espère qu'un document publiable sera soumis au CCT à l'occasion de sa prochaine session. La monographie devra par la suite être remise à jour à intervalles réguliers, disons tous les cinq ans. On espère que la plupart des renseignements donnés dans la monographie seront valables non seulement avec l'actuelle EIPT-68 et avec l'EPT-76, mais aussi avec la nouvelle EIPT. Pour cette dernière, quelques modifications seront nécessaires, comme la suppression des renseignements concernant le thermocouple Pt 10 % Rh/Pt. Les renseignements ainsi supprimés seraient probablement à reporter dans une autre monographie concernant les mesures secondaires de température (*voir* point 3b).

Mr *Quinn* demande à qui est destinée la monographie. A son avis, les lecteurs ne se trouvent pas dans les grands laboratoires nationaux, mais dans les petits laboratoires et dans les laboratoires industriels qui n'ont pas les moyens (personnel, installations) ou même besoin de réaliser l'EIPT avec toute son exactitude. Le *Président* entend bien que le but de la monographie n'est pas de dire aux grands laboratoires comment faire des mesures de température; la monographie est destinée à quiconque utilise des instruments primaires pour les mesures de température, comme par exemple les laboratoires mentionnés par Mr *Quinn*.

Mr *Coates* pense qu'il manque dans la monographie une introduction générale présentant les échelles internationales, les réalisations secondaires de ces échelles et la teneur des renseignements complémentaires. Il propose en fait qu'une introduction de ce type soit ajoutée au texte de la nouvelle EIPT; cependant, en attendant la parution de la nouvelle échelle, Mr *Coates* suggère que l'introduction figure dans la monographie. Le *Président* demande qui rédigera cette introduction. Puisque la monographie sera distribuée indépendamment des autres documents sur l'EIPT, Mr *Schooley* pense que l'introduction devrait aborder les nombreux aspects des réalisations de l'échelle de température.

Mr *Coates* suggère aussi que les renseignements concernant la réalisation des points de référence secondaires figurent seulement dans la monographie qui traitera des mesures secondaires de température. Mr *Kemp* et Mr *Crovini* sont d'accord: si des points secondaires, par exemple le point de congélation du mercure, sont inclus dans la première monographie, il faut en donner la raison et indiquer leur utilité. Le *Président* répond que la monographie a été préparée en pensant à la fois à l'échelle actuelle et à l'échelle future. C'est pourquoi il a paru utile de rassembler, dans le projet actuel, des renseignements qui risquent d'être valables avec la future EIPT. Si on parle des thermomètres à résistance de platine par exemple, il paraît raisonnable d'introduire des renseignements concernant les thermomètres à résistance de platine pour la mesure des hautes températures. On peut (provisoirement) les supprimer si cela est nécessaire.

Mr *Schooley* est d'accord avec cette façon de voir; à son avis on ne doit

dT_{68}/dT au point de l'or. Mr *Quinn* fait remarquer que la discontinuité s'était révélée assez faible en 1971. Mr *Crovini* souligne qu'il est très important pour la nouvelle échelle que les thermomètres à résistance de platine pour la mesure des hautes températures, qui sont étalonnés jusqu'au point de l'or, soient comparés avec le pyromètre optique au-dessus du point de l'or, afin que l'on détermine l'ordre de grandeur de la discontinuité et, si nécessaire, que l'on modifie la valeur attribuée au point de l'or (dans les limites de son incertitude).

d) *Rapport du GT4 (Températures inférieures à 100 K)*

Le *Président* du CCT propose, une fois présentés les rapports du GT4 et du GT5, une discussion commune de ces rapports.

Mr *Durieux* résume le rapport du GT4. L'EPT-76 et le document sur son élaboration ont été publiés dans *Metrologia* (voir point 2a). La plupart des laboratoires nationaux ont maintenant accès à cette échelle, soit au moyen de leur propre réalisation, soit au moyen de thermomètres à résistance de rhodium-fer étalonnés. Les nouvelles équations de pression de vapeur pour ^4He et ^3He , en accord avec l'EPT-76, n'ont pas encore été publiées (voir point 2f); le Document CCT/80-65 donne l'état d'avancement des travaux pour obtenir ces équations. On espère être en mesure d'envoyer aux membres du CCT, vers la fin de 1980, un projet comportant les nouvelles équations.

Il avait aussi été prévu en 1978 que serait publié, conjointement par le NPL et le KOL, un document traitant de l'expérience sur la réalisation des points de référence supraconducteurs à partir des dispositifs SRM 767. Les premiers résultats figurent dans la thèse de A. E. El Samahy (Université de Leyde, 1979) mais les travaux expérimentaux sont incomplets. Un rapport commun du NPL, du NML et du KOL devrait être soumis à *Metrologia* à la fin de 1980. Les résultats obtenus jusqu'à maintenant indiquent que la dispersion entre les six dispositifs SRM 767 est inférieure à 1 mK pour les cinq métaux, conformément aux indications annoncées par le NBS. Au NBS, on a récemment amélioré les techniques de préparation des échantillons, ce qui a eu pour résultat de réduire la dispersion des températures de transition de cinq échantillons de plomb à 0,1 mK seulement (Document CCT/80-40).

Le GT4 donne aussi la liste des mesures de température thermodynamique au-dessous de 100 K qui sont actuellement en cours. On estime que, pour le moment, les températures thermodynamiques sont connues à ± 1 mK entre 0,5 K et 30 K et que, dans les deux ou trois prochaines années, l'exactitude sera de ± 3 mK jusqu'à 100 K. On considère cela comme une base satisfaisante pour la nouvelle EIPT dans ce domaine de température.

Pour effectuer les interpolations dans la nouvelle EIPT, le thermomètre à résistance de platine constituera le meilleur choix pour descendre jusqu'à 20 K. Entre 20 K et 13,81 K, le thermomètre à résistance de platine sera

commode mais le thermomètre à résistance de rhodium-fer est plus exact. Entre 5 K et 0,5 K environ, les échelles de pression de vapeur de l'hélium permettent une précision de $\pm 0,2$ mK.

Le GT4 appuie entièrement la recommandation du NBS (Document CCT/80-40) demandant que l'on travaille davantage pour obtenir une reproductibilité de $\pm 0,1$ mK dans la réalisation des points de transition des cinq métaux supraconducteurs avec le dispositif SRM 767.

Aucune solution claire n'existe encore pour la définition de la nouvelle EIPT entre 4 K et 14 K. Il paraît peu probable que le point de transition du niobium, actuellement reproductible à environ 3 mK près, puisse être amélioré à mieux que 1 mK. On pourrait utiliser à sa place, soit des thermomètres à résistance de rhodium-fer étalonnés au-dessous de 4,2 K, à 7,2 K et au-dessus de 13,8 K (pour sept thermomètres à résistance de rhodium-fer étalonnés de cette façon, la dispersion maximale entre 4,2 K et 13,8 K est de 0,7 mK : Document CCT/80-56), soit un instrument d'interpolation thermodynamique comme un thermomètre à gaz ou un thermomètre magnétique.

Enfin, le rapport suggère 0,5 K comme limite inférieure de la nouvelle EIPT.

Mr *Rusby* signale une omission dans le rapport ; il convient d'ajouter à la liste des déterminations de température thermodynamique en cours, les travaux faits au NPL avec le thermomètre à gaz à indice de réfraction, entre 4 K et probablement 90 K. Mr *Schooley* demande que soient ajoutées aussi les mesures faites au NBS par thermométrie à bruit (qui doivent s'étendre au-dessus de 1 K).

e) *Rapport du GT5 (Thermomètres pratiques aux températures inférieures à 30 K).*

Mr *Hudson* présente le rapport du GT5 (Document CCT/80-5) qui traite d'abord des thermomètres pratiques pour les mesures précises de température au-dessous de 30 K, ensuite des méthodes d'interpolation entre 0,5 K et 30 K, et enfin des méthodes d'interpolation au-dessous de 0,5 K. Diverses possibilités sont indiquées, mais aucune recommandation n'est faite ; on a en effet considéré que cela dépassait les prérogatives du GT5 (une recommandation pour le domaine inférieur à 0,5 K est donnée dans le document NBS CCT/80-36). La dernière partie du rapport traite du problème de la non-unicité d'une échelle. Une annexe décrit l'emploi du thermomètre à gaz comme instrument d'interpolation. Une description analogue du thermomètre magnétique (trop longue pour le rapport) peut être obtenue sur demande, auprès du NBS. Mr *Hudson* ajoute que les renseignements concernant les thermomètres à résistance de rhodium-fer, qui n'étaient pas disponibles au moment où le rapport a été rédigé, sont donnés dans le Document CCT/80-56.

En conclusion, Mr *Hudson* mentionne deux informations portées à

l'attention du GT5 après la rédaction du rapport : 1) suivant Mr Besley, un fabricant italien produit un thermomètre à résistance de platine-cobalt ; 2) lors de la dernière Conférence Internationale sur le Magnétisme, il a été mentionné que CePd_3 présente des avantages dans un thermomètre magnétique parce qu'il possède une conductivité thermique meilleure que les sels magnétiques usuels, et parce que le thermomètre est linéaire depuis le domaine du millikelvin jusqu'au domaine de l'hélium liquide.

f) *Discussion commune des rapports du GT4 et du GT5*

Le *Président* ouvre la discussion sur les deux rapports, et propose de parler d'abord de l'opportunité de publier les meilleures valeurs actuelles de $T - T_{68}$, en donnant une évaluation de l'exactitude.

Mr *Schooley* pense que la publication serait utile ; toutefois, Mr *Quinn* et Mr *Durieux* estiment qu'il n'y a pas suffisamment de nouveaux renseignements depuis la dernière publication. En revanche, Mr *Thomas* considère que les résultats fournis par Mr *Coates* (Document CCT/80-27) constituent une addition importante aux valeurs de $T - T_{68}$. Mr *Quinn* est d'accord et suggère qu'ils pourraient être introduits dans le rapport du GT3. A une question de Mr *Bedford*, Mr *Coates* répond que les résultats sont préliminaires mais que le programme du NPL ne permet pas d'autres mesures. Mr *Schooley* et Mr *Hudson* soulignent que, si une publication sur les mesures de température thermodynamique doit paraître, il faut y inclure le domaine au-dessous de 0,5 K, ce qui n'a pas été fait dans le rapport du GT4. Ils mentionnent en particulier les travaux faits au NBS par Mr *Soulen* avec un thermomètre à bruit et par Mr *Marshak* avec un thermomètre à orientation nucléaire. Mr *Bonnier* souligne l'importance des températures thermodynamiques des points de référence au-dessous de 0,5 K pour ceux qui travaillent avec des réfrigérateurs à dilution.

Tout le monde est d'accord pour penser que, comme pour les propositions précédentes concernant les publications, la forme sous laquelle ces renseignements seront publiés doit être discutée au point 7.

Vient ensuite une brève discussion sur les autres questions soulevées par les rapports du GT4 et du GT5. Mr *Hudson* fait remarquer que la phrase « Les mesures de température au-dessous de 0,5 K en utilisant le nitrate de cérium et de magnésium, le magnétisme nucléaire, la thermométrie à bruit, l'orientation nucléaire, ou la thermométrie à résistance, ne nécessitent pas de recommandations spécifiques à inclure dans le texte de l'EIPT-87 » n'est pas claire ; elle vise sans discrimination des types très différents de thermomètres. Mr *Durieux* répond que la phrase est effectivement confuse : on pourrait dire que, pour les quatre premiers types de thermomètres, qui sont semi-thermodynamiques ou thermodynamiques, des recommandations spécifiques ne sont pas valables ; pour les thermomètres à résistance, on pourrait recommander une méthode simple d'étalement, mais cette méthode n'est pas encore fixée.

Mr *Kemp* signale une incohérence entre deux documents du NBS : l'un (Document CCT/80-36) dit qu'il n'y a pas besoin d'une échelle pratique au-dessous de 1 K ; l'autre (Document CCT/80-41) recommande des méthodes pour définir une échelle pratique au-dessous de 0,5 K. Mr *Hudson* fait observer que rien n'oblige plusieurs auteurs à adopter le même point de vue, même s'ils appartiennent au même laboratoire !

**4. État d'avancement des travaux
en relation avec la Recommandation T 1 (1978) au CIPM
(Mise au point de thermomètres à résistance de platine
pour la mesure des hautes températures)**

Le *Président* fait remarquer que ce point est essentiel pour la future EIPT ; si on ne parvient pas à réaliser des thermomètres à résistance de platine satisfaisants pour la mesure des hautes températures, il ne sera pas possible d'éliminer le thermocouple. Par conséquent, le CCT doit être complètement informé de la situation actuelle quant à la possibilité d'utiliser le thermomètre à résistance de platine pour la mesure des hautes températures. On dispose maintenant de thermomètres à résistance de platine construits par des fabricants japonais, et de nets progrès ont été faits au NBS par Mr *Evans* et ses collaborateurs. Le *Président* sollicite des commentaires afin que le CCT puisse prendre une décision sur le rôle du thermomètre à résistance de platine dans la nouvelle EIPT au-dessous du point de l'or.

Se référant au Document CCT/80-31 de Mr *Evans*, Mr *Schooley* résume les travaux. Mr *Evans* a étudié la stabilité aux températures élevées, les effets dus aux cycles thermiques, les caractéristiques d'immersion, les modifications dans les techniques des points fixes et dans les mesures électriques, les différentes configurations de thermomètres. Tous les thermomètres comportent un élément sensible en fil de platine, à quatre conducteurs, avec une enveloppe en quartz fondu et des supports. Pour obtenir la meilleure configuration libre de toute contrainte, Mr *Evans* a essayé différents montages du fil (à enroulements serré, spiralé bifilaire, bispiralé) et diverses modifications dans la façon de supporter les conducteurs. La construction actuelle, principalement mise au point pour être utilisée avec le thermomètre à gaz du NBS, consiste pour l'essentiel en un enroulement bispiralé bifilaire autour d'un croisillon en quartz fondu, et quatre conducteurs individuellement placés dans des capillaires en quartz fondu allant de la zone à température ambiante à l'élément sensible. Les capillaires sont à leur tour entourés en cinq points par un cinquième conducteur en platine qui est relié électriquement et qui sert de blindage. Mr *Cutkowski* a amélioré un pont de mesure de résistance à onde carrée qui peut fonctionner, soit à 15, soit à 30 Hz, et comporte une borne pour la mise à la terre. L'effet de fuite résistive, peut-être 1 000 fois la résistance de l'élément sensible, peut être complètement éliminé par le blindage. La

modification apparente de température résultant du raccordement du blindage est d'environ 15 mK au point de congélation de l'argent. Les fuites électriques forment évidemment un phénomène qui augmente beaucoup au fur et à mesure que la température s'élève. Des thermomètres de ce type sont construits pour être utilisés avec le thermomètre à gaz du NBS. Des essais sont en cours pour déterminer si, à côté des avantages de cette nouvelle conception, il existe des défauts. Les travaux sont faits essentiellement par Mr Evans lui-même, avec l'aide occasionnelle de Mr Guildner; aussi ne sont-ils pas rapides !

Le NBS pense que le programme pourrait être allégé matériellement par la collaboration d'autres laboratoires membres du CCT, comme on le propose dans le Document CCT/80-32 : ces laboratoires enverraient un technicien au NBS pendant trois ou quatre mois pour prendre part à la construction et aux essais de thermomètres, en se servant de composants fournis par le NBS; les thermomètres ainsi produits deviendraient la propriété des laboratoires participants. Mr Schooley sollicite des commentaires sur ce programme et demande qui y prendrait part.

Mr Bedford, Mr Kemp et Mr Bloembergen disent que leur laboratoire est en principe intéressé. Mr Crovini précise que l'IMGC a déjà travaillé de cette façon.

Mr Gott demande quelle est la durée minimale nécessaire à la participation d'une personne au programme du NBS. Mr Schooley estime que six semaines sont un minimum, mais que trois à quatre mois sont préférables.

Le Président demande si quelqu'un a une expérience des thermomètres japonais à résistance de platine pour la mesure des hautes températures, fabriqués par Chino Co. Au NML, Mr Kemp a constaté que ces thermomètres n'étaient pas très satisfaisants : ils ont tendance à se mettre en court-circuit aux températures élevées. Mr Thomas signale que la PTB (Berlin) a acheté des thermomètres japonais étalonnés, mais depuis quelques semaines seulement. Mr Bedford indique que Mr Berry (NRC) a reçu trois thermomètres de fabrication spéciale et qu'il commence seulement à procéder à des essais. Mr Ling mentionne alors le Document CCT/80-59, qui donne une description des thermomètres à résistance de platine pour la mesure des hautes températures fabriqués dans son laboratoire.

Mr Quinn demande si les thermomètres chinois sont stables lorsqu'ils sont soumis à des cycles thermiques jusqu'à des températures élevées. Mr Ling répond que, pour cent heures à haute température, la variation de R_0 est inférieure à l'équivalent de 10 mK. Mr Quinn souligne qu'il faut distinguer entre les effets dus au fait que les thermomètres sont maintenus à température élevée pendant une longue durée et les effets plus importants dus aux cycles thermiques entre une température élevée et la température ambiante. Ceux-ci sont indépendants de la durée passée à température élevée mais ils sont absolument cruciaux parce qu'ils incluent

les effets de déformation mécanique pendant le chauffage et pendant le refroidissement. Mr *Quinn* se dit assez déçu que, à en juger d'après le Document CCT/80-31, le NBS n'ait pas encore résolu ce problème.

Mr *Ling* demande si le NBS a aussi utilisé des supports en saphir. Mr *Schooley* répond que non.

Mr *Coates* demande si on peut utiliser les thermomètres en position horizontale. Mr *Kemp* précise que les remarques qu'il a faites sur les limites des thermomètres japonais sont valables pour leur utilisation dans les deux positions; Mr *Schooley* indique que les thermomètres du NBS sont toujours utilisés verticalement et que Mr *Evans* a des doutes sur la stabilité mécanique du quartz fondu à la température la plus élevée admissible lorsque les thermomètres sont utilisés horizontalement. Mr *Coates* suggère que toute limitation de ce genre soit mentionnée de façon explicite. Mr *Schooley* ajoute que l'on considère comme critique la méthode de nettoyage de toutes les parties du thermomètre. Il peut être avantageux, aussi, d'utiliser comme température de référence, non pas le point 0 °C, mais une température plus élevée (comme le point de congélation du zinc, par exemple) afin d'éviter d'importants effets dus aux cycles thermiques. Mr *Bedford*, se référant au Document CCT/80-31, demande si l'on a mesuré les caractéristiques d'immersion au point de congélation de l'argent ou à celui de l'or. Mr *Schooley* ne le sait pas.

Mr *Coates*, revenant sur une remarque antérieure du Président disant que l'on ne pourrait pas remplacer le thermocouple dans l'EIPT si l'on ne disposait pas d'un thermomètre à résistance de platine convenable, souligne qu'une autre solution consisterait à utiliser le pyromètre optique jusqu'à une température plus basse. Le Président fait remarquer que cette possibilité a été avancée et rejetée lors des sessions précédentes du CCT. Mr *Bedford* rappelle qu'il existait effectivement des objections très fortes (qui ne venaient pas de lui) au sein du CCT, il y a quatre ans, contre l'extension du domaine du pyromètre optique vers des températures plus basses. Mr *Coates* rappelle aussi que, lors de la session de 1978 du CCT, on avait suggéré d'étudier les propriétés du thermomètre à résistance de platine et du pyromètre optique au-dessous du point de congélation de l'or, pour déterminer les domaines dans lesquels ils sont capables de réaliser une échelle avec une incertitude inférieure à 0,04 K. Cette autre solution, parfaitement raisonnable, pourrait être mise en œuvre presque immédiatement, puisque le thermomètre à résistance de platine fonctionne bien jusqu'au point de congélation de l'argent et l'extension du domaine du pyromètre optique ne pose aucun problème.

Mr *Quinn* rappelle que cette même discussion a déjà eu lieu en 1976 et en 1978 et que, chaque fois, elle s'est terminée quand plusieurs membres ont dit que les problèmes du thermomètre à résistance de platine étaient pratiquement résolus et que l'on disposerait bientôt de thermomètres.

Tout cela était dit en toute bonne foi, mais il s'avère que le thermomètre à résistance de platine est un instrument très difficile à fabriquer. Mr Quinn pense que le CCT risque de redire exactement la même chose, réduisant ainsi la possibilité d'envisager d'autres solutions. A défaut, il peut s'avérer impossible d'avoir une EIPT-87, en dépit de l'énorme quantité de travail qui a été effectuée sur le thermomètre à résistance de platine pour la mesure des hautes températures. Mr Quinn regrette de devoir insister, mais il lui semble que la conception des thermomètres du NBS n'est pas acquise dans la mesure où l'on n'a aucune preuve que ces thermomètres sont stables lorsqu'ils sont soumis à des cycles thermiques. Mr Kemp demande de quelle stabilité il s'agit, 1 mK ou 10 mK. Il fait remarquer que le Document CCT/80-59 et le Document CCT/80-61, qui proviennent de la Chine et de la Tchécoslovaquie, parlent d'environ 10 mK pour leurs thermomètres. Mr Hudson rappelle que le CCT avait demandé 40 mK à sa précédente session ; la stabilité obtenue par Mr Evans se trouve située bien en deçà de cette limite.

Mr Coates demande si le NBS garantit effectivement le fonctionnement des thermomètres qui doivent être fabriqués ou si on est invité à prendre part à un programme de mise au point. Mr Schooley a l'impression que la conception du thermomètre est maintenant satisfaisante. Les capillaires en quartz fondu assurent une dilatation thermique à l'intérieur du thermomètre, identique à celle de la tige, et les variations de longueur des conducteurs en platine sont absorbées par un ressort de tension en haut de la tige. Mr Evans espère préparer un document sur le fonctionnement de ces thermomètres au cours de 1981. La méthode à utiliser pour les cycles thermiques est à l'étude.

Le Président répond à Mr Coates qu'il s'agit d'un programme de recherche. Il faut mettre au point un bon instrument que l'on doit ensuite confier à un fabricant ; on ne peut définir une nouvelle EIPT à partir de thermomètres construits par des stagiaires au NBS. Mr Hudson souligne que l'on doit intéresser un fabricant, de préférence un petit fabricant, à la construction de ces thermomètres. Mr Schooley demande si un fabricant chinois construira des thermomètres ; Mr Ling répond qu'il se peut que son laboratoire le fasse. Mr Schooley souligne l'importance d'un échange de thermomètres entre le NBS et le NIM. Mr Ling se déclare d'accord, estimant qu'il faut montrer si les thermomètres sont bons ou mauvais.

Mr Quinn estime que le commentaire de Mr Hudson sur les qualités de fonctionnement des thermomètres, laissait entendre que Mr Evans était déjà parvenu à un stade où les instabilités au cours des cycles thermiques (Document CCT/80-31) étaient de l'ordre du millikelvin. Cela peut-il être confirmé ? Mr Hudson répond que Mr Evans avait déjà atteint, il y a dix ans, la reproductibilité de 40 mK spécifiée par le CCT. Le niveau de ± 10 mK à ± 20 mK auquel Mr Evans est maintenant parvenu n'est cependant pas suffisamment bon pour les thermomètres dont Mr Guildner

a besoin. Mr Hudson souligne que la discussion semble toujours porter sur 5 mK ou 10 mK, alors que l'on n'a besoin que de 40 mK.

On discute ensuite de la raison de changer la conception des thermomètres du NBS, et de la situation actuelle concernant leur stabilité lorsqu'ils sont soumis à des cycles thermiques. Après avoir consulté Mr Evans par téléphone, Mr Schooley apporte les informations suivantes :

En ce qui concerne les effets dus aux cycles thermiques, Mr Evans ne possède de résultats suffisants que pour le point de congélation de l'aluminium, pour lequel la dérive lorsque l'on passe de ce point à 0 °C est inférieure à 0,1 mK par cycle pour les meilleurs thermomètres. Si l'on fait une moyenne sur tous les thermomètres, la dérive est peut-être de 0,2 mK par cycle, ce qui est assez comparable à ce que l'on obtient avec la plupart des thermomètres à résistance de platine étalons. Dans le cas de l'argent, Mr Evans n'a que peu de données; le résultat le meilleur est inférieur à 0,1 mK après un cycle; le pire est 2 mK pour un thermomètre dont il pense qu'il n'est pas encore stabilisé, c'est-à-dire qu'il est sujet à la dérive à court terme qui caractérise les nouveaux thermomètres.

Tous les thermomètres sont soumis à un long processus de vieillissement à 1 100 °C. Mr Evans ne peut dire ce que pourrait être la dérive au point triple de l'eau après un cycle court à 1 100 °C, mais il a l'impression que de petits effets de ce genre seraient noyés dans la dérive à long terme qui survient au cours du chauffage prolongé à 1 100 °C. Mr Evans n'a pas donné dans le Document CCT/80-31 d'indications sur les cycles thermiques, parce que les effets en paraissent faibles et peu différents de ceux des thermomètres à résistance de platine étalons aux températures ordinaires. Les caractéristiques d'immersion des thermomètres données dans le Document CCT/80-31 ont été mesurées aux points de congélation de l'étain, du zinc et de l'aluminium.

A une question de Mr *Crovini* demandant si les modifications dues aux cycles thermiques sont exprimées en changements apparents de température au point triple de l'eau ou au point de congélation du métal, Mr Schooley répond qu'il s'agit du point triple de l'eau.

Mr *Quinn* remarque que, si l'on tient compte de ces informations, les thermomètres semblent tout à fait convenables. Mr *Kemp*, au contraire, a encore des doutes quant à la situation au point de congélation de l'or. A l'évidence, les thermomètres sont corrects jusqu'au point de congélation de l'argent. Faut-il donc envisager d'effectuer la jonction au point de congélation de l'argent ? Pressé par le *Président* de donner son avis sur cette question, Mr Schooley dit que les thermomètres de Mr Evans sont soumis à une longue exposition à 1 100 °C et qu'on admet qu'ils peuvent supporter ensuite toute température inférieure à 1 100 °C.

Le *Président* récapitule les stades des échéances qui ont été fixées en 1978 : en 1980, on doit se mettre d'accord sur les principes généraux de la nouvelle échelle, par exemple la température de jonction entre le thermomètre à résistance de platine et le pyromètre optique; en 1982, le plan

détaillé de l'échelle doit être prêt à discuter ; en 1984, un projet de texte doit être prêt à discuter ; tout cela, pour qu'en 1986 un projet final de l'échelle puisse être adopté par le CCT et soumis au CIPM. Ces échéances n'ont été fixées qu'à titre indicatif mais si, pour le moment, le CCT choisit de les respecter, il faut décider des principes généraux à la présente session. Le *Président* sollicite alors les commentaires sur le point précis de savoir si on peut effectivement envisager l'élimination du thermocouple et, si c'est le cas, quelle sera la température de jonction entre le domaine du thermomètre à résistance de platine et celui du pyromètre optique.

L'accord est général pour que, dans la nouvelle EIPT, le thermomètre à résistance de platine remplace le thermocouple Pt 10 % Rh/Pt jusqu'à une température limite supérieure qui reste à déterminer et qui sera aussi la température limite inférieure pour le pyromètre optique.

Le *Président* pose à nouveau la question de savoir si cette température de jonction doit être le point de congélation de l'or. Si, au contraire, le point de congélation de l'argent est choisi comme limite supérieure de l'utilisation du thermomètre à résistance de platine, on risque d'avoir besoin d'un autre point de référence entre les points de congélation de l'argent et de l'antimoine (ou de l'aluminium).

Mr *Coates* estime que le nombre de points de référence nécessaires n'est pas lié à l'utilisation du point de congélation de l'or.

Mr *Bedford* fait remarquer que l'abaissement de la limite inférieure du domaine du pyromètre optique du point de congélation de l'or à celui de l'argent diminuerait *ipso facto* l'exactitude de cette portion de l'EIPT ainsi définie. Bien que cela soit vrai, Mr *Quinn* estime néanmoins que l'exactitude, avec laquelle il est possible de réaliser la partie haute de l'échelle au moyen du pyromètre optique, est déjà suffisamment élevée pour qu'une dégradation de ce genre soit tolérable.

Mr *Schooley* mentionne alors un article de Guildner, Kostkowski et Evans (1979), dans lequel on traite des exactitudes du thermomètre à résistance de platine et du pyromètre optique ; Mr *Coates* considère que cet article a l'inconvénient de beaucoup trop sous-estimer l'exactitude du pyromètre optique.

Mr *Hudson* dit que l'exactitude du pyromètre optique entre les points de congélation de l'argent et de l'or, dont a parlé Mr *Quinn*, est atteinte dans un petit nombre seulement des grands laboratoires nationaux du monde, mais il n'existe aucun instrument assurant une exactitude comparable dans le commerce. Mr *Quinn* estime que tout pyromètre, photoélectrique ou autre, qu'il soit de la plus haute précision ou de moindre qualité, employé actuellement à partir du point de congélation de l'or, peut être utilisé à partir du point de congélation de l'argent : la perte d'exactitude qui en résulte n'est pas significative. Mr *Hudson* répond qu'on ne l'a pas compris. Dans ce domaine, ce sont les thermocouples que l'on utilise parce

que les pyromètres de fabrication industrielle ne sont pas suffisamment exacts ; il n'y a que les laboratoires nationaux qui utilisent des pyromètres exacts.

Mr *Thomas* fait remarquer que le point de congélation de l'argent risque d'être plus difficile à réaliser avec une grande exactitude que le point de congélation de l'or, à cause des gaz occlus. Toutefois, Mr *Bedford* et Mr *Coates* ont tous les deux constaté que le point de congélation de l'argent, ainsi d'ailleurs que le point de congélation du cuivre, étaient parfaitement satisfaisants.

Puisque l'échelle au-dessus du point de congélation de l'or est souvent réalisée en pratique au moyen de lampes à filament de tungstène, Mr *Hudson* demande si le fait d'utiliser ces lampes jusqu'à 900 °C constituera un problème. Mr *Quinn* répond que la différence n'est pas significative et fait référence à une publication récente faite par Mr Jones (NML).

Mr *Kemp* fait remarquer que le thermomètre à résistance de platine pour la mesure des hautes températures serait peut-être un bon instrument pour les laboratoires d'étalonnage, mais qu'il est peu probable qu'il soit largement utilisé dans l'industrie. Mr *Schooley* pense que le nombre de laboratoires qui utiliseront le thermomètre à résistance de platine risque d'être comparable au nombre de ceux qui actuellement utilisent le pyromètre optique.

Le *Président* souligne que si le CCT ne peut prendre de décision sur une température de jonction, il sera nécessaire de préparer deux projets d'échelle pour la prochaine session, l'un avec le point de congélation de l'argent et l'autre avec le point de congélation de l'or comme température de jonction.

Mr *Moser* fait remarquer que, si l'on doit utiliser le thermomètre à résistance de platine au-dessus de 1 000 °C, il se peut que l'étalonnage au point de congélation du cuivre soit plus commode à réaliser qu'au point de congélation de l'or. Il demande si passer de 1 064 °C à 1 085 °C soulèvera une difficulté supplémentaire. De l'avis du *Président*, à en juger par les informations dont dispose actuellement le CCT, cette extension du domaine de température n'introduira pas de difficultés insurmontables.

Mr *Bloembergen* fait observer que le pyromètre a le léger avantage d'être davantage un instrument thermodynamique que le thermomètre à résistance de platine.

Mr *Quinn* mentionne qu'au-dessus de 900 °C, l'effet sur la relation résistance-température de la variation exponentielle avec la température de la concentration en équilibre des défauts lacunaires dans la platine devient important, en particulier au voisinage du point de congélation du cuivre. Mr *Schooley* considère que ce qu'avance Mr *Quinn* reste à démontrer ; il pense que l'idée de préparer deux projets d'échelle, comme l'a

pas refuser de communiquer des renseignements sur les grands progrès qui ont été faits en thermométrie au cours des quinze dernières années.

Mr *Kemp* se demande s'il convient d'inclure les méthodes d'interpolation pour les thermomètres à résistance de platine, en particulier pour le domaine inférieur à 0 °C. Le *Président* pense que les méthodes simplifiées d'interpolation doivent figurer dans la monographie concernant les mesures secondaires de température ; toutefois, il pourrait bien s'avérer très utile de les introduire aussi dans cette monographie.

Mr *Crovini* dit que dans l'ensemble l'IMGC est d'accord avec le contenu de ce document, mais que dans certains cas, par exemple dans la description des fours, les renseignements qui sont donnés décrivent la pratique d'un laboratoire particulier. Il suggère soit de limiter le nombre des détails, soit de donner d'autres solutions. Le *Président* répond que ce genre de difficulté vient de ce qu'une seule personne a rédigé cette partie de la monographie. Il pense aussi qu'il vaudrait la peine d'introduire des solutions de rechange et demande à ceux qui constatent des omissions ou des limitations de lui envoyer les corrections appropriées.

Mr *Coates* suggère que les incertitudes dans la réalisation de l'EIPT soient discutées dans la monographie ainsi que dans le document sur les mesures secondaires de température. Le *Président* est d'accord.

Mr *Bedford* demande qui va rassembler tous ces renseignements d'ici à deux ans. Le *Président* réitère sa demande : que tous les gens qui sont compétents sur des sujets précis communiquent les renseignements en leur possession. Par exemple, une présentation des thermomètres à résistance de platine pour la mesure des hautes températures, et éventuellement des fours, pourrait venir de Mr *Evans* (NBS).

Le *Président* résume la discussion qui précède en disant que des omissions ont été mentionnées et que des renseignements figurant actuellement dans la monographie doivent être supprimés. Le *Président* espère recevoir des contributions précises sous forme écrite de tous ceux qui sont concernés. Il suggère que des versions du projet mises à jour soient diffusées aux membres du CCT à intervalles d'environ six mois. Il espère que ces dispositions permettront de parvenir à un document publiable, définitivement approuvé à la 14^e session du CCT ; ce document pourrait donc être imprimé vers le milieu de l'été 1982.

b) Rapport du GT2 (*Points fixes secondaires et échelles secondaires*)

Le *Président* du GT2, Mr *Bedford*, résume le rapport (Document CCT/80-12). Lors de la 12^e session du CCT (1978), le GT2 a été chargé de deux tâches principales : 1^o) poursuivre la compilation des points de référence secondaires, 2^o) présenter des propositions concrètes concernant

les réalisations secondaires éventuelles de l'EIPT, avec les thermocouples platine-rhodium comme instruments d'interpolation.

En ce qui concerne les points de référence secondaires, le rapport donne la liste d'environ trente points en plus de ceux qui ont été publiés par le GT2 dans *Metrologia*, 13, 1977, p.197. Les valeurs données correspondent, soit à de nouvelles déterminations, soit à des résultats qui sont passés inaperçus à l'époque de la précédente publication. Les incertitudes probables sont réparties en quatre catégories selon la quantité d'informations fournies par les auteurs; Mr *Bedford* souligne que, dans tous les travaux de ce genre, les estimations de l'incertitude constituent un problème et que l'on doit toujours indiquer avec soin comment sont estimées les incertitudes. Il invite tout le monde à exprimer son avis sur cette question et à communiquer les résultats de nouvelles mesures au GT2.

En ce qui concerne les éventuelles réalisations secondaires de l'EIPT, le GT2 a analysé des résultats provenant du NRC, pour des thermocouples Pt 10 % Rh/Pt et Pt 13 % Rh/Pt. Lorsqu'ils sont étalonnés comme il est indiqué dans le rapport, l'un ou l'autre de ces thermocouples reproduit l'EIPT-68 à $\pm 0,2$ K près entre 0 et 1 100 °C. Il semble que Pt 13 % Rh/Pt soit un peu plus stable, mais Pt 10 % Rh/Pt est d'utilisation beaucoup plus courante.

Pour les températures jusqu'à 1 800 °C, le GT2 a examiné des résultats provenant du NRC, pour quelques thermocouples à deux alliages de platine et de rhodium (Pt 20 % Rh/Pt 5 % Rh, Pt 40 % Rh/Pt 20 % Rh et Pt 40 % Rh/Pt 10 % Rh). Tous ces thermocouples peuvent constituer une base satisfaisante pour une réalisation secondaire de l'EIPT-68 entre 1 100 °C et 1 800 °C avec une exactitude de $\pm 0,5$ K. Le GT2 estime, toutefois, que le meilleur choix ne correspond à aucun de ces thermocouples, mais plutôt au Pt 30 % Rh/Pt 6 % Rh parce qu'il est déjà accepté sur le plan international par des organisations comme la Commission Électrotechnique Internationale (CEI). Malheureusement, le GT2 n'avait pas pour ce thermocouple des résultats similaires; des résultats complémentaires fournis par l'ASMW indiquent que son fonctionnement est comparable à celui des thermocouples 20/5 et 40/10.

La Communauté Économique Européenne entreprend de nouvelles recherches sur la reproductibilité des thermocouples à deux alliages de platine et de rhodium et sur la méthode du fil pour leur étalonnage. On espère que les résultats seront disponibles avant un an. On pense avoir les résultats de recherches analogues faites à l'ASMW avant un ou deux ans.

Le GT2 a aussi résumé trois réalisations secondaires, déjà publiées, de l'EIPT-68 au-dessous de 0 °C, en essayant de dégager les avantages de chacune d'elles.

Enfin, le rapport fournit les reproductibilités des thermomètres à résistance de platine industriels, autres que ceux de la plus haute qualité. L'étude de ces thermomètres à l'IMGC se poursuit normalement: on espère en avoir les résultats prochainement.

Le *Président* remercie Mr Bedford pour ses propos et dit que le rapport revêt une importance particulière ; en effet, s'il doit y avoir une monographie concernant les mesures secondaires de température, il est évident qu'une grande partie des renseignements proviendra des travaux effectués par le GT2. Le *Président* demande s'il y a d'autres commentaires.

Pour Mr *Quinn*, il est important qu'il y ait des réalisations secondaires de l'EIPT qui soient clairement rattachées aux tables de thermocouples existantes et déjà acceptées sur le plan international (Document CEI 584 ou *NBS Monograph 125* ; voir rapport du GT2, Réf. 34). Mr *Coates* dit que le rapport donne beaucoup de renseignements précis, mais il aimerait une description plus explicite des méthodes qui entrent en jeu, en particulier en ce qui concerne la façon dont sont étalonnés les thermocouples et sur ce que sont les incertitudes qui y sont liées. Mr *Kemp* approuve ce point de vue ; il attire aussi l'attention sur les travaux effectués au NML sur les thermomètres à résistance de platine industriels dans le domaine de 20 K à 800 °C ; il semble que le comportement de certains de ces thermomètres soit proche de celui du thermomètre à résistance de platine étalon. Mr *Coates* rétorque que la plupart des thermomètres à résistance de platine industriels ne sont pas aussi bons ; il serait dangereux que le CCT préconise une réalisation secondaire de l'EIPT reposant sur ces thermomètres.

En ce qui concerne les tables de référence des thermocouples, Mr *Coates* demande quels sont les pays qui ont publié les tables contenues dans le Document 584 de la CEI ou dans la monographie 125 du NBS ou qui ont une norme nationale qui s'y rapporte. Il s'avère que la plupart des pays les incorporent dans leurs normes nationales ou le feront dans le proche avenir.

Le *Président* ajoute que le CCT n'a pas l'intention de recommander une réalisation secondaire de l'EIPT dès maintenant ; cependant, des suggestions en vue de recommandations de ce genre seront très précieuses pour les travaux ultérieurs du GT2. Mr *Coates* et le *Président* font remarquer qu'il faudrait peut-être décider lequel des deux thermocouples PtRh/Pt et quel thermocouple à deux alliages de platine et de rhodium doivent être recommandés pour de telles réalisations secondaires. Mr *Coates* pense que le thermocouple 30/6 est le meilleur pour les températures élevées parce que c'est le seul de ceux dont il est question dans le rapport du GT2 pour lequel il existe des tables de référence internationales ; de plus il est disponible commercialement dans de nombreux pays. En ce qui concerne le choix entre Pt 10 % Rh/Pt et Pt 13 % Rh/Pt, Mr *Coates* fait remarquer que les fabricants sont capables de construire un thermocouple à 13 % dont les mesures coïncident plus étroitement avec la table internationale (presque avec un facteur trois) que ne le font celles du thermocouple à 10 %. Le thermocouple à 13 % est aussi plus sensible et plus stable que celui à 10 %. Il faut admettre toutefois que le thermocouple à 10 % est plus largement utilisé.

Mr *Quinn* appuie les remarques de Mr *Coates* concernant la meilleure stabilité du thermocouple à 13 %. Il ajoute que le thermocouple à 13 % est plus facile à fabriquer avec une tolérance donnée sur la force électromotrice parce que la variation de cette dernière en fonction de la quantité de rhodium est plus faible au voisinage de 13 % qu'au voisinage de 10 %. Mr *Quinn* recommande que toute réalisation secondaire de l'EIPT reposant sur des thermocouples en métaux nobles utilise 13 %.

Mr *Crovini* souligne qu'il y a des pays qui n'utilisent pas le thermocouple à 13 %. Le *Président* fait remarquer qu'il n'y a aucune raison valable pour en rester au thermocouple à 10 % qui, de toute façon, va disparaître de la définition de l'EIPT. Mr *Coates* a l'impression que, même si le thermocouple à 10 % est plus largement utilisé dans l'industrie, il n'y aurait aucun inconvénient à utiliser le thermocouple à 13 % comme étalon de réalisation secondaire. Mr *Kemp* dit qu'en Australie les milieux industriels sont de plus en plus favorables à l'utilisation des thermocouples à deux alliages pour le domaine de 800 °C à 1 200 °C.

Le *Président* demande si le CCT doit recommander un thermocouple à un seul alliage pour le domaine des basses températures et un thermocouple à deux alliages pour le domaine des températures élevées, ou s'il doit recommander le thermocouple à deux alliages pour la totalité du domaine de température ; et si, dans chaque cas, il doit recommander un seul type de thermocouple.

Pour Mr *Bedford*, le GT2 pensait que deux recommandations devraient être faites, une pour un thermocouple à deux alliages pour les températures élevées et une pour un thermocouple à un seul alliage pour le domaine compris entre 0 °C et le point de l'or. Il insiste sur le fait qu'il y a des pays où l'on n'utilise pas de thermocouples à 13 % et où il n'y en a pas ; Le *Président* et Mr *Hudson* répondent que le fait que le thermocouple à 13 % soit recommandé par le CCT pourrait contribuer à ce qu'il soit plus facilement disponible.

Mr *Bedford* n'est pas encore certain que la preuve soit faite que le thermocouple à 13 % soit beaucoup plus stable que le thermocouple à 10 %. Mr *Quinn* fait remarquer que ses mesures et celles de Mr *Bedford*, en 1972, ont montré que la dispersion autour de la courbe moyenne de la force électromotrice en fonction de la température était moitié moindre pour le thermocouple à 13 % que pour le thermocouple à 10 %. Mr *Bedford* considère cela comme une différence assez secondaire qui ne concerne pas directement la stabilité. Mr *Coates* fait remarquer que les fabricants en Grande-Bretagne ont des difficultés à faire des thermocouples à 10 %, au contraire de ceux à 13 %, avec une tolérance de 1 K au point de l'or. Aucune réponse ne peut être donnée à une question de Mr *Bedford* demandant si les fabricants américains sont dans le même cas.

Mr *Quinn* reprend son argument en faveur des thermocouples à 13 %.

« Si l'on pouvait repartir à zéro », il préférerait même le thermocouple Pt 20 % Rh/Pt. Mr *Bedford* dit qu'il ne défend pas le thermocouple à 10 %, mais souhaite simplement connaître les mérites respectifs des deux thermocouples pour fixer son choix.

Le *Président* propose que le CCT recommande temporairement le thermocouple à un seul alliage à 13 % et le thermocouple à deux alliages 30/6 pour les réalisations secondaires de l'EIPT. Mr *Bedford* fait remarquer qu'une décision doit aussi être prise sur la question de la température de jonction entre les deux et expose brièvement trois possibilités pour la limite supérieure du thermocouple à 13 % : le point de congélation de l'or présente l'avantage évident d'être un point d'étalonnage, mais le thermocouple à 13 % peut probablement être utilisé à des températures plus élevées ; le point de congélation du palladium à 1 554 °C est probablement trop élevé pour que le thermocouple à 13 % soit suffisamment stable ; une température intermédiaire, 1 200 °C par exemple, pourrait avoir l'inconvénient d'une extrapolation dans l'étalonnage. Mr *Bedford* est d'accord avec une remarque faite auparavant par Mr *Kemp* selon laquelle le thermocouple à deux alliages peut être utilisé aussi au-dessous du point de l'or.

Mr *Schooley* demande si le Document CEI 584 (*NBS Monograph 125*) donne des recommandations pour les domaines de température valables pour ces thermocouples, et suggère que, si c'est le cas, on accepte simplement les recommandations qui existent. Mr *Coates* précise que, dans ces documents, les domaines des tables ne sont pas donnés comme des domaines prévus pour une utilisation pratique des thermocouples. Il remarque aussi, et c'est une question de principe, qu'on peut considérer l'utilisation de chaque thermocouple comme une réalisation secondaire distincte de l'EIPT et que, par conséquent, il n'est pas nécessaire de spécifier une température de jonction. Il remarque de plus que la CEI, en parlant des tolérances des fabricants, a récemment recommandé le domaine de 600 °C à 1 800 °C pour les thermocouples à deux alliages. Pour le thermocouple à un seul alliage, le domaine pourrait aller de 0 °C à environ 1 100 °C. Mr *Coates* ajoute que, pour les étalonnages courants avec la plus grande exactitude, dans le cas des thermocouples à un seul alliage, on considère le point de l'or comme la limite supérieure. De l'avis de Mr *Quinn*, on peut aussi utiliser le thermocouple à un seul alliage entre le point de l'or et 1 200 °C en ne constatant que très peu de différence dans son comportement.

Il s'ensuit une courte discussion pour savoir si le GT2 doit publier des recommandations concernant les réalisations secondaires de l'EIPT avec des thermocouples en métaux nobles, mais les opinions sont divisées.

Le *Président* demande si le CCT doit faire des recommandations à propos de la liste des points de référence secondaires ou des étalonnages du thermomètre à résistance de platine entre 14 K et 273 K figurant dans le rapport du GT2.

Mr *Bedford* estime qu'il ne faut rien faire pour le moment à propos du second point ; mais la liste des points de référence secondaires peut être publiée si le CCT en exprime le désir. Mr *Crovini* fait remarquer que, dans le cas où la liste serait publiée, il serait utile pour l'utilisateur que la pureté des substances soit spécifiée (c'est-à-dire le taux maximal d'impureté admissible pour une exactitude donnée de la température).

Le *Président* demande si les recommandations concernant les thermocouples doivent comporter les indications sur leur emploi et leurs domaines de température et si tout cela, avec une liste des points de référence secondaires mise à jour, pourrait constituer la base d'une monographie sur les mesures secondaires de température qui serait publiée en même temps que les renseignements complémentaires en 1982.

Mr *Bedford* pense qu'il serait difficile de publier des renseignements généraux sur la stabilité et l'emploi de ces thermocouples dans un court délai. En ce qui concerne les points de référence secondaires, le GT2 peut certainement publier une liste mise à jour, qui pourrait comporter aussi les effets des impuretés ainsi que l'a suggéré Mr *Crovini*. En ce qui concerne le document sur les mesures secondaires de température, Mr *Bedford* a l'impression qu'il s'agit d'un document assez complexe et qu'il serait difficile qu'il soit prêt pour 1982. Mr *Schooley* pense qu'il serait extrêmement utile qu'une liste à jour des points de référence secondaires soit publiée bientôt, dans *Metrologia* en particulier, si cette liste comporte des indications sur les types d'incertitudes et les effets des impuretés. Il a l'impression, toutefois, qu'on ne dispose peut-être pas encore d'informations suffisantes sur les thermocouples.

Mr *Bedford* dit qu'il ne voit pas très clairement ce que le CCT va recommander à propos de la limite supérieure d'utilisation du thermocouple Pt 13 % Rh/Pt. Mr *Schooley* souhaite aussi que Mr *Burns* (NBS) soit consulté. Mr *Giacomo* souligne que, chaque fois que l'on fait des recommandations pour des réalisations secondaires de l'EIPT, on doit faire clairement apparaître quel est leur statut par rapport à l'EIPT elle-même.

Le *Président* résume la discussion de la façon suivante : une publication dans *Metrologia* doit recommander l'utilisation de thermocouples en métaux nobles spécifiés, en indiquant aussi les limites de température d'utilisation ; on doit publier une liste des points de référence secondaires mise à jour ; on doit préparer un document sur les mesures secondaires de température pour accompagner le document contenant les renseignements complémentaires. Le *Président* suggère qu'une proposition précise soit préparée, puis discutée au point 7 de l'ordre du jour, afin de voir clairement ce que le CCT souhaite que l'on fasse.

c) Rapport du GT3 (Températures supérieures à 100 K)

Le Président du GT3, Mr *Quinn*, dit que le rapport (Document CCT/80-4) donne la liste de toutes les mesures de température thermody-

namique au-dessus de 100 K dont le Groupe de travail a eu connaissance. Toutefois, le rapport a été rédigé avant que les informations contenues dans le Document CCT/80-27 ne soient connues. Celles-ci relient, pour la première fois, les résultats obtenus avec le thermomètre à gaz du NBS à ceux obtenus par pyrométrie optique au-dessus de 600 °C. D'après les mesures de Mr Guildner, $T - T_{68}$ passe de $-0,05$ K à 350 °C à $-0,08$ K à 450 °C, tandis qu'au-dessus de 630 °C les mesures pyrométriques antérieures donnent des valeurs positives pour $T - T_{68}$. Les résultats préliminaires de Mr Coates montrent qu'il y a un raccordement lisse entre les deux domaines.

Mr *Bedford* fait remarquer qu'il serait vraiment fortuit qu'il n'y ait aucune discontinuité dans la pente de $T - T_{68}$ en fonction de T à 630 °C et demande à Mr Coates si ses mesures donnent des indications sur l'ordre de grandeur de cette discontinuité. Mr *Coates* considère que l'incertitude sur les résultats au-dessus de 600 °C rend cette évaluation difficile.

Mr *Thomas* demande si les résultats des mesures faites au pyromètre optique par Mr Bonhure, entre 630 °C et le point de l'or, sont maintenant recalculés par rapport à $T - T_{68}$. Mr *Coates* répond que oui et renvoie au *NPL Report QU56*.

Mr *Coates* tient à préciser que ses mesures ont été faites en trois mois seulement et ne doivent pas être considérées comme définitives. Il existe encore des incertitudes dues à l'effet de l'oxygène dans les thermomètres à résistance de platine et aux éventuels gradients de température dans le four. Mr *Coates* et Mr *Quinn* font remarquer qu'au point de congélation de l'antimoine les mesures donnent $T - T_{68} = -0,03$ K \pm 0,03 K (voir Document CCT/80-27, fig. 1), ce qui concorde très bien avec les résultats de Mr *Crovini* au thermomètre à bruit ($T - T_{68} = -0,05$ K). D'après Mr *Coates*, en se basant sur tous les résultats connus, on peut s'attendre à ce que $|T - T_{68}|$ ne soit pas supérieur à 0,2 K, et peut-être même à 0,1 K, au point de l'or.

Le *Président* remarque que le CCT pourrait souhaiter que soit publiée dans *Metrologia* une série de valeurs de $T - T_{68}$.

En réponse à une question de Mr *Quinn*, Mr *Schooley* indique que Mr *Guildner* n'a pas fait d'autres mesures au thermomètre à gaz que celles qui figurent dans le rapport du GT3. Il ajoute que Mr *Guildner* participera aux mesures, et certainement à la rédaction des publications, après son départ en retraite à la fin de 1980. A une question de Mr *Thomas*, Mr *Schooley* répond que Mr *Guildner* doit mesurer le coefficient de dilatation thermique du matériau utilisé pour le réservoir du thermomètre avant de pouvoir calculer $T - T_{68}$. En réponse à une question du *Président*, Mr *Schooley* regrette de ne pouvoir donner les échéances auxquelles on disposera des résultats.

Il s'ensuit une discussion générale des éventuelles discontinuités de

suggéré le Président, est la seule chose à faire. Mr *Gott* suggère que toute décision soit remise jusqu'à ce que l'on dispose de davantage d'informations sur le thermomètre à résistance de platine.

Le *Président* propose finalement que cette question de la température de jonction soit confiée à un Groupe de travail (*voir* point 6) chargé de présenter un rapport en 1982, et qu'entre-temps le GTI prépare deux projets de l'EIPT, l'un prenant le point de congélation de l'argent comme température de jonction, et l'autre le point de congélation de l'or ou celui du cuivre. Ces propositions sont acceptées.

5. Principes d'une nouvelle EIPT
sur lesquels doit reposer le projet d'échelle prévu pour 1982
(autres que ceux traités en 4)

a) *Lettre de la Commission I.4 de l'UICPA*

Mr *Quinn* indique qu'on a reçu une lettre de l'UICPA demandant que le CCT reconsidère la question du changement de l'EIPT-68. L'entrée en vigueur de l'EIPT-68 a entraîné des modifications dans de nombreuses données physico-chimiques; une nouvelle échelle amènerait une seconde série de modifications. On suggère dans cette lettre que le CCT envisage sérieusement de ne pas modifier l'EIPT-68, mais seulement de publier les tables des différences entre l'EIPT-68 et les températures thermodynamiques. A une question de Mr *Quinn*, Mr *Thomas* répond qu'effectivement un certain nombre de résultats devront être recalculés; par ailleurs, de nombreux résultats dans des tables comme les tables de Landolt-Bornstein, font encore référence à l'EIPT-48. Mr *Quinn* fait observer que la lettre ne fait référence qu'au domaine compris entre le point d'ébullition de l'oxygène et le point de congélation de l'antimoine. Il fait aussi remarquer que le changement de l'échelle concerne plus qu'une table des différences de $T - T_{68}$, par exemple le remplacement du thermocouple. Mr *Schooley* signale qu'il a entendu aussi des critiques, dans les milieux industriels américains, au sujet du changement de l'EIPT: les fabricants doivent modifier leur équipement chaque fois que l'échelle est changée. A son avis, toutefois, il serait dommage de ne pas introduire, dans une nouvelle échelle, les nombreuses améliorations qui sont maintenant acquises; il est essentiel, cependant, de le faire correctement.

Le *Président* est d'accord avec Mr *Schooley* et souhaite assurer l'UICPA, et les utilisateurs dans leur ensemble, que le CCT apportera le maximum de soin pour que la nouvelle échelle soit, en ce qui concerne les utilisateurs, une bonne représentation des températures thermodynamiques. Il est effectivement malheureux qu'à l'époque de la révision de l'échelle en 1968, ce but n'ait pu être atteint; les raisons complexes en ont

Groupe de travail 2

1) Poursuite de l'étude des points de référence secondaires qui sont proposés ou qui existent.

2) Préparation d'un document décrivant une bonne pratique de la thermométrie, portant sur les techniques secondaires y compris les réalisations secondaires de l'EIPT, mais à l'exclusion des points traités dans le Document du GT1. Un premier projet doit être présenté au CCT, en 1982.

Groupes de travail 3 et 4, considérations générales

Le *Président* propose que les anciens GT3, GT4 et GT5 soient remplacés par deux nouveaux Groupes de travail qui fourniraient au GT1 tous les renseignements nécessaires à la rédaction du projet de nouvelle EIPT. Le GT3 serait chargé du domaine de température couvert par le thermomètre à résistance de platine, c'est-à-dire probablement de 14 K à 1 064 °C, et le GT4 des températures inférieures à 14 K.

Cette proposition est longuement discutée parce qu'elle charge le GT3 de tâches aussi diverses que l'évaluation du comportement des thermomètres à résistance de platine pour la mesure des hautes températures, et l'étude des méthodes d'interpolation aux basses températures; mais on en arrive finalement à la conclusion que cet inconvénient est compensé par l'avantage de ne pas devoir scinder de façon artificielle le domaine du thermomètre à résistance de platine.

Mr *Quinn* exprime encore ses craintes à l'égard de la disponibilité et de l'emploi des thermomètres à résistance de platine pour la mesure des hautes températures. Le *Président* fait remarquer que si l'on ne dispose pas des thermomètres à temps, le CCT tiendra compte de ces circonstances indépendantes de sa volonté; en aucun cas, il ne doit recommander quelque chose de médiocre seulement pour satisfaire aux échéances fixées.

Mr *Kemp* fait observer que les mesures de température thermodynamique et l'évaluation des résultats de ces mesures, qui étaient de la compétence des anciens GT3 et GT4, sont encore d'une grande importance pour la nouvelle échelle. Le *Président* est d'accord sur cette remarque. Il est convenu que Mr *Rusby* et Mr *Durieux* resteront responsables de la communication au CCT des nouvelles équations de pression de vapeur de l'hélium.

Finalement, les tâches spécifiques du GT3 et du GT4 seront les suivantes :

Groupe de travail 3

1) Préparation, pour la nouvelle EIPT, des équations d'interpolation pour le domaine de température (probablement 14 K à 1 064 °C) couvert par le thermomètre à résistance de platine.

2) Choix d'une température de jonction entre le domaine du thermomètre à résistance de platine et celui du pyromètre optique.

3) Choix de points fixes dans le domaine du thermomètre à résistance de platine.

4) Choix, en liaison avec le GT4, de la limite inférieure du domaine de température dans lequel le thermomètre à résistance de platine définira l'EIPT.

5) Organisation d'une comparaison portant sur le comportement des thermomètres à résistance de platine pour la mesure des hautes températures, actuellement en cours de mise au point ou prêts à fabriquer ; évaluation des résultats de cette comparaison.

6) Étude des mesures de température thermodynamique au-dessus de 14 K.

Groupe de travail 4

Élaboration des recommandations sur tous les aspects d'une nouvelle EIPT au-dessous du domaine du thermomètre à résistance de platine et, en collaboration avec le GT3, détermination de la limite inférieure du domaine du thermomètre à résistance de platine.

c) *Composition des Groupes de travail*

La composition des Groupes de travail est la suivante :

Groupe de travail 1 :

Mr Preston-Thomas, Président
Mr Bloembergen
Mr Quinn

Groupe de travail 2 :

Mr Bedford, Président
Mr Bonnier
Mr Maas
Mr Pavese

Groupe de travail 3 :

Mr Crovini, Président
Mr Coates
Mr Kemp
Mr Ling
Mr Schooley
Mr Thomas

Groupe de travail 4 :

Mr Hudson, Président
Mr Durieux
Mr Rusby
Mr Swenson

7. Publication des documents

Rappelant une note concernant les publications du BIPM, qui a été diffusée en janvier 1980, Mr *Giacomo* propose que les travaux provenant du CCT et qui sont d'un intérêt général soient publiés dans *Metrologia*, tandis que les informations qui n'ont d'intérêt spécifique que pour le CCT (par

exemple le Rapport de la 13^e session, les rapports des Groupes de travail, et peut-être quelques-uns des autres documents soumis au CCT) soient publiées dans *Comité Consultatif de Thermométrie*. Seule serait publiée la liste complète des documents présentés au CCT, mais tous les documents pourraient être obtenus auprès du BIPM. Les membres du CCT donnent leur accord.

Mr Schooley demande s'il faut publier dans *Metrologia* (ou ailleurs) une nouvelle liste complète des points de référence secondaires, avec les renseignements dont on dispose sur l'exactitude des valeurs et sur la pureté requise des échantillons. Les membres du CCT sont d'accord pour l'envisager.

Il avait été convenu, lors des précédentes sessions du CCT, que tous les documents devaient parvenir au BIPM au moins deux mois avant l'ouverture de la session. L'importance de cette règle est soulignée par plusieurs personnes. Sinon, il devient impossible aux membres du CCT de discuter des documents avec les experts dans leur laboratoire. Cela est en particulier valable pour les rapports des Groupes de travail, qui constituent la base d'une grande partie des discussions au cours des réunions.

Il est convenu que, pour la prochaine session du CCT, les documents qui parviendront au BIPM au moins deux mois avant la session seront diffusés par le BIPM. Les autres ne seront diffusés que dans la mesure du possible. Le BIPM dressera une liste de tous les documents reçus, avec l'indication de leur date d'arrivée. En réponse à une question de Mr Schooley, Mr Giacomo précise que des copies des documents peuvent toujours être obtenues sur demande adressée au BIPM.

8. Questions diverses

a) Rapport et Recommandations du CCT au CIPM

Un bref rapport de cette session sera présenté au CIPM. Un certain nombre de recommandations portant sur les travaux à faire en thermométrie accompagnent généralement ce rapport. Un échange de vues a lieu sur l'opportunité de recommandations de ce genre. Mr Gott, Mr Kemp et Mr Coates sont d'avis qu'elles peuvent être utiles. Mr Gott et Mr Coates acceptent de préparer des propositions précises. Ces propositions sont discutées, puis adoptées par le CCT (voir Rapport de la 13^e session).

b) Prochaine session du CCT et « 6th Temperature Symposium » (États-Unis d'Amérique, mars 1982)

Le « 6th Symposium on Temperature, its Measurement and Control in Science and Industry » se tiendra à Washington du 15 au 18 mars 1982. La

plupart des membres du CCT assisteront probablement à ce Symposium et pour la plupart d'entre eux il serait commode, pour l'organisation des voyages, que la réunion du CCT et le Symposium ne se tiennent pas à plus d'une ou deux semaines d'écart.

En conséquence, on convient que la prochaine session du CCT aura lieu du 30 mars au 1^{er} avril 1982, à Sèvres.

c) *Remarques diverses*

Mr Schooley signale une brève description (en anglais) dans *PTB Mitteilungen*, N° 90, janvier 1980, du fonctionnement du thermomètre à gaz du NBS.

Mr Quinn attire l'attention du CCT sur le programme futur du BIPM en thermométrie, puisqu'il incombe au CCT de donner son avis au Directeur du BIPM sur ce programme. A l'heure actuelle, les recherches thermométriques du BIPM sont limitées aux travaux sur les cellules scellées à point triple et les mesures des intervalles de température thermodynamique entre 419 °C et 630 °C par pyrométrie optique. Cette année cependant, le CIPM a demandé au BIPM de faire un projet de plan à long terme des activités futures. Bien que les perspectives d'un accroissement significatif en personnel ou en ressources soient assez lointaines, au BIPM on considère qu'une extension des activités en thermométrie serait utile. On envisage d'entreprendre des mesures spectroradiométriques et une extension des travaux en pyrométrie optique constituerait un complément approprié. En ce qui concerne le domaine des basses températures, les travaux qui devraient être faits dépendent évidemment de la forme que revêtira la nouvelle EIPT, mais on propose que les travaux sur les cellules scellées à point triple soient étendus de façon à couvrir un domaine de température plus large. En ce qui concerne le domaine des températures ambiantes, on a besoin de réaliser des étalonnages avec le niveau d'exactitude le plus élevé pour les autres travaux effectués au BIPM. On s'intéresse aussi aux thermomètres à résistance de platine pour la mesure des hautes températures compte tenu des travaux qui ont été effectués en pyrométrie optique au-dessous du point de congélation de l'or. Mr Quinn sollicite des commentaires et des suggestions sur ces propositions. Des questions seront probablement posées aux membres du CCT dans leurs laboratoires respectifs, car le BIPM a demandé avis aux directeurs des laboratoires nationaux.

Mr Schooley indique qu'effectivement on lui a demandé son avis ; au NBS, on pense que le BIPM doit être l'endroit privilégié pour les comparaisons internationales, comme celles qui ont eu lieu dans le passé pour les thermomètres à résistance de germanium, les thermomètres à résistance de platine et les cellules scellées à point triple, en particulier pour tout ce qui concerne la partie administrative des programmes de comparaison.

Mr *Pavese* fait remarquer que, puisque les cellules scellées à point triple constitueront probablement les instruments essentiels pour réaliser les points fixes de la nouvelle EIPT, il serait utile que des « cellules étalons » soient conservées au BIPM exactement comme le sont des étalons de masse ou de résistance. En liaison avec cette idée, Mr *Giacomo* dit que le BIPM souhaite toujours rassembler des cellules à point triple de l'eau ; il vient juste de recevoir une cellule du NIM.

Mr *Crovini* fait remarquer qu'il est nécessaire de faire des recherches sur les étalons de transfert pour les températures supérieures à 1 800 °C environ, en particulier sur les lampes à ruban remplies de gaz.

Mr *Ling* transmet au CCT une invitation du Directeur du NIM pour que le CCT tienne sa prochaine session à Beijing. Le *Président* remercie le Directeur du NIM au nom du CCT, mais fait remarquer que le CIPM préfère que les réunions des Comités Consultatifs se tiennent au BIPM.

*
* *

Avant de lever la séance, le *Président* remercie tous les participants pour leur coopération pendant la session, Mr *Giacomo* et ses collaborateurs pour l'aide matérielle apportée au cours des réunions.

Reçu le 23 octobre 1980.

ANNEXE T 1

**Documents de travail présentés
à la 13^e session du CCT**

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

Document
CCT/

- 80-1 Polski Komitet Normalizacji I Miar (Pologne).- Etude sur le point thermométrique du sodium.
- 80-1bis Polski Komitet Normalizacji I Miar (Pologne).- The pressure coefficient of the sodium freezing point, by J. Butkiewicz and W. Gizmajer.
Ce document a été distribué après la session du CCT, en août 1980.
- 80-2 H.H. Wills Physics Laboratory (Royaume-Uni).- Dielectric constant gas thermometry of ⁴He from 4.2 - 27.1 K, by D. Gagan and G.W. Michel.

Document

CCT/

- 80-3 NML (Australie).- The thermocouple as an IPTS interpolation instrument, by R.E. Bentley and T.P. Jones.
- 80-4 Report of Working Group 3 to the CCT (voir Annexe T 4).
- 80-5 Third Report of Working Group 5 : Practical thermometers for temperatures below 30 K (voir Annexe T 6).
- 80-6 NML (Australie).- Comments on the use of germanium resistance thermometers as secondary standards for temperature scales below 30 K, by L.M. Besley.
- 80-7 NRC (Canada).- Temperature dependent transmittance of residual films on glasses, by M. Ohtsuka, R.E. Bedford and C.K. Ma.
Publié dans Metrologia, 15, 1979, pp. 165-166.
- 80-8 NRC (Canada).- Size-of-source effects in optical pyrometry, by M. Ohtsuka and R.E. Bedford.
- 80-9 NRC (Canada).- On the temperature interval between the freezing points of silver and copper, by M. Ohtsuka and R.E. Bedford.
- 80-10 NRC (Canada).- The copper freezing point as an alternative to the gold freezing point in the IPTS, by R.E. Bedford.
- 80-11 NRC (Canada).- Secondary realizations of the IPTS-68 defined by platinum/rhodium thermocouples, by R.E. Bedford and C.K. Ma.
- 80-12 Report 5 of Working Group 2 to the CCT (voir Annexe T 3).

Document

CCT/

- 80-13 NRLM (Japon).- Introduction of a new concept "effective temperature" to radiant characteristics analysis of non-isothermal cavities, by S. Hattori. Publié dans Trans. of Soc. Inst. Cont. Eng., 15, 1979, pp. 847-848.
- 80-14 NRLM (Japon).- Calculation of the directional emissivities of cavities by the Monte Carlo method, by A. Ono. Publié dans J. Opt. Soc. Am., 70, 1980, pp. 547-554.
- 80-15 NRLM (Japon).- An absolute radiometer for total radiation thermometry, by A. Ono. Publié dans Metrologia, 15, 1979, pp. 127-133 ; Jap. J. Appl. Phys., 18, 1979, pp. 697-698 ; Ibid., 18, 1979, pp. 1995-2002.
- 80-16 NRLM (Japon).- An observation of the freezing point of copper by radiation thermometry, by F. Sakuma and S. Hattori. A paraître dans Trans. of Soc. Inst. Cont. Eng.
- 80-17 NRLM (Japon).- A method of narrow band silicon radiation thermometer calibration by fixed point blackbody furnaces, by F. Sakuma and S. Hattori. A paraître dans Trans. of Soc. Inst. Cont. Eng.
- 80-18 NRLM (Japon).- Status report of temperature scale comparison between the platinum resistance thermometer and the radiation thermometer, by F. Sakuma and S. Hattori.
- 80-19 NRLM (Japon).- Reproducibility of superconductive transition temperature of lead and indium, by A. Inaba and K. Mitsui. A paraître dans Metrologia.

Document
CCT/

- 80-20 NRLM (Japon).- Superconductive transition point of tantalum and niobium as a reference temperature, by A. Inaba.
A paraître dans Jap. J. Appl. Phys., 19, 1980, pp. 1553-1559.
- 80-21 NRLM (Japon).- Realization of the triple point of indium in sealed glass cell, by S. Sawada.
A paraître dans Bulletin of NRLM.
- 80-22 NRC (Canada).- Platinum oxidation effects in standard resistance thermometers, by R.J. Berry.
- 80-23 NML (Australie).- Interpolation methods for platinum resistance thermometers between 13.81 K and 273.15 K, by R.C. Kemp, W.R.G. Kemp and L.M. Besley.
- 80-24 IMGC (Italie).- New low temperature fixed points measured at IMGC, by F. Pavese.
- 80-25 IMGC (Italie).- The use of triple point of gases in sealed cells as pressure transfer standards : oxygen (146.25 Pa), methane (11 696 Pa) and argon (68 890 Pa), by F. Pavese.
- 80-26 IMGC (Italie).- The role of the freezing point of copper in the International Practical Temperature Scale, by T. Ricolfi and F. Righini.
- 80-27 NPL (Royaume-Uni).- Measurement of ($t_{68} - t_{68}$) between 440 and 630 °C, by P.B. Coates, J.W. Andrews and M.V. Chattle.
- 80-28 NRLM (Japon).- Realization of EPT-76 by using a practical gas thermometer, by H.Sakurai and K. Mitsui.
A paraître dans Bulletin of NRLM.

Document

CCT/

- 80-29 NRLM (Japon).- Note on the convergency of the iteration calculation of W-T relation in IPTS-68 below 0 °C, by H. Sakurai.
Publié dans Rep. of NRLM, 28, 1979, pp. 341-345.
- 80-30 NBS (Etats-Unis d'Amérique).- Summary of recommendations to the CCT from the NBS, by J.F. Schooley.
- 80-31 NBS (Etats-Unis d'Amérique).- High temperature platinum resistance thermometry at NBS : a report to the CCT, by J.P. Evans.
- 80-32 NBS (Etats-Unis d'Amérique).- Transfer of high temperature platinum resistance thermometry techniques from NBS : A proposal to the CCT, by J.P. Evans.
- 80-33 NBS (Etats-Unis d'Amérique).- Defining fixed points of the IPTS, by G.T. Furukawa.
- 80-34 NBS (Etats-Unis d'Amérique).- Reproducibility of platinum resistance thermometer calibration at NBS and the triple point of argon in transportable sample cells, by G.T. Furukawa.
- 80-35 NBS (Etats-Unis d'Amérique).- Insulation support for standards-type platinum resistance thermometers, by G.T. Furukawa and B.W. Mangum.
- 80-36 NBS (Etats-Unis d'Amérique).- On the question of an IPTS below 1 K, by R.P. Hudson and B.W. Mangum.
- 80-37 NBS (Etats-Unis d'Amérique).- Triple point of gallium as a temperature fixed point, by B.W. Mangum.
- 80-38 NBS (Etats-Unis d'Amérique).- NBS-Cryogenic temperature scale-1, by H. Marshak and R.J. Soulen Jr.

Document
CCT/

- 80-39 NBS (Etats-Unis d'Amérique).- Realization of EPT-76 at the NBS, by E.R. Pfeiffer and R.S. Kaeser.
- 80-40 NBS (Etats-Unis d'Amérique).- Progress of research on the NBS SRM 767 superconductive fixed point device, by J.F. Schooley.
- 80-41 NBS (Etats-Unis d'Amérique).- Extension of the IPTS below 30 K, by J.F. Schooley, R.J. Soulen Jr. and H. Marshak.
- 80-42 BIPM.- Comparaison de cellules à point triple de l'eau, par J. Bonhoure.
- 80-43 IMGC (Italie).- On the relationship between the future IPTS and the thermodynamic temperature between 0 °C and 1100 °C, by L. Crovini and A. Actis.
- 80-44 Lettre du Président de la Commission I.4 de l'UICPA au CCT.
- 80-45 BIPM.- A note on the calculation of the emissivity of cylindrical near-blackbody cavities having diffusely reflecting walls, by T.J. Quinn.
- 80-46 ASMW (Rép. Dém. Allemande).- Secondary realization of the IPTS-68 in the range 83.798 K to 273.15 K, by P. Seifert.
- 80-47 ASMW, Akademie der Wissenschaften der DDR (Rép. Dém. Allemande).- Impulse blackbody radiation source at a temperature of 12 000 K for metrological purposes, by E. Geyer, K. Günther and S. Lang.
- 80-48 ASMW (Rép. Dém. Allemande).- A possible systematic error at the calibration of thermocouples by means of the wire method, by H. Maas and W. Heyne.

Document
CCT/

- 80-49 ASMW (Rép. Dém. Allemande).- Investigation of the reproducibility of the water triple point temperature, by H. Mittelstädt and H. Maas.
- 80-50 ASMW (Rép. Dém. Allemande).- International intercomparison measurements of triple points of water, by H. Maas, S. Lau and H. Mittelstädt.
- 80-51 NPL (Royaume-Uni).- Realizations of the triple points of argon and neon at NPL, by S.D. Ward.
- 80-52 NPL (Royaume-Uni).- Fixed points and deviation functions for the IPTS below 0 °C, by S.D. Ward and R.L. Rusby.
- 80-53 Report of Working Group 1 : Supplementary information for the IPTS-68.
- 80-53bis Résumé du Document 80-53. Ce résumé a été établi après la session (voir Annexe T 2).
- 80-54 INM (France).- Analyse du comportement thermique des cellules scellées, par G. Bonnier et Y. Hermier.
- 80-55 IMGC (Italie).- International intercomparison of fixed points by means of sealed cells. Preliminary report to the CCT of the measurements updated to May 15, 1980.
- 80-56 NPL (Royaume-Uni).- Stability and interpolation characteristics of rhodium-iron resistance thermometers, by R.L. Rusby.
- 80-57 Harbin Institute of Technology (Rép. Pop. de Chine).- The evaluation of the emissivity and the temperature of cavities at the gold freezing point, by Chen Hongpan, Chen Shouren and Chu Zaixiang.

été exposées dans la première communication du 5th Symposium on Temperature qui s'est tenu à Washington en 1971. Enfin, il est convenu qu'une copie de la partie du compte rendu des séances qui concerne l'UICPA sera envoyée à Mr Cali.

b) *Établissement éventuel des extrémités de l'échelle sur des principes thermodynamiques et abaissement éventuel de sa limite inférieure de 0,5 K à 10 mK*

Le *Président* fait remarquer que l'EIPT repose déjà sur les principes de la thermodynamique pour son extrémité supérieure; aussi la discussion portera-t-elle surtout sur l'extrémité inférieure de l'EIPT. Mr *Durieux* constate qu'il existe plusieurs instruments thermodynamiques d'extrapolation pour le domaine inférieur à 0,5 K, de telle sorte qu'il n'est peut-être pas nécessaire de spécifier une méthode d'extrapolation, ou même de définir une EIPT, au-dessous de 0,5 K. Mr *Coates* fait remarquer que toutes les méthodes thermodynamiques d'extrapolation devraient donner les mêmes températures. Mr *Hudson* indique que la méthode pour une extrapolation thermodynamique au-dessous de 0,5 K, ou 1 K, est choisie selon le type de recherche effectué. Le *Président* constate qu'apparemment les chercheurs dans ce domaine n'ont aucun problème à choisir un instrument d'extrapolation thermodynamique ou semi-thermodynamique (par exemple un thermomètre à bruit, un thermomètre à anisotropie du rayonnement γ , un thermomètre à résonance magnétique nucléaire, ou un thermomètre magnétique à sel paramagnétique tel que le nitrate de cérium et de magnésium), et à étalonner un thermomètre à résistance par comparaison. En ce qui concerne la remarque de Mr *Coates*, et bien que cela soit vrai en principe, le *Président* estime qu'il y a des choix à faire dans la pratique sur les valeurs pour des températures de référence convenables ou la constante des gaz.

Mr *Bonnier* indique que le thermomètre à nitrate de cérium et de magnésium est utilisé très couramment avec les réfrigérateurs à dilution; dans ce cas, l'étalonnage à 0,8 K (point supraconducteur du zinc), ou plus haut, est malcommode. Le point supraconducteur du cadmium (à 0,5 K) est ainsi le seul point dont on dispose et cela est insuffisant. Il estime que les points d'étalonnage au-dessous de 0,5 K devraient être définis dans une nouvelle EIPT.

Après avoir brièvement passé en revue les méthodes thermodynamiques dont on dispose pour mesurer ou extrapoler les températures au-dessous d'environ 1 K, Mr *Schooley* considère qu'il est tout à fait légitime d'étendre l'EIPT à des températures bien inférieures. On fait beaucoup de travaux dans les laboratoires scientifiques et industriels au-dessous de 1 K, et en fait au-dessous de 10 mK.

A titre d'information, Mr *Hudson* demande s'il incombe au CCT de conseiller les gens qui, pour diverses raisons pratiques, pourraient préférer

employer un thermomètre à nitrate de cérium et de magnésium ou, pour des raisons encore plus pratiques, un thermomètre à résistance semi-conductrice, sur la façon d'utiliser ces instruments, étant donné que l'on dispose de plusieurs thermomètres thermodynamiques. Le *Président* répond que des conseils de ce genre émanant du CCT risquent d'être appréciés, mais qu'ils doivent figurer dans des documents autres que le texte de l'EIPT.

Mr *Hudson* propose que le CCT ne tente pas de publier une extension de l'EIPT au-dessous de 0,5 K (ou au-dessous d'une température à préciser entre 0,5 K et 1 K) dans les mêmes conditions qu'au-dessus de cette température; le CCT devrait plutôt porter à la connaissance des milieux intéressés qu'il existe une variété de méthodes dont on dispose pour mesurer les températures d'une façon très pratique et en même temps thermodynamique. Des renseignements sur ces méthodes et sur l'emploi de thermomètres encore plus pratiques comme les thermomètres magnétiques, les thermomètres à résistance de germanium et les thermomètres à résistance de carbone, pourraient être donnés sous forme de renseignements complémentaires ou d'un document sur la thermométrie pratique.

Mr *Schooley* donne des informations sur les travaux effectués au NBS au-dessous de 1 K. On a constaté entre un thermomètre à bruit et un thermomètre à anisotropie du rayonnement γ , un accord à $\pm 0,1$ mK environ entre 15 mK et 50 mK; on est en train de poursuivre les mesures à des températures supérieures. Ce type de mesures donne accès à des températures thermodynamiques de plusieurs façons. Le NBS a mis au point une échelle de température, NBS-CTS-1 (NBS-Cryogenic Temperature Scale-1), qui va de 0,01 K à 0,56 K et repose sur le thermomètre à bruit, le thermomètre à anisotropie du rayonnement γ et le thermomètre magnétique. Une version transportable de cette échelle est disponible sous la forme du dispositif SRM 768, comportant cinq métaux dont les températures de transition supraconductrices ont été déterminées dans cette échelle. Des étalonnages individuels, avec des exactitudes d'environ 0,1 mK, sont fournis avec chaque dispositif: en effet, des échantillons différents ont des températures de transition quelque peu différentes (des travaux de recherche sur ces points de transition se poursuivent au NBS). Mr *Schooley* indique que cette possibilité ne doit pas être laissée de côté si elle peut être utile à l'EIPT. Le *Président* considère que cette possibilité est à l'évidence de la plus haute importance, mais qu'elle ne s'applique pas nécessairement à une extension de l'EIPT.

Mr *Schooley* ajoute qu'il préfère que l'EIPT ne soit pas définie en fonction des pressions de vapeur, parce que le thermomètre magnétique, fondé sur le paramagnétisme des électrons et la loi de Curie, est beaucoup plus commode et qu'en plus on peut l'utiliser à des températures bien plus basses. Mr *Hudson* reconnaît que le thermomètre magnétique est très utile, mais pense qu'il n'est pas nécessaire de définir une EIPT en utilisant le

thermomètre magnétique, parce qu'on dispose de méthodes pour faire des mesures directes de températures thermodynamiques.

Le *Président* propose que le Groupe de travail qui sera responsable de la partie inférieure de l'échelle étudie le problème et présente un rapport lors de la prochaine session du CCT.

c) *Point de congélation du cuivre en remplacement du point de congélation de l'or*

Le *Président* introduit le sujet en disant que la raison essentielle de cette proposition vient du prix prohibitif de l'or. Cette proposition rencontre un accueil favorable. Mr *Crovini*, Mr *Bedford* et Mr *Coates* indiquent que des réalisations du point de congélation du cuivre faites dans leurs laboratoires ont été satisfaisantes.

Mr *Schooley* souligne que, si cette proposition est acceptée, la différence entre les points de congélation de l'or et du cuivre doit être connue avec exactitude ; il demande où l'on en est actuellement à cet égard. Mr *Quinn* répond que les diverses mesures de cette différence effectuées par pyrométrie optique concordent à 20 mK près.

On décide que, dans le projet d'EIPT pour 1982, le GT1 introduira le point de congélation du cuivre comme choix possible à la place du point de congélation de l'or.

d) *Limite inférieure du domaine du thermomètre à résistance de platine*

Mr *Schooley* indique que Mr *Furukawa* (NBS) a émis des craintes au sujet de l'utilisation du thermomètre à résistance de platine comme instrument d'interpolation jusqu'à 14 K, parce que la précision des mesures passe de 0,1 mK au-dessus de 24 K à environ 1 mK à 14 K. Mr *Bedford* rend compte d'une réticence comparable au NRC sur l'utilisation du thermomètre à résistance de platine au-dessous de 20 K.

En revanche, Mr *Rusby* et Mr *Kemp* se disent tout à fait satisfaits de l'utilisation du thermomètre à résistance de platine jusqu'à 14 K. Mr *Rusby* souligne que la sensibilité en différence de potentiel n'est pas nettement moindre à 14 K qu'à 24 K, parce que le courant de mesure peut être augmenté par un facteur cinq environ. La détérioration de l'exactitude des mesures de température faites avec le thermomètre à résistance de platine au-dessous de 20 K résulte plus probablement davantage de la méthode d'interpolation que du thermomètre.

e) *Points fixes dans le domaine du thermomètre à résistance de platine (probablement 14 K-1 085 °C)*

On discute d'abord du domaine de température inférieur au point triple de l'oxygène.

Répondant à une question de Mr Rusby sur les possibilités d'utiliser le point triple de e-D₂ (18,7 K) comme point fixe, Mr Pavese fait une distinction entre la réalisation de ce point triple en général et sa réalisation dans une cellule scellée. Dans les cellules scellées, des difficultés risquent de provenir de la contamination due à la diffusion d'hydrogène provenant de la paroi de la cellule. En général, la pureté isotopique du gaz présente aussi quelques problèmes. Mr Pavese n'a pas pu se procurer de D₂ d'une pureté supérieure à 99,86 %, les 0,14 % restant étant surtout du HD; cette quantité d'impureté doit entraîner une erreur de 3 mK. Toutefois, une analyse raisonnablement bonne peut faire tomber l'incertitude au-dessous de 0,2 mK. De l'avis de Mr Pavese, il faut envisager d'utiliser le point triple de e-D₂ comme point fixe.

Mr Schooley souhaite supprimer tous les points d'ébullition parce que les mesures exactes de pression sont incommodes à faire. Toutefois, Mr Kemp souligne que, puisque les impuretés dans le platine ont tendance à jouer un rôle dans le comportement de la résistance en fonction de la température aux basses températures, la suppression de points fixes au-dessous de 27 K risque d'accroître sensiblement la non-unicité de l'échelle. En réponse à cela, Mr Rusby signale que l'utilisation des points triples de e-H₂, e-D₂, Ne et O₂ et de la transition β - γ dans l'oxygène solide à 45 K à la place des points fixes de l'EIPT-68 ne doit pas accroître de façon appréciable la non-unicité de l'échelle. Différents schémas d'interpolation (fondés sur les résultats des comparaisons de Ward et Compton), utilisant différentes séries de points fixes, ont été décrits dans les Documents CCT/80-23 et CCT/80-52. Mr Rusby ajoute que, si le point triple de e-D₂ et la transition β - γ dans l'oxygène solide s'avèrent insuffisamment reproductibles, on doit utiliser le point d'ébullition de e-H₂ et le point triple de Ne. Dans ce cas, Mr Schooley a l'impression qu'on devrait envisager d'utiliser aux basses températures d'autres instruments que le thermomètre à résistance de platine, instruments pour lesquels on aurait besoin de point d'étalonnage moins nombreux. Le Président souligne que cette question est étroitement liée à la décision concernant la limite inférieure du domaine du thermomètre à résistance de platine (voir 5c).

Le Président demande alors s'il y a des commentaires au sujet du domaine supérieur au point triple de l'oxygène. Mr Bedford signale que, dans ce domaine, la plupart des points de congélation conviennent; le choix dépend du schéma d'interpolation que l'on choisit.

Mr Schooley rend compte de travaux faits au NBS sur le point de congélation de l'aluminium; la dispersion totale entre cinq cellules est de 0,5 mK. Mr Coates fait remarquer qu'on manque de points fixes au voisinage de 800 °C, le point de l'eutectique Cu-Ag ne convenant pas très bien.

Mr Quim attire l'attention sur les travaux faits au NBS sur le point triple du gallium.

Mr *Bonnier* rend compte de difficultés rencontrées avec la réalisation du point triple de l'eau et recommande que ce point soit étudié dans une cellule scellée dans des conditions adiabatiques. Mr *Bedford* indique que des recherches de ce genre sont déjà en cours au NRC.

Mr *Kemp* signale que le point triple du krypton est facile à réaliser ; à son avis le point triple du xénon convient moins bien à cause de l'influence de la composition isotopique. Mr *Bonnier* fait remarquer que l'on trouve du xénon isotopiquement pur et que le point triple du xénon a l'avantage de se trouver à mi-chemin entre le point triple de l'argon et celui de l'eau. Mr *Rusby* se demande si l'on a vraiment besoin d'un point fixe entre le point triple de l'argon et celui de l'eau, parce qu'une grosse partie de la non-unicité constatée dans ce domaine est probablement due à des erreurs expérimentales dans les résultats de comparaison. De plus, pour les thermomètres à tige dont l'étalonnage doit descendre jusqu'au point triple de l'argon, il serait assez incommode de les étalonner à un second point triple au-dessous de 0 °C. Pour déterminer le coefficient α des thermomètres à résistance de platine du type capsule, Mr *Rusby* préférerait remplacer le point 100 °C par le point triple du gallium, plutôt que d'introduire le point triple du xénon ; le fait que l'on puisse réaliser le point triple du gallium avec une grande précision plus facilement que le point 100 °C ferait plus que compenser la réduction d'un facteur trois de l'intervalle de température. Mr *Pavese*, toutefois, serait favorable à l'utilisation du point triple du xénon ou de CO₂ dans des étalonnages de thermomètres à résistance du type capsule parce que cela permettrait de faire toutes les mesures, sauf bien entendu celle au point triple de l'eau, dans le même cryostat.

A cet égard Mr *Coates* demande si l'on devrait faire une distinction plus formelle entre les étalonnages des thermomètres à tige et ceux des thermomètres du type capsule. Le *Président* convient que, bien qu'une coupure à 0 °C dans la méthode d'interpolation (comme dans l'EIPT-68) soit artificielle, les considérations pratiques pour l'étalonnage des thermomètres à tige et du type capsule sont certainement importantes.

Mr *Schooley* souligne que, en général, l'idée d'utiliser des cellules à point triple scellées transportables pour réaliser les points fixes offre des possibilités beaucoup plus nombreuses qu'auparavant aux laboratoires qui désirent réaliser l'EIPT. Quoi qu'il en soit, il propose qu'on supprime dans l'échelle le point d'ébullition de l'eau. Il mentionne aussi les travaux faits par Mr *Furukawa* sur le point triple du mercure, à - 38 °C.

Le *Président* propose alors qu'on dresse une liste des points de référence qui pourraient convenir comme points fixes de la nouvelle EIPT ; cette liste constituerait un guide pour le Groupe de travail responsable de cette partie de l'échelle. La liste ci-dessous (préparée par le *Président*, Mr *Bedford* et Mr *Quinn*) et les domaines d'utilisation des trois types de thermomètre à résistance de platine sont commentés par Mr *Quinn* :

Point de congélation de	Cu	1 085 °C
	Au	1 064
	Ag	962
	Al	660
	Zn	420
	Cd	321
	Sn	232
	In	157
	Na	98
	Point triple de	Ga
H ₂ O		0
Hg		234 K
CO ₂		217
Xe		161
Kr		116
Ar		84
N ₂		63
O ₂		54
Transition β-γ dans O ₂		44
α-β dans N ₂	36	
Point triple de	Ne	24,6
	e-D ₂	18,7
	e-H ₂	13,8

Les points de référence sont les points fixes « nécessaires » ; parmi les autres points, on peut choisir entre plusieurs groupes. En ce qui concerne les trois types de thermomètre à résistance de platine, on propose les domaines suivants :

Thermomètre pour la mesure

des hautes températures : 0 °C à 962 °C, 1 064 °C ou 1 085 °C

Thermomètre à tige : 84 K à 420 °C ... 660 °C

Thermomètre du type capsule : 13,8 K à 30 K ... 232 °C.

Le *Président* fait observer que l'étalonnage des différents types de thermomètre (dans le même domaine de température) peut nécessiter, ou permettre, l'emploi de groupes différents de points fixes. Des groupes différents pourraient être autorisés aussi dans le cas où seule l'étendue du domaine de température pour lequel on a besoin d'étalonnage change, dans la mesure où l'on serait prêt à risquer une légère non-unicité de l'échelle, ou capable de l'éviter en choisissant des valeurs des points fixes et des interpolations très cohérentes. Mr *Schooley* fait remarquer qu'il serait peut-être souhaitable de ne pas avoir de chevauchement des domaines des trois types de thermomètre dans la définition de l'échelle ; on pourrait donner dans les Renseignements complémentaires des indications sur l'exactitude avec laquelle on peut utiliser les différents types de thermomètre.

tre en dehors de leur domaine propre. Mr *Quinn* et le *Président* rappellent qu'au moins un petit chevauchement des domaines d'étalonnage est souhaitable.

f) *Méthodes d'interpolation pour le domaine du thermomètre à résistance de platine (probablement 14 K-1 085 °C)*

Le *Président* fait remarquer que, du point de vue de l'utilisateur, la simplicité des méthodes d'interpolation est importante.

Mr *Crovini* mentionne les calculs faits à l'IMGC pour le domaine compris entre 0 °C et le point de congélation du zinc : une équation du second degré donne, entre les points fixes, des températures qui s'écartent de $\pm 0,02$ K des températures de Guildner. Une équation du troisième degré correspond aux températures de Guildner dans les limites de leur exactitude estimée.

Mr *Coates* reprend les remarques de Mr *Crovini* pour dire que, bien qu'un polynôme du troisième degré corresponde aux températures de Guildner dans les limites de l'exactitude thermodynamique de ces résultats, il subsiste des différences systématiques et il faudrait un polynôme du cinquième degré pour suivre la moyenne des températures de Guildner de façon plus régulière. Mr *Schooley* demande s'il y aurait avantage à utiliser des équations différentes dans des domaines différents, conservant ainsi aux équations une forme plus simple. Mr *Rusby* fait remarquer qu'il existe de nombreuses possibilités pour des schémas d'interpolation aux basses températures autres que les trois schémas qui sont discutés dans les Documents CCT/80-23 et CCT/80-52.

Mr *Kemp* demande s'il faut décider que les formules d'interpolation doivent passer par les points fixes de définition, ou s'il faut décider d'utiliser la méthode des moindres carrés. Mr *Bonnier* préfère la méthode des moindres carrés, mais lui et Mr *Coates* font remarquer qu'il faut spécifier la façon de pondérer les résultats. Le *Président*, Mr *Bedford* et Mr *Rusby* font observer qu'avoir une certaine redondance dans les points fixes présente l'avantage de pouvoir plus facilement détecter des erreurs dans l'étalonnage.

Mr *Schooley* demande si l'on pourrait donner des valeurs concernant la précision de l'échelle entre les points fixes, y compris la non-unicité. Mr *Quinn* répond que l'on ne dispose pas encore d'indication précise sur la non-unicité de l'EIPT-68 entre 0 °C et 630 °C. Mr *Coates* souligne l'importance qu'il y aurait à disposer bientôt de ce genre d'information. Le *Président* ajoute que des renseignements complémentaires de ce genre seraient aussi bienvenus pour le domaine compris entre le point triple de l'argon et 0 °C. Mr *Bedford* demande à Mr *Schooley* si Mr *Furukawa* a terminé la comparaison de thermomètres entre 90 K et 900 K qui était

annoncée dans le Document CCT/74-7. Mr Schooley répond que ces travaux ne sont pas encore faits.

Mr Crovini revient sur les indications de Mr Evans selon lesquelles un thermomètre à résistance de platine est stable, lorsqu'il est soumis à des cycles entre le point de congélation de l'aluminium et le point triple de l'eau, dans les limites qui correspondent à 0,1 mK au point triple de l'eau pour chaque cycle, soit environ 0,3 mK au point de congélation de l'aluminium. Il signale que c'est là une limitation tout à fait fondamentale à la précision que l'on peut atteindre.

g) *Domaine des basses températures (probablement 0,5 K-14 K)*

Mr Rusby déclare qu'il y a un choix à faire, soit définir une échelle qui peut être réalisée avec la précision la plus grande possible, soit accepter une échelle un peu plus commode à réaliser mais qui risque de manquer un peu d'unicité. Dans le premier cas, on doit se fier, pour le domaine allant de 4 K à 14 K, à des instruments thermodynamiques d'interpolation comme le thermomètre à gaz ou le thermomètre magnétique; dans le second cas, on peut fonder l'échelle sur le thermomètre à résistance de rhodium-fer. Si l'on effectue des étalonnages seulement par rapport aux pressions de vapeur de l'hélium au-dessous de 4,2 K, et par rapport à l'échelle du thermomètre à résistance de platine au-dessus de 13,8 K, la non-unicité de l'échelle entre 4,2 K et 13,8 K risque de se situer entre 2 mK et 4 mK. Si un étalonnage supplémentaire est effectué au point supraconducteur du plomb (7,2 K), elle peut être ramenée à 1 mK. Comme possibilité ultime, un autre étalonnage supplémentaire au point supraconducteur du niobium (9,3 K) permettrait une exactitude d'interpolation aussi bonne que celle de la réalisation des points fixes. A la place des pressions de vapeur de l'hélium on pourrait employer les étalonnages au point λ , au point d'ébullition de ^4He et aux points de transition supraconducteurs de quatre des cinq métaux du dispositif SRM 767.

Dans le cas d'un instrument thermodynamique d'interpolation pour définir l'échelle, le choix de Mr Rusby se porterait sur le thermomètre à gaz car ses techniques de construction et d'emploi sont nettement plus simples que celles du thermomètre magnétique; de plus, plusieurs laboratoires nationaux utilisent déjà le thermomètre à gaz dans le domaine 4,2 K-14 K.

Mr Schooley répète qu'il préfère que l'on élimine tous les points d'ébullition parce que les mesures de pression sont inconfortables. Il fait aussi remarquer que, puisque le thermomètre à résistance de platine demande un grand nombre de points d'étalonnage aux basses températures, il peut être souhaitable d'étendre le domaine du thermomètre d'interpolation thermodynamique à une température supérieure à 13,8 K. A cet égard, Mr Schooley attire l'attention sur un thermomètre à gaz que l'on met actuellement au point au NBS et qui ne nécessite pas de mesures de pression au moyen de manomètre. La pression

du gaz dans l'instrument est mesurée au moyen de la déformation d'un diaphragme (à basse température), qui fait varier une capacité et par conséquent la fréquence d'un circuit piloté par une diode tunnel. Le *Président* fait remarquer que si l'on choisit le thermomètre à gaz comme instrument de définition dans la nouvelle EIPT, on ne doit pas rejeter l'emploi d'autres versions du thermomètre à gaz classique à volume constant, par exemple le thermomètre à gaz à constante diélectrique, le thermomètre à gaz à indice de réfraction, ou l'instrument mentionné par Mr Schooley.

Mr *Besley* rappelle qu'il est nécessaire d'éviter une discontinuité de la pente, à 13,8 K.

Mr *Durieux* souligne qu'il est important de poursuivre les recherches sur la préparation des échantillons servant à réaliser les points de transition supraconducteurs des cinq métaux utilisés dans le dispositif SRM 767 parce que, pour le moment, la dispersion de ces points est de l'ordre de 1 mK pour chaque métal. Mr *Schooley* dit que les recherches se poursuivent au NBS; il espère que d'autres laboratoires vont faire de même. Il a reçu des échantillons de Mr *Astrov*; ils sont actuellement en cours de comparaison, au NBS, à des dispositifs SRM 767.

6. Programmes futurs du CCT et des Groupes de travail

a) Programme futur du CCT

Le *Président* propose que le CCT s'en tienne au programme élaboré lors des sessions précédentes : tout d'abord, préparer une nouvelle EIPT, avec 1987 comme date prévue pour son adoption, et en second lieu fournir des Renseignements complémentaires sur la réalisation de l'échelle actuelle et de la nouvelle échelle, et des renseignements sur les mesures secondaires de température. Le CCT est d'accord.

b) Prochains travaux des Groupes de travail

Les attributions des Groupes de travail, révisées en 1976, sont demeurées inchangées en 1978. Le *Président* estime que le moment est venu de modifier ces attributions; il propose aussi de ramener le nombre des Groupes de travail de cinq à quatre. Les membres du CCT adoptent le programme suivant :

Groupe de travail 1

- 1) Préparation d'un projet contenant les grandes lignes d'une nouvelle EIPT, sous une forme destinée à être discutée par le CCT en 1982.
- 2) Préparation d'un document contenant les Renseignements complémentaires sur l'EIPT; ce document devrait être prêt à publier, après discussion par le CCT en 1982; il serait révisé périodiquement par la suite.

Groupe de travail 2

1) Poursuite de l'étude des points de référence secondaires qui sont proposés ou qui existent.

2) Préparation d'un document décrivant une bonne pratique de la thermométrie, portant sur les techniques secondaires y compris les réalisations secondaires de l'EIPT, mais à l'exclusion des points traités dans le Document du GT1. Un premier projet doit être présenté au CCT, en 1982.

Groupes de travail 3 et 4, considérations générales

Le *Président* propose que les anciens GT3, GT4 et GT5 soient remplacés par deux nouveaux Groupes de travail qui fourniraient au GT1 tous les renseignements nécessaires à la rédaction du projet de nouvelle EIPT. Le GT3 serait chargé du domaine de température couvert par le thermomètre à résistance de platine, c'est-à-dire probablement de 14 K à 1 064 °C, et le GT4 des températures inférieures à 14 K.

Cette proposition est longuement discutée parce qu'elle charge le GT3 de tâches aussi diverses que l'évaluation du comportement des thermomètres à résistance de platine pour la mesure des hautes températures, et l'étude des méthodes d'interpolation aux basses températures; mais on en arrive finalement à la conclusion que cet inconvénient est compensé par l'avantage de ne pas devoir scinder de façon artificielle le domaine du thermomètre à résistance de platine.

Mr *Quinn* exprime encore ses craintes à l'égard de la disponibilité et de l'emploi des thermomètres à résistance de platine pour la mesure des hautes températures. Le *Président* fait remarquer que si l'on ne dispose pas des thermomètres à temps, le CCT tiendra compte de ces circonstances indépendantes de sa volonté; en aucun cas, il ne doit recommander quelque chose de médiocre seulement pour satisfaire aux échéances fixées.

Mr *Kemp* fait observer que les mesures de température thermodynamique et l'évaluation des résultats de ces mesures, qui étaient de la compétence des anciens GT3 et GT4, sont encore d'une grande importance pour la nouvelle échelle. Le *Président* est d'accord sur cette remarque. Il est convenu que Mr *Rusby* et Mr *Durieux* resteront responsables de la communication au CCT des nouvelles équations de pression de vapeur de l'hélium.

Finalement, les tâches spécifiques du GT3 et du GT4 seront les suivantes :

Groupe de travail 3

1) Préparation, pour la nouvelle EIPT, des équations d'interpolation pour le domaine de température (probablement 14 K à 1 064 °C) couvert par le thermomètre à résistance de platine.

2) Choix d'une température de jonction entre le domaine du thermomètre à résistance de platine et celui du pyromètre optique.

3) Choix de points fixes dans le domaine du thermomètre à résistance de platine.

4) Choix, en liaison avec le GT4, de la limite inférieure du domaine de température dans lequel le thermomètre à résistance de platine définira l'EIPT.

5) Organisation d'une comparaison portant sur le comportement des thermomètres à résistance de platine pour la mesure des hautes températures, actuellement en cours de mise au point ou prêts à fabriquer ; évaluation des résultats de cette comparaison.

6) Étude des mesures de température thermodynamique au-dessus de 14 K.

Groupe de travail 4

Élaboration des recommandations sur tous les aspects d'une nouvelle EIPT au-dessous du domaine du thermomètre à résistance de platine et, en collaboration avec le GT3, détermination de la limite inférieure du domaine du thermomètre à résistance de platine.

c) *Composition des Groupes de travail*

La composition des Groupes de travail est la suivante :

Groupe de travail 1 :

Mr Preston-Thomas, Président
Mr Bloembergen
Mr Quinn

Groupe de travail 2 :

Mr Bedford, Président
Mr Bonnier
Mr Maas
Mr Pavese

Groupe de travail 3 :

Mr Crovini, Président
Mr Coates
Mr Kemp
Mr Ling
Mr Schooley
Mr Thomas

Groupe de travail 4 :

Mr Hudson, Président
Mr Durieux
Mr Rusby
Mr Swenson

7. Publication des documents

Rappelant une note concernant les publications du BIPM, qui a été diffusée en janvier 1980, Mr *Giacomo* propose que les travaux provenant du CCT et qui sont d'un intérêt général soient publiés dans *Metrologia*, tandis que les informations qui n'ont d'intérêt spécifique que pour le CCT (par

exemple le Rapport de la 13^e session, les rapports des Groupes de travail, et peut-être quelques-uns des autres documents soumis au CCT) soient publiées dans *Comité Consultatif de Thermométrie*. Seule serait publiée la liste complète des documents présentés au CCT, mais tous les documents pourraient être obtenus auprès du BIPM. Les membres du CCT donnent leur accord.

Mr Schooley demande s'il faut publier dans *Metrologia* (ou ailleurs) une nouvelle liste complète des points de référence secondaires, avec les renseignements dont on dispose sur l'exactitude des valeurs et sur la pureté requise des échantillons. Les membres du CCT sont d'accord pour l'envisager.

Il avait été convenu, lors des précédentes sessions du CCT, que tous les documents devaient parvenir au BIPM au moins deux mois avant l'ouverture de la session. L'importance de cette règle est soulignée par plusieurs personnes. Sinon, il devient impossible aux membres du CCT de discuter des documents avec les experts dans leur laboratoire. Cela est en particulier valable pour les rapports des Groupes de travail, qui constituent la base d'une grande partie des discussions au cours des réunions.

Il est convenu que, pour la prochaine session du CCT, les documents qui parviendront au BIPM au moins deux mois avant la session seront diffusés par le BIPM. Les autres ne seront diffusés que dans la mesure du possible. Le BIPM dressera une liste de tous les documents reçus, avec l'indication de leur date d'arrivée. En réponse à une question de Mr Schooley, Mr Giacomo précise que des copies des documents peuvent toujours être obtenues sur demande adressée au BIPM.

8. Questions diverses

a) Rapport et Recommandations du CCT au CIPM

Un bref rapport de cette session sera présenté au CIPM. Un certain nombre de recommandations portant sur les travaux à faire en thermométrie accompagnent généralement ce rapport. Un échange de vues a lieu sur l'opportunité de recommandations de ce genre. Mr Gott, Mr Kemp et Mr Coates sont d'avis qu'elles peuvent être utiles. Mr Gott et Mr Coates acceptent de préparer des propositions précises. Ces propositions sont discutées, puis adoptées par le CCT (voir Rapport de la 13^e session).

b) Prochaine session du CCT et « 6th Temperature Symposium » (États-Unis d'Amérique, mars 1982)

Le « 6th Symposium on Temperature, its Measurement and Control in Science and Industry » se tiendra à Washington du 15 au 18 mars 1982. La

plupart des membres du CCT assisteront probablement à ce Symposium et pour la plupart d'entre eux il serait commode, pour l'organisation des voyages, que la réunion du CCT et le Symposium ne se tiennent pas à plus d'une ou deux semaines d'écart.

En conséquence, on convient que la prochaine session du CCT aura lieu du 30 mars au 1^{er} avril 1982, à Sèvres.

c) *Remarques diverses*

Mr Schooley signale une brève description (en anglais) dans *PTB Mitteilungen*, N° 90, janvier 1980, du fonctionnement du thermomètre à gaz du NBS.

Mr Quinn attire l'attention du CCT sur le programme futur du BIPM en thermométrie, puisqu'il incombe au CCT de donner son avis au Directeur du BIPM sur ce programme. A l'heure actuelle, les recherches thermométriques du BIPM sont limitées aux travaux sur les cellules scellées à point triple et les mesures des intervalles de température thermodynamique entre 419 °C et 630 °C par pyrométrie optique. Cette année cependant, le CIPM a demandé au BIPM de faire un projet de plan à long terme des activités futures. Bien que les perspectives d'un accroissement significatif en personnel ou en ressources soient assez lointaines, au BIPM on considère qu'une extension des activités en thermométrie serait utile. On envisage d'entreprendre des mesures spectroradiométriques et une extension des travaux en pyrométrie optique constituerait un complément approprié. En ce qui concerne le domaine des basses températures, les travaux qui devraient être faits dépendent évidemment de la forme que revêtira la nouvelle EIPT, mais on propose que les travaux sur les cellules scellées à point triple soient étendus de façon à couvrir un domaine de température plus large. En ce qui concerne le domaine des températures ambiantes, on a besoin de réaliser des étalonnages avec le niveau d'exactitude le plus élevé pour les autres travaux effectués au BIPM. On s'intéresse aussi aux thermomètres à résistance de platine pour la mesure des hautes températures compte tenu des travaux qui ont été effectués en pyrométrie optique au-dessous du point de congélation de l'or. Mr Quinn sollicite des commentaires et des suggestions sur ces propositions. Des questions seront probablement posées aux membres du CCT dans leurs laboratoires respectifs, car le BIPM a demandé avis aux directeurs des laboratoires nationaux.

Mr Schooley indique qu'effectivement on lui a demandé son avis ; au NBS, on pense que le BIPM doit être l'endroit privilégié pour les comparaisons internationales, comme celles qui ont eu lieu dans le passé pour les thermomètres à résistance de germanium, les thermomètres à résistance de platine et les cellules scellées à point triple, en particulier pour tout ce qui concerne la partie administrative des programmes de comparaison.

Mr *Pavese* fait remarquer que, puisque les cellules scellées à point triple constitueront probablement les instruments essentiels pour réaliser les points fixes de la nouvelle EIPT, il serait utile que des « cellules étalons » soient conservées au BIPM exactement comme le sont des étalons de masse ou de résistance. En liaison avec cette idée, Mr *Giacomo* dit que le BIPM souhaite toujours rassembler des cellules à point triple de l'eau ; il vient juste de recevoir une cellule du NIM.

Mr *Crovini* fait remarquer qu'il est nécessaire de faire des recherches sur les étalons de transfert pour les températures supérieures à 1 800 °C environ, en particulier sur les lampes à ruban remplies de gaz.

Mr *Ling* transmet au CCT une invitation du Directeur du NIM pour que le CCT tienne sa prochaine session à Beijing. Le *Président* remercie le Directeur du NIM au nom du CCT, mais fait remarquer que le CIPM préfère que les réunions des Comités Consultatifs se tiennent au BIPM.

*
* *

Avant de lever la séance, le *Président* remercie tous les participants pour leur coopération pendant la session, Mr *Giacomo* et ses collaborateurs pour l'aide matérielle apportée au cours des réunions.

Reçu le 23 octobre 1980.

ANNEXE T 1

**Documents de travail présentés
à la 13^e session du CCT**

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

Document
CCT/

- 80-1 Polski Komitet Normalizacji I Miar (Pologne).- Etude sur le point thermométrique du sodium.
- 80-1bis Polski Komitet Normalizacji I Miar (Pologne).- The pressure coefficient of the sodium freezing point, by J. Butkiewicz and W. Gizmajer.
Ce document a été distribué après la session du CCT, en août 1980.
- 80-2 H.H. Wills Physics Laboratory (Royaume-Uni).- Dielectric constant gas thermometry of ⁴He from 4.2 - 27.1 K, by D. Gagan and G.W. Michel.

Document

CCT/

- 80-3 NML (Australie).- The thermocouple as an IPTS interpolation instrument, by R.E. Bentley and T.P. Jones.
- 80-4 Report of Working Group 3 to the CCT (voir Annexe T 4).
- 80-5 Third Report of Working Group 5 : Practical thermometers for temperatures below 30 K (voir Annexe T 6).
- 80-6 NML (Australie).- Comments on the use of germanium resistance thermometers as secondary standards for temperature scales below 30 K, by L.M. Besley.
- 80-7 NRC (Canada).- Temperature dependent transmittance of residual films on glasses, by M. Ohtsuka, R.E. Bedford and C.K. Ma.
Publié dans Metrologia, 15, 1979, pp. 165-166.
- 80-8 NRC (Canada).- Size-of-source effects in optical pyrometry, by M. Ohtsuka and R.E. Bedford.
- 80-9 NRC (Canada).- On the temperature interval between the freezing points of silver and copper, by M. Ohtsuka and R.E. Bedford.
- 80-10 NRC (Canada).- The copper freezing point as an alternative to the gold freezing point in the IPTS, by R.E. Bedford.
- 80-11 NRC (Canada).- Secondary realizations of the IPTS-68 defined by platinum/rhodium thermocouples, by R.E. Bedford and C.K. Ma.
- 80-12 Report 5 of Working Group 2 to the CCT (voir Annexe T 3).

Document

CCT/

- 80-13 NRLM (Japon).- Introduction of a new concept "effective temperature" to radiant characteristics analysis of non-isothermal cavities, by S. Hattori. Publié dans Trans. of Soc. Inst. Cont. Eng., 15, 1979, pp. 847-848.
- 80-14 NRLM (Japon).- Calculation of the directional emissivities of cavities by the Monte Carlo method, by A. Ono. Publié dans J. Opt. Soc. Am., 70, 1980, pp. 547-554.
- 80-15 NRLM (Japon).- An absolute radiometer for total radiation thermometry, by A. Ono. Publié dans Metrologia, 15, 1979, pp. 127-133 ; Jap. J. Appl. Phys., 18, 1979, pp. 697-698 ; Ibid., 18, 1979, pp. 1995-2002.
- 80-16 NRLM (Japon).- An observation of the freezing point of copper by radiation thermometry, by F. Sakuma and S. Hattori. A paraître dans Trans. of Soc. Inst. Cont. Eng.
- 80-17 NRLM (Japon).- A method of narrow band silicon radiation thermometer calibration by fixed point blackbody furnaces, by F. Sakuma and S. Hattori. A paraître dans Trans. of Soc. Inst. Cont. Eng.
- 80-18 NRLM (Japon).- Status report of temperature scale comparison between the platinum resistance thermometer and the radiation thermometer, by F. Sakuma and S. Hattori.
- 80-19 NRLM (Japon).- Reproducibility of superconductive transition temperature of lead and indium, by A. Inaba and K. Mitsui. A paraître dans Metrologia.

Document
CCT/

- 80-20 NRLM (Japon).- Superconductive transition point of tantalum and niobium as a reference temperature, by A. Inaba.
A paraître dans Jap. J. Appl. Phys., 19, 1980, pp. 1553-1559.
- 80-21 NRLM (Japon).- Realization of the triple point of indium in sealed glass cell, by S. Sawada.
A paraître dans Bulletin of NRLM.
- 80-22 NRC (Canada).- Platinum oxidation effects in standard resistance thermometers, by R.J. Berry.
- 80-23 NML (Australie).- Interpolation methods for platinum resistance thermometers between 13.81 K and 273.15 K, by R.C. Kemp, W.R.G. Kemp and L.M. Besley.
- 80-24 IMGC (Italie).- New low temperature fixed points measured at IMGC, by F. Pavese.
- 80-25 IMGC (Italie).- The use of triple point of gases in sealed cells as pressure transfer standards : oxygen (146.25 Pa), methane (11 696 Pa) and argon (68 890 Pa), by F. Pavese.
- 80-26 IMGC (Italie).- The role of the freezing point of copper in the International Practical Temperature Scale, by T. Ricolfi and F. Righini.
- 80-27 NPL (Royaume-Uni).- Measurement of ($t - t_{68}$) between 440 and 630 °C, by P.B. Coates, J.W. Andrews and M.V. Chattle.
- 80-28 NRLM (Japon).- Realization of EPT-76 by using a practical gas thermometer, by H.Sakurai and K. Mitsui.
A paraître dans Bulletin of NRLM.

Document

CCT/

- 80-29 NRLM (Japon).- Note on the convergency of the iteration calculation of W-T relation in IPTS-68 below 0 °C, by H. Sakurai.
Publié dans Rep. of NRLM, 28, 1979, pp. 341-345.
- 80-30 NBS (Etats-Unis d'Amérique).- Summary of recommendations to the CCT from the NBS, by J.F. Schooley.
- 80-31 NBS (Etats-Unis d'Amérique).- High temperature platinum resistance thermometry at NBS : a report to the CCT, by J.P. Evans.
- 80-32 NBS (Etats-Unis d'Amérique).- Transfer of high temperature platinum resistance thermometry techniques from NBS : A proposal to the CCT, by J.P. Evans.
- 80-33 NBS (Etats-Unis d'Amérique).- Defining fixed points of the IPTS, by G.T. Furukawa.
- 80-34 NBS (Etats-Unis d'Amérique).- Reproducibility of platinum resistance thermometer calibration at NBS and the triple point of argon in transportable sample cells, by G.T. Furukawa.
- 80-35 NBS (Etats-Unis d'Amérique).- Insulation support for standards-type platinum resistance thermometers, by G.T. Furukawa and B.W. Mangum.
- 80-36 NBS (Etats-Unis d'Amérique).- On the question of an IPTS below 1 K, by R.P. Hudson and B.W. Mangum.
- 80-37 NBS (Etats-Unis d'Amérique).- Triple point of gallium as a temperature fixed point, by B.W. Mangum.
- 80-38 NBS (Etats-Unis d'Amérique).- NBS-Cryogenic temperature scale-1, by H. Marshak and R.J. Soulen Jr.

Document
CCT/

- 80-39 NBS (Etats-Unis d'Amérique).- Realization of EPT-76 at the NBS, by E.R. Pfeiffer and R.S. Kaeser.
- 80-40 NBS (Etats-Unis d'Amérique).- Progress of research on the NBS SRM 767 superconductive fixed point device, by J.F. Schooley.
- 80-41 NBS (Etats-Unis d'Amérique).- Extension of the IPTS below 30 K, by J.F. Schooley, R.J. Soulen Jr. and H. Marshak.
- 80-42 BIPM.- Comparaison de cellules à point triple de l'eau, par J. Bonhore.
- 80-43 IMGC (Italie).- On the relationship between the future IPTS and the thermodynamic temperature between 0 °C and 1100 °C, by L. Crovini and A. Actis.
- 80-44 Lettre du Président de la Commission I.4 de l'UICPA au CCT.
- 80-45 BIPM.- A note on the calculation of the emissivity of cylindrical near-blackbody cavities having diffusely reflecting walls, by T.J. Quinn.
- 80-46 ASMW (Rép. Dém. Allemande).- Secondary realization of the IPTS-68 in the range 83.798 K to 273.15 K, by P. Seifert.
- 80-47 ASMW, Akademie der Wissenschaften der DDR (Rép. Dém. Allemande).- Impulse blackbody radiation source at a temperature of 12 000 K for metrological purposes, by E. Geyer, K. Günther and S. Lang.
- 80-48 ASMW (Rép. Dém. Allemande).- A possible systematic error at the calibration of thermocouples by means of the wire method, by H. Maas and W. Heyne.

Document
CCT/

- 80-49 ASMW (Rép. Dém. Allemande).- Investigation of the reproducibility of the water triple point temperature, by H. Mittelstädt and H. Maas.
- 80-50 ASMW (Rép. Dém. Allemande).- International intercomparison measurements of triple points of water, by H. Maas, S. Lau and H. Mittelstädt.
- 80-51 NPL (Royaume-Uni).- Realizations of the triple points of argon and neon at NPL, by S.D. Ward.
- 80-52 NPL (Royaume-Uni).- Fixed points and deviation functions for the IPTS below 0 °C, by S.D. Ward and R.L. Rusby.
- 80-53 Report of Working Group 1 : Supplementary information for the IPTS-68.
- 80-53bis Résumé du Document 80-53. Ce résumé a été établi après la session (voir Annexe T 2).
- 80-54 INM (France).- Analyse du comportement thermique des cellules scellées, par G. Bonnier et Y. Hermier.
- 80-55 IMGC (Italie).- International intercomparison of fixed points by means of sealed cells. Preliminary report to the CCT of the measurements updated to May 15, 1980.
- 80-56 NPL (Royaume-Uni).- Stability and interpolation characteristics of rhodium-iron resistance thermometers, by R.L. Rusby.
- 80-57 Harbin Institute of Technology (Rép. Pop. de Chine).- The evaluation of the emissivity and the temperature of cavities at the gold freezing point, by Chen Hongpan, Chen Shouren and Chu Zaixiang.

Document
CCT/

- 80-58 NIM (Rép. Pop. de Chine).- A proposed platinum resistance temperature scale (13.81 K - 273.15 K), by Dai Le Shan and Ling Shan Kang.
- 80-59 NIM (Rép. Pop. de Chine).- A Stable high temperature platinum resistance thermometer, by Li Xumo, Zhang Jinde, Chen Deming and Su Jinrong.
- 80-60 NIM (Rép. Pop. de Chine).- The photoelectric comparator of high temperature standard, by Zhao-Qi and Deng-Xixiang.
- 80-61 IMT (Tchécoslovaquie).- Czechoslovak high temperature resistance thermometer, by L. Hudoba et M. Borovicka.
- 80-62 IMT (Tchécoslovaquie).- Freezing point of aluminium by E. Miklesova, M. Borovicka et L. Hudoba. Publié dans Ceskoslovenska Standardizace, 7, 1980, pp. 271-276.
- 80-63 IMM (URSS).- A propos du projet de l'EIPT, par B.N. Oleinik.
- 80-64 IMM (URSS).- Réalisation de l'échelle de température thermodynamique par le rayonnement thermique, par B.N. Oleinik.
- 80-65 NPL (Royaume-Uni), KOL (Pays-Bas).- Helium vapour pressure equations on the EPT-76, by R.L. Rusby, M. Durieux and H. ter Harmsel.
- 80-66 KOL (Pays-Bas).- Determination of the superconductive transition point of niobium, by M. Durieux and G.P. van der Meij.

Document

CCT/

- 80-67 KOL (Pays-Bas).- Preliminary gas thermometer measurements between 27 K and 90 K, by J.E. van Dijk, E.J. Kruithof, P. Steur, H. ter Harmsel and M. Durieux.
- 80-68 Report of Working Group 4 to the CCT (voir Annexe T 5).
- 80-69 NML (Australie).- Gas thermometry at NML, by R.C. Kemp, W.R.G. Kemp and P.W. Smart.
-

ANNEXE T 2

Résumé du Rapport du Groupe de travail 1 *

(Révision de l'EIPT)

(Traduction du Document CCT/80-53bis)

Le 5^e Rapport du Groupe de travail 1 est en fait un projet préliminaire des Renseignements complémentaires à l'EIPT et à l'EPT-76, dont les principaux chapitres sont : Points fixes, Thermomètres à résistance, Thermocouples platine/platine rhodié à 10 %, Pyrométrie optique et Basses températures de 0,05 K à 30 K.

Il est prévu de présenter les Renseignements complémentaires sous la forme d'une monographie pratique pour les thermométristes qui veulent réaliser une partie quelconque de l'EIPT ; les Renseignements aborderont aussi les techniques de mesures étroitement associées (points de référence secondaires, lampes à ruban de tungstène, etc.) qui peuvent être utiles aux thermométristes. Cette monographie ira de pair avec celle que doit préparer le Groupe de travail 2 sur les mesures de température à un niveau secondaire.

* Les membres de ce Groupe de travail sont MM. H. PRESTON-THOMAS, Président, Conseil National de Recherches (Canada), P.B. COATES, National Physical Laboratory (Royaume-Uni), R.C. KEMP, National Measurement Laboratory (Australie), J.F. SCHOOLEY, National Bureau of Standards (USA).

Le projet préliminaire, qui est très succinct, doit subir une révision importante et il y sera fait des additions. Les modifications résulteront des discussions qui auront lieu pendant la 13^e session (1980) du CCT et des apports ultérieurs faits par les membres du CCT au Groupe de travail 1. On espère soumettre à la 14^e session (1982) du CCT une version de cette monographie prête à être publiée.

Reçu en décembre 1980.

ANNEXE T 3

5^e Rapport du Groupe de travail 2 *

(Points fixes secondaires et échelles secondaires)

(Traduction du Document CCT/80-12)

1. Introduction

Dans ce rapport nous continuons la compilation d'une liste de points de référence secondaires à inclure éventuellement dans les "Renseignements Complémentaires" d'une future Echelle Internationale Pratique de Température (EIPT). Si l'on tient compte du désir exprimé de diverses parts d'avoir des points de référence secondaires beaucoup plus rapprochés dans une EIPT révisée (en particulier dans le domaine de - 100 °C à 400 °C), il est important d'avoir une liste étendue dans laquelle choisir. La liste actuelle (Tableau I) doit être considérée comme un supplément à la liste des points de référence secondaires publiée en 1976 dans le 3^e rapport du Groupe de travail 2 [1].

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

Nous espérons que la publication de cette liste, bien qu'utile en soi, conduira à de nouvelles déterminations plus exactes de certains des points de référence.

En accord avec la tâche confiée au Groupe de travail 2 par le CCT lors de sa 12^e session (1978), ce rapport examine dans le détail les différentes possibilités de réalisations secondaires de l'EIPT, en particulier l'utilisation des thermocouples platine/rhodium au voisinage de 0 °C. Nous présentons un ensemble assez large de résultats qui montrent quelles exactitudes peuvent être atteintes avec différents types de thermocouples en utilisant l'étalonnage de points fixes choisis, ainsi que les différences par rapport aux tables de référence étalons.

Nous étudions aussi les mérites relatifs des éventuelles réalisations secondaires de l'EIPT au-dessous de 0 °C qui ont été proposées. Enfin, nous présentons des résultats se rapportant à la possibilité d'une réalisation secondaire au moyen d'étalonnages simples de thermomètres à résistance de platine de type industriel pour le domaine extrêmement important allant de - 100 °C à 200 °C.

2. Points de référence secondaires

Dans le tableau I, nous donnons trente points de référence secondaires et une relation pression de vapeur/température. Ces points de référence secondaires comprennent de nouvelles déterminations de points fixes donnés antérieurement (essentiellement dans le domaine cryogénique) [1], de récentes déterminations faites depuis la publication de la référence 1, et d'anciennes déterminations dont il n'avait pas été tenu compte auparavant. Plusieurs des points fixes maintenant retenus correspondent à des températures de luminance à des points de fusion ; nous pensons que ceux-ci sont particulièrement intéressants pour des étalonnages de pyromètres optiques parce qu'ils éliminent la nécessité, soit de connaître l'émissivité, soit de disposer d'une cavité corps noir, et parce qu'ils se prêtent à des étalonnages in situ. En revanche, ils dépendent de la longueur d'onde. La température de luminance à la fusion T_a varie avec la longueur d'onde λ approximativement selon :

$$d\overline{T}_a = \frac{\overline{T}_a^2}{\underline{c}_2} \left(\ln \underline{\varepsilon}_\lambda + \frac{\lambda}{\underline{\varepsilon}_\lambda} \frac{d\underline{\varepsilon}_\lambda}{d\lambda} \right) d\lambda,$$

où $\underline{\varepsilon}_\lambda$ est l'émissivité spectrale et \underline{c}_2 la seconde constante de rayonnement. Pour des longueurs d'onde voisines de la valeur conventionnelle 0,65 μm , et en utilisant les rares résultats [32] dont on dispose pour $\underline{\varepsilon}_\lambda$, on trouve que $d\overline{T}_a/d\lambda$ aux points de fusion des métaux purs varie de façon typique de 2 à 10 kelvins par 10 nm, \overline{T}_a diminuant lorsque λ augmente. Ainsi, il est important que la longueur d'onde effective du pyromètre utilisé pour mesurer une température de luminance à la fusion soit connue à mieux que 5 nm si l'on veut que le fait de dépendre de la longueur d'onde ne limite pas l'utilité des températures de luminance à la fusion figurant sur la liste.

Au tableau I, et pour chaque état d'équilibre, on indique colonne 2 la température mesurée dans l'EIPT-68, colonne 3 l'incertitude correspondante donnée par l'auteur, et colonne 5 la référence. Répétons qu'il est difficile, sinon impossible, pour le Groupe de travail 2 d'estimer convenablement les exactitudes des points fixes indiqués d'après les descriptions publiées. Colonne 4, on a classé les incertitudes en quatre catégories, selon les renseignements dont on dispose. Dans la plupart des cas, les déterminations différentes d'un même point fixe sont cohérentes dans les limites des incertitudes indiquées. Un critère général qui quelquefois n'est pourtant pas rempli, est qu'il devrait être impossible d'attribuer une incertitude totale plus petite que la non reproductibilité de l'EIPT-68.

Le Groupe de travail 2 a pris contact avec la Commission pour les Hautes Températures et les Matériaux Réfractaires de l'UICPA. Cette Commission est intéressée par la fourniture d'éta-
lons secondaires de points de fusion au-dessus de 2000 °C, surtout pour les besoins des chimistes travaillant aux températures élevées ; elle espère une collaboration internationale dans cet effort. Dans le passé, elle a suscité des recherches sur deux points de fusion d'oxydes réfractaires et pense en susciter d'autres dans l'avenir. Le Groupe de travail 2 est d'accord pour travailler en liaison avec cette Commission comme il le fait déjà

avec le Sous-Comité 1.4.1. de l'UICPA sur l'Étalonnage et les Matériaux d'Essais, qui s'occupe des points de référence secondaires au-dessous de 300 °C.

3. Réalisations secondaires de l'EIPT-68

La réalisation secondaire de l'EIPT-68 la plus directe, et probablement la plus exacte et la moins onéreuse, est obtenue à partir d'étalonnages d'instruments étalons effectués par un laboratoire national. Nous pensons qu'une réalisation de ce type, établie sur un nombre convenable d'instruments étalonnés, serait satisfaisante pour beaucoup de laboratoires qui estiment avoir besoin d'une réalisation secondaire définie. Nous recommandons aux laboratoires d'étudier cette façon d'opérer avant d'entreprendre d'autres réalisations secondaires.

3.1 Thermocouples platine-rhodium

Comme elle est destinée à des laboratoires où l'on n'a pas besoin de l'exactitude la plus élevée dans la mesure des températures et où l'on ne dispose pas toujours d'un haut niveau d'expérience en ce domaine, une réalisation secondaire de l'EIPT-68 définie officiellement doit être facile à mettre en oeuvre. Elle doit être définie en faisant appel à des méthodes simples et des instruments d'interpolation peu coûteux. A cet égard, le thermocouple est idéal.

Nous considérons ici la fiabilité des échelles définies dans le domaine de 0 °C à 1800 °C d'après les différents types de thermocouples platine/rhodium. Pour chaque type, l'échelle serait définie par l'étalonnage d'un thermocouple à plusieurs points fixes et l'utilisation d'une table de référence des forces électromotrices en fonction de la température pour effectuer l'interpolation entre les points fixes.

3.1.1 Platine-10 % rhodium/platine (10/0)

Seize thermocouples provenant de six fabricants ont été recuits en suivant essentiellement les prescriptions de l'EIPT-68. Ils ont été étalonnés aux points de congélation de l'étain, du zinc, de l'antimoine, de l'argent et de l'or, et ensuite comparés

entre eux dans divers groupes de bains liquides agités (0 °C à 350 °C), dans un four chauffé au moyen d'une résistance en carbure de silicium (100 °C à 1100 °C), et dans un four électrique tubulaire (100 °C à 1100 °C) [33]. Pour contrôler la fiabilité d'une échelle de température reposant sur ces thermocouples, nous avons, pour chaque thermocouple, établi par la méthode des moindres carrés un polynôme du second degré (passant par zéro) correspondant aux différences des forces électromotrices aux points fixes par rapport aux valeurs données dans les tables. Les écarts résiduels de ces ajustements étaient généralement d'environ 0,2 μV et, sur un total de 80, deux seulement étaient supérieurs à 0,5 μV . En utilisant la courbe associée au polynôme en liaison avec la fonction de référence [34], nous avons calculé les températures indiquées par chacun des thermocouples en cours de comparaison à des intervalles réguliers de température entre 0 °C et 1100 °C. Des détails complémentaires sur ces méthodes sont donnés par Bedford et Ma [35]. Les résultats figurent au tableau II dans les colonnes 1. Les nombres portés dans le corps du tableau sont les dispersions maximales entre les seize thermocouples pour chaque température. Ainsi les seize thermocouples donnent la même température à $\pm 0,05$ K, $\pm 0,15$ K et $\pm 0,2$ K, respectivement à 100 °C, 400 °C et 1100 °C. Cela est une excellente confirmation de l'exactitude de $\pm 0,2$ K donnée pour l'EIPT-68. Les valeurs généralement plus petites des dispersions obtenues en utilisant le four tubulaire sont quelque peu trompeuses. Dans les deux autres colonnes 1, tous les résultats observés ont été inclus ; pour le four tubulaire (pour lequel on a enregistré un très grand nombre d'observations), on a utilisé seulement une valeur moyenne pour chaque thermocouple. Si nous tenons compte de la variation de chaque thermocouple de part et d'autre de ces moyennes, les dispersions maximales avec le four tubulaire passeraient à 0,18 K pour 100 °C et iraient jusqu'à 0,51 K pour 1100 °C. Toutefois, les résultats dans le cas du four tubulaire sont obtenus dans des conditions dynamiques, tandis que les autres résultats le sont dans des conditions d'équilibre. Il s'ensuit que les résultats correspondant aux bains liquides et au four SiC devraient être plus représentatifs.

Dans le domaine de 630 °C à 1064 °C on a aussi calculé les températures indiquées par chaque thermocouple selon la définition de l'EIPT-68 (forme quadratique s'appuyant sur les points de l'antimoine, de l'argent et de l'or [35]). Les différences entre

t_{68} et les températures obtenues comme indiqué ci-dessus étaient généralement inférieures à 0,04 K avec une seule différence atteignant 0,08 K. Ces différences sont inférieures aux incertitudes de mesure. Ainsi, dans ce domaine, la réalisation secondaire proposée coïncide avec l'EIPT-68. Pour treize des dix-sept comparaisons dans des bains liquides agités, jusqu'à 350 °C (températures des bains mesurées avec un thermomètre à résistance de platine étalonné), la moyenne des températures données par les seize thermocouples était égale à t_{68} à $\pm 0,03$ K. Les quatre valeurs extrêmes atteignaient 0,06 K. Là aussi, la réalisation secondaire proposée reproduit l'EIPT-68.

Nous avons refait les calculs en supprimant les points de l'étain et de l'antimoine de l'ajustement de la courbe de déviation. Les résultats sont donnés dans les colonnes 2. De la même façon, dans les colonnes 3, on donne les résultats en utilisant seulement 0 °C, et les points du zinc et de l'or pour déterminer les courbes de déviation. Il y a peu de dégradation avec ces courbes plus simples.

Six de ces thermocouples ont été étalonnés aux points du palladium et du platine par la méthode du fil, et ensuite comparés entre eux en différents groupes dans un four à haute température, de 1100 °C à 1750 °C. Des polynômes du second degré ont été ajustés par la méthode des moindres carrés à l'étalonnage aux points de l'antimoine, de l'argent, de l'or, du palladium et du platine, et la reproductibilité des températures calculée comme précédemment. La température retenue pour le point du palladium est celle qui a été récemment mesurée par Jones et Hall (1555 °C) [26]. Les résultats sont portés au tableau II ; tous les thermocouples concordent à $\pm 0,05$ K. Cette exactitude est excellente si l'on tient compte des faits suivants : (a) la reproductibilité des étalonnages aux points du palladium et du platine par la méthode du fil est d'environ ± 4 μ V ; (b) l'exactitude des températures attribuées aux points du palladium et du platine est de $\pm 0,5$ K environ ; (c) la table de référence indiquait 1767,6 °C pour le platine, aussi avons-nous utilisé cette valeur bien que la valeur recommandée soit maintenant 1769 °C ; (d) les écarts résiduels de l'ajustement de la courbe de déviation pouvaient atteindre 6 μ V, mais étaient généralement inférieurs à 3 μ V.

3.1.2 Platine-13 % rhodium/platine (13/0)

On a procédé, avec neuf thermocouples platine-13 % rhodium/platine provenant de sept fabricants [35], à une expérience identique à celle qui a été exposée dans le paragraphe 3.1.1. Les résultats sont donnés au Tableau III. Leur exactitude est légèrement plus grande avec les thermocouples 13/0 qu'avec les thermocouples 10/0 au-dessous de 1100 °C, mais sur un échantillonnage plus petit. Au-dessus de 1100 °C, les résultats sont semblables.

En comparant les thermocouples 10/0 aux thermocouples 13/0 on remarque que : a) les écarts résiduels d'ajustement de la courbe des thermocouples 13/0 sont quelque peu, mais pas nettement, plus petits que pour les thermocouples 10/0 ; b) les exactitudes des températures sont pour le moins plus élevées pour les thermocouples 13/0 ; c) les thermocouples 13/0 sont légèrement plus sensibles que les thermocouples 10/0 ; d) dans d'autres études [33, 36], les thermocouples 13/0 sont éventuellement plus stables que les thermocouples 10/0 ; e) il existe un nombre nettement plus grand de publications illustrant le comportement des thermocouples 10/0 que celui des thermocouples 13/0.

3.1.3 Platine-rhodium/platine-rhodium (20/5, 40/20 et 40/10)

Le NRC disposait d'une quantité considérable de résultats [37, 38] qui lui ont permis de faire des calculs identiques à ceux indiqués plus haut, pour les thermocouples 20/5 (treize thermocouples), 40/20 (dix thermocouples) et 40/10 (neuf thermocouples). Pour ceux-ci, on avait étalonné des thermocouples provenant de trois fabricants et jusqu'à cinq lots de fils, aux points fixes jusqu'au palladium (mais à l'exclusion de l'étain) ; on les a comparés entre eux plusieurs fois entre 100 °C et 1500 °C à intervalles de 100 K dans un four SiC. Par la suite, le point du platine a été utilisé et les thermocouples comparés entre eux entre 1500 °C et 1750 °C à intervalles de 50 K dans le four à haute température. On a calculé les exactitudes des températures obtenues avec ces thermocouples de la même façon que pour les thermocouples 10/0 et 13/0 [35]. Les résultats figurent au tableau IV.

Les faibles exactitudes des températures obtenues avec les thermocouples 40/20 et 40/10 au-dessous de 600 °C sont une conséquence directe de leur insensibilité dans cette région. De toute façon, dans le contexte actuel, nous nous intéressons seulement à leur fonctionnement au-dessus de 1000 °C. Pour les thermocouples 20/5, l'exactitude des températures est de $\pm 0,2$ K jusqu'à 1000 °C, $\pm 0,3$ K jusqu'à 1400 °C et $\pm 0,5$ K au-dessus. Pour les thermocouples 40/10, l'exactitude est comparable au-dessus de 1000 °C. Pour les thermocouples 40/20, dont la sensibilité est moitié moindre, elle est quelque peu moins bonne.

Ces résultats montrent qu'un thermocouple à deux alliages de platine-rhodium peut constituer une base satisfaisante pour une réalisation secondaire de l'EIPT-68 au-dessus de 1100 °C. Malheureusement, nous ne disposons pas de résultats de comparaison semblables pour étudier les thermocouples 30/6 (voir paragraphe 3.1.4). Nous pensons toutefois que leur comportement serait comparable à celui des thermocouples 20/5 et 40/10. Cela constituerait un choix logique comme base d'une réalisation secondaire : leur table de référence est en effet acceptée sur le plan international.

Bien que les tableaux II et III semblent indiquer que les thermocouples 10/0 et 13/0 donnent des températures aussi exactes au-dessus de 1100 °C que ceux à deux alliages, on sait d'après d'autres travaux publiés qu'ils sont moins stables et dérivent plus rapidement à long terme. Nous ne les recommanderions certainement pas comme base d'une réalisation secondaire au-dessus de 1500 °C, et probablement pas au-dessus de 1100 °C. La possibilité de définitions qui se recouvrent présente cependant un intérêt.

3.1.4 Platine-30 % rhodium/platine-6 % rhodium (30/6)

Le thermocouple 30/6 est déjà utilisé comme base d'une échelle secondaire dans les pays du Conseil d'Assistance Economique Mutuelle. L'échelle est définie au moyen d'étalonnages de points fixes et des différences de ceux-ci par rapport à une table de référence étalon [34]. Des comparaisons de réalisation de cette échelle dans six laboratoires nationaux (Rép. Démocratique Allemande, Union Soviétique, Pologne, Tchécoslovaquie, Hongrie, Bulgarie) ont été coordonnées par l'ASMW. Chaque laboratoire de métrologie a soumis deux thermocouples qui avaient été fabriqués par des sociétés situées en Rép. Démocratique Allemande,

Union Soviétique, USA et Rép. Fédérale d'Allemagne. Les thermocouples ont été étalonnés aux points de fusion et de congélation de l'antimoine, de l'argent, de l'or, du palladium et du platine. A l'ASMW, la méthode du creuset a été en plus utilisée pour le point du palladium.

Généralement, dans chaque laboratoire de métrologie, les douze thermocouples ont été étalonnés à tous les points fixes indiqués, puis transportés dans un autre laboratoire et étalonnés d'une façon similaire. L'étalonnage fait à l'ASMW a marqué la fin des mesures de comparaison.

Après l'étude des résultats de ces comparaisons, on a considéré que les échelles étaient équivalentes.

Les principaux résultats sont donnés au Tableau V.

V1 représente l'écart systématique maximal des échelles l'une par rapport à l'autre aux points fixes indiqués. Les valeurs de V1, équivalentes à environ 0,5 K au-dessous du point de l'or et à environ 1,0 K au-dessus, correspondent essentiellement aux erreurs systématiques résultant de la présence d'impuretés légères dans le métal utilisé pour les points fixes et des défauts de l'installation d'étalonnage. La différence entre les échelles établies avec grand soin (métaux de grande pureté et installation très fiable) ne montrait pas d'écart systématique supérieur aux erreurs aléatoires pendant l'étalonnage lui-même (moins de 0,1 K aux points de l'antimoine et de l'or et environ 0,3 K au point du platine).

V2 représente l'écart-type des résultats d'étalonnage obtenus avec les deux thermocouples de l'ASMW (valeur moyenne) aux points fixes correspondants (l'écart systématique de la valeur des points fixes pour chaque laboratoire de métrologie a été corrigé). Cette valeur est une expression de la stabilité et de la reproductibilité d'une échelle de température établie au moyen de ces thermocouples étalonnés. Dans les limites de ces incertitudes, les thermocouples ne font pas apparaître de dérive significative (après sept étalonnages jusqu'au point du platine).

V3 représente les écarts-types des étalonnages des douze thermocouples à chaque point fixe, à l'ASMW. Ces valeurs sont essentiellement une indication des erreurs provenant de la méthode et de l'installation d'étalonnage.

V4, correspondant à V3, représente les écarts-types obtenus quand on inclut les étalonnages de six laboratoires, c'est-à-dire de tous les laboratoires participants.

Les différences systématiques entre la méthode du creuset et la méthode du fil n'excèdent pas $1,9 \mu\text{V}$ (équivalent à $0,2 \text{ K}$) pour le point de l'or et $6,0 \mu\text{V}$ (équivalent à $0,5 \text{ K}$) pour le point du palladium (valeur de l'ASMW). La méthode du fil donne des valeurs d'étalonnage plus élevées que la méthode du creuset, probablement à cause d'effets dynamiques.

Une extrapolation de la courbe d'étalonnage à 2042 K sans considération de la valeur obtenue au point du platine donne un écart manifestement systématique de $-13 \mu\text{V}$ (avec un écart-type de $\pm 3 \mu\text{V}$), c'est-à-dire que la valeur mesurée par étalonnage au point du platine est supérieure. La cause n'en est pas connue.

On peut tirer les conclusions suivantes :

1. Au moyen du thermocouple Pt30Rh/Pt6Rh, on peut aisément établir une échelle de température dans le domaine compris entre 900 K et 2050 K qui possède une incertitude inférieure à $0,5 \text{ K}$ au-dessous de 1400 K et à $1,0 \text{ K}$ au-dessus de 1400 K .
2. Les erreurs aléatoires (écart-type) dues à la méthode d'étalonnage et à l'instabilité des thermocouples n'excèdent pas $0,2 \text{ K}$ au point de l'or et $0,5 \text{ K}$ au point du platine.
3. L'utilisation de méthodes d'étalonnage peu coûteuses (méthode du fil) et de points fixes de métaux d'une pureté qui n'est pas nécessairement la plus élevée ne perturbe pas beaucoup les résultats.
4. Une méthode d'étalonnage comportant les points du palladium et du platine est préférable afin d'éviter les erreurs d'extrapolation dans le domaine des températures élevées.

On doit remarquer que les écarts trouvés dans cette étude des thermocouples 30/6 sont cohérents avec les résultats du

paragraphe 3.1.3 et renforcent notre conclusion selon laquelle les thermocouples 30/6 donneraient des résultats semblables à ceux du tableau IV.

3.2 Thermomètres à résistance de platine

Les publications donnant des schémas d'interpolation sur lesquels on peut établir des réalisations secondaires de l'EIPT-68 au-dessous de 0 °C se réfèrent toutes aux thermomètres courants du type capsule. Nous en résumons trois brièvement et commentons certains points intéressants. Toutefois, il est important aussi de considérer la possibilité de réalisations reposant sur des thermomètres de type industriel qui pourraient couvrir un domaine allant de - 200 °C à 200 °C. Nous présentons aussi quelques résultats les concernant. Le choix éventuel d'une réalisation particulière dépend évidemment beaucoup de l'exactitude que l'on désire avoir. Certains auteurs pensent qu'une exactitude de ± 50 mK est suffisante ; nous sommes enclins à penser que cela est trop libéral pour de nombreux utilisateurs et qu'il vaut mieux viser ± 10 à ± 20 mK.

3.2.1 Extrapolation des étalonnages de thermomètres à résistance de platine

Pour 45 thermomètres du type capsule ayant des valeurs de $\alpha > 0,003\ 925$, Bedford [39] a étudié les résultats obtenus en extrapolant au-dessous de 0 °C les étalonnages faits au-dessus de 0 °C. Bien que les températures extrapolées s'écartent régulièrement de T_{68} et que les écarts aillent jusqu'à 1 K à 100 K, 1,7 K à 70 K et - 12 K au voisinage de 20 K, les variations sur ces températures sont faibles. En utilisant pour la correction une table ou une fonction, on peut mesurer T_{68} à ± 3 mK jusqu'à 150 K, à ± 10 mK à 77 K et à ± 30 mK à 30 K. Notons que :

a) La méthode est simple. Les thermomètres étaient étalonnés seulement au point triple et au point d'ébullition de l'eau. On a utilisé pour chaque thermomètre une valeur admise de δ . Si l'on mesurait δ au moyen d'un étalonnage au point de congélation de l'étain ou au point de congélation du zinc, l'incertitude de l'échelle extrapolée pourrait être encore plus faible.

b) Bien que la correction au moyen d'une table soit plus petite en ajoutant un point d'étalonnage supplémentaire (par exemple à 90 K ou à 54 K), les résultats de Bedford indiquent que les incertitudes ne seraient pas réduites de façon significative.

c) La méthode est aussi valable pour les thermomètres à tige.

d) L'échelle est de caractère statistique : il y a une forte probabilité, mais pas de certitude, qu'un thermomètre donné restera dans les limites d'incertitude indiquées.

3.2.2 Proposition de Kirby-Bedford-Kathnelson [40]

Ces auteurs montrent que les températures peuvent être mesurées à $\pm 10 \times 10^{-6}$ près en \underline{W} (ce qui équivaut à ± 15 mK à 20 K, ± 3 mK au-dessus de 50 K), entre 14 K et 273 K, en utilisant un thermomètre à résistance de platine étalonné en quatre points et l'équation d'interpolation

$$\Delta \underline{W} = \underline{c}(\underline{W} - 1) + \underline{d} \cdot \ln \underline{W} + \underline{e}(\ln \underline{W})^2$$

dans laquelle \underline{W} est la résistance réduite du thermomètre et $\Delta \underline{W}$ est la différence de \underline{W} à la résistance réduite d'un thermomètre étalonné (ou une fonction de référence). Les auteurs recommandent que le thermomètre soit étalonné dans des bains d'hélium liquide, d'hydrogène liquide, d'azote liquide et au point de glace. Notons que :

a) La méthode ne se limite pas aux thermomètres à résistance de platine étalons. Elle peut s'adapter aussi à certains thermomètres de fabrication industrielle.

b) La méthode nécessite soit un thermomètre étalonné pour mesurer la température des bains, soit un cryostat sophistiqué dans lequel on peut réaliser les points fixes.

c) On peut substituer aux points d'étalonnage conseillés, des cellules scellées à point triple. Pavese [41, 42] a suggéré des combinaisons convenables de tels points triples, en utilisant, par exemple, seulement des cellules contenant du méthane et de l'oxygène.

d) La possibilité existe d'améliorer l'échelle en ajoutant des termes à l'équation d'interpolation.

3.2.3 Proposition de Besley-Kemp [43]

Besley et Kemp ont proposé un étalonnage en deux points (hélium en ébullition, point de congélation de l'eau) d'un thermomètre, permettant de mesurer les températures à ± 20 mK entre 14 K et 273 K si la résistance réduite résiduelle du thermomètre ($\underline{W}_{4,2}$) est $< 4 \times 10^{-4}$. Pour les thermomètres dont le $\underline{W}_{4,2}$ est compris entre 4 et 7×10^{-4} , l'exactitude au-dessous de 40 K se détériore et atteint ± 40 mK pour la plupart des thermomètres, et ± 75 mK si on considère l'ensemble des thermomètres.

En bref, leur méthode repose sur la fonction \underline{Z}

$$\underline{Z}_T = \frac{\underline{R}_T - \underline{R}_{4,2}}{\underline{R}_{273,15} - \underline{R}_{4,2}} \quad (1)$$

dans laquelle \underline{R} est la résistance du thermomètre à la température indiquée. Besley et Kemp donnent une fonction de référence de la forme

$$\underline{T}^* = \sum_{n=0}^{16} \frac{A_n}{n} \left(\frac{\ln(\underline{Z}) + 3,54}{3,54} \right)^n \quad (2)$$

pour les \underline{Z} moyens d'un groupe de thermomètres pour lesquels $\underline{W}_{4,2} < 4 \times 10^{-4}$. La température \underline{T} telle que $\underline{T} = \underline{T}^* - \Delta \underline{T}^*$ est déterminée pour un thermomètre donné suivant un écart du type :

$$\Delta T^* = a \left(1 - \frac{T^*}{40} \right)^{\frac{1}{2}} \Delta T \quad (3)$$

où $\Delta T = b + c \cdot \underline{W}_{4,2} + d \cdot \underline{W}_{4,2}^2 \quad T^* \leq 40 \text{ K} \quad (4)$

$$\Delta T = 0 \quad T^* > 40 \text{ K} \quad (5)$$

En résumé, le thermomètre est étalonné à 4,2 K et 273,15 K. Une température T est mesurée en mesurant R_T , en calculant Z_T à partir de (1), en calculant T^* à partir de (2), et en calculant ΔT^* à partir de (3) - (5). Lorsqu'on a $4 \times 10^{-4} < \underline{W}_{4,2} < 7 \times 10^{-4}$, la méthode est identique, mais fait appel à des fonctions de référence et d'écart différentes. Avec cette proposition :

- (a) On a seulement besoin d'un étalonnage relativement simple en deux points.
- (b) Seuls des thermomètres étalons sont susceptibles d'avoir $\underline{W}_{4,2} < 4 \times 10^{-4}$.
- (c) Il se peut que la méthode ne soit pas applicable aux thermomètres à tige ; pour mesurer toute température inférieure à 273 K, un étalonnage à 4,2 K est nécessaire. Ce même écueil existe avec la proposition de Kirby-Bedford-Kathnelson.

En fin de compte, l'échelle par extrapolation est la plus simple. L'échelle Besley-Kemp est plus simple que l'échelle de Kirby-Bedford-Kathnelson car elle demande un moins grand nombre d'étalonnages, mais elle se limite à des thermomètres de haute qualité et elle est un peu moins exacte.

3.3 Les thermomètres à résistance de platine de fabrication industrielle

De nombreux thermomètres de fabrication industrielle sont reproductibles à mieux que 0,1 K, et certains atteignent une reproductibilité de 0,02 K dans le domaine compris entre - 200 °C et 200 °C (ou même 400 °C). La possibilité d'une réalisation secondaire de l'EIPT-68 reposant sur ces instruments est en cours d'étude à l'IMGC. Les thermomètres industriels sont fabriqués selon plusieurs normes nationales et internationales.

La plupart s'appliquent à des instruments dont le α est voisin de $0,00385 \text{ K}^{-1}$. Une recommandation de la CEI est à un stade de mise au point très avancé. Elle donne une table de référence, couvrant le domaine de - 200 °C à 850 °C, reposant sur une simple équation du second degré au-dessus de 0 °C et une équation du quatrième degré du type Callendar-Van Dusen aux basses températures. Lorsque l'on utilise les thermomètres avec ces équations d'interpolation, il faut s'attendre à avoir de petites différences systématiques par rapport à t_{68} . Les résultats préliminaires indiquent que dans le domaine qui s'étend de 0 °C à 420 °C, avec étalonnage à 0 °C, 100 °C et au point de congélation du zinc, la plupart des thermomètres du type CEI donnent des valeurs de température qui voisinent t à mieux que $\pm 0,03 \text{ K}$, bien que certains modèles fassent apparaître un écart un peu supérieur. Evidemment, les erreurs systématiques dépendent du choix des points d'étalonnage. Une étude visant à déterminer un critère de sélection des instruments et une méthode convenable d'étalonnage est en cours à l'IMGC.

Voici les avantages de l'utilisation des thermomètres à résistance de platine comme étalons secondaires :

(a) L'instrument peut être utilisé de concert avec des instruments à lecture directe de la température, avec une résolution allant jusqu'à 1 mK.

(b) Le thermomètre n'est pas coûteux.

(c) On a besoin d'un nombre limité de points d'étalonnage.

(d) Le thermomètre est plus sensible qu'un thermocouple Pt/Rh au-dessous de 400 °C.

TABLEAU I

Liste supplémentaire de points de référence secondaires¹

Etat d'équilibre	$T_{68}(K)$	Estimation d'incertitude de l'auteur		Référence
		Incertitude (K)	Catégorie ²	
Point triple du deutérium normal	18,729	± 0,002	B	2
Point triple du néon naturel	24,563 1	± 0,001	B	3
	24,562 5	± 0,002	B	44
Transition α - β de l'azote solide	35,621	± 0,003	B	4
Point triple de l'azote	63,145 9	± 0,001	B	3
	63,145 8	± 0,000 2	C	44
Point triple de l'argon	83,797 4	± 0,000 1	C	3
	83,797 4	± 0,000 9	A	5
	83,800 4		D	6
	83,796 2		D	7
Point d'ébullition de l'argon	87,295 3	± 0,000 5	C	44
Point triple de l'éthane	90,348	± 0,005	C	8
	90,352	± 0,001	C	9
Point triple du méthane	90,685 6	± 0,000 5	C	10
	90,685 ³		D	11
	90,686 1	± 0,000 2	C	12
	90,685 6		D	13
Point d'ébullition du méthane	111,656 7	± 0,001	C	14
Point triple du krypton	115,763 9	± 0,001	B	3
	115,766 1		D	15
Point triple du xénon	161,391 8	± 0,000 2	C	15
Point de sublimation du gaz carbonique	194,670 7		D	16
Point triple du gaz carbonique	216,579		D	16
Equilibre entre les phases vapeur et solide du gaz carbonique	170	± 0,001	C	16
	\bar{a}			
$\ln \frac{p}{p_0} = \frac{A}{T_{68}} + \frac{B}{T_{68}^2} + \frac{CT_{68}}{T_{68}^3} + \frac{DT_{68}^2}{T_{68}^4}$	194,7			

$$\frac{A}{T_{68}} = - 3900,224 \text{ K}$$

$$\frac{B}{T_{68}^2} = 28,576 \text{ 60}$$

$$\frac{C}{T_{68}^3} = 6,687 \text{ 764} \times 10^{-2} \text{ K}^{-1}$$

$$\frac{D}{T_{68}^4} = 1,181 \text{ 504} \times 10^{-4} \text{ K}^{-2}$$

Tableau I (Suite)

Etat d'équilibre	Estimation d'incertitude de l'auteur			Référence
	$T_{68}(K)$	Incertitude (K)	Catégorie ²	
Point triple du bromobenzène ⁴	242,419	± 0,010	B	17
Point triple du diphenyl éther	300,019 0	± 0,002	B	18
	300,019		D	19
Point triple du gallium	302,924 1	± 0,001	B	20
Point de congélation du sodium	370,969		D	21
Point de congélation du cuivre	1358,02	± 0,02	A	46
	1358,02	± 0,04	A	47
Température de luminance (0,653 μm) à la fusion du palladium ⁵	1688	± 5	B	22
Température de luminance (0,65 μm) à la fusion du titane (0,653 μm)	1801	± 4	A	23, 24
	1799	± 5	B	25
Point de fusion du palladium ⁵	1828,2	± 0,4	B	26
	1828		D	27
Point de fusion du titane	1941,5	± 4	A	23
	1945	± 5	B	25
Température de luminance (0,65 μm) à la fusion du vanadium	1988	± 4	A	28, 24
Température de luminance (0,65 μm) à la fusion du ruthenium	2294	± 8	A	24
Température de luminance (0,65 μm) à la fusion du niobium	2433	± 6	A	24
Température de luminance (0,65 μm) à la fusion du molybdène	2528	± 7	A	24
Point de fusion du ruthenium	2607	± 10	A	29
Point de fusion de l'oxyde d'yttrium (Y ₂ O ₃)	2712	± 12	B	45
Température de luminance (0,653 μm) à la fusion du tantale (0,995 μm)	2846	± 8	B	30
	2620	± 8	B	30
Point de fusion de l'oxyde de beryllium (BeO)	2851	± 9	A	31

Notes

1. Ces points de référence secondaires viennent en plus de ceux qui figurent dans la liste dressée précédemment par le Groupe de travail 2 [1]. Ce sont (a) de nouveaux points mesurés depuis que la précédente liste a été compilée ; (b) de nouvelles déterminations de points figurant déjà dans la liste ; ou (c) d'anciennes déterminations omises précédemment.
2. Les incertitudes indiquées appartiennent à l'une des catégories suivantes :
 - A. Niveau de confiance 95 % (ou 99 %).
 - B. Comporte des estimations à la fois de la reproductibilité et des erreurs systématiques.
 - C. Paraît ne comporter qu'une estimation de la reproductibilité.
 - D. Aucune estimation d'exactitude n'est donnée, mais la valeur semble être d'une exactitude comparable à d'autres états d'équilibre figurant au voisinage de cette température.
3. Désigné sous le nom de méthane "normal" par opposition au méthane "en équilibre" avec un point triple voisin de 90,677 K. Les deux états diffèrent d'une certaine quantité de conversion de spin des atomes d'hydrogène constituants.
4. La valeur 242,401 indiquée par les auteurs dans l'EIPT-48 a été convertie dans l'EIPT-68.
5. Température mesurée en atmosphère d'argon pur.

Tableau III

Dispersion maximale de la température indiquée
par les thermocouples Pt 13 % Rh/Pt

t_{50} (°C)	Dispersion maximale en K						
	bains liquides		four SiC		four à haute température		
	1	2	1	2	1	2	3
1	0,04	0,04					
3	0,03	0,03					
5	0,03	0,05					
10	0,07	0,07					
25	0,04	0,04					
50	0,06	0,06					
75	0,08	0,08					
100	0,07	0,07	0,12	0,14	0,07	0,06	0,06
125	0,06	0,05					
150	0,05	0,04			0,07	0,08	0,07
175	0,08	0,07					
200	0,11	0,10	0,19	0,22	0,07	0,07	0,07
232	0,09	0,08					
250	0,08	0,07			0,08	0,08	0,07
275	0,08	0,07					
300	0,14	0,12	0,24	0,28	0,08	0,07	0,07
325	0,15	0,14					
350	0,12	0,10			0,08	0,06	0,06
400			0,26	0,30	0,08	0,06	0,09
450					0,10	0,07	0,08
500			0,25	0,30	0,11	0,08	0,09
550					0,11	0,07	0,09
600			0,24	0,28	0,13	0,10	0,11
650					0,14	0,11	0,13
700			0,20	0,24	0,17	0,15	0,16
750					0,20	0,17	0,19
800			0,17	0,20	0,23	0,21	0,22
850					0,27	0,25	0,27
900			0,18	0,19	0,31	0,29	0,31
950					0,35	0,34	0,35
1000			0,20	0,20	0,38	0,38	0,40
1050					0,41	0,41	0,43
1100			0,21	0,21	0,44	0,44	0,46
1200							1,16
1200							1,08
1300							1,02
1400							0,71
1500							0,65
1550							0,63
1600							0,65
1650							0,64
1700							0,84
1750							1,12

Tableau IV

Dispersion maximale de la température indiquée
par les thermocouples Pt 20 % Rh/Pt 5 % Rh
Pt 40 % Rh/Pt 20 % Rh
Pt 40 % Rh/Pt 10 % Rh

Dispersion maximale en K

$t_{68}(^{\circ}\text{C})$	four SiC			four à haute température		
	20/5	40/20	40/10	20/5	40/20	40/10
	18		0,72			
100	0,76	1,47	1,94			
200	0,35	2,19	1,78			
300	0,36	2,19	1,30			
400	0,42	2,05	1,04			
500	0,42	1,42	1,07			
600	0,42	0,75	0,83			
700	0,38	0,44	0,70			
800	0,43	0,43	0,65			
900	0,48	0,55	0,56			
1000	0,32	0,91	0,67			
1100	0,49	0,97	0,63			
1200	0,45	1,12	0,69			
1300	0,43	1,26	0,54			
1400	0,57	1,51	0,64			
1500	0,76	1,52	0,75	0,61		
1550				1,12	1,61	1,41
1600				0,75	1,14	1,13
1650				0,80	1,23	1,01
1700				0,90	1,17	1,05
1750				0,86	1,02	1,00

Tableau V

Ecart aux points fixes des 12 thermocouples 30/6
selon des étalonnages faits dans six laboratoires

Points fixes	V1/ μV	V2/ μV	V3/ μV	V4/ μV
antimoine	1,9	$\pm 1,4$	$\pm 0,4$	$\pm 1,2$
argent	3,9	$\pm 2,0$	$\pm 1,9$	$\pm 2,3$
or	3,5	$\pm 1,8$	$\pm 2,2$	$\pm 2,2$
or (méthode du fil)	2,1	$\pm 1,4$	-	$\pm 1,9$
palladium (méthode du fil)	9,5	$\pm 3,2$	$\pm 3,0$	$\pm 4,2$
platine (méthode du fil)	11,7	$\pm 3,8$	$\pm 3,4$	$\pm 6,3$

BIBLIOGRAPHIE

1. CROVINI (L.), BEDFORD (R.E.), MOSER (A.), Metrologia, 13, 1977, pp. 197-206.
2. PAVESE (F.), BARBERO (C.), Cryogenics, 19, 1979, pp. 255-260.
3. KEMP (R.C.), KEMP (W.R.G.), Metrologia, 14, 1978, pp. 83-88.
4. KEMP (R.C.), KEMP (W.R.G.), Metrologia, 15, 1979, pp. 87-88.
5. KHNYKOV (V.M.), ORLOVA (M.P.), BELYANSKII (L.B.), RABUKH (L.N.), Zhurnal Fizicheshoi Khimii, 52, 1978, pp. 1483-1484 ; Russian Journal of Physical Chemistry, 52, 1978, pp. 849-850.
6. FURUKAWA (G.T.), Comité Consultatif de Thermométrie, 12^e session, 1978, Annexe T 13, pp. T 100 - T 102.
7. SHIRATORI (T.), Bulletin of NRLM, 28, 1979, pp. 30-33.
8. STRATY (G.C.), TSUMURA (R.), J. Chem. Phys., 64, 1976, pp. 859-861.
9. PAVESE (F.), J. Chem. Thermodynamics, 10, 1978, pp. 369-379.
10. PAVESE (F.), Metrologia, 15, 1979, pp. 47-49.
11. INABA (A.), MITSUI (K.), J. Appl. Phys., 17, 1978, pp. 1451-1452.
12. BONHOURE (J.), PELLO (R.), Metrologia, 14, 1978, pp. 175-177.
13. BONHOURE (J.), PELLO (R.), Metrologia, 16, 1980, pp. 95-99.
14. PAVESE (F.), CAGNA (G.), FERRI (D.), Proceedings of the Sixth International Cryogenic Engineering Conference, IPC Science and Technology, London, 1976, pp. 281-285.
15. INABA (A.), MITSUI (K.), Comité Consultatif de Thermométrie, 12^e session, Annexe T 17, 1978, pp. T 111-T 113.

16. ANCSIN (J.), Comité Consultatif de Thermométrie,
12^e session, Annexe T 18, 1978, pp. T 114 - T 115.
17. MASI (J.F.), SCOTT (R.B.), J. Res. N.B.S., 79A, 1975, pp. 619-
627.
18. VAUGHN (M.F.), NPL Report Chem., 86, July 1978.
19. SCHWAB (F.W.), WICKERS (E.), Comptes Rendus de la Quinzième
Conférence UICPA, 1949, p. 113.
20. MANGUM (B.W.), THORNTON (D.D.), Metrologia, 15, 1979, pp. 201-
215.
21. CIBOROWSKI (F.), Document CCT/80-1.
22. MILLER (A.P.), CEZAIIRLIYAN (A.), High Temperature Science, 11,
1979, pp. 41-47.
23. BEREZIN (B.Y.), KATS (S.A.), KENINSARIN (M.M.), CHEKHOVSKOI
(V.Y.), Teplofizika Vysokikh Temperatur, 12, 1974, pp. 524-
529 ; High Temperature, 12, 1974, pp. 450-455.
24. BEREZIN (B.Y.), KATS (S.A.), CHEKHOVSKOI (V.Y.), Teplofizika
Vysokikh Temperatur, 14, 1976, pp. 497-502 ; High Temperature,
14, 1976, pp. 448-452.
25. CEZAIIRLIYAN (A.), MILLER (A.P.), J. Res. NBS, 82, 1977, pp. 119-
122.
26. JONES (T.P.), HALL (K.G.), Metrologia, 15, 1979, pp. 161-163.
27. BEDFORD (R.E.), High Temperatures-High Pressures, 4, 1972,
pp. 241-260.
28. BEREZIN (B.Y.), CHEKHOVSKOI (V.Y.), SHEINDLIN (A.E.), Doklady
Akademiï Nauk SSSR, 201, 1971, pp. 583-585 ; Soviet Physics -
Doklady, 16, 1972, pp. 1007-1009.
29. KENISARIN (M.M.), BEREZIN (B.Y.), GORINA (N.B.), KATS (S.A.),
POLYAKOVA (V.P.), SAVITSKII (E.M.), CHEKHOVSKOI (V.Y.),
Teplofizika Vysokikh Temperatur, 12, 1974, pp. 1309-1310 ;
High Temperature, 12, 1974, pp. 1159-1160.

30. CEZAIIRLIYAN (A.), McCLURE (J.L.), COSLOVI (L.), RIGHINI (F.), ROSSO (A.), High Temperatures - High Pressures, 8, 1976, pp. 103-111.
31. BARKHATOV (L.S.), KAGAN (D.N.), KENISARIN (M.M.), CHEKHOVSKOI (V.Y.), SHPIL'RAIN (E.E.), Teplofizika Vysokikh Temperatur, 13, 1975, pp. 525-530 ; High Temperature, 13, 1975, pp. 484-488.
32. TOULOUKIAN (Y.S.), DeWITT (D.P.), Thermophysical Properties of Matter, Vol. 7, Thermal Radiative Properties of Metallic Elements and Alloys, Plenum, New York, 1970.
33. BEDFORD (R.E.), MA (C.K.), BARBER (C.R.), CHANDLER (T.R.), QUINN (T.J.), BURNS (G.W.), SCROGER (M.), Temperature, Its Measurement and Control in Science and Industry, Vol. 4, pp. 1585-1602, Instrument Society of America, Pittsburg, 1972.
34. POWELL (R.L.), HALL (W.J.), HYINK (C.H.), SPARKS (L.L.), BURNS (G.W.), SCROGER (M.G.), PLUMB (H.H.), NBS Monograph 125, 1974.
35. BEDFORD (R.E.), MA (C.K.), Document CCT/80-11.
36. McLAREN (E.H.), MURDOCK (E.G.), The Properties of Pt/PtRh Thermocouples for Thermometry in the Range 0-1100 °C, NRC Report No. NRCC 17407, NRCC 17408, 1979.
37. BEDFORD (R.E.), Rev. Sci. Instr., 35, 1964, pp. 1177-1190.
38. BEDFORD (R.E.), Rev. Sci. Instr., 36, 1965, pp. 1571-1580.
39. BEDFORD (R.E.), Temperature, Its Measurement and Control in Science and Industry, Vol. 4, pp. 15-25, Instrument Society of America, Pittsburgh, 1972.
40. KIRBY (C.G.), BEDFORD (R.E.), KATHNELSON (J.), Metrologia, 11, 1975, pp. 117-124.
41. PAVESE (F.), Advances in Cryogenic Engineering (Ed. K.D. Timmerhaus), Vol. 23, 1978, pp. 503-510.

42. PAVESE (F.), XVth International Congress on Refrigeration
A1/2-47, 1979.
 43. BESLEY (L.M.), KEMP (R.C.), Cryogenics, 8, 1978, pp. 497-500.
 44. PAVESE (F.), Document CCT/80-24.
 45. FOEX (M.), High-Temperatures - High Pressures, 9, 1977, pp. 269-
282.
 46. RICOLFI (T.), LANZA (F.), High Temperatures - High Pressures, 9,
1977, pp. 483-487.
 47. COATES (P.B.), ANDREWS (J.W.), J. Phys. F : Metal Phys., 8,
1978, pp. 277-285.
-

ANNEXE T 4

5^e Rapport du Groupe de travail 3 *

(Températures supérieures à 100 K)

(Traduction du Document CCT/80-4)

Il appartient au Groupe de travail 3 d'étudier les résultats des récentes mesures de température thermodynamique au-dessus de 100 K et leurs différences par rapport à l'EIPT-68 ; il lui appartient aussi de préparer l'introduction du thermomètre à résistance de platine pour la mesure des hautes températures dans l'échelle qui, finalement, remplacera l'EIPT-68.

Depuis la rédaction du 4^e Rapport du GT3, des progrès ont été accomplis dans ces deux domaines. Toutefois le GT3 n'a pas pu mettre en oeuvre le programme proposé pour une comparaison internationale de thermomètres à résistance de platine pour la mesure des hautes températures ; il n'a pas eu non plus de résultats expérimentaux nouveaux fournissant des valeurs de $T - T_{68}$ dans le domaine qui l'intéresse particulièrement, c'est-à-dire entre 460 °C et 630 °C.

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

En ce qui concerne les mesures de température thermodynamique, les travaux sur le thermomètre à gaz effectués au NBS se sont poursuivis et déplacés, comme prévu, vers les hautes températures ; des mesures ont été faites au voisinage de 660 °C, 800 °C et 960 °C. Le programme actuel prévoit de faire d'autres mesures entre 420 °C et 960 °C à intervalle d'environ 50 K. Toutefois les résultats ne seront connus que lorsque seront terminées la mesure de la dilatation thermique du matériau constituant le réservoir ainsi que la mesure de la pression thermo-moléculaire concernant le capillaire ; ces mesures seront faites ultérieurement. L'étude jusqu'au point de congélation de l'or sera retardée par des restrictions budgétaires et le prochain départ en retraite du physicien concerné (L.A. Guildner), mais elle reste toujours prévue. Le CCT doit donc s'attendre à ce que les travaux sur le thermomètre à gaz, au NBS, se poursuivent à un rythme ralenti grâce aux efforts de R.E. Edsinger, avec la participation occasionnelle de L.A. Guildner.

On peut résumer comme suit les résultats obtenus jusqu'à maintenant au NBS et ailleurs, entre 0 °C et 1064 °C :

1. Entre 0 °C et 460 °C, les valeurs de $T - T_{68}$ ont été déterminées à pas serrés (Guildner et Edsinger, NBS J. of Research, 80 A, 1976, pp. 703-738) ; le GT3 a publié un résumé dans Metrologia (13, 1977, pp. 175-178).
2. Entre 460 °C et 630 °C, aucun résultat nouveau n'a été publié.
3. Entre 630 °C et 1064 °C, un faisceau important de preuves tend à montrer que l'EIPT-68 s'écarte de la température thermodynamique, avec un maximum d'environ 0,5 K au voisinage de 800 °C (Metrologia, 13, 1977, pp. 175-178). Cela vient d'être récemment confirmé par des résultats obtenus à l'IMGC avec le thermomètre à bruit (Crovini et Actis, Metrologia, 14, 1978, pp. 69-78).

On peut résumer comme suit les travaux connus du GT3, actuellement en cours dans le domaine de 0 °C à 1064 °C :

1. Le thermomètre à gaz du NBS devrait fournir les valeurs de $\underline{T} - \underline{T}_{68}$ entre 419,58 °C et 630,74 °C à intervalle de 50 K ; il devrait aussi donner la différence entre la température thermodynamique et une échelle fondée sur le thermomètre à résistance de platine entre 630,74 °C et 960 °C à intervalle de 50 K. Les résultats sont attendus pour 1981 ou le début de 1982 et l'on prévoit que les incertitudes seront de l'ordre de 5 à 10 mK. Les travaux prévus ultérieurement s'étendront au point de congélation de l'or.

2. Au NPL, par thermométrie à rayonnement total, on devrait obtenir des valeurs de $\underline{T} - \underline{T}_{68}$ jusqu'à 230 °C et, éventuellement, jusqu'à 420 °C. Les résultats sont attendus à partir de 1981, avec une exactitude prévue de l'ordre de 5 mK dans le domaine de 100 °C à 200 °C (en utilisant le point triple de l'eau comme température de référence).

3. Au NPL, la pyrométrie spectrale devrait donner des valeurs de $\underline{T} - \underline{T}_{68}$ entre 420 °C et 1064 °C. Les résultats sont attendus dès 1980, avec une exactitude prévue de l'ordre de 40 mK (au point de congélation de l'or, en utilisant le point de congélation du zinc comme température de référence).

4. A la PTB, la pyrométrie spectrale devrait aussi fournir des valeurs de $\underline{T} - \underline{T}_{68}$ entre 420 °C et 1064 °C, dans les mêmes conditions qu'au NPL (même date, même exactitude).

5. Au BIPM, la pyrométrie spectrale devrait donner des valeurs de $\underline{T} - \underline{T}_{68}$, entre 420 °C et 630 °C. Les résultats sont attendus à partir de 1981 avec une exactitude prévue de l'ordre de 50 mK.

6. Au NML, par thermométrie à bruit, on devrait avoir des valeurs de $\underline{T} - \underline{T}_{68}$ dans le domaine de 100 K à 373 K. Les résultats sont attendus dès 1980, avec une exactitude prévue de l'ordre de 10 mK.

7. A l'Université de Karlsruhe, des valeurs thermodynamiques préliminaires pour le point d'ébullition de l'eau ont été obtenues par mesure de la capacité calorifique à pression constante du xénon ; les travaux se poursuivent.

En ce qui concerne le thermomètre à résistance de platine pour la mesure des hautes températures, les travaux de recherche qui se poursuivent au NBS ont progressé. Il est absolument nécessaire que la résistance du platine soit suffisamment stable lors de l'exposition prolongée à haute température. Les résultats obtenus au NBS montrent que les thermomètres de ce type peuvent supporter une exposition à des températures comprises entre 960 °C et 1100 °C pendant des milliers d'heures avec des évolutions des caractéristiques du platine suffisamment petites pour être acceptables. Des instabilités mécaniques, dues au fait que les thermomètres subissent des cycles thermiques, ont conduit à faire des recherches supplémentaires imprévues sur la conception du thermomètre. On pense que le type de construction actuel permet de surmonter ces difficultés mais des essais sont encore nécessaires. Il s'ensuit que la comparaison internationale des thermomètres pour la mesure des hautes températures proposée dans le 4^e Rapport du GT3 n'a pas encore commencé. Lors de la prochaine session du CCT, on verra si des thermomètres de ce type seront disponibles pour faire l'objet d'une comparaison circulaire entre laboratoires nationaux.

Malgré le retard imprévu dans la mise au point de thermomètres à résistance de platine stables pour la mesure des hautes températures, il semble que la voie soit maintenant ouverte pour l'établissement d'une échelle fondée sur le thermomètre à résistance fonctionnant jusqu'au point de congélation de l'or. Cependant, quelques conditions essentielles doivent être remplies avant d'officialiser une telle échelle.

1. Les laboratoires nationaux doivent disposer de thermomètres à résistance de platine pour la mesure des hautes températures depuis suffisamment longtemps et en nombre suffisant pour s'assurer de la confiance que l'on peut avoir dans leur fonctionnement.

2. Il faut établir un schéma provisoire d'interpolation pour faciliter la comparaison des résultats des différents chercheurs.
3. Les valeurs de la température thermodynamique doivent être bien établies sur la totalité du domaine de 0 °C à 1064 °C, soit par mesures directes, soit par interpolation.

On peut considérer qu'une fonction d'interpolation comporte deux parties : une première partie pour tenir compte des différences entre échantillons de platine dans divers thermomètres, exprimée aussi simplement que possible suivant une relation entre la résistance du thermomètre et la température dans une échelle pratique de température reproductible, t'' ; et une seconde partie pour tenir compte des différences entre les températures thermodynamiques et t'' . Dans des travaux déjà anciens faits au NBS (Evans and Wood, Metrologia, 7, 1971, p. 108), on indiquait qu'une relation quadratique entre la résistance et t'' rendait compte de toutes les différences entre les thermomètres dans les limites de l'incertitude expérimentale. Même avec les mesures qui, dans l'état actuel des recherches, sont plus précises, la relation quadratique convient toujours pour rendre compte des différences entre thermomètres* ; mais au fur et à mesure que l'on disposera de renseignements complémentaires, il pourra se faire qu'une relation plus complexe devienne nécessaire. Quant aux différences entre les températures thermodynamiques et les valeurs dans l'échelle pratique de température, on s'attend à ce que les résultats du thermomètre à gaz du NBS soient exprimés suivant la température Kelvin, c'est-à-dire suivant $T - T''$. La fonction reliant $T - T''$ à la température n'est pas établie.

Il convient de noter qu'à priori et d'un point de vue théorique, il n'y a aucune raison de penser que la relation résistance/température soit simplement quadratique jusqu'à 1336 K.

* Pour la relation quadratique, les valeurs de t'' pour les points fixes aux températures élevées sont déterminées en extrapolant t' comme dans l'EIPT.

Même si la structure de bande d'un métal de transition comme le platine n'était pas trop complexe pour permettre d'effectuer des calculs quantitatifs utiles de la résistivité, il est probable qu'on ne saurait prédire une relation quadratique pour un domaine de température aussi large. De plus, les effets anharmoniques de la dilatation thermique ainsi que la dispersion résultant des défauts dans le réseau cristallin induits thermiquement aux températures supérieures à 1200 K devraient conduire à des termes de degré plus élevé. De 0 °C à 630 °C, $\frac{t}{68} - t'$ dans l'EIPT-68 est une fonction du quatrième degré, et l'équation pour les différences complémentaires mesurées au moyen du thermomètre à gaz du NBS est du cinquième degré. Il ne serait donc pas surprenant qu'une équation couvrant le domaine complet de 0 °C au point de congélation de l'or demande encore davantage de termes.

En pratique, il est possible de fixer une série d'échéances correspondant aux différentes étapes à franchir dans la mise au point d'une échelle fondée sur le thermomètre à résistance de platine si une nouvelle EIPT doit être adoptée par la 18^e CGPM en 1987 (figure 1). Pour qu'une échelle de ce genre soit officiellement adoptée, le projet doit en être soumis aux Etats membres de la Convention du Mètre un an à l'avance, c'est-à-dire en octobre 1986. Cela veut dire que le CIPM doit approuver ce projet au plus tard aussi en octobre 1986. Si le CCT se réunit en mai 1986, l'approbation définitive par le CCT pourrait être reportée à cette date. Toutefois, un projet de cette échelle, à peu près complet, devrait être prêt un an plus tôt, soit en 1985, pour permettre son étude par les membres du CCT. Cela veut dire que, lors de sa session de 1984, le CCT aurait approuvé les grandes lignes sur lesquelles cette échelle serait fondée. Comme il est difficile d'établir une échelle du thermomètre à résistance sans résultats pour $\frac{T}{68} - T'$ et $\frac{T}{68} - T''$, nous nous retrouvons avec une échéance à la mi-1984 pour adopter les valeurs de la température thermodynamique dans le domaine de 0 °C à 1064 °C. Une échelle fondée sur le thermomètre à résistance devrait déjà avoir été mise en oeuvre et vérifiée au moyen de comparaisons internationales. Comme cela peut difficilement être réalisé en moins de deux ans, nous estimons que de telles comparaisons, avec une fonction d'interpolation convenue pour $\frac{t}{68}$, doivent commencer

- T 86 -

en 1982. En conséquence, il faut qu'à la mi-1982 au plus tard, on dispose de suffisamment de thermomètres à résistance de platine pour la mesure des hautes températures pour que les comparaisons commencent.

En conclusion, les deux à quatre prochaines années seront cruciales pour qu'une nouvelle EIPT soit établie en 1987.

Reçu en février 1980.

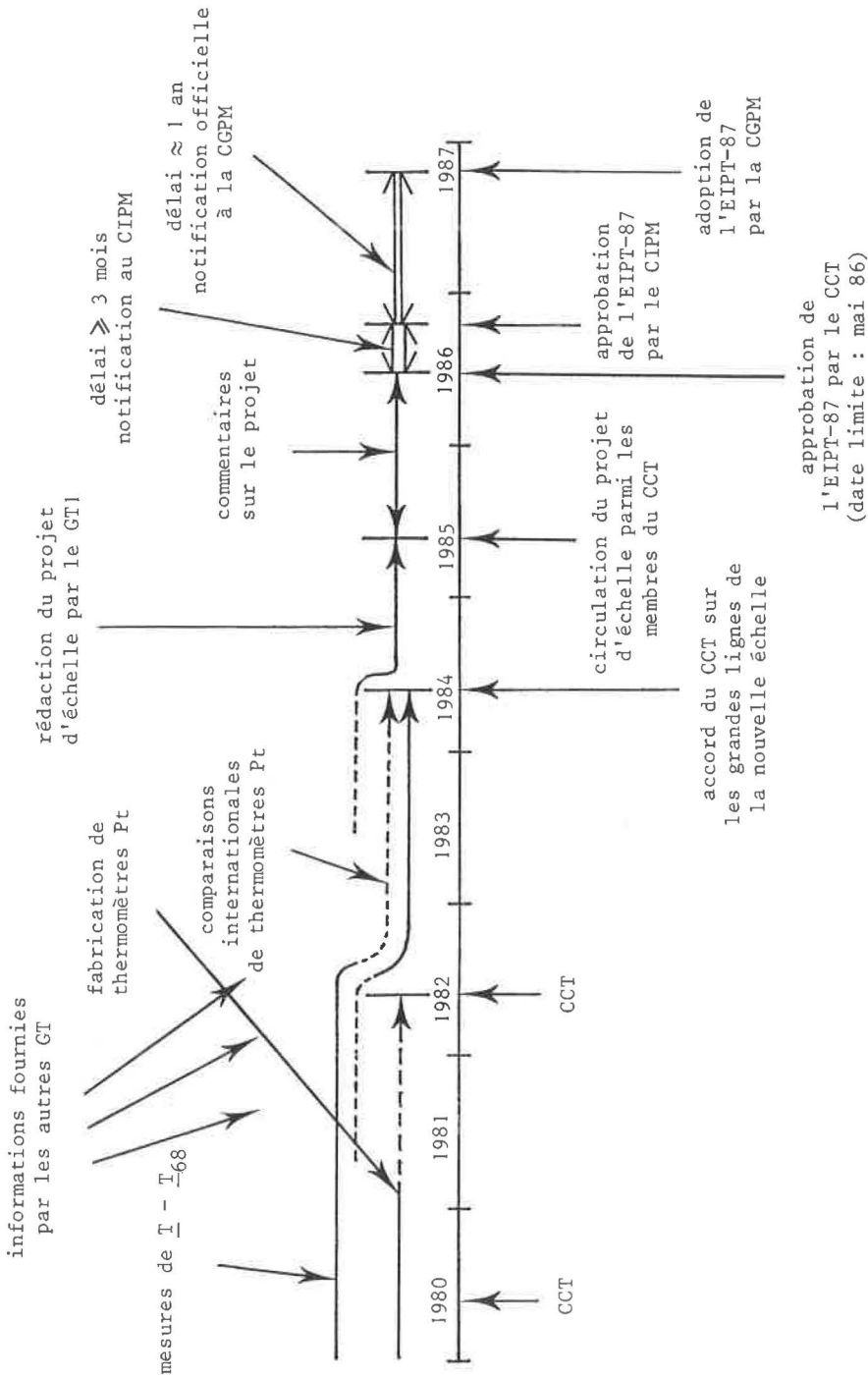


Fig. 1.- Emploi du temps estimatif pour l'élaboration de l'EIPT-87 (avec une attention particulière pour le domaine 0 °C - 1064 °C).

ANNEXE T 5

5^e Rapport du Groupe de travail 4 *

(Températures inférieures à 100 K)

(Traduction du Document CCT/80-68)

La première partie de ce rapport traite de l'Echelle Provisoire de Température de 1976 entre 0,5 K et 30 K, la deuxième partie des mesures de température thermodynamique au-dessous de 100 K (pour lesquelles nous nous limitons aux températures supérieures à 0,5 K) et la troisième partie de la définition de la future Echelle Internationale Pratique de Température.

1. Echelle Provisoire de Température de 1976 (EPT-76)

a) Publication de l'EPT-76

Le texte de l'EPT-76 figurait dans le rapport de la 12^e session du CCT (1978) présenté au CIPM. Le BIPM a fait

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

des copies du texte de cette échelle et les a distribuées à la XV^e Conférence Internationale sur la Physique à Basse Température, qui s'est réunie à Grenoble (France) en août 1978 ; le texte a aussi paru dans les Comptes Rendus de cette Conférence. Ensuite, l'EPT-76 et le document sur son historique et son élaboration ont été publiés dans Metrologia (15, 1979, p. 65).

b) Equations de pression de vapeur de l'hélium dans l'EPT-76

Le tableau III du texte de l'EPT-76 donne les différences de l'"Echelle ⁴He 1958" et de l'"Echelle ³He 1962" par rapport à l'EPT-76. Au NPL et au KOL, des recherches ont été faites pour établir de nouvelles équations de pression de vapeur pour ⁴He et ³He dans l'EPT-76. On envisage de faire circuler parmi les membres du CCT, avant la fin de 1980, un document qui donnera ces nouvelles équations ; ce document pourrait être soumis à Metrologia au début de 1981 (Document CCT/80-65).

c) Points de transition supraconducteurs du plomb, de l'indium, de l'aluminium, du zinc et du cadmium

Le NPL, le NML et le KOL n'ont pas encore terminé leur rapport commun concernant les travaux effectués sur la réalisation des cinq points de référence supraconducteurs de l'EPT-76 en utilisant des dispositifs SRM 767 (des résultats préliminaires sont donnés dans la référence 1). Les travaux effectués au NRLM sur la stabilité des points du plomb et de l'indium, pour deux dispositifs SRM 767, sont exposés dans le document CCT/80-19. Les deux études confirment que chacun des cinq points de référence est reproductible à $\pm 0,5$ mK environ, mais pas à mieux (sauf l'indium, pour lequel trois dispositifs SRM 767 utilisés au NPL et trois autres au KOL ont donné la même température de transition à 0,4 mK près).

Le NBS a rendu compte de l'avancement de ses travaux de recherche sur le dispositif SRM 767 (Document CCT/80-40) : cinq échantillons de plomb ont donné des températures de transition qui concordent à 0,1 mK près.

d) Réalisation de l'EPT-76 dans différents laboratoires

NPL : l'EPT-76 est conservée au moyen de thermomètres à résistance de rhodium-fer, étalonnés à l'origine par rapport à un thermomètre à gaz (échelle NPL-75) et à un thermomètre magnétique à nitrate de cérium et de magnésium (échelle T_{X1}).

ISU, NML, KOL* : l'EPT-76 est conservée essentiellement au moyen de thermomètres à résistance de rhodium-fer étalonnés au NPL par rapport aux échelles NPL-75 et T_{X1} .

NBS : l'EPT-76 est réalisée de différentes façons (Document CCT/80-39).

NRLM : l'EPT-76 est réalisée avec un thermomètre à gaz d'interpolation, en utilisant les points de transition de l'indium et du plomb et le point triple de l'hydrogène en équilibre comme points de référence (Document CCT/80-20).

PTB : les travaux sont en cours pour la réalisation de l'EPT-76 au moyen d'un thermomètre à gaz d'interpolation.

(Selon toute vraisemblance cette liste n'est pas complète).

e) Conclusion

Dans la plupart des laboratoires nationaux, les mesures de température entre 0,5 K et 13,81 K sont maintenant faites par rapport à l'EPT-76. On espère que la publication des équations

* Ces laboratoires ont aussi des réalisations de l'EPT-76 par rapport à leurs échelles magnétiques. Toutefois, comme ces échelles furent conservées au moyen de thermomètres à résistance de germanium dont on sait qu'ils sont moins stables que les thermomètres à résistance de rhodium-fer, ce sont les réalisations de l'EPT-76 au moyen des thermomètres à résistance de rhodium-fer étalonnés au NPL que l'on considère comme étant les plus sûres.

de pression de vapeur de ^3He et ^4He dans l'EPT-76 accroîtra son utilisation dans les milieux qui s'occupent de physique à basse température. La réalisation et l'utilisation de cette échelle ne devraient pas présenter de grandes difficultés.

2. Mesures de température thermodynamique entre 100 K et 0,5 K

a) Liste des mesures de température thermodynamique les plus utiles.

- Déterminations du point d'ébullition de l'oxygène par thermométrie à gaz au NRC (90,190 K), au NRLM (90,195 K) et au NPL (90,187 K) ; voir la liste dans la référence 2.

- Mesures faites au NPL par thermométrie à gaz et par la méthode des isothermes ; ces mesures ont donné l'échelle NPL-75 (2,6 K - 27,1 K).

- Mesures de la constante diélectrique faites à l'Université de Bristol par thermométrie à gaz et par la méthode des isothermes (4,2 K - 27,1 K). Ces mesures, qui se rapportaient à un seul point de référence (20 K), confirment l'échelle NPL-75 à 1 mK près (Document CCT/80-2).

- Mesures par thermométrie à bruit à l'Université de Münster entre 2,1 K et 4,2 K, mesures qui confirment les échelles NPL-75 et T_{X1} à 0,4 mK près.

- Mesures faites au NPL par thermométrie magnétique (nitrate de cérium et de magnésium) et qui ont donné l'échelle T_{X1} (0,5 K - 2,3 K).

- Différentes mesures par thermométrie magnétique (réf. 3) dont, en particulier, celles faites à l'ISU qui ont donné l'échelle T_{XAc} .

En plus de ces mesures, le calcul thermodynamique de la pression de vapeur pour ^4He fournit des valeurs de température thermodynamique entre environ 1 K et 1,8 K lorsque l'on choisit une constante empirique, la chaleur de vaporisation à 0 K. On peut aussi utiliser des calculs thermodynamiques pour extrapoler une relation empirique de pression de vapeur de ^3He au-dessus de 1 K vers des températures comprises entre 1 K et 0,5 K.

b) Mesures de température thermodynamique actuellement en cours

- Par thermométrie à gaz au NML (20 K - 90 K).
- Par thermométrie à gaz et par la méthode des isothermes au KOL (2,5 K - 100 K) ; voir Document CCT/80-67.
- Par thermométrie à gaz à la PTB (4 K - 90 K).
- Par thermométrie à bruit à l'Université de Münster (20 K - 90 K)

c) Conclusion

A la référence 3, il est dit que les mesures mentionnées en a), qui constituent la base de l'EPT-76 (sauf bien entendu les mesures au point d'ébullition de l'oxygène, et les résultats sur la constante diélectrique par thermométrie à gaz qui n'étaient pas disponibles en 1978), déterminent la température thermodynamique avec une incertitude de 1 mK à 27,1 K, 0,5 mK à 1 K et 1 mK à 0,5 K environ.

On pense que les expériences indiquées en b) fourniront dans les deux ou trois prochaines années la température thermodynamique entre 20 K et 90 K avec une incertitude allant de 1 mK à 20 K à 3 mK à 90 K environ.

Ainsi, en ce qui concerne la connaissance de la température thermodynamique entre 0,5 K et 90 K, la situation devrait être assez satisfaisante avant 1983*.

*En tout point de ce domaine de température, on devrait disposer en 1983 d'informations se recoupant et provenant d'au moins deux études différentes. La situation relativement la moins satisfaisante se situe au voisinage de 0,5 K ; on ne peut exclure (référence 3) une incertitude de 1 mK (0,2 %) dans la détermination de la température thermodynamique, bien que l'échelle T_{X1} au-dessous de 1 K soit en excellent accord avec l'extrapolation thermodynamique de l'équation de pression de vapeur de ^3He . A notre avis, cela vaudrait la peine d'étendre au moins à 0,5 K la thermométrie à bruit classique, telle qu'elle est pratiquée à l'Université de Münster au-dessus de 2 K.

3. Définition de la future EIPT au-dessous de 100 K

a) Exactitude des mesures de température au-dessous de 100 K, en 1987.

Ainsi qu'il a été dit au point 2, on pense qu'avant 1983 les mesures de la température thermodynamique seront établies entre 0,5 K et 100 K avec une incertitude de 3 mK à 100 K, 1 mK à 20 K, 0,5 mK à 1 K et 1 mK à 0,5 K.

Entre 13,81 K et 90 K, on dispose de plusieurs points fixes de référence, essentiellement des points triples, que l'on peut réaliser avec une reproductibilité de $\pm 0,1$ mK dans les meilleures conditions.

Le thermomètre à résistance de platine restera le meilleur choix pour les mesures de température les plus exactes entre 20 K et 90 K environ. Avec un nombre suffisant de points fixes de référence et une méthode d'interpolation améliorée, il peut conduire à une exactitude de 0,3 mK dans ce domaine.

Entre 13,81 K et 20 K environ, le thermomètre à résistance de platine restera extrêmement pratique (parce qu'il est aussi utilisé pour les températures plus élevées), mais le thermomètre à résistance de rhodium-fer, avec des étalonnages appropriés aux points fixes de référence, sera plus exact.

Entre 0,5 K et 5 K environ, les pressions de vapeur de l'hélium permettent des mesures de température avec une reproductibilité de 0,2 mK environ.

Nous appuyons entièrement la recommandation contenue dans le Document CCT/80-40, souhaitant que les laboratoires collaborent pour atteindre le but (probablement réalisable) qui est d'avoir une reproductibilité de $\pm 0,1$ mK pour les points de transition supraconducteurs du plomb, de l'indium, de l'aluminium, du zinc et du cadmium. Les quatre points les plus bas sont très utiles dans les cas où il est moins commode de mesurer des pressions de vapeur ; le point du plomb est évidemment de la plus haute impor-

tance puisqu'on ne dispose d'aucun autre point de référence au voisinage de 7 K.

Pour le moment, il nous paraît improbable de pouvoir obtenir une reproductibilité de $\pm 0,1$ mK pour le point du niobium sans dépenses et efforts excessifs (une reproductibilité de ± 1 mK paraît possible).

Il sera donc nécessaire d'utiliser un instrument d'interpolation thermodynamique pour étalonner les thermomètres à résistance entre 7 K et 14 K. Si une incertitude de $\pm 1,5$ mK environ est suffisante, on peut utiliser le thermomètre à résistance de rhodium-fer étalonné au-dessous de 4,2 K, à 7 K et au-dessus de 13,81 K.

Dans le domaine au-dessous de 0,5 K, on utilise diverses méthodes pour la mesure précise des températures. Quand on a besoin d'étalonnage au-dessus de 0,5 K, il faut bien entendu utiliser les meilleures valeurs pour les échelles de pression de vapeur de l'hélium et les points de transition supraconducteurs du cadmium, du zinc, de l'aluminium, de l'indium et du plomb.

Il se peut que l'on dispose avant 1985 de valeurs précises pour les points de référence au-dessous de 0,5 K (points de transition supraconducteurs ou pressions de fusion de ^3He) qui pourraient, dans certains cas, être utiles pour étalonner des thermomètres à résistance.

b) Future EIPT

Afin d'éviter les questions d'unicité d'une échelle ou les questions de sémantique (Documents CCT/80-5 et 36), nous avons volontairement, dans l'exposé ci-dessus, évité de parler des échelles de température, c'est-à-dire de définitions d'une grandeur T_{87} .

A notre avis, si dans un certain domaine de température une méthode donnée pour mesurer les températures est beaucoup plus précise qu'une autre (à commodité égale), cette méthode doit être recommandée sur le plan international. Si deux ou trois méthodes présentent des mérites égaux, on ne doit pas en recommander seulement une (en laissant les autres de côté), uniquement dans

un but d'unicité. Si l'on dispose de nombreuses méthodes à utiliser dans des conditions différentes, il devient incommode de les recommander toutes ; dans ce cas, il vaut mieux avoir un exposé descriptif que des directives.

Dans le cas de l'EIPT-87, nous avons actuellement l'impression qu'il faut retenir les points de référence au-dessus de 13,81 K, les échelles de pression de vapeur de l'hélium, les cinq points de référence supraconducteurs maintenant utilisés dans le dispositif SRM-767, une méthode d'étalonnage pour le thermomètre à résistance de platine jusqu'à 13,81 K, une méthode d'étalonnage pour le thermomètre à résistance de rhodium-fer entre 0,5 K et 30 K, et l'emploi d'un thermomètre d'interpolation thermodynamique entre 4 K et 20 K. On ne peut espérer que les valeurs pour le point du niobium, ou les points de référence supraconducteurs au-dessous de 0,5 K, ou la courbe de fusion de ^3He , soient disponibles en 1985 avec une exactitude suffisante pour figurer dans le texte de l'EIPT-87.

Les mesures de température au-dessous de 0,5 K en utilisant le nitrate de cérium et de magnésium, le magnétisme nucléaire, la thermométrie à bruit, l'orientation nucléaire ou la thermométrie à résistance, ne nécessitent pas de recommandations spécifiques à inclure dans le texte de l'EIPT-87.

Il est recommandé que le CCT veille à ce que soient publiées régulièrement les indications qui peuvent être utiles en thermométrie, et qui vieillissent plus vite que les renseignements figurant dans l'EIPT.

Note.

Au cours d'une autre discussion concernant les renseignements qui doivent figurer dans le texte d'une EIPT-87 et ceux qui doivent figurer dans un document séparé complémentaire, on a avancé l'idée de n'inclure dans le texte de l'échelle que les valeurs des points de référence (y compris les pressions de vapeur de l'hélium). Tout ce qui concerne l'interpolation à l'aide du thermomètre à résistance de platine, du thermomètre à résistance de rhodium-fer, du thermomètre à gaz, du thermocouple PtRh/Pt, pourrait être exposé dans un texte complémentaire distinct.

Cela présenterait au moins deux avantages : les informations pourraient être facilement mises à jour et toute distinction nette entre la définition de l'EIPT et ses réalisations secondaires disparaîtrait (chaque méthode, avec l'exactitude qu'elle peut donner, pourrait être décrite dans les renseignements complémentaires) (voir Annexe).

- [1] EL SAMAHY (A.E.), Thèse, Université de Leyde, 1979, 108 pages.
- [2] PRESTON-THOMAS (H.) et KIRBY (C.G.M.), Metrologia, 4, 1968, p. 30.
- [3] DURIEUX (M.), ASTROV (D.N.), KEMP (W.R.G.) et SWENSON (C.A.), Metrologia, 15, 1979, p. 57.

Annexe

Températures Kelvin Internationales Pratiques

L'unité de la grandeur physique de base appelée température thermodynamique, symbole T , est le kelvin, symbole K, défini comme la fraction $1/273,16$ de la température thermodynamique du point triple de l'eau.

La valeur numérique d'une température thermodynamique est obtenue en établissant le rapport de la valeur d'une propriété physique d'un corps (qui est proportionnelle à la température thermodynamique) à cette température, à sa valeur à la température thermodynamique du point triple de l'eau, 273,16 K. Ce rapport, multiplié par le kelvin, est la température thermodynamique cherchée. De telles mesures de la température thermodynamique sont difficiles et imprécises.

En revanche, les Températures Kelvin Internationales Pratiques qui s'approchent des valeurs numériquement correspondantes de la température thermodynamique d'une façon aussi voisine que possible dans l'état actuel des connaissances, sont facilement déterminées et hautement reproductibles.

Les Températures Kelvin Internationales Pratiques (IT) sont déterminées en choisissant des points fixes de référence appropriés dans le tableau I (qui donne les Températures Kelvin Internationales Pratiques d'un certain nombre d'états d'équilibre hautement reproductibles répartis dans le domaine de température compris entre 0,5 K et 1358,03 K) et une méthode appropriée d'interpolation ou d'extrapolation dans les renseignements complémentaires à l'EIPT publiés par ailleurs. Au-dessus de 1358,03 K (ou 1337,58 K ou 1235,08 K), les Températures Kelvin Internationales Pratiques sont obtenues à partir de la loi du rayonnement de Planck :

$$\frac{\frac{L}{\lambda} \left[\frac{T}{T_{(IT)}} \right]}{\frac{L}{\lambda} \left[\frac{T}{T_{(IT)}} [Au] \right]} = \frac{\exp \left[\frac{c_2}{\frac{\lambda T}{T_{(IT)}} [Au]} \right] - 1}{\exp \left[\frac{c_2}{\frac{\lambda T}{T_{(IT)}}} \right] - 1}$$

où $L_{\lambda} \left[\frac{T}{T_{(IT)}} \right]$ et $L_{\lambda} \left[\frac{T}{T_{(IT)}} [Au] \right]$ sont les densités spectrales à la température T_{IT} et à celle du point de congélation de l'or $T_{IT} [Au]$ de la luminance énergétique du rayonnement d'un corps noir à la longueur d'onde dans le vide λ ; $c_2 = 14,388 \cdot 10^{-3}$ m.K.

TABLEAU I

Points fixes de référence	Température attribuée $T_{(IT)}$ (K)
Point de transition supraconducteur du cadmium	0,519
Point de transition supraconducteur du zinc	0,851
Point de transition supraconducteur de l'aluminium.	1,179 6
Point de transition supraconducteur de l'indium....	3,414 5
Point d'ébullition de ⁴ He	4,222 1
Point de transition supraconducteur du plomb.....	7,199 9
Point triple de l'hydrogène en équilibre	13,804 4
Point d'ébullition de l'hydrogène en équilibre à une pression de 33 330,6 pascals (25/76 atmosphère normale)	17,037 3
Point d'ébullition de l'hydrogène en équilibre	20,273 5
Point triple du néon	24,559 1
Point d'ébullition du néon	27,102
Point de transition β-γ de l'oxygène solide	43,801
Point triple de l'oxygène	54,361
Point triple de l'azote	63,146
Point triple de l'argon	83,798
Point de rosée de l'oxygène	90,188
Point de rosée du krypton	119,764
Point triple de l'eau	273,16
Point d'ébullition de l'eau	373,15
Point de congélation de l'étain	505,118 1
Point de congélation du zinc	692,73
Point de congélation de l'argent	1235,08
Point de congélation de l'or	1337,58
Point de congélation du cuivre	1358,03

Reçu en juin 1980.

ANNEXE T 6

3^e Rapport du Groupe de travail 5 *

(Thermomètres pratiques aux températures inférieures à 30 K)

(Traduction du Document CCT/80-5)

Une fois encore le Groupe de travail 5 se voit obligé de dire qu'aucun progrès significatif n'a été fait dans la recherche de thermomètres pratiques pour les températures inférieures à 30 K. en fait le paragraphe d'introduction du 2^e Rapport (1978) serait encore tout à fait d'actualité.

Comme dans le rapport précédent, nous présentons d'abord (partie A) quelques indications utiles concernant les instruments pratiques. Mais l'essentiel du rapport (partie B) concerne la demande de plus en plus pressante d'élaborer une interpolation acceptable pour étendre l'EIPT aux températures inférieures à 13,81 K, jusqu'à la limite de la pression de vapeur de l'hélium (³He). On considère les températures jusqu'à 30 K, puisqu'il n'est pas impossible que, dans une échelle révisée, la limite inférieure

*Les membres de ce Groupe de travail sont MM. R.P. HUDSON, Président, National Bureau of Standards (Etats-Unis d'Amérique), K. MITSUI, National Research Laboratory of Metrology (Japon), R.L. RUSBY, National Physical Laboratory (Royaume-Uni).

du domaine de température couvert par le thermomètre à résistance de platine soit quelque peu relevée. Dans la partie C, nous examinons ce que pourrait être une échelle au-dessous de 0,5 K, puis nous terminons (partie D) par quelques brèves considérations sur l'"unicité". On trouvera ensuite, en annexe, une étude critique du thermomètre à gaz à volume constant. (Une étude similaire, faite pour le thermomètre magnétique, ayant donné un rapport jugé trop long pour être publié, des copies peuvent en être demandées à R.P. Hudson, NBS)*. Enfin, nous présentons un tableau donnant une indication sommaire des domaines d'utilisation des différents thermomètres considérés.

A. Instruments

Le thermomètre pratique le meilleur à tous égards (sensibilité, dimension, coût) reste le thermomètre à résistance de germanium, à la condition de choisir convenablement sa résistance nominale pour le domaine d'application désiré et d'avoir bien contrôlé sa reproductibilité sur plusieurs cycles thermiques. On peut utiliser les thermomètres à résistance de germanium jusqu'à 50 mK, certains même jusqu'à 10 mK ; mais plusieurs instruments seraient nécessaires pour couvrir le domaine jusqu'à 30 K.

Dans une récente publication, Anderson [1] donne une description très utile du savoir-faire dans le domaine des basses températures ; d'autres renseignements sur le fonctionnement du thermomètre à résistance de germanium jusqu'à 10 mK ont été publiés récemment [2]. Besley poursuit ses recherches sur la stabilité des thermomètres à résistance de germanium au NML [3] et publiera prochainement les résultats obtenus à 15 K et 27 K ainsi qu'à 20 K. Un article de Anderson et Swenson [4] traite de la reproductibilité et du fonctionnement dans le domaine de 1 K à 35 K. Au NRLM, avec l'aide technique de Yokogawa Electric Works, les travaux se poursuivent sur la mise au point de thermomètres à résistance de germanium possédant des caractéristiques uniformes. Il s'est avéré que quelques modèles récents sont utilisables pour la thermométrie de précision dans le domaine de 2 K à 20 K, avec des caractéristiques qui ne sont pas très différentes de celles du Cryocal CR 1000. Ces instruments sont de construction nouvelle avec un support matériau-

*Présentement au BIPM, F-92310 Sèvres.

lisé de l'élément résistant assurant un échange thermique direct. Les caractéristiques d'auto-échauffement sont comparables à celles du CR 1000, dans lequel le support est assuré par les fils conducteurs eux-mêmes et l'échange thermique obtenu par conduction le long des fils conducteurs et par l'hélium comme gaz d'échange. Actuellement, on a quelques problèmes dus à des forces électromotrices parasites.

Pour le domaine de 1 K à 30 K, le thermomètre à résistance "verre-carbone" est intéressant comme remplaçant possible du thermomètre à résistance de germanium. Bien que, pour le moment, sa stabilité soit en général moins bonne, la fonction de T , $\frac{dR}{dT}$, est lisse et monotone sur le domaine allant de 1 K à 300 K [5]. Les problèmes actuels sont liés à la sensibilité extrême des contacts lors des manipulations et aux difficultés qui existent pour préparer des résistances "verre-carbone" sans contraintes. On peut espérer que ces difficultés seront surmontées, ou réduites, à la suite de mises au point ultérieures.

Comparé au thermomètre à résistance de germanium, le thermomètre à résistance de rhodium-fer (RIRT) est moins sensible, plus coûteux et plus grand (il a les dimensions d'un thermomètre à résistance de platine du type capsule). On peut, toutefois, utiliser un même instrument dans tout le domaine allant de 0,5 K à 30 K (et au-delà jusqu'à 300 K) avec une stabilité à long terme assurée ; au NPL, des essais ont montré que la reproductibilité ne débordait pas des incertitudes de mesures (0,1 mK à 4,2 K et moins de 0,5 mK à 20 K) sur une période de six ans. De plus, les caractéristiques du RIRT peuvent être déterminées avec exactitude (écart-type de 0,2 mK) sur de larges domaines de température, par exemple de 0,5 K à 4 K, à 20 K, à 24 K et à 27 K au moyen de polynômes de 4^e, 8^e, 9^e, et 11^e degré respectivement [6].

Une version assez rudimentaire d'un thermomètre à gaz à volume constant empli d'hélium (CVGT) donne directement des résultats thermométriques dont l'exactitude est bonne, au moyen de méthodes simples [7]. Pour de nombreuses applications, le CVGT est très "pratique", particulièrement parce qu'il n'est pas affecté par les champs magnétiques ou électromagnétiques. Il nécessite, toutefois, la mesure précise de rapports de pressions, et l'évaluation convenable des effets dus aux espaces nuisibles, aux écarts entre gaz

réels et gaz parfait, à l'effusion thermique, au poids de la colonne de gaz et à l'adsorption. Ces questions sont abordées plus loin, dans la partie B.

Deux types de thermomètres à gaz conçus pour surmonter certaines de ces difficultés ont été signalés. Dans le premier type, les effets d'espaces nuisibles sont éliminés en mesurant la masse volumique du gaz in situ au moyen de la mesure de sa constante diélectrique ou de son indice de réfraction. Gagan a montré que le thermomètre à gaz à constante diélectrique était bien utilisable [8] ; des recherches sont en cours sur le thermomètre à indice de réfraction [9]. Dans le second type, le thermomètre à gaz à volume constant à cavité résonnante à haute fréquence, la pression est mesurée in situ [10], mais l'instrument est en fait un transducteur dont il faut déterminer les défauts de linéarité. La première version de cet appareil a été faite en cuivre à forte conductivité, car ce matériau possède des propriétés thermiques reproductibles bien connues ; cependant, ce cuivre non écroui est trop mou et on a observé des instabilités élevées inacceptables. On attend avec intérêt de nouveaux résultats, qui seront obtenus avec un instrument fabriqué en alliage monétaire d'argent et comportant aussi diverses autres améliorations.

Le thermomètre magnétique est simple dans son principe. On peut en choisir la substance de telle sorte qu'il soit sensible sur un large domaine de température et que ses imperfections (qui entraînent des écarts par rapport à la loi de Curie ($1/T$) relative à la susceptibilité) soient relativement faibles. Mangum et Bowers [11] ont récemment étudié deux substances, le métaphosphate de gadolinium, $Gd(PO_3)_3$, et le sulfate éthyl de néodyme, $Nd(C_2H_5SO_4)_3$. La première donne le signal le plus fort et elle est plus résistante du point de vue physique et du point de vue chimique ; elle peut être utilisée sous forme de verre ou de poudre. Il existe des difficultés de fonctionnement avec le système de mesure habituel comportant une inductance mutuelle cylindrique et un pont en courant alternatif associé. Il est possible que l'on puisse mettre au point un système SQUID supérieur du point de vue fonctionnement mais, semble-t-il, cela n'a pas été tenté. Un tel système introduirait aussi ses propres défauts et difficultés de mise au point, dont on peut toutefois ne pas tenir compte jusqu'à preuve du contraire ! Ce thermomètre est aussi sensible aux interférences magnétiques.

Oda, Fujii et Nugano [12] ont récemment parlé d'un nouvel instrument pour basses températures dont l'étude vaut la peine d'être approfondie. Son principe repose sur la dépendance entre la température et la profondeur de blindage de Meissner pour le cuivre d'un fil supraconducteur revêtu de cuivre. La susceptibilité magnétique effective d'un fil de ce type varie donc avec la température ; la sensibilité est fondamentalement élevée.

B. Interpolation dans le domaine de 0,5 K à 30 K

Il semble qu'il existe trois grands types de thermomètres susceptibles d'être utilisés comme instrument d'interpolation pour une EIPT révisée et étendue vers les basses températures.

1) Thermomètre à résistance

Finalement, c'est au moyen de thermomètres à résistance que l'on conservera et utilisera le plus souvent l'EIPT ; il serait donc très avantageux que l'on puisse aussi utiliser un thermomètre à résistance comme instrument d'interpolation aux basses températures. Malheureusement, d'une part le thermomètre à résistance de platine ne conserve pas une sensibilité suffisante pour être utilisé jusqu'à 4,2 K, d'autre part les caractéristiques des thermomètres à résistance de germanium et de rhodium-fer sont trop différentes d'un thermomètre à l'autre pour permettre une interpolation satisfaisante en utilisant les différences par rapport aux fonctions de référence.

Toutefois, Van Rijn et al. [13] ont montré qu'un thermomètre à résistance de germanium étalonné au-dessus de 13,8 K, au-dessous de 4,2 K, et en deux points seulement entre 4,2 K et 13,8 K, peut donner des résultats exacts à 1 mK près environ. Rusby a constaté sur un échantillonnage de huit thermomètres à résistance de rhodium-fer que, si l'on ne tient pas compte des résultats entre 4,2 K et 13,8 K pour un étalonnage s'étendant de 2,2 K (ou 0,5 K) à 20,3 K, l'erreur maximale d'interpolation type donnée par un polynôme du huitième degré est de 2 à 4 mK. Si l'on ajoute à l'étalonnage, soit le point du plomb (7,2 K), soit le point du niobium (9,4 K), on ramène l'erreur maximale à 1,5 mK environ. Si l'on considère à la fois les points du plomb et du niobium, l'interpolation est réalisée à 0,2 mK près sur tout le domaine de température et dans tous les cas. Ainsi, une interpolation fondée sur un

thermomètre à résistance est techniquement réalisable à la condition de disposer de deux points fixes définis de façon précise dans le domaine de 4,2 K à 13,8 K.

Le thermomètre à résistance de platine continuerait à servir d'instrument d'interpolation jusqu'à 13,8 K et les échelles de pression de vapeur de l'hélium seraient utilisées au-dessous de 4,2 K.

Il serait aussi possible d'étalonner le thermomètre à résistance de rhodium-fer dans l'échelle du thermomètre à résistance de platine au-dessus de 13,8 K et à huit points fixes compris entre 0,5 K et 13,8 K (points de transition supraconducteurs de Cd, Zn, Al, In, Pb et Nb, point λ de ^4He et point d'ébullition normal de ^4He). Là aussi, une interpolation au moyen d'un polynôme du huitième degré serait réalisée à 0,2 mK près. A l'exception du point d'ébullition de ^4He , on éviterait les mesures de pression de vapeur, mais la méthode repose essentiellement sur la sûreté des points fixes supraconducteurs et sur le point de Nb qui, bien entendu, n'est pas encore couramment utilisé.

Ce choix du thermomètre à résistance de rhodium-fer est techniquement très tentant, mais le problème d'approvisionnement oblige à marquer le pas. A l'heure actuelle, il n'existe qu'un seul fournisseur de fil et un seul fabricant de thermomètres de ce type. Le stockage de fil et de thermomètres pourrait constituer une assurance et par ailleurs l'incorporation de cette méthode dans une EIPT pourrait bien inciter d'autres fabricants à s'intéresser à ce domaine. Un problème de matériaux existe aussi en ce qui concerne les points fixes supraconducteurs ; parmi les métaux du groupe SRM/767, Cd et Zn constituent des pièges pour les imprudents : ils ont en effet une affinité assez marquée pour les impuretés magnétiques qui peuvent affecter leur comportement de manière radicale. En ce qui concerne les effets des impuretés dans le Nb, il est actuellement nécessaire que les travaux de recherches soient poursuivis. Faudrait-il spécifier un dispositif particulier, directement disponible, ou suffirait-il de spécifier les éléments chimiques ? Serait-il, par ailleurs, nécessaire de spécifier l'emploi de cristaux simples (de Nb et éventuellement d'autres éléments) ?

2) Thermomètre à gaz à volume constant

La possibilité d'utiliser un thermomètre à gaz à volume constant pour assurer l'interpolation entre deux températures a été

discutée au moins deux fois dans les publications récentes [7, 14]. Le but est de spécifier un thermomètre à gaz à volume constant de façon telle que les effets systématiques indiqués dans la partie A soient faibles ou que l'on puisse en tenir compte avec exactitude sans investigation expérimentale poussée. Ainsi, le rapport du volume du réservoir au volume de l'espace nuisible devrait être suffisamment grand pour que l'on puisse estimer ou mesurer de façon satisfaisante la correction d'espace nuisible. Par ailleurs, le diamètre du tube capillaire ne devrait pas être trop petit afin que les erreurs d'effusion thermique ne soient pas trop importantes. Celles-ci peuvent être réduites en augmentant la pression de remplissage, mais seulement au prix d'une non-linéarité accrue due aux imperfections du gaz.

Les résultats de Berry [15] montrent que l'expression pour le second coefficient du viriel $\underline{B}(T) = \underline{a} + \underline{b}/T$ n'est pas aussi exacte que Barber le pensait, et il serait nécessaire de spécifier $\underline{B}(T)$ de façon plus précise, c'est-à-dire rendre l'interpolation légèrement non linéaire.

Dans le thermomètre à gaz de Berry (réservoir de 1 litre, capillaire de 1 mm de diamètre), la correction d'espace nuisible était d'environ 3 mK à 14 K. Cependant, si ce thermomètre était utilisé comme instrument d'interpolation entre 3,2 K et 14 K, la non-linéarité due à l'espace nuisible ne s'élèverait qu'à 0,3 mK et il pourrait en être tenu compte par simple calcul de la distribution de température dans le capillaire. L'autre solution, proposée par Swenson, consiste à utiliser un réservoir plus petit, en acceptant comme conséquence de devoir mesurer la distribution de température.

Quelques calculs se rapportant au thermomètre à gaz à volume constant sont donnés dans l'annexe, en prenant comme limite supérieure, soit le point triple de l'hydrogène, soit celui du néon. On a choisi comme limite inférieure le point d'ébullition normal de ^3He et l'extension éventuelle de l'échelle à 0,5 K se ferait par rapport à l'échelle de pression de vapeur de ^3He , par exemple.

Par ailleurs, un thermomètre à gaz à volume constant, même ayant un réservoir de volume réduit, risque d'avoir des possibilités d'adaptation limitées et, là aussi, l'attention est attirée sur les possibilités (actuellement imprécises) du thermomètre à gaz

à volume constant à cavité résonnante à haute fréquence dont le volume n'est que de quelques centimètres cubes. Si l'EIPT spécifie seulement le domaine de température, l'expression pour $B(T)$ et la masse volumique maximale, alors l'un quelconque de ces choix (y compris les thermomètres à gaz à constante diélectrique et à indice de réfraction) serait acceptable en principe, à charge pour chaque expérimentateur de vérifier que son thermomètre donne une interpolation convenable (par exemple en faisant varier les conditions de remplissage).

3) Thermomètre magnétique

Si l'on choisit un instrument paramagnétique "à l'aveuglette", on a besoin en général de quatre points d'étalonnage. La connaissance approfondie des propriétés magnétiques d'une substance donnée permet quelquefois un calcul exact des effets d'ordre supérieur, ce qui a pour résultat de réduire le nombre des points d'étalonnage nécessaires.

Dans une étude récente [11], Mangum et Bowers ont étudié un exemple de chacun des cas ci-dessus, c'est-à-dire le sulfate éthyl de néodyme et le métaphosphate de gadolinium, $Gd(PO_3)_3$. Celui-ci est le plus fort du point de vue magnétique, bien que le sel de Nd soit aussi assez fort ; à l'évidence, il est avantageux de travailler avec un ion aussi fort que possible, tant que la substance mère obéit encore à la loi de Curie avec une bonne approximation.

Les deux sels indiqués plus haut conviennent bien aux domaines de 1 K à 15 K et de 2 K à 30 K respectivement. On dispose de points fixes supraconducteurs à 0,844 K (zinc), 1,175 K (aluminium), 3,417 K (indium) et 7,200 K (plomb) dans le dispositif SMR 767 ; de plus, on peut espérer disposer d'ici peu d'une référence à 9,4 K environ (niobium). Aussi longtemps que l'on n'aura pas pour références des transitions supraconductrices à des températures encore plus élevées, il restera la pression de vapeur de l'hydrogène et, enfin, le point triple et le point d'ébullition normal du néon à 24,56 K et 27,10 K respectivement.

Avec une bonne approximation, la sensibilité à la température varie selon T^{-2} . Ainsi, si le rapport signal/bruit demeure constant, le thermomètre magnétique sera 800 fois moins sensible à 27 K et 200 fois moins à 14 K qu'il ne l'est à 1 K. En fait, le rapport

signal/bruit se détériore généralement un peu au fur et à mesure que la température augmente. Il serait nécessaire d'avoir $\Delta T = \pm 1 \mu\text{K}$ à 1 K, pour avoir encore $\pm 0,2 \text{ mK}$ à 27 K ; cela est possible - avec un thermomètre magnétique à courant alternatif assez conventionnel, équipé d'un élément sensible $\text{Gd}(\text{PO}_3)_3$ de 1 cm^3 - mais ce n'est pas facile. On peut penser que ce serait beaucoup plus facile, au moins du point de vue de la sensibilité, avec un système de détection du type SQUID, bien qu'une telle approche du problème n'ait pas encore été tentée.

4) Résumé

Le thermomètre magnétique et le thermomètre à gaz à volume constant sont semblables en ce sens que leur paramètre thermométrique est relié simplement à la température thermodynamique ; le problème se limite à déterminer les effets d'ordre supérieur avec une exactitude acceptable. Le thermomètre à gaz à volume constant est plus simple à monter et présente davantage de possibilités d'application. Le thermomètre à résistance de rhodium-fer est celui pour lequel les impératifs d'étalonnage sont les plus grands, mais sa conception est simple et ses possibilités d'utilisation assez variées.

C. Interpolation au-dessous de 0,5 K

Pour le domaine inférieur à 0,5 K et jusqu'à la région du millikelvin, on dispose de plusieurs points fixes de référence. Ils comportent ceux du type supraconducteur relativement simples, les plus bas se situant à environ 16 mK ; et les transitions de phase de ^3He plus complexes, qui vont jusqu'à 1 mK et au-dessous. Le NBS a fabriqué et fournit un nouveau dispositif de points fixes supraconducteurs à basses températures (SRM 768), dont les composants (et leurs transitions) sont W ($\sim 16 \text{ mK}$), Be ($\sim 22 \text{ mK}$), Ir ($\sim 99 \text{ mK}$), AuAl_2 ($\sim 161 \text{ mK}$) et AuIn_2 ($\sim 206 \text{ mK}$). A l'heure actuelle, il est difficile de se procurer W, Be et Ir de pureté convenable. Les différences de température entre Be-Ir et Ir- AuAl_2 sont plus grandes qu'il n'est souhaitable et cette situation va encore empirer si le problème d'approvisionnement en Ir s'avère insoluble. Ce domaine (1 mK à 500 mK) est assez particulier parce que les observateurs trouvent fréquemment tout aussi commode d'utiliser un thermomètre primaire (anisotropie du rayonnement γ de noyaux orientés) ou un thermomètre quasi-primaire (magnétique ou magné-

tique nucléaire). Aussi, peut-être faudrait-il commencer par poser la question : une échelle pratique est-elle nécessaire ? Si la réponse est oui, la seconde question devrait être : l'échelle sera-t-elle fondée sur l'interpolation entre des points fixes (exemple : le thermomètre à résistance de platine) ou sur un principe physique fondamental avec extrapolation ad infinitum à partir d'un point de référence (exemple : le rayonnement d'un corps noir) ?

Le premier cas pourrait éventuellement être réglé (jusqu'à 10 mK) en utilisant les thermomètres à résistance de germanium, si l'approvisionnement se faisait sans problème à l'avenir et si les transitions supraconductrices, qui sont trop largement espacées, étaient complétées (ou entièrement remplacées) par un thermomètre magnétique. De plus, des résistances en carbone amincies par rodage risquent de supplanter celles en germanium, s'il s'avère qu'elles présentent, comme on l'espère actuellement, une relation R/T analytique assez simple ; dans les deux cas, des ré-étalonnages fréquents seraient nécessaires. Un thermomètre magnétique utilisant comme élément sensible de la poudre de nitrate double de cérium dilué dans du lanthane et de magnésium (CMN) serait plus simple à étalonner et devrait pouvoir être utilisé jusqu'à 1 mK ; il nécessiterait aussi un ré-étalonnage après chaque réchauffage. Pour certaines applications il risquerait d'être difficile à utiliser*.

Par ailleurs, un thermomètre magnétique nucléaire permet d'utiliser la seconde méthode qui est un peu plus élégante. On pourrait encore utiliser les points fixes dont on dispose, mais seulement comme indicateurs de confiance. Les impuretés magnétiques électroniques peuvent perturber fortement la susceptibilité nucléaire mais la technique de la résonance magnétique nucléaire (NMR) évite largement cette difficulté. On a étalonné des thermomètres NMR à des températures allant jusqu'à 2 K avec une incertitude estimée à 0,2 % [16]. On pourrait donc envisager la liaison avec les domaines plus élevés de l'EIPT révisée en rattachant une partie du domaine du

*Comme les conditions d'utilisation risquent d'être extrêmement variées dans les recherches aux très basses températures, il est particulièrement difficile de trouver un seul et même thermomètre largement utilisable. Ce fait est très lié à la question : quel type d'EIPT, s'il en faut vraiment une ?

thermomètre à résistance de rhodium-fer à un point fixe supra-conducteur, ou à la courbe de pression de vapeur de ^3He , quelque part entre 0,5 K et 1 K. Une autre possibilité consisterait à utiliser, non pas la susceptibilité magnétique nucléaire, mais le temps de relaxation spin nucléaire-réseau, ce qui est fait couramment pour l'étalonnage interne de thermomètres NMR industriels. Accepter une valeur pour la constante de Korringa revient un peu à définir la température du point triple de l'eau. Toutefois, là aussi, il serait nécessaire d'éviter les effets pernecieux des impuretés.

D. Non-unicité

Ou bien on utilise un thermomètre magnétique, ou un thermomètre a gaz et les pressions de vapeur de l'hélium, ou le thermomètre à résistance de rhodium-fer jusqu'à 0,5 K ; ou bien on limite l'emploi du NMR aux températures ne dépassant pas 0,05 K, comblant les vides au moyen du thermomètre magnétique conventionnel, ou on fait confiance au NMR jusqu'à 1 K ; ou bien on utilise "l'approche" au moyen du thermomètre à résistance de platine ou "l'approche" au moyen du rayonnement du corps noir. Dans tous les cas, ceux qui vont réviser l'EIPT vont avoir à se poser la question : doit-on éviter ou tolérer les chevauchements, autrement dit la duplication (ou la prolifération) des échelles de température ?

C'était précisément la faute qu'une EIPT était à l'origine destinée à éliminer et nous pensons que le principe d'une définition unique ne devrait pas être abandonné sans raison valable. La non-unicité ne serait pas un problème en pratique, toutefois, tant que les ordres de grandeur impliqués ne sont pas supérieurs aux écarts que l'on peut constater sur le plan international entre les réalisations d'une échelle définie de façon unique.

BIBLIOGRAPHIE

1. ANDERSON (A.C.), Advances in Instrumentation, Vol. 33, Part 4, p. 13, Instrument Society of America, Pittsburgh, 1978.
2. ROTH (E.P.), MATEY (J.R.), ANDERSON (A.C.), JOHNS (D.A.), Rev. Sci. Instr., 49, 1978, p. 813.

3. BESLEY (L.M.), Rev. Sci. Instr., 49, 1978, p. 1041.
4. ANDERSON (M.S.), SWENSON (C.A.), Rev. Sci. Instr., 49, 1978, p. 1027.
5. BESLEY (L.M.), Rev. Sci. Instr., 50, 1979, p. 1626.
6. RUSBY (R.L.), Conference on Low Temperature Thermometry (Low Temperature Group, Institute of Physics), London, October 1st 1979 (non publié).
7. BARBER (C.R.), Temperature, Its Measurement and Control in Science and Industry, Vol. 4, p. 99, Instrument Society of America, Pittsburgh, 1972.
8. GUGAN (D.), MICHEL (G.W.), Metrologia, 16, 1980, p. 149.
9. COLCLOUGH (A.R.), Metrologia, 10, 1974, p. 73.
10. VAN DEGRIFT (C.T.), BOWERS Jr. (W.J.), WILDES (D.G.), PIPES (P.B.), Advances in Instrumentation, Vol. 33, Part 4, p. 33, Instrument Society of America, Pittsburgh, 1978.
11. MANGUM (B.W.), BOWERS Jr. (W.J.), Proc. 15th Int. Conf. Low Temp. Phys., J. Phys., 39, C-16, 1978, p. 1175.
12. ODA (Y.), FUJII (G.), NAGANO (H.), Japan J. Appl. Phys., 18, 1979, p. 1411.
13. VAN RIJN (C.), NIEUWENHUIS-SMIT (M.C.), VAN DIJK (J.E.), TIGGELMAN (J.L.), DURIEUX (M.), Temperature, Its Measurement and Control in Science and Industry, Vol. 4, p. 815, Instrument Society of America, Pittsburgh, 1972.
14. SWENSON (C.A.), CCT, 11^e session, 1976, p. T 86.
15. BERRY (K.H.), Metrologia, 15, 1979, p. 89.
16. BLOYET (D.), GHOZLAN (A.), PIEJUS (P.), VAROQUAUX (E.J.-A.), Proc. 13th Int. Conf. Low Temperature Physics, Vol. IV, p. 503, Plenum Press, New York, 1974.

Annexe

Le thermomètre à gaz à volume constant
comme instrument d'interpolation

Nous passons en revue les principaux effets systématiques qui entraînent la non-linéarité d'un thermomètre à gaz à volume constant utilisé comme instrument d'interpolation.

1) Effets d'espace nuisible

L'écart par rapport à la linéarité, dû aux espaces nuisibles est donné par

$$\Delta T_{-D} = - \frac{D}{V_B} (T_x - T_1)(T_2 - T_x)$$

où V_B est le volume du réservoir et D est la somme $\sum \frac{V_i}{T_i}$ des éléments de volume à la température T_i dans l'appareillage de mesure de la pression. ΔT_{-D} est à son maximum au milieu du domaine $T_x = \frac{1}{2} (T_1 + T_2)$, en supposant pour simplifier que D est indépendant de T_x .

Pour un thermomètre à gaz ayant un tube capillaire de 1 mm de diamètre et 80 cm de longueur, l'"espace nuisible capillaire" serait probablement de 0,01 cm³/K environ (dans les limites d'un facteur 2, selon les caractéristiques de construction). Si $T_1 = 3,2$ K, $T_2 = 14$ K et $V_B = 1000$ cm³, la valeur maximale de ΔT_{-D} serait de 0,3 mK ; la valeur correspondante pour 3,2 K et 24 K serait de 1,1 mK. De plus, pour chaque centimètre cube à température ambiante, l'écart par rapport à la linéarité augmenterait de 0,1 mK (pour $T_2 = 14$ K) ou 0,4 mK ($T_2 = 24$ K).

Le volume à température ambiante peut dépasser 10 cm³ si l'on utilise un diaphragme [15], mais il n'est pas nécessaire qu'il soit supérieur à 1 cm³ pour un manomètre à mercure conçu avec soin (Rogers et al., Metrologia, 4, 1968, p. 47).

2) Correction pour un gaz réel

Berry a relié ses résultats pour le second coefficient du viriel de ⁴He au moyen de l'expression $B(T) = \underline{a} + \underline{b}/T + \underline{c}/T^2$. Dans cette relation, il n'y a que le terme \underline{c}/T^2 qui contribue à la non-linéarité dans l'interpolation. L'ordre de grandeur de l'effet est donné par :

$$\Delta T_G = \frac{(\underline{T}_x - \underline{T}_1)(\underline{T}_2 - \underline{T}_x)}{\underline{T}_1 \cdot \underline{T}_2 \cdot \underline{T}_x} \frac{\underline{c} \cdot N}{V_B};$$

il atteint un maximum pour $\underline{T}_x = \sqrt{\underline{T}_1 \cdot \underline{T}_2}$. Pour une sensibilité à la pression de 2,4 kPa/K (18 torr/K), la concentration N/V_B est de 3×10^{-4} mol/cm³. Si nous prenons $\underline{c} = 48 \pm 10$ cm³·K²/mol, nous avons $\Delta T_G(\text{max})$ égal à $1,2 \pm 0,2$ mK et $1,8 \pm 0,4$ mK, respectivement pour les domaines allant de 3,2 K à 14 K et 3,2 K à 24 K. A cause de l'incertitude dans la correction et à cause de l'effet du troisième coefficient du viriel (qui peut être de 0,3 mK dans ces exemples), il serait souhaitable d'indiquer la sensibilité à la pression, ou au moins sa limite supérieure, si l'on doit utiliser un thermomètre à gaz comme instrument d'interpolation dans une échelle.

3) Dans un tube de 1 mm de diamètre dont l'une des extrémités est à 3,2 K (réservoir de gaz) et l'autre à la température ambiante, l'effet thermomoléculaire serait d'environ 0,4 Pa à une pression de 8 kPa, et conduirait à une correction de température d'environ 0,2 mK.

4) L'effet type de la colonne de gaz est de 10^{-4} \underline{P} (\underline{P} étant la pression du gaz) et ne provoque aucune non-linéarité significative dans l'interpolation.

5) Les effets d'adsorption ont été étudiés par Berry [15] jusqu'à 2,6 K, en utilisant un réservoir doré de 1000 cm³; ils se sont avérés inférieurs à 0,1 mK pour 0,8 kPa/K. Toutefois, tous les réservoirs se comporteraient de façon différente à cet égard et

il serait souhaitable de pouvoir interpoler en travaillant avec des masses volumiques différentes surtout si l'on employait un réservoir nettement plus petit.

Comme Swenson l'a fait remarquer, on peut avoir de nombreuses variantes des paramètres de conception, et les calculs actuels sont plutôt des exemples qu'une tentative pour donner des spécifications. En particulier, il serait possible de réduire de façon substantielle les dimensions du réservoir à la condition de pouvoir mesurer les corrections d'espace nuisible accrues avec l'exactitude voulue et de pouvoir garantir que les effets d'adsorption ne sont pas importants. Comme la non-linéarité due aux espaces nuisibles augmente en gros comme T_2^2 , tandis que les corrections thermo-moléculaires et celles liées au caractère imparfait du gaz augmentent rapidement au fur et à mesure que T_1 diminue, la conception du thermomètre dépend beaucoup du domaine de température dans lequel il sera utilisé.

Reçu en mars 1980.

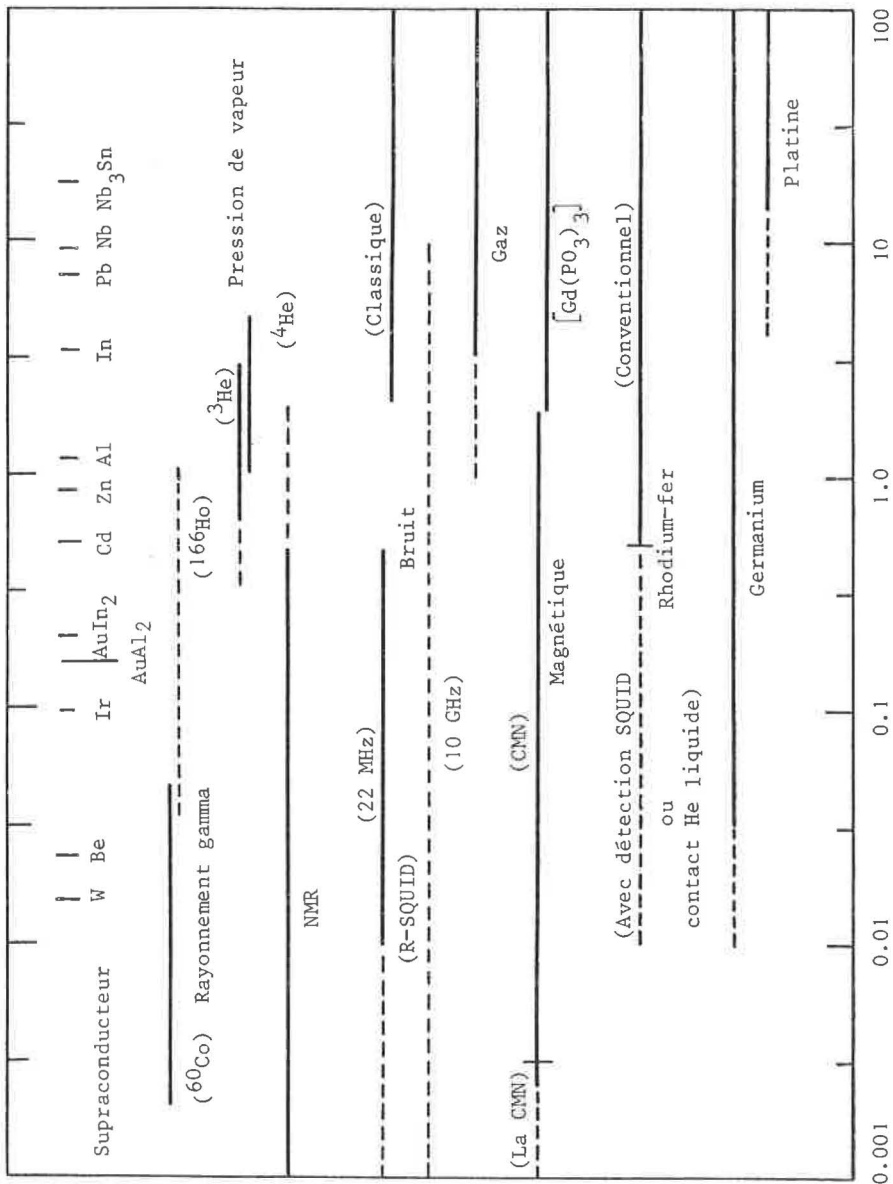


TABLE DES MATIÈRES

COMITÉ CONSULTATIF DE THERMOMÉTRIE

13^e Session (1980)

	Pages
Notice historique sur les organes de la Convention du Mètre	v
Liste des membres	vii
Ordre du jour	ix
Rapport au Comité International des Poids et Mesures, par M. Durieux	T 1
EIPT (remplacement; extension vers les basses températures; réalisations secondaires). Thermomètres à résistance de platine pour les hautes températures. Comparaison de cellules scellées à point triple. Groupes de travail (rapports; réorganisation)	2
Recommandation T 1 (1980)	6
Compte rendu des séances de la 13 ^e session du CCT	7
1. Approbation du compte rendu des séances de la 12 ^e session du CCT	7
2. Travaux faisant suite à la 12 ^e session du CCT	7
– Publication de l'EPT-76 et du document joint	7
– Valeur de la constante des gaz	8
– Comparaisons de cellules scellées à point triple	8
– Distribution des thermomètres à résistance de platine pour la mesure des hautes températures, fabriqués au NBS	10
– Différence importante possible $T - T_{68}$ au point triple de l'oxygène	10
3. Présentation des rapports des Groupes de travail	10
– Rapport du GT1 (Révision de l'EIPT)	10
– Rapport du GT2 (Points fixes secondaires et échelles secondaires)	12
– Rapport du GT3 (Températures supérieures à 100 K)	17
– Rapport du GT4 (Températures inférieures à 100 K)	19
– Rapport du GT5 (Thermomètres pratiques aux températures inférieures à 30 K)	20
– Discussion commune des rapports du GT4 et du GT5	21
4. Mise au point de thermomètres à résistance de platine pour la mesure des hautes températures	22
5. Principes d'une nouvelle EIPT sur lesquels doit reposer le projet d'échelle prévu pour 1982	29
– Lettre de la Commission I.4 de l'UICPA (Inconvénients des changements trop fréquents d'échelles)	29
– Établissement éventuel des extrémités de l'échelle sur des principes thermodynamiques et abaissement éventuel de sa limite inférieure de 0,5 K à 10 mK	30
– Remplacement du point de congélation de l'or par le point de congélation du cuivre	32
– Limite inférieure du domaine du thermomètre à résistance de platine	32

- Points fixes dans le domaine du thermomètre à résistance de platine (probablement 14 K-1 085 °C)	32
- Méthodes d'interpolation pour le domaine du thermomètre à résistance de platine (probablement 14 K-1 085 °C)	36
- Domaine des basses températures (probablement 0,5 K-14 K)	37
6. Programmes futurs du CCT et des nouveaux Groupes de travail	38
- Programme futur du CCT	38
- Groupe de travail 1 : Nouvelle EIPT et Renseignements complémentaires	38
- Groupe de travail 2 : Points de référence secondaires et document sur la thermométrie « pratique »	39
- Groupes de travail 3 et 4, considérations générales	39
- Groupe de travail 3 : Domaine du thermomètre à résistance de platine et températures thermodynamiques au-dessus de 14 K	39
- Groupe de travail 4 : Nouvelle EIPT au-dessous du domaine du thermomètre à résistance de platine	40
- Composition des Groupes de travail	40
7. Publication des documents présentés à la 13 ^e session du CCT	40
8. Questions diverses	41
- Rapport et Recommandation du CCT au CIPM	41
- Prochaine session du CCT	41
- Remarques diverses (travaux thermométriques futurs du BIPM)	42

Annexes

T 1. Documents de travail présentés à la 13 ^e session du CCT	44
T 2. Résumé du Rapport du Groupe de travail 1 (Révision de l'EIPT)	53
T 3. 5 ^e Rapport du Groupe de travail 2 (Points fixes secondaires et échelles secondaires)	55
T 4. 5 ^e Rapport du Groupe de travail 3 (Températures supérieures à 100 K)	80
T 5. 5 ^e Rapport du Groupe de travail 4 (Températures inférieures à 100 K)	88
T 6. 3 ^e Rapport du Groupe de travail 5 (Thermomètres pratiques aux températures inférieures à 30 K)	100

IMPRIMERIE DURAND

28600 LUISANT (FRANCE)

Dépôt légal, Imprimeur, 1980

ISBN 92-822-2068-0

ACHEVÉ D'IMPRIMER LE 30 JUILLET 1981

Imprimé en France