

COMITÉ CONSULTATIF DE THERMOMÉTRIE

SESSION DE 1974

ORDRE DU JOUR

1. Discussion des rapports des Groupes de travail 1 à 4.
 - a. GT 2 : Points fixes secondaires et techniques de mesure.
 - b. GT 3 : Températures thermodynamiques pour $T > 100$ K.
 - c. GT 4 : Températures thermodynamiques pour $T < 100$ K.
 - d. GT 1 : Révision de l'E.I.P.T.-68 ; discussion préliminaire.
 2. Informations en rapport avec la Recommandation T 1 (1971).
 - a. Pyrométrie par rayonnement au-dessous de $1\ 064$ °C.
 - b. Mesures de températures thermodynamiques au-dessous de $1\ 064$ °C.
 - c. Détermination du point de congélation du platine dans l'E.I.P.T.-68.
 - d. Mesures de température au-dessus de $4\ 000$ K.
 3. Documents soumis au C.C.T.
 - a. Examen des documents qui ne se rapportent pas aux points 1 et 2.
 - b. Date limite de présentation des documents pour les sessions ultérieures.
 - c. Publication des documents.
 - d. Publication des documents des Groupes de travail.
 4. Révision de l'E.I.P.T.-68 (*suite*).
 5. Prochaine session du C.C.T.
 6. Fréquence des futurs rapports des Groupes de travail.
 7. Publication des présents rapports des Groupes de travail.
 8. Tâches et composition des Groupes de travail.
 9. Révision de l'E.I.P.T.-68 (*fin*).
 10. Futur remplacement de l'E.I.P.T.-68.
 11. Divers.
 12. Rapport et Recommandation au C.I.P.M.
-

COMITÉ INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES

COMITÉ CONSULTATIF
DE THERMOMÉTRIE

10^e SESSION — 1974

(14-16 mai)



BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES

Pavillon de Breteuil, F-92310 SÈVRES, France

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

ISBN 92-822-2033-8.

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* (B.I.P.M.) 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 fondamentales.

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

La Conférence Générale est formée des délégués de tous les États membres de la Convention du Mètre et se réunit au moins une fois tous les six 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 au moins une fois tous les deux 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. Le budget annuel du Bureau International est de l'ordre de 4 000 000 de francs-or, soit environ 1 600 000 dollars U.S.

(1) Au 31 décembre 1974, quarante-trois 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, Corée, Danemark, Dominicaine (Rép.), Égypte, Espagne, Finlande, France, Hongrie, Inde, Indonésie, 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 C.I.P.M.*, 81, 1963, p. 97). Chaque Comité Consultatif, dont la présidence est généralement confiée à un membre du Comité International, est composé d'un délégué 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 sept :

1. Le *Comité Consultatif d'Électricité* (C.C.E.), créé en 1927.
2. Le *Comité Consultatif de Photométrie et Radiométrie* (C.C.P.R.), nouveau nom donné en 1971 au *Comité Consultatif de Photométrie* (C.C.P.) créé en 1933 (de 1930 à 1933 le Comité précédent (C.C.E.) s'est occupé des questions de photométrie).
3. Le *Comité Consultatif de Thermométrie* (C.C.T.), créé en 1937.
4. Le *Comité Consultatif pour la Définition du Mètre* (C.C.D.M.), créé en 1952.
5. Le *Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde* (C.C.D.S.), créé en 1956.
6. Le *Comité Consultatif pour les Étalons de Mesure des Rayonnements Ionisants* (C.C.E.M.R.I.), créé en 1958. Depuis 1969 ce Comité Consultatif est constitué de quatre sections : Section I (Rayons X et γ , électrons), Section II (Mesure des radionucléides), Section III (Mesures neutroniques), Section IV (Étalons d'énergie α).
7. Le *Comité Consultatif des Unités* (C.C.U.), créé en 1964.

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 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-Président
J. V. DUNWORTH

Président
J. M. OTERO

LISTE DES MEMBRES

DU

COMITÉ CONSULTATIF DE THERMOMÉTRIE

Président

H. PRESTON-THOMAS, Membre du Comité International des Poids et Mesures; Assistant Director, Division of Physics, Conseil National de Recherches, *Ottawa*.

Membres

AMT FÜR STANDARDISIERUNG, MESSWESEN UND WARENPRÜFUNG [A.S.M.W.], *Berlin*.

CONSEIL NATIONAL DE RECHERCHES [N.R.C.], *Ottawa*.

CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET MÉTIERS [C.N.A.M.]: Institut National de Métrologie [I.N.M.], *Paris*.

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

INSTITUT DES MESURES PHYSICOTECHNIQUES ET RADIOTECHNIQUES [I.M.P.R.], *Moscou*.

ISTITUTO DI METROLOGIA G. COLONNETTI, *Turin*.

KAMERLINGH ONNES LABORATORIUM [K.O.L.], *Leiden*.

NATIONAL BUREAU OF STANDARDS [N.B.S.], *Washington*.

NATIONAL STANDARDS LABORATORY [N.S.L.]*, *Chippendale* (Australie).

(*) Maintenant « National Measurement Laboratory » (N.M.L.).

NATIONAL PHYSICAL LABORATORY [N.P.L.], *Teddington* (Grande-Bretagne).

NATIONAL RESEARCH LABORATORY OF METROLOGY [N.R.L.M.], *Tokyo*.

PHYSIKALISCH-TECHNISCHE BUNDESANSTALT [P.T.B.], *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 Tchécoslovaque, *Bratislava*.

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

Le directeur du Bureau International des Poids et Mesures [B.I.P.M.], *Sèvres*.

10^e SESSION (1974)

RAPPORT

AU

COMITÉ INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES

Par M. DURIEUX, Rapporteur

Le Comité Consultatif de Thermométrie (C.C.T.) s'est réuni pour sa 10^e session au Bureau International des Poids et Mesures, à Sèvres, où il a tenu cinq séances les 14, 15 et 16 mai 1974.

Etaient présents :

H. PRESTON-THOMAS, membre du C.I.P.M., président du C.C.T.

Les délégués des laboratoires membres :

Conseil National de Recherches [N.R.C.], Ottawa
(R.E. BEDFORD).

Conservatoire National des Arts et Métiers [C.N.A.M.],
Paris : Institut National de Métrologie (A. MOSER).
Istituto di Metrologia G. Colonnetti [I.M.G.C.], Turin,
(L. CROVINI).

Kamerlingh Onnes Laboratorium [K.O.L.], Leiden
(M. DURIEUX).

National Bureau of Standards [N.B.S.], Washington
(R.P. HUDSON, H.H. PLUMB).

National Physical Laboratory [N.P.L.], Teddington
(P. DEAN, T.J. QUINN).

National Research Laboratory of Metrology [N.R.L.M.],
Tokyo (K. MITSUI).

National Standards Laboratory [N.S.L.]*, Chippendale
(W.R.G. KEMP).

Physikalisch-Technische Bundesanstalt [P.T.B.],
Braunschweig (W. THOMAS).

Les membres nominativement désignés :

F.G. BRICKWEDDE (Pennsylvania).

J. SKAKALA (Bratislava).

Le directeur du B.I.P.M. (J. TERRIEN).

Assistaient aussi à la session : P. GIACOMO, sous-
directeur du B.I.P.M., J. BONHOURE et G. GIRARD
(B.I.P.M.).

Excusé : J. de BOER (Amsterdam), membre nominativement
désigné.

Absents : Amt für Standardisierung, Messwesen und Waren-
prüfung [A.S.M.W.], Berlin ; Institut de Métrologie D.I.
Mendéléév [I.M.M.], Leningrad ; Institut des Mesures
Physicotechniques et Radiotechniques [I.M.P.R.], Moscou.
M. COLOMINA (Madrid), C.A. SWENSON (Ames, U.S.A.),
membres nominativement désignés.

Le Président accueille tous les participants et en parti-
culier Mr Mitsui, le nouveau représentant du N.R.L.M.
Mr Terrien leur souhaite la bienvenue au B.I.P.M.

Mr Durieux est désigné comme rapporteur, avec Mr Girard
comme secrétaire.

A la 9^e session (1971) du C.C.T., on avait constitué quatre
Groupes de travail pour étudier des points particuliers concer-
nant la tâche du C.C.T. Les Groupes de travail devaient présen-
ter au C.C.T. des rapports annuels. Ces rapports se sont révélés
extrêmement utiles et ont constitué la base de la plupart des
discussions de cette 10^e session du C.C.T.

* Maintenant National Measurement Laboratory [N.M.L.].

Avant d'aborder le point 1 de l'ordre du jour (discussion des rapports des quatre Groupe de travail), le Président fait remarquer que le sujet principal des discussions au cours de cette session sera vraisemblablement l'approbation d'une version amendée de l'Echelle Internationale Pratique de Température de 1968 (E.I.P.T.-68), proposée dans le dernier rapport du Groupe de travail 1. Si la version amendée de l'E.I.P.T.-68 doit être approuvée par le C.I.P.M. à sa session de septembre 1974 et ensuite par la Conférence Générale des Poids et Mesures à sa réunion de mai 1975, le temps dont on dispose est extrêmement réduit. En fait, à l'exception peut-être de quelques détails mineurs, il faut qu'à cette session le C.C.T. approuve entièrement l'E.I.P.T.-68 amendée.

1. DISCUSSION DES RAPPORTS DES GROUPES DE TRAVAIL 1 A 4

a) Rapport du Groupe de travail 2 (Points fixes secondaires ; techniques de mesure)

Mr Crovini remarque que le Groupe de travail 2 a préparé une liste des déterminations des points de référence secondaires. Cette liste n'est pas complète. On espère que cela pourra stimuler des redéterminations des points fixes les moins sûrs et que quiconque est en mesure d'y apporter une contribution le fera et communiquera ses résultats au Groupe de travail 2.

Mr Crovini cite quelques points particuliers de la liste. Une nouvelle valeur ($T_{68} = 234,309$ K) est attribuée au point de congélation du mercure ; la valeur qui figurait dans la version originale de l'E.I.P.T.-68 ($T_{68} = 234,288$ K) était inexacte. On propose une nouvelle valeur pour la température du point de l'eutectique cuivre-aluminium, qu'on doit expérimentalement déterminer en tant que point de fusion et non en tant que point de congélation ; la nouvelle valeur est $t_{68} = 548,26$ °C (l'ancienne valeur était $t_{68} = 548,23$ °C). On propose $t_{68} = 630,755$ °C comme température du point de congélation de l'antimoine (ancienne valeur $t_{68} = 630,74$ °C) ; cette nouvelle valeur est essentiellement fondée sur des expériences faites au N.R.C. et à l'I.M.G.C. avec des échantillons d'antimoine entièrement exempt d'oxygène et des thermomètres à résistance de platine de la meilleure qualité. La température du point de congélation du cuivre devient $t_{68} = 1\,084,88$ °C (au lieu de $t_{68} = 1\,084,5$ °C). Aux basses températures il y a de

nombreuses nouvelles déterminations de points de référence. Pour le point triple de l'argon, qui ne figurait pas dans la version originale de l'E.I.P.T.-68, le Groupe de travail 2 propose $T_{68} = 83,798 \text{ K}$; on a inclus ce point dans le nouveau projet comme substitut au point d'ébullition de l'oxygène. Pour le point de congélation du platine, dont on avait recommandé l'étude à la dernière session du C.C.T., le Groupe de travail 2 n'est pas en mesure de soumettre une proposition définitive tant que l'origine de la différence entre la récente valeur du N.S.L. ($t_{68} = 1\,769,7 \text{ °C} \pm 0,5 \text{ °C}$) et la précédente valeur du N.P.L. ($t_{68} = 1\,767,9 \text{ °C} \pm 0,3 \text{ °C}$) n'aura pas été déterminée.

Mr Crovini remarque aussi qu'il est très difficile d'évaluer les exactitudes des différentes déterminations sur des bases comparables et que le nombre des points fixes proposés comme points de référence secondaires paraît excessivement grand. Il demande si l'on doit allonger sans discrimination la liste des points de référence secondaires ou si on ne devrait pas plutôt éliminer certains points, par exemple en raison d'une moins bonne reproductibilité. A cet égard, il s'avère qu'on doit apporter une attention particulière à l'établissement des températures de référence secondaires dans le domaine compris entre -50 °C et 200 °C où la thermométrie est très souvent pratiquée au niveau secondaire.

En ce qui concerne la seconde partie de la tâche du Groupe de travail 2, c'est-à-dire la recherche de techniques pratiques simplifiées de mesure des températures, Mr Crovini mentionne trois points :

On a donné une forme simplifiée de la fonction de référence $W_{\text{CCT-68}}$ pour les thermomètres à résistance de platine ; cette forme simplifiée est déjà introduite dans le nouveau projet d'E.I.P.T.-68 proposé.

On est généralement d'accord pour penser que le thermocouple Pt-10 % Rh/Pt, que l'on utilise entre $630,74 \text{ °C}$ et $1\,064,43 \text{ °C}$, est sérieusement limité en exactitude (au mieux $\pm 0,2 \text{ °C}$) ; en conséquence, il faudrait étendre l'échelle de rayonnement vers le bas et l'échelle du thermomètre à résistance de platine vers le haut pour qu'elles se rejoignent en un point situé dans le domaine compris entre 800 °C et $1\,064 \text{ °C}$. Les thermomètres à résistance de platine dont on dispose couramment ne donnent pas entière satisfaction lorsqu'on les utilise aux températures élevées. Un nouveau type de thermomètre à résistance de platine fabriqué au Japon semble être

le meilleur, mais on n'a pas encore démontré que son fonctionnement jusqu'au point de l'or est digne de confiance. Mr Crovini demande aux laboratoires nationaux de coordonner les activités expérimentales de façon à obtenir une estimation complète des possibilités d'une échelle du thermomètre à résistance de platine jusqu'à, disons, 960 °C. Pour ce faire, il suggère que l'on définisse une échelle provisoire du thermomètre à résistance de platine aux températures élevées.

Enfin, le Groupe de travail 2 a proposé une réalisation secondaire de l'E.I.P.T.-68 entre 1 064 °C et 1 600 °C environ au moyen de thermocouples en alliage Pt-Rh ; une telle échelle serait bien entendu moins précise que l'échelle du pyromètre optique mais plus facile et moins onéreuse à réaliser.

Le Président remercie Mr Crovini pour ses commentaires sur le rapport du Groupe de travail 2.

Mr Kemp et Mr Quinn commentent la différence entre les températures obtenues au N.S.L. et au N.P.L. pour le point de congélation du platine. Mr Kemp pense que l'on pourra élucider dans quelques semaines la question de la présence éventuelle d'impuretés dans l'échantillon de platine utilisé au N.S.L. Mr Quinn est d'accord avec Jones, qui a effectué les mesures au N.S.L., pour considérer comme peu probable que des impuretés dans les échantillons de platine du N.S.L. puissent expliquer la différence, car si le platine avait été impur au point d'élever le point de congélation de 1,8 °C, les paliers de fusion et de congélation n'auraient pas été horizontaux. Mr Quinn suggère que la difficulté se situe dans la comparaison des luminances énergétiques du four et de la lampe étalon ; à cet égard, il rappelle des problèmes antérieurs demeurés non résolus auxquels le N.S.L. a été confronté en faisant des mesures sur la lampe étalon du type à ruban que le N.P.L. avait conçue et qui avait servi dans les comparaisons internationales des échelles du pyromètre optique. On convient que le N.P.L. et le N.S.L. continueront de discuter la question et présenteront ultérieurement une valeur définitive au Groupe de travail 1.

On envisage d'autres déterminations du point de congélation du platine à la P.T.B. et à l'I.M.G.C., mais on n'a aucun résultat pour le moment. Mr Crovini ne pense pas en avoir avant la fin de 1974.

Une discussion assez approfondie s'engage sur deux aspects de la proposition du Groupe de travail 2 d'établir une échelle secondaire du thermocouple pour le domaine compris entre 1 064 °C et 1 600 °C. Comment doit-on définir une telle échelle et devrait-elle être approuvée par le C.I.P.M. ?

Pour Mr Quinn, un point de départ raisonnable serait fourni par les nouvelles tables de référence pour les thermocouples Pt-10 % Rh/Pt et Pt-13 % Rh/Pt mises au point par le N.B.S., le N.P.L. et le N.R.C. il y a quelques années. Il préfère les thermocouples à 13 % de rhodium parce que ceux-ci paraissent plus stables.

Mr Crovini n'est pas certain que les différents types de fil reproduiront suffisamment bien les tables de référence sans étalonnage. Il rappelle que l'on a utilisé les tables dans deux normes nationales pour les thermocouples (ASTM E230 aux Etats-Unis et BS 4937 au Royaume-Uni), mais il se demande si ces normes sont assez bonnes pour l'échelle secondaire proposée. Il pense que l'étalonnage à un ou deux points de référence sera nécessaire. Mr Quinn et Mr Bedford sont d'accord sur ce point. Mr Bedford n'est pas certain que le couple Pt-13 % Rh/Pt soit idéal pour le domaine des températures élevées, mais il est d'accord avec Mr Quinn pour penser que l'utilisation d'un type différent de thermocouple entraînerait un travail considérable pour établir de nouvelles tables de référence.

Quant à savoir ce qu'on devrait faire en cette matière, Mr Quinn et Mr Hudson demandent si le C.C.T. ne devrait pas simplement approuver les tables de thermocouples existantes, déjà acceptées par l'ASTM et la B.S.I. ; on espère que la C.E.I. les approuvera également bientôt.

En réponse à une question de Mr Hudson, le Président signale que le C.I.P.M. a discuté la question générale des niveaux secondaires de mesure ; alors que dans le passé le B.I.P.M. ne s'occupait que des plus hauts niveaux d'exactitude, on a suggéré qu'il serait opportun maintenant de modifier cet état de choses. Les besoins métrologiques d'un certain nombre de pays membres de la Convention du Mètre se situent en grande partie au niveau secondaire de mesure et une partie des ressources du B.I.P.M. devrait être consacrée à mettre davantage l'accent sur ce niveau, secondaire mais extrêmement utile. Par

conséquent, si le C.C.T. choisissait de s'occuper de telles échelles secondaires, il serait dans la ligne de pensée du C.I.P.M. ou du B.I.P.M. dans son ensemble.

A la suite du souhait exprimé par Mr Crovini d'établir des points de référence secondaires dans le domaine de $- 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $200\text{ }^{\circ}\text{C}$, Mr Kemp suggère que l'attention soit portée en particulier sur le domaine compris entre $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Mr Plumb suggère que le Groupe de travail 2 s'intéresse aux thermocouples du type tungstène-rhénium en vue de leur emploi dans les réacteurs nucléaires. Il remarque aussi qu'il semble exister au N.B.S. un besoin urgent d'un point de référence particulier pour les thermomètres médicaux.

La suite de la discussion du rapport du Groupe de travail 2 est reportée au point 4.

Avant d'aborder les rapports des Groupes de travail 3 et 4, le Président souligne que la tâche de ces Groupes (détermination des températures thermodynamiques) ne consiste pas simplement à rassembler les données disponibles mais également à estimer la fiabilité et l'exactitude dans les différentes expériences. Ils doivent voir si l'exactitude supposée au moment de la publication des résultats est correcte ; il peut fréquemment arriver, en effet, que l'on doive réexaminer la fiabilité d'anciennes déterminations de la température thermodynamique à la lumière de travaux ultérieurs ; ces derniers peuvent révéler l'existence d'erreurs systématiques dont les premiers chercheurs ne pouvaient avoir connaissance ou n'avaient pas suffisamment tenu compte. Ces révisions de l'exactitude conduisent quelquefois à de grosses difficultés lorsqu'elles ne confirment pas les propres estimations des auteurs, mais les Groupes de travail doivent cependant faire de leur mieux pour parvenir à une conclusion sur la fiabilité des diverses déterminations des températures thermodynamiques.

b) Rapport du Groupe de travail 3 ($T > 100\text{ K}$)

Mr Quinn indique d'abord que plusieurs résultats de pyrométrie par rayonnement déjà publiés ont dû être revus à la lumière d'une note de Blevin (N.S.L.) : c'est la longueur d'onde dans le vide que l'on doit utiliser (dans l'équation 15 de la version originale de l'E.I.P.T.-68) et non la longueur d'onde dans le milieu dans lequel on effectue les mesures.

L'application de la correction correspondante fait passer la température du point de congélation de l'or mesurée par Hall de $1\ 063,7\ ^\circ\text{C}$ à $1\ 064,0\ ^\circ\text{C}$, celle de Heusinkveld de $1\ 064,55\ ^\circ\text{C}$ à $1\ 064,72\ ^\circ\text{C}$ et celle de Bonhoure de $1\ 064,18\ ^\circ\text{C}$ à $1\ 064,38\ ^\circ\text{C}$. D'après ces expériences il n'y a aucune preuve que la valeur attribuée au point de l'or dans l'E.I.P.T.-68 soit fausse. Toutefois, les mesures par pyrométrie optique faites au N.P.L. et au B.I.P.M. ont montré qu'entre $630\ ^\circ\text{C}$ et $1\ 064\ ^\circ\text{C}$ l'E.I.P.T.-68 diffère considérablement des températures thermodynamiques, les différences atteignant un maximum de $0,7\ ^\circ\text{C}$ au voisinage de $800\ ^\circ\text{C}$.

Mr Quinn fait alors remarquer que le Groupe de travail 3 a rencontré de sérieuses difficultés pour essayer de faire une proposition unanime sur la question suivante : fallait-il, et sous quelle forme, donner dans l'édition amendée des renseignements mieux à jour sur l'incertitude estimée de l'E.I.P.T.-68 aux points fixes de définition au-dessus de $0\ ^\circ\text{C}$ et entre ces points fixes ? Quant à l'incertitude estimée aux points fixes, la question a porté essentiellement sur le tableau VII du texte original de l'E.I.P.T.-68. Ce tableau donne les "Incertitudes estimées sur les valeurs assignées aux points fixes de définition par rapport à leur température thermodynamique". Les valeurs que l'on croyait correctes en 1968, varient de $5\ \text{mK}$ pour le point d'ébullition de l'eau à $0,2\ \text{K}$ pour le point de congélation de l'or.

La principale preuve qu'il y a quelque chose d'erroné dans ces incertitudes estimées provient des travaux de Guildner au N.B.S. sur le thermomètre à gaz : il a trouvé $99,970\ ^\circ\text{C}$ $\pm 0,003\ 5\ ^\circ\text{C}$ pour la température thermodynamique du point d'ébullition de l'eau (Document CCT/74-6). La différence avec la valeur attribuée à ce point fixe dans l'E.I.P.T.-68 est six fois plus grande que l'incertitude estimée donnée au tableau VII.

Mr Hudson donne ensuite les valeurs provisoires de Guildner : $231,92\ ^\circ\text{C} \pm 0,015\ ^\circ\text{C}$ et $419,49\ ^\circ\text{C} \pm 0,03\ ^\circ\text{C}$ pour les températures thermodynamiques respectives des points de l'étain et du zinc. Guildner lui-même préfère ne pas encore donner de valeur, car les résultats donnés changeront vraisemblablement très légèrement lorsqu'il aura une meilleure connaissance des corrections dues aux coefficients du viriel du gaz et à la dilatation du réservoir (les valeurs données ci-dessus correspondent à une

différence $t_{68} - t$ de 0,048 °C et 0,09 °C respectivement pour les points de l'étain et du zinc).

Mr Quinn rappelle que la pyrométrie par rayonnement a montré qu'entre le point de l'antimoine et celui de l'argent les températures données par l'E.I.P.T.-68 diffèrent des températures thermodynamiques de quantités atteignant jusqu'à 0,7 °C. Bien que le Groupe de travail 3 ne soit pas parvenu à un accord unanime, plusieurs possibilités ont été discutées. L'une consistait à laisser le tableau VII (de l'E.I.P.T.-68) tel qu'il est mais en y ajoutant une note. La seconde consistait à supprimer purement et simplement le tableau VII. La troisième, proposée par Guildner, consistait à ajouter dans le tableau VII les nouvelles valeurs estimées des températures thermodynamiques des points fixes et leurs incertitudes, en laissant bien entendu les valeurs attribuées inchangées et en supprimant les estimations d'incertitude de 1968.

Une discussion approfondie s'engage. Mr Thomas exprime l'opinion de la P.T.B. et préconise fermement de ne pas modifier les incertitudes qui sont données au tableau VII pour les points de l'étain, du zinc, de l'argent et de l'or, car il n'existe pas de preuve suffisante pour le faire. Il pense que le Groupe de travail 3 n'a pas eu suffisamment la possibilité de discuter les valeurs provisoires données par Guildner pour les points de l'étain et du zinc et que, pour les points fixes supérieurs, il n'y a pas de preuve réelle que les incertitudes attribuées en 1968 soient fausses. Le Président, Mr Hudson et Mr Quinn ont en fait l'impression que les expériences extrêmement soigneuses de Guildner entre 0 °C et 140 °C ainsi qu'aux points de l'étain et du zinc, ont montré que des erreurs systématiques sérieuses existaient dans la thermométrie à gaz ancienne. En conséquence, les valeurs données en 1968 pour les points fixes de définition aux températures élevées risquent d'être moins exactes qu'on ne le pensait à l'époque, car ces valeurs étaient aussi essentiellement fondées sur les déterminations au thermomètre à gaz.

Après cette discussion, le Président propose que l'on nomme un sous-groupe chargé de présenter une proposition définitive au cours de la session, mais il suggère de reporter cela après que les rapports des Groupes de travail 4 et 1 aient été aussi discutés. Il remercie Mr Quinn et les autres membres du Groupe de travail 3 pour les efforts qu'ils ont consacrés à traiter ce difficile problème.

c) Rapport du Groupe de travail 4 ($T < 100$ K)

Mr Durieux rappelle que les rapports du Groupe de travail 4 sont limités au domaine compris entre 1 K et 30 K. Dans ce domaine, les échelles "officielles" sont : l'E.I.P.T.-68 au-dessus de 13,81 K, l'Echelle ^4He 1958 au-dessous de 5,2 K et l'Echelle ^3He 1962 au-dessous de 3,3 K. Les récentes déterminations de la température thermodynamique comprennent des mesures faites au thermomètre acoustique au N.B.S. et au N.P.L., ainsi que des déterminations des isothermes pV et des mesures au thermomètre à gaz faites au N.P.L. et au Los Alamos Scientific Laboratory. Des échelles magnétiques de température ont été mises au point à l'I.M.P.R., à l'I.S.U. et au K.O.L. Il y a également un travail intéressant au N.B.S. sur les points fixes des supraconducteurs, parmi lesquels les points de transition du plomb (7,2 K), de l'indium (3,4 K) et de l'aluminium (1,2 K) se situent dans le domaine de 1 K à 30 K. La situation en était là lorsqu'a commencé la comparaison internationale de thermomètres à germanium, que l'on avait proposée à la session du C.C.T. de 1971. Pour l'instant, ces comparaisons ont été faites au N.S.L. avec des thermomètres étalonnés provenant de l'I.S.U., du N.S.L. et du K.O.L. ; le N.S.L. vient de recevoir des thermomètres de l'I.M.P.R., étalonnés dans l'échelle magnétique de l'I.M.P.R. Grâce aux mesures extrêmement soigneuses et précises faites au N.S.L., on connaît les différences entre toutes les échelles et déterminations de température mentionnées ci-dessus dans le domaine où elles se chevauchent. Comme le N.S.L. et le K.O.L. ont réalisé les points de transition du plomb, de l'indium et de l'aluminium et rapporté aux thermomètres à germanium ces températures de transition, on connaît maintenant ces points de référence dans les échelles correspondantes et la reproductibilité de leur réalisation entre le N.S.L. et le K.O.L.

On n'a trouvé entre ces différentes échelles aucun désaccord grave. Il est apparu que l'échelle magnétique est très appropriée à des interpolations sur des intervalles de température assez larges. Par exemple, si l'on normalise les échelles magnétiques de l'I.S.U. et du K.O.L. aux mêmes températures de référence, soit 2,2 K, 4,2 K, 20 K et 27 K, l'accord entre les deux échelles magnétiques dans le domaine compris entre 2,2 K et 27 K est meilleur que $\pm 0,5$ mK. Le N.S.L. est disposé à poursuivre les mesures de comparaison, ainsi qu'à étalonner des thermomètres à germanium pour d'autres laboratoires natio-

naux dans le domaine de 1 K à 30 K.

Les plans et les propositions du Groupe de travail 4 pour l'avenir sont :

1) Publier le résultat des comparaisons d'échelles dans *Metrologia*, ainsi que l'avait décidé le C.C.T. en 1971. Toutefois, sur la suggestion de Mr Kemp, le Groupe de travail 4 propose aussi que l'on donne dans cet article la "meilleure estimation CCT/74 d'une échelle lissée dans le domaine 1 K - 30 K". On peut déduire cette échelle et ses rapports avec les autres échelles pour les basses températures à partir des résultats actuels des comparaisons faites au N.S.L. Il est proposé que l'article dans lequel on donnerait les résultats des comparaisons d'échelles et la nouvelle échelle lissée, soit envoyé à tous les membres du C.C.T. avant publication, afin que cette échelle lissée ait l'approbation du C.C.T.

2) Le Groupe de travail 4 a suggéré dans son second rapport que l'on adopte de nouvelles échelles de l'hélium liquide lors de la 11^e session du C.C.T. (que l'on pensait devoir se tenir en 1978) et qu'on les propose au C.I.P.M. en 1979. On admet généralement qu'une révision des échelles actuelles de l'hélium est nécessaire parce que l'on sait qu'elles s'écartent des températures thermodynamiques, dans des proportions qui peuvent atteindre jusqu'à 0,2 % de la température. Toutefois Mr Quinn, le Président et d'autres membres ont souligné une difficulté pratique : les échelles actuelles de l'hélium sont citées à l'Annexe II de l'E.I.P.T.-68 comme les échelles recommandées et il ne sera pas possible de réviser le texte de l'E.I.P.T.-68 une seconde fois en 1979. Par ailleurs, le Groupe de travail 4 a le sentiment qu'il serait très désavantageux de repousser le remplacement des échelles de l'hélium jusqu'à l'époque prévue pour le remplacement de l'E.I.P.T.-68, c'est-à-dire jusqu'à 1983. Malheureusement, il n'y a encore aucune proposition détaillée pour changer les échelles de l'hélium (et l'Annexe II de l'E.I.P.T.-68). Pour résoudre cette difficulté le Groupe de travail 4 propose de supprimer la référence aux échelles de l'hélium dans le texte de l'E.I.P.T.-68, c'est-à-dire de supprimer l'Annexe II. Les échelles de l'hélium actuelles demeurent bien entendu les échelles recommandées par le C.I.P.M. De plus, le Groupe de travail 4 propose que lors de la 11^e session du C.C.T. en 1976 (voir point 5), on présente de nouvelles échelles de l'hélium qui pourront, après approbation par le C.C.T., être soumises à l'approbation du C.I.P.M. en 1976.

3) Le N.S.L. est disposé à poursuivre la comparaison internationale des échelles pour les basses températures et l'étalonnage des thermomètres pour les laboratoires nationaux qui n'ont pas leur propre échelle. Mr Quinn soumettra des thermomètres à résistance de RhFe.

4) Etendre les comparaisons faites au N.S.L. jusqu'à 0,5 K.

L'accord se fait sur les propositions du Groupe de travail 4 de supprimer la référence aux échelles de l'hélium liquide dans le texte de l'E.I.P.T.-68 et de publier une échelle lissée pour les basses températures sous les auspices du C.C.T. Toutefois, Mr Brickwedde et Mr Plumb craignent que le désordre ne s'instaure, en particulier dans le domaine compris entre 13,81 K et 30 K où il y aura deux échelles recommandées. Mr Kemp souligne qu'il y a déjà beaucoup de désordre car, pour le domaine compris entre 2 K et 20 K, plusieurs échelles de température sont utilisées ; il est également extrêmement difficile de raccorder l'échelle ^4He 1958 à une échelle raisonnable au-dessus de 4,2 K. Une échelle lissée entre 1 K et 30 K serait vraiment importante pour les physiciens qui travaillent aux basses températures.

On est d'accord pour demander que la relation de la nouvelle échelle lissée avec les autres échelles soit clairement expliquée dans l'article de *Metrologia*. Mr Brickwedde suggère que l'échelle lissée descende jusqu'à 0,9 K ou même 0,5 K.

d) Rapport du Groupe de travail 1 (Révision de l'E.I.P.T.-68 ; discussion préliminaire)

La version la plus récente de l'édition amendée de l'E.I.P.T.-68 présentée dans le rapport (1^{er} avril) du Groupe de travail 1 a été mise au point à partir de versions antérieures, sur lesquelles on a reçu des commentaires de plusieurs laboratoires. La plupart des laboratoires représentés au C.C.T. ont envoyé leurs commentaires et le Président les remercie de leurs efforts considérables. Il explique que la dernière version est un compromis élaboré par Mr Bedford et lui-même entre les différentes opinions émises.

Depuis que cette dernière version a été diffusée, le Président en a discuté avec des collègues du N.P.L., du N.B.S., du N.S.L. et du K.O.L. ; il en est résulté quelques changements mineurs. Il y a des changements importants : la suppression de

la référence aux échelles de l'hélium liquide (Annexe II), le paragraphe (dans l'Annexe I) proposé par Mr Dean pour expliquer pourquoi l'on a omis ces échelles, la suggestion de Mr Crovini que certains points de congélation de référence secondaires devraient être redéfinis comme des points de fusion et finalement, changement le plus controversé, la modification ou la suppression du tableau VII. Un certain nombre de petites corrections ou modifications qui ont été suggérées constituent à l'évidence des améliorations et seront incluses dans l'échelle.

Le Président demande s'il y a d'autres commentaires.

Une discussion s'instaure sur la nomenclature et les unités. Mr Brickwedde fait la suggestion intéressante de réserver le terme "point fixe" aux états d'équilibre qui sont fixes par nature, comme les points triples, et de ne pas l'utiliser pour caractériser des points comme par exemple le point de l'hydrogène à 17 K. Mr Thomas attire l'attention du C.C.T. sur les sérieuses objections de la P.T.B. contre l'utilisation des grandeurs T_{68} et t_{68} dans la version originale et la version amendée proposée de l'E.I.P.T.-68. La P.T.B. préférerait qu'on utilise le concept suivant : il n'y a qu'une seule température que l'on peut exprimer dans l'échelle 1968 ou dans toute autre échelle (pour une autre question sur les unités et les grandeurs voir le Document CCT/74-28, point 1).

Mr Terrien attire l'attention sur le fait que la partie "Renseignements complémentaires" est considérablement raccourcie dans le texte amendé de l'échelle et demande s'il subsiste suffisamment de renseignements pour que l'utilisateur puisse réaliser l'échelle. Il signale que dans le domaine de la radioactivité par exemple, on a tendance à décrire avec plus de détails les méthodes expérimentales afin d'aider les laboratoires qui ont une moins grande expérience, comme ceux des pays en voie de développement. Le Président répond que les "Renseignements complémentaires", dans le texte original, étaient incorrects ou inexacts dans un certain nombre de cas. On a essayé de supprimer, dans l'édition amendée de l'échelle, tout ce qui était inexact, et parfois sans importance, pour ne conserver que les renseignements vraiment importants.

Mr Plumb signale que le N.B.S. a publié un document sur les thermomètres à résistance de platine qui pourrait aider les

laboratoires, qui n'ont pas encore l'expérience nécessaire, à réaliser l'échelle (voir la discussion sur ce point plus loin, au point 11).

Mr Crovini remarque une incompatibilité entre la déclaration mentionnée dans les "Renseignements complémentaires" au paragraphe Thermocouple étalon, selon laquelle le thermocouple ne sera pas précis à mieux que $\pm 0,3$ °C, et la condition, exprimée dans le texte de l'échelle, que la différence entre les forces électromotrices au point de l'or et au point de l'argent prenne à ± 3 μ V près une valeur calculée (équation (14) de la version amendée). Du fait que la force électromotrice d'un thermocouple change avec la profondeur d'immersion (effet dit de McLaren) et par suite d'instabilités dans le thermocouple, on peut facilement faire des erreurs de $\pm 1,5$ μ V au point de l'or et au point de l'argent, de telle sorte que l'incertitude expérimentale dans la différence entre les forces électromotrices au point de l'or et au point de l'argent dépasse 3 μ V.

Ces remarques conduisent à une longue discussion sur ce qui avait été écrit dans l'E.I.P.T.-68 sur le thermocouple Pt-Rh/Pt, c'est-à-dire les équations 13 à 15 (numérotation de l'édition amendée) et dans le paragraphe 2 des "Renseignements complémentaires". Lorsque le Groupe de travail 1 avait corrigé le texte de l'échelle, il avait trouvé que c'était une des parties les moins satisfaisantes parce que les informations provenaient d'une seule source. Après discussions au cours des derniers jours avec des personnes compétentes, on propose maintenant de modifier le chiffre pour l'exactitude du thermocouple dans le paragraphe 2, de $\pm 0,3$ °C à $\pm 0,2$ °C, mais le Président souligne que tous autres renseignements seraient les bienvenus.

MM. Bedford, Crovini, Dean, Plumb, Quinn et le Président prennent part à une discussion sur la question de savoir s'il faut modifier ou même supprimer du texte les équations 13 à 15. Mr Quinn note qu'il n'y a aucune preuve qu'on ne puisse pas utiliser, pour réaliser l'échelle, les thermocouples qui ne suivent pas les équations 13 à 15.

Le thermocouple Pt-13 % Rh/Pt par exemple, donne à 0,1 °C ou 0,2 °C près la même échelle que le thermocouple Pt-10 % Rh/Pt et pourtant il ne satisfait pas du tout à ces équations. Les

fabricants utilisent seulement l'équation 13 qui spécifie la force électromotrice du thermocouple Pt-Rh/Pt au point de l'or ; ils peuvent même fabriquer le fil de telle sorte que la force électromotrice au point de l'or soit à $\pm 10 \mu\text{V}$ près égale à la valeur normale. Le Président dit que, bien que la teneur en rhodium ne soit à l'évidence pas importante pour réaliser l'échelle, le pourcentage des impuretés dans le fil est probablement important et à cet égard les équations 13 à 15 peuvent être utiles car elles éliminent l'emploi de fil en alliage impur. Mr Quinn admet que les équations 13 à 15 sont trop restrictives en ce qui concerne la teneur en rhodium mais qu'elles écartent la possibilité d'avoir des fils en alliage impur. A ce stade, il y a une tendance parmi les divers interlocuteurs pour suggérer que l'on supprime les équations 14 et 15.

Mr Quinn signale quelques réserves faites par le N.P.L. sur la méthode compliquée de recuit des thermocouples qui est donnée dans la version amendée proposée, non parce que la méthode est mauvaise mais parce qu'il n'est pas certain que des efforts supplémentaires soient justifiés par une amélioration dans le comportement du thermocouple, étant donné qu'il existe une incertitude totale de $\pm 0,2 \text{ K}$.

Le Président propose que l'on forme un petit sous-comité pour s'occuper de la partie de l'E.I.P.T.-68 qui concerne les thermocouples (équations 13 à 15 et paragraphe 2 des "Renseignements complémentaires") pour en discuter avec les personnes intéressées et pour préparer une recommandation (voir point 4). Il propose que MM. Quinn et Plumb constituent ce sous-comité, ce qui est accepté.

Mr Hudson rapporte ensuite une suggestion faite par plusieurs personnes du N.B.S. ; à la fin de l'Annexe I de l'E.I.P.T.-68 on devrait indiquer qu'au fur et à mesure des nouvelles déterminations de température thermodynamique le C.C.T. publiera dans ses rapports une évaluation des résultats.

Mr Dean rappelle au C.C.T. sa suggestion antérieure : on devrait expliquer dans l'Annexe I les raisons de la suppression de l'Annexe II ; Mr Thomas suggère en outre que l'on ajoute à l'historique de l'E.I.P.T., dans l'Annexe I, quelques phrases sur l'édition amendée proposée de l'échelle.

Le Président propose que Mr Dean prépare ces additions à l'Annexe I et les présente ultérieurement au C.C.T.

Le Président revient maintenant sur la question des incertitudes des températures thermodynamiques au-dessus de 0 °C (Tableau VII de l'E.I.P.T.-68). Mr Hudson rappelle les valeurs obtenues très récemment par Guildner au thermomètre à gaz pour les points de congélation de l'étain et du zinc (*voir point 1b*). Quelques remarques générales sont faites sur le sujet. L'opinion de la majorité est que le Tableau VII ne peut plus rester sous sa forme actuelle car, pour certains points fixes, les incertitudes données sont incorrectes.

Mr Hudson, approuvé par Mr Terrien, souligne que le C.C.T. a le devoir d'exposer les faits, de les présenter au public et lorsqu'il y a des désaccords, de suggérer, si possible, quels sont les résultats les plus dignes de foi. Il précise de plus que, s'il est évident qu'une nouvelle mesure est plus exacte que les anciennes et que l'on a évité dans la nouvelle mesure des erreurs systématiques que l'on n'avait pas évaluées à l'époque des mesures précédentes, on doit non pas faire une moyenne entre les résultats ancien et nouveau mais utiliser le nouveau résultat.

Le Président appuie fortement ce point de vue. Lorsqu'une expérience extrêmement complexe, malgré sa complexité, est soumise à des vérifications internes suffisamment rigoureuses, on peut accepter avec confiance son évaluation. C'est le cas par exemple, pour le travail de Sakuma au B.I.P.M. sur l'accélération due à la pesanteur ; même si la confirmation par d'autres expériences faisait totalement défaut, ce travail est d'une telle qualité que l'on devrait en accepter les résultats avec un taux de confiance bien supérieur à celui qu'on accorderait à la moyenne des résultats d'un certain nombre d'expériences moins exactes. D'après ce que l'on sait des travaux de Guildner ils appartiennent aussi à cette catégorie, malgré l'absence regrettable de publication de renseignements détaillés.

Mr Thomas dit qu'à son avis les travaux de Guildner sont excellents, mais il aimerait voir une confirmation des résultats ; il indique à nouveau que le Groupe de travail 3 n'a pas pu discuter à fond des résultats au-dessus de 140 °C et qu'au-dessus du point du zinc Guildner n'a donné aucun résultat. En conséquence, la P.T.B. ne serait pas d'accord pour écarter

les anciens résultats du thermomètre à gaz ni pour modifier les incertitudes admises au-dessus du point d'ébullition de l'eau.

Mr Hudson souligne que certaines expériences déterminantes (telles que celles de Guildner) sont si complexes, si longues et si coûteuses que les répéter pour confirmation est peu probable. Pour cette raison, ériger en principe qu'il est toujours nécessaire, avant de pouvoir changer une valeur dans l'E.I.P.T., de répéter une expérience pour la confirmer, rendrait vaines précisément ces expériences complexes et coûteuses dont on a le plus grand besoin pour améliorer et éventuellement remplacer l'E.I.P.T.-68, et en conséquence empêcherait de les entreprendre.

Mr Quinn remarque que l'on pourrait s'attendre à ce que les renseignements inclus dans le texte de l'E.I.P.T.-68 soient valables pour une dizaine d'années ; c'est également vrai pour les évaluations d'incertitudes, comme dans le Tableau VII. Par ailleurs, on peut proposer que le C.C.T. publie plus souvent les meilleures valeurs. Dans cette perspective, on pourrait supprimer totalement le Tableau VII et le remplacer par l'indication que le C.C.T. publiera de temps en temps les meilleures valeurs. Mr Hudson et Mr Thomas, tout en réfléchissant à cette idée, pensent qu'il est délicat de dire exactement pourquoi les incertitudes données au Tableau VII ne doivent plus être considérées comme valables.

A la fin de cette discussion, le Président propose qu'un sous-comité, constitué de MM. Bedford, Crovini et Mitsui, présente ultérieurement au C.C.T. une proposition écrite.

La suite de la discussion sur la révision du texte de l'E.I.P.T.-68 est reportée au point 4.

2. INFORMATION EN RAPPORT AVEC LA RECOMMANDATION T 1 (1971) DE LA 9^e SESSION DU C.C.T.

a) *Pyrométrie par rayonnement au-dessous de 1 064 °C*

Le Président ouvre la discussion sur ce point en rappelant la proposition du rapport du Groupe de travail 2 d'étendre le domaine pyrométrique de l'échelle vers le bas et celui du thermomètre à résistance de platine vers le haut pour qu'ils se rejoignent au point de l'argent (961,93 °C).

Mr Quinn rend compte des travaux effectués au N.P.L. dans ce domaine. Des travaux sont en cours pour utiliser des méthodes de comptage de photons et un photomultiplicateur sensible au rayonnement jusqu'à $\lambda = 850$ nm, afin d'avoir une sensibilité appropriée pour utiliser le pyromètre photoélectrique jusqu'au point de l'antimoine et si possible jusqu'au point du zinc. Par ailleurs, on a l'intention d'utiliser un thermomètre à rayonnement total à partir du point triple de l'eau jusqu'au point de l'étain et par la suite jusqu'au point du zinc (*voir* le Document CCT/74-21).

Mr Crovini rend compte des mesures faites à l'I.M.G.C. sur la réalisation du point de l'argent (*voir* le Document CCT/74-11). On a trouvé qu'en prenant des précautions raisonnables, on peut réduire l'influence de l'oxygène dissous à moins de 3 mK ; cela a été vérifié avec un thermomètre à résistance de platine. Il propose d'étendre l'échelle pyrométrique vers le bas, au moins jusqu'au point de l'argent. MM. Quinn et Dean remarquent qu'il n'est pas nécessaire que cette échelle et l'échelle du thermomètre à résistance de platine se rejoignent à un point fixe et qu'il se peut que 800 °C soit un meilleur choix pour la jonction des deux échelles. Voir aussi les travaux de J. Bonhoure (Document CCT/74-12).

Enfin, Mr Kemp signale que l'on vient de construire au N.S.L. un appareillage pour la thermométrie par rayonnement total au-dessous du point de l'or.

*b) Mesures des températures thermodynamiques au-dessous de
1 064 °C*

La discussion de ce point n'est pas poursuivie, car les résultats des récentes déterminations de la température thermodynamique ont été donnés par les Groupes de travail 3 et 4 et sont discutés aux points 1b et 1c. Il est évident qu'il serait extrêmement précieux d'avoir prochainement de nouveaux résultats au thermomètre à gaz au-dessus du point du zinc.

Comme il est dit au point 1c, de nouvelles déterminations de la température thermodynamique du point d'ébullition du néon et du point triple de l'oxygène seraient d'un grand intérêt.

c) Détermination du point de congélation du platine dans
l'E.I.P.T.-68

On en a déjà discuté au point la. Aucune autre information n'est présentée.

d) Mesures des températures au-dessus de 4 000 K

Le Président rappelle qu'on avait remarqué, lors de la dernière session du C.C.T., que le domaine des températures élevées devient de plus en plus important et que le C.C.T. devrait étudier la question des méthodes de mesure de température autres que celle du pyromètre optique classique inutilisable à ces températures. Le Président signale aussi qu'un peu partout se pose la question de mesurer des températures, pas aussi élevées que 4 000 K, mais dans des conditions particulièrement défavorables, en particulier dans les réacteurs nucléaires.

Mr Dean dit qu'au N.P.L. un groupe petit mais actif travaille depuis environ quatre ans dans le domaine des températures situées au-dessus de 4 000 K. Au cours de ces années l'intérêt pour les mesures de températures dans cette région n'a fait que croître de la part des milieux tant scientifiques qu'industriels. Il espère qu'après un certain nombre d'années le C.C.T. pourra prendre une part active pour coordonner les travaux sur les étalons et les techniques de mesure dans ce domaine.

Comme le Président demande de spécifier plus précisément le domaine de température concerné, Mr Dean répond que ce domaine s'étend de 4 000 K, ou un peu moins, à 14 000 K-20 000 K.

En ce qui concerne l'établissement d'étalons, le Président remarque qu'utiliser le rayonnement du synchrotron comme étalon absolu de rayonnement pour ce domaine élevé de température est si extraordinairement onéreux qu'il est virtuellement impossible de justifier son utilisation uniquement aux fins de mesures de température.

On discute de la question de savoir si le C.C.T. est le comité approprié pour s'occuper de ces températures élevées, mais Mr Dean souligne que de toute façon l'importance de ce domaine doit être portée à l'attention du C.I.P.M.

Mr Quinn remarque que le secrétaire de l'O.I.M.L. a récemment proposé la création d'un Groupe de travail sur les températures des plasmas.

Mr Moser dit qu'à l'I.N.M. on a construit un arc à plasma d'hydrogène que l'on utilise comme source de rayonnement entre 120 nm et 40 nm (Document CCT/74-17). Il invite les membres du C.C.T. à visiter ce laboratoire.

3. DOCUMENTS SOUMIS AU C.C.T.

a) Examen des documents autres que ceux qui ont trait aux points 1 et 2

Le Président introduit le sujet en mentionnant la nouvelle détermination de la constante des gaz au N.P.L. (voir le Document CCT/74-27) ; la nouvelle valeur est $(8\ 315,59 \pm 0,18) \text{ J K}^{-1} \text{ kmol}^{-1}$ * alors que l'ancienne valeur était $(8\ 314,41 \pm 0,26) \text{ J K}^{-1} \text{ kmol}^{-1}$. Il mentionne aussi l'importance des documents dans lesquels est donné l'état d'avancement des travaux expérimentaux dans les laboratoires nationaux.

Mr Hudson résume brièvement quelques-uns des documents soumis par le N.B.S. Le Document CCT/74-3 est un résumé de la thermométrie cryogénique au N.B.S. Il s'agit non seulement de fournir des renseignements sur les travaux actuels au N.B.S. mais surtout de centrer l'attention sur la thermométrie dans le domaine compris entre 20 K et quelques millikelvins. En particulier, les présentes recherches sur le thermomètre à bruit dans lesquelles on utilise des techniques mettant en oeuvre des jonctions Josephson, ont donné à penser qu'en employant des fréquences convenables on peut pousser l'utilisation du thermomètre à bruit de 1 mK environ à 1 ou peut être 10 K, de telle sorte que le même thermomètre absolu peut être utilisé sur un domaine relatif de 10^3 à 10^4 .

Mr Hudson mentionne aussi le Document CCT/74-9 dans lequel on suggère l'utilisation des mesures précises de capacité thermique des gaz pour déterminer des températures thermodynamiques dans le domaine de 0 °C à 100 °C. Des travaux dans cette direction sont en cours à l'Université de Karlsruhe en collaboration avec le N.B.S.

* Note ajoutée aux épreuves : Pour tenir compte de récentes corrections, cette valeur doit être remplacée par $(8\ 316,00 \pm 0,17) \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kmol}^{-1}$.

Mr Plumb attire l'attention sur un autre document du N.B.S. (Document CCT/74-8) se rapportant au point de congélation de l'aluminium. Cinq échantillons d'aluminium ont donné, pour ce point de congélation, des températures comprises toutes à l'intérieur de 0,5 mK. Ceci est important car le N.B.S. n'est pas satisfait de l'extrapolation de l'échelle du thermomètre à résistance de platine au-dessus du point du zinc et a le sentiment que le point de l'aluminium est préférable au point de l'antimoine comme point fixe de définition pour l'échelle.

Mr Crovini mentionne deux documents de l'I.M.G.C. Dans le Document CCT/74-11 sur le point de congélation de l'argent, on donne une valeur expérimentale du coefficient de pression, c'est-à-dire de l'effet de la pression sur la température du point de congélation, et on propose d'ajouter cette information au Tableau V de l'E.I.P.T.-68. Le Document CCT/74-10 décrit les mesures sur le point de fusion de l'alliage eutectique cuivre-argent dont on a obtenu des réalisations très reproductibles. La température a été mesurée avec des thermocouples et on a obtenu $t_{68} = 779,60 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0,15 \text{ }^\circ\text{C}$. Le Président remercie Mr Crovini d'avoir fourni la valeur du coefficient de pression pour le point de congélation de l'argent.

Mr Bedford donne de brefs commentaires sur deux documents du N.R.C. Dans le Document CCT/74-1 on présente un calcul simplifié des "fonctions écarts" pour les thermomètres à résistance de platine au-dessous de 273 K et on discute les discontinuités des dérivées secondes de ces fonctions aux points fixes de définition. Dans le Document CCT/74-2 on propose une fonction écart plus simple : au lieu de diviser le domaine compris entre 13,81 K et 237,15 K en quatre parties, on utilise pour l'ensemble du domaine une fonction écart à 6 constantes.

Le Président remercie Mr Bedford et souligne l'importance de la proposition du Document CCT/74-2 pour le futur remplacement de l'E.I.P.T.-68.

Mr Mitsui porte le Document CCT/74-31 du N.R.L.M. à l'attention des membres. Dans ce document, on calcule les effets des erreurs d'étalonnage des thermomètres à résistance de platine à chacun des points fixes, à 273,15 K et au-dessous, sur les indications des thermomètres aux autres températures. Mr Plumb ajoute que Furukawa a publié des résultats semblables.

b) Date limite de présentation des documents pour les sessions futures

Le Président remarque que ce point a été soulevé lors des précédentes sessions mais que de nombreux documents sont encore souvent soumis très peu de temps avant ou même pendant la réunion. Plusieurs membres prennent part à la discussion et tous soulignent l'importance de recevoir les documents trois ou au moins deux mois avant la réunion. Mr Hudson regrette que, cette fois-ci, les personnes des laboratoires n'aient pas eu du tout la possibilité de lire la plupart des documents et d'en discuter avec leurs délégués au C.C.T. Même les personnes qui ont assisté à la réunion n'ont pas eu le temps de lire les documents qu'ils n'ont reçus qu'en réunion. Mr Kemp pense qu'il serait profitable que les Groupes de travail puissent se réunir à Paris une journée avant la session du C.C.T. pour étudier les documents qui ont été envoyés en retard.

Finalement, on accepte la déclaration suivante :

"On demande que les documents présentés au C.C.T. arrivent au B.I.P.M. deux mois avant la session, en reconnaissant toutefois que le C.C.T. pourra éventuellement faire des exceptions pour des résultats importants, donnés sous une forme très concise."

c) Publication des documents CCT/74-1 à 33

On est d'accord pour que ces documents soient publiés par le B.I.P.M. mais que la longueur maximale soit de deux pages ou l'équivalent de 500 mots. Dans le cas des documents plus longs, les auteurs peuvent envoyer au B.I.P.M. un résumé de deux pages au maximum dans les trois mois ; sinon le B.I.P.M. rédigera le résumé qui sera publié. On fera des exceptions pour les articles qui décrivent l'état d'avancement des travaux dans les divers laboratoires (Documents CCT/74-3 et 21 par exemple). Mr Terrien demande que les auteurs donnent dans les résumés la référence exacte de la publication dans laquelle paraîtra le document complet ; si le document complet ne doit pas être publié, un exemplaire doit en être envoyé au B.I.P.M. afin qu'il puisse en fournir une copie aux personnes intéressées qui en feraient la demande.

d) Publication des documents des Groupes de travail (principes généraux)

Les principes suivants sont acceptés. Les rapports complets des Groupes de travail qui ont été présentés jusqu'ici ne sont pas faits pour être publiés ni dans les comptes rendus du C.C.T. ni ailleurs, mais des résumés devraient être publiés dans les comptes rendus du C.C.T. (*voir aussi le point 7*). Toutefois, il peut arriver qu'un Groupe de travail obtienne des informations d'une importance si générale qu'elles devraient être portées à la connaissance d'un groupe assez large de lecteurs ; dans ce cas ces informations devraient être publiées dans *Metrologia* par le Groupe de travail après accord du C.C.T. Au cas où un article de ce genre serait prêt peu avant une session du C.C.T., l'accord de celui-ci pourrait être demandé lors de la session. Si le Groupe de travail désire publier un article de ce genre entre deux sessions du C.C.T., l'approbation des membres du C.C.T. sera demandée par correspondance. La procédure de cette approbation du C.C.T. par correspondance est précisée (Il suffit de l'absence d'opposition après avoir pris les précautions raisonnables pour s'assurer que les membres du C.C.T. ont bien eu connaissance du projet d'article).

4. RÉVISION DE L'E.I.P.T.-68

Discussion du rapport du Groupe de travail 1 (Suite)

a) Remarques d'introduction

Tirant la leçon de ses vingt années d'expérience au sein du C.C.T., le Président propose de faire quelques remarques sur la façon dont le C.C.T. a travaillé dans le passé et travaille à l'heure actuelle. Ces remarques devraient dissiper tout malentendu sur la situation des Groupes de travail ou des sous-comités. Vers la fin des années 50 et le début des années 60, le C.C.T. s'est réuni plusieurs fois dans le but d'étendre l'E.I.P.T. vers les températures au-dessous de 90 K et de la réviser là où c'était nécessaire. On a adopté les principes généraux de la nouvelle échelle qui en résultait lors de la session du C.C.T. en 1967. Un petit groupe de travail avait rédigé le texte qui fut envoyé par la poste aux membres du C.C.T. en leur demandant leurs commentaires ; en fait il y eut très peu de commentaires. Il devint évident avec le temps que cette méthode présentait d'énormes inconvénients.

A la suite de cette expérience, le C.C.T. déclara lors de sa session de 1971 que la discussion des modifications, et ultérieurement, le remplacement de l'E.I.P.T.-68 risqueraient d'être extrêmement difficiles et peu efficaces en sessions plénières du C.C.T. sans préparation suffisante. Pour éviter ces difficultés on a constitué des Groupes de travail en leur donnant comme instruction de préparer des documents écrits qui serviraient de base pour une future révision de l'échelle.

L'utilité des Groupes de travail s'est révélée inestimable pour le fonctionnement du C.C.T. ; ils lui demeurent toutefois subordonnés et leurs documents ne constituent que des propositions pour le C.C.T. : ces propositions peuvent être rejetées, modifiées ou acceptées selon les décisions du comité au complet. Les Groupes de travail n'ont aucun pouvoir de décision par eux-mêmes et il en est de même, bien entendu, pour les sous-comités qui ont été constitués au cours de la présente session du C.C.T.

b) Rapport du sous-comité sur les thermocouples [équations (13) à (15)] et paragraphe 2 des "Renseignements complémentaires" du texte de l'E.I.P.T.-68

Mr Quinn rend compte de l'avis du sous-comité. Les équations (13) à (15) devraient être conservées dans le texte. La force électromotrice au point de congélation de l'or devrait être 10 334 μV plutôt que 10 320 μV pour être en accord avec les nouvelles tables de référence. La tolérance au point de congélation de l'or devrait être $\pm 30 \mu\text{V}$ au lieu de $\pm 40 \mu\text{V}$; ceci tient compte de toutes les fabrications de thermocouples dont le sous-comité a connaissance.

Le sous-comité s'est prononcé contre la suppression des équations (14) et (15), car ces équations sont les seules à fournir l'assurance que l'alliage PtRh est fait de platine pur et de rhodium pur. Sans elles il serait possible, quoique peu probable, qu'un fabricant fasse un thermocouple de platine pur et d'un alliage de platine et de rhodium non purs qui, par chance, donnerait la force électromotrice exacte au point de congélation de l'or mais pas à ceux de l'argent et de l'antimoine.

Pour tenir compte des objections de Mr Crovini selon lesquelles $\pm 3 \mu\text{V}$ dans l'équation (14) est trop limitatif, le

sous-comité suggère $\pm 6 \mu\text{V}$. Il suggère aussi $\pm 8 \mu\text{V}$ au lieu de $\pm 5 \mu\text{V}$ dans l'équation (15) (voir le point 9 pour un complément de discussion sur les limites de variation autorisées).

Certaines modifications du texte sont aussi suggérées. Après une longue discussion, la décision est reportée au point 9.

c) Rapport du sous-comité pour compléter l'Annexe I

Ce sous-comité (Mr Dean) a préparé un projet d'adjonction à l'Annexe I, historique de la mise au point de l'E.I.P.T. On propose que cette adjonction donne la liste des différences les plus importantes entre l'édition originale et l'édition amendée de l'E.I.P.T.-68 :

1. Introduction du point triple de l'argon comme une alternative au point d'ébullition de l'oxygène.
2. La fonction de référence $W_{\text{CCT-68}}$ pour le thermomètre à résistance de platine au-dessous de 0°C est donnée sous une forme simplifiée.
3. Changement des critères de sélection des thermocouples (équations (13) à (15)).
4. Amélioration des "Renseignements complémentaires".
5. Suppression de la référence à l'"Echelle ^4He 1958" et à l'"Echelle ^3He 1962".
6. Adjonction d'une note sur les incertitudes de l'E.I.P.T.-68 au-dessus de 0°C (Tableau VII).

A la suite d'une suggestion de Mr Kemp, on est d'accord pour ajouter une phrase indiquant que l'on a changé les valeurs de quelques-uns des points de référence secondaires. Ceci est accepté mais conduit à une discussion sur l'évaluation des exactitudes des valeurs données dans la table des points de référence secondaires. Mr Kemp indique que beaucoup de personnes ont des problèmes provenant de l'incertitude où ils se trouvent quant à l'exactitude de ces valeurs. Toutefois, il ressort des travaux du Groupe de travail 2 combien il est difficile d'évaluer cette exactitude (voir point 1a). Le Président propose que l'on ajoute au tableau VII une note de bas de page disant que "Les incertitudes des valeurs de ces points de référence secondaires présentent des variations considérables ; elles seront données dans une publication ultérieure sous les auspices du C.C.T." La décision finale sur ce rapport est reportée à plus tard (voir point 9).

d) Rapport du sous-comité chargé des incertitudes dans
l'E.I.P.T.-68 au-dessus de 0 °C (Tableau VII)

Le sous-comité (MM. Bedford, Crovini et Mitsui) a préparé la proposition suivante :

Le sous-comité est d'avis que le tableau VII doit être supprimé dans l'Annexe I de l'E.I.P.T.-68 et que l'on insère le paragraphe suivant dans l'Annexe I modifiée :

"Comme mentionné précédemment, on a choisi les valeurs des températures attribuées aux points fixes de définition de l'E.I.P.T.-68 afin qu'elles soient en accord avec les meilleures mesures des températures thermodynamiques au moment où l'E.I.P.T.-68 a été promulguée. La plupart de ces températures thermodynamiques avaient été obtenues à partir de mesures au thermomètre à gaz. Depuis lors, de nouvelles données expérimentales, fondées tant sur la thermométrie à gaz que sur la thermométrie par pyrométrie optique, indiquent que les températures attribuées aux points fixes de définition peuvent s'écarter des températures thermodynamiques de quantités supérieures aux incertitudes données au tableau VII du texte original de l'E.I.P.T.-68. Pour l'instant il n'est pas possible de réviser ce tableau avec une confiance suffisante. Le C.C.T. publiera de temps en temps ses meilleures estimations des écarts des températures dans l'E.I.P.T.-68 par rapport aux températures thermodynamiques."

Mr Quinn remarque que Mr Thomas et lui-même (tous les deux membres du Groupe de travail 3) sont en principe d'accord avec cette proposition, mais ils préfèrent une autre rédaction, moins détaillée.

Cette proposition est en principe acceptée, mais la décision définitive est reportée jusqu'à ce que le texte proposé soit rédigé et distribué au Comité (voir point 9).

Le Président remarque que ceci complète en fait les discussions sur le texte amendé de l'E.I.P.T.-68, l'approbation définitive étant toutefois reportée à la fin de la session (voir point 9).

5. PROCHAINE SESSION DU C.C.T.

Le Président avait suggéré que l'intervalle entre deux sessions du C.C.T. soit de quatre ans, pour être au même rythme que les réunions de la C.G.P.M. Mr Dean a l'impression qu'un intervalle de quatre ans entre deux sessions est trop long ; le N.P.L. trouve que ces réunions sont extrêmement profitables. Mr Hudson suggère un intervalle de deux ans. Mr Kemp est d'accord avec cette suggestion. Le sentiment général est que, compte tenu de l'accroissement rapide des connaissances en thermométrie, un intervalle de deux ans est judicieux. L'accord se fait pour que la prochaine session ait lieu en 1976, très probablement au mois de juin.

6. FRÉQUENCE DES FUTURS RAPPORTS DES GROUPES DE TRAVAIL

Le Président remarque que, bien que les rapports annuels des Groupes de travail aient été extrêmement importants, un intervalle de deux ans serait peut-être plus approprié. Il est décidé que les Groupes de travail présenteront leur prochain rapport en janvier 1976. Mr Hudson suggère que les Groupes de travail peuvent, s'ils le désirent, présenter des rapports complémentaires plus tôt, ce qui est accepté.

7. PUBLICATION DES PRÉSENTS RAPPORTS DES GROUPES DE TRAVAIL

On a discuté au point 3d les principes généraux de la publication des rapports des Groupes de travail. On est d'accord pour que chaque Groupe de travail fasse un résumé de ses rapports qui comprenne les conclusions principales et envoie ce résumé au B.I.P.M. avant le 1^{er} août 1974. Ces résumés seront publiés dans les comptes rendus du C.C.T. L'approbation de ces résumés par le C.C.T. n'est pas nécessaire. Les rapports du Groupe de travail 1 constituent une exception car le texte complet de l'édition amendée de l'E.I.P.T.-68 sera bien entendu publié ailleurs.

8. TÂCHES ET COMPOSITION DES GROUPES DE TRAVAIL

a) Tâches des Groupes de travail

Le Président répète que le C.C.T. doit beaucoup aux Groupes de travail; ces Groupes ont beaucoup facilité la tâche du C.C.T., tâche autrefois très difficile. Comme introduction à la discussion sur d'éventuels changements parmi les membres des Groupes de travail, le Président fait les remarques suivantes. En général les Groupes fonctionnent très bien; il est donc ni nécessaire ni opportun d'opérer des changements importants dans la composition des Groupes de travail existants. Lorsque c'est possible, il est souhaitable d'avoir dans les Groupes de travail des membres du C.C.T. ou des représentants au C.C.T., car cela facilite grandement les discussions avec celui-ci. A cet égard, le Président mentionne qu'il est à déplorer que les membres soviétiques des Groupes de travail n'aient pas pu assister à la présente session du C.C.T., d'autant plus que, par suite des difficultés de correspondance, ces membres n'ont pas été en mesure d'apporter aux Groupes de travail toute la contribution qu'ils auraient très certainement désiré apporter. Comme dernière remarque d'introduction, le Président insiste vigoureusement sur la limite de quatre membres, qui représente absolument le maximum pour que le Groupe travaille de façon efficace.

Il y a une discussion sur le meilleur moyen d'essayer d'améliorer les relations avec les membres soviétiques des Groupes de travail et avec les représentants soviétiques en général. Mr Skakala et Mr Terrien suggèrent que les lettres aux personnalités scientifiques soient adressées par l'intermédiaire du Comité d'Etat des Normes auprès du Conseil des Ministres de l'U.R.S.S., Leninski prosp. 9b, Moscou M 49 et peut-être même par l'intermédiaire du B.I.P.M.

Mr Kemp attire l'attention du C.C.T. sur la proposition suivante du Groupe de travail 4 de constituer un cinquième groupe de travail chargé de faire des rapports au C.C.T. sur les thermomètres utilisés en pratique dans le domaine compris entre 1 K et 30 K.

"En comparant les échelles pour les basses températures il est apparu de plus en plus évident qu'il y a un besoin urgent de faire des recherches sur des "thermomètres de laboratoire" dans le domaine

de température compris entre 1 K et 30 K. Plus de 90 % des mesures pratiques de température dans ce domaine sont faites avec des thermomètres à germanium. On a dépensé beaucoup de temps et d'effort dans les laboratoires nationaux et dans bien d'autres instituts de recherche pour venir à bout des instabilités de ces thermomètres, mais virtuellement aucune recherche n'a été faite nulle part pour améliorer les thermomètres.

"Bien que des recherches continues sur la détermination des températures thermodynamiques soient de grande importance, il semble au Groupe de travail 4 qu'il y a un déséquilibre entre l'importance des recherches dans ce domaine et l'importance des efforts déployés pour améliorer les "thermomètres de laboratoire."

"Les thermomètres pratiques (autres que les thermomètres à germanium) que l'on doit continuer à étudier comprennent les thermomètres à RhFe. Le Groupe de travail 4 suggère que le C.C.T. étudie la constitution d'un cinquième Groupe de travail pour donner en 1976 un rapport sur la situation actuelle des thermomètres de laboratoire et sur les possibilités d'améliorer cette situation".

Mr Hudson donne son appui à cette idée et dit que le N.B.S. est disposé à y participer. A cet égard, il mentionne la mise au point au N.B.S. d'un petit thermomètre magnétique. Mr Quinn donne aussi son appui et indique que le N.P.L. est également disposé à participer à ce Groupe de travail : depuis quelque temps ce laboratoire a une activité dans ce domaine qu'il considère comme de grande importance. On s'accorde pour qu'un cinquième Groupe de travail soit constitué, son rôle précis devant être discuté ultérieurement (*voir plus loin à Groupe de travail 5*).

Le Président propose une discussion sur les rôles et le maintien en activité des Groupes de travail 1 à 4.

Groupe de travail 1

Le Président rappelle que la tâche qui a été attribuée au Groupe de travail 1 en 1971 consistait à préparer la modification du texte de l'E.I.P.T.-68. Si l'édition amendée qui est proposée est acceptée cette tâche est accomplie, mais il était évident à l'époque où ce Groupe de travail a été constitué qu'il devait également préparer le remplacement ultérieur de l'échelle. Comme on peut penser que ce remplacement de l'E.I.P.T.-68 aura lieu en 1983, le Président propose que le

Groupe de travail 1 continue à exister et qu'il ait pour tâche la préparation du remplacement de l'E.I.P.T.-68. Le C.C.T. approuve cette proposition.

Groupe de travail 2

Le Président rappelle les deux tâches du Groupe de travail 2 : révision des points de référence secondaires et recherches sur des techniques simplifiées de mesure de la température. La première s'est avérée être une tâche difficile et exigeante, dont le Groupe s'est acquitté de façon extrêmement efficace. Il propose de maintenir également ce Groupe.

Mr Bedford remarque qu'on aiderait grandement les membres du Groupe de travail 2 si les renseignements relatifs aux travaux sur les points de référence secondaires effectués par les membres du C.C.T. ou portés à leur connaissance, étaient communiqués au Groupe de travail. Mr Moser signale qu'il serait utile de définir de façon plus précise les tâches de ce Groupe de travail, ce qui pourrait faciliter l'obtention des crédits nécessaires pour les accomplir. Le Président répond que cela ne doit pas interférer avec la souplesse nécessaire à l'accomplissement des tâches des Groupes de travail.

Mr Crovini souligne l'importance de l'existence d'un riche éventail de points de référence secondaires entre - 100 °C et 200 °C. Mr Hudson suggère que le NBS Office of Reference Data pourrait peut-être apporter son assistance au Groupe de travail en ce qui concerne les points de référence secondaires. Le Président dit que le domaine des basses températures est si spécialisé que l'on pourrait en décharger le Groupe de travail 2 et que l'un des Groupes de travail 4 ou 5 pourrait s'occuper de ce domaine.

Mr Crovini répète que dans le dernier rapport du Groupe de travail 2 on propose que les différents laboratoires coordonnent leurs activités dans le but de parvenir à une échelle provisoire pour le thermomètre à résistance de platine au-dessus de 630 °C. MM. Bedford et Crovini recommandent fermement que l'on propose au C.I.P.M. un effort coordonné pour définir et vérifier une échelle de température pour le thermomètre à résistance de platine au-dessus de 630 °C: lors du remplacement de l'E.I.P.T.-68, on aura absolument besoin de disposer de données suffisantes sur ce point. Mr Quinn souligne la liaison de ce

projet avec l'extension vers le bas de l'échelle pyrométrique ; le Président exprime l'intérêt particulier du Groupe de travail 1 et souligne que tous les moyens disponibles doivent être utilisés pour coordonner les travaux des laboratoires nationaux dans ce domaine.

En commentaire général, Mr Kemp demande si les Groupes de travail peuvent s'adresser à chaque laboratoire national pour demander de l'aide pour des tâches particulières ou pour recommander des travaux déterminés. Le Président répond qu'il encouragerait fortement les Groupes de travail à agir ainsi et il ajoute que les visites personnelles des membres des Groupes de travail dans les laboratoires nationaux sont très utiles à cet égard.

On est finalement d'accord pour que le Groupe de travail 2 soit maintenu, étant entendu que son rôle se développera dans le sens qu'a proposé Mr Crovini.

Groupes de travail 3 et 4

Le Président propose de discuter ensemble les tâches des Groupes de travail 3 et 4. Comme point mineur il suggère de changer le domaine de température du Groupe de travail 3 de $T > 100 \text{ K}$ à $T \gg 100 \text{ K}$. Le Président demande alors au C.C.T. de dire si, à son avis, les tâches de ces Groupes de travail doivent demeurer ce qu'elles sont ou si on doit les modifier ; on doit tenir compte du fait que le Groupe de travail 4 a déjà préparé son programme de travail en y incluant une suggestion en vue d'une échelle pour les basses températures et en proposant la constitution d'un cinquième Groupe de travail chargé des thermomètres pratiques aux basses températures.

Mr Dean pense que ces Groupes de travail doivent poursuivre leurs travaux ; le Président est du même avis.

Mr Quinn demande au C.C.T. s'il souhaite que le Groupe de travail 3 présente, lors de la prochaine session du C.C.T., une liste provisoire des différences entre l'E.I.P.T.-68 et les températures thermodynamiques correspondantes. Mr Thomas pense qu'une telle liste préliminaire serait utile. Le Président remarque qu'en fait il incombe implicitement aux Groupes de travail 3 et 4 d'établir de telles listes et de les mettre continuellement à jour.

Mr Kemp indique que des travaux récents avec des thermomètres magnétiques ont montré qu'il est peut-être possible d'étendre la thermométrie magnétique jusqu'à près de 90 K avec une exactitude de l'ordre de 1 mK. Il faut cependant étalonner le thermomètre magnétique à certains points de référence. Pour cette raison, il serait très utile d'effectuer des mesures de températures thermodynamiques dans le domaine compris entre 25 K et 90 K.

On est d'accord pour maintenir aussi ces deux Groupes de travail et pour leur demander de poursuivre les travaux qu'ils ont entrepris.

Groupe de travail 5

Le Président ouvre la discussion sur la tâche précise du Groupe de travail 5, dont le C.C.T. vient d'accepter la constitution au cours de cette session. Mr Kemp suggère que l'on prenne comme point de départ de la discussion la proposition du Groupe de travail 4 au C.C.T. (*voir plus haut*). La discussion se centre sur la question, posée par Mr Dean, de savoir si le C.C.T. souhaite que le Groupe de travail 5 s'en tienne pour commencer à une partie déterminée du domaine de température au-dessous de 30 K, à cause du besoin impérieux de renseignements complémentaires dans ce domaine, ou si l'on ne fixe pas de limite inférieure à ce domaine de température. Le C.C.T. s'accorde pour dire que le Groupe de travail est chargé d'étudier "les thermomètres pratiques pour les basses températures au-dessous de 30 K".

b) Membres des Groupes de travail

Groupe de travail 1.— Le C.C.T. est d'accord pour trouver que le Groupe de travail 1 fonctionne bien et qu'on ne doit pas modifier sa composition.

En vue d'améliorer les relations avec les membres soviétiques des Groupes de travail 1 et 4, Mr Terrien informera les laboratoires soviétiques, par l'intermédiaire du Comité des Normes, de la reconduction des Groupes de travail.

Groupe de travail 2.— Mr Crovini souligne le très bon fonctionnement du Groupe de travail 2. A son avis la présidence devrait changer ; le Groupe de travail aimerait s'adjoindre un quatrième membre pour l'aider, étant donné l'étendue de ses

tâches. Mr Moser et Mr Bedford demandent à Mr Crovini de garder la présidence. Mr Crovini pense que la présidence devrait revenir à un membre dont l'anglais est la langue maternelle, mais Mr Quinn ne partage pas du tout cette opinion.

On s'accorde pour que la présidence reste à Mr Crovini et que Mr Bedford et Mr Moser continuent à faire partie de ce Groupe de travail. Le Président suggère de laisser en suspens pour le moment la question d'un quatrième membre, car il faut encore nommer les membres du cinquième Groupe de travail que l'on vient de créer.

Groupe de travail 3 et 4. - Parlant au nom du Groupe de travail 3, Mr Quinn rappelle que ce Groupe a eu ses difficultés mais qu'il doit poursuivre son action. Mr Thomas souligne la nécessité d'améliorer les relations entre les membres de ce Groupe de travail ; mais cela peut être arrangé ultérieurement. Mr Hudson annonce une réunion du Groupe de travail 3 à Washington dans un proche avenir. Mr Quinn souligne l'importance d'une telle réunion et le Président invite les membres du Groupe de travail 3 à visiter également le N.R.C. à cette occasion. Le Président résume l'opinion du C.C.T. : le Groupe de travail 3 travaille avec efficacité et doit continuer avec les membres actuels.

Le Président demande si l'on peut clarifier la situation de Mme Orlova. Le Groupe de travail 4 a reçu une lettre de Mr Astrov, de l'I.M.P.R., aux termes de laquelle Mme Orlova n'est plus à l'I.M.P.R. Mr Astrov s'occupe depuis longtemps de thermométrie aux basses températures et en particulier de l'établissement d'une échelle de l'I.M.P.R. entre 1 K et 30 K. Pour cette raison, Mr Kemp et Mr Durieux suggèrent de prendre des dispositions pour nommer Mr Astrov membre du Groupe de travail 4 à la place de Mme Orlova. Le C.C.T. approuve cette suggestion, les autres membres demeurant les mêmes.

Groupe de travail 5. - Avant d'aborder la discussion de la composition du Groupe de travail 5, le Président fait quelques remarques préliminaires. Il aimerait voir les laboratoires japonais et hongrois représentés dans un ou deux Groupes de travail. Il faut nommer trois ou quatre membres au Groupe de travail 5. Le Groupe de travail 2 a demandé un quatrième membre et il y a également place pour un quatrième membre au Groupe de travail 3. Les Groupes de travail 1 et 4 sont déjà au complet

avec quatre membres. Le Président demande à Mr Mitsui et Mr Skakala si leur intérêt et leur compétence se rapportent à l'un des domaines des Groupes de travail 5, 2 et 3. Mr Mitsui indique que son laboratoire est en cours de déménagement, et que de ce fait il ne peut guère pour le moment apporter une contribution expérimentale aux Groupes de travail ; toutefois il s'intéresse personnellement au domaine du Groupe de travail 5. Le Président propose que Mr Mitsui fasse partie du Groupe de travail 5. Mr Skakala remarque qu'il fait partie du C.C.T. à titre personnel ; il proposera que son institut en fasse partie. Un laboratoire pour les mesures de température est en cours de construction. Mr Skakala propose par conséquent de reporter à la prochaine session du C.C.T. la question de la participation de son institut à l'un des Groupes de travail, mais précise que le Groupe de travail 2 serait le plus approprié. Mr Brickwedde s'intéresse au domaine dont est chargé le Groupe de travail 4, qui comprend déjà quatre membres, et plus particulièrement aux échelles de l'hélium. Mr Kemp et le Président apprécieront la coopération de Mr Brickwedde pour arriver aux nouvelles échelles de l'hélium envisagées.

Le Président demande ensuite des suggestions pour d'autres nominations au Groupe de travail 5, soulignant que les membres des Groupes de travail doivent s'intéresser de façon marquée, déterminée et continue à la thermométrie aux basses températures. Pour Mr Kemp, le N.B.S. et le N.P.L. constitueraient des candidats appropriés, car les Etats-Unis produisent depuis longtemps des thermomètres d'usage et le N.P.L. a aussi une activité dans ce domaine. Mr Quinn propose que l'on confie la présidence au N.B.S. Le C.C.T. s'accorde finalement pour qu'un physicien du N.B.S. soit président, et que Mr Mitsui et un physicien du N.P.L. fassent partie du Groupe de travail 5.

9. RÉVISION DE L'E.I.P.T.-68 (*fin*)

Lecture est donnée du projet définitif du rapport du sous-comité sur les thermocouples, c'est-à-dire sur les nouvelles équations (13) à (15) et la nouvelle version du paragraphe 2 des "Renseignements complémentaires" (*voir* point 4b).

Mr Crovini remarque qu'il faut vérifier si les valeurs données pour les différences nominales entre les forces élec-

tromotrices aux points de congélation de l'or et de l'argent (1184 μV) et entre celles au point de congélation de l'or et à 630,74 °C (4774 μV) sont compatibles avec la nouvelle valeur de la force électromotrice au point de l'or. Mr Quinn vérifiera ces chiffres. Le projet est accepté par le C.C.T. avec la possibilité d'apporter de petites corrections aux deux chiffres mentionnés ci-dessus. Toutefois, à la suite d'un échange de correspondance postérieur à la session du C.C.T., on est revenu aux limites de variation autorisées à l'origine dans les équations (14) et (15) et on a ajouté au texte une note explicative.

Lecture est ensuite donnée du projet définitif des additions à l'Annexe (Annexe I dans le texte original de l'E.I.P.T.-68). Il s'agit du rapport du sous-comité sur l'Annexe I (*voir* point 4c) y compris la déclaration sur la suppression du tableau VII proposée par MM. Quinn et Thomas (*voir* point 4d). Après une longue discussion au cours de laquelle plusieurs membres manifestent leur souci de la qualité du texte, une version définitive de l'Annexe est acceptée.

Le Président souligne que maintenant le C.C.T. a accepté un texte complet de l'édition amendée de 1975 de l'E.I.P.T.-68. Ce texte sera traduit en français et communiqué au C.I.P.M.

10. FUTUR REMPLACEMENT DE L'E.I.P.T.-68

Le Président constate que le remplacement de l'E.I.P.T.-68 est généralement considéré comme nécessaire, essentiellement a) pour remplacer le thermocouple par le thermomètre à résistance de platine et le pyromètre à rayonnement, b) pour étendre l'échelle au-dessous de 13,81 K et si possible en modifier la définition entre 13,81 K et 20 K, c) si possible aussi pour modifier la définition des fonctions écarts pour le thermomètre à résistance de platine au-dessous de 273,15 K et, on l'espère, d) pour mettre l'échelle en meilleur accord avec les températures thermodynamiques sur la totalité de son étendue.

Le Président cite 1979, 1983 et 1987 comme dates auxquelles on pourrait adopter une nouvelle échelle si la C.G.P.M. continue à se réunir tous les quatre ans. Il suggère 1983 comme date la plus favorable. Le remplacement de l'échelle constituera le sujet le plus important des sessions futures du C.C.T.

11. DIVERS

Publication de compléments à l'E.I.P.T.— Les "Renseignements complémentaires" sur la réalisation pratique de l'E.I.P.T. étant considérablement abrégés dans l'édition amendée, Mr Moser suggère de publier une monographie sur ce sujet. Cela pourrait être d'un grand intérêt pour les utilisateurs de l'échelle. Le Président apprécie particulièrement la suggestion de publier de telles informations sous les auspices du C.C.T. et pense que les Groupes de travail, en particulier le Groupe de travail 2, pourraient être en mesure de s'en charger.

Mr Kemp suggère qu'à l'avenir on supprime du texte de l'échelle les "Renseignements complémentaires" pour pouvoir plus facilement les tenir à jour sans être lié par les dates de modification ou de remplacement de l'échelle.

De plus, Mr Kemp remarque qu'il pourrait être utile de donner aussi des renseignements sur des réalisations moins précises de l'E.I.P.T., en particulier pour aider les pays en voie de développement.

Comparaisons internationales de thermomètres.— Mr Hudson demande quel est l'état d'avancement des comparaisons internationales de thermomètres. En réponse, Mr Bedford signale que les comparaisons de thermocouples entre le N.P.L., le N.B.S. et le N.R.C. sont achevées. Les nouvelles tables qui en résultent ont été acceptées aux U.S.A. et au Royaume-Uni et seront vraisemblablement acceptées sur le plan international (voir aussi le point 1a). Mr Mitsui signale qu'au Japon on modifie les normes industrielles japonaises pour les thermocouples, en accord avec les nouvelles tables.

Mr Quinn rend compte de la comparaison internationale des thermomètres à résistance de platine au-dessous de 273 K (voir C.C.T., 9^e session, 1971). Le N.P.L. a reçu des thermomètres en provenance du N.S.L. et du K.O.L. et les mesures ont commencé. Pour les comparaisons de thermomètres à germanium, Mr Kemp renvoie au Document CCT/74-33 et aux rapports du Groupe de travail 4.

Le Président saisit avec plaisir cette occasion pour remercier le N.S.L. et le N.P.L. pour le gros effort qu'ils sont prêts à faire respectivement dans ces comparaisons internationales de thermomètres à germanium et à résistance de platine. Ces comparaisons sont extrêmement importantes. En particulier, le Président remercie Mr Kemp pour les travaux excellents du N.S.L. dans les comparaisons des thermomètres à germanium qui semblent avoir déjà fourni une base pour une nouvelle échelle des basses températures.

*
* *

Le Président remercie les membres du C.C.T. pour leur contribution extrêmement efficace au succès de cette session, ainsi que Mr Terrien et son personnel pour l'aide permanente qu'ils ont apportée, en toutes occasions, au cours des réunions.

Mr Terrien remercie le Président en soulignant le rôle que le Président a eu dans la préparation et dans le succès de cette session.

(Août 1974)

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

RECOMMANDATION T 1 (1974)*

Le Comité Consultatif de Thermométrie,

1. *CONSIDÉRANT qu'on a fait beaucoup de progrès en thermométrie depuis la promulgation de l'Echelle Internationale Pratique de Température de 1968 (E.I.P.T.-68),*

RECOMMANDE que le Comité International des Poids et Mesures accepte que l'"Echelle Internationale Pratique de Tempéra-

* Les cinq points de cette Recommandation ont été approuvés par le Comité International des Poids et Mesures à sa 63^e session (septembre 1974).

ture de 1968, Edition amendée de 1975" remplace l'Echelle Internationale Pratique de Température de 1968".

2. CONSIDÉRANT qu'une grande partie des mesures thermométriques au niveau secondaire se situent dans le domaine de 100 K à 400 K et qu'il n'existe pas suffisamment de points de référence dans ce domaine,

RECOMMANDE que l'on entreprenne des recherches pour établir des points de référence secondaires reproductibles entre 100 K et 400 K et pour déterminer leur température dans l'E.I.P.T.-68.

3. CONSIDÉRANT que l'on reconnaît de façon générale que le thermocouple Pt-10 % Rh/Pt est très inférieur au thermomètre à résistance de platine et au pyromètre optique comme instrument étalon d'interpolation,

RECOMMANDE que l'on intensifie et coordonne les recherches pour étendre le domaine du thermomètre à résistance de platine vers les hautes températures et le domaine du pyromètre optique vers les basses températures.

4. CONSIDÉRANT l'intérêt croissant pour les températures au-dessous de 13,81 K et l'absence d'une échelle de température acceptée sur le plan international dans cette région,

RECOMMANDE que l'on fasse des recherches pour étendre l'E.I.P.T.-68 jusqu'à 2 mK.

5. CONSIDÉRANT l'intérêt croissant pour les mesures de température au-dessus de 4000 K tant dans les milieux scientifiques qu'industriels,

RECOMMANDE que les laboratoires nationaux étendent leurs recherches vers la détermination des températures supérieures à 4000 K.

ANNEXE T 1

Documents de travail présentés à la 10^e session du C.C.T.

Document

CCT/

Domaine des températures supérieures à 0 °C

- 74-17 C.N.A.M. (France).- Mesures de températures dans un arc à plasma d'hydrogène, par P. Fieffé-Prévost (Voir Annexe T 6).
- 74-10 I.M.G.C. (Italie).- The melting point of the silver-copper eutectic alloy, by L. Crovini and P. Marcarino (Voir Annexe T 7).
- 74-11 I.M.G.C. (Italie).- Evaluation of the pressure coefficient and the effect of dissolved oxygen on the freezing and melting points of high purity silver, by G. Bongiovanni, L. Crovini and P. Marcarino (Voir Annexe T 8).
- 74-6 N.B.S. (Etats-Unis d'Amérique).- The thermodynamic kelvin temperature scale from 273.15 K to 415 K, by L.A. Guildner and R.E. Edsinger (Publié dans *J. of Res. N.B.S.*, 77-A, 1973, p. 383).

Document

CCT/

- 74-7 N.B.S. (Etats-Unis d'Amérique).- Comparison of "long stem" platinum resistance thermometers from 90 K to 900 K, by G.T. Furukawa (Voir Annexe T 9).
- 74-8 N.B.S. (Etats-Unis d'Amérique).- Investigation of freezing temperatures of National Bureau of Standards Aluminum Standards, by G.T. Furukawa (Publié dans *J. of Res. N.B.S.*, 78-A, 1974, p. 477).
- 74-9 N.B.S. (Etats-Unis d'Amérique).- The ideal gas-calorimetric thermometer, by L. Haar (Publié dans *Science*, 176, 1972, p. 1293).
- 74-14 N.R.L.M. (Japon).- An experimental evaluation of errors in calibration of platinum thermometers at the triple point of water, by S. Sawada and T. Mochizuki (Voir le résumé à l'Annexe T 10. Cet article a été publié en langue japonaise dans : *Rep. of N.R.L.M.*, 22, 1973, p. 212).
- 74-15 N.R.L.M. (Japon).- Appareil de type Maecker pour la réalisation de 10^4 K, par H. Sakate et S. Takata (Voir le résumé à l'Annexe T 11. Cet article a été publié en langue japonaise dans : *Oyo Buturi*, 39, 1970, p. 441).

Pyrométrie

- 74-12 B.I.P.M.- Etude pyrométrique des températures comprises entre 630 °C et 1 064 °C, par J. Bonhoure (Voir Annexe T 12).
- 74-19 C.N.A.M. (France).- Pyromètre photoélectrique, par G. Negro (Voir Annexe T 13).
- 74-21 N.P.L. (Royaume-Uni).- New work underway at N.P.L. on thermometry : 1) Total Radiation Thermometer. 2) Photon-counting Pyrometry, by T.J. Quinn (Voir Annexe T 14).

Document

CCT/

- *74-13 N.R.L.M. (Japon).- A multiplicative comparator of the spectral radiances, by S. Takata and S. Hattori (Voir le résumé à l'Annexe T 15).
- 74-16 N.R.L.M. (Japon).- A new source of blackbody radiation at the gold point, by S. Hattori and S. Takata (Voir le résumé à l'Annexe T 16. Cet article sera publié en langue japonaise dans *Rep. of N.R.L.M.*).
- Domaine des températures inférieures à 0 °C*
- 74-1 N.R.C. (Canada).- Discontinuities in second derivatives of the resistance thermometer deviation functions, by R.E. Bedford (Voir le résumé à l'Annexe T 17).
- 74-2 N.R.C. (Canada).- A proposal for a new deviation function in the IPTS-68 below 273 K, by C. Kirby and R.E. Bedford (Voir *Metrologia*, 11, 1975, p. 117).
- 74-18 C.N.A.M. (France).- Cellule à point triple de l'argon, par G. Bonnier (Voir Annexe T 18).
- 74-22 I.M.P.R. (U.R.S.S.).- Realization of the practical temperature scales in the range from 1.5 to 13.81 K, by M.P. Orlova, D.N. Astrov, R.V. Philonchik, G.A. Kytin and T.M. Kourakina (Voir résumé à l'Annexe T 19).
- 74-23 I.M.P.R. (U.R.S.S.).- Realization of the International Practical Temperature Scale of 1968 and P-T relations of gases in the range from 13.81 to 90.188 K, by M.P. Orlova, D.N. Astrov, D.I. Sharevskaya, L.B. Belyansky, Ya. E. Razhba and Khnykov (voir le résumé à l'Annexe T 20).

* Le texte complet de ce document peut être obtenu sur demande adressée au B.I.P.M.

Document

CCT/

- 74-24 I.M.P.R. (U.R.S.S.).- Magnetic temperature scale in 2 to 30 K range, by V.T. Shkraba, V.A. Pavlov and D.N. Astrov (Voir le résumé à l'Annexe T 21).
- 74-20 I.M.G.C. (Italie).- Mesures de comparaison de thermomètres à résistance entre 13,81 et 273,15 K et traitement des données expérimentales, par F. Pavese (Voir Annexe T 22).
- 74-32 K.O.L. (Pays-Bas).- Experience at KOL with the NBS superconductive fixed point device SRM 767 (Pb, In and Al points), by J.E. Van Dijk and M. Durieux (Voir Annexe T 23).
- 74-3 N.B.S. (Etats-Unis d'Amérique).- Resume of NBS cryogenic thermometry and the proposed cryogenic extension of the IPTS, by G. Cataland, R.P. Hudson, B.W. Mangum, H. Marshak, H.H. Plumb, J.F. Schooley, R.J. Soulen Jr. and D.B. Utton (Publié dans N.B.S. Technical Note 830, 1974).
- 74-5 N.B.S. (Etats-Unis d'Amérique).- The International Practical Temperature Scale of 1968 in the region 13.81 K to 90.188 K as maintained at the National Bureau of Standards, by G.T. Furukawa, J.L. Riddle and W.R. Bigge (Publié dans *J. of Res. N.B.S.*, 77-A, 1973, p. 309).
- 74-21 N.P.L. (Royaume-Uni).- New work underway at NPL on thermometry : 1) Dielectric constant gas thermometry 90 K - 373 K. 2) The optical thermometer, by T.J. Quinn (Voir Annexe T 24).
- 74-29 N.R.L.M. (Japon).- Reproducibility of germanium thermometers at ⁴He boiling point, by T. Shiratori and K. Mitsui (Voir le résumé à l'Annexe T 25. Cet article sera publié en langue japonaise dans *Rep. of N.R.L.M.*).

Document

CCT/

- 74-30 N.R.L.M. (Japon).- Recent status of NRLM gas thermometry below IPTS range, by K. Mitsui and H. Sakurai.
- *74-25 N.S.L. (Australie).- Implications of magnetic thermometry on the IPTS-68 below 90 K, by L.M. Besley, T.C. Cetas and W.R.G. Kemp (voir le résumé à l'Annexe T 26).
- 74-33 N.S.L. (Australie).- Rapport supplémentaire au Groupe de travail 4.

Divers

- *74-4 N.B.S. (Etats-Unis d'Amérique).- NBS thermometry and the IPTS, by J.F. Schooley (Voir le résumé à l'Annexe T 27).
- *74-26 N.B.S. (Etats-Unis d'Amérique).- Proposed statement for inclusion in the report of the 1974 meeting of the Comité Consultatif de Thermométrie, by L.A. Guildner, G.T. Furukawa and J.L. Riddle (Voir le résumé à l'Annexe T 28).
- 74-27 N.P.L. (Royaume-Uni).- A new determination of the gas constant, by T.J. Quinn, T.R.D. Chandler and A.R. Colclough (Voir Annexe T 29).
- 74-28 N.R.L.M. (Japon).- Comments on the revised version of the IPTS-68.
- 74-31 N.R.L.M. (Japon).- Influence of the calibration error at fixed points on the platinum resistance thermometry, by T. Mochizuki and H. Sakurai (Voir le résumé à l'Annexe T 30. Cet article sera publié en langue japonaise dans *Rep. of N.R.L.M.*).

ANNEXE T 2

Cette Annexe concernait le projet de version amendée de l'E.I.P.T.-68, établi par le Groupe de travail 1.

Après discussion, le projet finalement adopté par le C.C.T. a été soumis au Comité International des Poids et Mesures à sa session de septembre 1974, puis approuvé par la 15^e Conférence Générale des Poids et Mesures (mai-juin 1975, Résolution 7) sous le titre "Echelle Internationale Pratique de Température de 1968, édition amendée de 1975" (texte reproduit à l'Annexe T 31).

ANNEXE T 3

Résumé des deux premiers Rapports * du Groupe de travail 2

(Points fixes secondaires)

1. INTRODUCTION

Le Groupe de travail 2 (GT 2) a été créé par le Comité Consultatif de Thermométrie (C.C.T.) pour examiner la révision des points de référence secondaires et pour étudier d'autres techniques d'étalonnage dans l'E.I.P.T.-68.

Ce Groupe comprend

L. Crovini (Président)
Istituto di Metrologia "G. Colonnetti"
Torino, Italie

R.E. Bedford
Conseil National de Recherches
Ottawa, Canada

A. Moser
Conservatoire National des Arts et Métiers
Paris, France.

Les paragraphes suivants donnent un résumé des activités du GT 2 pour les années 1972 et 1973.

* Ces Rapports ont été communiqués aux membres du C.C.T. en janvier 1973 et janvier 1974, et discutés à la 10^e session du C.C.T. en mai 1974.

2. DÉTERMINATIONS EXPÉRIMENTALES DES POINTS DE RÉFÉRENCE SECONDAIRES

On a fait remarquer, tant dans le cadre du C.C.T. qu'à l'extérieur, qu'il y a un manque de renseignements relatifs aux sources et aux valeurs des incertitudes de beaucoup des températures mentionnées comme points de référence dans le Tableau VI de l'E.I.P.T.-68.

Comme première étape d'une amélioration de cette situation, le GT 2 donne ci-après, en annexe, un projet de "Liste des plus récentes déterminations des points secondaires de référence". Cette liste comporte deux parties. La partie 1 met à jour le Tableau VI de l'E.I.P.T.-68 en donnant des résultats expérimentaux complémentaires pour les points qui y figurent et en ajoutant des transitions qui n'y figuraient pas auparavant. Les deux premières colonnes de la liste s'expliquent d'elles-mêmes. L'indication "E.I.P.T.-68" dans la troisième colonne signifie que la température correspondante est celle qui figure au Tableau VI de l'E.I.P.T.-68 ; l'indication "N" dans la colonne 3 signifie généralement qu'il s'agit d'une nouvelle valeur publiée depuis la promulgation de l'E.I.P.T.-68 ou d'un point fixe qui ne figure pas dans l'E.I.P.T.-68 ; mais il peut s'agir d'une ancienne valeur dont apparemment il n'avait pas été tenu compte lorsque l'E.I.P.T.-68 a été établie. Le GT 2 n'appuie ni ne recommande les incertitudes figurant dans la colonne 4. Pour la plupart, ce sont des valeurs données par les auteurs et qui ne sont même pas toujours cohérentes. La colonne 5 donne l'origine des valeurs des points fixes mentionnés. Lorsqu'il n'y a aucune indication, le point correspondant provient du Tableau VI de l'E.I.P.T.-68 et son origine nous est inconnue. Nous ne prétendons pas que cette liste soit complète.

La partie 2 contient une liste assez complète des relations pression de vapeur/température déterminées expérimentalement pour des systèmes en équilibre vapeur/liquide et vapeur/solide de nombreuses substances.

Il serait extrêmement souhaitable que les résultats et leur exactitude soient donnés à l'avenir par les auteurs d'une façon plus cohérente que cela n'a été le cas dans le passé. Le GT 2 étudie la possibilité de prescrire des critères pour l'estimation de l'exactitude.

3. POINT DE CONGÉLATION DE L'ANTIMOINE

Le GT 2 propose la température

$$t_{68} = 630,755 \text{ } ^\circ\text{C} \pm 0,003 \text{ } ^\circ\text{C}$$

pour le point de congélation de l'antimoine, sur la base des résultats détaillés publiés par McLaren et Murdock (*Can. J. Phys.*, 46, 1968, p. 369 et p. 401), confirmés par les résultats de Bongiovanni, Crovini et Marcarino (*Comité Consultatif de Thermométrie*, 9^e session, 1971, p. T 66). Les résultats, dont il a été tenu compte, ont été obtenus en utilisant de l'antimoine de grande pureté, bien dépourvu d'oxyde, et des thermomètres à résistance de platine dont la bobine présentait une résistance d'isolement très élevée et dont l'élément sensible était en bon couplage thermique avec le métal en fusion.

4. POINT DE CONGÉLATION DU CUIVRE

Le GT 2 propose la température

$$t_{68} = 1\,084,88 \text{ } ^\circ\text{C} \pm 0,1 \text{ } ^\circ\text{C}$$

pour le point de congélation du cuivre. Cette valeur résulte d'une détermination thermodynamique faite par Righini, Rosso et Ruffino (*High Temperatures-High Pressures*, 4, 1972, p. 471), en comparant avec un pyromètre optique photoélectrique le rayonnement spectral à 1 μm de deux cavités corps noir, l'une maintenue dans de l'or en cours de congélation et l'autre dans du cuivre en cours de congélation. La température de congélation de l'or utilisée était celle indiquée dans l'E.I.P.T.-68.

5. POINT DE CONGÉLATION DU PLATINE

La température de congélation du platine est intéressante non seulement pour la thermométrie mais également pour la photométrie et la radiométrie. Une des recommandations de la 9^e session du C.C.T. (1971) au C.I.P.M. souhaitait que la détermination de ce point fixe soit refaite par plus d'un laboratoire. Il a été rendu compte de deux déterminations précises récentes : Quinn et Chandler [30] ont trouvé une température du point de congélation de $1\,767,9 \text{ } ^\circ\text{C} \pm 0,3 \text{ } ^\circ\text{C}$, après application d'une correction pour l'indice de réfraction de l'air (Blevin [W.R.], *Metrologia*, 8, 1972, p. 146) ; Jones et Tapping [68] ont obtenu $1\,769,7 \text{ } ^\circ\text{C} \pm 0,5 \text{ } ^\circ\text{C}$ (taux de confiance 99 %). Ces deux expériences ont été soigneusement étudiées, mais on n'a trouvé aucune raison pour justifier l'écart relatif

vement grand (plus du double de la somme des incertitudes respectives) entre les résultats. Le GT 2 propose que l'on donne un poids égal à ces deux valeurs et par conséquent

$$t_{68} = 1\,768,8 \text{ } ^\circ\text{C} \pm 1 \text{ } ^\circ\text{C}$$

pour la température du point de congélation du platine.

Deux autres expériences semblables sont en cours ; on espère que leur résultat sera disponible dans un proche avenir.

6. AUTRES POINTS FIXES

Le GT 2 recommande que le point triple de l'argon soit inclus dans l'E.I.P.T.-68 comme point fixe de définition concurremment avec le point d'ébullition de l'oxygène, mais sans remplacer celui-ci. Le point triple de l'argon est aussi reproductible et facilement réalisable que le point d'ébullition de l'oxygène, sans peut-être l'être davantage. Après avoir examiné les résultats qui s'y rapportent, nous proposons la température

$$T_{68} = 83,798 \text{ K}$$

fondée principalement sur les références [8] et [50]. Toutes les modifications qui résulteraient de l'emploi de cette valeur dans les températures T_{68} entre 83,798 K et 90,188 K sont insignifiantes.

Le GT 2 concentre son attention sur le point de congélation du mercure. La valeur qui est donnée au Tableau VI de l'E.I.P.T.-68 est manifestement fausse. Dans la liste en annexe, on donne les valeurs du point de congélation et du point triple du mercure.

7. NOUVELLE FORMULATION DE LA FONCTION DE RÉFÉRENCE

$$W_{\text{CCT-68}}(T_{68})$$

Il incombe au GT 2 de proposer toute action susceptible de diminuer la complexité de la réalisation de l'E.I.P.T.-68. A cet égard le GT 2 recommande que la fonction de référence $W_{\text{CCT-68}}(T_{68})$, telle qu'elle figure dans le texte, soit remplacée par le formule de Kirby et Bedford (*Metrologia*, 8, 1972, p. 82) ; voir erratum (*Metrologia*, 8, 1972, p. 157). Pour calculer T_{68} à $\pm 0,1$ mK près, avec la formulation de Kirby-Bedford, il suffit de connaître les coefficients avec 8 chiffres significatifs. Pour une précision moindre ou de petits domaines de température il suffit même de moins de chiffres, ce qui rend le calcul faisable avec des calculateurs programmables de bureau. Cette nouvelle formulation est une transformation

exacte, et non une approximation, de la fonction de référence $W_{\text{CCT-68}}(T_{68})$, de telle sorte qu'elle ne modifie en rien la définition de T_{68} .

8. THERMOMÉTRIE A RÉSISTANCE DE PLATINE DE 630 A 1 064 °C

On s'accorde à penser que le thermomètre à résistance de platine remplacera finalement le thermocouple platine à 10 % de rhodium/platine comme instrument étalon sur une grande partie du domaine de température de ce dernier. Malheureusement, en dépit de cet accord apparent, il semble que peu de travaux soient faits pour confirmer les possibilités supposées du thermomètre à résistance de platine à ces températures. Le thermocouple présente de graves limitations de son exactitude (pas meilleure que $\pm 0,2$ °C) par rapport au pyromètre optique ($\pm 0,04$ °C à 1000 °C) et au thermomètre à résistance de platine ($\pm 0,01$ °C). Des expériences portant sur l'exactitude et la reproductibilité du thermomètre à résistance de platine sont absolument nécessaires.

Les thermomètres à résistance de platine à haute température actuellement disponibles ne sont pas fiables au-dessus du point de congélation de l'argent. Ceux qui sont construits au Japon semblent présenter le meilleur comportement, mais il n'est pas prouvé que leur fonctionnement soit digne de confiance jusqu'au point de l'or. Néanmoins de nombreux laboratoires nationaux achètent ces thermomètres japonais comme étant les meilleurs disponibles. Il devrait par conséquent exister un équipement expérimental suffisant pour proposer aux laboratoires susceptibles d'être intéressés de coordonner leur activité dans le but de définir une échelle provisoire pour le thermomètre à résistance de platine au-dessus de 630 °C.

D'après les renseignements disponibles à ce jour, il semble au GT 2 qu'une telle échelle provisoire devrait être telle que les domaines étendus du thermomètre à résistance de platine et du pyromètre optique se rejoignent au point de l'argent (961,93 °C). Entre les points fixes du domaine du thermomètre à résistance de platine, on pourrait interpoler les températures soit à partir d'une équation, soit à partir d'une fonction de référence.

9. ÉCHELLES SECONDAIRES DU THERMOCOUPLE

Le GT 2 pense qu'on devrait essayer de définir une réali-

sation secondaire de l'E.I.P.T.-68 au moyen de thermocouples dans le domaine de température supérieur à 1 064 °C. Bien que les thermocouples ne puissent faire concurrence en exactitude au pyromètre optique photoélectrique, ils ont une précision comparable et d'énormes avantages de commodité et de coût. Les thermocouples sont maintenant et demeureront les thermomètres les plus employés dans ce domaine, mais les températures qu'ils mesurent ne sont données dans l'E.I.P.T. que si les thermocouples ont été étalonnés par rapport à un pyromètre optique. Une seconde réalisation de l'E.I.P.T.-68 définie, par exemple, en attribuant des températures à un ou deux points fixes supplémentaires et en reliant la force électromotrice mesurée à ces points fixes à une table de référence agréée (comme c'est le cas maintenant pour le thermomètre à résistance de platine au-dessous de 0 °C) éviterait des étalonnages primaires onéreux dans d'innombrables cas où l'exactitude la plus grande n'est pas nécessaire. Une telle réalisation secondaire pourrait être convenablement définie avec l'un des thermocouples en métal noble existants, sa table de référence annexe, et un ou peut-être deux points fixes supplémentaires (palladium, platine). On peut réaliser ces points fixes de façon peu coûteuse par la méthode du fil ; il existe déjà beaucoup de publications portant sur l'exactitude de ce type d'étalonnage. On pourrait effectuer ainsi de façon simple une réalisation secondaire jusqu'à 1600 °C (ou 1800 °C). On pourrait déterminer son exactitude probable par des expériences appropriées.

Annexe*

Liste des plus récentes déterminations des points de référence secondaires

1^{ère} partie : Points fixes

Etat d'équilibre	T_{68} (K)	Identi- fication	Incertitude ⁺ (mK)	Auteurs (référence) (année)
P.T. hydrogène normal	13,956	EIPT-68		Durieux (42) (1970)
P.E. hydrogène normal	20,397	EIPT-68		Durieux (42) (1970)
Transition α - β oxygène solide	23,884	N		Hoge (44) (1950)
	23,867	N	± 2	Orlova (45) (1962)
	23,864	N	± 4	Muijlwijk (46) (1968)
	23,880	N	± 5	Kemp et Pickup (67) (1972)
P.T. néon naturel ^[1]	24,555 ^[2]	EIPT-68		Grilly (43) (1962)
	24,561	N	± 1	Furukawa <i>et al.</i> (1) (1970) (48) (1972)
	24,560	N	± 2	Compton (2) (1970)
	24,561 9	N	$\pm 0,4$	Tiggelman <i>et al.</i> (3) (1971)
	24,561 8	N	$\pm 0,8$	Tiggelman (47) (1973)
Transition β - γ oxygène solide	43,806	N		Hoge (44) (1950)
	43,811	N	± 2	Orlova (45) (1962)
	43,804	N	± 3	Muijlwijk (46) (1968)
	43,801	N	$\pm 2,4$	Kemp et Pickup (67) (1972)
P.T. Azote ^[3]	63,148	EIPT-68		Moussa (4) (1966)
	63,146 4	N ; T_{68}^{NRC}		Ancsin (49) (1974)
P.E. azote ^[3]	77,348	EIPT-68	± 1	Moussa (4) (1966)
	77,343	N ; T_{68}^{NRC}		Lovejoy (5) (1963)
	77,343 9	N ; T_{68}^{NRC}		Ancsin (49) (1974)
P.T. argon ^[3,4]	83,797 3	N ; T_{68}^{NRC}		Ancsin et Phillips (7) (1969)
	83,797 6	N ; T_{68}^{NRC}	$\pm 0,2$	Ancsin (50) (1973)
	83,799 8	N ; T_{68}^{NBS}	$\pm 0,3$	Furukawa <i>et al.</i> (8) (1971)
	83,795 9	N ; T_{68}^{NRC}		Lovejoy (5) (1963)
	83,794 ^[5] ₈	N		Flubacker <i>et al.</i> (58) (1961)
	83,805 ₅	N	± 1	Chen <i>et al.</i> (60) (1971)
P.E. argon ^[3]	83,793	N		Chien (61) (1967)
	87,292 8	N ; T_{68}^{NRC}		Lovejoy (5) (1963)
	87,294 6	N ; T_{68}^{NRC}		Ancsin (50) (1973)

* Les renvois [] sont donnés à la fin du tableau, avant la bibliographie.

⁺ Estimation communiquée par les auteurs.

P.T. krypton	}	115,768	N		Beaumont <i>et al.</i> (52) (1961)
		115,762	N		Lovejoy (5) (1963)
		115,786	N		Fender et Halsey (51) (1965)
		115,752 ^[6]	N		Michels et Prins (57) (1962)
P.E. krypton		119,797	N		Lovejoy (5) (1963)
P.T. xenon	}	161,392	N		Lovejoy (5) (1963)
		161,375 ^[6]	N		Michels et Prins (57) (1962)
P.E. xenon		165,059	N		Lovejoy (5) (1963)
P.S. CO ₂	}	194,674	EIPT-68		
		194,673	N		Lovejoy (5) (1963)
P.T. CO ₂	}	216,579	N	± 5	Meyers et Van Dusen (54) (1933)
		216,578	N	± 2	Ambrose (55) (1957)
		216 581	N		Lovejoy (5) (1963)
P.T. mercure		234,309	N	± 5	Dengler (9) (1962)
P.C. mercure ^[7]	}	234,288	EIPT-68		valeur fausse
		234,314	N	± 5	Dengler (9) (1962)

Etat d'équilibre	t_{68} (°C)	Identi- fication	Incertitude ⁺ (K)	Auteurs (référence) (année)	
Point de glace	0	EIPT-68	exact par définition		
P.T. phénoxybenzène	26,87	EIPT-68			
P.T. acide benzoïque	122,37	EIPT-68			
P.C. indium	156,634	EIPT-68	± 0,001	McLaren (10) (1958)	
P.C. bismuth	271,442	EIPT-68	± 0,001	McLaren et Murdock (11) (1963)	
P.C. cadmium	321,108	EIPT-68	± 0,001	McLaren (12) (1959)	
P.C. plomb	327,502	EIPT-68	± 0,001	McLaren et Murdock (13) (1960)	
P.E. mercure	356,66	EIPT-68	non donnée	Blaisdell et Kaye (14) (1941)	
P.E. soufre	444,674	EIPT-68	± 0,005	même source que EIT-27	
P.F. eutectique Cu-Al	}	548,23	EIPT-68		
		548,26	N	± 0,005	McAllan (15) (1971), lettre à H. Preston-Thomas (1973)

P.C. antimoine	}	630,74	EIPT-68		moyenne CCT (1967)
		630,755	N	± 0,003	meilleure valeur GT 2 (16) (17) (1972)
P.C. aluminium	}	660,37	EIPT-68		Wensel (18) (1939)
		660,462	N	± 0,004	McAllan et Ammar (19) (1971)
		660,47	N,thermo- dynamique	± 0,05	Moser <i>et al.</i> (20) (1967)
P.F. eutectique Cu-Ag		779,6	N	± 0,15	Crovini et Marcarino (66) (1974)
P.C. cuivre	}	1 084,5	EIPT-68		valeur fausse
		1 084,88	N	± 0,1	Righini <i>et al.</i> (21) (1972)
P.C. nickel		1 455	EIPT-68	± 1	Van Dusen et Dahl (22)(1947) Wensel et Roeser (23)(1930)
P.C. cobalt ^[8]		1 495	EIPT-68	± 1	Van Dusen et Dahl (22)(1947)
P.C. palladium		1 554	EIPT-68		Schofield (24) (1929) Schofield (25) (1936) Fairchild <i>et al.</i> (26) (1929)
P.C. platine	}	1 772	EIPT-68		moyenne (NPL,NBS,PTR) (27) (28) (29) (1930-34)
		1 767,9	N	± 0,3	Quinn et Chandler (30)(1971) corrigé de ± 0,3 K pour l'indice de réfraction de l'air
		1 771	N	± 5	Cezairliyan (31) (1970) méthode du fil (fusion)
		1 769,7	N	± 0,5	Jones et Tapping (68)(1975)
P.C. rhodium		1 963	EIPT-68	± 3	Roeser et Wensel (32)(1934)
P.F. Al ₂ O ₃	}	2 054	N	± 6	IUPAC (33) (1970)
		2 044	N	± 7	Gitlesen et Motzfeldt (34) (1965)
P.C. iridium	}	2 447	EIPT-68	± 3	Henning et Wensel (35)(1933)
		2 452	N	± 5	Riley (63) (1964)
P.F. niobium	}	2 477	N	± 10	Cezairliyan (40) (1972)
		2 472	N	± 10	Schofield (41) (1956)
P.F. molybdène	}	2 621	N	± 10	Cezairliyan <i>et al.</i> (36) (1970)
		2 623	N	± 15 ?	Batta <i>et al.</i> (37) (1972)
		2 626	N	± 9	Kenisarin <i>et al.</i> (38)(1972)
		2 623	N	± 10	Riley (63) (1964)
		2 615	N	± 10	Worthing (64) (1925)
P.F. tungstène	}	3 387	EIPT-68		
		3 422	N	± 15	Cezairliyan (39) (1972)

Etat d'équilibre

Auteurs

A. Phases liquide et vapeur de l'hydrogène en équilibre

$$\log_{10} \left(\frac{p}{p_0} \right) = A + \frac{B}{T_{68}} + CT_{68} + DT_{68}^2 \quad \text{Durieux (42)(1970)}$$

où $A = 1,711\,466$; $B = -44,010\,46\text{ K}$; (figure dans l'EIPT-68)
 $C = 0,023\,590\,9\text{ K}^{-1}$; $D = -48,017 \times 10^{-6}\text{ K}^{-2}$

B. Phases liquide et vapeur de l'hydrogène normal

$$\log_{10} \left(\frac{p}{p_0} \right) = A + \frac{B}{T_{68}} + CT_{68} + DT_{68}^2 \quad \text{Durieux (42)(1970)}$$

où $A = 1,734\,791$; $B = -44,623\,68\text{ K}$; (figure dans l'EIPT-68)
 $C = 0,023\,186\,9\text{ K}^{-1}$; $D = -48,017 \times 10^{-6}\text{ K}^{-2}$

C. Phases solide et vapeur du néon⁽¹⁾

$$\ln \left(\frac{p}{p_0} \right) = A + \frac{B}{T_{68}} + CT_{68} + DT_{68}^2 \quad \text{Tiggelman (47)(1973)}$$

où $A = 10,275\,895$; $B = -261,182\,05\text{ K}$;
 $C = -4,540\,82 \times 10^{-2}\text{ K}^{-1}$; $D = 10,352\,89 \times 10^{-4}\text{ K}^{-2}$

D. Phases liquide et vapeur du néon naturel⁽¹⁾

1. ^[9] $\log_{10} \left(\frac{p}{p_0} \right) = A + \frac{B}{T_{68}} + CT_{68} + DT_{68}^2$ d'après Grilly (43)(1962)
 voir Durieux (42)(1970)
 (figure dans l'EIPT-68)

où $A = 4,611\,52$; $B = -106,385\,1\text{ K}$;
 $C = 0,036\,833\,1\text{ K}^{-1}$; $D = 42,489\,2 \times 10^{-5}\text{ K}^{-2}$

2. $\ln p = A + \frac{B}{T} + C \ln T + DT + ET^2$ Furukawa (48)(1972)

où $A = 2\,074,411$; $B = -6\,618,952\text{ K}$;
 $C = -748,942\,23$; $D = 29,231\,698\text{ K}^{-1}$;
 $E = -0,190\,167\,6\text{ K}^{-2}$; p est en Pa ;
 T est donnée dans l'échelle NBS-55

3. $\ln \left(\frac{p}{p_0} \right) = A + \frac{B}{T_{68}} + CT_{68} + DT_{68}^2$ Tiggelman (47)(1973)

où $A = 10,153\,199$; $B = -240,780\,122\text{ K}$;
 $C = -6,796\,944 \times 10^{-2}\text{ K}^{-1}$; $D = 7,802\,784 \times 10^{-4}\text{ K}^{-2}$

E. Phases solide et vapeur de l'azote

$$\ln p = A + \frac{B}{T_{68}} + CT_{68} \quad \text{Ancsin (49)(1974)}$$

où $A = 23,715\,979$; $B = -861,621\,60\text{ K}$;
 $C = -1,006\,552 \times 10^{-2}\text{ K}^{-1}$
 p est en Pa

F. Phases liquide et vapeur de l'azote

1. $\log_{10} \left(\frac{p}{p_0} \right) = A + \frac{B}{T_{68}} + C \log_{10} \left(\frac{T_{68}}{T_0} \right) + DT_{68} + ET_{68}^2$ d'après Moussa (4)(1966)
 voir Durieux (42)(1970)

où $A = 5,893\,139$; $B = -404,131\,05\text{ K}$;
 $C = -2,374\,9$; $D = -14,250\,5 \times 10^{-3}\text{ K}^{-1}$;
 $E = 72,534\,2 \times 10^{-6}\text{ K}^{-2}$; $T_0 = 77,348\text{ K}$ (figure dans l'EIPT-68)

$$2. \ln p = A + \frac{B}{T_{68}} + CT_{68} + DT_{68}^2$$

Ancsin (49)(1974)

où $A = 26,500\ 258$; $B = - 874,467\ 65\ K$;
 $C = - 6,655\ 806 \times 10^{-2}\ K^{-1}$; $D = 2,473\ 924 \times 10^{-4}\ K^{-2}$
 p est en Pa

G. Phases solide et vapeur de l'argon

$$1. \ln p = A + \frac{B}{T}$$

Fender et Halsey (51)(1965)

où $A = 22,550\ 00$; $B = - 956,068\ K$;
 p est en Pa ; T : température thermodynamique de
 Fender et Halsey

$$2. \ln p = A + \frac{B}{T_{68}}$$

Ancsin (50)(1973)

où $A = 22,548\ 60$; $B = - 955,992\ K$;
 p est en Pa

H. Phases liquide et vapeur de l'argon

$$\ln p = A + \frac{B}{T_{68}} + CT_{68}$$

Ancsin (50)(1973)

où $A = 22,119\ 208$; $B = - 864,700\ 28\ K$;
 $C = - 0,787\ 611 \times 10^{-3}\ K^{-2}$; p est en Pa

I. Phases liquide et vapeur de l'oxygène

$$1. \left[\begin{matrix} 10 \\ 10 \end{matrix} \right] \log_{10} \left(\frac{p}{p_0} \right) = A + \frac{B}{T_{68}} + C \log_{10} \left(\frac{T_{68}}{T_0} \right) + DT_{68} + ET_{68}^2$$

d'après Muijlwijk (46)(1968)
 voir Durieux (42)(1970)

où $A = 5,961\ 546$; $B = - 467,455\ 76\ K$;
 $C = - 1,664\ 512$; $D = - 13,213\ 01 \times 10^{-3}\ K^{-1}$;
 $E = 50,804\ 1 \times 10^{-6}\ K^{-2}$; $T_0 = 90,188\ K$

(figure dans l'EIPT-68)

$$2. \ln \left(\frac{p}{p_0} \right) = A + \frac{B}{T_{68}} + CT_{68} + DT_{68}^2 + ET_{68}^3$$

Tiggelman (47)(1973)

où $A = 15,933\ 121$; $B = - 1\ 056,290\ 8\ K$;
 $C = - 7,232\ 704 \times 10^{-2}\ K^{-1}$; $D = 3,278\ 830 \times 10^{-4}\ K^{-2}$
 $F = - 4,574\ 942 \times 10^{-7}\ K^{-3}$

$$3. \ln p = A + \frac{B}{T_{68}} + \frac{C}{T_{68}^2} + DT_{68} + ET_{68}^2 + FT_{68}^3$$

Ancsin (53)(1974)

où $A = 45,461\ 944$; $B = - 1\ 724,525\ 0\ K$;
 $C = 9\ 846,904\ 8\ K^2$; $D = - 3,131\ 262 \times 10^{-1}\ K^{-1}$;
 $E = 1,927\ 512 \times 10^{-3}\ K^{-2}$; $F = - 4,720\ 606 \times 10^{-6}\ K^{-3}$
 p est en Pa

J. Phases solide et vapeur de l'anhydride carbonique

$$T_{68} = \left[194,674 + 12,264 \left(\frac{p}{p_0} - 1 \right) - 9,15 \left(\frac{p}{p_0} - 1 \right)^2 \right] K$$

(figure dans l'EIPT-68)

K. Phases liquide et vapeur de l'eau

$$t_{68} = \left[100,00 + 28,021\ 6 \left(\frac{p}{p_0} - 1 \right) - 11,642 \left(\frac{p}{p_0} - 1 \right)^2 + 7,1 \left(\frac{p}{p_0} - 1 \right)^3 \right] . ^\circ C$$

(figure dans l'EIPT-68)

L. Phases liquide et vapeur du mercure

$$t_{68} = \left[356,66 + 55,552 \left(\frac{P}{P_0} - 1 \right) - 23,03 \left(\frac{P}{P_0} - 1 \right)^2 + 14,0 \left(\frac{P}{P_0} - 1 \right)^3 \right] ^\circ\text{C} \quad (\text{figure dans l'EIPT-68})$$

M. Phases liquide et vapeur du soufre

$$t_{68} = \left[444,674 + 69,010 \left(\frac{P}{P_0} - 1 \right) - 27,48 \left(\frac{P}{P_0} - 1 \right)^2 + 19,14 \left(\frac{P}{P_0} - 1 \right)^3 \right] ^\circ\text{C} \quad (\text{figure dans l'EIPT-68})$$

Notes

1. Ces valeurs sont données pour le néon ayant une composition isotopique proche de celle spécifiée dans la Section III.6 de l'E.I.P.T.-68. Les températures du point triple et les équations de pression de vapeur pour ^{20}Ne et ^{22}Ne sont données par Furukawa (48).
2. La valeur de Grilly mesurée dans l'échelle NBS-55 était 24,544 K ($p = 324,8$ mmHg). Convertie dans l'E.I.P.T.-68, elle devient 24,552 K. Comme le point d'ébullition du néon mesuré par Grilly est de 3 mK inférieure à la valeur définie dans l'E.I.P.T.-68, son équation de pression de vapeur était déplacée de 3 mK et par conséquent la température du point triple corrigée devient 24,555 K.
3. La réalisation actuelle (1973) de l'E.I.P.T.-68 (T_{68}^{NRC}) est fondée sur le point d'ébullition et le point triple de l'oxygène de Ancsin (50) et les points de l'hydrogène et du néon du N.B.S. Comme il existe une différence équivalente à environ 3 mK entre les réalisations du point d'ébullition de l'oxygène au N.R.C. et au N.B.S., les températures mesurées au voisinage de 90 K dans (T_{68}^{NRC}) sont numériquement différentes de celles mesurées dans (T_{68}^{NBS}) d'environ la même quantité. Dans ce domaine, (T_{68}^{NBS}) est décrite par Furukawa *et al.* (56). Des différences du même type existeront par rapport aux réalisations de l'E.I.P.T.-68 par d'autres laboratoires.
4. Il a été rendu compte de deux autres valeurs pour le point triple de l'argon (51, 57). Bien que leur précision soit moyennement grande, la première n'est pas mentionnée ici à cause de l'incertitude considérable qu'il y a dans sa conversion dans l'E.I.P.T.-68, la seconde ne l'est pas non plus parce que l'argon n'était pas suffisamment pur (59).
5. La valeur de Flubacker *et al.* (58) a été convertie dans l'E.I.P.T.-68 à partir de l'échelle NBS-39.
6. La valeur de Michels et Prins (57) a été convertie dans l'E.I.P.T.-68 à partir d'une relation établie par Bedford et Prins (62).
7. La valeur mentionnée dans l'E.I.P.T.-68 n'est pas correcte. La valeur mentionnée dans le premier rapport du GT 2 (janvier 1973) est fautive de 2 mK parce qu'une correction de 1 mK à la valeur mesurée de Dengler (9) (pour tenir compte de la pression hydrostatique dans son montage) a été affectée d'un signe incorrect. Le premier rapport du GT 2 a également attribué à tort la même valeur au point triple et au point de congélation du mercure.
8. La valeur de Van Dusen *et al.* (22), quand elle est convenablement ramenée à l'E.I.P.T.-68, est 1495 °C et non 1494 °C comme elle figure au Tableau VI de l'E.I.P.T.-68.
9. L'équation (19) de l'E.I.P.T.-68 provient d'un développement en série de Taylor de cette équation à 27,102 K.
10. L'équation (20) de l'E.I.P.T.-68 provient d'un développement en série de Taylor de cette équation à 90,188 K.

Abréviations

N : nouvelle détermination ; P.T. : point triple ; P.E. : point d'ébullition ; P.S. : point de sublimation ; P.C. : point de congélation ; P.F. : point de fusion.

BIBLIOGRAPHIE*

1. FURUKAWA (G.T.), SABA (W.G.), SWEGER (D.M.) et PLUMB (H.H.), *Metrologia*, 6, 1970, p. 35.
2. COMPTON (J.P.), *Metrologia*, 6, 1970, p. 103.
3. TIGGELMAN (J.L.), VAN RIJN (C.) et DURIEUX (M.), *Temperature*, 4, 1972, p. 137.
4. MOUSSA (M.R.M.), *Ph.D. Thesis*, Leiden, 1966.
5. LOVEJOY (D.R.), *Nature*, 197, 1963, p. 353.
6. TIGGELMAN (J.L.) et DURIEUX (M.), *Temperature*, 4, 1972, p. 149.
7. ANCSIN (J.) et PHILLIPS (M.J.), *Metrologia*, 5, 1969, p. 77.
8. FURUKAWA (G.), BIGGE (W.R.) et RIDDLE (J.L.), *Temperature*, 4, 1972, p. 231.
9. DENGLER (C.O.), *ISA Proceedings (17th Conference)*, 1962.
10. McLAREN (E.H.), *Can. J. Phys.*, 36, 1958, p. 1131.
11. McLAREN (E.H.) et MURDOCK (E.G.), *Can. J. Phys.*, 41, 1963, p. 95
12. McLAREN (E.H.), *Can. J. Phys.*, 37, 1959, p. 422.
13. McLAREN (E.H.) et MURDOCK (E.G.), *Can. J. Phys.*, 38, 1960, p. 577.
14. BLAISDELL (B.E.) et KAYE (J.), *Temperature*, 1, 1941, p. 127.
15. McALLAN (J.V.), *Temperature*, 4, 1972, p. 265.
16. McLAREN (E.H.) et MURDOCK (E.G.), *Can. J. Phys.* 46, 1968, p. 401.
17. BONGIOVANNI (G.), CROVINI (L.) et MARCARINO (P.), *Comité Consultatif de Thermométrie*, 9^e session, 1971, p. T 66.
18. WENSEL (H.T.), *Procès-Verbaux C.I.P.M.*, 19, 1939, p. T 80.
19. McALLAN (J.V.) et AMMAR (M.M.), *Temperature*, 4, 1972, p. 275.
20. MOSER (H.), OTTO (J.) et THOMAS (W.), *Z. Physik*, 206, 1967, p. 223.
21. RIGHINI (F.), ROSSO (A.) et RUFFINO (G.), *High Temperatures - High Pressures*, 4, 1972, p. 471.
22. VAN DUSEN (M.S.) et DAHL (A.I.), *J. Res. N.B.S.*, 39, 1947, p. 291.
23. WENSEL (H.T.) et ROESER (W.F.), *J. Res. N.B.S.*, 5, 1930, p. 1309.
24. SCHOFIELD (F.H.), *Proc. Roy. Soc. London*, A125, 1929, p. 517.
25. SCHOFIELD (F.H.), *Ibid.*, A155, 1936, p. 301.
26. FAIRCHILD (C.O.), HOOVER (W.H.) et PETERS (M.F.), *J. Res. N.B.S.*, 2, 1929, p. 931.
27. SCHOFIELD (F.H.), *Proc. Roy. Soc. London*, A146, 1934, p. 792.
28. HOFFMANN (F.) et TINGWALDT (C.), *Z. Physik*, 34, 1934, p. 434.
29. ROESER (W.F.), CALDWELL (F.R.) et WENSEL (H.T.), *J. Res. N.B.S.*, 6, 1931, p. 1119.
30. QUINN (T.J.) et CHANDLER (T.R.D.), *Temperature*, 4, 1972, p. 295.
31. CEZAIRLIYAN (A.), *J. Res. N.B.S.*, 74 C, 1970, p. 87.
32. ROESER (F.) et WENSEL (H.T.), *J. Res. N.B.S.*, 12, 1934, p. 519.
33. SCHNEIDER (S.J.), *IUPAC Report PAC 21/1-N*, Butterworth, London, 1970, basé sur l'article paru dans *J. Res. N.B.S.*, 71 A, 1967, p. 317.

* Les différents volumes de "Temperature, Its Measurement and Control in Science and Industry" sont appelés simplement *Temperature*, 1, etc.

34. GITLESEN (G.) et MOTZFELDT (K.), *New Scientist*, July 29, 1965.
 35. HENNING (F.) et WENSEL (H.T.), *J. Res. N.B.S.*, 10, 1933, p. 809.
 36. CEZAIIRLIYAN (A.), MORSE (M.S.) et BECKETT (C.W.), *Rev. Int. Hautes Temp. et Réfract.*, 7, 1970, p. 382
 37. BATTÀ (E.) et FRYXELL (R.E.), *J. Nuclear Mat.*, 35, 1970, p. 195.
 38. KENISARIN (M.M.), BEREZIN (B. Ya.) et CHEKHOVSKOI (V. Ya.), *High Temperatures - High Pressures*, 4, 1972, p. 707.
 39. CEZAIIRLIYAN (A.), *High Temperature Science*, 4, 1972, p. 248.
 40. CEZAIIRLIYAN (A.), *High Temperatures - High Pressures*, 4, 1972, p. 453.
 41. SCHOFIELD (T.H.), *J. Inst. Metals*, 85, 1956-57, p. 372.
 42. DURIEUX (M.), in "Progress in Low Temperature Physics", Chap. 10, p. 416, C.J. Gorter, North Holland, Amsterdam, 1970.
 43. GRILLY (E.R.), *Cryogenics*, 2, 1962, p. 226.
 44. HOGE (H.J.), *J. Res. N.B.S.*, 44, 1950, p. 321.
 45. ORLOVA (M.P.), *Temperature*, 3, 1962, p. 179.
 46. MUIJLWIJK (R.), *Ph. D. Thesis*, Leiden, 1968.
 47. TIGGELMAN (J.L.), *Ibid.*, Leiden, 1973.
 48. FURUKAWA (G.T.), *Metrologia*, 8, 1972, p. 11.
 49. ANCSIN (J.), *Can. J. Phys.*, 52, 1974, p. 1521.
 50. ANCSIN (J.), *Metrologia*, 9, 1973, p. 147.
 51. FENDER (B.E.F.) et HALSEY Jr (G.D.), *J. Chem. Phys.* 42, 1965, p. 127.
 52. BEAUMONT (R.H.), CHIHARA (H.) et MORRISON (J.A.), *Proc. Phys. Soc. London*, 78, 1961, p. 1462.
 53. ANCSIN (J.), *Can. J. Phys.*, 52, 1974, p. 2305.
 54. MEYERS (C.H.) et VAN DUSEN (M.S.), *J. Res. N.B.S.*, 10, 1933, p. 381.
 55. AMBROSE (D.), *Brit. J. Appl. Phys.*, 8, 1957, p. 32.
 56. FURUKAWA (G.T.), RIDDLE (J.L.) et BIGGE (W.R.), *J. Res. N.B.S.*, 77 A, 1973, p. 309.
 57. MICHELS (A.) et PRINS (C.), *Physica*, 28, 1962, p. 101.
 58. FLUBACKER (P.), LEADBETTER (A.J.) et MORRISON (J.A.), *Proc. Phys. Soc. London*, 78, 1961, p. 1449.
 59. HARDY (W.H.), CRAWFORD (R.K.) et DANIELS (W.B.), *J. Chem. Phys.*, 54, 1971, p. 1005.
 60. CHEN (H.H.), AZIZ (R.A.) et LIM (C.C.), *Can. J. Phys.*, 49, 1971, p. 1569.
 61. CHIEN (J.W.S.), *M. Sc. Thesis*, University of Waterloo, Canada, 1967.
 62. BEDFORD (R.E.) et PRINS (C.), *Physica*, sous presse, 1974.
 63. RILEY (B.), *J. Sc. Instr.*, 41, 1964, p. 504.
 64. WORTHING (A.G.), *J. Franklin Inst.*, 199, 1925, p. 549.
 65. CHIOTTI (P.), *USAEC Tech. Rep.*, AECD-3072, 1950.
 66. CROVINI (L.) et MARCARINO (P.), ce volume, Annexe T 7.
 67. KEMP (W.R.G.) et PICKUP (C.P.), *Temperature*, 4, 1972, p. 217.
 68. JONES (T.P.) et TAPPING (J.), *Metrologia*, sous presse, 1975.
-

ANNEXE T 4

Résumé des deux premiers Rapports * du Groupe de travail 3

(Températures supérieures à 100 K)

Dans ce résumé des deux premiers rapports du Groupe de travail 3, nous discutons d'abord des corrections qui doivent être apportées aux résultats de la pyrométrie optique depuis que l'on a découvert que dans tout ce type de travail il aurait fallu tenir compte de l'indice de réfraction de l'air. Nous examinons ensuite les travaux actuellement en cours dans les laboratoires nationaux pour l'obtention de nouvelles valeurs de la température thermodynamique au-dessus de 100 K. Suit enfin un résumé des preuves actuellement connues de l'écart de l'E.I.P.T.-68 par rapport aux températures thermodynamiques dans le domaine compris entre 0 °C et le point de l'or.

1. CORRECTIONS AUX RÉSULTATS DE LA PYROMÉTRIE OPTIQUE

En 1972, W.R. Blevin [1] a fait paraître dans *Metrologia* une note attirant l'attention sur le fait que la loi du rayonnement de Planck est une fonction de la fréquence, grandeur qui est indépendante de l'indice de réfraction du milieu que traverse le rayonnement. Comme la valeur convenue de la seconde constante de

* Ces Rapports ont été communiqués aux membres du C.C.T. en janvier 1973 et janvier 1974, et discutés à la 10^e session du C.C.T. en mai 1974.

rayonnante, c_2 , ($c_2 = \frac{h \cdot c}{k} = 0,014\ 388\ \text{m.K}$) se rapporte à des longueurs d'onde dans le vide il est nécessaire de tenir compte de l'indice de réfraction de l'air, qui varie de 1,000 28 aux longueurs d'onde visibles à 1,000 27 aux longueurs d'onde de $4\ \mu\text{m}$ et au-delà. Les résultats de la plus grande partie de la pyrométrie optique ont été calculés en utilisant les longueurs d'onde effectives dans l'air, il convient donc de les revoir. Les résultats des travaux qui entrent dans cette catégorie et qui sont du ressort de ce Groupe de travail, comprennent la récente détermination du point de congélation du platine [2], les mesures des écarts entre l'E.I.P.T.-68 et les températures thermodynamiques entre $725\ ^\circ\text{C}$ et le point de l'or [3] et les mesures effectuées dans l'intervalle entre le point du zinc ou le point de l'antimoine et le point de l'or [4,5,6].

A la valeur de la température du point de congélation du platine, récemment publiée comme étant égale à $1\ 767,6\ ^\circ\text{C} \pm 0,3\ ^\circ\text{C}$, il faut appliquer une correction de $0,3\ ^\circ\text{C}$, de telle sorte que la nouvelle valeur de la température du point de congélation du platine devient

$$1\ 767,9\ ^\circ\text{C} \pm 0,3\ ^\circ\text{C}$$

en tenant compte d'un indice de réfraction de l'air de 1,000 28 à une longueur d'onde de $0,65\ \mu\text{m}$.

La différence entre cette nouvelle valeur révisée et celle qui était utilisée auparavant, fondée sur les travaux faits au N.B.S., au N.P.L. et à la P.T.R. aux alentours de 1932, demeure inchangée ($4,4\ ^\circ\text{C}$) car il n'y a aucune preuve qu'on ait tenu compte de l'indice de réfraction de l'air dans aucun de ces anciens travaux. De la même manière, les résultats de la récente comparaison des échelles des températures élevées, effectuée par quatre laboratoires nationaux [7], demeurent inchangés puisque aucun des quatre laboratoires n'a fait de correction d'indice de réfraction.

Dans la note récemment publiée par Quinn et Chandler [3] sur la différence entre la température thermodynamique et l'E.I.P.T.-68 entre $725\ ^\circ\text{C}$ et le point de l'or, l'effet de la correction d'indice de réfraction doit diminuer les écarts indiqués.

Les résultats relatifs aux thermocouples indiqués à la fig. 1 de la référence [3] doivent être modifiés de telle sorte que $t - t_{68}$ soit diminuée de $0,13\ \text{K}$ à $725\ ^\circ\text{C}$, $0,09\ \text{K}$ à $800\ ^\circ\text{C}$, $0,05\ \text{K}$ à $900\ ^\circ\text{C}$ et $0,02\ \text{K}$ à $1000\ ^\circ\text{C}$. L'effet d'une telle modification n'amène à changer aucune des conclusions

tirées de ces résultats. L'effet des corrections de l'indice de réfraction sur les résultats de Hall [4] est un peu plus significatif étant donné que l'intervalle de température considéré est beaucoup plus grand. Hall a fondé ses mesures des points fixes sur la valeur présumée du point du zinc de 419,58 °C, valeur qui fut plus tard adoptée pour l'E.I.P.T.-68. Le tableau I rassemble les résultats originaux de Hall ainsi que les valeurs révisées, calculées en utilisant un indice de réfraction de l'air de 1,000 27, valable pour les longueurs d'onde de 2 µm à 4 µm utilisées par Hall.

Tableau I

Point fixe	Valeur originale de Hall °C	Valeur corrigée °C
Zinc	419,58	419,58
Antimoine	630,54 ± 0,2	630,62 ± 0,2
Eutectique Cu/Ag	779,1 ± 0,4	779,2 ± 0,4
Argent	961,2 ± 0,5	961,5 ± 0,5
Or	1 063,7 ± 0,6	1 064,0 ± 0,6

Parmi les travaux anciens qui sembleraient être affectés par une correction de ce type, il y a ceux de Heusinkveld [5], qui publia en 1964 les résultats des mesures des intervalles antimoine-argent-or en utilisant un pyromètre fonctionnant à une longueur d'onde d'environ 1 µm.

Pour ses travaux, Heusinkveld avait choisi 630,67 °C comme température du point de congélation de l'antimoine et il obtint pour les points de congélation de l'argent et de l'or les valeurs respectives de 962,25 °C et 1 064,4 °C. Si l'on prend pour le point de congélation de l'antimoine dans l'E.I.P.T.-68 la valeur 630,74 °C, les températures au point de congélation de l'argent et de l'or deviennent alors 962,38 °C et 1 064,55 °C. Les corrections de l'indice de réfraction ajoutent en plus 0,13 °C et 0,17 °C respectivement aux points de l'argent et de l'or, ce qui conduit aux valeurs finales de 962,51 °C pour le point de congélation de l'argent et 1 064,72 °C pour celui de l'or. La disparité, qui s'élève à 0,4 °C, entre les résultats d'Heusinkveld au point de congélation de l'or, obtenus à partir de mesures à 0,96 µm et ceux obtenus à 1,03 µm, n'est pas modifiée par la correction d'indice de réfraction puisqu'elle ne change pas d'une façon significative entre ces deux longueurs d'onde.

Les travaux de Bonhure au B.I.P.M. dont les résultats sont donnés dans notre premier rapport, doivent également être corrigés de la même façon, c'est-à-dire de $0,13\text{ }^{\circ}\text{C}$ au point de congélation de l'argent et de $0,17\text{ }^{\circ}\text{C}$ à celui de l'or. Ses résultats deviennent donc : $962,01\text{ }^{\circ}\text{C}$ pour le point de congélation de l'argent et $1\ 064,38\text{ }^{\circ}\text{C}$ pour le point de congélation de l'or [6]. La divergence de $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ qu'il a trouvée entre l'E.I.P.T.-68 et ses mesures de rayonnement à $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ est par suite également augmentée.

2. TRAVAUX EN COURS DANS LES LABORATOIRES NATIONAUX SUR LES MESURES DE TEMPÉRATURE THERMODYNAMIQUE

a) *thermométrie à gaz*

Autant que nous le sachions, trois laboratoires travaillent sur la thermométrie à gaz au-dessus de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$; ce sont le N.B.S., le N.R.C. et la P.T.B.

Au N.B.S., les travaux sont conduits avec un fort accent mis à la fois sur l'amélioration des instruments et la recherche des effets systématiques éventuels de sorption. Pour les résultats les plus récents, voir les références [8] et [9] dans lesquelles sont présentées les valeurs thermodynamiques obtenues jusqu'à $140\text{ }^{\circ}\text{C}$. La différence $t - t_{68}$ est égale à $-0,030 \pm 0,003\ 5\ \text{K}$ au point d'ébullition de l'eau et est presque linéaire en fonction de la température internationale, dans le domaine exploré. On estime que les changements qui pourraient être apportés à la valeur thermodynamique du point d'ébullition de l'eau, provenant de nouvelles mesures des coefficients de dilatation du matériau du réservoir peuvent s'élever à $1\ \text{mK}$, et que les modifications provenant d'une nouvelle réduction des effets de sorption, ne dépasseront pas $2\ \text{mK}$. On espère avoir sous peu des résultats jusqu'au point du zinc et même jusqu'au point de l'or.

A la P.T.B., la thermométrie à gaz est également centrée sur le point d'ébullition de l'eau et on envisage d'utiliser un thermomètre à gaz à volume constant avec un réservoir en silice ($800\ \text{cm}^3$ de volume), avec lequel on utilisera une balance de pression pour la mesure de la pression. On pense que l'on aura les premiers résultats au cours de 1974.

Au N.R.C., un thermomètre à gaz à volume constant est en cours de construction. Il comprendra un réservoir en acier inoxydable d'une capacité de $1400\ \text{cm}^3$, conçu pour être recuit

à 650 °C. La mesure de la pression sera également faite au moyen d'une balance de pression. Toute l'installation est conçue pour donner une incertitude d'environ 5 mK dans la mesure de la température thermodynamique jusqu'au point d'ébullition de l'eau, et pour fonctionner à des températures allant jusqu'au point du zinc.

b) thermométrie à bruit

Un seul laboratoire, l'I.M.G.C., nous a informé que des travaux étaient en cours ou envisagés en thermométrie à bruit dans ce domaine de température. Les résultats obtenus jusqu'en 1971 ont été décrits dans la référence [10]. Depuis lors, de nouveaux travaux utilisant les températures des points de glace et de l'étain comme températures de référence, ont montré que la valeur du point de l'antimoine dans l'E.I.P.T.-68 est cohérente avec les valeurs attribuées aux températures de ces points de référence dans les limites de l'incertitude estimée de la mesure, c'est-à-dire un écart-type sur la moyenne égale à 0,2 K. Des recherches sont faites pour diminuer l'incertitude de mesure et ensuite pour étendre les mesures jusqu'au point de l'or.

c) thermométrie par rayonnement

Il y a deux façons d'envisager la thermométrie par rayonnement, la méthode de rayonnement total et la méthode de rayonnement spectral. Dans les deux cas, les rayonnements (soit total, soit spectral) émis par deux corps noirs, dont l'un est à une température de référence, sont comparés et leur rapport permet de calculer celui qui n'est pas connu. Si l'on utilise le rayonnement total, on peut alors prendre 0 °C (ou le point triple de l'eau) comme température de référence ; une détermination fondamentale de la température qui n'est pas connue, est alors possible. Si par contre on utilise le rayonnement spectral, l'énergie très réduite dont on dispose, oblige à prendre toujours la température de référence au-dessus de 0 °C et par conséquent les résultats ne peuvent que donner des renseignements sur les températures relatives des deux corps noirs, fondées sur la connaissance préalable de la température de référence. Une autre incertitude dans les mesures de rayonnement spectral provient de l'incertitude dans la valeur de la seconde constante du rayonnement, $\frac{hc}{k}$.

Deux laboratoires sont en train de faire des mesures de rayonnement total, le N.B.S. et le N.P.L. Les travaux du

N.B.S. ont été décrits au 5^e Symposium sur la Température en 1971 [11], où l'on a montré qu'en utilisant 0 °C comme température de référence, la sensibilité à 100 °C approchait le millikelvin. Une étude soignée des sources éventuelles d'erreur dans l'appareillage est actuellement en cours. On envisage de faire fonctionner l'appareil à des températures allant jusqu'à celle du point de l'or. Une expérience semblable dans son principe, a débuté au N.P.L. ; dans cette expérience on doit, en plus, obtenir une valeur pour la constante de Stefan à partir d'une mesure absolue du flux de rayonnement émis par le corps noir de référence à 0 °C. On se propose alors de mesurer les températures thermodynamiques, au moins jusqu'au point du zinc, par référence au point de glace, avec une précision de quelques millikelvins.

Les méthodes de rayonnement spectral sont utilisées par un certain nombre de laboratoires pour la détermination des points fixes au-dessus du point du zinc. Au B.I.P.M. les travaux se poursuivent sur la mesure des intervalles antimoine/argent/or au moyen d'un pyromètre monochromatique photoélectrique fonctionnant à une série de longueurs d'onde voisines de 950 nm. Les résultats les plus récents ont été donnés à la session de 1974 du C.C.T. De plus, les mesures de la différence entre les températures obtenues par mesure de rayonnements et l'E.I.P.T.-68 entre les points fixes font apparaître une différence de presque 0,5 °C au voisinage de 800 °C. Cette différence est de même signe et presque de même grandeur que celle dont le N.P.L. a récemment rendu compte (voir ci-après).

Au N.S.L., des travaux sont en cours pour étendre l'échelle de rayonnement jusqu'au point de l'antimoine par pyrométrie photoélectrique. On attend des résultats sur les intervalles antimoine/argent/or dans le courant de 1974. A la P.T.B., l'échelle de rayonnement descend jusqu'au point de l'argent par pyrométrie photoélectrique. Au N.P.L., on se propose d'étendre les mesures par rayonnement spectral jusqu'à rejoindre les mesures par rayonnement total, soit au point du zinc, soit à celui de l'antimoine. On a obtenu des résultats préliminaires en utilisant le pyromètre photoélectrique fonctionnant à une longueur d'onde de 662 nm en descendant jusqu'à 725 °C [3]. Des travaux sont actuellement en cours pour appliquer des méthodes de comptage de photons en utilisant un photomultiplicateur fonctionnant à des longueurs d'onde allant jusqu'à 950 nm pour donner une sensibilité convenable aux basses températures. Les résultats obtenus jusqu'ici entre le point de congélation

de l'or et 725 °C comprennent des comparaisons de l'échelle de rayonnement (fondée sur le point de congélation de l'or de l'E.I.P.T.-68) à l'E.I.P.T.-68 réalisée au moyen d'un thermocouple, ainsi qu'à des températures obtenues à l'aide d'un thermomètre à résistance de platine utilisant une fonction quadratique d'interpolation fondée sur les points de glace, du zinc et de l'or et tenant compte des effets des défauts du réseau sur la résistivité. Les résultats montrent un écart par rapport à l'E.I.P.T.-68, tant de l'échelle de rayonnement que de l'échelle de résistance, s'élevant à près de 0,5 K à 750 °C. Egalement, l'intervalle argent/or apparaît trop grand de 0,15 K environ. Il est intéressant de noter ici que, selon les résultats de Blevin et Brown [15] qui font suite à leurs travaux sur la constante de Stefan, la température du point de congélation de l'or dans l'E.I.P.T.-68 peut être interprétée comme étant trop élevée de 0,3 K.

3. MISE EN ÉVIDENCE DE L'ÉCART DE L'E.I.P.T.-68 PAR RAPPORT AUX TEMPÉRATURES THERMODYNAMIQUES

L'existence d'un écart entre les températures dans l'E.I.P.T.-68 et les températures thermodynamiques, dans le domaine compris entre le point de glace et le point de congélation de l'or, est prouvée par un certain nombre de sources ; elle peut être résumée brièvement comme suit :

1. La thermométrie à gaz récente au N.B.S. a montré un écart entre l'E.I.P.T.-68 et la température thermodynamique, qui augmente de façon linéaire jusqu'à 140 °C et qui atteint 0,03 °C au point d'ébullition de l'eau [9]*. On suppose que les effets d'adsorption ont faussé les résultats anciens en thermométrie à gaz dans ce domaine [8].

2. A la session de 1971 du C.C.T., la P.T.B. a fait part de mesures non encore publiées du point d'ébullition de l'eau faites en 1956 qui donnaient par rapport à 100 °C des différences soit de 0,018 K, soit de 0,028 K ($\pm 0,01$ K) selon la façon dont on calculait la température de référence [13].

3. Entre 725 °C et le point de congélation de l'or, l'écart entre l'E.I.P.T.-68 et l'échelle de rayonnement fondée sur la valeur attribuée au point de congélation de l'or,

* Un nouveau calcul fait par L. Haar du N.B.S., à partir d'un certain nombre d'anciennes données calorimétriques, donne une température du point d'ébullition inférieure à 100 °C d'environ 0,035 K [12] bien que, compte tenu de l'exactitude indiquée dans les résultats expérimentaux originaux, l'accord avec ce qui est donné en [9] soit peut-être fortuit.

présente un maximum de 0,5 K [3,6] à 800 °C.

4. A 630,74 °C, il y a une discontinuité de la pente de la courbe force électromotrice/température pour un thermocouple étalonné dans l'E.I.P.T.-68, au-dessus de 630,74 °C par la méthode des points fixes et au-dessous de 630,74 °C par rapport à un thermomètre à résistance de platine [14].

5. Les mesures par rayonnement total fondées sur une valeur calculée de la constante de Stefan, conduisent à une température du point de congélation de l'or inférieure de 0,3 K ($\pm 0,3$ K) à la valeur attribuée dans l'E.I.P.T.-68 [15].

6. Les résultats obtenus avec le thermomètre à bruit confirment la valeur du point de congélation de l'antimoine dans l'E.I.P.T.-68 à $\pm 0,2$ K près. Cette valeur est fondée sur celle attribuée au point de congélation de l'étain [10].

7. Les résultats obtenus au B.I.P.M. pour l'intervalle entre le point de l'antimoine et le point de l'or conduisent, en prenant pour référence la température du point de congélation de l'antimoine, à une température du point de congélation de l'or en accord à 0,1 K près avec la valeur qui lui est attribuée dans l'E.I.P.T.-68 [6]. On a trouvé entre les points fixes les mêmes différences que celles rapportées en 3.

Parmi ces diverses preuves expérimentales, la plus significative est celle qui provient des résultats récents obtenus au N.B.S. avec le thermomètre à gaz. Il est évidemment de la plus haute importance que d'autres laboratoires nationaux effectuent des travaux indépendants pour confirmer ces valeurs puisque c'est la seule preuve directe que la température attribuée à un point fixe est fautive de façon significative. Il convient de remarquer que l'E.I.P.T.-68 est définie entre 0 °C et 630,74 °C par une équation quadratique en utilisant indifféremment le point d'ébullition de l'eau ou le point de congélation de l'étain comme point d'étalonnage ; un changement de la température attribuée au point d'ébullition de l'eau, impliquerait aussi un changement du point de congélation de l'étain. Les autres preuves expérimentales mentionnées ci-dessus ne font pas la distinction entre les erreurs dans les températures des points fixes de définition et les erreurs dans la forme des fonctions d'interpolation. Il n'est pas évident pour cette raison qu'une simple révision des incertitudes liées aux températures des points fixes de définition dans le Tableau VII (du texte de l'E.I.P.T.-68), fondées sur une sorte d'extrapolation de la nouvelle incertitude au point d'ébullition de l'eau, donnerait une image convenable de la situation actuelle.

Cette question a été longuement discutée par les trois membres du Groupe de travail sans que l'on parvienne à un accord unanime. Il fut en fin de compte décidé de présenter au C.C.T. deux propositions possibles, pour discussion.

1. La première proposition, sur laquelle Quinn et Thomas sont d'accord, consiste à laisser tel qu'il est le Tableau VII dans la nouvelle édition de l'E.I.P.T.-68 et à lui annexer une note explicative. Nous avons suggéré la note suivante :

Les incertitudes mentionnées ci-dessus ont été évaluées sur la base des meilleures données disponibles à l'époque où l'E.I.P.T.-68 a été établie. Depuis lors de nouveaux travaux ont montré que l'E.I.P.T.-68 s'écarte probablement de la température thermodynamique, tant aux points fixes de définition qu'entre eux, de quantités supérieures aux limites indiquées. Les incertitudes mentionnées ci-dessus doivent par conséquent être traitées avec prudence jusqu'à ce que les résultats de nouveaux travaux expérimentaux soient disponibles. Des estimations révisées de ces incertitudes seront publiées de temps en temps par le Comité International des Poids et Mesures.

Nos idées actuelles sur les incertitudes avec lesquelles on connaît la température thermodynamique aux points fixes et entre eux, sont essentiellement celles qui proviennent directement des points 1 à 7 ci-dessus. Toute déclaration plus précise doit attendre de nouveaux résultats expérimentaux.

2. La deuxième proposition, celle de Guildner, est que le Tableau VII devrait être complètement éliminé du texte de l'E.I.P.T.-68 et que le C.C.T. devrait publier, dans les comptes rendus de sa session de 1974, le tableau suivant :

Tableau II

Estimation des valeurs des températures thermodynamiques des points fixes de définition et leurs incertitudes avec un taux de confiance de 99 %

	Valeur attribuée dans l'E.I.P.T.-68	Valeur estimée de la température thermodynamique	Incertitude estimée de la valeur thermodynamique (K)
Eau (P.T.)	273,16 K	273,16 K	—
Eau (P.E.)	100 °C	99,97 °C	0,01
Etain (P.C.)	231,968 1	231,93	0,04
Zinc (P.C.)	419,58	419,52	0,06
Argent (P.C.)	961,93	961,7	0,5
Or (P.C.)	1 064,43	1 064,1	0,5

P.T. : point triple ; P.E. : point d'ébullition ; P.C. : point de congélation

A la suite de nouvelles discussions à la 10^e session du C.C.T. à laquelle assistaient Quinn et Thomas, un compromis fut atteint selon lequel le Tableau VII serait supprimé du texte et le paragraphe donné ci-dessus (légèrement modifié) inséré à un endroit approprié.

T.J. Quinn (N.P.L.), Président

L.A. Guildner (N.B.S.)

W. Thomas (P.T.B.)

BIBLIOGRAPHIE

1. BLEVIN (W.R.), *Metrologia*, 8, 1972, p. 146.
2. QUINN (T.J.) et CHANDLER (T.R.), *Metrologia*, 7, 1971, p. 132.
3. QUINN (T.J.) et CHANDLER (T.R.), *Metrologia*, 9, 1973, p. 44.
4. HALL (J.A.), *Metrologia*, 1, 1965, p. 140.
5. HEUSINKVELD, Thesis : Optical Determination of the Freezing Temperatures of Silver and Gold, University of Utrecht, 1964.
6. BONHOURS (J.), *Comité Consultatif de Thermométrie*, 9^e session, 1971, p. T 84. Ce volume, Annexe T 12.
7. LEE (R.D.), *et al.*, Temperature, Its Measurement and Control in Science and Industry, Vol. 4, I, p. 377, Instrument Society of America, Pittsburgh, 1972.
8. GUILDNER (L.A.), *et al.*, *Ibid.*, Vol. 4, I, p. 33.
9. GUILDNER (L.A.) et EDSINGER (R.E.), *J. Res. N.B.S.*, 77-A, 1973, p.383.
10. ACTIS (A.), *et al.*, Temperature, Its Measurement and Control in Science and Industry, Vol. 4, I, p. 355.
11. GINNINGS (D.C.) et REILLY (M.L.), *Ibid.*, Vol. 4, I, p. 339.
12. HAAR (L.), *Science*, 176, 1972, p. 1293.
13. THOMAS (W.), *Comité Consultatif de Thermométrie*, 9^e session, 1971, p. T 63.
14. BEDFORD (R.E.), *et al.*, Temperature, Its Measurement and Control in Science and Industry, Vol. 4, III, p. 1585.
15. BLEVIN (W.R.) et BROWN (W.J.), *Metrologia*, 7, 1971, p. 15.

ANNEXE T 5

Résumé des Rapports du Groupe de travail 4

(Températures inférieures à 100 K)

1. INTRODUCTION

Depuis sa création en 1971, le Groupe de travail 4 (GT 4) a présenté aux membres du C.C.T. les cinq documents suivants :

1. Lettre du 15 décembre 1972.
2. Rapport pour 1973, du GT 4, partie 1, Mai 1973.
(Ce rapport comporte un résumé des travaux dans les laboratoires nationaux sur la thermométrie au-dessous de 100 K).
3. Rapport pour 1973, du GT 4, partie 2, Septembre 1973.
4. Rapport pour 1974, du GT 4, Mars 1974.
5. Rapport supplémentaire du N.S.L. au GT 4, 26 avril 1974. (document CCT/74-33)

On résumera dans les paragraphes suivants les principaux points de ces documents. Un court résumé des travaux du GT 4 et de ses projets et propositions pour l'avenir est donné dans la Rapport de la 10^e session du C.C.T., section 1c.

2. COMPARAISON INTERNATIONALE DES THERMOMÈTRES À RÉSISTANCE DE PLATINE (1 K - 35 K)

Lors de la réunion du C.C.T. en 1971, fut avancée l'idée de nouvelles comparaisons internationales des échelles de température dans le domaine de 1 K à 35 K, au moyen de thermomè-

tres à germanium étalonnés dans ces échelles (C.C.T. 9^e session, 1971, p. T 16). Ces comparaisons seraient la suite de comparaisons antérieures des échelles de température du N.B.S. (échelle acoustique), de l'I.M.P.R. (échelle du thermomètre à gaz), de l'I.S.U. (échelle magnétique), du N.S.L. (échelle du thermomètre à gaz) et du K.O.L. (échelle magnétique). Le GT 4 a été chargé de l'organisation de ces nouvelles comparaisons. Le N.S.L. s'est proposé pour effectuer les mesures.

A la suite d'un échange de correspondance au sein du GT 4 et avec d'autres membres du C.C.T. au cours de 1972 et au début de 1973, l'idée s'est fait jour de comparer non seulement les échelles de température des laboratoires mais également les réalisations de l'échelle ⁴He 1958 et de la partie inférieure de l'E.I.P.T.-68. De plus, on a jugé utile que les laboratoires qui étaient en train d'établir une échelle des basses températures pourraient envoyer des thermomètres non étalonnés ; ces laboratoires auront ainsi un accès immédiat à toutes les échelles en usage.

Dans le rapport du GT 4 de mai 1973, on a demandé aux laboratoires nationaux désireux de prendre part aux comparaisons d'envoyer chacun trois thermomètres. Le programme a été esquissé comme suit :

Il est demandé d'envoyer des thermomètres étalonnés (dans la mesure du possible) dans l'échelle du laboratoire dans le domaine de 1,5 K à 35 K ou dans une partie de ce domaine, dans l'échelle ⁴He 1958 (ou l'échelle ³He 1962) et dans l'E.I.P.T.-68 (aux points fixes de définition ou d'après un thermomètre à résistance de platine). On peut envoyer également des thermomètres non étalonnés, à la condition qu'ils soient bien vérifiés quant à leur reproductibilité. En fait, la stabilité des thermomètres pose un problème au cours des comparaisons. Il est demandé à chaque laboratoire de vérifier la reproductibilité de ses thermomètres dans la partie inférieure du domaine (par exemple à 4,2 K) et dans la partie supérieure (à 20 K ou au-dessus). Les étalonnages à deux points fixes (par exemple le point d'ébullition normal de ⁴He et celui de e-H₂ ou Ne) sont très utiles pour déceler les modifications dans l'étalonnage d'un thermomètre ; lorsque l'on connaît les modifications à ces deux températures on peut, presque à coup sûr, les déterminer aux températures intermédiaires par simple interpolation. On doit contrôler les thermomètres pour s'assurer que l'isolation entre le germanium et la capsule est suffisante.

Dans le rapport du GT 4, on indiquait les températures auxquelles on allait comparer les thermomètres (41 températures spécifiées dans le domaine de 1,5 K à 35 K, et quelques points supplémentaires entre 1 K et 1,5 K sur demande).

Le rapport poursuivait :

On pense que les comparaisons fourniront beaucoup de renseignements utiles sur les différences entre les échelles des laboratoires aux basses températures, qui sont en usage courant ou seront constituées dans un proche avenir, et sur les différences entre ces échelles,

⁴He 1958 et l'E.I.P.T.-68. Elles fourniront aussi des renseignements sur les éventuelles différences entre les réalisations de ⁴He 1958 et du domaine inférieur de l'E.I.P.T.-68 dans les différents laboratoires, ainsi que sur la stabilité des thermomètres à germanium.

On a donné les premières conclusions des mesures faites au N.S.L. dans le rapport de mars 1974 du GT 4. Quatre thermomètres étalonnés du K.O.L. ont été comparés à des thermomètres du N.S.L., eux aussi étalonnés. Les comparaisons ont fourni les différences entre les échelles suivantes :

Echelle acoustique du N.B.S. (2 K - 20 K)

Echelle magnétique de l'I.S.U. (1 K - 34 K)

Echelle magnétique du K.O.L. (1,5 K - 30 K)

Echelle ⁴He 1958 réalisée à l'I.S.U. (1 K - 5 K)

Echelle ⁴He 1958 réalisée au K.O.L. (1,5 K - 5 K)

"E.I.P.T.-68", version du N.S.L. fondée sur la version du N.B.S. (13,81 K - 34 K) et la réalisation du K.O.L.

(13,81 K - 30 K).

Les premiers résultats des comparaisons ont été très prometteurs :

a. La reproductibilité des mesures et la stabilité des thermomètres à germanium étaient telles que la dispersion trouvée au N.S.L. pour les quatre thermomètres du K.O.L., relativement aux étalonnages effectués au K.O.L., n'était pas supérieure à 1,0 mK dans le domaine de 1,5 K à 25 K.

b. La différence entre les échelles magnétiques de l'I.S.U. et du K.O.L. est une fonction "lisse" de la température, telle que, si les échelles étaient amenées en coïncidence à quelques températures de référence convenues (par exemple 2,2 K, 4,215 K, 13,81 K et 20,28 K) en ajustant les "constantes magnétiques" A, B, Δ et γ, les échelles concorderaient aux températures intermédiaires (à l'intérieur du domaine des températures de référence) à mieux que 0,5 mK.

c. Les réalisations de l'échelle ⁴He 1958 de l'I.S.U. et du K.O.L. ne diffèrent pas de plus de 0,5 mK (entre 2,3 K et 5 K) (ceci inclut des modifications éventuelles dans les thermomètres à germanium).

d. La version du N.S.L. de l'E.I.P.T.-68 et la réalisation du K.O.L. de l'E.I.P.T.-68 ne diffèrent pas de plus de 2 mK entre 13,81 K et 28 K (y compris également les modifications des thermomètres).

Dans le rapport complémentaire du N.S.L. au GT 4 (document CCT/74-33), on indique les résultats provisoires des comparaisons de thermomètres à germanium sur des graphiques donnant les

écarts entre les différentes échelles des basses températures et les déterminations de la température thermodynamique. De plus, dans ce rapport on propose d'établir, sur la base des résultats des comparaisons, une échelle de température provisoire lissée pour le domaine de 1 K à 30 K. Cette proposition, reprise par le GT 4, a été acceptée par le C.C.T. On envisage que le GT 4, sous les auspices du C.C.T., publie dans *Metrologia* en 1975 cette "meilleure estimation d'une échelle lissée dans le domaine de 1 K à 30 K".

Le N.S.L. est prêt à poursuivre la comparaison internationale des échelles des basses températures et l'étalonnage des thermomètres pour les laboratoires qui n'ont pas leur propre réalisation de l'échelle. On a reçu récemment de l'I.M.P.R. des thermomètres étalonnés ; on n'a pas encore réduit les résultats pour ces thermomètres. L'I.M.G.C. a envoyé des thermomètres non étalonnés ; l'étalonnage en a été effectué. Le N.P.L. soumettra bientôt des thermomètres à résistance rhodium-fer.

3. COMPARAISON INTERNATIONALE DE THERMOMÈTRES À RÉSISTANCE DE PLATINE

Dans sa lettre du 15 décembre 1972, le GT 4 portait à la connaissance des membres du C.C.T. une suggestion du N.S.L. : faire dans le domaine de 13,81 K à 373,15 K une comparaison internationale de thermomètres à résistance de platine (du type capsule) étalonnés. Le N.P.L. a fait savoir au GT 4 qu'il voulait bien effectuer les mesures de comparaison.

Dans le rapport de mai 1973 le GT 4 a fait la déclaration suivante :

Nous proposons d'accepter l'offre faite par le N.P.L. d'effectuer les comparaisons de thermomètres à résistance de platine aux températures des points fixes de l'E.I.P.T.-68 au-dessous de 100 °C. Pour vérifier d'éventuels changements dans les étalonnages des thermomètres, le N.P.L. mesurera aussi leur résistance au point d'ébullition normal de ^4He . Tout laboratoire désireux de prendre part aux comparaisons est invité à envoyer au N.P.L. trois ou, si cela n'est pas possible, deux thermomètres à résistance de platine, qui soient étalonnés dans l'E.I.P.T.-68 au-dessous de 273,15 K. On recommande fortement les étalonnages au point d'ébullition normal de ^4He . Les laboratoires qui n'ont pas de thermomètres étalonnés peuvent également envoyer des thermomètres non étalonnés, mais on recommande que soit déterminée la résistance des thermomètres au point triple de l'eau.

Les comparaisons seront effectuées de façon continue au cours des toutes prochaines années. Comme il a été proposé, les mesures seront effectuées au N.P.L., mais il pourrait s'avérer utile à un stade ultérieur que d'autres laboratoires apportent leur aide. Pour l'acheminement des thermomètres au N.P.L. il en est comme pour les thermomètres à germanium : le "transport à la main" paraît constituer

une partie essentielle du programme de comparaison. On doit éviter tout type de choc et les personnes chargées du transport doivent en être averties en conséquence. Le N.P.L. visera à obtenir une exactitude de 0,1 mK aux températures des points fixes de l'E.I.P.T.-68 et de $1 \mu\Omega$ au point d'ébullition normal de ^4He . On peut accepter tous les types courants de thermomètres à résistance de platine de type capsule. Les laboratoires désireux de prendre part au programme de comparaison sont priés de faire connaître aussitôt que possible à T.J. Quinn l'époque à laquelle ils enverront leurs thermomètres et de s'adresser directement à lui pour toute autre question concernant les comparaisons.

Dans le rapport de 1974 du GT 4, on donnait l'"Etat d'avancement au 8 mars 1974", fourni par J. Compton du N.P.L. :

On a reçu au N.P.L. trois thermomètres, deux provenant du K.O.L., et un du N.S.L. Dans les deux cas on dispose des valeurs de R (0 °C) et W (100 °C), et les comparaisons à basse température viennent de commencer avec six thermomètres du N.P.L. On peut maintenant s'occuper rapidement de thermomètres provenant d'autres laboratoires et le N.P.L. aimerait les recevoir dès que possible.

4. TRANSITIONS SUPRACONDUCTRICES COMME POINTS FIXES THERMOMÉTRIQUES

Dans le rapport de mai 1973 du GT 4, on recommandait l'utilisation comme point fixe thermométrique du dispositif supraconducteur mis au point par Schooley et ses collaborateurs (N.B.S.). Ce dispositif comporte cinq éléments de grande pureté, plomb, indium, aluminium, zinc et cadmium. Les points fixes supraconducteurs se situent respectivement au voisinage de 7,2 K, 3,4 K, 1,2 K, 0,8 K et 0,5 K. On peut obtenir ce dispositif en s'adressant au N.B.S. On trouvera davantage de détails dans *N.B.S. Special Publication 280-44*.

Depuis lors, le N.S.L. et le K.O.L. ont expérimenté le dispositif du N.B.S. (rapport du GT 4 de mars 1974 et ce volume, Annexe T 23). Le GT 4 pense donner dans ses prochains rapports les "meilleures valeurs" pour ces points fixes.

5. ÉTAT ACTUEL DE LA CONNAISSANCE DES TEMPÉRATURES THERMODYNAMIQUES DANS LE DOMAINE DE 1 K À 100 K

Dans le Tableau VII de l'E.I.P.T.-68 on donne pour les valeurs des points fixes au-dessous de 100 K, 0,01 K comme estimation de l'incertitude par rapport aux températures thermodynamiques. On n'a jamais donné le détail des discussions sur la façon dont on a attribué les valeurs aux points fixes ni sur quoi est fondé cette estimation de l'incertitude. La valeur de 0,01 K constituait une assez bonne estimation à partir des ren-

seignements dont on disposait en 1968.

Dans le domaine compris entre 1 K et 30 K on a publié les résultats des mesures de température avec le thermomètre acoustique (N.B.S.), les thermomètres à gaz (I.M.P.R., N.S.L.) et les thermomètres magnétiques (I.S.U., I.M.P.R., K.O.L.). Les résultats d'une comparaison de ces échelles (à l'exception de l'échelle du K.O.L.) ont été publiés par W.R.G. Kemp, J.G. Collins, C.P. Pickup et R. Muijlswijk (*Temperature, Its Measurement and Control in Science and Industry*, Vol. 4, p. 85, Instrument Society of America, Pittsburgh, 1972). Les différences entre l'échelle magnétique de l'I.S.U. et les autres échelles (^4He 1958, E.I.P.T.-68, Echelle acoustique du N.B.S., N.B.S.-55) ont été publiées par C.A. Swenson (*Metrologia*, 9, 1973, p. 99). Les différences entre l'échelle acoustique du N.B.S. et l'échelle de l'I.M.P.R. ont été données dans une Note de G.A. Kytin, D.N. Astrov, M.P. Orlova et G.A. Galoushkina (*Comité Consultatif de Thermométrie*, 9^e session, 1971, document CCT/71-54 non publié mais qui peut être obtenu sur demande au B.I.P.M.). L'échelle magnétique du K.O.L. a été publiée dans *Temperature, Its Measurement and Control in Science and Industry*, Vol. 4, p. 73, Instrument Society of America, Pittsburgh, 1972. La conclusion provisoire est que si toutes les échelles étaient ramenées aux mêmes températures de référence et si l'on évitait certaines difficultés avec les équations d'interpolation des thermomètres à germanium, "l'accord entre les échelles se ferait vraisemblablement à quelques millikelvins près" (*Temperature, Its Measurement and Control in Science and Industry*, Vol. 4, p. 85, 1972).

Les mesures isothermes faites au N.P.L. ont une importance considérable car, au contraire des mesures dont il a été question ci-dessus (à l'exception de celles faites avec le thermomètre acoustique), elles sont absolues et ne font appel à aucune température mesurée antérieurement dans le domaine. Les premiers résultats sont donnés par K.H. Berry dans *Metrologia*, 8, 1972, p. 125 et dans le rapport de septembre 1973 du GT 4. La température du point d'ébullition normal de $e\text{-H}_2$ est d'après ces mesures, de 5,4 mK inférieure à la valeur dans l'E.I.P.T.-68 et la température du point d'ébullition normal de ^4He est de 9,0 mK supérieure à sa valeur dans l'Echelle ^4He 1958. Ces derniers résultats confirment d'anciennes expériences avec le thermomètre acoustique, les thermomètres à gaz et les thermomètres magnétiques.

Seules sont moins fondamentales les mesures au thermomètre

à gaz faites au N.P.L., pour lesquelles on a utilisé des valeurs de B qui proviennent des résultats d'isothermes obtenus au N.P.L. Les résultats aux points fixes de l'hydrogène indiquent que les températures des points fixes à 13,81 K et 17,042 K sont, respectivement, 3,5 mK et 3,4 mK inférieures à T_{68} ; les résultats aux températures de l'hélium confirment que la correction à T_{58} est approximativement proportionnelle à la température. Les résultats du N.P.L. ont été décrits dans la thèse de doctorat de K.H. Berry. Cette thèse comporte également une discussion générale très utile des résultats des isothermes et du thermomètre à gaz entre 2 K et 20 K.

R.P. Sherman (Los Alamos Scientific Laboratory) a rendu compte au Cinquième Symposium sur la température (Washington, 1971) des mesures isothermes avec ^3He .

Dans le domaine de 1 K à 30 K les expériences suivantes sont en cours ou seront prochainement commencées (rapport de septembre 1973 du GT 4) : thermométrie à gaz à l'A.S.M.W., le N.R.L.M., le N.S.L., l'I.M.P.R. et la P.T.B., mesures des isothermes pV de ^4He au K.O.L., thermométrie acoustique au N.B.S. et au N.P.L., thermométrie magnétique au N.B.S., à l'I.M.P.R. et au N.S.L. et mesures de l'indice de réfraction au N.P.L.

A notre avis, l'état actuel de la connaissance des températures thermodynamiques est suffisant pour obtenir dans le domaine de 2 K à 20 K une échelle avec une exactitude allant de 1 mK environ à 2 K, à 5 mK environ à 20 K. L'échelle pourrait être lissée à ± 1 mK près ou mieux en se servant des résultats existants pour le thermomètre magnétique. Ces résultats devraient pouvoir donner une exactitude d'environ 5 mK jusqu'à 30 K.

On peut penser que les expériences actuellement en cours donneront à cette échelle, d'ici trois ans, une base encore plus solide et une exactitude plus grande.

Les seules mesures dont nous ayons connaissance dans le domaine de 30 K à 100 K sont les mesures de température magnétique faites au N.S.L. par T. Cetas ; ces résultats seront bientôt publiés dans *Metrologia*.

Dans un document non publié (CCT/74-33) quelques-uns des résultats mentionnés ci-dessus sont comparés aux échelles de température magnétique.

6. ÉCHELLES DE TEMPÉRATURE À HÉLIUM LIQUIDE

Comme on dispose maintenant de nombreuses preuves que

l'échelle ^4He 1958 et l'échelle ^3He 1962 sont fausses de 0,2 % environ (c'est-à-dire que les températures T_{58} et T_{62} sont de 0,2 % approximativement supérieures aux températures thermodynamiques), le GT 4 propose de réviser ces échelles.

Le GT 4 pense être en mesure de présenter au C.C.T. en 1976 de nouvelles échelles à hélium. Si le C.C.T. est d'accord avec ces nouvelles échelles, celles-ci pourront être soumises à l'approbation du C.I.P.M. en septembre 1976. Dans cette perspective on a supprimé dans l'édition amendée de 1975 de l'E.I.P.T.-68 (voir Rapport de la 10^e session du C.C.T., section 1c) la référence à l'échelle ^4He 1958 et à l'échelle ^3He 1962 qui figurait dans le texte original de l'E.I.P.T.-68 (Annexe II).

7. DÉFINITION D'UNE E.I.P.T. DANS LE DOMAINE DE 4 K À 14 K

Il ne fait aucun doute que le besoin est grand d'une échelle de température aisément reproductible, acceptée sur le plan international dans le domaine de 4 K à 14 K.

L'échelle lissée de 1 K à 30 K mentionnée au point 2 et qui devrait être publiée sous les auspices du C.C.T. en 1975, sera un pas en avant ; mais on ne pourra la réaliser qu'avec des thermomètres magnétiques assez complexes ou avec une série de thermomètres au germanium (ou au fer et au rhodium) étalonnés.

Le problème semble clair : la thermométrie magnétique de grande précision avec quelques points de référence déterminés avec des thermomètres absolus est en mesure de constituer une échelle dans le domaine de 1 K à 30 K avec une exactitude suffisante (voir point 5), mais aucune méthode convenable et simple n'existe à l'heure actuelle pour reproduire l'échelle entre 4 K et 14 K.

Il convient d'indiquer que la partie inférieure de l'E.I.P.T.-68, c'est-à-dire le domaine compris entre 13,81 K et 20,28 K, n'est pas non plus entièrement satisfaisante ; l'échelle ne paraît pas suffisamment lissée par rapport à la température thermodynamique (document CCT/74-33 non publié).

Mesures de températures dans un arc à plasma d'hydrogène

Par P. FIEFFÉ-PRÉVOST

Institut National de Métrologie du C.N.A.M. (France)

(Document CCT/74-17)

L'Institut National de Métrologie du Conservatoire National des Arts et Métiers étudie actuellement un arc électrique fonctionnant en régime continu sous pression atmosphérique d'hydrogène. Le but principal de cette expérience est de réaliser une source de luminance spectrale énergétique entre 120 et 400 nm.

Les principaux avantages d'une telle source sont les suivants :

1°) L'arc électrique est un dispositif simple et robuste, créant un plasma stable et reproductible, de symétrie cylindrique, à des températures de l'ordre de 15 000 K.

2°) Les constantes atomiques de l'hydrogène sont connues précisément, ce qui permet le calcul en valeur absolue de la luminance spectrale énergétique rayonnée par le plasma en fonction de sa température électronique.

3°) L'hydrogène émet un puissant fond continu entre 121,5 et 380 nm qui n'est pas réabsorbé par le plasma.

On utilise trois types de diagnostics spectroscopiques :

- a) Mesure des largeurs de raies, ces raies étant élargies par effet Stark.
- b) Mesure de la luminance énergétique d'une raie.
- c) Mesure de la luminance spectrale énergétique du fond continu.

Le modèle de l'équilibre thermodynamique local permet à partir de ces trois types de mesures de déduire la température électronique (Tableau I). L'incertitude sur les mesures de rayonnement est actuellement de l'ordre de 10 %, ce qui entraîne une incertitude sur la température électronique de l'ordre de 1 %. On devrait pouvoir, dans un avenir proche, en améliorant les mesures de rayonnement, atteindre une incertitude relative sur la température de l'ordre de 5×10^{-3} , ce qui permettra de mettre en évidence d'éventuels écarts à l'équilibre thermodynamique local et d'améliorer l'exactitude sur la température.

TABLEAU I

Type de mesure	Température
luminance H_{β}	12 390 K
luminance H_{γ}	12 350 K
luminance du fond continu à 540 nm	12 450 K
profil H_{β}	12 150 - 12 450 K

ANNEXE T 7

Point de fusion de l'eutectique cuivre-argent

Par L. CROVINI et P. MARCARINO

Istituto di Metrologia G. Colonnetti (Italie)

(Traduction du Document CCT/74-10)

Roeser [1], Alieva [2], Moser et al. [3], Crovini et Marcarino [4] ont dans le passé déjà étudié l'eutectique cuivre-argent.

Mc Allan [5] a découvert dans le cas de l'eutectique Al-Cu Al₂ que le point de fusion est supérieur au point de congélation aussi bien dans sa définition que dans sa reproductibilité. De la même façon, Bongiovanni et al. [6] ont réussi à définir avec précision le point de fusion de l'eutectique Ag-Cu en cherchant la température du pic maximal dans l'histogramme de fusion (dans le cas de pics mal définis, on cherche la température correspondant au barycentre du pic principal). Ils ont pu obtenir une reproductibilité de 10 mK (écart-type) en utilisant seulement des échantillons obtenus après des congélations très longues (durée de solidification supérieure à 8 h). Il est raisonnable de supposer que le processus de fusion avait lieu sur des échantillons assez homogènes.

Le meilleur échantillon qu'ils choisirent (Ag-Cu-LeMo) a une composition très proche de la composition nominale [7] et ils ont pu penser que sa pureté était supérieure à 99,999 %. Il pesait environ 1,5 kg et permettait de plonger un thermocouple à 17 cm au-dessous de la surface du liquide.

Le présent article se rapporte à un travail qui a été effectué à un stade ultérieur, au cours duquel la température de fusion ainsi définie a été déterminée dans l'E.I.P.T.-68. On a étalonné deux thermocouples étalons, satisfaisant aux exigences de l'E.I.P.T.-68, aux deux points de définition de cette échelle et à la température de congélation de l'antimoine de grande pureté. On a admis que cette température était de 630,755 °C d'après des déterminations précises [8]. L'installation expérimentale était la même que précédemment [6], c'est-à-dire qu'on maintenait une atmosphère d'argon de grande pureté au-dessus du métal en fusion et que la profondeur d'immersion était de 16 cm. La répartition de la température le long des fils du thermocouple était constante à chaque point d'étalonnage et au point de l'eutectique. On pouvait considérer que les gradients thermiques étaient identiques dans tout l'appareil. On a observé expérimentalement les caractéristiques d'immersion des thermocouples et on les a trouvées proches de celles rapportées par Mc Laren et Murdock [9]. Le tableau I donne les forces électromotrices d'étalonnage ainsi que celles qui correspondent au point de fusion de l'eutectique pour l'échantillon (Ag-Cu-LeMo).

TABLEAU I

Point fixe	Force électromotrice du thermocouple		Incertitude estimée (K)
	PPR32 (mV)	PPR33 (mV)	
point de congélation de l'or $t = 1\ 064,43\ ^\circ\text{C}$	10,314 8	10,324 6	$\pm 0,2$
point de congélation de l'argent $t = 961,93\ ^\circ\text{C}$	9,132 1	9,139 9	$\pm 0,05$
point de congélation de l'antimoine $t = 630,755\ ^\circ\text{C}$	5,543 9	5,545 8	$\pm 0,025$
point de fusion de (Ag-Cu) (pic de l'histogramme)	7,112 3	7,117 2	$\pm 0,035$

On estime l'exactitude des déterminations des forces électromotrices à $\pm 0,005\ \%$. Quand on ajoute cette valeur à la reproductibilité du point fixe, on obtient l'incertitude totale estimée (tableau I). Pour le point de l'eutectique, les

thermocouples PPR32 et PPR33 donnent respectivement 779,58 °C et 779,62 °C. En prenant la moyenne et en calculant l'incertitude en tenant compte de celles données au tableau I, on obtient :

$$t_{68} \text{ (Ag-Cu)} = 779,60 \pm 0,15 \text{ °C.}$$

L'effet des gradients de température peut soulever quelques doutes quant à la validité de cette détermination. Toutefois, si à tous les points d'étalonnage on modifie la profondeur d'immersion du thermocouple, les forces électromotrices d'étalonnage de ce dernier seront modifiées dans le même sens, comme l'ont indiqué Mc Laren et Murdock [9]. Il s'en suivra une variation de t_{68} (Ag-Cu) donnée par l'équation suivante :

$$\Delta t_{\text{Ag-Cu}} = \left(\frac{\partial t}{\partial t_{\text{Sb}}}\right) \Delta t_{\text{Sb}} + \left(\frac{\partial t}{\partial t_{\text{Ag}}}\right) \Delta t_{\text{Ag}} + \left(\frac{\partial t}{\partial t_{\text{Au}}}\right) \Delta t_{\text{Au}}$$

Le tableau II donne les valeurs des trois dérivées partielles à 779 °C et les variations de température correspondant à une augmentation de 1 cm de la profondeur d'immersion. Les variations déterminées expérimentalement à l'I.M.G.C. sont comparées à celles indiquées par Mc Laren et Murdock. Les valeurs calculées pour $t_{\text{Ag-Cu}}$ sont petites à cause du faible gradient observé au point de l'antimoine et de la compensation partielle entre les effets aux points de l'argent et de l'or.

TABLEAU II

Référence	$\frac{\partial t}{\partial t_{\text{Sb}}}$	$\frac{\partial t}{\partial t_{\text{Ag}}}$	$\frac{\partial t}{\partial t_{\text{Au}}}$	Δt_{Sb} (K)	Δt_{Ag} (K)	Δt_{Au} (K)	$\Delta t_{\text{Ag-Cu}}$ (K)
I.M.G.C.	+ 0,34	+ 1,30	- 0,68	0,006	0,027	0,043	- 0,008
Mc Laren et Murdock	+ 0,34	+ 1,30	- 0,68	0,023	0,039	0,045	- 0,028

Lorsque l'on opère à immersion constante, c'est-à-dire lorsque l'on augmente (ou diminue) la profondeur d'immersion de façon égale à tous les points fixes, y compris au point (Ag-Cu), il y a une compensation supplémentaire due à la caractéristique d'immersion au point (Ag-Cu). Il s'ensuit que la variation devrait être plus petite que celle indiquée au tableau II.

En conclusion, la température donnée ici peut être reproduite avec l'appareillage classique à point fixe dans les

limites de l'incertitude estimée.

BIBLIOGRAPHIE

1. ROESER (W.F.), *J. Res. N.B.S.*, 3, 1929, pp. 343-358.
 2. ALIEVA (F.Z.), *Izmeritel. Tekh.*, 2, 1963, pp. 23-26.
 3. MOSER (H.), OTTO (J.) et THOMAS (W.), *Z. für Phys.*, 175, 1963, pp. 327-331.
 4. CROVINI (L.) et MARCARINO (P.), *Ric. Termotecnica*, 17, 1967, pp. 11-15.
 5. Mc ALLAN (J.V.), *Temperature, Its Measurement and Control in Science and Industry*, Vol. 4, I, p. 265, Instrument Society of America, Pittsburgh, 1972.
 6. BONGIOVANNI (G.), CROVINI (L.) et MARCARINO (P.), *High Temperatures-High Pressures*, 4, 1972, pp. 573-587.
 7. HANSEN, *Constitution of Binary Alloys*, Mc Graw-Hill Book Company, 1958.
 8. BONGIOVANNI (G.), CROVINI (L.) et MARCARINO (P.), *Comité Consultatif de Thermométrie*, 9^e Session, 1971, pp. T 66-74 ; et ce Volume, Annexe T3.
 9. Mc LAREN (E.H.) et MURDOCK (E.G.), *Temperature, Its Measurement and Control in Science and Industry*, Vol. 4, p. 1543, Instrument Society of America, Pittsburgh, 1972.
-

ANNEXE T 8

Évaluation du coefficient de pression et de l'influence de l'oxygène dissous sur les points de congélation et de fusion de l'argent de haute pureté

Par G. BONGIOVANNI, L. CROVINI et P. MARCARINO

Istituto di Metrologia G. Colonnetti (Italie)

(Traduction du Document CCT/74-11)

On a fait deux expériences distinctes sur la congélation et la fusion de l'argent de grande pureté.

Dans la première, un échantillon de 1,5 kg d'argent (de 99,999 9 % de pureté nominale, fourni par Monteponi-Montevecchio (M-M), Italie) a été congelé à différentes pressions pour mesurer directement le coefficient reliant la température de congélation aux variations de pression, coefficient qui est donné par l'équation de Clausius-Clapeyron.

L'appareil était le même que celui décrit précédemment [1], dans lequel un thermomètre à résistance de platine de 0,25 Ω (type Rosemount 162 K) était utilisé avec un pont [2] ayant une sensibilité de 0,1 $\mu\Omega$. Le métal était conservé en atmosphère d'argon, dont la pression était connue à ± 1 % près.

Comme il est indiqué sur la figure 1, on a obtenu des résultats au cours de trois essais différents, aussi bien en diminuant la pression (cercles vides) qu'en l'augmentant (croix). Les différences de température sont à attribuer à une petite pente du palier (<10 mK/h).

La meilleure valeur pour (dT/dp) est $0,059 \pm 0,005 \mu\text{K}/\text{Pa}$, alors que les données bibliographiques (chaleur latente de fusion $L = 25,1 \pm 0,9 \text{ cal/g}$ [3], dilatation volumique de l'argent

à la fusion, $(V_1 - V_s)/V_s = 0,0499$ et masse volumique de l'argent solide $\rho_s = 9,85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ [4]) donnent $0,060 \text{ } \mu\text{K/Pa}$.

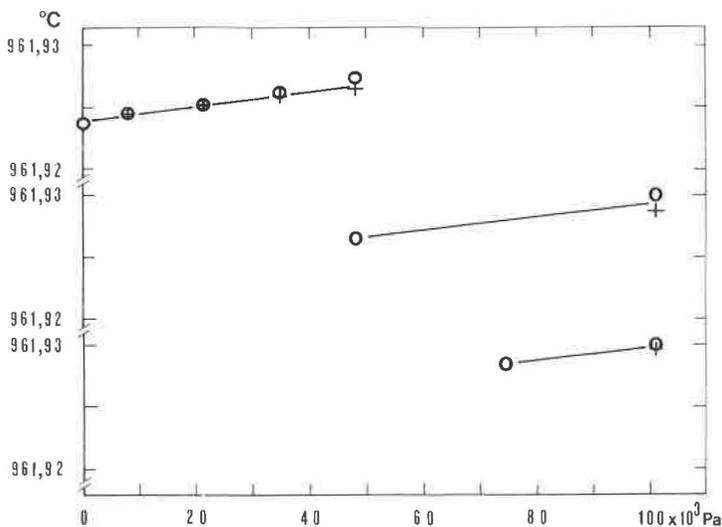


Fig. 1.- Variation du point de liquidus avec la pression.

L'accord est satisfaisant lorsque l'on considère à la fois l'exactitude limitée des données thermodynamiques et l'incertitude de $0,2 \text{ mK}$ dans la mesure des intervalles de température. Il en résulte que le point triple de l'argent (à la pression $p = 0,378 \text{ Pa}$) est $(6,0 \pm 0,2) \text{ mK}$ inférieure au point de congélation à la pression normale.

Le gradient thermique dans un lingot d'argent en cours de congélation, dû à la pression hydrostatique du métal liquide, devrait être $0,055 \text{ mK/cm}$.

Malheureusement le thermomètre utilisé n'était pas approprié pour déceler un aussi faible gradient par suite des pertes excessives de chaleur le long de la tige.

On a étudié à fond dans le passé l'influence de l'oxygène dissous [5]. La seconde expérience se rapportait à la contamination par de petites quantités d'oxygène dans une atmosphère réductrice (creuset de graphite et disques de protection en graphite). Des mélanges de gaz contenant de faibles pourcentages d'oxygène dans de l'argon passaient au-dessus du métal en fusion ou passaient directement en bulles à travers le métal à des températures n'excédant pas $1000 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Un second échantillon d'argent a été utilisé pour servir d'étalon de référence. Il s'est avéré que cet échantillon (d'une pureté nominale de 99,999 %, fourni par Leico Industries, U.S.A.) était plus pur que celui de Monteponi-Montevecchio, ainsi que cela a été montré par les comparaisons du point de liquidus et par des analyses thermiques durant la fusion. On a obtenu les déterminations du point de liquidus en amorçant la congélation avec le thermomètre, d'une façon tout à fait comparable à ce qui se pratique couramment pour le point du zinc. On a enregistré les courbes de fusion seulement pendant la fusion d'échantillons rapidement congelés. D'après les résultats, nous pouvons faire les remarques suivantes :

a) Dans l'état initial (échantillons complètement exempts d'oxygène) l'échantillon de Leico présente un point de liquidus (8 ± 2) mK plus élevé que celui de l'échantillon M-M. Les domaines de fusion à 40 % de la durée totale de fusion (le temps nécessaire pour couvrir un intervalle de $\pm 0,1$ K de part et d'autre du point de fusion) sont respectivement 3,5 mK et 7 mK ; à 70 % de la durée totale de fusion ils sont de 9 mK et 100 mK.

b) Le fait d'introduire de faibles pourcentages d'oxygène (0,1 % de O_2 dans de l'argon pur) dans l'atmosphère au-dessus du métal en fusion (échantillon M-M) ne modifie pas le point de liquidus d'une quantité supérieure à l'incertitude de mesure (± 2 mK) ; cela n'affecte pas non plus la forme de la courbe de fusion.

c) Le fait de faire passer dans le métal en fusion des bulles de mélanges d'oxygène et d'argon avec 0,1 à 1 % d'oxygène abaisse le point de liquidus d'environ 3 mK. On retrouve le point de liquidus initial après chauffage de l'échantillon à 1050 °C sous vide pendant au moins 50 heures.

d) L'oxygène dissous, après passage en bulles, entraîne une inversion de pente dans la courbe de fusion comme le montre la figure 2. La dépression se situe entre 3 et 6 mK, ce qui est en bon accord avec la dépression du point de liquidus. Ceci peut s'expliquer par le fait que l'oxygène ne serait pas soluble dans la phase solide.

e) Il faut davantage de temps pour retrouver les courbes initiales de fusion (150 h à 1050 °C, soit sous vide, soit à faible pression). A un stade intermédiaire la forme de la courbe est très trompeuse, car l'effet combiné des impuretés et de l'oxygène progressivement dissous dans l'argent fondu réduit considérablement la pente dans la partie centrale de la courbe.

Il en résulte une ambiguïté évidente car l'échantillon oxydé peut présenter un domaine de fusion à 40 % inférieur à 3 mK (14 mK à 70 %) sans que le point de liquidus soit meilleur.

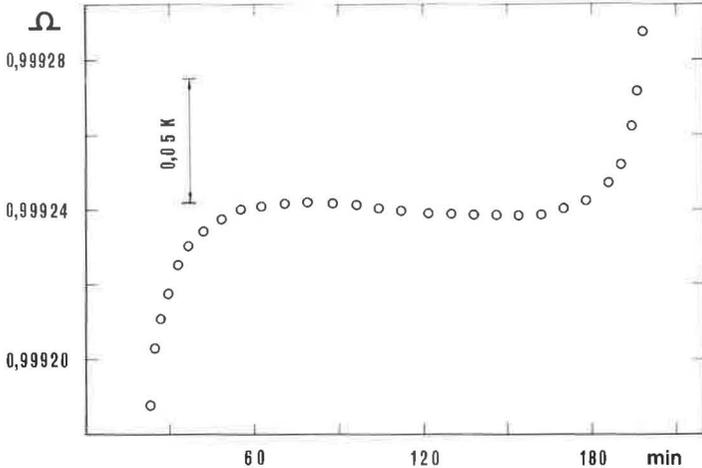


Fig. 2.- Courbe de fusion (oxygène dissous dans l'argent).

Nous pouvons donc conclure que le point de l'argent n'est pas aussi dépendant de l'oxygène dissous que le point de l'antimoine par exemple ; toutefois, pour obtenir la meilleure exactitude il convient d'utiliser un système ayant une bonne étanchéité aux gaz.

On ne devrait faire les analyses thermiques des échantillons de très grande pureté qu'après un traitement soigneux de désoxydation afin d'éviter toute ambiguïté.

BIBLIOGRAPHIE

1. BONGIOVANNI (G.), CROVINI (L.) et MARCARINO (P.), *High Temperatures-High Pressures*, 4, 1972, pp. 573-587.
2. CROVINI (L.) et KIRBY (C.G.M.), *Rev. Sci. Instr.*, 41, 1970, pp. 493-497.
3. American Society for Metals, *Selected values of the Thermodynamic Properties of the Elements*, pp. 17-24, Metals Park, Ohio, 1973.
4. American Society for Metals, *Metals Handbook*, 1, p. 1181, Metals Park, Ohio, 1961.
5. ROESER (W.F.) et DAHL (A.I.), *J. Res. N.B.S.*, 10, 1933, p. 661.

Comparaison de thermomètres à résistance de platine « à longue tige » de 90 K à 900 K

Par G. T. FURUKAWA

National Bureau of Standards (États-Unis d'Amérique)

(Traduction du Document CCT/74-7)

Un appareil est en cours de construction pour comparer les thermomètres à résistance de platine "à longue tige" de 90 K à 900 K, afin d'étudier la reproductibilité de l'Echelle Internationale Pratique de Température de 1968 (E.I.P.T.-68).

Dans son principe, l'appareil est un bloc de cuivre avec une série d'écrans thermiques et des puits appropriés pour les thermomètres. Sa conception permet d'isoler thermiquement le bloc de cuivre et de rendre sa température aussi uniforme que possible. Les écrans thermiques qui entourent le bloc de cuivre servent également à maintenir les tiges des thermomètres à la même température. Pour obtenir un haut degré de stabilité thermique du bloc de cuivre, on a appliqué, dans la conception de l'appareil, la méthode de l'"écran flottant"⁽¹⁾. Dans cette méthode, une enveloppe thermique relativement massive entoure directement le bloc de cuivre. Un "couplage thermique lâche" existe entre cette enveloppe et le bloc de cuivre. Pendant le fonctionnement, on amène à la fois le bloc de cuivre et l'enveloppe à la même température désirée ; les écrans extérieurs sont alors utilisés pour les isoler thermiquement de l'environnement. En conséquence, l'écran flottant sert à soustraire le bloc de cuivre aux petites fluctuations de température des écrans extérieurs. On espère que la température du bloc de cuivre ne se modifiera pas de façon significative pendant la comparaison d'une paire quelconque de thermomètres. L'appareil comprendra des puits pour neuf thermomètres.

(1) PERSOZ (B.), *Annales Phys.*, 14, 1940, p. 237.

Évaluation expérimentale des erreurs dans l'étalonnage des thermomètres à résistance de platine au point triple de l'eau

Par S. SAWADA et T. MOCHIZUKI

National Research Laboratory of Metrology (Japon)

(Document CCT/74-14)

Résumé

Dans le but d'évaluer de façon analytique les erreurs dans l'étalonnage des thermomètres à résistance de platine au point triple de l'eau, on a réalisé une expérience dans laquelle on a étudié et fait varier séparément les facteurs suivants : 1) la cellule à point triple, 2) le thermomètre, 3) le fluide assurant le contact thermique dans le puits thermométrique, 4) le temps écoulé après l'introduction d'un thermomètre dans une cellule, 5) le courant de mesure.

L'analyse des modifications des résultats obtenus avec trois thermomètres et trois cellules a conduit aux conclusions suivantes : lorsque l'on extrapole la résistance à courant nul, les variations systématiques des résultats obtenus dans différentes conditions ne s'avèrent pas significatives, sauf pour les différences de température entre cellules. Par ailleurs, la résistance à courant nul est affectée par trois sortes d'erreurs aléatoires ; la première d'environ $\pm 0,05$ mK (écart-type) résulte de modifications d'un jour à l'autre de conditions incontrôlées, la seconde d'environ $\pm 0,06$ mK provient de chaque introduction de thermomètre dans une cellule, et la troisième d'environ $\pm 0,04$ mK résulte de chaque lecture de résistance. Ces sources d'erreur donnent lieu à une incertitude, dans le cas d'une seule détermination de la résistance au point triple, d'environ $\pm 0,18$ mK avec un taux de confiance de 95 %.

ANNEXE T 11

Appareil de type Maecker pour la réalisation de 10^4 K

Par H. SAKATE et S. TAKATA

National Research Laboratory of Metrology (Japon)

(Document CCT/74-15)

Résumé

On a commencé à étudier le plasma comme étalon de température dans le domaine de 10^4 K pour un spectre de rayonnement situé dans la zone visible-ultraviolet. Dans ce but, un arc électrique stabilisé du type Maecker a été réalisé. Le plasma d'argon obtenu est cylindrique, d'un diamètre de 4 mm et d'une longueur de 30 cm. L'arc est alimenté par un redresseur pouvant fournir une intensité de courant comprise entre 30 et 100 A sous une tension à vide de 500 V.

Pour mesurer la densité électronique, on a utilisé l'élargissement de la raie H_{β} de l'hydrogène introduit à un faible pourcentage dans l'argon. On a pu en déduire, par application de la loi de Saha, une température d'ionisation. Les résultats obtenus ont montré qu'avec une élévation de l'intensité du courant de 30 à 80 A, les températures varient entre 10 800 K et 12 700 K et les densités électroniques entre $3,1 \times 10^{16}$ et $9,8 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$.

ANNEXE T 12

Étude pyrométrique des températures comprises entre 630 °C et 1 064 °C

Par J. BONHOURE

Bureau International des Poids et Mesures

(Document CCT/74-12)

Les mesures entreprises au B.I.P.M. dès 1969 avaient pour unique objectif l'étude de la température thermodynamique du point de congélation de l'or ; cependant dans le but de recueillir plus d'information, mais également pour des raisons pratiques, l'étude a été étendue au point de congélation de l'argent et à plusieurs autres températures comprises entre 630 °C et 1 064 °C.

Rappelons brièvement le principe et les conditions de mesure [1]. Deux cavités rayonnantes identiques assimilables à des corps noirs, contenues dans des fours à températures bien uniformes, sont maintenues l'une à 630 °C et l'autre à 1 064 °C ; les températures sont mesurées à l'aide de thermocouples Pt/Pt-Rh 10 %, donc connues dans l'E.I.P.T.-68. Par hypothèse, on admet qu'à 630 °C l'écart entre la température thermodynamique et la valeur correspondante dans l'E.I.P.T.-68 est nul. La mesure du rapport des luminances énergétiques des deux cavités rayonnantes, pour une étroite bande spectrale définie par un filtre interférentiel au voisinage de la longueur d'onde de 1 μm , permet alors de déterminer l'écart à 1 064 °C entre la température thermodynamique et la valeur correspondante dans l'E.I.P.T.-68.

Les huit groupes de mesures réalisés au cours des quatre

années 1970-1973 ont tous permis de rattacher le point de congélation de l'or à la température 630 °C, soit directement, soit en s'appuyant sur un nombre impair (un ou trois) de paliers de température intermédiaires. Les deux cas ont leurs avantages et leurs inconvénients. Dans le premier cas, la rapidité de la comparaison réduit au minimum le risque d'erreur due à l'évolution éventuelle des thermocouples. Dans le second cas, la comparaison est finalement rapportée à la même cavité rayonnante ce qui élimine l'erreur due à toute dissemblance possible entre les cavités ; de plus les valeurs des rapports de luminances qu'on est amené à déterminer sont fortement diminuées, surtout si on associe au récepteur un diviseur de luminances ; les défauts de linéarité du récepteur (tube photoélectrique à vide, de type Gillod-Boutry, à cathode Cs-Ag-O) deviennent sans importance.

Les résultats obtenus pour les points de congélation de l'argent et de l'or sont rassemblés au tableau I ; associés aux

TABLEAU I

Différences $t - t_{68}$ pour les points de congélation de l'argent et de l'or
(température de référence 630,74 °C ; $c_2 = 0,014\ 388\ \text{m}\cdot\text{K}$)

	Ag	Au
Mars-mai 1970		+ 0,07 K
Octobre-novembre 1970	+ 0,12 K	- 0,19
Janvier-février 1971		- 0,24
Mars 1971		- 0,06
Janvier-février 1972	+ 0,17	- 0,02
Mars 1972		+ 0,03
Novembre-décembre 1972		+ 0,11
Janvier-février 1973	- 0,05	- 0,12
Moyenne	+ 0,08 K	- 0,05 K
Ecart-type	0,13 K	0,16 K

résultats isolés obtenus à 720, 806, 826, 900 et 1 010 °C, ils ont permis d'établir la courbe de la figure 1. Les valeurs ont été calculées avec $c_2 = 0,014\ 388\ \text{m}\cdot\text{K}$ et en utilisant dans la relation de Planck les longueurs d'onde dans le vide ; chaque valeur est une moyenne qui provient de l'emploi systématique de six filtres interférentiels dont les pics sont répartis à peu près régulièrement de 0,94 à 1,02 μm (bande passante à

mi-hauteur ≈ 15 nm).

La figure 1 montre que, dans l'hypothèse où la différence $t - t_{68}$ est nulle à 630 °C, l'échelle actuelle du thermocouple platine/platine rhodié à 10 % n'est pas une représentation satisfaisante des températures thermodynamiques dans le domaine allant de 630 °C à 960 °C ; en revanche, l'intervalle de température séparant les points de congélation de l'argent et de l'or semble à peu près correctement apprécié.

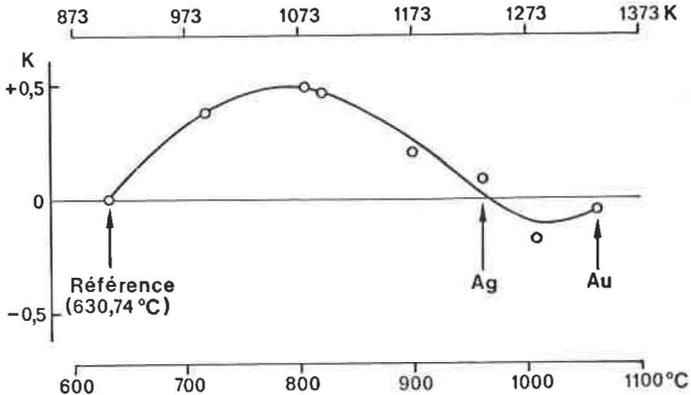


Fig. 1.- Différence $t - t_{68}$

Les éléments d'incertitude les plus importants des mesures faites au B.I.P.M. restent les thermocouples et les filtres interférentiels. On a cependant essayé d'en atténuer les effets de la façon suivante :

- l'étalonnage des thermocouples a été contrôlé très fréquemment ; de plus le four utilisé pour l'étalonnage et le four contenant la cavité rayonnante étant de conception et de construction très voisines, la répartition de température le long des fils d'un thermocouple était sensiblement la même au cours de l'étalonnage et au cours de l'utilisation, ce qui est une condition d'emploi favorable ;
- la détermination de la courbe de transmission des filtres interférentiels, relativement facile le long du pic principal, est très imprécise dans un domaine spectral étendu de part et d'autre du pic. On a contrôlé, soit par combinaison des filtres, soit par addition d'une couche d'eau devant chaque filtre, qu'aucun des six filtres utilisés ne présentait de transmission parasite appréciable.

Par ailleurs, et bien qu'un calcul préalable ait déjà montré que l'émissivité des cavités rayonnantes n'était pas modifiée de façon significative par l'existence de l'ouverture d'observation, on a vérifié qu'il en était effectivement ainsi en comparant les luminances pour des aires d'ouverture différentes.

La température de référence (630 °C) utilisée jusqu'à maintenant pour les mesures faites au B.I.P.M. présente l'inconvénient majeur de ne pas correspondre à un point fixe de l'E.I.P.T.-68 ; elle a été choisie parce que la sensibilité du tube photoélectrique à cathode Cs-Ag-O ne permettait pas d'atteindre une température plus basse. Mais, avec l'apparition récente d'un photomultiplicateur à cathode Ga-In-As possédant des caractéristiques très supérieures, on espère au cours de nouvelles mesures pouvoir prendre pour référence la température du point de congélation du zinc (419,58 °C).

BIBLIOGRAPHIE

1. BONHOURE (J.), *Comité Consultatif de Thermométrie*, 9^e session, 1971, p. T 84.
-

ANNEXE T 13

Pyromètre photoélectrique

Par G. NÉGRO

Institut National de Métrologie du C.N.A.M. (France)

(Document CCT/74-19)

L'étude en cours doit permettre de déterminer la température du point de congélation du cuivre par rapport à celle du point de congélation de l'or dans l'E.I.P.T.-68.

Le pyromètre

C'est un comparateur destiné à mesurer l'égalité de deux densités spectrales de luminance. La longueur d'onde est définie par un filtre interférentiel dont la bande passante se situe vers 650 nm.

Le récepteur est un photomultiplicateur EMI 9659 B associé à un amplificateur de courant dont la constante de temps est variable.

La sensibilité de l'ensemble est de $80 \text{ K}\cdot\text{V}^{-1}$ et la précision de 0,02 K pour un taux de confiance de 99 % au point de congélation de l'or.

L'atténuateur

L'extrapolation en température est effectuée à l'aide d'un atténuateur optique du type "disque à secteurs tournants". La forme de l'atténuateur permet d'avoir un facteur de transmission variable pour obtenir l'égalité des réponses. La valeur du facteur de transmission est connue de deux manières :

- mécaniquement, par une mesure dimensionnelle de l'ouverture angulaire avant l'expérience ;
- électroniquement, au moment de l'équilibre, par une mesure de la largeur du signal périodique modulé.

L'incertitude relative sur la connaissance de cette transmission doit être inférieure à 6×10^{-4} afin que la température soit connue à mieux que 0,05 K.

Les corps noirs

Les creusets en graphite recevant les métaux purs sont placés dans deux fours tubulaires horizontaux avec balayage d'argon. Les deux cavités sont identiques (8 mm de diamètre et 70 mm de long), fermées par un diaphragme en platine de 1 mm de diamètre ; l'émissivité est 0,999 77.

La détermination de la température du point de congélation du cuivre se fait sans étalon de transfert, par comparaison directe des deux corps noirs contenant respectivement le cuivre et l'or, pendant des paliers de congélation simultanés.

Nouveaux travaux thermométriques en cours au-dessus de 0 °C

Par T. J. QUINN

National Physical Laboratory (Royaume-Uni)

(Traduction du Document CCT/74-21)

1 - Thermomètre à rayonnement total

On va déterminer les températures thermodynamiques au-dessus de 0 °C par des mesures de rayonnement total. L'équipement (dont le schéma est donné à la fig. 1) est semblable dans son principe à celui qui est décrit par Ginnings et Reilly [1], mais on a particulièrement veillé à minimiser les effets de diffraction en suivant les principes avancés par Blevin [2].

Avec la conception actuelle de l'appareil on peut mesurer des températures jusqu'à 230 °C avec des incertitudes (égales à trois écarts-types) qui peuvent se situer entre 1 mK et 5 mK. Par la suite, on envisage de modifier le radiateur thermique et les ouvertures pour permettre des mesures allant jusqu'à 420 °C et éventuellement au-delà.

Dans son principe l'appareil consiste en des cavités rayonnante et absorbante, séparées par un système d'ouvertures qui sert à définir le faisceau transmis. On minimise les pertes par diffraction en faisant en sorte, au moyen de réflecteurs, que l'ouverture du radiateur soit éclairée par le rayonnement dans un demi-espace et que la cavité absorbante reçoive le rayonnement de l'ouverture du récepteur sur tout le demi-espace. Les ouvertures du radiateur ont 10 et 18 mm de diamètre et les ouvertures du récepteur 18 et 24 mm, ce qui offre la possibilité

d'étudier les effets systématiques dus à la géométrie. La distance séparant les ouvertures est fixée à 100 mm.

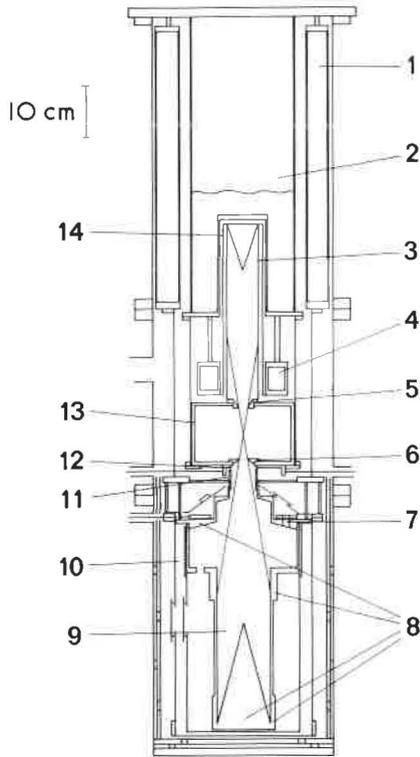


Fig. 1.- Thermomètre à rayonnement total.

1, Réservoir d'azote (77 K) ; 2, Réservoir d'hélium (4,2 K) ; 3, Cavité absorbante ; 4, Ancrage thermique (2 K) ; 5, Ouverture du récepteur ; 6, Ouverture du radiateur ; 7, Orifice de pompage du radiateur ; 8, Emplacements des thermomètres à résistance de platine ; 9, Cavité rayonnante ; 10, Ecran régulé en température ; 11, Miroir tubulaire (77 K) ; 12, Obturateur ; 13, Trappe de rayonnement ; 14, Liaison thermique.

La température du récepteur variera entre 3 K et 16 K, selon le flux d'énergie rayonnante et l'on mesurera la puissance absorbée par substitution électrique. On a l'intention de faire des mesures absolues de la géométrie du système d'ouvertures, afin de déterminer la constante de Stefan avec, on l'espère, une incertitude de 1×10^{-4} (trois écarts-types).

On a porté une attention particulière au problème du transport d'énergie par le flux de gaz entre le radiateur et le récepteur et à l'émissivité des cavités. Pour aider à cette

analyse, on a fait une étude approfondie des propriétés de dégazage et du pouvoir réfléchissant dans l'infrarouge lointain des revêtements noirs qui allaient être utilisés.

Le montage complet est en cours de construction et il est prévu que les mesures préliminaires commenceront en 1975.

BIBLIOGRAPHIE

1. GINNINGS (D.C.) and REILLY (M.L.), *Temperature, its Measurement and Control in Science and Industry*, vol. 4, p. 339, Instrument Society of America, Pittsburg, 1972.
2. BLEVIN (W.R.), *Metrologia*, 6, 1970, p. 39.

*
* *

2 - Pyrométrie par comptage de photons

Pour améliorer l'exactitude du pyromètre photoélectrique du N.P.L. et pour étendre son domaine de fonctionnement à des températures plus basses, on a modifié l'instrument pour utiliser des photomultiplicateurs mis au point récemment, dont la réponse s'étend à la région du proche infrarouge. Pour tirer tout le parti de l'accroissement de la sensibilité, on refroidit le photomultiplicateur jusqu'à environ - 25 °C de façon à réduire le bruit de fond. En stabilisant la température du tube à mieux que 0,1 °C, on évite les erreurs dues aux variations de l'efficacité quantique de la cathode.

On peut faire fonctionner l'instrument modifié soit sur le mode courant continu, soit sur le mode comptage de photons. Celui-ci est mieux approprié à l'acquisition automatique des données nécessaires pour la mesure des plus basses températures. Avec des photomultiplicateurs sélectionnés, il s'est avéré possible d'établir la linéarité du système de détection avec l'exactitude nécessaire et d'éviter ainsi les erreurs qui peuvent être introduites par l'utilisation de filtres neutres ou de dispositifs additifs de faisceaux. Aux faibles intensités, on préfère la technique de comptage des photons car elle réduit les effets de variation de gain du photomultiplicateur et écarte l'éventualité de bruit basse fréquence des amplificateurs de courant continu.

On a réduit l'erreur introduite dans la comparaison de sources à températures différentes en utilisant des filtres interférentiels à bande étroite (0,2 - 2,0 nm), dont on peut déterminer la longueur d'onde effective à mieux que 0,02 nm. Pour le moment on dispose dans le pyromètre de cinq filtres dont les pics de transmission sont situés dans le domaine de 600 à 900 nm.

On a fait des mesures à des températures inférieures à 500 °C. Dans cette région l'exactitude obtenue est principalement limitée par la statistique de comptage. Par exemple pour obtenir une exactitude de 10 mK avec une source qui donne un taux de comptage de 10^3 s^{-1} , les mesures doivent durer environ 24 heures.

Comparteur multiplicatif de luminances énergétiques spectrales

Par S. TAKATA et S. HATTORI

National Research Laboratory of Metrology (Japon)

(Document CCT/74-13)

Résumé

On a construit un comparateur capable d'équilibrer, d'additionner et de multiplier les luminances énergétiques spectrales x , y et z , de trois radiateurs X, Y et Z. Un dispositif à fente oscillante module le faisceau émis par X pour le mettre sous la forme de $\sin(\omega t)$ et ceux émis par Y et Z sous la forme de $\sin(\omega t + \pi)$. Les faisceaux modulés sont mélangés par un guide de rayonnement, passent à travers un filtre interférentiel puis tombent sur un photomultiplicateur dont le courant de sortie, amplifié de façon sélective, est conduit sur un discriminateur de phase. Lorsqu'il faut contrôler l'égalité $x = y$, il suffit d'introduire les faisceaux émis par X et par Y et d'ajuster soit x soit y de telle sorte qu'on ne détecte dans le circuit aucun signal de courant alternatif. On réalise aussi directement et de la même manière $x = z$ et par conséquent $y = z$.

Lorsque l'on est sûr d'avoir $x = y = z$, la somme des deux luminances énergétiques ($y + z$) que l'on obtient en introduisant en même temps les faisceaux émis par Y et par Z, est égale à $2y$ et par conséquent à $2z$. Par suite, si l'on fait passer x à x' de façon à avoir $x' = y + z$, on a $x' = 2y = 2z = 2x$, la luminance énergétique originelle x est donc multipliée par un facteur 2.

On peut réaliser successivement les multiples $2^n \times x$ et les sous-multiples $2^{-n} \times x$, ainsi que leur somme, n étant un nombre entier.

On estime que la précision relative dans l'égalisation des deux luminances énergétiques est de 0,1 % ou mieux.

On utilise maintenant ce comparateur au N.R.L.M. dans la réalisation de l'E.I.P.T.-68 au-dessus du point de l'or.

Note. Communication présentée à la Conférence sur la Photométrie et la Colorimétrie qui s'est tenue à Varna, Bulgarie, en juin 1973.

Nouvelle source de rayonnement corps noir au point de l'or

Par S. HATTORI et S. TAKATA

National Research Laboratory of Metrology (Japon)

(Traduction du Document CCT/74-16)

On a construit une nouvelle source de rayonnement corps noir pour améliorer la précision de la réalisation de l'échelle des hautes températures.

Le montage comprend :

- 1) un creuset cylindrique en graphite dont la cavité (diamètre intérieur 8 mm, profondeur 70 mm, diamètre de l'ouverture 1,5 mm, émissivité estimée de 0,999 98) contient un lingot d'or de 0,95 kg ;
- 2) un four tubulaire capable d'élever et de contrôler la température du creuset jusqu'au point de l'or.

Une des caractéristiques importantes de ce montage est que l'échange de chaleur entre le creuset et le four a lieu essentiellement par rayonnement thermique de telle sorte qu'on est assuré d'une bonne uniformité de température le long de l'axe du creuset.

Entre le four (diamètre intérieur 70 mm, longueur 600 mm) et le creuset (diamètre extérieur 58 mm, longueur 150 mm), on place un tube support en graphite (longueur totale 200 mm). Les deux extrémités du tube (sur une longueur de 10 mm) ont un diamètre extérieur de 70 mm et par conséquent s'ajustent étroitement à la paroi interne du four ; la partie centrale du tube (longueur 180 mm) a un diamètre extérieur de 68 mm et ne se

trouve donc pas en contact avec la paroi interne du four. Le creuset, placé dans la partie centrale à l'intérieur du tube support, est ainsi presque complètement soustrait à l'échange de chaleur par conduction thermique.

Deux blocs de nitrure de bore placés de part et d'autre du tube support sont maintenus, à l'aide d'un circuit de contrôle, à une température telle que la température à l'intérieur du creuset devient uniforme pendant la période de congélation du lingot d'or.

Le Tableau I donne le résultat des mesures de la répartition des températures le long de l'axe du four lorsque l'on remplace le creuset par un bloc de graphite de même forme et de même dimension. La bonne uniformité ainsi obtenue semble être due au fait que l'échange de chaleur se fait par rayonnement.

Une autre caractéristique de ce montage est que le four est entouré d'une triple enveloppe contre le rayonnement, ce qui permet de chauffer le four jusqu'au point de l'or en peu de temps et de le maintenir à cette température avec une puissance électrique de 800 W seulement.

TABLEAU I

*Différence de température entre le centre
et divers points de l'axe du four*

Point de mesure	en avant du centre		en arrière du centre	
	50 mm	25 mm	25 mm	50 mm
état stable	- 0,03 K	+ 0,01 K	- 0,04 K	- 0,05 K
refroidissement de 1,3 K/min	- 0,3	- 0,1	- 0,1	- 0,4
réchauffement de 1,2 K/min	+ 0,4	+ 0,1	+ 0,1	+ 0,2

On a fait les mesures avec un thermocouple Pt-PtRh à 13 % protégé par une gaine en quartz, d'un diamètre extérieur de 4 mm.

Discontinuités dans les dérivées secondes des fonctions écarts du thermomètre à résistance

Par R. E. BEDFORD

Conseil National de Recherches (Canada)

(Traduction du Document CCT/74-1)

Résumé

On montre que les désaccords entre les valeurs précédemment publiées des discontinuités de $d^2W(T_{68})/dT_{68}^2$ aux jonctions des différents domaines de l'E.I.P.T.-68 au-dessous de 0 °C, sont dus à de petites différences de température dans la réalisation des points fixes de définition dans les laboratoires concernés. Pour un groupe de thermomètres étalonnés dans un laboratoire donné, la variation maximale des discontinuités à 90,188 K et 54,361 K est faible ce qui montre qu'elles dépendent davantage des réalisations des points fixes que des caractéristiques des thermomètres. En conséquence, l'examen de ces discontinuités peut permettre de déceler des différences (supérieures à 1 mK) dans la réalisation des points fixes entre laboratoires.

Dans ce but on a exprimé les constantes A_1 , B_1 , etc. des quatre fonctions écarts qui définissent T_{68} au-dessous de 0 °C, comme des fonctions linéaires des différences mesurées des résistances réduites, $\Delta W_1(T_{68})$, aux points fixes et des dérivées des fonctions écarts, $\Delta W'_1(T_{68})$, aux jonctions des différents domaines. On donne dans le document l'ensemble des constantes de ces fonctions linéaires. Celles-ci sont utiles, en dehors de

leur nécessité dans le contexte présent, pour simplifier de façon considérable les calculs qu'il faut faire pour l'étalonnage des thermomètres.

Par une double différenciation des équations (5)-(6) de l'E.I.P.T.-68 et par une soustraction convenable, on peut exprimer les discontinuités des dérivées secondes comme des fonctions linéaires de A_1 , B_1 , etc. Pour de petits changements dans les valeurs des résistances réduites mesurées aux points fixes, l'effet sur les discontinuités est alors obtenu par différenciation de ces fonctions, celles du paragraphe 2, et une substitution convenable. Il en résulte que des changements supérieurs à l'équivalent de 1 mK dans les résistances réduites à 100 °C, 90,188 K et 54,361 K entraînent des changements significatifs dans les discontinuités à 90,188 K et 54,361 K. Les différences dans les discontinuités à 90,188 K et 54,361 K entre les étalonnages au N.R.C. et au K.O.L. sont vraisemblablement dues au fait que les températures des points d'ébullition de l'eau et de l'oxygène réalisés au K.O.L. sont, dans l'ensemble, supérieures de plusieurs millikelvins à celles réalisées au N.R.C. Il n'y a pas toutefois de preuve suffisante pour nous permettre d'attribuer, sans équivoque, une valeur précise à la différence correspondante pour chacun des deux points fixes.

Cellule à point triple de l'argon

Par G. BONNIER

Institut National de Métrologie du C.N.A.M. (France)

(Document CCT/74-18)

On a réalisé le point triple de l'argon sous la forme de deux cellules destinées à l'étalonnage de thermomètres à résistances de platine à longue tige.

Chaque cellule, associée à un vase Dewar, a la particularité d'être complètement autonome et d'une extrême simplicité d'emploi (fig. 1). La cellule est faite d'un cylindre en acier inoxydable de diamètre intérieur 93 mm, de diamètre extérieur 99 mm et de 135 mm de hauteur. Elle est fermée à la partie supérieure par une plaque traversée par un tube destiné à supporter le thermomètre. La face inférieure est fixée à un cylindre de 27 mm de diamètre intérieur, de 30 mm extérieur et de 120 mm de hauteur destiné à recevoir les phases liquide et solide de l'argon. Cette disposition permet d'obtenir un manchon d'argon solide autour de l'élément actif du thermomètre d'environ 120 mm de hauteur. Un tube de cuivre ajouré (diamètre intérieur 15 mm, diamètre extérieur 17 mm) de 90 mm de long est placé autour de la partie inférieure du thermomètre.

L'ensemble est prévu pour résister à des pressions internes de l'ordre de 55×10^5 Pa qui se produisent lorsque la cellule est placée à la température ambiante.

Le remplissage en argon se fait, la cellule étant placée dans l'azote liquide, par l'intermédiaire d'un tube de cuivre. Ce tube est alors scellé et coupé par compression. Une soudure

à l'étain rapportée ensuite assure la protection du scellement.

Pour améliorer la stabilité des paliers, en les rendant moins dépendants des variations de température du bain extérieur, la cellule a été garnie sur toute sa surface externe d'un revêtement de polyuréthane expansé d'environ 1 cm d'épaisseur.

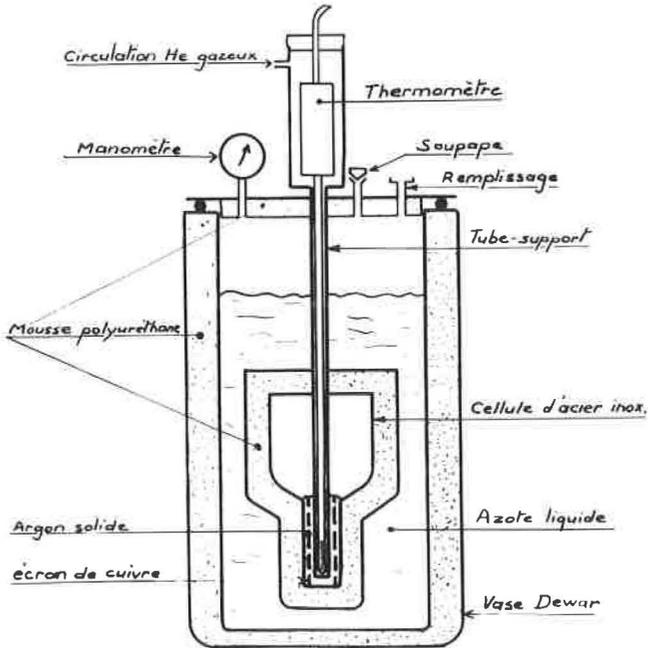


Fig. 1.- Cellule à point triple de l'argon

Le tube-support du thermomètre permet de fixer la cellule à une bride. Cette bride sert à fermer hermétiquement le cryostat. Elle porte les éléments nécessaires au fonctionnement de l'ensemble : l'orifice de remplissage, la mesure de la pression, et la soupape de régulation. Elle est également munie d'un dispositif permettant d'éviter la condensation de vapeur d'eau à l'intérieur du puits où se trouve le thermomètre.

En cours de fonctionnement, la cellule est immergée dans un bain d'azote liquide. La température de ce bain est portée au voisinage de celle du point triple de l'argon en stabilisant la pression au-dessus du bain à une valeur voisine de $2,04 \times 10^5$ Pa.

La variation de la tension de vapeur de l'azote liquide en fonction de la température est de 2×10^4 Pa/K. Cette sensibilité importante permet d'obtenir une stabilité de température du bain satisfaisante avec une soupape comme élément de régulation.

Les paliers de température débutent deux heures après la mise en froid et durent environ quatre heures. Pendant un palier, les variations de température sont inférieures à $\pm 0,5$ mK autour d'une valeur moyenne. L'analyse de la population de ces moyennes obtenues lors de réalisations successives de paliers met en évidence, sur une moyenne, un écart-type égal à 4×10^{-4} K pour la cellule n° 1 et à $1,5 \times 10^{-4}$ K pour la cellule n° 2.

La différence des températures entre les moyennes générales des deux cellules est de 2×10^{-4} K. Elle n'est pas significative pour un taux de confiance de 95 %.

Réalisation des échelles pratiques de température dans le domaine de 1,5 à 13,81 K

Par M. P. ORLOVA, D. N. ASTROV, R. V. PHILONCHIK,
G. A. KYTIN et T. M. KOURAKINA

Institut des Mesures Physicotechniques et Radiotechniques (U.R.S.S.)

(Traduction du Document CCT/74-22)

Résumé

On décrit l'appareil et la technique de mesure pour la réalisation des échelles pratiques de température dans la région comprise entre 1,5 et 13,81 K qui n'est pas couverte par l'E.I.P.T.-68.

Dans le domaine entre 1,5 et 4,2 K, on a réalisé l'"Echelle ^4He 1958" recommandée par le C.C.T. On décrit le thermomètre à pression de vapeur utilisé pour la réalisation de cette échelle et l'étalonnage des thermomètres à résistance de germanium.

On mesure les pressions de vapeur de l'hélium avec un manomètre de précision à mercure et un cathétomètre. L'incertitude des mesures de pression est de ± 3 Pa. La température du bloc de comparaison est constante à ± 1 mK près pendant les mesures en chaque point expérimental.

On donne les résultats de l'étude du thermomètre à pression de vapeur faite pour déterminer l'effet de "point froid", l'influence de la pellicule d'hélium superfluide ainsi que pour vérifier les éventuels gradients de température entre l'hélium liquide dans la chambre à pression de vapeur et les thermomètres à résistance de germanium.

Les résultats de l'étalonnage du thermomètre à germanium montrent que T_{58} est reproductible à mieux que ± 1 mK.

On estime à $\pm 1,5$ mK une erreur systématique éventuelle inexpliquée dans la réalisation de l'"Echelle ^4He 1958", d'après les résultats expérimentaux de sa comparaison avec l'échelle NBS P2-20 et l'échelle magnétique de l'I.M.P.R.

Dans le domaine entre 4,2 et 13,81 K, on a réalisé l'échelle pratique de température avec une série de thermomètres à résistance de germanium étalonnés par comparaison au thermomètre à gaz. On a modifié l'échelle du thermomètre à gaz pour se raccorder à l'"Echelle ^4He 1958" à 4,215 K et à l'E.I.P.T.-68 à 13,81 K. La stabilité des lectures des deux thermomètres à germanium utilisés comme étalons primaires pour conserver l'échelle dans ce domaine de température est vérifiée périodiquement au point d'ébullition de ^4He , au point d'ébullition et au point triple de l'hydrogène en équilibre. On a trouvé que cette stabilité se maintenait à $\pm 1,0$ mK sur une période d'environ dix ans.

On a transféré l'échelle pratique de température sur les thermomètres à résistance de germanium entre 4,2 et 13,81 K dans un cryostat dont le régime thermique est le suivant : la température du bloc de comparaison demeure constante à ± 1 mK près pendant la totalité de la durée des mesures en chaque point expérimental et les gradients de température dans le bloc n'excèdent pas ± 1 mK.

On discute les résultats du traitement mathématique par ordinateur des données de l'étalonnage du thermomètre à germanium.

**Réalisation de l'E.I.P.T.-68
et la relation pression-température des gaz
dans le domaine de 13,81 à 90,188 K**

Par M. P. ORLOVA, D. N. ASTROV, D. I. SHAREVSKAYA,
L. B. BELYANSKY, Ya. E. RAZHBA et V. T. KHNYKOV

Institut des Mesures Physicotechniques et Radiotechniques (U.R.S.S.)

(Traduction du Document CCT/74-23)

Résumé

On décrit l'appareil pour la réalisation des points fixes de l'E.I.P.T.-68 au-dessous de 90,188 K et on donne les résultats des recherches. Dans cet appareil on peut étalonner des thermomètres à résistance de platine avec un écart-type d'environ 0,5 mK aux températures d'ébullition et de 0,2 mK aux températures de point triple. On a comparé entre eux plusieurs appareils pour la réalisation des températures des points fixes. Les résultats coïncident à mieux que 1 mK aux températures des points d'ébullition et 0,5 mK aux températures de point triple.

On a étudié la relation entre la température et les pressions de vapeur saturante de l'hydrogène en équilibre, du néon et de l'oxygène, dans les domaines entre 13,81 et 20,3 K, 24,5 K et 27,2 K, 80 K et 90,3 K respectivement. Les écarts-types des points expérimentaux par rapport à la fonction d'approximation dans les domaines de température respectifs s'élevaient à 0,46, 0,32 et 0,84 mK.

On a comparé les relations obtenues avec les relations température-pression de l'E.I.P.T.-68 et les résultats des travaux récents effectués au N.B.S. et au K.O.L. L'accord entre les résultats est d'environ ± 1 mK pour l'hydrogène en équilibre et l'oxygène. Dans le cas du néon, la différence entre la relation température-pression obtenue et celle de l'E.I.P.T.-68 s'élève à 3 mK, ce qui concorde avec les résultats obtenus au N.B.S. et au K.O.L. à 1 mK près.

Échelle de température magnétique dans le domaine de 2 à 30 K

Par V. T. SHKRABA, V. A. PAVLOV et D. N. ASTROV

Institut des Mesures Physicotechniques et Radiotechniques (U.R.S.S.)

(Traduction du Document CCT/74-24)

Résumé

On a comparé un thermomètre magnétique fondé sur la susceptibilité magnétique du sulfate double d'ammonium et de manganèse avec un thermomètre à germanium. On a mesuré la susceptibilité magnétique au moyen d'un pont à inductance mutuelle à basse fréquence, blindé et à auto-contrôle, avec une incertitude des mesures relatives meilleure que $\pm 5 \times 10^{-6}$. La sensibilité du thermomètre magnétique est de $\pm 0,3$ mK aux environs de 30 K. On a étalonné le thermomètre dans l'E.I.P.T.-68 en liaison avec l'"Echelle ^4He 1958", avec une incertitude de $\pm 0,5$ mK. Trois séries successives de mesures ont montré que la reproductibilité du thermomètre magnétique correspond à environ $\pm 0,2$ mK entre 2 K et 4,2 K et à environ $\pm 0,8$ mK entre 13,81 K et 30 K. Ceci confirme le manque de concordance entre les températures thermodynamiques et l'E.I.P.T.-68 et l'"Echelle ^4He 1958" qui a été déjà signalée. Selon nos résultats, la température du point d'ébullition de l'hélium dans l'"Echelle ^4He 1958" est trop basse et doit être relevée de $10,5 \pm 1,5$ mK. Une comparaison indirecte de notre échelle de température magnétique avec les résultats obtenus par Van Rijn et M. Durieux ainsi que ceux de Cetas et Swenson, a été faite par l'intermédiaire de l'échelle acoustique NBS P2-20. La différence estimée entre nos résultats et ceux des auteurs ci-dessus n'excède pas ± 3 mK.

Comparaison de thermomètres à résistance entre 13,81 et 273,15 K et traitement des données expérimentales

Par F. PAVESE

Istituto di Metrologia G. Colonnetti (Italie)

(Document CCT/74-20)

Cryostat de comparaison.- Un bloc de cuivre, dans lequel peuvent être installés neuf thermomètres, est placé dans un environnement adiabatique, obtenu au moyen de deux écrans concentriques dont la température est maintenue à ± 3 mK de celle du bloc par des régulateurs automatiques à thermocouple différentiel. Les fils de mesure, avant d'atteindre le bloc, sont soigneusement ancrés thermiquement à la température du bloc, de telle sorte que le flux thermique résiduel ne dépasse pas $30 \mu\text{W}$. Le bloc échangeant aussi de la chaleur avec l'écran intérieur, l'espace qui les sépare est rempli d'hélium gazeux à une pression de 10 à 70 Pa. Au total on observe une dérive thermique du bloc qui atteint en moyenne $0,1 \text{ mK/min}$ (une valeur maximale de $0,2 \text{ mK/min}$ est admise pour les mesures), ce qui correspond à un échange de $5 \mu\text{W}$ à 14 K et de $800 \mu\text{W}$ à 300 K. Cela ne peut causer qu'un gradient maximal de température de $10 \mu\text{K/cm}$, même si tout l'échange se produisait à une extrémité du bloc. Le cryostat et les appareillages auxiliaires sont décrits dans [1]. A la suite de son étude thermique, on peut juger que le cryostat n'introduit pas d'erreurs systématiques supérieures à la valeur de la dérive thermique par minute (par exemple $0,1 \text{ mK}$ pour $0,1 \text{ mK/min}$), c'est-à-dire que le bloc peut être considéré comme isotherme et les flux de chaleur station-

naires restent dans ces limites, même pendant les fluctuations produites par la dérive thermique.

Mesures.— En général, les thermomètres sont tous connectés en série. La séquence des mesures est indiquée au tableau de la figure 1, où quatre thermomètres (1-4) sont comparés à deux intensités de courant (a, b) en répétant la mesure cinq fois (I - V). Pour les mesures de résistance, on utilise un pont thermométrique de Kusters (précision de 1×10^{-7}) et des résistances étalons reliées à 1×10^{-6} près aux étalons nationaux [2]. Pour le moment, l'ensemble électrique de mesure produit un

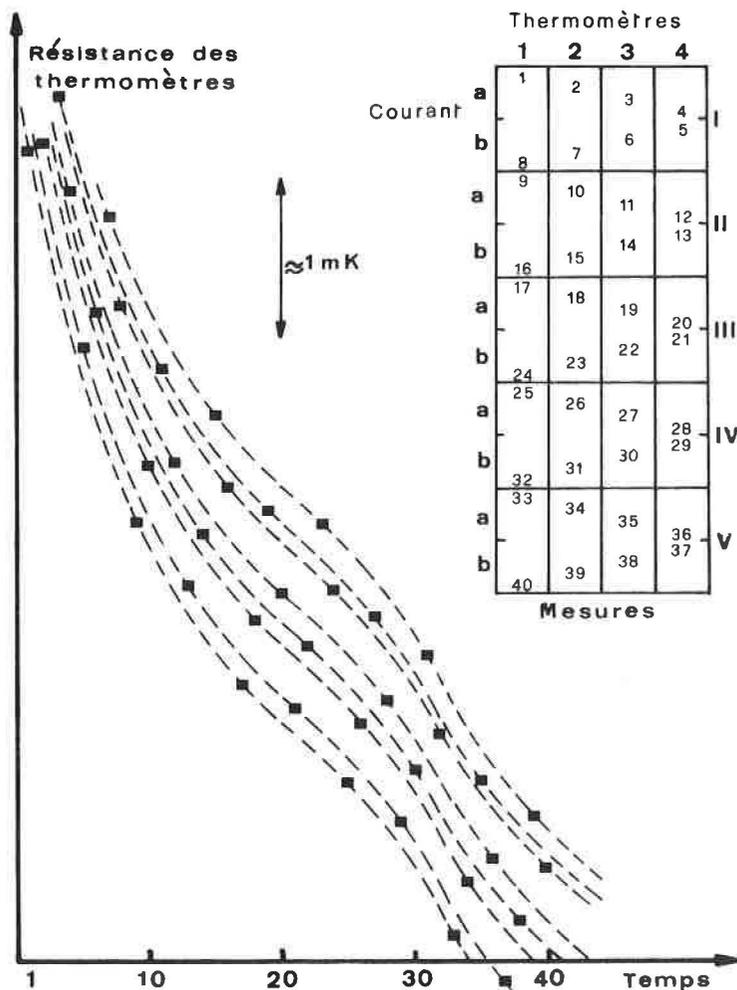


Fig. 1.- Dérive thermique du cryostat.

bruit de fond qui limite la sensibilité absolue des mesures à 1 nV, c'est-à-dire à 1 $\mu\Omega$ avec 1 mA.

Utilisation des données.— La figure 1 montre comment la dérive thermique du cryostat, même limitée à 0,1 mK/min, produit dans le temps une variation de la résistance de chaque thermomètre qui doit être soigneusement corrigée ; les temps, donnés ici en unités arbitraires, peuvent aisément atteindre une heure au total.

Bien que, pour la seule correction du réchauffement des thermomètres, une méthode d'interpolation linéaire soit souvent satisfaisante, on a préféré développer une méthode qui représente la courbe de dérive complète par un polynôme logarithmique en utilisant toutes les données expérimentales. Cette méthode est fort utile pour comparer aisément, et d'une façon objective, des mesures effectuées en des temps différents.

Suivant la figure 1, les mesures doivent être rangées en autant de groupes homogènes qu'il y a de thermomètres, et, pour chaque thermomètre, divisées en deux groupes, un pour chaque intensité de courant, puisque le facteur de réchauffement n'est pas connu *a priori*. On peut donc juger directement de la dérive thermique en comparant, seulement, les mesures à l'intérieur de chaque groupe (5 sur un total de 40, dans le cas cité). On a alors ajouté l'hypothèse, déjà représentée à la fig. 1, que toutes les m courbes de dérive des différents groupes sont superposables par translation suivant l'axe des ordonnées. Cela est parfaitement raisonnable puisque la variation totale de température est inférieure à 0,01 K et que les caractéristiques des thermomètres à résistance de platine avec $\alpha > 3,925 \ 0 \times 10^{-3}$ sont très proches les unes des autres.

Pour les thermomètres à résistance de germanium, cette hypothèse limite la méthode, en général, à des groupes de thermomètres du même modèle. Si l'on applique alors à $(m-1)$ courbes des *translations* optimisées suivant l'axe des ordonnées, il est possible de comprimer toutes les mesures dans une bande de largeur minimale dont on peut, à ce moment là, trouver une représentation mathématique convenable en utilisant *toutes* les mesures.

Pour tracer cette courbe, toutes les méthodes manuelles dont les résultats sont en général peu fiables à cause de l'influence non négligeable de la patience et du jugement subjectif de l'opérateur ont été écartées. Nous avons utilisé un ordinateur (IBM 1130) pour développer un programme qui applique

la méthode des moindres carrés de telle façon que les paramètres de la courbe de dérive et ceux des translations soient tous calculés en même temps.

Les résultats sont excellents dans tous les cas, c'est-à-dire que les écarts des points mesurés par rapport à la courbe calculée ne montrent aucune allure systématique.

La valeur quadratique moyenne de ces écarts approche celle obtenue avec une interpolation linéaire pour des dérives très faibles et régulières, mais elle s'en écarte, d'une façon importante même, pour certaines formes de dérive en donnant des résultats meilleurs. Le degré du polynôme varie entre $n = 2$ et $n = 6$.

La figure 2 montre ces écarts quadratiques moyens obtenus pour soixante-dix comparaisons effectuées dans notre Institut, sur des thermomètres à résistances de platine entre 1971 et

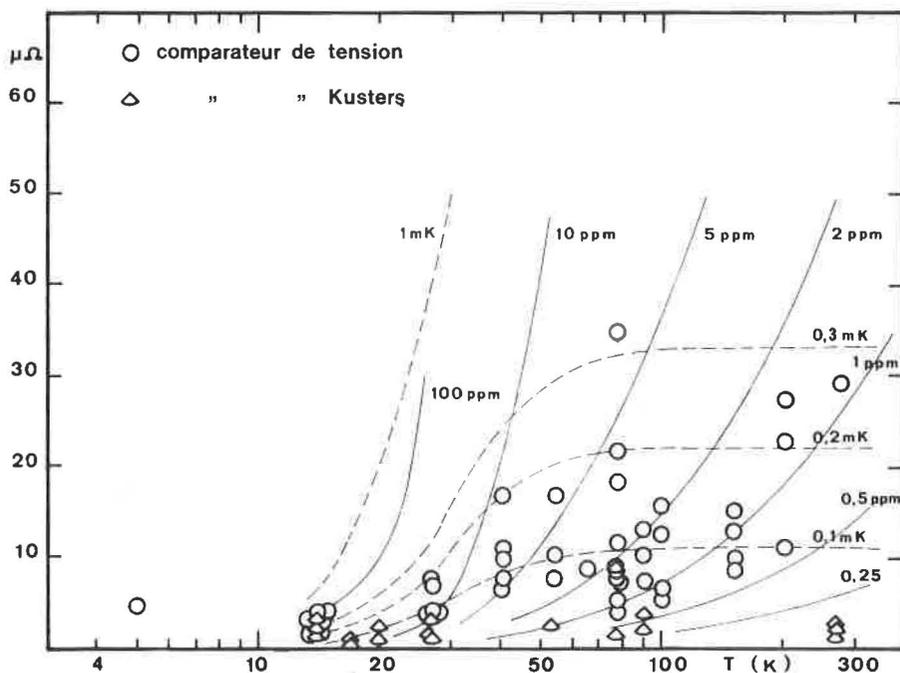


Fig. 2.- Comparaison de thermomètres à résistance de platine ; écarts entre les valeurs observées et la courbe calculée.

1973. Il apparaît que pour les mesures les plus anciennes, ils sont presque toujours meilleurs que 0,2 mK. A la suite d'améliorations de la régulation thermique du cryostat et de l'utilisation du pont thermométrique de Kusters, nous sommes parvenus aux valeurs actuelles de 1 à 3 $\mu\Omega$, constantes sur tout le domaine de l'E.I.P.T.-68.

Critères objectifs pour juger de l'incertitude des mesures.— Les résultats donnés à la figure 2 se rapportent directement à l'incertitude de la comparaison puisque la dispersion des mesures par rapport à la courbe de dérive n'est plus due à l'interpolation des données, mais seulement aux erreurs propres à chaque mesure. Cela représente donc un premier critère. Deux autres critères ont été utilisés : ils se servent de paramètres qui sont indépendants, pendant chaque comparaison, de la répétition des mesures et du temps.

Le premier d'entre eux utilise les valeurs de réchauffement des thermomètres : il peut être différent suivant la température ou le cryostat, mais il reste le même pendant le temps d'une mesure. La dispersion des valeurs obtenues pour chaque thermomètre en différentes mesures doit donc se rapporter uniquement à l'incertitude des mesures.

Le troisième critère utilise les valeurs des températures qui peuvent être calculées à l'aide des tableaux d'étalonnages des thermomètres. On rapporte toutes les mesures au même instant, en les transposant au moyen de la courbe de dérive calculée. A ce moment là, choisissant un des thermomètres comme étalon de référence, on calcule les différences de température (c'est-à-dire d'étalonnage) pour chacun des autres ; la dispersion des valeurs obtenues pour chaque thermomètre est reliée seulement à l'incertitude des mesures. La cohérence entre les valeurs d'incertitude obtenues avec les trois critères et spécialement entre les différences d'étalonnages répétés en des temps différents, constitue une garantie que la précision des calculs n'est pas éphémère ; c'est aussi une garantie de la cohérence propre de la méthode, qui a montré beaucoup d'autres avantages comme la fiabilité et la capacité de déceler et corriger des erreurs de transcription.

BIBLIOGRAPHIE

1. PAVESE (F.), BONAUDO (L.) et LIMBARINU (S.), *La Termotecnica*, 26, 1972, pp. 546-552.
 2. PAVESE (F.), BONAUDO (L.) et LIMBARINU (S.), *La Termotecnica*, 26, 1972, pp. 501-505.
-

Travaux du K.O.L. avec le dispositif SRM 767 du N.B.S. pour points fixes supraconducteurs

(Points de transition de Pb, In et Al)

Par J. E. VAN DIJK et M. DURIEUX

Kamerlingh Onnes Laboratorium (Pays-Bas)

(Traduction du Document CCT/74-32)

Le K.O.L. s'est procuré trois exemplaires du dispositif supraconducteur à point fixe du N.B.S., SRM 767 [1], numérotés 102, 103 et 108. Avec chacun de ces dispositifs on a réalisé les points de transition de Pb, In et Al. On a déterminé les températures de transition avec des thermomètres à germanium étalonnés (CC 761, CC 777, CC 1046, CC 915 et CC 975).

On a monté un dispositif supraconducteur à point fixe et trois ou quatre thermomètres à germanium dans un gros bloc de cuivre, dont on pouvait contrôler la température à un dixième de millikelvin. Au moyen de bobines de Helmholtz on compensait à $2 \mu\text{T}$ près, dans la plupart des mesures, le champ magnétique terrestre. Le tableau I donne le schéma des mesures et les résultats.

Les températures de transition données dans le tableau sont les points moyens de transition, déterminés graphiquement à partir de l'inductance en fonction de la température. On a toujours pu faire ces déterminations graphiques des points moyens à $0,1 \text{ mK}$ près et la plupart du temps à $0,05 \text{ mK}$ près. N est le nombre total des transitions mesurées chaque jour, à température croissante et décroissante. Les températures données dans le tableau sont les moyennes des points milieux de transition approchée en température croissante. ΔT est la largeur de transition, c'est-à-dire l'intervalle de température

TABLEAU I

$$\overline{T_c \text{ (K)}}$$

Séries	Date	Dispositif N°	CC 761	CC 777	CC 1046	CC 915	CC 975	N	\overline{W} (mK)	δT (mK)	
<u>Plomb</u>											
3,4	1973-06-15	108	7,193 1 ₅	7,192 9 ₅	7,193 6	7,192 8	-	3	0,3	< 0,0 ₅	
5,6	1973-06-19	108	7,193 2	7,193 0 ₅	7,193 8	7,192 8	-	4	0,2 ₅	< 0,0 ₅	
12	1973-06-26	108	7,193 1 ₅	7,193 0	7,193 6	7,192 7 ₅	-	6	0,2	< 0,0 ₅	
35,36	1974-02-27	108	-	7,192 6 ₅	7,193 1	-	-	2	0,5	< 0,0 ₅	
47,48	1974-03-21	102	-	7,192 6	7,193 2 ₅	-	-	3	1,0	< 0,1	
50	1974-03-26	103	-	7,192 7 ₅	7,193 3	-	-	2	1,4	0,2	
<u>(H = H_{terrestre})</u>											
4	1973-06-15	108	7,191 2 ₅	7,191 0 ₅	7,191 7	7,190 9	-	1	0,7	-	
11	1973-06-22	108	7,191 2 ₅	7,191 0 ₅	7,191 9	7,190 8	-	3	0,7 ₅	< 0,0 ₅	
12	1973-06-26	108	7,191 2 ₅	7,191 1	7,191 8	7,190 8 ₅	-	1	0,6	-	
<u>Indium</u>											
7	1973-06-20	108	3,407 5	3,407 6	3,408 1 ₅	3,407 3	-	2	1,5	< 0,0 ₅	
8,9	1973-06-21	108	3,407 4 ₅	3,407 5 ₅	3,408 0 ₅	3,407 2 ₅	-	1	1,3	-	
13	1973-06-27	108	3,407 4	3,407 4 ₅	3,408 0	3,407 2	-	2	1,0	< 0,0 ₅	
33	1974-02-26	108	-	3,407 6	3,408 3	-	3,408 7 ₅	2	1,8	0,1	
49	1974-03-22	102	-	3,406 6	3,407 0 ₅	-	3,407 5	2	1,7	< 0,0 ₅	
55,56	1974-03-29	103	-	3,406 9	3,407 1 ₅	-	3,407 7 ₅	2	2,5	0,2	
<u>(H = H_{terrestre})</u>											
14	1973-06-28	108	3,404 1 ₅	3,404 2 ₅	3,404 8	3,403 9 ₅	-	2	1,3	0,1	
<u>Aluminium</u>											
37	1974-02-28	108	-	1,176 7 ₅	1,176 6 ₅	-	1,176	2	3,6	0,6	
46	1974-03-19	102	-	1,176 2	1,176 4	-	-	2	3,2	0,5	
54	1974-03-28	103	-	1,176 6 ₅	1,176 8 ₅	-	-	2	3,4	-	

dans lequel interviennent 80 % du changement de l'inductance. δT est la différence de température entre les points milieux de transition obtenus en température croissante et en température décroissante.

Les températures sont données dans l'échelle magnétique du K.O.L., $T_m(I)$ [2] pour les points de transition de Pb et In, sauf pour le thermomètre CC 975 qui avait été étalonné séparément dans l'"Echelle ^4He 1958". Les températures au point de transition de Al sont données dans l'"Echelle ^3He 1962".

Les résultats ressortent mieux sur le tableau, mais on peut les résumer brièvement comme suit (au cours de toute la discussion qui suit, on ne tient pas compte des résultats dans le champ magnétique terrestre) :

1. *Reproductibilité de réalisation des points fixes*

Pb : Dispersion totale des températures de transition pour les trois dispositifs: $0,0_5$ mK, $0,4$ mK, $0,7$ mK, $0,0_5$ mK, pour les quatre thermomètres à germanium. Dispersion totale moyenne $0,3$ mK. Aucune différence décelable entre les trois dispositifs.

In : Dispersion des températures de transition pour le dispositif N° 108 : $0,1$ mK, $0,1_5$ mK, $0,3$ mK, $0,0_5$ mK pour les quatre thermomètres à germanium. Dispersion moyenne $0,1_5$ mK. Aucune différence décelable entre les dispositifs N° 102 et N° 103. Le dispositif N° 108 donne une température de transition qui est, pour trois thermomètres, $0,8_5$ mK, $1,2$ mK et $1,1$ mK (moyenne $1,0_5$ mK) supérieure à la moyenne obtenue avec les dispositifs N° 102 et N° 103.

Al : Dispersion totale des températures de transition pour les trois dispositifs : $0,5_5$ mK et $0,4_5$ mK pour les deux thermomètres à germanium. Dispersion moyenne $0,5$ mK. Aucune différence décelable entre les trois dispositifs.

Il est évident que ces dispersions et ces différences comportent des erreurs expérimentales dues aux mesures de température avec les thermomètres à germanium.

2. *Valeurs des températures des points de transition*

Pb : Températures de transition dans $T_m(I)$: $7,193$ 1_5 K, $1,192$ 8_5 K, $7,193$ 4_5 K et $7,192$ 8 K pour les quatre thermomètres à germanium (moyennes pour les trois dispositifs). Moyenne générale : $7,193$ 1 K $\pm 0,4$ mK dans $T_m(I)$. La valeur correspondante dans l'échelle magnétique $T_m(III)$ [2] est $7,201$ 6 K $\pm 0,4$ mK. Nous pensons que $T_m(III)$ est, à 2 mK près, en accord avec la température thermodynamique à cette température.

In : Dans le tableau I, les températures sont données dans

l'échelle magnétique $T_m(I)$ pour les quatre premiers thermomètres. (Nous laissons de côté le thermomètre CC 975 car l'on suppose que son étalonnage est un peu moins précis.) Comme $T_m(I)$ est égale à T_{58} à 0,5 mK près, nous considérons que les températures sont dans l'"Echelle ^4He 1958". Pour le dispositif N° 108, la moyenne des points de transition est pour les quatre thermomètres 3,407 $\frac{4}{5}$ K, 3,407 $\frac{5}{5}$ K, 3,408 1 K et 3,407 $\frac{2}{5}$ K. Moyenne générale : 3,407 6 K. Pour les dispositifs N°s 102 et 103 les moyennes générales sont respectivement 3,406 8 K et 3,407 0 K. On pense que chacune de ces trois valeurs est exacte, dans l'"Echelle ^4He 1958", à 1 mK près.

Al : Dans le tableau I les températures sont données dans l'"Echelle ^3He 1962". Les valeurs moyennes des températures de transition, pour les trois thermomètres sont 1,176 5 K, 1,176 6 K et 1,176 K. Moyenne générale 1 176 5 K. Nous pensons que ce résultat est donné, dans l'"Echelle ^3He 1962", avec une précision meilleure que 2 mK.

Pour vérifier la compensation du champ magnétique terrestre (40 μT) on a mesuré dans le champ magnétique terrestre les points de transition de Pb et In. Nous avons trouvé dans T_c une chute de 1,9 mK et 3,3 mK respectivement pour Pb et In. Les différences théoriques sont 1,96 mK pour Pb et 2,56 mK pour In en utilisant respectivement pour Pb et In les valeurs 49 K/T et 64 K/T.

Nous rendons hommage à l'aide apportée par Mr J. Mooibroek à toutes les étapes de cette étude.

BIBLIOGRAPHIE

1. SCHOOLEY (J.F.), SOULEN Jr. (R.J.) et EVANS Jr. (G.A.), *N.B.S. Special publication, 260-44*, 1972.
2. VAN RIJN (C.) et DURIEUX (M.), *Temperature, Its measurement and Control in Science and Industry*, Inst. Soc. America, Pittsburg, 1972, *Vol. 4-I*, p. 73.

Les températures $T_m(I)$ et $T_m(III)$ employées dans ce document sont nommées $^{Gd}T_m(I)$ et $^{Gd}T_m(III)$, respectivement, dans cette bibliographie.

Nouveaux travaux thermométriques en cours au-dessous ou au voisinage de 0 °C

Par T. J. QUINN

National Physical Laboratory (Royaume-Uni)

(Traduction du Document CCT/74-21)

1. THERMOMÉTRIE UTILISANT LA CONSTANTE DIÉLECTRIQUE DES GAZ ENTRE 90 K ET 373 K

Nous avons l'intention de nous intéresser à la thermométrie à gaz dans le domaine de 90 K à 373 K en utilisant la permittivité relative (constante diélectrique, ϵ) du gaz obtenue à partir de mesures de capacité, comme mesure de la masse volumique du gaz. Si la capacité C_0 d'un condensateur situé à l'intérieur du réservoir devient $C_0 + \Delta C$ lorsqu'on admet le gaz, on a $\Delta C/C_0 = \epsilon - 1$; en utilisant la relation de Clausius-Mossotti, la quantité

$$\frac{\Delta C/C_0}{\Delta C/C_0 + 3} \left(= \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2} \right)$$

est proportionnelle à la masse volumique que l'on peut alors substituer dans l'équation d'état. Afin de déterminer la constante de proportionnalité on doit d'abord faire des mesures à une température connue (celle du point triple de l'eau serait une température idéale). Ensuite on peut déterminer des températures par rapport à ce point fixe. Dans la pratique il serait nécessaire de parcourir les isothermes de $\frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2} \cdot \frac{1}{p}$ en fonction de la pression p qui, à la limite $p \rightarrow 0$, tend vers $\frac{A}{RT} + K$, où A est la constante déterminée et K est une petite correction

due à la compressibilité du condensateur.

L'avantage de la méthode est que toutes les mesures sont des mesures de grandeurs intensives, d'où il résulte que la constance du volume n'est pas nécessaire, qu'il n'y a pas de corrections d'espace nuisible et que des pertes de gaz modérées sont tolérables. La désorption des gaz des parois n'est importante que dans la mesure où la polarisation des gaz est affectée par les impuretés. On peut éliminer l'effet d'adsorption de gaz sur les électrodes du condensateur en utilisant un condensateur en croix du type de celui que l'on utilise dans les étalons calculables de capacité. Les désavantages par rapport aux autres types de thermomètres à gaz sont que la compressibilité du condensateur doit être connue (avec une exactitude de quelques pourcent) et que cela entraîne une mesure supplémentaire de capacité. Comme on obtient $(\epsilon - 1)$ à partir de la différence entre deux grandeurs semblables, les mesures de capacité doivent être très précises et il est nécessaire d'utiliser un gaz plus polarisable que He, par exemple Ar, Kr ou Xe. Il faudrait une précision de 1×10^{-8} ou mieux dans la mesure de capacité pour avoir une exactitude utile dans une détermination du point d'ébullition de l'eau. La méthode devient plus exacte lorsque l'on abaisse la température et nous sommes en train de concevoir un appareil qui fonctionnera d'abord dans le domaine de 90 K à 373 K, à des pressions allant jusqu'à 3×10^5 Pa en utilisant la balance de pression pour mesurer les rapports de pression avec l'exactitude nécessaire.

2. THERMOMÈTRE OPTIQUE

La détermination de l'indice de réfraction d'un gaz est une mesure commode de sa masse volumique en unités arbitraires. Cet indice peut être utilisé en liaison avec une mesure de pression et un étalonnage approprié à une ou plusieurs températures, comme paramètre de base d'un nouveau thermomètre : le thermomètre optique.

Comme l'indice de réfraction est une grandeur thermodynamique intensive, on évite les difficultés liées aux mesures de masse et de volume nécessitées par les déterminations de masse volumique en thermométrie à gaz conventionnelle. On peut penser aussi qu'il s'agit là d'un appareillage beaucoup moins compliqué qu'un thermomètre acoustique puisqu'un interféromètre optique est beaucoup plus simple qu'un interféromètre acoustique. En revanche, comparé au thermomètre magnétique, il a l'inconvénient

de nécessiter une mesure exacte de pression ; mais comme c'est un appareil plus proche de l'idéal, le problème de l'étalonnage (et éventuellement de réétalonnages fréquents) ne se pose pas.

Il peut sembler au premier abord que l'interférométrie optique dans un cryostat est une entreprise considérable, mais cette impression est due seulement au caractère peu habituel de la technique. On trouve maintenant disponibles dans le commerce des cryostats de conception simple, à queue démontable, de grandes dimensions, équipés de bonnes fenêtres optiques. On peut y loger facilement un petit interféromètre - par exemple un Michelson avec une cellule à gaz dans l'un des bras - et on peut installer en dehors du cryostat un petit laser, peu onéreux, avec des cellules photoélectriques et un compteur.

Le N.P.L. a construit un instrument de ce type et pense obtenir une résolution optique suffisamment bonne pour que les erreurs de mesure de l'indice de réfraction soient petites comparées à celles qui sont liées à la mesure de la pression. On utilisera ce thermomètre optique pour tracer les isothermes de l'indice de réfraction. Il pourrait être étalonné au point triple de l'eau pour en faire un thermomètre primaire au sens le plus strict ou, avec plus de facilité, à basse température. Toutefois il est particulièrement bien adapté pour l'interpolation entre deux points fixes, puisque sa principale erreur systématique, résultant de la légère déformation élastique de de la cellule à gaz lorsque la pression croît, s'élimine dans ce type de fonctionnement.

ANNEXE T 25

Reproductibilité des thermomètres à germanium au point d'ébullition de ^4He

Par T. SHIRATORI et K. MITSUI

National Research Laboratory of Metrology (Japon)

(Traduction du Document CCT/74-29)

Pour préparer la comparaison internationale des échelles des basses températures, on a vérifié, au N.R.L.M., la reproductibilité des thermomètres à germanium en utilisant un thermomètre à pression de vapeur de ^4He (fig. 1). On a choisi quatre thermomètres (Cryocal, type CR-1000). La reproductibilité (fig. 2) de leur résistance au point d'ébullition de ^4He est de $\pm 0,2$ mK avec un taux de confiance de 95 %, après plusieurs cycles de température entre la température de l'hélium et la température ambiante. La mesure était faite lorsque l'ensemble du thermomètre se réchauffait lentement ($0,03$ mK/min) à partir d'une température d'environ $0,1$ K au-dessous de la température environnante de façon à éviter l'éventualité du point froid. On évalue à ± 4 Pa l'exactitude du manomètre utilisé.

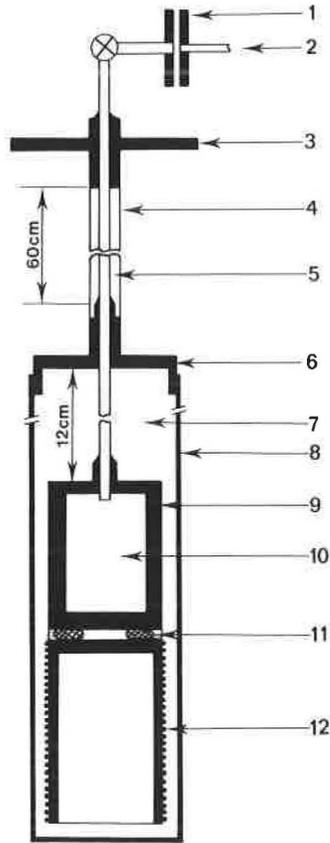


Fig. 1.- Schéma du cryostat.

1, Raccordement par joint torique ; 2, Orifice de mesure de la pression de vapeur ; 3, Disque à la température ambiante ; 4, Tube-écran ; 5, Vide primaire ; 6, Disque à la température de l'hélium ; 7, Vide primaire ; 8, Enveloppe cylindrique ; 9, Bloc de cuivre ; 10, Bulbe à pression de vapeur ; 11, Résistance de germanium ; 12, Ancre thermique.

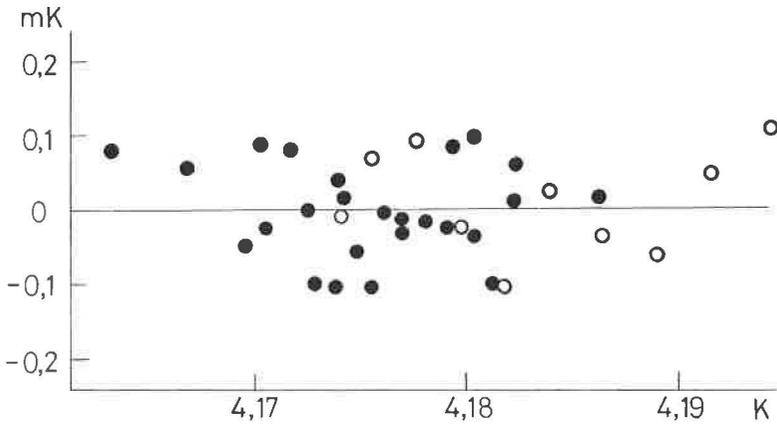


Fig. 2.- Reproductibilité des thermomètres à germanium.
(cercles noirs : 1^{ère} série ; cercles blancs : 2^e série).

Les implications de la thermométrie magnétique sur l'E.I.P.T.-68 au-dessous de 90 K

Par L. M. BESLEY, T. C. CETAS et W. R. G. KEMP

National Standards Laboratory (Australie)

(Traduction du Document CCT/74-25)

Résumé

La mise au point de l'E.I.P.T.-68 au-dessous de 90 K à partir de quatre "échelles nationales" et le processus nécessaire pour étalonner un thermomètre à résistance de platine donné impliquent un degré de complexité susceptible d'introduire des irrégularités dans l'échelle. De plus, les études récentes par thermométrie magnétique montrent que l'E.I.P.T.-68 n'est pas lissée au-dessous de 34 K ; la thermométrie à gaz et la thermométrie acoustique laissent aussi à penser que le point d'ébullition de l'hydrogène en équilibre ($e\text{-H}_2$) a été défini 5 mK trop haut. Aussi la meilleure façon d'étendre l'échelle au-dessous de 13,81 K n'est pas évidente.

Nous avons utilisé un thermomètre magnétique de 1 à 83 K, fondé sur la susceptibilité à 30 Hz du sulfate de gadolinium à huit molécules d'eau et du sulfate double d'ammonium et de manganèse, pour vérifier la régularité ou la cohérence thermodynamique de l'E.I.P.T.-68 et pour recueillir des informations dans le but d'étendre l'E.I.P.T. vers les basses températures. On a analysé indépendamment les résultats obtenus avec les deux sels ; ils sont identiques entre 2,3 K et 63 K. Aux températures les plus basses il ne faut pas retenir les résultats avec le gadolinium à cause des effets dus à la décomposition

de l'état fondamental dégénéré par le champ cristallin. Au-dessus de 63 K, les impuretés de terres rares dans l'échantillon de gadolinium font que sa susceptibilité s'écarte de la loi de Curie modifiée. Malheureusement nous n'avons pas réussi à obtenir des résultats valables avec le sel de manganèse au-dessus de 83 K, en particulier au point d'ébullition de l'oxygène, 90,188 K. La dispersion des résultats se situe à environ $\pm 0,5$ mK au-dessous de 50 K et ± 1 mK au-dessus. Les erreurs systématiques éventuelles tripleraient ces limites au-dessus de 30 K environ et les doubleraient au-dessous.

Lorsqu'on étalonne le thermomètre magnétique dans l'E.I.P.T.-68 entre 27 et 63 K (cette échelle magnétique est appelée T_{XNSL}) les résultats montrent que les points d'ébullition de $e-H_2$ à 1 atm et à 25/76 atm se situent 3 mK au-dessus des valeurs qui sont cohérentes thermodynamiquement avec l'échelle au-dessus de 27 K. La fonction d'interpolation du thermomètre à résistance de platine est cause de cette incohérence et présente une bosse de 3 mK centrée sur 20,280 K. Au-dessus de 27 K la fonction d'interpolation présente de petites sinuosités de l'ordre de 1 à 2 mK, qui proviennent vraisemblablement du fait que la fonction est tenue de passer par la bosse à 20 K.

On peut étalonner le thermomètre magnétique pour qu'il passe par la valeur du point d'ébullition de l'hydrogène en équilibre donnée par la thermométrie à gaz et la thermométrie acoustique, c'est-à-dire 20,275 K. On appelle cette échelle magnétique T'_X . T'_X est très voisine de l'échelle T_{XAC} de Swenson au-dessous de 14 K, environ 1 mK plus basse que T_{XAC} à 20 K, 2,5 mK au-dessous de la valeur du point d'ébullition du néon dans l'E.I.P.T.-68 et elle rejoint T_{XNSL} à 90 K. C'est notre meilleure approximation de la température thermodynamique déduite des résultats couramment disponibles. Des modifications allant jusqu'à 5 mK dans la valeur du point d'ébullition de l'oxygène auraient peu d'effet sur T_{XNSL} ou T'_X au-dessous de 20 K. Ainsi les deux échelles pourraient servir de base à une extension de l'échelle internationale au-dessous de 13,81 K. Une extension provisoire, qui ne modifierait pas l'E.I.P.T.-68, utiliserait T_{XNSL} , tandis que T'_X serait plus utile lorsqu'il conviendra de redéfinir l'échelle internationale. Les valeurs du point d'ébullition de 4He dans ces échelles sont plus élevées que celles données par T_{58} , de 8,4 mK pour T_{XNSL} et 8,0 mK pour T'_X . Ces échelles magnétiques feront l'objet d'une partie des comparaisons internationales d'échelles qui vont prochainement débiter au N.S.L.

ANNEXE T 27

La thermométrie au N.B.S. et l'E.I.P.T.

Par J. F. SCHOOLEY

National Bureau of Standards (États-Unis d'Amérique)

(Document CCT/74-4)

Résumé

Les derniers résultats en thermométrie à gaz donnent à penser que la température du point d'ébullition de l'eau dans l'Echelle Internationale Pratique de Température de 1968 est $(0,030 \pm 0,003 5)$ °C plus élevée que sa température thermodynamique. On propose en conséquence une recommandation pour la révision du texte de l'E.I.P.T.-68. On indique de plus les mesures que le N.B.S. a prises pour maintenir et diffuser l'E.I.P.T.-68. Enfin on fait une recommandation sur les détails d'un échange de thermomètres à résistance de platine à organiser sur le plan international.

Sur la différence entre les températures thermodynamiques et les températures dans l'E.I.P.T.-68

Par L. A. GUILDNER, G. T. FURUKAWA et J. L. RIDDLE

National Bureau of Standards (États-Unis d'Amérique)

(Traduction du Document CCT/74-26)

Résumé

Plusieurs articles récents rendent compte de mesures de la relation entre les températures thermodynamiques (T) et les températures dans l'Echelle Internationale Pratique de Température de 1968 (T_{68}).

En utilisant le contenu concordant de ces articles, les auteurs en concluent que, au-dessous de 0 °C, la différence entre T et T_{68} n'est pas supérieure à 0,01 K. Au-dessus de 0 °C la différence entre T et T_{68} est environ 0,03 K au point d'ébullition de l'eau et augmente probablement avec la température. La relation entre T et T_{68} aux points fixes est résumée dans un court tableau qui donne une appréciation de la situation actuelle.

Nouvelle détermination de la constante des gaz

Par T. J. QUINN, T. R. D. CHANDLER et A. R. COLCLOUGH

National Physical Laboratory (Royaume-Uni)

(Traduction du Document CCT/74-27)

On a obtenu une nouvelle valeur de la constante des gaz, R , à partir de mesures de la vitesse du son, C , dans l'argon à la température du point triple de l'eau. On a effectué les mesures de vitesse en utilisant un interféromètre acoustique à différence de marche variable et à basse fréquence fonctionnant à 5,6 kHz [1]. On a fait 98 mesures indépendantes de la vitesse du son sur un domaine de pression compris entre 0,3 et 2,0 atmosphères. On a fait une réduction par la méthode des moindres carrés de C^2 en fonction de la pression et on a extrapolé l'isotherme acoustique ainsi obtenue à pression nulle pour obtenir une valeur de C_0^2 (C_0 , vitesse à la limite des basses pressions). On a ensuite calculé la constante des gaz à partir de la relation :

$$C_0^2 = \frac{\gamma RT}{M}$$

où $\gamma = 5/3$, $T = 273,16$ K et $M = 39,9478$ g·mol⁻¹ ; on a déterminé expérimentalement C_0^2 comme étant égal à $94\,768,9 \pm 2,1$ m²·s⁻² ; l'incertitude sur C_0^2 est l'écart-type sur le segment d'isotherme acoustique.

On a ainsi obtenu comme valeur de la constante des gaz

$$R = 8\,315,59 \pm 0,18 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kmol}^{-1} *$$

* Note ajoutée aux épreuves : pour tenir compte de récentes corrections, cette valeur doit être remplacée par :

$$R = 8\,316,00 \pm 0,17 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kmol}^{-1}.$$

L'incertitude donnée ici est l'écart-type sur le résultat qui découle de l'écart-type sur c_0^2 provenant des erreurs aléatoires dans les mesures de la vitesse du son et équivaut à un écart-type de 22×10^{-6} sur R .

La plus forte erreur systématique est celle qui résulte de l'incertitude dans la composition isotopique de l'argon utilisé dans les mesures ; on pense qu'elle n'excède pas 7×10^{-6} . On considère comme négligeables les erreurs dans la mesure des températures, la fréquence acoustique et les mesures de déplacement dans l'interféromètre ; on ne pense pas que les erreurs dues aux impuretés chimiques dans l'argon entraînent une erreur systématique supérieure à 3×10^{-6} . L'incertitude la plus importante sur le résultat est donc celle qui résulte des erreurs aléatoires dans la mesure de la vitesse.

Un article paraîtra prochainement, qui donnera une description de ces travaux avec les détails complets de la méthode expérimentale et les résultats.

Cette nouvelle valeur de R est supérieure de 142×10^{-6} à celle qui était fondée sur des mesures de masse volumique de l'oxygène et qui est donnée par Cohen et Taylor [2] comme étant $8\,314,41 \pm 0,26 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kmol}^{-1}$.

BIBLIOGRAPHIE

1. QUINN (T.J.), Proceedings of AMCO-4, 1972, Plenum Press, p. 529.
 2. COHEN (R.) et TAYLOR (W.), *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 2, 1973, p. 566.
-

Influence de l'erreur d'étalonnage aux points fixes en thermométrie à résistance de platine

Par T. MOCHIZUKI et H. SAKURAI

National Research Laboratory of Metrology (Japon)

(Document CCT/74-31)

On a analysé par le calcul les erreurs d'étalonnage aux points fixes des thermomètres à résistance de platine pour la réalisation de l'E.I.P.T. On a étudié ainsi l'influence d'une erreur dans la détermination de W à un point fixe, sur la relation $W - T$ pour l'ensemble du domaine de fonctionnement du thermomètre.

Les figures 1 à 4 représentent, en fonction de la température, l'erreur dans la réalisation de l'E.I.P.T. entraînée par une erreur d'une unité au point fixe considéré et indiqué sur chaque courbe (Relations $W - T$ ou $R - T$ pour le point triple de l'eau).

Tr : point triple ; B : point d'ébullition.

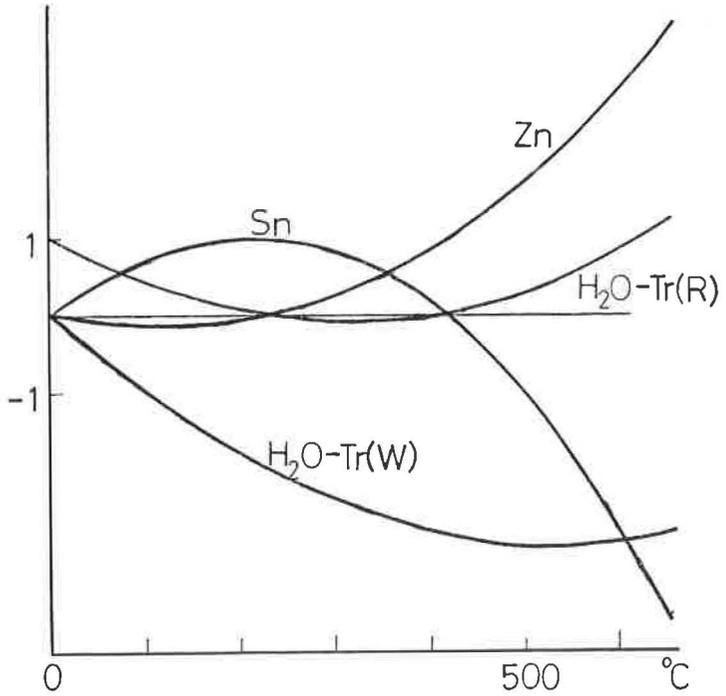


Fig. 1. - Domaine 0-630 °C

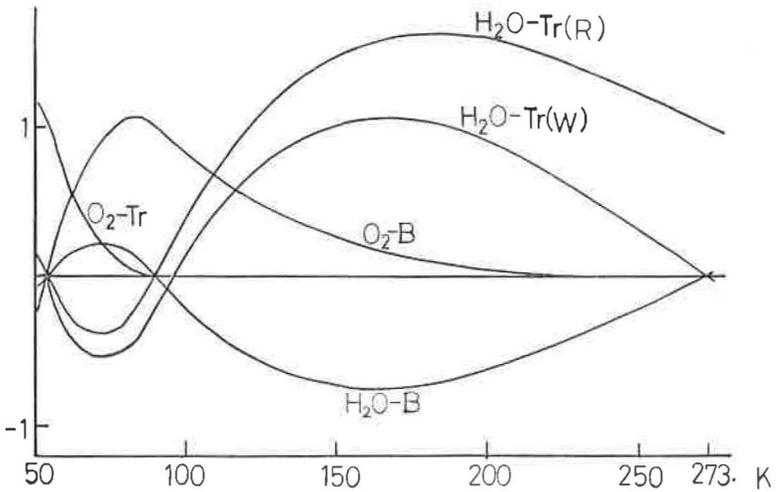


Fig. 2. - Domaine 54-273 K.

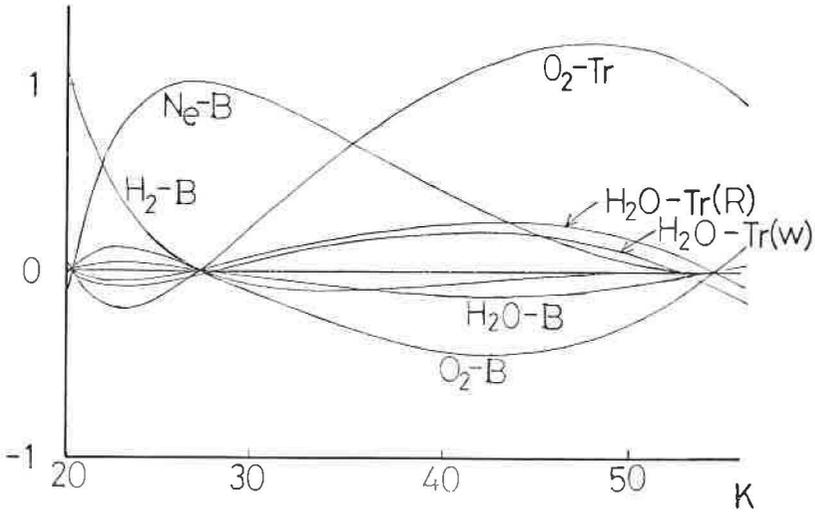


Fig. 3.- Domaine 20-54 K.

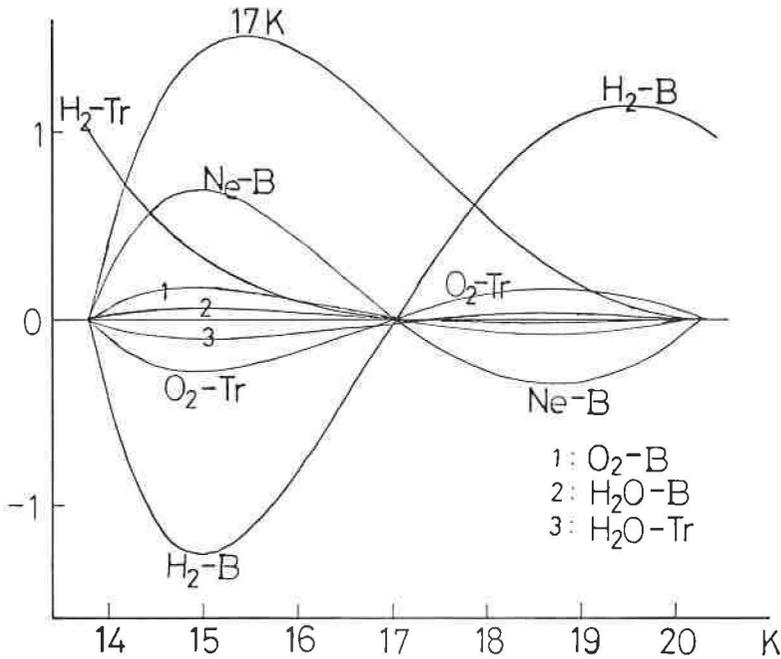


Fig. 4.- Domaine 14-20 K.

Échelle Internationale Pratique de Température de 1968

Édition amendée de 1975 *

L'échelle présentée dans ce document a été proposée par le Comité International des Poids et Mesures en 1974 et adoptée par la 15^e Conférence Générale des Poids et Mesures en 1975. Ce n'est qu'une version modifiée de l'Échelle Internationale Pratique de Température de 1968 (E.I.P.T.-68), et non une autre échelle.

Cette nouvelle rédaction de l'E.I.P.T.-68 n'apporte aucun changement aux températures mesurées, T_{68} .

TABLE DES MATIÈRES

	Pages
I. <i>Introduction</i>	A 3
II. <i>Définition de l'Échelle Internationale Pratique de Température de 1968 (E.I.P.T.-68)</i>	3
1. Principe de l'E.I.P.T.-68 et points fixes de définition	3
2. Définition de la Température Internationale Pratique de 1968 dans les différents domaines de température	4
<i>a.</i> Domaine de 13,81 K à 273,15 K	4
<i>b.</i> Domaine de 0 °C (273,15 K) à 630,74 °C	5
<i>c.</i> Domaine de 630,74 °C à 1 064,43 °C	6
<i>d.</i> Domaine des températures supérieures à 1 064,43 °C	6
III. <i>Renseignements complémentaires</i>	6
1. Thermomètre à résistance étalon	7
2. Thermocouple étalon	7
3. Pression	7
4. Point triple de l'eau	8
5. Point triple, point 17,042 K et point d'ébullition de l'hydrogène en équilibre	9
6. Point d'ébullition du néon	9
7. Point triple de l'argon	9
8. Point triple et point de rosée de l'oxygène	9
9. Point d'ébullition de l'eau	10
10. Points de congélation de l'étain et du zinc	10
11. Points de congélation de l'argent et de l'or	10
12. Températures de référence secondaires	10
ANNEXE. <i>Historique de la mise au point des Échelles Internationales de Température</i>	11
TABLEAU I. Points fixes de définition de l'E.I.P.T.-68	14
TABLEAU II. Coefficients α_j de la fonction de référence pour les thermomètres à résistance de platine dans le domaine compris entre 13,81 K et 273,15 K	15
TABLEAU III. Valeurs de $W_{\text{CCT-68}}(T_{68})$, selon l'équation (5), pour des valeurs entières de T_{68}	16
TABLEAU IV. Valeurs de $W_{\text{CCT-68}}(T_{68})$, selon les données portées au tableau II, aux températures des points fixes	17
TABLEAU V. Influence de la pression sur les températures de quelques points fixes de définition et points de référence secondaires	17
TABLEAU VI. Points de référence secondaires	18
TABLEAU VII. Différences approximatives ($t_{68} - t_{48}$), en kelvins	21

I. Introduction

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 ⁽¹⁾.

Pour des raisons historiques, liées à la façon dont les échelles de température ont été définies à l'origine, il est courant d'exprimer une température par la différence entre cette température et celle de l'état thermique inférieur de 0,01 kelvin au point triple de l'eau. Une température thermodynamique T , exprimée de cette façon, est appelée température Celsius, symbole t , définie par

$$(1) \quad t = T - 273,15 \text{ K.}$$

L'unité de température Celsius est le degré Celsius, symbole °C, qui est par définition égal en grandeur au kelvin. On peut exprimer une différence de température en kelvins ou en degrés Celsius.

L'Échelle Internationale Pratique de Température de 1968 (E.I.P.T.-68) a été conçue de telle façon que toute température mesurée dans cette Échelle soit une étroite approximation de la température thermodynamique numériquement correspondante. De plus, les mesures dans cette Échelle sont plus faciles et sont très reproductibles, tandis que les mesures directes de températures thermodynamiques sont à la fois difficiles et imprécises.

L'E.I.P.T.-68 utilise à la fois les Températures Kelvin Internationales Pratiques, symbole T_{68} , et les Températures Celsius Internationales Pratiques, symbole t_{68} . La relation entre T_{68} et t_{68} est la même que celle qui existe entre T et t , c'est-à-dire

$$(2) \quad t_{68} = T_{68} - 273,15 \text{ K.}$$

Les unités de T_{68} et t_{68} sont le kelvin, symbole K, et le degré Celsius, symbole °C, c'est-à-dire que les noms des unités sont les mêmes que ceux qui sont utilisés pour la température thermodynamique T et la température Celsius t .

L'E.I.P.T.-68 a été adoptée par le Comité International des Poids et Mesures à sa session de 1968 conformément aux pouvoirs qui lui avaient été donnés par la 13^e Conférence Générale des Poids et Mesures (Résolution 8). Cette Échelle a remplacé l'Échelle Internationale Pratique de Température de 1948 (édition amendée de 1960).

II. Définition de l'Échelle Internationale Pratique de Température de 1968 (E.I.P.T.-68) ⁽²⁾

1. Principe de l'E.I.P.T.-68 et points fixes de définition

L'E.I.P.T.-68 est fondée sur les valeurs des températures assignées à un certain nombre d'états d'équilibre reproductibles (points fixes de définition)

⁽¹⁾ *Comptes rendus des Séances de la 13^e Conférence Générale des Poids et Mesures* (1967-1968), Résolutions 3 et 4, p. 104.

⁽²⁾ Dans ce document, on emploie en général les températures Kelvin au-dessous de 0 °C et les températures Celsius au-dessus de 0 °C. Cela permet d'éviter l'emploi de valeurs négatives et est conforme à l'usage général.

et sur des instruments spécifiés étalonnés à ces températures. Ces états d'équilibre et les valeurs de la Température Internationale Pratique qui leur sont assignées sont donnés au Tableau I (p. A 14). L'interpolation entre les températures des points fixes est réalisée au moyen de formules servant à établir la relation entre les indications de ces instruments et les valeurs de la Température Internationale Pratique.

Entre 13,81 K et 630,74 °C, c'est le thermomètre à résistance de platine qui est employé comme instrument étalon. L'élément résistant du thermomètre doit être en platine pur, recuit, exempt de toute contrainte. Sa résistance réduite $W(T_{68})$, définie par

$$(3) \quad W(T_{68}) = R(T_{68})/R(273,15 \text{ K})$$

où R est la résistance, ne doit pas être inférieure à 1,392 50 à $T_{68} = 373,15 \text{ K}$. Au-dessous de 0 °C, la relation résistance-température du thermomètre est obtenue à l'aide d'une fonction de référence et de fonctions écarts spécifiées. Entre 0 °C et 630,74 °C, deux polynômes fournissent la relation résistance-température.

Entre 630,74 °C et 1 064,43 °C, l'instrument étalon est le thermocouple platine rhodié (10 % de rhodium)/platine, dont la relation force électromotrice-température est représentée par une équation du second degré.

Au-dessus de 1 064,43 °C, on définit la Température Internationale Pratique de 1968 au moyen de la loi du rayonnement de Planck avec 1 064,43 °C (1 337,58 K) comme température de référence et 0,014 388 mètre·kelvin comme valeur de c_2 .

2. Définition de la Température Internationale Pratique de 1968 dans les différents domaines de température

a. Domaine de 13,81 K à 273,15 K

Entre 13,81 K et 273,15 K, la température T_{68} est définie par la relation

$$(4) \quad W(T_{68}) = W_{\text{CCT-68}}(T_{68}) + \Delta W_i(T_{68}),$$

où $W_{\text{CCT-68}}(T_{68})$ est la résistance réduite donnée par la fonction de référence ⁽³⁾

$$(5) \quad T_{68} = \sum_{j=0}^{20} a_j \left(\frac{\ln W_{\text{CCT-68}}(T_{68}) + 3,28}{3,28} \right)^j \text{ K}.$$

Les coefficients a_j de cette fonction de référence sont donnés au Tableau II (p. A 15). Les écarts $\Delta W_i(T_{68})$ aux températures des points fixes de définition sont obtenus à partir des valeurs mesurées de $W(T_{68})$ et des valeurs correspondantes de $W_{\text{CCT-68}}(T_{68})$ (voir Tableau IV, p. A 17). Pour trouver $\Delta W_i(T_{68})$ aux températures intermédiaires, on emploie des formules d'interpolation. L'intervalle entre 13,81 K et 273,15 K est divisé en quatre régions; dans chacune d'elles $\Delta W_i(T_{68})$ est défini par un polynôme en T_{68} , dont les coefficients sont déterminés d'après les valeurs de $\Delta W_i(T_{68})$ aux points fixes et par la condition qu'il n'y ait pas de

⁽³⁾ L'équation (5) est, mise sous une autre forme, l'équation (22) de la version originale de l'E.I.P.T.-68. Les valeurs de T_{68} calculées à partir de ces deux formules sont pratiquement égales (à mieux que $\pm 10 \mu\text{K}$); l'ancienne fonction de référence peut aussi être employée.

discontinuité de $d\Delta W_i(T_{68})/dT_{68}$ au passage d'une région à la région voisine (4).

Entre 13,81 K et 20,28 K, la fonction écart est

$$(6) \quad \Delta W_1(T_{68}) = A_1 + B_1 T_{68} + C_1 T_{68}^2 + D_1 T_{68}^3.$$

Les coefficients de cette fonction sont déterminés d'après les écarts mesurés au point triple de l'hydrogène en équilibre, à la température de 17,042 K et au point d'ébullition de l'hydrogène en équilibre et d'après la dérivée première de la fonction écart au point d'ébullition de l'hydrogène en équilibre, telle qu'elle résulte de l'équation (7).

Entre 20,28 K et 54,361 K, la fonction écart est

$$(7) \quad \Delta W_2(T_{68}) = A_2 + B_2 T_{68} + C_2 T_{68}^2 + D_2 T_{68}^3.$$

Les coefficients de cette fonction sont déterminés d'après les écarts mesurés au point d'ébullition de l'hydrogène en équilibre, au point d'ébullition du néon et au point triple de l'oxygène et d'après la dérivée première de la fonction écart au point triple de l'oxygène, telle qu'elle résulte de l'équation (8).

Entre 54,361 K et 90,188 K, la fonction écart est

$$(8) \quad \Delta W_3(T_{68}) = A_3 + B_3 T_{68} + C_3 T_{68}^2.$$

Les coefficients de cette fonction sont déterminés d'après les écarts mesurés au point triple et au point de rosée de l'oxygène (ou au point triple de l'argon, voir note (d) au Tableau I) et d'après la dérivée première de la fonction écart au point de rosée de l'oxygène, telle qu'elle résulte de l'équation (9).

Entre 90,188 K et 273,15 K, la fonction écart est

$$(9) \quad \Delta W_4(T_{68}) = b_4(T_{68} - 273,15 \text{ K}) + e_4(T_{68} - 273,15 \text{ K})^3 (T_{68} - 373,15 \text{ K}).$$

Les coefficients de cette fonction sont déterminés d'après les écarts mesurés au point de rosée de l'oxygène (ou au point triple de l'argon, voir note (d) au Tableau I) et au point d'ébullition de l'eau (5).

b. *Domaine de 0 °C (273,15 K) à 630,74 °C*

Entre 0 °C et 630,74 °C, la température t_{68} est définie par la relation

$$(10) \quad t_{68} = t' + 0,045 \left(\frac{t'}{100 \text{ °C}} \right) \left(\frac{t'}{100 \text{ °C}} - 1 \right) \left(\frac{t'}{419,58 \text{ °C}} - 1 \right) \left(\frac{t'}{630,74 \text{ °C}} - 1 \right) \text{ °C},$$

dans laquelle t' est défini par l'équation

$$(11a) \quad t' = \left\{ \frac{1}{\alpha} [W(t') - 1] + \delta \left(\frac{t'}{100 \text{ °C}} \right) \left(\frac{t'}{100 \text{ °C}} - 1 \right) \right\} \text{ °C},$$

avec $W(t') = \frac{R(t')}{R(0 \text{ °C})}$. Les constantes $R(0 \text{ °C})$, α et δ sont déterminées d'après

(4) En fait, $d^2\Delta W_i(T_{68})/dT_{68}^2$ présente de petites discontinuités aux points de raccordement entre les diverses régions à 20,28 K, 54,361 K et 90,188 K; ces discontinuités sont si faibles que les deux premières (à 20,28 K et 54,361 K) ne sont pas décelables et que la troisième (à 90,188 K) est à peine décelable dans les mesures les plus précises des grandeurs thermophysiques.

(5) Si l'on emploie le point de congélation de l'étain (voir note (e) au Tableau I) comme point fixe au lieu du point d'ébullition de l'eau, on doit calculer $W(100 \text{ °C})$ pour le thermomètre à résistance de platine d'après les équations (10) et (11).

des mesures de la résistance au point triple de l'eau, au point d'ébullition de l'eau (ou au point de congélation de l'étain, voir la note (e) au Tableau I) et au point de congélation du zinc.

L'équation (11a) est équivalente à l'équation

$$(11b) \quad W(t') = 1 + At' + Bt'^2,$$

dans laquelle $A = \alpha(1 + \delta/100 \text{ }^\circ\text{C})$ et $B = -10^{-4}\alpha\delta \text{ }^\circ\text{C}^{-2}$.

c. *Domaine de 630,74 °C à 1 064,43 °C*

Entre 630,74 °C et 1 064,43 °C, la température t_{68} est définie par l'équation

$$(12) \quad E(t_{68}) = a + bt_{68} + ct_{68}^2,$$

dans laquelle $E(t_{68})$ est la force électromotrice d'un thermocouple étalon platine rhodié (10 % de rhodium)/platine, quand une soudure est à 0 °C et l'autre à la température t_{68} . Les coefficients a , b et c sont calculés d'après les valeurs de $E(t_{68})$ à 630,74 °C \pm 0,2 °C (température déterminée au moyen d'un thermomètre à résistance de platine) et aux points de congélation de l'argent ($t_{68}(\text{Ag})$) et de l'or ($t_{68}(\text{Au})$).

La pureté du fil de platine du thermocouple étalon doit être telle que la résistance réduite $W(100 \text{ }^\circ\text{C})$ ne soit pas inférieure à 1,392 0. Le fil de platine rhodié doit contenir nominalement en masse 10 % de rhodium et 90 % de platine. Le thermocouple doit être tel que les forces électromotrices $E(630,74 \text{ }^\circ\text{C})$, $E(t_{68}(\text{Ag}))$ et $E(t_{68}(\text{Au}))$ satisfassent aux relations suivantes :

$$(13) \quad E(t_{68}(\text{Au})) = 10\,334 \text{ } \mu\text{V} \pm 30 \text{ } \mu\text{V}$$

$$(14) \quad E(t_{68}(\text{Au})) - E(t_{68}(\text{Ag})) = 1\,186 \text{ } \mu\text{V} + 0,17 [E(t_{68}(\text{Au})) - 10\,334 \text{ } \mu\text{V}] \pm 3 \text{ } \mu\text{V}$$

$$(15) \quad E(t_{68}(\text{Au})) - E(630,74 \text{ }^\circ\text{C}) = 4\,782 \text{ } \mu\text{V} + 0,63 [E(t_{68}(\text{Au})) - 10\,334 \text{ } \mu\text{V}] \pm 5 \text{ } \mu\text{V}.$$

d. *Domaine des températures supérieures à 1 064,43 °C*

Au-dessus de 1 064,43 °C (1 337,58 K), la température $t_{68} (= T_{68} - 273,15 \text{ K})$ est définie par l'équation

$$(16) \quad \frac{L_\lambda(T_{68})}{L_\lambda(T_{68}(\text{Au}))} = \frac{\exp\left[\frac{c_2}{\lambda T_{68}(\text{Au})}\right] - 1}{\exp\left[\frac{c_2}{\lambda T_{68}}\right] - 1},$$

dans laquelle $L_\lambda(T_{68})$ et $L_\lambda(T_{68}(\text{Au}))$ sont les densités spectrales de la luminance énergétique du rayonnement d'un corps noir à la longueur d'onde dans le vide λ , respectivement à la température T_{68} et à celle du point de congélation de l'or, $T_{68}(\text{Au})$; $c_2 = 0,014\,388 \text{ m} \cdot \text{K}$.

En pratique, il n'est pas nécessaire de spécifier la valeur de la longueur d'onde à employer dans les mesures, car $T_{68}(\text{Au})$ est suffisamment proche de la température thermodynamique du point de congélation de l'or et la valeur attribuée à c_2 est suffisamment proche de la valeur vraie de la seconde constante de rayonnement de l'équation de Planck pour que toute influence de la longueur d'onde sur T_{68} soit négligeable.

III. Renseignements complémentaires

Les appareils, les méthodes et les modes opératoires décrits dans ce chapitre sont représentatifs d'une bonne pratique à l'époque actuelle.

1. *Thermomètre à résistance étalon*

Un thermomètre à résistance de platine construit et utilisé de la manière suivante présentera une stabilité convenable et fournira une échelle de température hautement reproductible.

L'élément sensible du thermomètre doit être une résistance à quatre bornes, en fil de platine, montée sans contrainte à l'intérieur d'un tube hermétiquement scellé. Un court tronçon de chaque conducteur aboutissant à l'élément résistant doit être en platine, afin d'éviter toute contamination et tout échauffement par effet Peltier. Les autres matériaux proches de l'élément résistant doivent être choisis de façon à réduire la contamination du platine. On devra remplir le tube scellé avec un gaz sec contenant suffisamment d'oxygène pour stabiliser les impuretés présentes sous forme d'oxydes.

L'élément résistant doit être recuit à une température supérieure à la température maximale prévue pour le fonctionnement du thermomètre et en tout cas au moins égale à 450 °C. Ainsi, on supprime la plupart des défauts du réseau cristallin et on stabilise l'état des impuretés chimiques dans le fil de platine. Il se peut que d'autres défauts soient introduits lors de l'utilisation du thermomètre, à cause de chocs mécaniques ou d'un refroidissement rapide (trempe) à partir de températures supérieures à 450 °C; ces défauts pourront être supprimés par un nouveau recuit.

Il est important que le thermomètre soit construit et utilisé de façon à réduire les erreurs dues aux fuites électriques dans les isolateurs, aux fuites thermiques par rayonnement et conduction et aux effets d'échauffement par le courant de mesure.

Un critère utile pour juger de la fiabilité d'un thermomètre est la constance de sa résistance et de sa résistance réduite, à des températures de référence choisies. La résistance au point triple de l'eau d'un thermomètre étalon doit varier de moins de l'équivalent de 1 mK (à 0 °C) par heure de fonctionnement au-dessus de 200 °C et de moins d'un quart de cette valeur au-dessous de 0 °C.

2. *Thermocouple étalon*

On fabrique des thermocouples étalons satisfaisants avec des fils d'un diamètre uniforme compris entre 0,35 et 0,65 mm. Les fils du thermocouple doivent être complètement recuits avant usage. A cette fin, il est nécessaire de chauffer le fil de platine à une température d'au moins 1 100 °C et le fil de platine rhodié à 1 450 °C. Si le recuit est effectué avant que les fils soient montés sur leurs isolateurs, le thermocouple achevé doit être à nouveau chauffé à une température d'au moins 1 100 °C jusqu'à ce que sa force électromotrice se soit stabilisée et que les défauts locaux d'homogénéité produits par les contraintes aient disparu. Lorsqu'un tel processus de recuit a été suivi, on obtient les limites de $\pm 3 \mu\text{V}$ et $\pm 5 \mu\text{V}$ données dans les équations (14) et (15) respectivement pour les différences

$$E(t_{68}(\text{Au})) - E(t_{68}(\text{Ag})) \quad \text{et} \quad E(t_{68}(\text{Au})) - E(630,74 \text{ °C}).$$

Toutefois, dans l'usage courant, ces précautions peuvent ne pas assurer une exactitude meilleure que $\pm 0,2 \text{ °C}$ à cause des modifications incessantes des inhomogénéités chimiques et physiques des fils dans les régions où existent des gradients de température.

3. *Pression*

On peut mesurer les pressions avec suffisamment d'exactitude soit avec une balance de pression, soit au moyen d'une colonne de mercure. La masse volumique

moyenne du mercure pur à t_{68} dans une colonne barométrique qui équilibre la pression p mesurée est donnée avec une exactitude suffisante, dans le domaine de température compris entre 0 °C et 40 °C et pour les pressions qui se rapportent à ces mesures, par la relation :

$$(17) \varrho\left(t_{68}, \frac{p}{2}\right) = \frac{\varrho(20\text{ °C}, p_0)}{[1 + A(t_{68} - 20\text{ °C}) + B(t_{68} - 20\text{ °C})^2] \times \left[1 - \chi\left(\frac{p}{2} - p_0\right)\right]}$$

où $A = 18\,115 \times 10^{-8}\text{ °C}^{-1}$

$$B = 0,8 \times 10^{-8}\text{ °C}^{-2}$$

$$\chi = 4 \times 10^{-11}\text{ Pa}^{-1};$$

$\varrho(20\text{ °C}, p_0) = 13\,545,87\text{ kg/m}^3$ est la masse volumique du mercure pur à $t_{68} = 20\text{ °C}$ sous la pression $p_0 = 101\,325\text{ Pa}$ (1 atmosphère normale).

On peut obtenir une valeur suffisamment exacte de l'accélération locale due à la pesanteur en se servant du Réseau Gravimétrique International Unifié 1971 (IGSN-71) de l'Union Géodésique et Géophysique Internationale ⁽⁶⁾.

Les pressions hydrostatiques à l'intérieur des enceintes à point fixe ont une influence, faible mais significative, sur la température (voir Tableau V, p. A 17).

4. Point triple de l'eau

On peut réaliser la température du point triple de l'eau dans des ampoules de verre scellées contenant seulement de l'eau d'une grande pureté, dont la composition isotopique est essentiellement celle de l'eau des océans. A une profondeur h au-dessous de la surface liquide-vapeur, la température d'équilibre t_{68} entre la glace et l'eau liquide est donnée par

$$(18) \quad t_{68} = A + Bh$$

où $A = 0,01\text{ °C}$ et $B = -7 \times 10^{-4}\text{ m}^{-1}\text{ °C}$. La méthode recommandée pour la préparation d'une cellule à point triple consiste à former une épaisse couche de glace autour du puits du thermomètre en refroidissant de l'intérieur, puis à faire fondre une partie suffisante de cette couche de glace, également à partir de l'intérieur, pour produire une nouvelle surface de contact eau-glace au voisinage du puits. Au cours des premières heures qui suivent la préparation de la cellule, la température mesurée dans le puits du thermomètre s'élève assez rapidement de quelques dix-millièmes de kelvin pour se stabiliser après un à trois jours. On doit protéger la cellule du rayonnement. Une cellule préparée de cette façon et conservée dans un bain de glace est capable de maintenir une température constante à 0,1 mK près pendant plusieurs mois. Les différences entre les températures de cellules convenablement construites, de provenances diverses, ne doivent pas dépasser 0,2 mK.

Les variations de la composition isotopique de l'eau naturelle sont telles qu'elles entraînent des différences décelables dans la température du point triple. L'eau des océans contient environ 0,16 mmol de ^2H par mole de ^1H et 0,4 mmol de ^{17}O et 2 mmol de ^{18}O par mole de ^{16}O . Cette proportion d'isotopes lourds est pratiquement la plus élevée que l'on trouve dans l'eau naturelle. Les eaux continentales superficielles contiennent normalement environ 0,15 mmol de ^2H par mole de ^1H ; l'eau provenant des neiges polaires ne contient parfois que 0,1 mmol de ^2H par mole de ^1H .

Les opérations de purification de l'eau peuvent modifier légèrement sa composition isotopique, et la composition isotopique à une surface de contact eau-glace dépend quelque peu de la technique de congélation.

⁽⁶⁾ Procès-Verbaux C.I.P.M., 40, 1972, p. 29. Recommandation 2 (CI-1972).

Une augmentation de 10 μmol de ^2H par mole de ^1H correspond à une augmentation de la température du point triple de 40 μK ; c'est la différence entre les températures des points triples obtenus avec l'eau des océans et avec l'eau que l'on trouve normalement à la surface des continents. La plus grande différence entre les températures du point triple des eaux naturelles est 0,25 mK.

5. Point triple, point 17,042 K et point d'ébullition de l'hydrogène en équilibre

L'hydrogène a deux variétés moléculaires, désignées par les préfixes *ortho* et *para*. La composition du mélange ortho-para en équilibre dépend de la température. A la température ambiante elle est de 75 % d'orthohydrogène et de 25 % de parahydrogène (« hydrogène normal »). Lors de la liquéfaction, la composition change lentement avec le temps et il y a des changements correspondants dans les propriétés physiques. Au point d'ébullition, la composition d'équilibre est de 0,21 % d'orthohydrogène et de 99,79 % de parahydrogène et la température est plus basse que celle de l'hydrogène normal d'environ 0,12 K. L'expression « hydrogène en équilibre » signifie dans ce document que l'hydrogène a sa composition ortho-para d'équilibre à la température considérée. Afin d'éviter dans la réalisation de ces points fixes des erreurs dues à une composition indéterminée, il est conseillé qu'un catalyseur tel que l'hydroxyde ferrique activé soit présent en permanence pour maintenir la composition d'équilibre de l'hydrogène.

Par suite du fractionnement des isotopes, il y a une différence d'environ 0,4 mK entre le point de rosée (fraction liquide infiniment petite) et le point d'ébullition (fraction vapeur infiniment petite) de l'hydrogène en équilibre. La composition isotopique normale de l'hydrogène est 0,15 mmol de ^2H par mole de ^1H .

Pour le domaine de 13,81 K à 23 K, l'équation suivante donne la température T_{68} en fonction de la tension de vapeur de l'hydrogène en équilibre, avec une exactitude de quelques millikelvins

$$(19) \quad \lg \frac{p}{p_0} = A + \frac{B}{T_{68}} + CT_{68} + DT_{68}^2$$

où

$$\begin{aligned} A &= 1,711\ 466 & B &= -44,010\ 46\ \text{K} \\ C &= 0,023\ 590\ 9\ \text{K}^{-1} & D &= -0,000\ 048\ 017\ \text{K}^{-2}. \end{aligned}$$

6. Point d'ébullition du néon

La composition isotopique normale du néon est de 2,7 mmol de ^{21}Ne et 92 mmol de ^{22}Ne pour 0,905 mole de ^{20}Ne . Comme pour l'hydrogène, il y a une différence d'environ 0,4 mK entre le point de rosée et le point d'ébullition du néon normal.

Pour le domaine de 27 K à 27,2 K, l'équation suivante donne la température T_{68} en fonction de la tension de vapeur du néon, avec une exactitude de $\pm 0,2$ mK

$$(20) \quad T_{68} = \left[27,102 + 3,314\ 4 \left(\frac{p}{p_0} - 1 \right) - 1,24 \left(\frac{p}{p_0} - 1 \right)^2 + 0,74 \left(\frac{p}{p_0} - 1 \right)^3 \right] \text{K}.$$

7. Point triple de l'argon

Des impuretés telles que N_2 , CO , O_2 et CH_4 , dans la proportion de 1×10^{-6} , modifient la température d'équilibre de quantités atteignant $-30\ \mu\text{K}$.

8. Point triple et point de rosée de l'oxygène

On préfère dans ce cas le point de rosée au point d'ébullition parce que le premier est relativement indépendant du taux de contamination en substances volatiles.

Il faut prendre grand soin d'éviter la contamination par l'argon, car celle-ci peut abaisser le point de rosée sans modifier de façon appréciable la différence

de température entre le point de rosée et le point d'ébullition, différence que l'on utilise généralement comme une indication approximative du taux d'impuretés.

Pour le domaine de 90,1 K à 90,3 K, l'équation suivante donne la température T_{68} en fonction de la tension de vapeur de l'oxygène, avec une exactitude de $\pm 0,1$ mK

$$(21) \quad T_{68} = \left[90,188 + 9,5648 \left(\frac{p}{p_0} - 1 \right) - 3,69 \left(\frac{p}{p_0} - 1 \right)^2 + 2,22 \left(\frac{p}{p_0} - 1 \right)^3 \right] \text{K.}$$

9. Point d'ébullition de l'eau

Pour le domaine de 99,9 °C à 100,1 °C, l'équation suivante donne la température t_{68} en fonction de la tension de vapeur de l'eau, avec une exactitude de $\pm 0,1$ mK

$$(22) \quad t_{68} = \left[100 + 28,0216 \left(\frac{p}{p_0} - 1 \right) - 11,642 \left(\frac{p}{p_0} - 1 \right)^2 + 7,1 \left(\frac{p}{p_0} - 1 \right)^3 \right] \text{°C.}$$

La composition isotopique doit être celle de l'eau des océans. Une modification de la proportion de ^2H dans l'eau entraîne une modification de la température du point d'ébullition de l'eau dans le même sens que pour la température du point triple, mais environ trois fois plus faible.

10. Points de congélation de l'étain et du zinc

On peut réaliser des températures très reproductibles en observant le palier de la courbe de la température en fonction du temps pendant la congélation lente de métaux très purs.

Dans la détermination des points de congélation, on procède de façon à être sûr que l'élément sensible du thermomètre se trouve en contact aussi étroit que possible et en équilibre thermique avec une surface de contact solide-liquide; peu après le début de la formation de cristaux (germination) il doit y avoir soit une enveloppe solide complète s'épaississant à partir de la paroi du creuset, soit un manchon solide complet se formant sur le puits du thermomètre.

La température d'équilibre entre le métal solide et liquide varie légèrement avec la pression. Les grandeurs de ces variations sont données au Tableau V (p. A 17).

11. Points de congélation de l'argent et de l'or

On peut réaliser les températures d'équilibre entre les phases solide et liquide de l'argent et de l'or dans des creusets fermés en graphite artificiel très pur, en matière céramique ou en silice vitreuse. Le point de congélation de l'argent est abaissé par des quantités relativement petites d'oxygène qui peuvent se dissoudre dans la phase liquide. Par conséquent, une atmosphère inerte ou réductrice doit entourer l'argent en fusion.

12. Températures de référence secondaires

En plus des points fixes de définition de l'E.I.P.T.-68 donnés au Tableau I, on dispose d'autres températures de référence. Certaines sont données au Tableau VI (p. A 18).

ANNEXE

Historique de la mise au point des Échelles Internationales de Température

En 1927, on a adopté l'Échelle Internationale de Température pour surmonter les difficultés pratiques de la réalisation directe des températures thermodynamiques par la thermométrie à gaz et pour unifier les échelles nationales de température existantes. C'est la 7^e Conférence Générale des Poids et Mesures qui a introduit cette Échelle dans le but de fournir une échelle pratique de température, reproductible avec facilité et avec précision et aussi proche que possible de la température thermodynamique telle qu'on pouvait la déterminer à l'époque.

L'Échelle Internationale de Température de 1927 a été révisée en 1948. Les procédés expérimentaux de réalisation de l'Échelle Internationale de Température demeuraient à peu près les mêmes, mais on apportait à la définition de l'Échelle deux modifications entraînant des changements appréciables dans les valeurs numériques assignées aux températures mesurées. Le changement de la valeur de la température du point de congélation de l'argent de 960,5 °C à 960,8 °C modifiait les températures mesurées avec le thermocouple étalon (domaine de 630 °C à 1 063 °C); la différence maximale était d'environ 0,4 K vers 800 °C. L'adoption de la valeur 0,014 38 m · K, au lieu de 0,014 32 m · K, pour la constante de rayonnement c_2 modifiait toutes les températures supérieures au point de congélation de l'or, tandis que l'emploi de la formule du rayonnement de Planck, à la place de la formule de Wien, affectait les températures très élevées. Les températures supérieures au point de congélation de l'or étaient diminuées, par exemple de 2,2 K à 1 500 °C et de 6 K à 2 000 °C. Outre l'approbation de cette révision de 1948 de l'Échelle Internationale de Température, la 9^e Conférence Générale des Poids et Mesures décida, afin d'assurer l'uniformité internationale de la nomenclature, d'abandonner le mot « centigrade » et son équivalent « centésimal » en faveur du mot « Celsius ». Ainsi le symbole °C prit dès lors la signification « degré Celsius ».

La 11^e Conférence Générale des Poids et Mesures adopta une version modifiée de l'Échelle de 1948 sous le nouveau titre « Échelle Internationale Pratique de Température de 1948 (édition amendée de 1960) », le titre abrégé devenant E.I.P.T.-48. Toutes les valeurs numériques des températures restaient les mêmes qu'en 1948. La nouvelle édition comportait la nouvelle définition du kelvin (alors degré Kelvin). On a également reconnu à cette époque que l'E.I.P.T. ne représentait plus les températures thermodynamiques aussi étroitement que possible et le texte comportait un chapitre sur les différences.

L'E.I.P.T.-68 a été conçue pour ramener ces différences dans les limites de l'exactitude avec laquelle on connaissait alors (1967) les températures thermodynamiques et pour étendre l'Échelle vers les basses températures.

L'E.I.P.T.-68 diffère de l'E.I.P.T.-48 par les points suivants. La limite inférieure de l'Échelle est maintenant 13,81 K au lieu de 90,18 K. Les valeurs assignées à un certain nombre de points fixes de définition ont été modifiées, les seuls points demeurant numériquement inchangés par rapport à l'E.I.P.T.-48 étant le point triple de l'eau, qui est fixé de façon permanente par définition, et le point d'ébullition de l'eau. Les instruments étalons demeurent les mêmes qu'auparavant, mais le thermomètre à résistance de platine doit maintenant avoir une résistance réduite $W(100\text{ }^{\circ}\text{C})$ d'au moins 1,392 5 au lieu de 1,392 0. Dans le domaine de température compris entre 90,188 K et 273,15 K, on ne se sert plus, pour l'interpolation, de l'équation de Callendar-Van Dusen; à sa place, on emploie la fonction de référence $W_{\text{CCT-68}}(T_{68})$. Au-dessus de 0 °C, l'équation de Callendar a été modifiée de telle sorte que les valeurs interpolées de la température soient plus étroitement conformes aux valeurs de la température thermodynamique. Enfin, on a introduit une valeur plus exacte de c_2 , soit 0,014 388 m·K, dans l'équation de Planck pour déterminer les températures supérieures au point de congélation de l'or. Les conséquences de tous ces changements sont résumées au Tableau VII (p. A 21).

Dans le domaine de 13,81 K à 90,188 K, l'E.I.P.T.-68 est fondée sur la moyenne de quatre « échelles nationales » et sur les « meilleures » températures choisies pour les points fixes de définition. Ces échelles nationales sont chacune définies au moyen de thermomètres à résistance de platine étalonnés d'après le thermomètre à gaz et sont très bien reproductibles.

Les différences entre l'E.I.P.T.-68 et les échelles nationales sont publiées dans *Metrologia*, 5, N° 2, 1969, p. 47.

Le texte actuel est une version amendée du texte de 1968 de l'E.I.P.T.-68. Les valeurs attribuées aux points fixes de définition et les méthodes d'interpolation demeurent inchangées. Mises à part quelques améliorations mineures de rédaction, le texte actuel diffère du texte de 1968 sur les points suivants :

Le point triple de l'argon a été introduit comme possibilité de remplacement du point d'ébullition de l'oxygène.

La fonction de référence $W_{\text{CCT-68}}$, pour le domaine au-dessous de 0 °C, est donnée sous une forme améliorée [équation (5) qui remplace l'équation (22) du texte de 1968]. Les valeurs de T_{68} déduites des deux équations sont pratiquement identiques (à $\pm 10\text{ }\mu\text{K}$ près) et l'on peut encore utiliser la formulation du texte de 1968.

On a changé les critères de sélection des thermocouples [équations (13) à (15) dans le texte actuel].

On a éliminé quelques contradictions et quelques imperfections dans les renseignements complémentaires (chapitre III) et on y a ajouté certains autres renseignements.

On a modifié les valeurs de quelques points de référence secondaires (Tableau VI, p. A 18).

On a supprimé le tableau qui, dans la version originale de l'E.I.P.T.-68, donnait les incertitudes estimées sur les valeurs assignées aux points fixes de définition par rapport à leur température thermodynamique. Ces incertitudes avaient été évaluées sur la base des meilleures données dont on disposait au moment où l'E.I.P.T.-68 a été élaborée. Depuis lors, de nouveaux travaux ont montré que l'E.I.P.T.-68 s'écarte vraisemblablement de la température thermodynamique, au-dessus de 0,01 °C, à la fois aux points fixes de définition et entre ces points, de quantités supérieures aux incertitudes indiquées. Des estimations

révisées de ces incertitudes seront donc publiées de temps en temps par le Comité Consultatif de Thermométrie (C.C.T.).

Un certain nombre de mesures récentes indiquent que les températures T_{58} et T_{62} , données respectivement par l'« Échelle ^4He 1958 » et l'« Échelle ^3He 1962 », diffèrent notablement des températures thermodynamiques correspondantes. On a par conséquent supprimé le texte par lequel on recommandait l'utilisation de ces échelles pour les basses températures. On pense que le C.C.T. recommandera pour les basses températures l'emploi d'autres échelles qui seront publiées dans *Metrologia*.

TABLEAU I

Points fixes de définition de l'E.I.P.T.-68 (a)

État d'équilibre	Valeur assignée de la Température Internationale Pratique	
	$T_{68}(\text{K})$	$t_{68}(^{\circ}\text{C})$
Équilibre entre les phases solide, liquide et vapeur de l'hydrogène en équilibre (point triple de l'hydrogène en équilibre) (b)	13,81	— 259,34
Équilibre entre les phases liquide et vapeur de l'hydrogène en équilibre à une pression de 33 330,6 Pa (25/76 atmosphère normale) (b, c)	17,042	— 256,108
Équilibre entre les phases liquide et vapeur de l'hydrogène en équilibre (point d'ébullition de l'hydrogène en équilibre) (b, c)	20,28	— 252,87
Équilibre entre les phases liquide et vapeur du néon (point d'ébullition du néon) (c)	27,102	— 246,048
Équilibre entre les phases solide, liquide et vapeur de l'oxygène (point triple de l'oxygène)	54,361	— 218,789
Équilibre entre les phases solide, liquide et vapeur de l'argon (point triple de l'argon) (d)	83,798	— 189,352
Équilibre entre les phases liquide et vapeur de l'oxygène (point de rosée de l'oxygène) (c, d)	90,188	— 182,962
Équilibre entre les phases solide, liquide et vapeur de l'eau (point triple de l'eau)	273,16	0,01
Équilibre entre les phases liquide et vapeur de l'eau (point d'ébullition de l'eau) (e)	373,15	100
Équilibre entre les phases solide et liquide de l'étain (point de congélation de l'étain) (e)	505,118 1	231,968 1
Équilibre entre les phases solide et liquide du zinc (point de congélation du zinc)	692,73	419,58
Équilibre entre les phases solide et liquide de l'argent (point de congélation de l'argent)	1 235,08	961,93
Équilibre entre les phases solide et liquide de l'or (point de congélation de l'or)	1 337,58	1 064,43

(a) Sauf pour les points triples et pour un point de l'hydrogène en équilibre (17,042 K), les valeurs assignées des températures le sont pour des états d'équilibre sous la pression $p_0 = 101\,325$ Pa (1 atmosphère normale). L'influence de petits écarts par rapport à cette pression est donnée au Tableau V. Dans les cas où une composition isotopique différente risque de modifier de façon significative la température du point fixe, on doit utiliser la composition spécifiée au chapitre III.

(b) Le terme hydrogène en équilibre est défini au paragraphe III, 5.

(c) Le fractionnement des isotopes ou des impuretés dicte l'emploi des points d'ébullition (fraction vapeur infiniment petite) pour l'hydrogène et le néon et du point de rosée (fraction liquide infiniment petite) pour l'oxygène (voir chapitre III).

(d) On peut utiliser le point triple de l'argon à la place du point de rosée de l'oxygène.

(e) Le point de congélation de l'étain [$t' = 231,929\,2$ °C, voir équation (10)] peut être utilisé à la place du point d'ébullition de l'eau.

TABLEAU II

Coefficients a_j de la fonction de référence pour les thermomètres à résistance de platine dans le domaine compris entre 13,81 K et 273,15 K

j	a_j	j	a_j
0	38,592 76	10	239,502 85
1	43,448 37	11	524,649 44
2	39,108 87	12	— 319,799 81
3	38,693 52	13	— 787,606 86
4	32,568 83	14	179,547 82
5	24,701 58	15	700,428 32
6	53,038 28	16	29,486 66
7	77,357 67	17	— 335,243 78
8	— 95,751 03	18	— 77,256 60
9	— 223,528 92	19	66,762 92
		20	24,449 11

A $T_{68} = 373,15$ K, la valeur de $W_{\text{CCT-68}}(T_{68})$ est 1,392 596 68. A $T_{68} = 273,15$ K, la fonction de référence $W_{\text{CCT-68}}(T_{68})$, sa dérivée première et sa dérivée seconde ont respectivement les mêmes valeurs que la fonction $W(t_{68})$, définie par les équations (10) et (11) pour $\alpha = 3,925\,966\,8 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ et $\delta = 1,496\,334 \text{ } ^\circ\text{C}$, sa dérivée première et sa dérivée seconde.

On peut obtenir auprès du Bureau International des Poids et Mesures, F-92310 SÈVRES, France, une table de cette fonction de référence, suffisamment détaillée pour permettre une interpolation linéaire avec une exactitude de 0,1 mK. Un extrait de cette table est donné au Tableau III.

*Valuers de $W_{\text{GCT-68}}(T_{68})$, selon l'équation (5),
pour des valeurs entières de T_{68}*

T_{68} K	$W_{\text{GCT-68}}(T_{68})$	T_{68} K	$W_{\text{GCT-68}}(T_{68})$	T_{68} K	$W_{\text{GCT-68}}(T_{68})$	T_{68} K	$W_{\text{GCT-68}}(T_{68})$
13	0,001 230 63						
14	0,001 459 74						
15	0,001 745 42	80	0,199 582 13	145	0,477 696 81	210	0,745 730 27
16	0,002 094 75	81	0,203 917 13	146	0,481 884 56	211	0,749 798 46
17	0,002 515 12	82	0,208 254 41	147	0,486 069 86	212	0,753 865 19
18	0,003 014 29	83	0,212 593 49	148	0,490 252 74	213	0,757 930 48
19	0,003 599 62	84	0,216 933 90	149	0,494 433 23	214	0,761 994 32
20	0,004 277 80	85	0,221 275 23	150	0,498 611 35	215	0,766 056 74
21	0,005 054 94	86	0,225 617 10	151	0,502 787 12	216	0,770 117 73
22	0,005 936 68	87	0,229 959 15	152	0,506 960 59	217	0,774 177 30
23	0,006 928 05	88	0,234 301 04	153	0,511 131 76	218	0,778 235 46
24	0,008 033 15	89	0,238 642 47	154	0,515 300 67	219	0,782 292 21
25	0,009 255 05	90	0,242 983 17	155	0,519 467 34	220	0,786 347 56
26	0,010 595 85	91	0,247 322 86	156	0,523 631 80	221	0,790 401 52
27	0,012 056 90	92	0,251 661 33	157	0,527 794 06	222	0,794 454 09
28	0,013 639 02	93	0,255 998 34	158	0,531 954 16	223	0,798 505 27
29	0,015 342 62	94	0,260 333 69	159	0,536 112 11	224	0,802 555 08
30	0,017 167 67	95	0,264 667 22	160	0,540 267 95	225	0,806 603 51
31	0,019 113 64	96	0,268 998 74	161	0,544 421 68	226	0,810 650 58
32	0,021 179 46	97	0,273 328 12	162	0,548 573 33	227	0,814 696 29
33	0,023 363 45	98	0,277 655 20	163	0,552 722 93	228	0,818 740 64
34	0,025 663 36	99	0,281 979 88	164	0,556 870 49	229	0,822 783 64
35	0,028 076 45	100	0,286 302 04	165	0,561 016 04	230	0,826 825 29
36	0,030 599 53	101	0,290 621 57	166	0,565 159 59	231	0,830 865 61
37	0,033 229 13	102	0,294 938 40	167	0,569 301 16	232	0,834 904 59
38	0,035 961 58	103	0,299 252 43	168	0,573 440 78	233	0,838 942 24
39	0,038 793 05	104	0,303 563 60	169	0,577 578 46	234	0,842 978 57
40	0,041 719 69	105	0,307 871 85	170	0,581 714 21	235	0,847 013 57
41	0,044 737 61	106	0,312 177 13	171	0,585 848 06	236	0,851 047 26
42	0,047 842 92	107	0,316 479 38	172	0,589 980 02	237	0,855 079 64
43	0,051 031 77	108	0,320 778 58	173	0,594 110 12	238	0,859 110 71
44	0,054 300 35	109	0,325 074 68	174	0,598 238 36	239	0,863 140 48
45	0,057 644 87	110	0,329 367 66	175	0,602 364 76	240	0,867 168 95
46	0,061 061 59	111	0,333 657 50	176	0,606 489 34	241	0,871 196 12
47	0,064 546 82	112	0,337 944 18	177	0,610 612 12	242	0,875 222 01
48	0,068 096 93	113	0,342 227 69	178	0,614 733 10	243	0,879 246 61
49	0,071 708 34	114	0,346 508 02	179	0,618 852 30	244	0,883 269 93
50	0,075 377 58	115	0,350 785 17	180	0,622 969 74	245	0,887 291 97
51	0,079 101 22	116	0,355 059 14	181	0,627 085 43	246	0,891 312 73
52	0,082 875 95	117	0,359 329 93	182	0,631 199 38	247	0,895 332 23
53	0,086 698 57	118	0,363 597 55	183	0,635 311 61	248	0,899 350 46
54	0,090 565 98	119	0,367 862 01	184	0,639 422 13	249	0,903 367 42
55	0,094 475 19	120	0,372 123 32	185	0,643 530 95	250	0,907 383 13
56	0,098 423 37	121	0,376 381 49	186	0,647 638 08	251	0,911 397 57
57	0,102 407 77	122	0,380 636 54	187	0,651 743 54	252	0,915 410 77
58	0,106 425 83	123	0,384 888 49	188	0,655 847 33	253	0,919 422 71
59	0,110 475 06	124	0,389 137 36	189	0,659 949 47	254	0,923 433 40
60	0,114 553 15	125	0,393 383 17	190	0,664 049 98	255	0,927 442 85
61	0,118 657 89	126	0,397 625 94	191	0,668 148 85	256	0,931 451 05
62	0,122 787 20	127	0,401 865 69	192	0,672 246 10	257	0,935 458 02
63	0,126 939 14	128	0,406 102 45	193	0,676 341 74	258	0,939 463 74
64	0,131 111 86	129	0,410 336 25	194	0,680 435 78	259	0,943 468 23
65	0,135 303 64	130	0,414 567 11	195	0,684 528 24	260	0,947 471 48
66	0,139 512 87	131	0,418 795 06	196	0,688 619 11	261	0,951 473 51
67	0,143 738 04	132	0,423 020 13	197	0,692 708 41	262	0,955 474 29
68	0,147 977 72	133	0,427 242 34	198	0,696 796 15	263	0,959 473 85
69	0,152 230 60	134	0,431 461 73	199	0,700 882 34	264	0,963 472 19
70	0,156 495 43	135	0,435 678 32	200	0,704 966 98	265	0,967 469 29
71	0,160 771 07	136	0,439 892 14	201	0,709 050 09	266	0,971 465 17
72	0,165 056 44	137	0,444 103 22	202	0,713 131 67	267	0,975 459 82
73	0,169 350 52	138	0,448 311 59	203	0,717 211 73	268	0,979 453 25
74	0,173 652 39	139	0,452 517 29	204	0,721 290 28	269	0,983 445 45
75	0,177 961 17	140	0,456 720 33	205	0,725 367 32	270	0,987 436 43
76	0,182 276 04	141	0,460 920 75	206	0,729 442 87	271	0,991 426 18
77	0,186 596 26	142	0,465 118 58	207	0,733 516 94	272	0,995 414 71
78	0,190 921 11	143	0,469 313 85	208	0,737 589 52	273	0,999 402 01
79	0,195 249 93	144	0,473 506 58	209	0,741 660 63		
80	0,199 582 13	145	0,477 696 81	210	0,745 730 27		

TABLEAU IV

Valeurs de $W_{\text{GCT-88}}(T_{68})$, selon les données portées au Tableau II, aux températures des points fixes

Point fixe	$T_{68}(\text{K})$	$t_{68}(^{\circ}\text{C})$	$W_{\text{GCT-88}}$
Point triple de l'hydrogène en équilibre	13,81	— 259,34	0,001 412 08
Point 17,042 K de l'hydrogène en équilibre	17,042	— 256,108	0,002 534 45
Point d'ébullition de l'hydrogène en équilibre	20,28	— 252,87	0,004 485 17
Point d'ébullition du néon	27,102	— 246,048	0,012 212 72
Point triple de l'oxygène	54,361	— 218,789	0,091 972 53
Point triple de l'argon	83,798	— 189,352	0,216 057 05
Point de rosée de l'oxygène	90,188	— 182,962	0,243 799 12
	273,15	0	1
Point d'ébullition de l'eau	373,15	100	1,392 596 68

TABLEAU V

Influence de la pression sur les températures de quelques points fixes de définition et points de référence secondaires

Substances	$T_{68}(\text{K})$	Coefficient de pression	
		millikelvins par atmosphère normale	millikelvins par mètre de liquide
	Valeur attribuée à la température d'équilibre		
Hydrogène en équilibre	13,81*	34	0,25
Oxygène	54,361*	12	1,5
Argon	83,798*	25	3,3
Eau	273,16*	— 7,5	— 0,7
Étain	505,118 1**	3,3	2,2
Zinc	692,73**	4,3	2,7
Argent	1 235,08**	6,0	5,4
Or	1 337,58**	6,1	10
	Valeur recommandée de la température d'équilibre		
Néon	24,561*	16	1,9
Mercure	234,314**	5,4	7,1
Indium	429,784**	4,9	3,3
Bismuth	544,592**	— 3,5	— 3,4
Cadmium	594,258**	6,2	4,8
Plomb	600,652**	8,0	8,2
Antimoine	903,905**	0,85	0,5

*Point triple.

**Point de congélation sous 101 325 Pa (1 atmosphère normale).

TABLEAU VI

Points de référence secondaires ^(a)

État d'équilibre ^(b)	Température Internationale Pratique	
	T_{68} (K)	t_{68} (°C)
Équilibre entre les phases solide, liquide et vapeur de l'hydrogène normal (point triple de l'hydrogène normal)	13,956	— 259,194
Équilibre entre les phases liquide et vapeur de l'hydrogène normal (point d'ébullition de l'hydrogène normal)	20,397	— 252,753
(23) $\lg \frac{p}{p_0} = A + \frac{B}{T_{68}} + CT_{68} + DT_{68}^2$		
$A = 1,734\ 791$ $B = -44,623\ 68\ \text{K}$		
$C = 0,023\ 186\ 9\ \text{K}^{-1}$ $D = -0,000\ 048\ 017\ \text{K}^{-2}$		
pour le domaine de température compris entre 13,956 K et 30 K.		
Équilibre entre les phases solide, liquide et vapeur du néon (point triple du néon)	24,561	— 248,589
Équilibre entre les phases liquide et vapeur du néon		
(24) $\lg \frac{p}{p_0} = A + \frac{B}{T_{68}} + CT_{68} + DT_{68}^2$		
$A = 4,611\ 52$ $B = -106,385\ 1\ \text{K}$		
$C = -0,036\ 833\ 1\ \text{K}^{-1}$ $D = 4,248\ 92 \times 10^{-4}\ \text{K}^{-2}$		
pour le domaine de température compris entre 24,561 K et 40 K.		
Équilibre entre les phases solide, liquide et vapeur de l'azote (point triple de l'azote)	63,146	— 210,004
Équilibre entre les phases liquide et vapeur de l'azote (point d'ébullition de l'azote)	77,344	— 195,806
(25) $\lg \frac{p}{p_0} = A + \frac{B}{T_{68}} + C \lg \frac{T_{68}}{T_0} + DT_{68} + ET_{68}^2$		
$A = 5,893\ 271$ $B = -403,960\ 46\ \text{K}$		
$C = -2,366\ 8$ $D = -0,014\ 281\ 5\ \text{K}^{-1}$		
$E = 72,587\ 2 \times 10^{-6}\ \text{K}^{-2}$ $T_0 = 77,344\ \text{K}$		
pour le domaine de température compris entre 63,146 K et 84 K.		
Équilibre entre les phases liquide et vapeur de l'argon (point d'ébullition de l'argon)	87,294	— 185,856

^(a) Les températures indiquées dans ce tableau sont les meilleures qui soient disponibles au moment de la compilation. A l'heure actuelle, il n'est pas possible d'attribuer des niveaux d'exactitude à ces températures; les erreurs peuvent être de quelques unités du dernier chiffre inscrit. On envisage de faire des évaluations de l'exactitude de ces températures et de les publier de temps en temps sous les auspices du Comité International des Poids et Mesures.

^(b) Dans cette table, les états d'équilibre s'entendent à la pression $p_0 = 101\ 325\ \text{Pa}$ (1 atmosphère normale), sauf pour les points triples et dans les cas où un domaine de pression est explicitement autorisé.

État d'équilibre (b)

Température Internationale
Pratique
 $T_{68}(K)$ $t_{68}(^{\circ}C)$

Équilibre entre les phases liquide et vapeur de l'oxygène

$$(26) \lg \frac{p}{p_0} = A + \frac{B}{T_{68}} + C \lg \frac{T_{68}}{T_0} + DT_{68} + ET_{68}^2$$

$$A = 5,961\ 546$$

$$B = -467,455\ 76\ K$$

$$C = -1,664\ 512$$

$$D = -0,013\ 213\ 01\ K^{-1}$$

$$E = 50,804\ 1 \times 10^{-8}\ K^{-2}$$

$$T_0 = 90,188\ K$$

pour le domaine de température compris entre 54,361 K et 94 K.

Équilibre entre les phases solide et vapeur de l'anhydride carbonique (point de sublimation de l'anhydride carbonique) ...

194,674

— 78,476

$$(27) \ T_{68} = \left[194,674 + 12,264 \left(\frac{p}{p_0} - 1 \right) - 9,15 \left(\frac{p}{p_0} - 1 \right)^2 \right] K$$

pour le domaine de température compris entre 194 K et 195 K.

Équilibre entre les phases solide et liquide du mercure (point de congélation du mercure) (c)

234,314

— 38,836

Équilibre entre la glace et l'eau saturée d'air (point de congélation de l'eau) (d)

273,15

0

Équilibre entre les phases solide, liquide et vapeur du phénoxybenzène (oxyde de diphenyle) (point triple du phénoxybenzène)

300,02

26,87

Équilibre entre les phases solide, liquide et vapeur de l'acide benzoïque (point triple de l'acide benzoïque)

395,52

122,37

Équilibre entre les phases solide et liquide de l'indium (point de congélation de l'indium) (c)

429,781

156,634

Équilibre entre les phases solide et liquide du bismuth (point de congélation du bismuth) (c)

544,592

271,442

Équilibre entre les phases solide et liquide du cadmium (point de congélation du cadmium) (c)

594,258

321,108

Équilibre entre les phases solide et liquide du plomb (point de congélation du plomb) (c)

600,652

327,502

Équilibre entre les phases liquide et vapeur du mercure (point d'ébullition du mercure)

629,81

356,66

$$(28) \ t_{68} = \left[356,66 + 55,552 \left(\frac{p}{p_0} - 1 \right) - 23,03 \left(\frac{p}{p_0} - 1 \right)^2 + 14,0 \left(\frac{p}{p_0} - 1 \right)^3 \right] ^{\circ}C$$

pour $p = 90\ kPa$ à $104\ kPa$.

(c) Voir Tableau V pour l'influence des variations de pression sur ce point de congélation.

(d) Le point de glace est une approximation très voisine de la température définie comme étant 10 mK au-dessous du point triple de l'eau.

État d'équilibre (b)

Température Internationale
Pratique $T_{68}(K)$ $t_{68}(^{\circ}C)$

Équilibre entre les phases liquide et vapeur du soufre (point d'ébullition du soufre)	717,824	444,674
---	---------	---------

$$(29) \quad t_{68} = \left[444,674 + 69,010 \left(\frac{p}{p_0} - 1 \right) - 27,48 \left(\frac{p}{p_0} - 1 \right)^2 + 19,14 \left(\frac{p}{p_0} - 1 \right)^3 \right] ^{\circ}C$$

pour $p = 90 \text{ kPa}$ à 104 kPa .

Équilibre entre les phases solide et liquide de l'eutectique cuivre-aluminium	821,41	548,26
Équilibre entre les phases solide et liquide de l'antimoine (point de congélation de l'antimoine) (c)	903,905	630,755
Équilibre entre les phases solide et liquide de l'aluminium (point de congélation de l'aluminium)	933,61	660,46
Équilibre entre les phases solide et liquide du cuivre (point de congélation du cuivre)	1 358,03	1 084,88
Équilibre entre les phases solide et liquide du nickel (point de congélation du nickel)	1 728	1 455
Équilibre entre les phases solide et liquide du cobalt (point de congélation du cobalt)	1 768	1 495
Équilibre entre les phases solide et liquide du palladium (point de congélation du palladium)	1 827	1 554
Équilibre entre les phases solide et liquide du platine (point de congélation du platine)	2 042	1 769
Équilibre entre les phases solide et liquide du rhodium (point de congélation du rhodium)	2 236	1 963
Équilibre entre les phases solide et liquide de l'oxyde d'aluminium, Al_2O_3 (température de fusion de l'oxyde d'aluminium) .	2 327	2 054
Équilibre entre les phases solide et liquide de l'iridium (point de congélation de l'iridium)	2 720	2 447
Équilibre entre les phases solide et liquide du niobium (température de fusion du niobium)	2 750	2 477
Équilibre entre les phases solide et liquide du molybdène (température de fusion du molybdène)	2 896	2 623
Équilibre entre les phases solide et liquide du tungstène (température de fusion du tungstène)	3 695	3 422

TABLEAU VII

Différences approximatives ($t_{68} - t_{48}$), en kelvinsa. Domaine compris entre -180 °C et 0 °C

t_{68} (°C)	0	-10	-20	-30	-40	-50	-60	-70	-80	-90	-100
-100	+ 0,022	+ 0,013	+ 0,003	- 0,006	- 0,013	- 0,013	- 0,005	+ 0,007	+ 0,012		
0	+ 0,000	+ 0,006	+ 0,012	+ 0,018	+ 0,024	+ 0,029	+ 0,032	+ 0,034	+ 0,033	+ 0,029	+ 0,022

b. Domaine compris entre 0 °C et $1\ 070$ °C

t_{68} (°C)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
0	0,000	- 0,004	- 0,007	- 0,009	- 0,010	- 0,010	- 0,010	- 0,008	- 0,006	- 0,003	0,000
100	0,000	0,004	+ 0,007	+ 0,012	+ 0,016	+ 0,020	+ 0,025	+ 0,029	+ 0,034	+ 0,038	+ 0,043
200	0,043	0,047	0,051	0,054	0,058	0,061	0,064	0,067	0,069	0,071	0,073
300	0,073	0,074	0,075	0,076	0,077	0,077	0,077	0,077	0,077	0,076	0,076
400	0,076	0,075	0,075	0,075	0,074	0,074	0,074	0,075	0,076	0,077	0,079
500	0,079	0,082	0,085	0,089	0,094	0,100	0,108	0,116	0,126	0,137	0,150
600	0,150	0,165	0,182	0,200	0,23	0,25	0,28	0,31	0,34	0,36	0,39
700	0,39	0,42	0,45	0,47	0,50	0,53	0,56	0,58	0,61	0,64	0,67
800	0,67	0,70	0,72	0,75	0,78	0,81	0,84	0,87	0,89	0,92	0,95
900	0,95	0,98	1,01	1,04	1,07	1,10	1,12	1,15	1,18	1,21	1,24
1 000	1,24	1,27	1,30	1,33	1,36	1,39	1,42	1,44			

c. Domaine compris entre $1\ 100$ °C et $4\ 000$ °C

t_{68} (°C)	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1 000
1 000		1,5	1,7	1,8	2,0	2,2	2,4	2,6	2,8	3,0	3,2
2 000	3,2	3,5	3,7	4,0	4,2	4,5	4,8	5,0	5,3	5,6	5,9
3 000	5,9	6,2	6,5	6,9	7,2	7,5	7,9	8,2	8,6	9,0	9,3

TABLE DES MATIÈRES

COMITÉ CONSULTATIF DE THERMOMÉTRIE 10^e Session (1974)

	Pages
Notice historique sur les organes de la Convention du Mètre	V
Liste des membres	VII
Ordre du jour	X
Rapport au Comité International des Poids et Mesures, par M. Durieux	T 1
Introduction du président du C.C.T. sur le sujet principal de cette session (révision de l'E.I.P.T.-68)	2
Discussion du rapport du Groupe de travail 2 (Points de référence secondaires et leurs températures; techniques pratiques pour la mesure des températures au niveau secondaire)	3
Discussion du rapport du Groupe de travail 3 (Températures > 100 K; incertitudes des températures thermodynamiques des points fixes)	7
Discussion du rapport du Groupe de travail 4 (Températures comprises entre 1 K et 30 K; les différentes échelles; comparaisons internationales de thermomètres à germanium; situation des échelles de l'hélium)	10
Discussion du rapport du Groupe de travail 1 (Principales modifications au texte de l'E. I.P.T.-68; premier examen du projet d'édition amendée)	12
Informations en rapport avec la Recommandation T 1 (1971) de la 9 ^e session du C.C.T. (Extension des domaines couverts dans l'E.I.P.T.-68 par la pyrométrie optique et par le thermomètre à résistance de platine. Mesures des températures thermodynamiques au-dessous de 1 064 °C et au-dessus de 4 000 K)	17
Examen de documents divers (CCT/74-27, 3, 9, 8, 11, 10, 1, 2, 31)	20
Déclaration relative à la date limite de présentation des documents avant les sessions	22

Publication des documents dans les comptes rendus du C.C.T.; publication des rapports des Groupes de travail	22
Révision de l'E.I.P.T.-68 (Suite de l'examen du projet de l'édition amendée : thermocouples, annexe sur l'historique de l'échelle, incertitudes)	23
Date de la 11 ^e session du C.C.T.	27
Fréquence des futurs rapports des Groupes de travail	27
Les rapports des Groupes de travail présentés à cette session seront résumés dans les comptes rendus du C.C.T.	27
Tâches et composition des Groupes de travail (Regrets de l'absence des membres soviétiques. Constitution d'un cinquième Groupe de travail pour s'occuper des thermomètres utilisés en pratique dans le domaine de 1 K à 30 K. Les Groupes de travail 1 à 4 sont maintenus; tâches de ces Groupes et du nouveau Groupe de travail 5; composition des cinq Groupes)	28
Révision de l'E.I.P.T.-68 (Fin de la discussion. Adoption du projet de l'« E.I.P.T.-68, édition amendée de 1975 »)	34
Futur remplacement de l'E.I.P.T. : points essentiels	35
Questions diverses :	
— Publication de compléments à l'E.I.P.T.	36
— Situation des comparaisons internationales	36
Recommandation présentée au Comité International des Poids et Mesures :	
<i>Recommandation T 1 (1974) (Les cinq points de cette Recommandation concernent l'adoption de l'édition amendée de l'E.I.P.T.-68 et les travaux futurs pour améliorer cette échelle et étendre son domaine)</i>	37

Annexes

T 1. <i>Documents de travail présentés à la 10^e session du C.C.T.</i>	39
T 2. (<i>Voir Annexe T 31</i>)	44
T 3. <i>Résumé des deux premiers Rapports du Groupe de travail 2 (Points fixes secondaires)</i>	45
T 4. <i>Résumé des deux premiers Rapports du Groupe de travail 3 (Températures > 100 K)</i>	59
T 5. <i>Résumé des Rapports du Groupe de travail 4 (Températures < 100 K)</i>	69
T 6. I.N.M. (France). — <i>Mesures de températures dans un arc à plasma d'hydrogène</i> , par P. Fieffé-Prévoist	77
T 7. I.M.G.C. (Italie). — <i>Point de fusion de l'eutectique cuivre-argent</i> , par L. Crovini et P. Marcarino	79
T 8. I.M.G.C. (Italie). — <i>Évaluation du coefficient de pression et de l'influence de l'oxygène dissous sur les points de congélation et de fusion de l'argent de haute pureté</i> , par G. Bongiovanni, L. Crovini et P. Marcarino	83
T 9. N.B.S. (États-Unis d'Amérique). — <i>Comparaison de thermomètres à résistance de platine « à longue tige » de 90 K à 900 K</i> , par G. T. Furukawa	87
T 10. N.R.L.M. (Japon). — <i>Évaluation expérimentale des erreurs dans l'étalonnage des thermomètres à résistance de platine au point triple de l'eau</i> , par S. Sawada et T. Mochizuki (Résumé)	88

T 11.	N.R.L.M. (Japon). — <i>Appareil de type Maecker pour la réalisation de 10⁴ K</i> , par H. Sakate et S. Takata (Résumé).....	89
T 12.	B.I.P.M. — <i>Étude pyrométrique des températures comprises entre 630 °C et 1 064 °C</i> , par J. Bonhoure	90
T 13.	I.N.M. (France). — <i>Pyromètre photoélectrique</i> , par G. Négro	94
T 14.	N.P.L. (Royaume-Uni). — <i>Nouveaux travaux thermométriques en cours au-dessus de 0 °C</i> , par T. J. Quinn	96
T 15.	N.R.L.M. (Japon). — <i>Comparateur multiplicatif de luminances énergétiques spectrales</i> , par S. Takata et S. Hattori (Résumé)	100
T 16.	N.R.L.M. (Japon). — <i>Nouvelle source de rayonnement corps noir au point de l'or</i> , par S. Hattori et S. Takata	102
T 17.	N.R.C. (Canada). — <i>Discontinuités dans les dérivées secondes des fonctions écarts du thermomètre à résistance</i> , par R. E. Bedford (Résumé)	104
T 18.	I.N.M. (France). — <i>Cellule à point triple de l'argon</i> , par G. Bonnier	106
T 19.	I.M.P.R. (U.R.S.S.). — <i>Réalisation des échelles pratiques de température dans le domaine de 1,5 à 13,81 K</i> , par M. P. Orlova, D. N. Astrov, R. V. Philonchik, G. A. Kytin et T. M. Kourakina (Résumé)	109
T 20.	I.M.P.R. (U.R.S.S.). — <i>Réalisation de l'E.I.P.T.-68 et la relation pression-température des gaz dans le domaine de 13,81 à 90,188 K</i> , par M. P. Orlova, D. N. Astrov, D. I. Sharevskaya, L. B. Belyansky, Ya. E. Razhba et V. T. Khnykov (Résumé).....	111
T 21.	I.M.P.R. (U.R.S.S.). — <i>Échelle de température magnétique dans le domaine de 2 à 30 K</i> , par V. T. Shkraba, V. A. Pavlov et D. N. Astrov (Résumé).....	112
T 22.	I.M.G.C. (Italie). — <i>Comparaison de thermomètres à résistance entre 13,81 et 273,15 K et traitement des données expérimentales</i> , par F. Pavese	113
T 23.	K.O.L. (Pays-Bas). — <i>Travaux du K.O.L. avec le dispositif SRM 767 du N.B.S. pour points fixes supraconducteurs (Points de transition de Pb, In et Al)</i> , par J. E. Van Dijk et M. Durieux	119
T 24.	N.P.L. (Royaume-Uni). — <i>Nouveaux travaux thermométriques en cours au-dessous ou au voisinage de 0 °C</i> , par T. J. Quinn	123
T 25.	N.R.L.M. (Japon). — <i>Reproductibilité des thermomètres à germanium au point d'ébullition de ⁴He</i> , par T. Shiratori et K. Mitsui	126
T 26.	N.S.L. (Australie). — <i>Les implications de la thermométrie magnétique sur l'E.I.P.T.-68 au-dessous de 90 K</i> , par L. M. Besley, T. C. Cetas et W. R. G. Kemp (Résumé)	129
T 27.	N.B.S. (États-Unis d'Amérique). — <i>La thermométrie au N.B.S. et l'E.I.P.T.</i> , par J. F. Schooley (Résumé).....	131
T 28.	N.B.S. (États-Unis d'Amérique). — <i>Sur la différence entre les températures thermodynamiques et les températures dans l'E.I.P.T.-68</i> , par L. A. Guildner, G. T. Furukawa et J. L. Riddle (Résumé)	132
T 29.	N.P.L. (Royaume-Uni). — <i>Nouvelle détermination de la constante des gaz</i> , par T. J. Quinn, T.R.D. Chandler et A. R. Colclough	133
T 30.	N.R.L.M. (Japon). — <i>Influence de l'erreur d'étalonnage aux points fixes en thermométrie à résistance de platine</i> , par T. Mochizuki et H. Sakurai ..	135
T 31.	<i>Échelle Internationale Pratique de Température de 1968, édition amendée de 1975</i>	A 1

IMPRIMERIE DURAND
28600 LUISANT (FRANCE)

Dépôt légal, Imprimeur, 1976, n° 406
ISBN 92-822-2033-8

ACHEVÉ D'IMPRIMER LE 1976-04-08

Imprimé en France