

COMITÉ CONSULTATIF DE THERMOMÉTRIE

SESSION DE 1948.

PROCÈS-VERBAUX DES SÉANCES,

RAPPORT ET ANNEXES.



PRÉSIDENT

du Comité international des Poids et Mesures :

M. J. E. SEARS.

LISTE DES MEMBRES

DU

COMITÉ CONSULTATIF DE THERMOMÉTRIE.

Président :

M. le Prof. D^r W. J. DE HAAS, Directeur du Kamerlingh Onnes Laboratorium der Rijks-Universiteit, Rijnsburgerweg, 20, *Leiden*.

Membres et experts :

Pour la Physikalisch-Technische Reichsanstalt, *Berlin* :

M. le D^r W. HEUSE, Président du Laboratoire de Thermométrie de la Reichsanstalt. *Expert* : M. le D^r Helmut MOSER, Membre de la Reichsanstalt (Retardés dans leur voyage).

Pour le National Bureau of Standards, *Washington* :

M. le D^r H. F. STIMSON, Physicien au National Bureau of Standards.

Pour le National Physical Laboratory, *Teddington* :

M. J. A. HALL, Membre du National Physical Laboratory. *Expert* : M. C. R. BARBER, Membre de ce Laboratoire.

Pour le Conservatoire National des Arts et Métiers, *Paris* :
M. G. RIBAUD, Professeur de Physique à la Sorbonne:
Expert : M. G.-A. BOUFRY, Professeur au Conservatoire National des Arts et Métiers (Excusé).

Pour l'Électrotechnical Laboratory : à titre consultatif,
désignés par le Scientific Research Institute, *Tokio*,
MM. KINOSHITA et J. OISHI.

Pour l'Institut de Métrologie de l'U. R. S. S., *Léninegrad* :
M. le Prof. A. C. KOLOSsov, Membre de l'Institut de
Métrologie. *Expert* : M. ALESSINE, Membre du
Comité des Mesures et des Appareils de Mesure de
l'U. R. S. S.

M. le Prof. W. SWIETOSLAWSKI, Président de la Commission
des Données Physico-Chimiques de l'Union
Internationale de Chimie, Wawelska 17, m. 146,
Varsovie, 22 (Excusé).

M. le Prof. J. TIMMERMANS, Secrétaire de la Commission
des Données Physico-Chimiques de l'Union Internationale
de Chimie, 35, avenue Émile Van Becelaere,
Boitsfort-lez-Bruzelles.

M. le Prof. E. PERUCCA, Directeur de l'École Polytechnique,
Turin.

M. A. PÉRARD, Directeur du Bureau International des
Poids et Mesures, *Sèvres*.

Invités :

M. le Prof. J. DE BOER, Secrétaire de la Commission S.U.N.
de l'Union Internationale de Physique Pure et
Appliquée, Bunsenstraat, 98, *Amsterdam*.

M. le Prof. P. FLEURY, Secrétaire Général de l'Union
Internationale de Physique Pure et Appliquée, 3 et
5, boulevard Pasteur, *Paris* (15^e) (Excusé).

M. CH. VOLET, Sous-Directeur du Bureau International
des Poids et Mesures, *Sèvres*.

MM. A. BONHOURE et J. TERRIEN, Adjointe du Bureau
International des Poids et Mesures, *Sèvres*.



COMITÉ CONSULTATIF DE THERMOMÉTRIE

SESSION DE 1948

PROCÈS-VERBAL

DE LA PREMIÈRE SÉANCE

TENUE AU PAVILLON DE BRETEUIL

le mardi 25 mai 1948.

Présidence de M. le Professeur de HAAS.

Sont présents : MM. HALL, KOLOSOV, PÉRARD, PERUCCA, RIBAUD, STIMSON, TIMMERMANS, ALESSINE, BARBER, membres du Comité Consultatif et experts.

Assistent à la séance : MM. DE BOER, VOLET, BONHOURE, TERRIEN, invités.

La séance est ouverte à 15^h 10^m.

M. le PRÉSIDENT donne la parole à M. PÉRARD qui, au nom du Bureau International, souhaite la bienvenue aux savants qui se sont dérangés pour assister à cette deuxième session du Comité Consultatif de Thermométrie. Sur la proposition de son Président, le Comité Consultatif adresse son salut à M. KEESOM avec ses vœux affectueux pour le rétablissement de sa santé. M. PÉRARD transmet aux membres présents les compliments et souhaits de succès qu'il a reçus de M. SEARS, Président du Comité International des Poids et Mesures. Il présente ensuite

les excuses de MM. BOUTRY, SWIETOSLAWSKI et de MM. KINOSHITA et OISHI, désignés par le Scientific Research Institute de Tokio. MM. HEUSE et MOSER, représentant la Physikalisch-Technische Reichsanstalt, sur la présence desquels on comptait, ont probablement rencontré des difficultés imprévues pour leur voyage.

M. PÉRARD constate que le quorum prévu par le Règlement est atteint et que le Comité Consultatif peut, par conséquent, délibérer valablement. Il propose donc de nommer comme Secrétaire M. VOLET, qui sera aidé par M. TERRIEN pour la rédaction des Procès-Verbaux, et comme Rapporteur M. HALL, pour l'établissement du rapport à présenter au Comité International des Poids et Mesures. Ces nominations sont prononcées à l'unanimité.

Avant de passer à l'étude des points prévus à l'Ordre du Jour, M. PÉRARD veut insister sur la nécessité qu'il y aurait à ce que les Notes et documents qui doivent être étudiés par les membres du Comité Consultatif fussent remis un mois ou au moins 15 jours avant la session, afin que la traduction et la distribution des documents puissent être faites à temps. Il propose que les rapports qui forment la base de la discussion soient publiés intégralement, tandis que les autres, qui en forment des commentaires, soient publiés dans une forme résumée.

Ainsi en est-il décidé.

M. le PRÉSIDENT ouvre la discussion sur la thermométrie des basses températures qui forme l'objet le plus important des questions qui se présentent au Comité Consultatif. Il rappelle les travaux importants de Giaque sur l'Échelle absolue des Températures, et montre tout l'intérêt théorique et expérimental d'une échelle à un seul point fixe. Avec celle-ci une température peut être mesurée au moyen de deux déterminations au lieu de trois dans le

système actuel. M. DE HAAS a développé son point de vue dans sa lettre du 30 avril 1938 à M. PÉRARD (Annexe 10, p. T 114).

M. PÉRARD souligne que, pour ses travaux, le Bureau International a besoin de pouvoir compter sur une échelle parfaitement définie jusqu'à l'ordre du millième de degré près dans l'intervalle de 0 à 30° environ. Il ne pourrait admettre que les formules de réduction qu'il a établies avec le plus grand soin ne fussent plus maintenant valables en toute précision. Il demande à ce propos si le chiffre qu'on admettra pour la position du point de glace dans l'Échelle Kelvin sera garanti à la précision nécessaire de un centième de degré près.

M. HALL partage ce point de vue et signale, à ce propos, que le point 100 peut être défini à 1 ou 2 millièmes de degré.

M. DE BOER assure que le point 30°, par exemple, sera mieux défini dans le système Giauque que dans le système actuel.

M. PERUCCA observe que la question revient à savoir s'il vaut mieux conserver l'intervalle fondamental exactement égal à 100 degrés, ou bien fixer définitivement le point de la glace dans l'échelle Kelvin.

Après un échange de vues auquel prennent part la plupart des membres présents, il est bien spécifié que l'on ne propose pas de modifier l'échelle pratique dite internationale, mais seulement l'échelle thermodynamique.

M. PÉRARD se déclare alors satisfait.

M. TIMMERMANS pense que, dans ce cas, la décision à prendre nécessite une étude et une discussion approfondie, non seulement de la part de ce Comité, mais aussi

d'autres organismes intéressés, et qu'en aucun cas une décision ne pourrait être prise aujourd'hui.

M. le PRÉSIDENT est aussi d'avis que des discussions, même privées, sont encore nécessaires sur ce sujet, et il passe à l'Ordre du Jour qui appelle l'examen de la question du point triple de l'eau. Il signale l'intérêt de substituer un point facilement reproductible à 1 dix-millième de degré près à un autre qui n'est qu'à 1 ou 2 millièmes.

M. PÉRARD dit que le Bureau International n'a pas encore une grande expérience du point triple, ce qui ne lui permet pas d'apporter tous les résultats désirables. Il voudrait alors être assuré que les expériences qui s'imposent ont bien été faites par ceux qui proposent actuellement le point triple. A-t-on fait varier toutes les modalités de l'expérience pour permettre d'affirmer qu'en toutes circonstances la température du fil du thermomètre est bien celle du point triple, malgré le courant qui parcourt le fil, et malgré le support dont la conductibilité calorifique n'est pas négligeable ? Cela paraît moins sûr qu'avec le point zéro ; car il existe dans le premier cas au moins une paroi de verre en plus qui sépare l'instrument de mesure du milieu dans lequel règne la température fixe de repère.

M. DE HAAS estime qu'on peut tenir le point triple pendant des jours.

M. RIBAUD reconnaît l'intérêt du point triple qui a l'avantage important d'être mieux défini. Il pense que le point de fusion de la glace n'est pas affranchi de la plupart des inconvénients attribués par M. Pérard au point triple.

M. HALL demande également si la conduction ther-

mique du thermomètre lui-même n'introduit pas des erreurs.

M. STIMSON répond à l'une des objections avancées en déclarant que les mesures au thermomètre à résistance se font au National Bureau of Standards avec des intensités de courant de 0,001 et 0,002 ampère, et l'on extrapole à zéro.

L'écart entre le point triple et le point zéro a été trouvé par lui égal à 0,00997 degré, alors que le résultat calculé est 0,00993 degré (0,00749 degré pour l'effet de la pression et 0,00244 pour l'air dissout).

M. TIMMERMANS pense que M. Swietoslowski, s'il était là, ferait des objections au point triple. Quant à lui, qui en était plutôt partisan, ce que lui a dit M. Stimson sur la reproductibilité remarquable du point zéro lorsqu'on utilise une technique bien étudiée propre à assurer la saturation de l'eau par l'air, il se demande maintenant s'il est vraiment opportun d'opérer le changement proposé.

M. KOLOSsov dit que l'Institut des Recherches Scientifiques de Métrologie de l'U. R. S. S. propose de maintenir l'ancien point zéro comme point fondamental et de ne mentionner le point triple que dans une remarque. M. TIMMERMANS serait disposé à appuyer cette proposition.

M. le PRÉSIDENT invite MM. les Membres du Comité Consultatif à exprimer leur avis. MM. HALL, RIBAUD et STIMSON se prononcent pour l'adoption formelle du point triple. MM. KOLOSsov, PÉRARD et TIMMERMANS proposent le maintien du point zéro et la mention du point triple dans une remarque. M. PERUCCA n'a pas d'avis basé sur l'expérience. En se plaçant au point de vue didactique, la question se pose sous la forme suivante : si l'on veut

baser la thermométrie sur l'échelle thermodynamique à un seul point fixe, on peut prendre le point triple, tandis que si l'on veut garder 100 degrés entre les points de glace et de vapeur de l'eau, il faut conserver le point zéro.

M. VOLET pense que l'adoption du point triple implique l'adoption d'une valeur pour l'écart qu'il présente avec le point zéro.

M. RIBAUD dit que les deux questions sont évidemment liées et qu'il faudrait se mettre d'accord sur la valeur de cette différence de température.

M. HALL signale que des expériences vont être faites au National Physical Laboratory.

M. le PRÉSIDENT pense que l'on peut attendre la prochaine séance pour se prononcer sur un texte précis et il ouvre la discussion sur la question de l'unité de chaleur.

M. PÉRARD rappelle que la Résolution votée à ce sujet par le Comité Consultatif en 1939, ne devait être présentée au Comité International qu'après une consultation des divers organismes intéressés.

Cette Résolution était la suivante (A₁) :

a. « L'unité de quantité de chaleur est la quantité de chaleur « équivalente à l'unité d'énergie désignée sous le nom de « joule », « égale à 10⁷ ergs.

b. « La calorie est équivalente à 3600/860 joules ou « 1/860 wattheure.

c. « Les termes précédemment employés de « calorie-kilo-gramme » et « grande calorie » sont remplacés par celui de « kilocalorie ». La kilocalorie se trouve ainsi égale à 1/860 kilo-« wattheure.

REMARQUE 1. — « Le kilojoule est très voisin de l'unité de « chaleur britannique

$$1 \text{ BTU} = 1,055 \text{ kilojoule.}$$

REMARQUE 2. — « La calorie est pratiquement égale à l'ancienne calorie dite « à 15°C ».

REMARQUE 3. — « En l'état actuel de la technique, la manière la plus précise de mesurer les quantités de chaleur est d'opérer par comparaison avec les quantités équivalentes d'énergie électrique. »

Parmi les organismes à consulter, l'un, la Conférence des Steam Tables a cessé d'exister. Les deux autres, la Commission des Données Physico-Chimiques de l'Union Internationale de Chimie, et l'Union Internationale de Physique Pure et Appliquée, se sont réunies à Londres en juillet 1947 et ont adopté les projets de résolution respectifs suivants :

Pour la Commission des Données Physico-Chimiques (A₂) :

a. « L'unité de quantité de chaleur est la quantité de chaleur équivalente à l'unité d'énergie désignée sous le nom de joule et égale à 10⁷ ergs.

b. « Lorsque les quantités de chaleur sont déterminées avec une haute précision, par comparaison avec la chaleur spécifique de l'eau à une certaine température θ°, elles seront évaluées en calories à θ°. L'auteur des mesures devra indiquer dans sa publication le facteur de conversion qu'il a choisi pour lier le joule à la calorie.

c. « Les termes précédemment employés de « calorie kilogramme » et « grande calorie » seront remplacés par celui de « kilocalorie. »

et pour l'Union Internationale de Physique Pure et Appliquée (sa Commission S. U. N.) (A₃) :

a. « L'unité de quantité de chaleur est le joule, égal à 10⁷ ergs. (N. B. — « Cette proposition confirme celle déjà adoptée en 1934 par l'Assemblée générale de l'Union de Physique). »

b. « Il est demandé que tous les résultats d'expériences calorimétriques soient exprimés en joules, et que, si les expériences ont été faites par comparaison avec un échauffement

« d'eau, les températures extrêmes et le facteur de conversion
« utilisé soient indiqués.

c. « Si pour une raison quelconque on ne peut éviter l'usage
« d'une calorie, le facteur de conversion admis devra être
« indiqué.

d. « Il est demandé que la Commission mixte des Constantes
« physicochimiques du Conseil International des Unions scien-
« tifiques provoque si possible une entente entre les spécialistes
« des mesures de précision pour qu'ils emploient les mêmes fac-
« teurs de conversion. »

M. DE BOER résume les propositions en présence et observe qu'il y a très peu de différence entre les deux dernières.

M. TIMMERMANS remarque qu'en général la tendance des physiciens est de réduire le nombre des unités. Cependant, les praticiens, ainsi qu'on le voit dans la question qui nous occupe, ont une tendance inverse. Il exprime, pour sa part, la crainte de voir une nouvelle unité de chaleur apporter de la confusion dans les résultats. Un très grand nombre de mesures calorimétriques se font par la méthode comparative, c'est-à-dire par rapport à l'eau, les résultats en sont précis, ils sont comparables entre eux. Si on les exprime ensuite en une autre unité avec un coefficient de transformation sujet lui-même à varier, on perdra le bénéfice de cette homogénéité à laquelle les physico-chimistes tiennent beaucoup.

M. DE HAAS reconnaît le bien-fondé des arguments apportés par M. TIMMERMANS, mais signale néanmoins que le National Bureau of Standards exprime tous ses résultats calorimétriques en joules sans inconvénient.

M. PERUCCA dit que le joule est une unité bien définie, alors qu'il existe plusieurs calories selon la température de référence choisie. Il pense, à ce propos, qu'il y aurait avantage pour les physico-chimistes à rapporter leurs

mesures à la chaleur spécifique de l'eau, dont on établirait avec soin une table en fonction de la température.

M. DE BOER pense que les mesures, même de chaleur de combustion, peuvent se faire par voie électrique avec une précision extrême de $3 \cdot 10^{-5}$, difficilement réalisable par comparaison avec l'eau.

M. STIMSON est aussi de cet avis. Il partage également l'opinion de M. Perucca quant à l'utilisation de la chaleur spécifique de l'eau. Il signale qu'aux États-Unis on se sert couramment de deux calories valant respectivement 4,1840 et 4,1867 joules.

M. PÉRARD fait remarquer, à propos de certains résultats qui ont été soumis à ce Comité, que les unités électriques dites internationales n'existent plus. Elles ont été remplacées, à partir du 1^{er} janvier 1948, par les unités absolues.

M. DE BOER propose, si l'on crée une nouvelle calorie, de lui donner un nom, celui de « calorie absolue » par exemple. Mais il pense, ainsi que M. HALL, qu'une nouvelle unité de chaleur n'est pas nécessaire ; le joule peut suffire.

M. HALL pense que les spécialistes du National Physical Laboratory n'accepteront pas facilement l'expression « calorie absolue ». Quant à leur préférence au sujet de la rédaction d'une résolution, elle irait plutôt à celle proposée par l'Union de Physique Pure et Appliquée.

Un échange de vues s'engage sur les termes en lesquels une proposition pourrait être rédigée.

M. le PRÉSIDENT charge M. PÉRARD de préparer un texte, qui sera soumis à la prochaine réunion. Puis il lève la séance à 17^h 30^m.

PROCÈS-VERBAL

DE LA DEUXIÈME SÉANCE

TENUE A L'INSTITUT D'OPTIQUE A PARIS

le jeudi 27 mai 1948.

PRÉSIDENCE DE M. LE PROFESSEUR DE HAAS.

Sont présents : MM. HALL, KOLOSsov, PÉRARD, PERUCCA, RIBAUD, STIMSON, TIMMERMANS, ALESSINE, BARBER, membres du Comité Consultatif et experts.

Assistent à la séance : MM. DE BOER, VOLET, BONHOURE, TERRIEN, invités.

La séance est ouverte à 14^h 30^m.

M. le PRÉSIDENT donne la parole au Secrétaire pour la lecture du Procès-Verbal, qui est adopté.

Il ouvre ensuite la discussion sur les projets de résolution qui sont soumis au Comité.

M. PÉRARD expose que pour tenir compte des différentes opinions qui ont été exprimées au sujet du point triple au cours de la précédente séance, on a établi les deux rédactions suivantes :

PROJET 1.

En l'état actuel de la technique, le point triple de l'eau est susceptible de constituer un repère thermométrique

avec une précision plus élevée que le point de fusion de la glace.

En conséquence, le Comité Consultatif estime que le zéro de l'échelle thermométrique centigrade doit être défini comme étant la température inférieure de $0,01$ degré à celle du point triple de l'eau pure (de composition moyenne en eau lourde).

PROJET 1 bis.

Le Comité Consultatif estime que le point zéro de l'échelle thermométrique centigrade doit continuer d'être *défini* par le point de fusion de la glace.

Cependant, en l'état actuel de la technique, la réalisation pratique de ce repère peut se faire avec la plus grande précision au moyen du point triple de l'eau dont la température est de $+ 0^{\circ},00993$.

M. PÉRARD dit qu'il serait lui-même favorable au projet 1 bis, mais qu'il y a un tel concours d'opinions autorisées en faveur du projet 1 que personnellement il l'accepterait sans discussion.

M. VOLET exprime ses craintes de voir changer la définition d'un repère thermométrique aussi important que le point de glace qui joue un rôle primordial dans les définitions des unités fondamentales du Système Métrique. Il pense que le point de glace est physiquement aussi bien défini que le point triple. La réalisation technique du point triple est aujourd'hui plus précise. Prochainement ce sera peut-être le point de glace qui sera de nouveau plus facilement reproductible; M. Perucca a déjà entrevu la possibilité d'améliorer l'obtention de ce point (Annexe XVIII, p. T 141). Changera-t-on alors de nouveau la définition du zéro? Le projet 1 bis répond à ces objections; il

rend indépendant la *définition* du zéro des fluctuations de la technique thermométrique.

Après un échange de vues, le Comité Consultatif propose l'adoption du Projet 1 dans la rédaction suivante.

RÉSOLUTION I.

En l'état actuel de la technique, le point triple de l'eau est susceptible de constituer un repère thermométrique avec une précision plus élevée que le « point de fusion de la glace ».

En conséquence, le Comité Consultatif estime que le zéro de l'échelle thermodynamique centésimale doit être défini comme étant la température inférieure de 0,0100 degré à celle du point triple de l'eau pure.

La discussion est ensuite ouverte sur la rédaction d'une résolution relative à l'échelle thermodynamique. La valeur à adopter pour la température du point triple dans cette échelle est examinée et donne lieu à un échange de vues auquel prennent part tous les membres du Comité.

M. DE BOER répond à certaines objections en précisant que le nombre choisi servira de définition à la nouvelle échelle et qu'il ne sera par conséquent plus sujet à varier selon les résultats d'expériences nouvelles.

M. le PRÉSIDENT résume la discussion en faisant observer que cette question a soigneusement été étudiée en 1939, et que le peu d'expériences faites depuis ne saurait nous faire changer d'avis; en particulier, le nombre définitif obtenu par Beattie est pratiquement identique à celui qui avait déjà été communiqué en 1939. Il propose, en conséquence, d'adopter $273^{\circ},16$ pour le point triple.

RÉSOLUTION II.

Le Comité Consultatif admet le principe d'une échelle thermodynamique absolue ne comportant qu'un

seul point fixe fondamental, constitué actuellement par le point triple de l'eau pure, dont la température absolue est fixée à 273°,16.

L'introduction de cette nouvelle Échelle n'affecte en rien l'usage de l'Échelle Internationale, qui reste l'échelle pratique recommandée.

Dans l'état présent de la précision des mesures, la nouvelle échelle coïncide avec l'Échelle Thermodynamique Centésimale.

M. PÉRARD attire l'attention sur l'expression « *admet le principe* » qui figure dans ce texte et qui reflète la réserve marquée par plusieurs membres du Comité à l'égard de cette Résolution.

M. le PRÉSIDENT ouvre la discussion sur la Résolution relative à l'Unité de chaleur. Après quelques observations, celle-ci est adoptée sous la forme suivante :

RÉSOLUTION III.

L'unité de quantité de chaleur est le joule, égal à 10⁷ ergs.

REMARQUE. — *Il est demandé que les résultats d'expériences calorimétriques soient, autant que possible, exprimés en joules.*

Cependant, lorsque les quantités de chaleur sont déterminées avec une haute précision par un échauffement d'eau, on peut les exprimer en calories à une température déterminée.

ÉCHELLE INTERNATIONALE DE TEMPÉRATURE.

M. le PRÉSIDENT remercie le N. B. S. et le N. P. L. pour le gros travail qu'ils se sont imposé en vue de préparer la

discussion. Il propose que l'on examine point par point leurs importants rapports.

Il signale la difficulté qu'on rencontre souvent pour se procurer du platine pur, et souhaite que des échanges puissent être faits avec les laboratoires mieux placés à ce point de vue.

M. HALL dit, à ce propos, que la condition

$$R_{100}/R_0 > 1,392$$

est très difficile à réaliser et qu'on pourrait s'en tenir au rapport 1,391.

M. STIMSON précise que le platine doit être recuit.

A propos de la partie de l'échelle comprise entre les points de solidification de l'antimoine et de l'or, M. Barber attire l'attention sur les résultats obtenus au N. P. L. et sur le critère de pureté du platine-rhodié, qui a été établi sur la base d'expériences faites au N. B. S., au N. P. L. et à la P. T. R. Ces résultats seront publiés en Annexe (p. T 89); ils permettent de formuler un critérium meilleur que la spécification de la force électromotrice au point de fusion de l'or.

M. STIMSON se déclare d'accord.

La discussion porte ensuite sur la valeur de la constante C_2 .

M. KOLOSOV indique que les spécialistes de l'U. R. S. S. estiment qu'il n'y a pas lieu de changer la valeur adoptée en 1939, soit 1,432 cm.degré, avant que de nouvelles expériences aient été faites.

M. le PRÉSIDENT dit que depuis la première session du Comité, des expériences importantes ont été faites, qui montrent que le nombre admis en 1939 est trop faible.

M. TERRIEN rend compte des documents reçus d'Alle-

magne, qui contiennent une conclusion identique. Cependant, il est signalé que si l'on prenait 1,438, le point de fusion de l'or deviendrait 1067°, et que ce fait a besoin, au préalable, d'être vérifié par des expériences avec le thermomètre à gaz.

M. RIBAUD précise que le point de l'or ne serait pas affecté par le changement de C_2 , mais seulement les températures supérieures.

Le Comité se rallie à la proposition du N. B. S. de prendre la valeur $C_2 = 1,438$ cm. degré.

M. le PRÉSIDENT ouvre ensuite la discussion sur la troisième partie du projet d'Échelle Internationale relative aux recommandations.

M. HALL spécifie que le montage du thermocouple doit être tel qu'il évite les tensions là où existent de forts gradients de température.

Au sujet des recommandations relatives à la pression, il propose un changement de rédaction, avec lequel M. Stimson est d'accord.

A propos du point triple, une discussion s'engage sur la pureté de l'eau et le lavage du verre. On conclut qu'il n'y a pas lieu de préciser cette pureté. La conductibilité électrique, en particulier, ne constitue pas un critère suffisant.

M. TIMMERMANS recommande de laver le verre avec un jet de vapeur d'eau.

M. KOLOSsov propose de supprimer le point de l'argent qui ne présente pas une précision suffisante et qui est trop près du point de l'or.

M. le PRÉSIDENT observe que cette question nécessite une étude approfondie. Elle n'a pu être faite par les

membres du Comité, qui en ont été informés trop tard. Il en est de même pour les documents japonais que M. Terrien présente, et pour une note que dépose M. Stimson sur la dépendance des coefficients dans les formules d'interpolation (Annexe XI, p. T 117). M. le Président recommande encore aux auteurs de remettre leurs documents bien avant la session.

M. PERUCCA, au nom des physiciens italiens, demande que des références bibliographiques soient données relativement aux travaux ayant servi de base pour l'établissement de l'Échelle Internationale 1948.

M. le PRÉSIDENT résume la discussion qui s'engage sur ce sujet, en demandant aux laboratoires qui ont une documentation de la communiquer au Bureau International, qui centralisera.

M. PÉRARD confirme que le Bureau International se chargera volontiers de cette tâche.

M. TIMMERMANS voudrait aussi que le Bureau International intervienne pour faciliter l'échange de publications actuellement difficiles à se procurer, afin que, dans une réunion comme celle-ci, tous les membres aient pu prendre connaissance à temps des travaux effectués dans les différents pays.

M. PÉRARD assure que le Bureau International s'efforcera d'améliorer cette situation dans la mesure de ses moyens.

M. TIMMERMANS remercie ses collègues du bon accueil qu'il a reçu au sein de cette assemblée de physiciens, comme représentant des physico-chimistes.

M. PÉRARD se fait l'interprète des membres du Comité pour adresser ses remerciements à M. le Professeur

DE HAAS pour la façon dont il a présidé cette session et dirigé les travaux.

M. le PRÉSIDENT remercie à son tour M. PÉRARD qui a eu toute la charge de la préparation de ces séances, et il félicite ses collègues pour la courtoisie qu'ils ont apportée dans les discussions.

La séance est levée à 18^h 20^m.

DEUXIÈME RAPPORT
DU
COMITÉ CONSULTATIF DE THERMOMÉTRIE
AU
COMITÉ INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES.

Par M. J. A. HALL, Rapporteur.

Le Comité a tenu deux réunions, le mardi 25 mai 1948 à Sèvres, au Bureau International des Poids et Mesures, et le jeudi 27 mai à Paris, à l'Institut d'Optique, sur l'aimable invitation de son directeur : M. P. Fleury.

Étaient présents à ces réunions : M. le Professeur de Haas, Président; MM. Hall, Kolossov, Pérard, Pérucca, Ribaud, Stimson, Timmermans, membres du Comité; MM. Alessine et Barber, experts; MM. de Boer, Volet, Bonhoure et Terrien, invités.

M. Volet fut nommé Secrétaire et M. Hall, Rapporteur de la session.

**SUBSTITUTION DU POINT TRIPLE DE L'EAU COMME POINT
FIXE FONDAMENTAL AU POINT DE FUSION DE LA GLACE.**

Le Comité a discuté la question de l'adoption du point triple de l'eau comme point fixe fondamental pour l'Échelle Internationale de Température. Les Membres estiment que la reproductibilité du point triple est supé-

rieure à celle du point de fusion de la glace; en conséquence, le Comité a adopté la résolution suivante :

RÉSOLUTION I.

En l'état actuel de la technique, le point triple de l'eau est susceptible de constituer un repère thermométrique avec une précision plus élevée que le point de fusion de la glace.

En conséquence, le Comité Consultatif estime que le zéro de l'échelle thermodynamique centésimale doit être défini comme étant la température inférieure de 0,0100 degré à celle du point triple de l'eau pure.

THERMOMÉTRIE DES TRÈS BASSES TEMPÉRATURES.

POSITION DU POINT DE FUSION DE LA GLACE

DANS L'ÉCHELLE KELVIN ET ADOPTION D'UNE ÉCHELLE DE TEMPÉRATURE A UN SEUL POINT FIXE.

Le Comité a examiné la suggestion de Giaque concernant l'adoption d'une échelle définie par l'intervalle entre le zéro absolu et le point triple de l'eau, au lieu de l'intervalle entre le point de fusion de la glace (ou le point triple) et le point d'ébullition de l'eau. Il reconnaît les avantages de ce procédé pour les travaux à très basses températures; mais il reconnaît aussi qu'aux températures plus élevées, il entraînerait une incertitude plus grande qu'à présent sur la valeur numérique des températures données dans l'échelle centigrade. La plus grande incertitude dans la valeur du degré qui résulterait actuellement de l'adoption du nouveau principe serait particulièrement désavantageuse, par exemple, pour la métrologie de précision. Il fut admis, en conséquence, qu'il serait nécessaire de conserver le système actuel pour l'Échelle Internationale, qui resterait l'échelle pratique. En principe, cependant, le

Comité donna son approbation à l'échelle définie par le zéro absolu et un seul autre point fixe.

Concernant la valeur assignée au point triple de l'eau dans l'échelle Kelvin, le Comité est d'avis, vu l'absence de résultats publiés depuis la session de 1939, qu'on peut retenir le nombre adopté en 1939, soit $273,15^{\circ}\text{K}$ pour le point de fusion de la glace ou $273,16^{\circ}\text{K}$ pour le point triple de l'eau.

La résolution suivante a été adoptée :

RÉSOLUTION II

Le Comité Consultatif admet le principe d'une échelle thermodynamique absolue ne comportant qu'un seul point fixe fondamental, constitué actuellement par le point triple de l'eau pure, dont la température absolue est fixée à $273^{\circ},16$.

L'introduction de cette nouvelle échelle n'affecte en rien l'usage de l'Échelle Internationale, qui reste l'échelle pratique recommandée.

Dans l'état présent de la précision des mesures, la nouvelle échelle coïncide avec l'Échelle Thermodynamique Centésimale.

L'ÉCHELLE INTERNATIONALE DE TEMPÉRATURE (1948).

Les discussions du Comité sur l'Échelle Internationale de Température eurent pour base un mémorandum soumis par le National Bureau of Standards (U. S. A.) ainsi que des recommandations auxquelles il donna lieu de la part du National Physical Laboratory (Grande-Bretagne). Des commentaires ont été reçus de l'U. R. S. S. et du Japon; mais ils sont arrivés trop tard pour qu'il ait été possible de leur consacrer l'étude détaillée qui serait nécessaire

avant d'en tenir compte pour changer les spécifications de l'Échelle.

Les modifications proposées à l'Échelle de 1927 sont données ci-après :

Point zéro. — Le point zéro de l'Échelle reste la température d'équilibre entre la glace et l'eau saturée d'air; mais pour les travaux de haute précision, il est maintenant à réaliser par la détermination du point triple de l'eau auquel on a assigné la température de $0^{\circ},0100\text{C}$.

Point de solidification de l'argent. — Le point de solidification de l'argent a été porté de $960^{\circ},5\text{C}$ à $960^{\circ},8\text{C}$. La nouvelle valeur proposée se trouve dans la limite de précision des déterminations au moyen du thermomètre à gaz et a l'avantage de réaliser une transition plus continue entre les portions de l'Échelle définies par le thermomètre à résistance et par le thermocouple. Il y a des raisons de penser que la transition avec la partie de l'Échelle basée sur le rayonnement est aussi rendue plus continue par ce changement.

Limite inférieure de l'Échelle. — Le Comité recommande que la limite inférieure de l'Échelle soit fixée au point d'ébullition de l'oxygène ($-182^{\circ},97\text{C}$), au lieu de -190°C , puisqu'il semble exister une différence mesurable, par rapport à l'échelle thermodynamique, entre ces deux températures.

Transition entre le thermomètre à résistance et le thermocouple. — La proposition faite en 1939 que la transition du thermomètre à résistance au thermocouple soit faite au point de solidification de l'antimoine ($630^{\circ},5\text{C}$), au lieu de 660°C , a été confirmée. Le Comité propose cependant qu'il ne soit plus obligatoire d'effectuer le passage au moyen d'une détermination du point de solidi-

fication de l'antimoine, mais qu'il soit autorisé à effectuer dans ce but une comparaison directe entre le thermomètre à résistance et le thermocouple dans une enceinte isotherme à 630°,5C.

Pureté des fils du thermomètre à résistance et du thermocouple. — Il a été spécifié que le rapport R_{100}/R_0 pour les fils de platine du thermomètre à résistance et du thermocouple ne doit pas être inférieur à 1,3910. Une nouvelle spécification relative à la relation entre les forces électromotrices aux points de solidification de l'antimoine, de l'argent et de l'or, a été ajoutée. Cette spécification a pour but d'assurer une bonne concordance de forme entre les courbes d'étalonnage obtenues avec des thermocouples de différentes provenances.

Valeur de C_2 . — La valeur de C_2 adoptée en 1927 était de 1,432 cm.degré. En 1939, on reconnut que ce nombre était certainement trop bas; la nouvelle valeur qui fut envisagée était 1,436; mais l'opinion du Comité fut que ce nombre ne pouvait lui-même pas être considéré comme définitif. En conséquence, il avait estimé qu'il était inopportun à cette date d'effectuer un changement. Aujourd'hui, le nombre qui semble le plus exact est 1,438, et le présent Comité recommande que cette valeur soit adoptée. Le changement de 1,432 en 1,438 conduira à des valeurs numériques un peu plus basses pour les hautes températures, la différence étant de 3 degrés à 1550°C et de 6 degrés à 2000°C. Les valeurs des points fixes secondaires proposés en 1939 ont été modifiées pour correspondre avec le changement proposé de C_2 .

Loi de Planck. — Le Comité propose que la loi de Planck soit substituée à celle de Wien dans la définition de la partie de l'Échelle basée sur le rayonnement. Ce changement n'entraîne aucune différence appréciable dans

l'Échelle en dessous de 2500°C environ ; mais il rend possible l'usage de l'Échelle jusqu'aux plus hautes températures, pour lesquelles la loi de Wien devient inapplicable.

UNITÉ DE CHALEUR.

En 1939, le Comité Consultatif adoptait une résolution spécifiant que l'unité de chaleur était le joule, et que la calorie était définie comme étant égale à 3600/860 joules. Cependant, cette résolution n'a pu être acceptée par le Comité International après consultation de différents organismes intéressés. Parmi ceux-ci, la Commission des Données Physico-Chimiques de l'Union Internationale de Chimie et l'Union Internationale de Physique Pure et Appliquée ont depuis lors adopté des résolutions qui n'acceptent pas la suggestion de définir la calorie en fonction du joule. Eu égard à ces points de vue, le Comité a maintenant adopté la résolution suivante :

RÉSOLUTION III.

L'unité de quantité de chaleur est le joule, égal à 10^7 ergs.

REMARQUE. — *Il est demandé que les résultats d'expériences calorimétriques soient autant que possible exprimés en joules.*

Cependant, lorsque les quantités de chaleur sont déterminées avec une haute précision par un échauffement d'eau, on peut les exprimer en calories à une température déterminée.

TEXTE

DE

L'ÉCHELLE INTERNATIONALE DE TEMPÉRATURE DE 1948

PREMIÈRE PARTIE.

INTRODUCTION.

L'échelle Kelvin, dans laquelle les températures sont désignées par °K et identifiées par le symbole T, est reconnue comme l'échelle thermodynamique fondamentale à laquelle toute mesure de température doit pouvoir se rapporter finalement. Dans cette échelle, l'intervalle compris entre le point de fusion de la glace T_0 et le point d'ébullition de l'eau T_{100} est 100 degrés. Par la présente déclaration, la Neuvième Conférence Générale des Poids et Mesures adopte, en principe, l'échelle Kelvin, ainsi que l'échelle thermodynamique centésimale ⁽¹⁾, dans laquelle la température est égale à $T - T_0$. Tout intervalle de température exprimé dans l'une de ces échelles aura la même valeur numérique que lorsqu'on l'exprimera dans l'autre.

Les difficultés expérimentales inhérentes aux mesures de température dans l'échelle thermodynamique ont conduit à l'adoption, en 1927, par la Septième Conférence Générale des Poids et Mesures, d'une échelle pratique qui a été désignée sous le nom d'Échelle Internationale de Température. Cette échelle devait s'accorder avec l'échelle thermodynamique centésimale aussi étroitement qu'il était possible dans l'état des connaissances à

(1) La Conférence Générale, qui s'est tenue en octobre 1948, a décidé de supprimer les mots « centésimale » et « centigrade », et de les remplacer par « Celsius ».

cette époque. Elle fut établie de façon qu'elle fût aisément et exactement reproductible, et qu'elle fournit la possibilité de spécifier toute température dans l'Échelle Internationale entre des limites beaucoup plus étroites que dans l'échelle thermodynamique.

L'Échelle définie ici représente la première révision de l'Échelle adoptée en 1927 et a été conçue en vue de réaliser une concordance aussi étroite que possible avec l'échelle thermodynamique centésimale telle qu'elle est connue actuellement, tout en y incorporant certaines améliorations basées sur l'expérience pour rendre l'Échelle plus uniforme et plus reproductible que celle qui l'a précédée.

Les modes opératoires par lesquels on devra réaliser l'Échelle sont en substance inchangés. Deux seulement des révisions de la définition de l'Échelle ont pour conséquence des changements appréciables dans la valeur numérique assignée aux températures mesurées. Le passage du point de l'argent de $960^{\circ},5$ à $960^{\circ},8\text{C}$ change les températures mesurées avec le thermo-couple étalon. L'adoption d'une valeur différente pour la constante de radiation C_2 change toutes les températures supérieures au point de solidification de l'or, tandis que l'emploi de la formule de Planck, au lieu de la formule de Wien, affecte surtout les très hautes températures. La formule de Planck est conforme à l'échelle thermodynamique et élimine par conséquent la limite supérieure qui était imposée par la loi de Wien dans l'échelle de 1927.

D'autres modifications importantes, qui ne causent que peu ou pas de changement dans la valeur numérique de la température, mais qui servent à rendre l'Échelle mieux définie et mieux reproductible sont :

a. La terminaison d'une partie de l'Échelle au point de l'oxygène au lieu de -190°C .

b. Le fractionnement de l'Échelle au point de solidification de l'antimoine (environ 630°C) au lieu de 660°C.

c. Les exigences pour une pureté supérieure du platine du thermomètre à résistance étalon et du thermocouple étalon et pour des limites permises plus étroites de la force électromotrice du thermocouple étalon au point de l'or.

L'Échelle définie par le thermomètre à résistance reste en substance identique à celle de 1927. Dans le domaine compris entre 630° et 1063°C, les valeurs numériques de la température sur l'Échelle de 1948 sont plus élevées que celles de l'Échelle de 1927, la différence maximum étant environ 0,4 degré près de 800°C.

Les températures sur l'Échelle Internationale de Température de 1927 étaient désignées par °C ou °C (Int.). Comme la désignation « °C » est conservée dans la présente révision, elle doit être appliquée, à l'avenir, aux températures de la dernière Échelle adoptée avant l'époque à laquelle la désignation est utilisée. Là où quelque doute pourrait surgir, la désignation doit être précisée sous la forme °C (Int. 1927) ou °C (Int. 1948).

DEUXIÈME PARTIE.

DÉFINITION DE L'ÉCHELLE INTERNATIONALE DE TEMPÉRATURE DE 1948.

1. Les températures dans l'Échelle Internationale de Température de 1948 sont désignées par « °C » ou « °C (Int. 1948) » et représentées par le symbole *t*.

2. L'Échelle est fondée sur un certain nombre de températures d'équilibre fixes et reproductibles (points fixes)

auxquelles sont assignées des valeurs numériques, et sur des formules spécifiées établissant la relation entre la température et les indications des instruments étalonnés au moyen de ces points fixes.

3. Les points fixes et la valeur numérique assignée à chacun d'eux sont donnés dans le tableau I. Dans chaque cas ces valeurs définissent la température d'équilibre correspondant à une atmosphère normale, c'est-à-dire par définition 1013250 dynes/cm². Le dernier chiffre décimal donné pour chacune des valeurs des points fixes primaires ne représente que le degré de reproductibilité de ce point fixe.

TABLEAU I.

*Points fixes fondamentaux et points fixes primaires
sous la pression normale de 1013250 dynes/cm².*

	Température °C.
a. Température d'équilibre entre l'oxygène liquide et sa vapeur (point d'ébullition de l'oxygène).	— 182,970
b. Température d'équilibre entre la glace et l'eau saturée d'air (point de fusion de la glace) (Point fixe fondamental).....	0
c. Température d'équilibre entre l'eau liquide et sa vapeur (point d'ébullition de l'eau) (Point fixe fondamental).....	100
d. Température d'équilibre entre le soufre liquide et sa vapeur (point d'ébullition du soufre)....	444,600
e. Température d'équilibre entre l'argent solide et l'argent liquide (point de solidification de l'argent).....	960,8
f. Température d'équilibre entre l'or solide et l'or liquide (point de solidification de l'or).....	1063,0

4. Les procédés d'interpolation conduisent à un partage de l'Échelle en quatre régions.

a. De 0°C au point de solidification de l'antimoine la température t est définie par la formule

$$R_t = R_0(1 + At + Bt^2),$$

dans laquelle R_t est la résistance à la température t du fil de platine entre les points de bifurcation formés par la soudure du conducteur de courant et du conducteur de potentiel d'un thermomètre étalon à résistance. La constante R_0 est la résistance à 0°C, et les constantes A et B doivent être déterminées à partir des valeurs mesurées de R_t aux points d'ébullition de l'eau et du soufre. Le platine d'un thermomètre à résistance étalon doit être recuit et sa pureté doit être telle que R_{100}/R_0 soit supérieur à 1,3910.

b. Du point d'ébullition de l'oxygène à 0°C la température t est définie par la formule

$$R_t = R_0[1 + At + Bt^2 + C(t - 100)t^3],$$

dans laquelle R_t , R_0 , A et B sont déterminés de la même façon que ci-dessus en (α) et la constante C étant déterminée à partir de la valeur mesurée de R_t au point d'ébullition de l'oxygène.

c. Du point de solidification de l'antimoine au point de solidification de l'or, la température t est définie par la formule

$$E = a + bt + ct^2,$$

dans laquelle E est la force électromotrice d'un thermocouple étalon de platine et platine rhodié, lorsque l'une des soudures est à 0°C et l'autre à la température t . Les constantes a , b , c doivent être déterminées à partir des valeurs mesurées de E aux points de solidification de l'antimoine, de l'argent et de l'or. L'antimoine utilisé

doit être tel que sa température de solidification, déterminée au moyen d'un thermomètre à résistance étalon, ne soit pas inférieure à 630°,3 C. On peut aussi étalonner le thermocouple par comparaison directe avec un thermomètre étalon à résistance, à une température comprise entre 630°,3 et 630°,7 C, au moyen d'une enceinte à température uniforme.

Le fil de platine du thermocouple étalon doit être recuit et d'une pureté telle que le rapport $\frac{R_{100}}{R_0}$ soit supérieur à 1,3910. Le fil d'alliage doit contenir nominale-ment 90 pour 100 de platine et 10 pour 100 de rhodium en poids. Le thermocouple achevé doit donner aux points de solidification de l'antimoine (630°,5 C), de l'argent et de l'or, des forces thermoélectriques telles que l'on ait :

$$\begin{aligned} E_{Au} &= 10300 \pm 50 \mu V, \\ E_{Au} - E_{Ag} &= 1185 + 0,158(E_{Au} - 10310) \pm 3 \mu V, \\ E_{Au} - E_{Sb} &= 4776 + 0,631(E_{Au} - 10310) \pm 5 \mu V. \end{aligned}$$

d. Au-dessus du point de l'or, la température t est définie par la formule

$$\frac{J_t}{J_{Au}} = \frac{\frac{C_2}{e^{\lambda(t_{Au} + T_0)} - 1}}{\frac{C_2}{e^{\lambda(t + T_0)} - 1}},$$

dans laquelle :

J_t et J_{Au} sont respectivement les énergies de rayonnement de longueur d'onde λ par intervalle unité de longueur d'onde, émises en une unité de temps par l'unité d'aire d'un corps noir, à la température t et au point de solidification de l'or t_{Au} .

C_2 est 1,438 cm. degré.

T_0 est la température du point de fusion de la glace en °K.

λ est une longueur d'onde du spectre visible.

e est la base des logarithmes népériens.

TROISIÈME PARTIE.

RECOMMANDATIONS.

Les recommandations des paragraphes suivants sont des conseils plutôt que des prescriptions. Les appareils, les méthodes et les modes opératoires recommandés représentent une bonne pratique à l'époque actuelle, mais on n'a pas eu l'intention de retarder la mise au point et l'utilisation d'améliorations et de perfectionnements. L'expérience a montré que ces recommandations sont favorables à l'uniformité et à la reproductibilité dans la réalisation de l'Échelle de Température définie à la deuxième Partie.

1. *Thermomètre à résistance étalon.* — Un thermomètre à résistance étalon doit être conçu et construit de façon que le fil résistant de platine soit aussi dépourvu de tension qu'il est possible et qu'il reste dans cet état pendant son utilisation. Le fil de platine le plus convenable est celui qui est étiré à partir d'un lingot fondu et non d'une mousse martelée.

Des thermomètres satisfaisants ont été fabriqués avec du fil fin de $0^{\text{mm}},05$ et du fil gros de $0^{\text{mm}},5$ de diamètre, un court tronçon de chaque conducteur aboutissant à la résistance étant en platine et continuant sous la forme d'un fil d'or dans la région du gradient de température. La bobine de résistance du thermomètre une fois achevée doit être recuite dans l'air à une température qui ne soit pas inférieure à environ 450°C , ou, si elle doit être utilisée à des températures supérieures à 450°C , à une température supérieure à la température la plus élevée à laquelle elle doit être utilisée. Il est recommandé que le tube qui protège la bobine terminée soit rempli d'un gaz contenant un peu d'oxygène.

Un critérium utile qui sert de sauvegarde contre un

défaut de construction du thermomètre achevé et contre des erreurs dans l'étalonnage aux points fixes est que $\frac{R_s - R_0}{R_{100} - R_0}$ (expression dans laquelle R_s est la résistance au point d'ébullition du soufre) doit être compris entre 4,2165 et 4,2180. D'une façon analogue, si le thermomètre est étalonné pour servir dans le domaine des températures inférieures à 0°C, le rapport $\frac{R_s - R_{0_2}}{R_{100} - R_0}$ (expression dans laquelle R_{0_2} est la résistance au point d'ébullition de l'oxygène) doit être compris entre 6,143 et 6,144. La constance de la résistance à un point de référence, tel que le point triple de l'eau (ou le point de fusion de la glace), avant et après l'utilisation à d'autres températures, est aussi un précieux critérium de l'efficacité du recuit et de la fidélité du thermomètre en usage.

2. *Thermocouples étalons.* — Des thermocouples étalons satisfaisants ont été fabriqués avec des fils dont le diamètre n'était pas inférieur à 0^{mm},35, ni supérieur à 0^{mm},65. Avant l'étalonnage, les fils du couple doivent être recuits dans l'air pendant une heure à environ 1100°C. Le montage des fils du thermocouple doit être réalisé de telle sorte que soit évitée toute contrainte mécanique aux endroits où des gradients élevés de température risquent de se présenter.

3. *Pression.* — Les points fixes sont donnés comme la température d'équilibre à une pression de 1013250 dynes/cm². Cette pression correspond à celle qu'exerce une colonne de mercure de 760^{mm} de haut ayant une masse spécifique de 13,5951 g/cm³, et soumise à une attraction de gravitation de 980,665 dynes/gramme. Sauf pour les travaux de la plus haute précision, on peut admettre que le mercure pur du commerce à 0°C possède une masse spécifique de 13,5951 g/cm³ en moyenne dans la colonne.

Dans les paragraphes suivants concernant les points fixes, les formules représentant la relation entre la pression p , au point milieu de la bobine de platine et la température d'équilibre correspondante t_p sont données sous deux formes. Le polynome est une forme commode lorsque la pression est voisine d'une atmosphère normale tandis que la forme logarithmique est applicable, ainsi qu'on le sait, dans un domaine beaucoup plus étendu. Ces deux formes sont données l'une et l'autre en fonction du rapport de p à p_0 (pression normale) et sont par conséquent également utilisables, que p et p_0 soient exprimés en dynes/cm² ou en millimètres de mercure à 0°C et sous l'attraction de 980,665 dynes/g.

4. *Point zéro de l'Échelle.* — La température 0°C peut être déterminée expérimentalement, avec une précision suffisante dans presque tous les cas, en utilisant un mélange de glace finement divisée et d'eau saturée d'air à 0° dans un vase bien isolé tel qu'un vase de Dewar. Il est cependant recommandé que, pour les travaux de la plus haute précision, le point zéro soit réalisé au moyen du point triple de l'eau, point auquel a été assignée la température de + 0°,0100C. Cette valeur est en accord avec tous les résultats expérimentaux acquis jusqu'ici à 0,0002 degré près.

a. *Réalisation du point triple de l'eau.* — La température d'équilibre entre la glace, l'eau liquide et la vapeur d'eau a été réalisée dans des ampoules de verre approprié ayant de 4 à 7^{cm} de diamètre, présentant un puits rentrant axial pour les thermomètres et ne contenant que de l'eau d'une grande pureté. La quantité d'eau doit être telle qu'elle permette une immersion convenable du thermomètre et qu'elle assure l'existence des trois phases pendant les mesures. De telles ampoules, lorsqu'elles sont

préparées d'une façon convenable pour leur emploi, et qu'elles sont entièrement plongées dans un bain de glace ordinaire, ont été trouvées capables de maintenir une température constante pendant plusieurs jours à 0,0001 degré près.

Des ampoules ont été préparées pour être utilisées en refroidissant leur contenu dans son ensemble jusqu'à ce que de petits cristaux soient présents dans toute la masse du liquide. Une méthode à préférer consiste à congeler une couche épaisse de glace autour du puits par un refroidissement rapide de l'intérieur. Avec cette méthode l'eau au contact de la glace en voie de formation retient la plus grande partie des impuretés contenues initialement dans l'eau. Il en résulte un abaissement appréciable de la température à l'extérieur de cette couche, à moins que la pureté initiale de l'eau ne soit suffisamment élevée. Si l'on fait fondre alors une fine couche de glace pure au contact du puits, on produit une surface de contact entre de l'eau et de la glace très pures, ce qui fixe une température constante et reproductible à mieux que 0,0001 degré, si la température extérieure initiale n'est pas inférieure de plus de 0,001 degré à la température créée à l'intérieur après la fusion de la fine couche de glace.

La température d'équilibre t correspondant à la profondeur H (en millimètres) au-dessous de la surface vapeur-liquide peut être calculée d'après la formule

$$t = 0,0100 - 0,7 \cdot 10^{-6} H.$$

b. Réalisation du point de fusion de la glace. — En observant quelques précautions concernant la pureté de la glace et de l'eau, la saturation de l'eau à 0°C avec de l'air non contaminé et l'effet de la pression, on peut réaliser une température reproductible, à quelques dix-millièmes de degré près.

On peut calculer l'effet de la pression par la formule

$$t = 0,0099 \left(1 - \frac{p}{p_0} \right) - 0,7 \cdot 10^{-6} H,$$

dans laquelle t est la température d'équilibre, p est la pression barométrique ambiante à laquelle l'eau est saturée par l'air, H est la profondeur en millimètres au-dessous de la surface du mélange eau et glace.

5. *Point d'ébullition de l'oxygène.* — La température d'équilibre entre l'oxygène liquide et sa vapeur est d'ordinaire réalisée par la méthode statique. La bobine de platine du thermomètre étalon et la surface libre de l'oxygène liquide dans son récipient sont amenés à la même température dans un cryostat convenable, qui peut être par exemple un bloc de métal dans un bain bien agité d'oxygène liquide. Le tube qui relie l'espace contenant l'oxygène liquide pur au manomètre utilisé pour la mesure de la pression de vapeur doit être protégé contre des températures inférieures à la température de l'oxygène liquide pur à l'endroit où se trouve le fil résistant du thermomètre étalon.

La température d'équilibre t_p correspondant à une pression p peut être trouvée avec une exactitude de quelques millièmes de degré dans tout le domaine compris entre $p = 660$ et $p = 860^{\text{mm}}$ de mercure au moyen de la formule

$$t_p = -182,970 + 9,530 \left(\frac{p}{p_0} - 1 \right) - 3,72 \left(\frac{p}{p_0} - 1 \right)^2 + 2,2 \left(\frac{p}{p_0} - 1 \right)^3$$

ou, avec la même exactitude, mais dans un intervalle plus étendu, par la formule

$$t_v = -182,970 + \frac{21,94 \log_{10} \frac{p}{p_0}}{1 - 0,261 \log_{10} \frac{p}{p_0}}$$

6. *Point d'ébullition de l'eau.* — La température d'équilibre entre l'eau liquide et sa vapeur est réalisée par la méthode dynamique, le thermomètre étant placé dans la vapeur saturée, avec des appareils de conceptions diverses, les uns fermés et les autres ouverts à l'atmosphère. Les systèmes fermés dans lesquels un hypsomètre et un manomètre sont reliés à un manostat de grand volume empli d'hélium sont préférables pour les étalonnages précis au point d'ébullition de l'eau. L'hypsomètre doit être disposé de façon que soient évités une surchauffe de la vapeur autour du thermomètre, une contamination par l'air ou par d'autres impuretés, et les effets de radiation. On peut juger, que la température d'équilibre a été atteinte lorsque la température observée, ramenée à une pression constante, est indépendante du temps écoulé, des variations dans le débit de chaleur fourni au liquide, des variations des pertes de chaleur par les parois et de la profondeur d'immersion du thermomètre.

La température d'équilibre t_p correspondant à une pression p peut être obtenue avec une exactitude de 0,001 degré dans tout le domaine compris entre $p = 660$ et $p = 860^{\text{mm}}$ de mercure au moyen de la formule

$$t_p = 100 + 28,012 \left(\frac{p}{p_0} - 1 \right) - 11,64 \left(\frac{p}{p_0} - 1 \right)^2 + 7,1 \left(\frac{p}{p_0} - 1 \right)^3$$

ou, avec la même exactitude, mais dans un intervalle plus étendu, par la formule

$$t_p = 100 + \frac{64,500 \log_{10} \frac{p}{p_0}}{1 - 0,1979 \log_{10} \frac{p}{p_0}}$$

7. *Point d'ébullition du soufre.* — Le soufre utilisé dans un appareil à point d'ébullition du soufre ne devrait pas contenir plus de 0,005 pour 100 d'impuretés. Le sélénium et l'arsenic sont les impuretés dont la présence a été trouvée la plus probable en quantité suffisante pour affecter la température d'équilibre d'une façon notable.

Dans le type usuel d'appareil pour point d'ébullition du soufre qui s'est montré satisfaisant pour une exactitude de 0,01 à 0,02 degré, le soufre est contenu dans un tube de verre, de silice fondue, ou d'une substance analogue, ayant un diamètre intérieur de 4 à 5^{cm}. La longueur du tube est déterminée par la considération que la colonne de vapeur doit être assez longue pour que l'on puisse installer un écran contre le rayonnement et pour permettre la profondeur d'immersion requise du thermomètre à résistance. Un chauffage électrique est préférable. Au-dessus de la source de chaleur le tube est entouré d'un isolant thermique.

Dans un travail récent dans lequel on désirait une exactitude d'environ 0,001 degré, le thermomètre n'était pas immergé directement dans la vapeur de soufre, mais dans un puits thermométrique en aluminium, ce qui adaptait ainsi l'appareil à son emploi avec un système clos. Le puits thermométrique est muni d'un ou plusieurs écrans contre le rayonnement, conçus de telle sorte que l'intérieur de l'écran soit presque un corps noir, mais avec de larges ouvertures pour la circulation de la vapeur de soufre dans tout l'intérieur. Un chauffage électrique était installé pour régler les pertes de chaleur par les parois.

On peut juger que les températures d'équilibre ont été atteintes lorsque les températures observées, ramenées à une pression constante, sont indépendantes du temps écoulé, des variations du débit de la chaleur fournie au

liquide, des variations des pertes de chaleur par les parois et de la profondeur d'immersion du thermomètre.

La température d'équilibre t_p , qui correspond à une pression p , peut être obtenue avec une exactitude d'environ 0,001 degré dans tout le domaine qui s'étend de $p = 660$ à $p = 800^{\text{mm}}$ de mercure au moyen de la formule

$$t_p = 444,6 + 69,010 \left(\frac{p}{p_0} - 1 \right) - 27,48 \left(\frac{p}{p_0} - 1 \right)^2 + 19,14 \left(\frac{p}{p_0} - 1 \right)^3,$$

ou, dans un intervalle plus étendu, par la formule

$$t_p = 444,6 + \frac{158,92 \log_{10} \frac{p}{p_0}}{1 - 0,234 \log_{10} \frac{p}{p_0}}.$$

8. Points de solidification de l'argent et de l'or. —

Nos connaissances sur l'effet des impuretés les plus probables dans de l'argent ou de l'or soigneusement purifiés indiquent que l'addition de 0,01 pour 100 d'impureté métallique en poids à de l'argent pur ou de 0,005 pour 100 à de l'or pur ne changent probablement pas le point de solidification de plus de 0,1 degré dans l'un et l'autre cas.

Pour l'étalonnage d'un thermocouple, le métal est contenu dans un creuset de graphite pur ou d'une autre matière réfractaire qui ne le contamine pas. Des creusets de graphite artificiel, ayant environ 3^{cm} de diamètre intérieur et 15^{cm} de profondeur avec une paroi d'environ 1^{cm} d'épaisseur, ont été trouvés très satisfaisants. La quantité de métal utilisée dans un tel creuset est de 1600^g d'or ou de 900^g d'argent environ. L'argent, pendant qu'il est chaud, doit être protégé contre l'oxygène.

Le creuset et le métal sont placés dans un four capable de chauffer son contenu à une température uniforme.

Le métal est fondu et amené à une température uniforme quelques degrés au-dessus de son point de fusion, puis on le laisse refroidir lentement.

Le thermocouple, monté dans un tube de porcelaine comportant des isolateurs de porcelaine qui séparent les deux fils, est immergé dans le métal en fusion à travers un trou ménagé au centre du couvercle du creuset.

La profondeur d'immersion doit être telle que la force électromotrice observée du thermocouple ne change pas de plus de 1 microvolt lorsque la profondeur de l'immersion est augmentée ou diminuée de 1^{cm}. Pendant la solidification, la force électromotrice doit rester constante dans les limites de 1 microvolt pendant une durée d'au moins 5 minutes.

9. *Point de solidification de l'antimoine.* — Le mode opératoire à observer pour utiliser le point de solidification de l'antimoine comme température d'étalonnage est essentiellement le même que celui qui a été spécifié pour les points de solidification de l'argent et de l'or. L'antimoine a une tendance marquée à rester en surfusion avant de se solidifier. La surfusion ne sera pas excessive si l'on ne chauffe le métal que quelques degrés au-dessus de son point de fusion et si l'on agite le métal liquide. Pendant la solidification, la force électromotrice doit rester constante dans les limites de 1 microvolt pendant une durée d'au moins 5 minutes.

10. *Température du point de fusion de la glace dans l'échelle Kelvin.* — En vue de l'uniformité il est recommandé d'adopter comme température du point de fusion de la glace dans l'échelle Kelvin 273°,15 K (1).

(1) Ce nombre de 273°,15 K n'a pas été ratifié par le Comité international, ni par la Conférence Générale. La décision fixant la dernière décimale a été ajournée.

QUATRIÈME PARTIE.

RENSEIGNEMENTS SUPPLÉMENTAIRES.

1. *Formules résistance-température.* — La formule d'interpolation pour l'intervalle compris entre 0°C et le point de solidification de l'antimoine, qui est la suivante dans la définition de l'Échelle

$$R_t = R_0(1 + A t + B t^2),$$

peut être écrite sous la forme de Callendar,

$$t = \frac{1}{\alpha} \left(\frac{R_t}{R_0} - 1 \right) + \delta \left(\frac{t}{100} - 1 \right) \frac{t}{100},$$

dans laquelle

$$\alpha = \frac{1}{100} \left(\frac{R_{100}}{R_0} - 1 \right).$$

Les relations entre les coefficients sont :

$$A = \alpha \left(1 + \frac{\delta}{100} \right), \quad \alpha = A + 100B,$$

$$B = -\frac{\alpha \delta}{100^2}, \quad \delta = -\frac{100^2 B}{A + 100B}.$$

La condition que $\frac{R_{100}}{R_0}$ soit supérieur à 1,3910 est équivalente à spécifier que α doit être supérieur à 0,003910.

La condition que $\frac{R_t - R_0}{R_{100} - R_0}$ soit compris entre 4,2165 et 4,2180 est équivalente à spécifier que δ soit compris entre 1,488 et 1,498.

D'une façon analogue, la formule d'interpolation pour l'intervalle compris entre 0°C et le point d'ébullition de l'oxygène, qui est la suivante dans la définition de l'Échelle

$$R_t = R_0[1 + A t + B t^2 + C(t - 100)t^3]$$

peut être écrite sous la forme de Callendar-Van Dusen

$$t = \frac{1}{\alpha} \left(\frac{R_t}{R_0} - 1 \right) + \delta \left(\frac{t}{100} - 1 \right) \frac{t}{100} + \beta \left(\frac{t}{100} - 1 \right) \left(\frac{t}{100} \right)^3.$$

Les relations entre A, B et α , δ sont les mêmes que ci-dessus et les autres relations sont

$$C = -\frac{\alpha\beta}{100^4} \quad \text{et} \quad \beta = -\frac{100^4 C}{A + 100B}.$$

La condition que $\frac{R_s - R_{0.2}}{R_{100} - R_0}$ soit compris entre 6,143 et 6,144 est équivalente à spécifier que $0,5852\delta - \beta$ soit compris entre 0,7656 et 0,7598.

2. *Points fixes secondaires.* — En plus des six points fixes fondamentaux et primaires, on peut disposer d'un certain nombre d'autres points fixes, qui peuvent être utiles en certaines occasions. Quelques-uns de ces points fixes, parmi les plus constants et reproductibles, ainsi que leur température dans l'Échelle Internationale de Température de 1948, sont groupés dans le Tableau II. Les températures données sont celles qui correspondent à la pression d'une atmosphère normale, excepté pour les points triples de l'eau et de l'acide benzoïque. Les formules donnant la variation de la température avec la pression sont destinées à être utilisées dans tout le domaine qui s'étend de $p = 680$ à $p = 780^{\text{mm}}$ de mercure.

TABLEAU II.

*Points fixes secondaires
sous la pression d'une atmosphère normale
(sauf pour les points triples).*

	Température °C. (Int. 1948).
Température d'équilibre entre l'anhydride carbonique solide et sa vapeur.....	— 78,5
$t_p = -78,5 + 12,12 \left(\frac{p}{p_0} - 1 \right) - 6,4 \left(\frac{p}{p_0} - 1 \right)^2.$	
Température de solidification du mercure.....	— 38,87
Température d'équilibre entre la glace, l'eau et sa vapeur (point triple).....	0,1000

TABLEAU II (suite).

	Température °C. (Int. 1948).
Température de transition du sulfate de sodium décahydraté.....	32,38
Température du point triple de l'acide benzoïque.....	123,36
Température d'équilibre entre le naphthalène et sa vapeur.....	218,0
$t_p = 218,0 + 44,4 \left(\frac{P}{P_0} - 1 \right) - 19 \left(\frac{P}{P_0} - 1 \right)^2$.	
Température de solidification de l'étain.....	231,9
Température d'équilibre entre le benzophénone et sa vapeur.....	305,9
$t_p = 305,9 + 48,8 \left(\frac{P}{P_0} - 1 \right) - 21 \left(\frac{P}{P_0} - 1 \right)^2$.	
Température de solidification du cadmium.....	320,9
Température de solidification du plomb.....	327,3
Température d'équilibre entre le mercure et sa vapeur.....	356,58
$t_p = 356,58 + 55,552 \left(\frac{P}{P_0} - 1 \right) - 23,03 \left(\frac{P}{P_0} - 1 \right)^2 + 14,0 \left(\frac{P}{P_0} - 1 \right)^3$.	
Température de solidification du zinc.....	419,5
Température de solidification de l'antimoine.....	630,5
Température de solidification de l'aluminium.....	660,1
Température de solidification du cuivre en atmosphère réductrice.....	1083
Température de solidification du nickel.....	1453
Température de solidification du cobalt.....	1492
Température de solidification du palladium.....	1552
Température de solidification du platine.....	1769
Température de solidification du rhodium.....	1960
Température de solidification de l'iridium.....	2443
Température de fusion du tungstène.....	3380

3. Relation entre l'Échelle Internationale de Température de 1948 et l'échelle centésimale thermodynamique. — A l'époque de l'adoption de l'Échelle Interna-

tionale de Température de 1927, les données dont on disposait étaient insuffisantes pour prouver des différences certaines entre cette Échelle et l'échelle centésimale thermodynamique. Les recherches antérieures telles que celles qui ont été publiées en 1911 par la Physikalisch-Technische Reichsanstalt n'indiquaient pas de différences dépassant 0,05 degré dans l'intervalle compris entre 0° C et le point d'ébullition du soufre.

Des recherches récentes au Massachusetts Institute of Technology indiquent des différences plus grandes entre 200° C et le point d'ébullition du soufre. Des comparaisons entre deux thermomètres à azote et des thermomètres à résistance de platine ont été faites à 0°, 25°, 50°, 75°, 100°, 150°, 200°, 250°, 300°, 350° C, au point d'ébullition du mercure, à 400° C et au point d'ébullition du soufre. Les différences trouvées entre t (échelle thermodynamique) et t (Échelle Internationale) s'expriment par la formule suivante

$$t(\text{therm.}) - t(\text{Int.}) = \frac{t}{100} \left(\frac{t}{100} - 1 \right) (0,04217 - 7,481 \cdot 10^{-5} t).$$

Le point d'ébullition du soufre dans l'échelle thermodynamique a été trouvé à 444°,74 C; les résultats obtenus avec les deux thermomètres à gaz présentant une différence d'environ 0,05 degré.

Dans l'intervalle compris entre 0° C et le point d'ébullition de l'oxygène, des intercomparaisons publiées par la Physikalisch-Technische Reichsanstalt en 1932, et par le Laboratoire de Leyde en 1935, indiquent que les différences entre l'Échelle Internationale et l'échelle thermodynamique sont inférieures à 0,05 degré. On n'est pas d'accord sur le signe de quelques-unes des différences mentionnées, qui sont de l'ordre de grandeur des incertitudes possibles des mesures au thermomètre à gaz.

Dans le domaine qui s'étend au-dessous du point

d'ébullition de l'oxygène, certains résultats indiquent que les températures de l'Échelle Internationale de Température de 1927 sont progressivement plus élevées que celles de l'échelle thermodynamique d'une quantité qui s'élève à plusieurs centièmes de degré à -190°C . Pour cette raison, et aussi parce qu'il est avantageux de terminer les diverses parties de l'Échelle à des points d'étalonnage, l'Échelle Internationale de Température de 1948 ne s'étend que jusqu'au point d'ébullition de l'oxygène.

Dans l'intervalle compris entre le point de solidification de l'antimoine et le point de solidification de l'or, il y a peu de résultats relatifs au signe ou à la grandeur des écarts entre l'Échelle Internationale et l'échelle thermodynamique. La valeur $1063^{\circ},0\text{C}$ pour le point de l'or a été acceptée en tant que définition conventionnelle et le restera sans aucun doute jusqu'à l'apparition de résultats fondamentaux nouveaux et plus exacts. Le passage de $960^{\circ},5$ à $960^{\circ},8\text{C}$ est bien dans les limites d'incertitude de la fixation du point de solidification de l'argent dans l'échelle thermodynamique. Grâce à ce changement, l'échelle du thermocouple se raccorde d'une façon plus continue, non seulement avec l'échelle du thermomètre à résistance au point de solidification de l'antimoine, mais aussi avec l'échelle du pyromètre optique au point de solidification de l'or lorsque l'on emploie la valeur $C_2 = 1,438\text{ cm.degré}$.

Il est intéressant de noter que, la validité de la formule de Planck étant reconnue, les températures supérieures au point de l'or dans l'Échelle Internationale de Température de 1948 ne différeront de celles de l'échelle thermodynamique centigrade que dans la mesure causée par des erreurs sur les constantes C_2 , t_{Au} et T_0 utilisées dans la formule.

ANNEXE I.

National Bureau of Standards

MÉMORANDUM RELATIF AU PROJET

D'UNE

ÉCHELLE INTERNATIONALE DE TEMPÉRATURE ⁽¹⁾

DE 1948.

(8 NOVEMBRE 1947)

(Traduction)

Le but de ce mémorandum est de donner les raisons qui ont conduit le National Bureau of Standards à suggérer des changements qui distinguent le projet ci-après du texte de l'Échelle Internationale de Température de 1927 et du projet proposé en 1939.

Pour la plus grande partie, la rédaction et la disposition du projet proposé en 1939 ont été conservées, lorsque celles-ci différaient du texte de l'Échelle de 1927. Nous avons pensé que la forme générale du projet de 1939 a été trouvée acceptable par le Comité Consultatif de Thermométrie.

La substitution du point triple de l'eau en tant que point fixe fondamental, ainsi que la définition de 0°C comme étant la température $0,0100$ degré au-dessous du point triple, a été proposée par un certain nombre de laboratoires, et sera sans aucun doute acceptable d'une façon générale.

La seule base pour des changements possibles dans la définition de l'Échelle dans l'intervalle compris entre 0°C et le point de solidification de l'antimoine est le travail de Beattie et de ses collaborateurs au Massachusetts Institute of Technology. Les conséquences qui résultent de ces changements ont été examinées par les représentants du National Bureau of Standards avec les professeurs J. A. Beattie et F. G. Keyes du M. I. T., et tous les participants sont arrivés à la conclusion que le changement, à

(1) Voir à la page T 30 le texte définitif adopté par le Comité et par la Conférence Générale.

L'époque présente, ne serait pas opportun. Un changement possible de la température attribuée au point d'ébullition du soufre, qui le porterait de $444^{\circ},60$ à $444^{\circ},70$ ou $444^{\circ},75$ C, réduirait mais n'éliminerait pas les différences trouvées au M. I. T. entre l'échelle thermodynamique et n'importe quelle échelle définie par une relation quadratique pour le thermomètre à résistance. L'Échelle Internationale de Température de 1927 est pratique et facilement reproductible et beaucoup de travaux s'appuient sur la valeur $444^{\circ},60$ C pour le point d'ébullition du soufre.

Dans l'intervalle compris entre 0° C et le point d'ébullition de l'oxygène, il est reconnu qu'une formule améliorée serait très désirable; mais on n'en a proposé aucune qui parût remplacer d'une façon satisfaisante la rédaction de 1927; celle-ci a donc été conservée sans changement. L'Échelle a là encore l'avantage d'un haut degré de reproductibilité, de telle sorte que des résultats exprimés dans cette Échelle pourront être recalculés avec une faible incertitude s'il devient désirable d'améliorer l'Échelle ultérieurement.

La région au-dessous du point d'ébullition de l'oxygène a été le sujet de plusieurs recherches. Les résultats de ces recherches ont accru nos connaissances, mais n'ont pas fourni de moyens pratiques et reproductibles pour étendre l'Échelle Internationale de Température aux températures inférieures au point d'ébullition de l'oxygène.

L'un des défauts les plus importants de l'Échelle de 1927 est le manque de continuité dans la région où l'échelle du thermomètre à résistance se raccorde à l'échelle du couple thermoélectrique. Ce défaut est facilement corrigé si l'on porte la température attribuée au point de solidification de l'argent de $960^{\circ},5$ C à $960^{\circ},8$ C, sans changer la formule d'interpolation quadratique pour le couple thermoélectrique.

Avec ce changement, les températures obtenues au moyen des couples étalons sont amenées à un accord bien meilleur avec les valeurs obtenues au moyen de thermomètres à résistance étalons dans un domaine considérable au-dessus et au-dessous du point de solidification de l'antimoine. Des arguments expérimentaux, en faveur d'un changement de la valeur attribuée au point de solidification de l'argent, ont été présentés en 1939, et la valeur $960^{\circ},8$ C paraît être en accord avec ces arguments mieux qu'aucune autre valeur.

Il n'est guère besoin de justifier l'usage de la formule de Planck au lieu de la formule de Wien comme fondamentale dans le domaine de température au-dessus du point de solidification de l'or. En pratique, la formule de Wien continuera sans doute à être utilisée dans le domaine où elle est applicable, et il sera toujours possible de revenir à la formule fondamentale lorsqu'il y aura une occasion de le faire.

En 1939 il a été proposé que la valeur de C_2 soit portée de 1,432 à 1,436 cm. degré. Depuis cette époque il y a eu des arguments expérimentaux en faveur de la valeur 1,438 cm. degré pour C_2 . Dans le résumé le plus récent des constantes physiques, Birge donne une valeur de 1,43848 cm. degré pour C_2 .

Les recommandations de la troisième partie sont des conseils plutôt que des prescriptions. On a fait ainsi principalement afin que les spécifications ne soient pas d'une rigidité telle qu'elles retardent le progrès. L'incorporation de modes opératoires assez précis dans l'Échelle de 1927 fut utile, sans aucun doute, à cette époque, mais ne devrait plus être nécessaire.

On a donné des renseignements complémentaires dans une Note séparée au lieu de les inclure dans les recommandations, comme ils l'étaient dans le projet proposé en 1939, et ils ont été considérablement développés. Les valeurs données pour les points fixes secondaires au-dessus de 0°C sont en accord avec les valeurs des points de fusion des éléments chimiques contenus dans la *N. B. S. Miscellaneous Publication M 183*, parue le 10 avril 1947.

PROJET POUR UNE ÉCHELLE INTERNATIONALE DE TEMPÉRATURE DE 1948

TABLE DES MATIÈRES.

Première Partie. — Introduction.

Deuxième Partie. — Définition de l'Échelle Internationale de Température de 1948.

Troisième Partie. — Recommandations.

Quatrième Partie. — Renseignements supplémentaires.

PREMIÈRE PARTIE.

INTRODUCTION.

L'échelle Kelvin, dans laquelle les températures sont désignées par °K et identifiées par le symbole T, est reconnue comme l'échelle thermodynamique fondamentale à laquelle toute mesure de température devrait pouvoir se rapporter finalement. Dans cette échelle, l'intervalle compris entre le point de fusion de la glace T_0 et le point d'ébullition de l'eau T_{100} est 100 degrés. Par la présente déclaration, la Neuvième Conférence Générale des Poids et Mesures adopte, en principe, l'échelle Kelvin, ainsi que l'échelle thermodynamique centigrade, dans laquelle la température est égale à $T - T_0$. Tout intervalle de température exprimé dans l'une de ces échelles aura la même valeur numérique que lorsqu'on l'exprimera dans l'autre.

Les difficultés expérimentales inhérentes aux mesures de température dans l'échelle thermodynamique ont conduit à l'adoption, en 1927, par la Septième Conférence Générale des Poids et Mesures, d'une échelle pratique qui a été désignée sous le nom d'Échelle Internationale de Température. Cette échelle devait s'accorder avec l'Échelle Thermodynamique Centigrade, aussi étroitement qu'il était possible dans l'état des connaissances à cette époque. Elle fut établie de façon qu'elle fût aisément et exactement reproductible, et qu'elle fournit la possibilité de spécifier toute température dans l'Échelle Internationale entre des limites beaucoup plus étroites que dans l'échelle thermodynamique.

L'Échelle définie ici représente la première révision de l'Échelle adoptée en 1927 et a été conçue en vue de réaliser une concordance aussi étroite que possible avec l'échelle thermodynamique centigrade telle qu'elle est connue actuellement, tout en y incorporant certaines améliorations basées sur l'expérience pour rendre l'Échelle plus uniforme et plus reproductible que celle qui l'a précédée.

Les modes opératoires par lesquels on devra réaliser l'Échelle sont en substance inchangés. Deux seulement des révisions de la définition de l'Échelle ont pour conséquence des changements appréciables dans la valeur numérique assignée aux températures

mesurées. Le passage du point de l'argent de $960^{\circ},5$ à $960^{\circ},8$ C change les températures mesurées avec le thermocouple étalon. La définition de l'Échelle au-dessus du point de l'or au moyen de la formule du rayonnement de Planck au lieu de la formule de Wien, et avec une valeur différente de la constante de rayonnement C_2 , change les températures au-dessus du point de l'or et supprime la limite supérieure qui existait dans l'échelle de 1927.

D'autres changements importants, qui ne causent que peu ou pas de changement dans la valeur numérique de la température, mais qui servent à rendre l'Échelle mieux définie et mieux reproductible sont :

a. La définition de 0°C comme étant la température $0,0100$ degré au-dessous du point triple de l'eau, remplaçant par là l'un des points fixes fondamentaux, celui du point de la glace, par le point triple.

b. La terminaison d'une partie de l'Échelle au point de l'oxygène au lieu de -190°C .

c. Le fractionnement de l'Échelle au point de l'antimoine (environ 630°C) au lieu de 660°C .

d. Les exigences pour une pureté supérieure du platine du thermomètre à résistance étalon et du thermocouple étalon et pour des limites permises plus étroites de la force électromotrice du thermocouple étalon au point de l'or.

L'Échelle définie par le thermomètre à résistance reste en substance identique à celle de 1927. Dans le domaine compris entre 630° et 1063°C , les valeurs numériques de la température sur l'Échelle de 1948 seront plus élevées que celles de l'Échelle de 1927, la différence maximum étant environ $0,4$ degré près de 800°C .

Les températures sur l'Échelle Internationale de Température de 1927 étaient désignées par $^{\circ}\text{C}$ ou $^{\circ}\text{C}$ (Int.). Comme la désignation « $^{\circ}\text{C}$ » est conservée dans la présente révision, elle doit être appliquée, à l'avenir, aux températures de la dernière Échelle adoptée avant l'époque à laquelle la désignation est utilisée. Là où quelque doute pourrait surgir, la désignation doit être précisée sous la forme $^{\circ}\text{C}$ (Int. 1927) ou $^{\circ}\text{C}$ (Int. 1948).

DEUXIÈME PARTIE.

DÉFINITION DE L'ÉCHELLE INTERNATIONALE DE TEMPÉRATURE DE 1948.

1. Les températures dans l'Échelle Internationale de Température de 1948 seront désignées par « °C » ou « °C (Int. 1948) » et représentées par le symbole t .

2. L'Échelle est fondée sur un certain nombre de températures d'équilibre fixes et reproductibles (points fixes) auxquelles sont assignées des valeurs numériques, et sur des formules spécifiées établissant la relation entre la température et les indications des instruments étalonnés au moyen de ces points fixes.

3. Les points fixes fondamentaux et la valeur numérique assignée à chacun d'eux sont donnés dans le Tableau I. Dans chaque cas, à l'exception du point triple de l'eau, ces valeurs définissent la température d'équilibre correspondant à une atmosphère normale, c'est-à-dire par définition 1013 250 dynes/cm². Le dernier chiffre décimal donné pour chacune des valeurs du tableau ne représente que le degré de reproductibilité de ce point fixe.

TABLEAU I.

Points fixes fondamentaux.

	Température (°C).
a. Température d'équilibre entre l'oxygène liquide et sa vapeur à une pression d'une atmosphère normale (point d'ébullition de l'oxygène).....	— 182,970
b. Température d'équilibre entre la glace, l'eau et la vapeur d'eau (point triple de l'eau).....	+ 0,0100
c. Température d'équilibre entre l'eau liquide et sa vapeur à une pression d'une atmosphère normale (point d'ébullition de l'eau).....	100,0000

TABEAU I (suite).

	Température (°C).
d. Température d'équilibre entre le soufre liquide et sa vapeur à une pression d'une atmosphère normale (point d'ébullition du soufre).....	444,600
e. Température d'équilibre entre l'argent solide et l'argent liquide (point de solidification de l'argent).....	960,80
f. Température d'équilibre entre l'or solide et l'or liquide (point de solidification de l'or).....	1063,00

4. Les procédés d'interpolation conduisent à un partage de l'Échelle en quatre régions :

a. De 0° C au point de solidification de l'antimoine, la température t est définie par la formule

$$R_t = R_0(1 + A t + B t^2),$$

dans laquelle R_t est la résistance à la température t du fil de platine entre les points de bifurcation formés par la soudure du conducteur de courant et du conducteur de potentiel d'un thermomètre étalon à résistance. La constante R_0 est la résistance à 0° C, et les constantes A et B doivent être déterminées à partir des valeurs mesurées de R_t au point d'ébullition de l'eau et au point d'ébullition du soufre. La pureté et l'état physique du platine d'un thermomètre à résistance étalon doivent être tels que $\frac{R_{100}}{R_0}$ soit supérieur à 1,3920.

b. Du point de l'oxygène à 0° C, la température t est définie par la formule

$$R_t = R_0[1 + A t + B t^2 + C(t - 100)t^3],$$

dans laquelle R_t , R_0 , A et B ont la signification spécifiée ci-dessus en (a), la constante C étant calculée à partir de la valeur mesurée de R_t au point d'ébullition de l'oxygène.

c. Du point de solidification de l'antimoine au point de solidification de l'or, la température t est définie par la formule

$$E = a + bt + ct^2,$$

dans laquelle E est la force électromotrice d'un thermocouple étalon de platine et platine rhodié, lorsque l'une des soudures est à 0°C et l'autre à la température t . Les constantes a, b, c doivent être calculées à partir des valeurs mesurées de E aux points de solidification de l'antimoine, de l'argent et de l'or. Dans la détermination de ces constantes, la température que l'on doit assigner au point de solidification de l'antimoine utilisé est la valeur déterminée pour cet échantillon particulier avec un thermomètre étalon à résistance, de la façon spécifiée au paragraphe 4a. L'antimoine utilisé doit avoir un point de solidification qui ne soit pas inférieur à $630^\circ,3\text{C}$.

Le fil de platine du thermocouple étalon doit être d'une pureté telle que, pour le fil recuit, le rapport $\frac{R_{100}}{R_0}$ soit supérieur à 1,3910. Le fil d'alliage doit contenir nominalemeut 90 p. 100 de platine et 10 p. 100 de rhodium en poids. Le thermocouple achevé doit développer une force électromotrice comprise entre 10280 et 10320 microvolts lorsque l'une des soudures est à 0°C et l'autre au point de solidification de l'or.

d. Au-dessus du point de solidification de l'or, la température t est définie par la formule

$$\frac{J_t}{J_{\text{Au}}} = \frac{\frac{C_2}{e^{\lambda(\ell_{\text{Au}} + T_0)} - 1}}{\frac{C_2}{e^{\lambda(\ell + T_0)} - 1}},$$

dans laquelle :

J_t et J_{Au} sont respectivement les énergies de rayonnement de longueur d'onde λ par intervalle unité de longueur d'onde émises en une unité de temps par l'unité d'aire d'un corps noir, à la température t et au point de solidification de l'or, ℓ_{Au} .

C_2 est 1,438 cm. degré.

T_0 est la température du point de fusion de la glace en $^\circ\text{K}$.

λ est une longueur d'onde, en centimètres, du spectre visible.

e est la base des logarithmes népériens.

TROISIÈME PARTIE.

RECOMMANDATIONS.

Les recommandations des paragraphes suivants sont des conseils plutôt que des prescriptions. Les appareils, les méthodes et les modes opératoires recommandés représentent une bonne pratique à l'époque actuelle, mais on n'a pas eu l'intention de retarder la mise au point et l'utilisation d'améliorations et de perfectionnements. L'expérience a montré que ces recommandations sont favorables à l'uniformité et à la reproductibilité dans la réalisation de l'Échelle de Température définie à la deuxième partie.

1. *Thermomètre à résistance étalon.* — Un thermomètre à résistance étalon doit être conçu et construit de façon que le fil résistant de platine soit aussi dépourvu de tension qu'il est possible et garde cet état pendant la suite de son utilisation. Le fil de platine le plus convenable est celui qui est étiré à partir d'un lingot fondu et non d'une mousse martelée.

Des thermomètres satisfaisants ont été fabriqués avec du fil fin de $0^{\text{mm}},05$ et du fil gros de $0^{\text{mm}},5$ de diamètre, un court tronçon de chaque conducteur aboutissant à la résistance étant en platine et continuant sous la forme d'un fil d'or à travers la région du gradient de température. La bobine résistante du thermomètre une fois achevée doit être recuite dans l'air à une température qui ne soit pas inférieure à environ 450°C , ou, si elle doit être utilisée à des températures supérieures à 450°C , à une température supérieure à la température la plus élevée à laquelle elle doit être utilisée. Il est recommandé que le tube qui protège la bobine terminée soit rempli d'un gaz contenant un peu d'oxygène.

Un critérium utile qui sert de sauvegarde contre une médiocrité de construction du thermomètre achevé et contre des erreurs dans le calibrage aux points fixes est que $\frac{R_S - R_0}{R_{100} - R_0}$ (expression dans laquelle R_S est la résistance au point d'ébullition du soufre) doit être compris entre 4,2165 et 4,2180. D'une façon analogue, si le thermomètre est étalonné pour servir dans le domaine des températures inférieures à 0°C , le rapport $\frac{R_S - R_{0_2}}{R_{100} - R_0}$ (expression dans laquelle R_{0_2} est la résistance au point

d'ébullition de l'oxygène) doit être compris entre 6,143 et 6,144. La constante de la résistance à un point de référence, tel que le point triple de l'eau (ou le point de fusion de la glace) avant et après l'utilisation à d'autres températures, est aussi un précieux critérium de l'efficacité du recuit et de la fidélité du thermomètre en usage.

2. *Thermocouples étalons.* — Des thermocouples étalons satisfaisants ont été fabriqués avec des fils dont le diamètre n'était pas inférieur à 0^{mm},35, ni supérieur à 0^{mm},65. Avant l'étalonnage, les fils du couple doivent être recuits dans l'air pendant une heure à environ 1100° C. Un critérium utile qui sert de sauvegarde contre les effets possibles des impuretés et les erreurs dans l'étalonnage aux points de solidification de l'antimoine, de l'argent et de l'or, est que $\frac{E_{Au} - E_{Sb}}{E_{Au} - E_{Ag}}$ doit être compris entre 4,020 et 4,035. Un thermocouple qui est utilisé comme étalon ne doit pas être chauffé au-dessus de 1100° C après son étalonnage initial, et un changement de 5 microvolts dans la force électromotrice au point de solidification de l'or peut être considéré comme le signe d'impuretés initiales ou d'une contamination ultérieure.

3. *Pression.* — A l'exception du point triple de l'eau, chacun des trois points fondamentaux est donné comme la température d'équilibre à une pression de 1013 250 dynes/cm², ce qui correspond à la pression exercée par une colonne de mercure haute de 760^{mm}, soumise à une attraction de gravitation de 980,665 dynes/gramme et ayant une masse spécifique de 13,5951 g/cm³, valeur prise pour la masse spécifique moyenne du mercure ordinaire pur à 0° C et à la pression moyenne existant dans une telle colonne de mercure.

Lors de l'étalonnage d'un thermomètre à résistance aux points d'ébullition de l'oxygène, de l'eau et du soufre, plusieurs corrections doivent être appliquées à la hauteur observée de la colonne de mercure, afin d'obtenir la pression qui correspond à la température au point milieu de la résistance de platine. Pour obtenir la pression à la surface inférieure du mercure, la hauteur observée de la colonne de mercure doit subir les corrections suivantes : 1° erreurs de division de l'échelle; 2° dilatation thermique de l'échelle et changement de longueur de l'échelle

dû à son poids; 3° dépression capillaire du mercure; 4° pression gazeuse résiduelle à la surface supérieure du mercure; 5° valeur de la gravité; 6° dilatation thermique et compressibilité du mercure. Les corrections 5° et 6° peuvent être faites au moyen de la relation

$$p_{\text{Hg}} = \frac{p\mathcal{G}}{\mathcal{G}_0 \left(1 + \alpha_{\text{Hg}} t_{\text{Hg}} + \frac{\beta_{\text{Hg}}}{2} \frac{760 - p_{\text{Hg}}}{760} \right)},$$

p_{Hg} , pression en millimètres de mercure à 0° C et sous la gravité normale au niveau inférieur du mercure.

p , pression en millimètres de mercure à t° C, et sous la gravité locale, ayant subi les corrections (1) à (4) énumérées ci-dessus.

β_{Hg} , coefficient moyen de compressibilité cubique du mercure, environ $4 \cdot 10^{-6}$ par atmosphère aux températures ordinaires.

\mathcal{G} , valeur locale de la gravité en dynes/gramme.

\mathcal{G}_0 , gravité normale 980,665 dynes/gramme.

α_{Hg} , coefficient moyen de dilatation thermique du mercure entre 0° et t° C.

Des valeurs de α_{Hg} peuvent être obtenues d'après le tableau suivant :

t° C.	$\alpha_{\text{Hg}} \cdot 10^7$.
10.....	1815
20.....	1816
30.....	1817
40.....	1818

La pression p_t en millimètres de mercure à 0° C et sous la gravité normale qui correspond à la température d'équilibre t_p au point milieu de la résistance de platine, peut être obtenue d'après la relation $p_t = p_{\text{Hg}} + p_f$, dans laquelle p_f est la différence de pression (en millimètres de mercure) due à la colonne de fluide qui existe entre le point milieu de la résistance de platine et la surface inférieure du mercure. La pression p_{sat} en millimètres de mercure due à une colonne de vapeur saturée haute de H^{mm} peut être obtenue d'après la relation $p_{\text{sat}} = p_{\text{Hg}} HF$, dans laquelle F est un facteur représentant le rapport entre la densité de la vapeur saturée et la densité du mercure, divisé par la pression en millimètres de mercure. Des valeurs approchées

de F dans l'intervalle compris entre $p = 660$ et $p = 860^{\text{mm}}$ de mercure sont les suivantes :

Vapeur saturée.	F.10°.
Oxygène.....	38
Eau.....	5,8
Soufre.....	36

Dans les paragraphes suivants concernant les points fixes, les formules représentant la relation entre la pression p , spécifiée ci-dessus et la température d'équilibre correspondante t_p , sont données sous deux formes. Le polynome est une forme commode lorsque la pression est voisine de 760^{mm} de mercure, tandis que la forme logarithmique est applicable, ainsi qu'on le sait, dans un domaine beaucoup plus étendu.

4. *Point d'ébullition de l'oxygène.* — La température d'équilibre entre l'oxygène liquide et sa vapeur est d'ordinaire réalisée par la méthode statique. La résistance de platine du thermomètre étalon et la surface libre de l'oxygène liquide dans son récipient sont amenés à la même température dans un cryostat convenable, qui peut être par exemple un bloc de métal dans un bain bien agité d'oxygène liquide. Le tube qui relie l'espace contenant l'oxygène liquide pur au manomètre utilisé pour la mesure de la pression de vapeur doit être protégé contre des températures inférieures à la température de l'oxygène liquide pur à l'endroit où se trouve le fil résistant du thermomètre étalon.

La température d'équilibre t_p correspondant à une pression p (en millimètres de mercure) peut être trouvée avec une exactitude de quelques millièmes de degré dans tout le domaine, compris entre $p = 660^{\text{mm}}$ et $p = 860^{\text{mm}}$ au moyen de la formule

$$t_p = -182,970 + 12,54 \left(\frac{p-760}{1000} \right) - 6,44 \left(\frac{p-760}{1000} \right)^2 + 5,1 \left(\frac{p-760}{1000} \right)^3$$

ou, avec la même exactitude, mais dans un intervalle plus étendu, par la formule

$$t_p = -182,970 + \frac{21,94 \log_{10} \frac{p}{760}}{1 - 0,261 \log_{10} \frac{p}{760}}$$

5. *Point de fusion de la glace.* — Il a été mentionné dans

l'introduction, qu'en vue d'obtenir la précision la plus élevée, 0° C a été défini comme étant la température 0,0100 degré au-dessous du point triple de l'eau. La température 0° C peut être réalisée expérimentalement, avec une précision suffisante dans presque tous les cas, en utilisant un mélange de glace finement divisée et d'eau saturée d'air dans un vase bien isolé tel qu'un vase de Dewar. En observant quelques précautions concernant la pureté de la glace et de l'eau, la saturation de l'eau à 0° C avec de l'air non contaminé et l'effet de la pression, on peut réaliser une température reproductible à quelques dix-millièmes de degré près.

On peut calculer l'effet de la pression par la formule

$$t = 13 \cdot 10^{-6} (760 - p) - 0,7 \cdot 10^{-6} H,$$

dans laquelle t est la température d'équilibre, p est la pression barométrique ambiante (en millimètres de mercure) à laquelle l'eau est saturée par l'air, H est la profondeur en millimètres au-dessous de la surface du mélange eau et glace.

6. *Point triple de l'eau.* — La température d'équilibre entre la glace, l'eau liquide et la vapeur d'eau a été réalisée dans des ampoules de verre ayant 4 à 7^{cm} de diamètre, présentant un puits rentrant axial pour les thermomètres et ne contenant que de l'eau d'une grande pureté. La quantité d'eau doit être telle qu'elle permette une immersion convenable du thermomètre et qu'elle assure l'existence des trois phases pendant les mesures. De telles ampoules, lorsqu'elles sont préparées d'une façon convenable pour leur emploi, et qu'elles sont maintenues dans un bain de glace ordinaire, ont été trouvées capables de maintenir une température constante pendant plusieurs jours à 0,0001 degré près.

Des ampoules ont été préparées pour être utilisées en refroidissant leur contenu dans son ensemble jusqu'à ce que de petits cristaux soient présents dans toute la masse du liquide. Une méthode à préférer consiste à congeler un manteau de glace autour du puits par un refroidissement rapide à l'intérieur. Un désavantage de cette méthode est que l'eau au contact de la glace en voie de solidification contient la plus grande partie des impuretés contenues initialement dans l'eau congelée, d'où il résulte un abaissement appréciable de la température, à moins

que la pureté de l'eau ne soit suffisamment élevée. Cet inconvénient est facilement évité en faisant fondre une fine couche de glace pure au contact du puits, ce qui met autour du puits une surface de contact eau-glace très pure et fixe une température qui est constante et reproductible à mieux que 0,001 degré.

La température d'équilibre t correspondant à la profondeur H (en mm) au-dessous de la surface vapeur-liquide peut être calculée d'après la formule

$$t = 0,0100 - 0,7 \cdot 10^{-6} H.$$

7. *Point d'ébullition de l'eau.* — La température d'équilibre entre l'eau liquide et sa vapeur a été réalisée expérimentalement par la méthode dynamique, le thermomètre étant placé dans la vapeur saturée, avec des appareils de conceptions diverses, les uns fermés et les autres ouverts à l'atmosphère. Les systèmes fermés dans lesquels un hypsomètre et un manomètre sont reliés à un manostat de grand volume empli d'hélium sont préférables pour les étalonnages précis au point d'ébullition de l'eau. L'hypsomètre doit être disposé de façon que soient évités une surchauffe de la vapeur autour du thermomètre, une contamination par l'air ou par d'autres impuretés, et les effets de radiation. On peut juger que la température d'équilibre a été atteinte lorsque la température observée, ramenée à une pression constante, est indépendante du temps écoulé, des variations dans le débit de chaleur fourni au liquide, des variations des pertes de chaleur par les parois et de la profondeur d'immersion du thermomètre.

La température d'équilibre t_p correspondant à une pression p (en mm de mercure) peut être obtenue avec une exactitude de 0,001 degré dans tout le domaine compris entre $p = 660$ et $p = 860^{\text{mm}}$ au moyen de la formule

$$t_p = 100 + 36,858 \left(\frac{p-760}{1000} \right) - 20,16 \left(\frac{p-760}{1000} \right)^2 + 16,2 \left(\frac{p-760}{1000} \right)^3,$$

où, avec la même exactitude dans un intervalle plus large, par la formule :

$$t_p = 100 + \frac{64,500 \log_{10} \frac{p}{760}}{1 - 0,1979 \log_{10} \frac{p}{760}}.$$

8. *Point d'ébullition du soufre.* — Le soufre utilisé dans un appareil à point d'ébullition du soufre ne devrait pas contenir plus de 0,005 pour 100 d'impuretés. Le sélénium et l'arsenic sont les impuretés dont la présence a été trouvée la plus probable en quantité suffisante pour affecter la température d'équilibre d'une façon notable.

Le type usuel d'appareil pour point d'ébullition du soufre et d'écran contre le rayonnement décrit dans le texte de l'Échelle Internationale de Température de 1927, construit et utilisé convenablement, s'est montré satisfaisant pour une exactitude de 0,01 à 0,02 degré. Dans cet appareil, le soufre est contenu dans un tube de verre, de silice fondue ou d'une substance analogue, ayant un diamètre intérieur de 4 à 5 cm. La longueur du tube est déterminée par la considération que la colonne de vapeur doit être assez longue pour que l'on puisse installer un écran contre le rayonnement et pour permettre la profondeur d'immersion requise du thermomètre à résistance. Un chauffage électrique est préférable. Au-dessus de la source de chaleur, le tube est entouré d'un isolant thermique.

Dans un travail plus récent, dans lequel on désirait une exactitude d'environ 0,001 degré, le thermomètre n'était pas immergé directement dans la vapeur de soufre, mais dans un puits thermométrique en aluminium, ce qui adaptait ainsi l'appareil à son emploi avec un système clos. Le puits thermométrique est muni d'un ou plusieurs écrans contre le rayonnement, conçus de telle sorte que l'intérieur de l'écran soit presque un corps noir, mais avec de larges ouvertures pour la circulation de la vapeur de soufre dans tout l'intérieur. Un chauffage électrique était installé pour régler les pertes de chaleur par les parois.

On peut juger que les températures d'équilibre ont été atteintes lorsque les températures observées, ramenées à une pression constante, sont indépendantes du temps écoulé, des variations du débit de la chaleur fournie au liquide, des variations de pertes de chaleur par les parois et de la profondeur d'immersion du thermomètre.

La température d'équilibre t_p , qui correspond à une pression p (en mm de mercure), peut être obtenue avec une exactitude d'environ 0,001 degré dans tout le domaine qui s'étend de $p = 660^{\text{mm}}$ à $p = 800^{\text{mm}}$, au moyen de la formule

$$t_p = 444,6 + 90,803 \left(\frac{p-760}{1000} \right) - 47,57 \left(\frac{p-760}{1000} \right)^2 + 43,6 \left(\frac{p-760}{1000} \right)^3$$

ou, dans un intervalle plus étendu, par la formule

$$t_p = 444,6 + \frac{158,92 \log_{10} \frac{P}{760}}{1 - 0,234 \log_{10} \frac{P}{760}}$$

9. *Points de solidification de l'argent et de l'or.* — Nos connaissances sur l'effet des impuretés les plus probables dans de l'argent ou de l'or soigneusement purifiés indiquent que l'addition de 0,01 pour 100 d'impureté métallique en poids à de l'argent pur ou de 0,005 pour 100 à de l'or pur ne changent probablement pas le point de solidification de plus de 0,1 degré dans l'un et l'autre cas.

Pour l'étalonnage d'un thermocouple, le métal est contenu dans un creuset de graphite pur ou d'une autre matière réfractaire qui ne le contamine pas. Des creusets de graphite artificiel ayant environ 3^{cm} de diamètre intérieur et 15^{cm} de profondeur avec une paroi d'environ 1^{cm} d'épaisseur, ont été trouvés très satisfaisants. La quantité de métal utilisé dans un tel creuset est environ 1600 grammes d'or, ou environ 900 grammes d'argent. L'argent, pendant qu'il est chaud, doit être protégé contre l'oxygène.

Le creuset et le métal sont placés dans un four capable de chauffer son contenu à une température uniforme.

Le métal est fondu et amené à une température uniforme, quelques degrés au-dessus de son point de fusion, puis on le laisse refroidir lentement.

Le thermocouple, monté dans un tube de porcelaine comportant des isolateurs de porcelaine qui séparent les deux fils, est immergé dans le métal en fusion à travers un trou ménagé au centre du couvercle du creuset.

La profondeur d'immersion doit être telle que la force électromotrice observée du thermocouple ne change pas de plus de 1 microvolt lorsque la profondeur de l'immersion est augmentée ou diminuée de 1^{cm}. Pendant la solidification, la force électromotrice doit rester constante dans les limites de 1 microvolt pendant une durée d'au moins cinq minutes.

10. *Point de solidification de l'antimoine.* — Le mode opératoire à observer pour utiliser le point de solidification de l'an-

timoine comme température d'étalonnage est essentiellement le même que celui qui a été spécifié pour les points de solidification de l'argent et de l'or. L'antimoine a une tendance marquée à rester en surfusion avant de se solidifier. La surfusion ne sera pas excessive si l'on ne chauffe le métal que quelques degrés au-dessus de son point de fusion et si l'on agite le métal liquide. Pendant la solidification, la force électromotrice doit rester constante dans les limites de un microvolt pendant une durée d'au moins cinq minutes.

11. *Température du point de fusion de la glace dans l'échelle Kelvin.* — En vue de l'uniformité, il est recommandé d'adopter comme température du point de fusion de la glace dans l'échelle Kelvin, 273°, 16K.

QUATRIÈME PARTIE.

RENSEIGNEMENTS SUPPLÉMENTAIRES.

1. *Formules résistance-température.* — La formule d'interpolation pour l'intervalle compris entre 0°C et le point de solidification de l'antimoine, qui est la suivante dans la définition de l'échelle :

$$R_t = R_0(1 + At + Bt^2),$$

peut être écrite sous la forme de Callendar,

$$t = \frac{1}{\alpha} \left(\frac{R_t}{R_0} - 1 \right) + \delta \left(\frac{t}{100} - 1 \right) \frac{t}{100},$$

dans laquelle

$$\alpha = \frac{1}{100} \left(\frac{R_{100}}{R_0} - 1 \right).$$

Les relations entre les coefficients sont :

$$\begin{aligned} A &= \alpha \left(1 + \frac{\delta}{100} \right), & \alpha &= A + 100B, \\ B &= -\frac{\alpha\delta}{100^2}, & \delta &= -\frac{100^2 B}{A + 100B}. \end{aligned}$$

La condition que $\frac{R_{100}}{R_0}$ soit supérieur à 1,3920 est équivalente à spécifier que α doit être supérieur à 0,003920. La condition

que $\frac{R_S - R_0}{R_{100} - R_0}$ soit compris entre 4,2165 et 4,2180 est équivalente à spécifier que δ soit compris entre 1,488 et 1,498.

D'une façon analogue, la formule d'interpolation pour l'intervalle compris entre 0°C et le point d'ébullition de l'oxygène, qui est la suivante dans la définition de l'Échelle :

$$R_t = R_0 [1 + At + Bt^2 + C(t-100)t^3],$$

peut être écrite sous la forme de Callendar-Van Dusen :

$$t = \frac{1}{\alpha} \left(\frac{R_t}{R_0} - 1 \right) + \delta \left(\frac{t}{100} - 1 \right) \frac{t}{100} + \beta \left(\frac{t}{100} - 1 \right) \left(\frac{t}{100} \right)^3.$$

Les relations entre A, B et α , δ sont les mêmes que ci-dessus et les autres relations sont :

$$C = -\frac{\alpha\beta}{100^4} \quad \text{et} \quad \beta = -\frac{100^4 C}{A + 100B}.$$

2. *Points fixes secondaires.* — En plus des six points fixes fondamentaux, on peut disposer d'un certain nombre d'autres points fixes, qui peuvent être utiles en certaines occasions. Quelques-uns de ces points fixes, parmi les plus constants et reproductibles, ainsi que leur température dans l'Échelle Internationale de Température de 1948, sont groupés dans le Tableau II. Les températures données sont celles qui correspondent à la pression d'une atmosphère normale, excepté pour l'acide benzoïque. Les formules donnant la variation de la température avec la pression sont destinées à être utilisées dans tout le domaine qui s'étend de $p = 680^{\text{mm}}$ à $p = 780^{\text{mm}}$ de mercure. Pour les températures au-dessus du point de l'or, les valeurs de $\frac{J_t}{J_{\text{Au}}}$ et les valeurs de la longueur d'onde effective λ_e utilisées pour leur détermination sont données également.

TABLEAU II.

Points fixes secondaires.

Température d'équilibre entre l'anhydride carbonique solide et sa vapeur à une atmosphère.....	Température °C (Int. 1948).
	— 78,51

$$t_p = -78,51 + 15,95 \left(\frac{p-760}{1000} \right) - 11 \left(\frac{p-760}{1000} \right)^2.$$

TABLEAU II (suite).

	Température °C (Int. 1948).
Température de solidification du mercure.....	— 38,86
Température d'équilibre entre la glace et l'eau saturée d'air à une atmosphère.....	0,000
Température de transition du sulfate de sodium décahydraté.....	32,38
Température du point triple de l'acide benzoïque.....	122,36
Température d'équilibre entre le naphthalène et sa vapeur à une atmosphère.....	218,0
$t_p = 218,0 + 58,4 \left(\frac{p-760}{1000} \right) - 33 \left(\frac{p-760}{1000} \right)^2$	
Température de solidification de l'étain.....	231,9
Température d'équilibre entre le benzophénone et sa vapeur à une atmosphère.....	305,9
$t_p = 305,9 + 64,2 \left(\frac{p-760}{1000} \right) - 37 \left(\frac{p-760}{1000} \right)^2$	
Température de solidification du cadmium.....	320,9
Température de solidification du plomb.....	327,4
Température d'équilibre entre le mercure et sa vapeur à une atmosphère.....	356,58
$t_p = 356,58 + 73,095 \left(\frac{p-760}{1000} \right) - 39,87 \left(\frac{p-760}{1000} \right)^2 + 31,9 \left(\frac{p-760}{1000} \right)^3$	
Température de solidification du zinc.....	419,5
Température de solidification de l'antimoine.....	630,5
Température de solidification de l'aluminium.....	660,1

	$10^4 \lambda_e$ (cm).	J, J_{Au} .	°C (Int. 1948).
Température de solidification du cuivre en atmosphère réductrice.....	0,6535	1,276	1083,1
Température de solidification du nickel.....	0,6533	41,40	1453
Température de solidification du cobalt.....	0,6532	54,99	1492
Température de solidification du palladium..	0,6530	82,25	1551
Température de solidification du platine....	0,6528	299,0	1769
Température de solidification du rhodium...	0,6527	751	1960
Température de solidification de l'iridium,..	0,6525	4380	2443
Température de fusion du tungstène.....	—	—	3380

3. *Températures au-dessus du point de solidification de l'or.* — Pour la détermination des températures au moyen d'un pyromètre optique, la formule approximative suivante (fondée sur la loi de Wien) :

$$\log_e \frac{J_r}{J_{Au}} = \frac{1,438}{\lambda} \left(\frac{1}{1336} - \frac{1}{t_w + 273} \right),$$

fournira généralement des valeurs qui ne sont pas sensiblement différentes de celles que fournit la formule donnée dans la deuxième Partie.

Dans le Tableau III, les valeurs de t_w obtenues en utilisant cette formule d'approximation sont comparées aux valeurs correspondantes des Échelles Internationales de Température de 1927 et 1948, en utilisant $\lambda = 65.10^{-6}$ cm. Les valeurs dans l'Échelle Internationale de Température de 1927 ne sont pas étendues au-delà de la limite supérieure à cette Échelle.

TABLEAU III.

$t^{\circ}\text{C}$ (Int. 1948).	$t_w^{\circ}\text{C}$.	$t^{\circ}\text{C}$ (Int. 1927).
1063,0	1063,0	1063,0
1500,0	1499,9	1502,3
2000,0	1999,7	2006,4
2500,0	2499,6	2512,1
3000,0	2999,8	3019,8
3500,0	3500,7	3529,8
4000,0	4003,2	4043,0
4500,0	4508,2	—
5000,0	5016,8	—

4. *Relation entre l'Échelle Internationale de Température de 1948 et l'échelle thermodynamique centigrade.* —

A l'époque de l'adoption de l'Échelle Internationale de Température de 1927, les données dont on disposait étaient insuffisantes pour prouver des différences certaines entre cette Échelle et l'échelle thermodynamique centigrade. Les recherches antérieures, telles que celles qui ont été publiées en 1911 par la Physikalisch-Technische Reichsanstalt, n'indiquaient pas de différences dépassant 0,05 degré dans l'intervalle compris entre 0°C et le point du soufre.

Des recherches récentes au Massachusetts Institute of Techno-

logy indiquent des différences plus grandes entre 200°C et le point du soufre. Des comparaisons entre deux thermomètres à azote et des thermomètres à résistance de platine ont été faites à 0°, 25°, 50°, 75°, 100°, 150°, 200°, 250°, 300°, 350°C, au point du mercure, à 400°C et au point du soufre. Les différences trouvées entre t (échelle thermodynamique) et t (Échelle Internationale) ont été exprimées de la manière suivante :

$$t(\text{therm.}) - t(\text{Int.}) = \frac{t}{100} \left(\frac{t}{100} - 1 \right) (0,04217 - 7,481 \cdot 10^{-5} t).$$

Le point du soufre dans l'échelle thermodynamique a été trouvé à 444°,74 les résultats obtenus avec les deux thermomètres à gaz présentant une différence d'environ 0,05 degré.

Dans l'intervalle compris entre 0°C et le point de l'oxygène, des intercomparaisons effectuées par la Physikalisch-Technische Reichsanstalt en 1932, et par le Laboratoire de Leyde en 1935, indiquent que les différences entre l'Échelle Internationale et l'échelle thermodynamique sont inférieures à 0,05 degré. On n'est pas d'accord sur le signe de quelques unes des différences mentionnées, qui sont de l'ordre de grandeur des incertitudes possibles des mesures du thermomètre à gaz.

Dans le domaine qui s'étend au-dessous du point de l'oxygène, certains résultats indiquent que les températures de l'Échelle Internationale de Température de 1927 sont progressivement plus élevées que celles de l'échelle thermodynamique d'une quantité qui s'élève à plusieurs centièmes de degré à — 190°C. Pour cette raison, et aussi parce qu'il est avantageux de terminer les diverses parties de l'Échelle à des points d'étalonnage, l'Échelle Internationale de Température de 1948 ne s'étend que jusqu'au point de l'oxygène.

Dans l'intervalle compris entre le point de l'antimoine et le point de l'or, il y a peu de résultats relatifs au signe ou à la grandeur des écarts entre l'Échelle Internationale et l'échelle thermodynamique. La valeur 1063°,0C pour le point de l'or a été acceptée en tant que définition conventionnelle et le restera sans aucun doute jusqu'à l'apparition de résultats fondamentaux nouveaux et plus exacts. Le passage de 960°,5 à 960°,8C est bien dans les limites d'incertitude de la fixation du point de l'argent dans l'échelle thermodynamique. Grâce à ce changement, l'échelle du thermocouple se raccorde d'une façon plus continue, non

seulement avec l'échelle du thermomètre à résistance au point de l'antimoine, mais aussi avec l'échelle du pyromètre optique au point de l'or lorsque l'on emploie la valeur $C_2 = 1,438$ cm.degré.

Il est intéressant de noter que, la validité de la formule de Planck étant reconnue, les températures supérieures au point de l'or dans l'Échelle Internationale de Température de 1948 ne différeront de celles de l'échelle thermodynamique centigrade que dans la mesure causée par des erreurs sur les constantes C_2 , t_{Au} et T_0 utilisées dans la formule.

ANNEXE II.

National Physical Laboratory.

COMMENTAIRES SUR LE PROJET
D'ÉCHELLE INTERNATIONALE DE TEMPÉRATURE
DE 1948

PROPOSÉ PAR LE
NATIONAL BUREAU OF STANDARDS

(12 JANVIER 1948)

(Traduction)

PREMIÈRE PARTIE.

Etant donné que les modifications dans cette section dépendront entièrement des modifications sur lesquelles on pourrait se mettre d'accord dans la deuxième Partie du projet, nous ne nous proposons pas pour le moment de commenter la première Partie.

DEUXIÈME PARTIE.

Paragraphe 3. — Nous notons que l'on propose de donner la définition primaire de la pression en dynes par centimètre carré. Nous sommes d'accord avec ce changement, mais nous aurons quelques autres remarques à présenter à la troisième Partie.

Paragraphe 3 b. — Nous n'avons pas d'expérience sur l'utilisation du point triple de l'eau en tant que point fixe. Nous nous souvenons pourtant que la P. T. R. a été en faveur de son adoption en 1939, et si vous êtes arrivés maintenant à la conclusion que vous désirez l'adopter, nous n'élèverons pas d'objection.

Paragraphe 3 e. — Nous avons entrepris, sur la relation entre la force électromotrice et la température d'un thermocouple étalon dans le domaine compris entre 0° et 1750° C, une étude qui, nous l'espérons, donnera des résultats utiles sur la valeur la meilleure à adopter pour le point de solidification de l'argent en vue d'assurer un passage continu tant vers l'échelle du thermo-

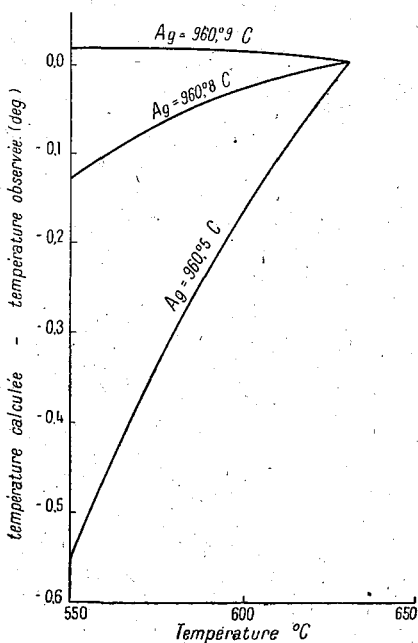


Fig. 1.

mètre à résistance que vers l'échelle définie par le rayonnement. Vingt-quatre thermocouples, douze en alliage classique à 10 p. 100, et douze en alliage à 13 p. 100, alliage utilisé industriellement dans notre pays, provenant des deux fabricants anglais MM. Johnson, Matthey and Co. Ltd. et Sheffield Smelting Co. Ltd., sont employés dans cette étude. Celle-ci consiste à comparer ces thermocouples au thermomètre à résistance étalon entre 0° et 630° C, à les étalonner aux points de solidification de l'argent et de l'or, et à les comparer à l'échelle définie par le rayonnement au-dessus du point de solidification de l'or.

A l'heure actuelle, six thermocouples à 10 p. 100 de la Sheffield Smelting Co. ont été étudiés comme il vient d'être dit ci-dessus jusqu'au point de solidification de l'or, mais aucune mesure au pyromètre optique n'a été effectuée jusqu'ici. On a établi des équations paraboliques fondées sur les points de solidification de l'antimoine, de l'argent et de l'or en choisissant successivement, pour l'argent, l'une des valeurs 960°,5, 960°,8 et 960°,9 C; les différences entre les forces électromotrices données par ces équations et celles que l'on obtient dans la comparaison réelle au thermomètre à résistance ont été représentées par les courbes de la figure 1.

Les résultats que nous avons obtenus jusqu'à maintenant indiquent par conséquent qu'une valeur plus élevée attribuée au point de solidification de l'argent conduirait à un meilleur recouvrement de l'échelle du thermomètre à résistance et de celle du thermocouple, et que la valeur la meilleure à cet égard serait 960°,9 C. Ce travail est cependant incomplet, puisque nous n'avons examiné que des fils d'une seule fabrication et que nous n'avons pas encore d'observations montrant comment ce changement affecterait le raccordement avec l'échelle définie par le rayonnement. Nous espérons obtenir des renseignements sur ce point dans les quelques mois à venir.

Paragraphe 4 a. — Nous acceptons la valeur minimum proposée de 1,3920 pour le rapport $\frac{R_{100}}{R_0}$ relatif au platine à utiliser dans le thermomètre à résistance étalon. Nous notons que vous avez rejeté dans la troisième Partie les rapports correspondants pour les points d'ébullition du soufre et de l'oxygène. D'après notre expérience, avec tous les types de thermomètres que nous avons construits, si le rapport $\frac{R_{100}}{R_0}$ est satisfaisant, la condition que vous spécifiez au point d'ébullition du soufre s'ensuit. Néanmoins, nous pensons qu'il pourrait être sage de maintenir, dans les spécifications elles-mêmes concernant le thermomètre à résistance étalon, les rapports correspondants que vous proposez dans la troisième Partie.

Paragraphe 4 c. — Pourvu que l'on dispose de moyens satisfaisants pour comparer directement le thermocouple étalon et le thermomètre à résistance étalon à 630° C, nous ne pensons pas que les spécifications doivent être exprimées de façon à rendre

obligatoire l'emploi du point de solidification de l'antimoine. A Teddington, nous trouvons plus commode d'effectuer la comparaison dans un bain de sel agité [Bibl. 1] dans lequel nous trouvons qu'il est possible d'assurer une intercomparaison reproductible à un ou deux centièmes de degré.

Nous aimerions avoir quelques renseignements sur les raisons pour lesquelles on a réduit la tolérance dans la force électromotrice au point de solidification de l'or à un intervalle de 40 microvolts. Nous admettons que les limites anciennes étaient plus lâches qu'il n'est nécessaire, mais l'intervalle de 10280 à 10320 microvolts paraît être indûment restrictif. Si vous voulez bien vous reporter aux comparaisons internationales effectuées en 1930-1931 (*Research Paper* 373, *B. S. Journal of Research*, Vol. 11) vous trouverez les valeurs suivantes (qui évidemment sont données en unités « internationales ») :

Couples P. T. R.....	10255 à 10260,
« N. B. S.....	10305 à 10314,
« N. P. L.....	10312 à 10317.

Les faits suivants donnent des renseignements plus récents sur ce qui a été fait en Grande-Bretagne.

Un lot de couples (fil Johnson-Matthey) utilisés dans un travail du N. P. L. de 1939 [2] s'échelonnaient de 10326 à 10338.

Les tableaux de la force électromotrice normale, fournis par Johnson-Matthey comme représentant des valeurs moyennes pour leurs fils, donnent 10323.

L'étude actuellement en cours au N. P. L., avec deux groupes de six couples dont les fils proviennent de Johnson-Matthey pour l'un et de Sheffield Smelting Co. pour l'autre, donne des valeurs qui s'échelonnent entre 10303 et 10333.

Les valeurs ci-dessus doivent être maintenant augmentées de 4 microvolts à cause du changement en volt « absolu » qui vient d'entrer en vigueur, de telle sorte que, lorsque cette correction est effectuée, la force électromotrice moyenne des fils britanniques se trouve à la limite supérieure des tolérances que vous proposez, ou légèrement au-dessus. Les nouvelles limites proposées excluraient en tout cas des fils allemands d'avant-guerre, mais des renseignements recueillis par l'un de nous chez W. C. Heraeus, au cours d'un voyage récent en Allemagne, laissent penser que leur production courante n'est pas de la

qualité exigée pour l'Échelle Internationale (le chiffre de 1,385 pour $\frac{R_{100}}{R_0}$ a été mentionné), de telle sorte que cette exclusion n'appelle probablement pas d'objection sérieuse.

Les résultats expérimentaux que nous possédons n'indiquent pas qu'une tolérance aussi étroite soit nécessaire pour assurer que l'échelle soit définie sans ambiguïté. Nous n'avons pas étalonné de couples à 10 p. 100 dont la force électromotrice soit juste en dehors de l'intervalle proposé, mais nous possédons quelques résultats intéressants sur des couples à 13 p. 100. Deux couples, l'un en alliage à 10 p. 100 et l'autre en alliage à 13 p. 100, ont été étalonnés aux points de solidification de l'antimoine, de l'argent et de l'or avec les résultats suivants :

	Sb.	Ag.	Au.
10 p. 100.....	5543,7	9136,8	10324,9
13 p. 200.....	5922,1	9988,0	11350,5

Ils ont été aussi comparés entre eux à deux températures intermédiaires entre les points de solidification de l'antimoine et de l'argent, et les valeurs des forces électromotrices correspondantes ont été 7240,5 et 7830 d'une part, 8284 et 9014 d'autre part. En utilisant une loi quadratique déduite des trois points fixes dans chaque cas, nous trouvons les températures suivantes : 790°,4₂ et 790°,3₀ d'une part, 885°,0₇ et 884°,9₅ C d'autre part. Ces résultats laissent penser que des couples de platine pur et d'alliage platine-rhodium pur définiraient la même échelle dans un domaine assez large de la composition du fil de l'alliage, de sorte que, à ce point de vue en tout cas, la restriction ne paraît pas nécessaire, mais nous serions disposés à admettre une tolérance de ± 50 sur 10300 microvolts.

Cependant, la seule limitation de la force électromotrice au point de solidification de l'or n'est pas suffisante pour garantir qu'un couple est très satisfaisant, car il serait possible d'ajuster le contenu en rhodium d'un fil d'alliage très impur de façon à se conformer à une force électromotrice spécifiée au point de solidification de l'or, et dans de telles conditions la forme de l'échelle différerait sans aucun doute de la normale.

Il semble, par conséquent, que l'on pourrait admettre une tolérance plus large, mais qu'une certaine prescription additionnelle devrait être imposée afin d'assurer une forme satisfaisante

de la courbe. Dans ce but, votre proposition pour limiter la valeur du rapport $\frac{E_{Au} - E_{Sb}}{E_{Au} - E_{Ag}}$ s'offre à l'esprit, mais nous discutons le mérite d'un critère différent dans notre commentaire de la troisième Partie.

TROISIÈME PARTIE.

Nous avons l'impression que la tentative pour donner un résumé très bref des meilleures techniques actuelles n'a pas été entièrement satisfaisante et a conduit à une présentation du sujet quelque peu déséquilibrée. Par exemple, la technique de la manipulation des instruments de mesure de température proprement dite et les sources d'erreurs susceptibles de se présenter dans leur usage sont à peine mentionnées, tandis que les erreurs possibles dans les mesures auxiliaires de pression (bien qu'il faille admettre qu'elles sont importantes) sont traitées tout au long.

Il nous semble qu'il n'est guère possible de donner dans ce memorandum des renseignements suffisants pour répondre à toutes les exigences sans se référer aux travaux originaux publiés, et nous suggérons que cette section pourrait être quelque peu abrégée, mais qu'elle devrait être accompagnée d'une bibliographie annotée de toutes les publications capables de fournir un guide de quelque valeur sur les meilleures techniques à adopter.

Nous donnons en Appendice une liste de quelques articles émanant du N. P. L., qu'il pourrait être utile d'inclure dans une telle bibliographie, si cette idée vous agréait.

En dehors de cette question de la façon générale de rédiger cette troisième Partie, nous désirons soulever quelques points de détail.

Section 2. — Nous aimerions avoir quelques renseignements sur la façon dont vous êtes arrivés à la tolérance de 4,020 à 4,035 pour le rapport $\frac{E_{Au} - E_{Sb}}{E_{Au} - E_{Ag}}$.

En utilisant les résultats expérimentaux auxquels nous avons déjà fait allusion, nous obtenons les valeurs suivantes :

Comparaisons internationales de 1933.

P. T. R.....	4,028 et 4,018	} d'après les observations du N. P. L.
N. B. S.....	4,040 et 4,036	
N. P. L.....	4,022 et 4,037	

Étude du N. P. L. en 1939.

4,033, 4,028 et 4,030.

La valeur obtenue, d'après le tableau des forces électromotrices que nous utilisons pour les couples étalons employés dans notre travail d'étalonnage courant est 4,024.

Le critère proposé aurait, par conséquent, pour effet d'exclure quelques couples tout à fait satisfaisants, tandis que, en même temps, il ne nous paraît pas fournir une épreuve suffisamment sensible de la pureté des fils du thermocouple et de la technique expérimentale, ce à quoi il est destiné. Par exemple, si un couple avait été étalonné correctement aux points de solidification de l'or et de l'antimoine, et si la valeur correcte de ce rapport était voisine d'une des limites, l'écart possible sur la valeur vraie du point de solidification de l'argent pourrait être 4 microvolts sans que le rapport soit pris en dehors des limites proposées. D'une façon correspondante, si les points de solidification de l'or et de l'argent étaient corrects, le point de solidification de l'antimoine pourrait être erroné de 18 microvolts.

Nous avons examiné le résultat de l'étalonnage d'un grand nombre de couples d'origines diverses aux trois points fixes, et nous sommes arrivés à la conclusion qu'il y a une relation définie entre E_{Au} et $(E_{Au} - E_{Ag})$ et entre E_{Au} et $(E_{Au} - E_{Sb})$. Ainsi, lorsqu'on trace ces courbes, les points se disposent à très peu de chose près sur les lignes droites de la figure 2 (les droites moyennes ont été déterminées par la méthode donnée par Awbery, *Proc. Phys. Soc.*, 41, 1929, p. 384), et ceci suggère que l'on pourrait obtenir un contrôle très précis de la qualité du thermocouple et de la validité des observations en déterminant si les valeurs des forces électromotrices sont conformes à cette relation. Les critères peuvent être exprimés sous la forme suivante :

$$(1) \quad E_{Au} - E_{Ag} = 1185 + 0,158(E_{Au} - 10310) \pm 3$$

et

$$(2) \quad E_{Au} - E_{Sb} = 4774 + 0,631(E_{Au} - 10310) \pm 3.$$

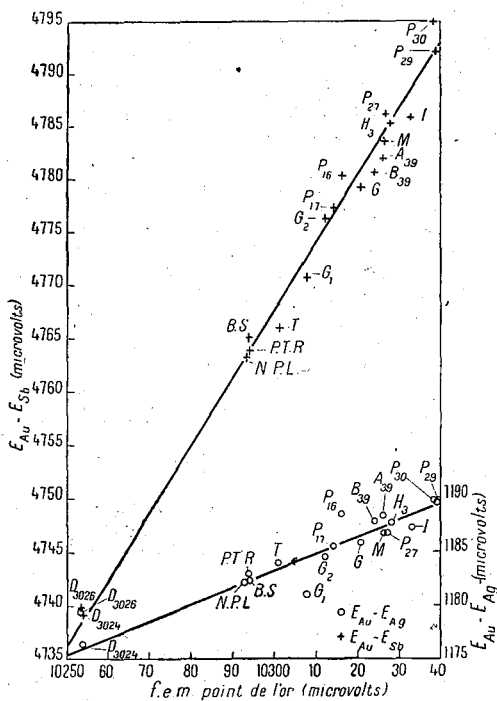


Fig. 2.

Couple	Manufacture	Référence
D 3024..	Allemagne 1930	Comparaisons Internationales
D 3026..		
G ₁	États-Unis 1930	B. S. J. R. RP 573
G ₂		
P ₁₆	Grande-Bretagne 1930	Observat. N. P. L.
P ₁₇		
P. T. R..	Moyenne des 6 couples précédents	Obsv. P. T. R. (corrigé)
B. S.....	"	" B. S. (")
N. P. L..	"	" N. P. L. (")
P ₂₇	Grande-Bretagne 1938	Proc. Phys. Soc. 1939, 51, 695.
P ₂₉		
P ₃₀		
H ₃	Grande-Bretagne 1939	Étalons N. P. L.
A ₃₉		
B ₃₉	Grande-Bretagne 1946	Observat. N. P. L.
G ₂		
I.....	S. S. Co	Observat. N. P. L. (Moy. de 6 couples)
M.....	Grande-Bretagne 1946	
T.....	S. S. Co	Tabl. de Réf. B. S. J. R. R. P. 530, 1933
	États-Unis 1933	

On remarquera que, d'après la figure 2, un seul des thermocouples donne une valeur qui tombe en dehors de ces limites, à savoir : le couple G₁ du National Bureau of Standards, d'après les observations du N. P. L. (comparaisons internationales déjà citées), l'écart étant environ 3,4 microvolts. Si l'on utilise cependant les observations finales du Bureau of Standards faites avec de l'argent d'inquartation, la discordance est réduite à 0,6 microvolts.

Les équations (1) et (2) ci-dessus peuvent être exprimées en fonction des constantes de l'équation parabolique de la façon suivante :

$$\begin{aligned} (1 \alpha) \quad & a + 4,1424 \cdot 10^2 b + 1,8275 \cdot 10^5 c = 2810 \\ (2 \alpha) \quad & a + 3,7812 \cdot 10^2 b + 0,2987 \cdot 10^5 c = 2750. \end{aligned}$$

Comme l'une quelconque de ces deux équations implique la détermination des trois points fixes, il semblerait que l'usage de l'une d'elles seulement serait un critère satisfaisant. Nous donnons ci-après (p. T 81) quatre exemples du calcul du premier membre de ces équations en utilisant les formules paraboliques pour des fils d'origines différentes.

Comme les équations (1) et (2) peuvent être utilisées directement d'après les observations aux points de solidification de l'antimoine, de l'argent et de l'or, tandis que les équations (1 α) et (2 α) nécessitent le calcul de l'équation quadratique comme étape préliminaire, nous sommes en faveur de l'utilisation des premiers critères en tant que moyen de déterminer la qualité du thermocouple et la validité des observations pour définir l'Échelle de Température.

Nous pensons que le dernier paragraphe de cette section pourrait peut-être être reconsidéré. Nous admettons que le couple étalon ne doit pas être chauffé au-dessus de 1100° C, et nous comprenons que vous n'avez pas l'intention de suggérer qu'un chauffage à cette température pourrait par lui-même provoquer un changement de 5 microvolts dans la force électromotrice. Nous hésitons beaucoup cependant à adopter la proposition selon laquelle on permettrait un changement de presque 5 microvolts dans la force électromotrice d'un thermocouple étalon ayant été porté à la température de solidification de l'or. Dans notre travail d'étalonnage courant, nous n'utiliserions pas un couple dont la force électromotrice au point de solidifi-

Origine du fil	Renseignements numériques tirés de	Equation parabolique $E = a + bt + ct^2$	Valeur du premier membre de l'équation	
			1 a.	2 a.
U. S. A. (N. B. S.).....	B. S. Reference Tables B. S. J. R. RP. 530 1933	$E = -333,29$ $+8,291\ 75\ t$ $+0,001\ 610\ 80\ t^2$	2807	2754
Angleterre (Johnson Matthey).....	N. P. L. Reference Table 1942	$E = -337,0$ $+8,3022\ t$ $+0,001\ 625\ t^2$	2805	2753 _s
Angleterre (Sheffield Smelting Co).	N. P. L. 1947 (Moy. de 6 couples)	$E = -379,0$ $+8,403\ 23\ t$ $+0,001\ 568\ 74\ t^2$	2815 _s	2751 _s
Allemagne (Heraeus).....	N. P. L. (Couple D 3024) B. S. J. R. RP. 573 1931	$E = -337,20$ $+8,287\ 33\ t$ $+0,001\ 576\ 83\ t^2$	2807 _s	2749 _s

cation de l'or aurait changé de plus de 3 microvolts depuis sa force électromotrice initiale, et pour des étalonnages de premier ordre nous imposerions une tolérance plus sévère, par exemple ne dépassant pas un microvolt.

Section 3. — Ainsi que nous l'avons déjà dit dans notre commentaire de la deuxième Partie, nous sommes d'accord pour exprimer la pression normale en dynes par cm^2 . Nous avons l'impression cependant qu'il y a une sorte d'incohérence dans la rédaction lorsque nous arrivons à la troisième Partie. Dans cette dernière on donne des équations qui relient la température d'équilibre à la pression qui règne au moment de l'observation.

En utilisant ces équations il faudra substituer à 1013250 dynes/ cm^2 une pression de 760^{mm} de mercure à $g = 980,665$ dynes/g et à 0°C , où ayant une densité de $13,5951$ g/ cm^3 , sans que le choix entre les deux soit bien clair.

Nous préférons que la pression normale soit exprimée en dynes/ cm^2 , parce qu'elle est alors fondée uniquement sur les étalons primaires de masse, de longueur et de temps, éliminant ainsi toute incertitude sur l'expression de la pression en mercure ordinaire à 0°C ou en mercure de densité $13,5951$ g/ cm^3 . Pour rendre effective la définition en dynes/ cm^2 , les équations thermométriques données dans la troisième Partie devraient être corrigées et rendues conformes à l'expression des pressions dans ces unités. La pression normale serait alors définie sans ambiguïté, et tout progrès dans la technique des mesures de pression, en particulier grâce à une meilleure connaissance de la densité et de la composition isotopique du mercure, serait sans répercussion sur la définition fondamentale.

Pour répondre aux besoins dans lesquels on n'exige pas la précision la plus élevée, on peut estimer désirable de maintenir en plus de la définition et des équations en dynes/ cm^2 , une référence à 760^{mm} de mercure à 0°C et $g = 980,665$ dynes/g, ainsi qu'à la valeur admise pour la densité et le coefficient thermique du mercure, et aux équations sous leur forme actuelle. Ceci serait possible, mais nous proposons de le faire d'une façon entièrement séparée des définitions et des recommandations.

Nous aimerions nous référer aux renseignements que vous donnez au sujet des corrections à appliquer à la hauteur observée de la colonne de mercure. Ceux-ci sont trop détaillés pour qui utilise un baromètre de conception ordinaire, étalonné directe-

ment ou indirectement par rapport à un baromètre normal primaire, et peut amener des confusions. D'un autre côté, les détails fournis sont insuffisants pour qui désire mesurer la pression d'après les principes fondamentaux. Nous pensons que ceci illustre nos remarques antérieures, d'après lesquelles il serait désirable de renvoyer à des références bibliographiques pour les renseignements sur les détails de technique.

ANNEXE III.

National Bureau of Standards

MÉMORANDUM RELATIF A UNE 5^e SECTION

POUR LA QUATRIÈME PARTIE DU PROJET

D'ÉCHELLE INTERNATIONALE DE TEMPÉRATURE

DE 1948

(24 JANVIER 1948)

(Traduction)

Les résultats de la comparaison de six thermomètres à résistance de platine avec un thermomètre à hélium dans le domaine de température qui s'étend de 10° à 90° K sont donnés dans le *Research Paper RP 1188, J. Research NBS, 1939, 22, 351*. Sauf à la partie inférieure de ce domaine de température, on a trouvé que la précision du thermomètre à résistance était environ dix fois la précision du thermomètre à gaz. On a pensé par conséquent qu'il était très désirable d'étendre l'Échelle Internationale de Température aux températures inférieures au point d'ébullition de l'oxygène, et que l'on devrait inclure dans le projet de 1948 des propositions qui étendraient, jusqu'aux températures voisines de 10° K, le domaine utile du thermomètre à résistance de platine.

Depuis 1939, environ quinze thermomètres à résistance ont été étalonnés par comparaison avec un ou plusieurs des six thermomètres qui avaient été précédemment étalonnés au moyen d'un thermomètre à hélium. Ces comparaisons ont été effectuées entre 10° et 90° K, en un nombre de points suffisant pour qu'on puisse établir un tableau ou un graphique d'après lesquels on peut déterminer la température en fonction de la résistance mesurée, ainsi qu'il est expliqué dans RP 1188.

Une étude récente des résultats obtenus dans ces intercompa-

raisons a montré qu'à toute température le rapport $\frac{R_T - R_T}{R_{O_2} - R_{T_1}}$ est à peu près constant pour différents thermomètres, R_{O_2} étant la résistance au point d'ébullition de l'oxygène, R_{T_1} la résistance à un point d'étalonnage quelconque de température inférieure, et R_T la résistance à une température intermédiaire quelconque. Par exemple, lorsque R_{T_1} est le point triple de l'oxygène (54°,36 K), on a trouvé que le rapport ci-dessus a la même valeur, avec une exactitude de quelques millièmes de degré pour presque tous les thermomètres, à toute température comprise entre 54°,36 et 90°,19 K. Lorsque R_{T_1} est le point d'ébullition de l'hydrogène en équilibre (20°,273 K), on a obtenu des résultats analogues pour tous les thermomètres dont le rapport $\frac{R_{100}}{R_0}$ était supérieur à 1,3920. On a trouvé des différences beaucoup plus considérables, en particulier dans le domaine de 20° à 40° K, pour des thermomètres dont le rapport $\frac{R_{100}}{R_0}$ était inférieur à 1,3920, ce qui souligne combien il est important et désirable d'adopter ce critère pour des thermomètres étalons. Celui-ci paraît être un critère nécessaire et suffisant de la pureté et de l'état physique du platine des divers thermomètres afin qu'ils suivent étroitement la même relation résistance-température.

Si l'on admet que le rapport $\frac{R_T - R_{H_2}}{R_{O_2} - R_{H_2}}$ est une fonction univoque de la température pour des thermomètres étalons, il fournit un moyen commode et reproductible pour interpoler toute température intermédiaire avec une précision bien meilleure qu'il n'a été possible avec les thermomètres à gaz. On peut attribuer des valeurs numériques à ce rapport, de telle sorte que la température dans cet intervalle soit aussi étroitement conforme à l'échelle Kelvin qu'il est possible dans l'état actuel de nos connaissances.

Jusqu'à présent aucune formule simple n'a été proposée pour représenter la relation résistance-température aux températures inférieures au point d'ébullition de l'oxygène. Dans la plupart des cas, un tableau est plus commode qu'une formule, surtout si la formule est compliquée. On propose, ci-après, un tableau donnant des valeurs échelonnées de degré en degré. Les valeurs numériques contenues dans le tableau sont fondées sur la valeur assignée à la température des deux points fixes et sur des inter-

comparaisons d'un thermomètre étalon avec l'un des thermomètres précédemment étalonnés au moyen d'un thermomètre à hélium. Un autre tableau donnant des températures échelonnées selon des intervalles égaux de $\frac{R_T - R_{H_2}}{R_{O_2} - R_{H_2}}$ serait plus commode pour déterminer la température d'après des mesures de résistance.

Les équations proposées pour la tension de vapeur de l'hydrogène en équilibre peuvent être utilisées pour étalonner des thermomètres à résistance de platine dans le domaine des températures comprises entre 22° et 11° K environ. La justification de ces équations, y compris celle de la valeur 20°,273 K pour la température du point normal d'ébullition de l'hydrogène en équilibre, paraîtra dans une prochaine publication du National Bureau of Standards, actuellement sous presse.

Paragraphe additionnel proposé.

5. *Températures inférieures au point d'ébullition de l'oxygène.* — Pour mesurer des températures inférieures au point d'ébullition de l'oxygène, on peut utiliser des thermomètres étalons à résistance de platine munis d'un tube protecteur contenant un peu d'hélium, sans avoir à les comparer à un thermomètre à gaz ou à des thermomètres qui auraient été contrôlés de cette façon. Entre le point d'ébullition de l'oxygène et celui de l'hydrogène, on peut obtenir la température en étalonnant un thermomètre à résistance de platine à un seul point fixe additionnel et en utilisant pour l'interpolation le rapport $\frac{R_T - R_{H_2}}{R_{O_2} - R_{H_2}}$ dans lequel R_{O_2} est la résistance au point d'ébullition de l'oxygène (90°,19 K ou —182°,97 C), R_{H_2} la résistance au point d'ébullition de l'hydrogène en équilibre (20°,273 K), et R_T la résistance à une température intermédiaire quelconque T. On a trouvé que ce rapport a la même valeur pour tous les thermomètres étalons, avec une approximation d'environ 0,01 degré ($\frac{R_{100}}{R_0}$ étant supérieur à 1,3920), à une température quelconque comprise entre ces points d'étalonnage. D'après la résistance observée, on peut obtenir la température dans ce domaine en

employant le tableau suivant qui donne, de degré en degré, la valeur de $\frac{R_T - R_{H_2}}{R_{O_2} - R_{H_2}}$.

$^{\circ}$ K.	$\frac{R_T - R_{H_2}}{R_{O_2} - R_{H_2}}$	$^{\circ}$ K.	$\frac{R_T - R_{H_2}}{R_{O_2} - R_{H_2}}$	$^{\circ}$ K.	$\frac{R_T - R_{H_2}}{R_{O_2} - R_{H_2}}$
20,273..	0,000 00	44.....	0,208 38	68.....	0,599 61
21.....	002 41	45.....	222 35	69.....	617 37
22.....	006 10	46.....	236 63	70.....	635 17
23.....	010 25	47.....	251 19	71.....	653 02
24.....	014 87	48.....	266 02	72.....	670 90
25.....	019 98	49.....	281 11	73.....	688 81
26.....	025 59	50.....	296 43	74.....	706 76
27.....	031 70	51.....	311 98	75.....	724 73
28.....	038 31	52.....	327 75	76.....	742 73
29.....	045 44	53.....	343 70	77.....	760 76
30.....	053 07	54.....	359 84	78.....	778 80
31.....	061 21	55.....	376 15	79.....	796 88
32.....	069 85	56.....	392 62	80.....	814 97
33.....	078 99	57.....	409 24	81.....	833 08
34.....	088 61	58.....	426 01	82.....	851 21
35.....	098 71	59.....	442 90	83.....	869 35
36.....	109 26	60.....	459 93	84.....	887 51
37.....	120 27	61.....	477 07	85.....	905 67
38.....	131 70	62.....	494 32	86.....	923 85
39.....	143 54	63.....	511 67	87.....	942 03
40.....	155 78	64.....	529 11	88.....	960 21
41.....	168 40	65.....	546 64	89.....	978 39
42.....	181 39	66.....	564 23	90.....	996 55
43.....	194 72	67.....	581 89	90.19...	1,000 00

Aux températures comprises entre 22° K environ et 11° K environ, on peut étalonner un thermomètre à résistance de platine par la tension de vapeur de l'hydrogène liquide ou solide en équilibre en utilisant les équations suivantes, dans lesquelles P est la pression en millimètres de mercure et T est exprimé en degrés K :

Liquide..... $\log_{10} P = 4,64392 - 44,3450/T + 0,02093 T$
 Solide..... $\log_{10} P = 4,62438 - 47,0172/T + 0,03635 T$

L'expression « hydrogène en équilibre » utilisée ici se rapporte à l'hydrogène composé de parahydrogène en équilibre avec l'orthohydrogène à la température T. D'ordinaire, la transformation de l'ortho en parahydrogène est lente, mais en présence d'un bon catalyseur, tel que le chromite de zinc ($ZnCrO_2$) finement pulvérisé et activé par un chauffage à environ $400^\circ C$ sous vide, l'équilibre est atteint en quelques minutes.

Le point triple de l'oxygène ($54^\circ,363 K$) et le point triple de l'hydrogène en équilibre ($13^\circ,813 K$) sont des points fixes additionnels qui peuvent être utiles dans ce domaine de température

ANNEXE IV

National Physical Laboratory.

NOTE SUR

LE THERMOCOUPLE ÉTALON EN PLATINE
ET PLATINE A 10 POUR 100 DE RHODIUM

DÉFINITION DE LA COURBE : FORCE ÉLECTROMOTRICE-TEMPÉRATURE

(19 MAI 1948)

(Traduction)

Dans les commentaires du N. P. L. sur les propositions faites par le National Bureau of Standards pour l'Échelle Internationale de Température de 1948, on avait proposé que des relations entre la force électromotrice du thermocouple étalon en platine et platine à 10 p. 100 de rhodium aux points de solidification de l'or, de l'argent et de l'antimoine puissent être spécifiées dans des limites étroites, afin de donner un contrôle de la validité des observations et de la pureté des fils du thermocouple. D'après l'examen des valeurs de la force électromotrice obtenues au N. B. S., au N. P. L. et à la P. T. R. sur des thermocouples d'origine américaine, britannique et allemande, 8 lots différents de thermocouples ayant été examinés, on a déduit les critères suivants :

$$E_{Au} - E_{Ag} = 1185 + 0,158 (E_{Au} - 10310) \pm 3 \text{ microvolts,}$$

$$E_{Au} - E_{Sb} = 4774 + 0,631 (E_{Au} - 10310) \pm 3 \text{ microvolts.}$$

(4776 unités absolues).

Depuis que ces commentaires ont été faits, on a pu disposer de quelques résultats supplémentaires, qui sont d'un intérêt consi-

dérable pour démontrer la valeur de ces critères. On a trouvé six thermocouples, deux provenant de chacun des trois lots, qui satisfaisaient la condition relative à $E_{Au} - E_{Ag}$, mais qui donnaient des valeurs quelque peu supérieures à celle qui est indiquée par l'équation relative à $E_{Au} - E_{Sb}$. Les résultats étaient les suivants :

Thermocouple n°.	Microvolts (Unités internationales).					
	1.	2.	3.	4.	5.	6.
E_{Au}	10316,7	10323,7	10328,7	10325,4	10303,3	10305,8
E_{Ag}	9129,4	9137,0	9140,1	9136,8	9119,7	9121,0
$E_{Au} - E_{Ag}$	1187,3	1186,7	1188,6	1188,6	1183,6	1184,8
Critérium.....	1186,1	1187,2	1188,0	1187,4	1183,9	1184,3
E_{Sb}	5529,6	5535,9	5535,2	5535,3	5529,9	5528,3
$E_{Au} - E_{Sb}$	4787,1	4787,8	4793,5	4790,1	4773,4	4777,5
Critérium.....	4778,2	4782,6	4785,8	4783,7	4769,8	4771,3
Différence observa- tion-critérium...	+8,9	+5,2	+7,7	+6,4	+3,6	+6,2
Différ. moyenne...	6,3					

En utilisant la valeur moyenne des forces électromotrices données par les six thermocouples mentionnés ci-dessus aux points de solidification de l'or, de l'argent et de l'antimoine, on a déterminé l'équation quadratique, et l'on a trouvé qu'il était nécessaire d'assigner au point de solidification de l'argent une valeur de $961^{\circ},0$ C pour pouvoir obtenir un accord à $0,1$ degré près avec l'échelle du thermomètre à résistance, en descendant jusqu'à 55° C. On avait montré, cependant, dans nos commentaires, auxquels nous faisons allusion ci-dessus, qu'un lot de six thermocouples qui satisfaisaient au critérium exigeaient pour le point de solidification de l'argent une valeur de $960^{\circ},9$ C pour que soit réalisé l'accord avec l'échelle du thermomètre à résistance.

De bonnes raisons apparaissent d'après ces résultats, pour supposer qu'il y avait une différence de pureté dans les fils des deux lots de thermocouples, et ceci a été contrôlé par l'examen spectrographique de cinq thermocouples choisis de la façon suivante : les numéros 3 et 4 du tableau ci-dessus, G et H parmi les six thermocouples mentionnés dans nos commentaires précédents, et B. 39 extrait des étalons du N. P. L. Le rapport du spectroscopiste sur les analyses est reproduit ci-dessous :

Élément et raie décelés.	Thermocouple n°			
	0.	11.	3.	4.

B. 39.

Fils de platine.

Or 2675.....	> 0,001 %	0,001 %	< 0,001 %	< N° 3	< N° 4
Argent 3280.....	à peine visible	à peine visible	à peine visible	très faiblement visible	faiblement visible
» 3382.....	non décelé	non décelé	non décelé	»	»
Cuivre 3273, 3274.....		raies faibles;	pas de différences sensibles.		

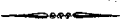
Fils de platine-rhodium.

Or 2675.....	à peine visible	à peine visible	faiblement visible	faiblement visible	à peine visible
Cuivre 3273, 3274.....		faiblement visible;	pas de différences sensibles.		
Argent 3382.....	non décelé	à peine visible	à peine visible	faiblement visible	faiblement visible
Fer 3020, 3021, 2599, 2598, 2488.....		faiblement visible;	pas de différences sensibles.		
Palladium 3404, 3242.....	faiblement visible	faiblement visible	> G et H	> 3	très faiblement visible ³
Magnésium 2852, 2802, 2795.....		faiblement visible;	pas de différences sensibles.		

Les éléments suivants ont été également recherchés mais n'ont été décelés dans aucun des échantillons : Al, B, Bi, Co, Cr, Mn, Mo, Ni, Pb, Si, Sn, Ti, V, Zn, Ir, Os, Ru.

Les échantillons 3 et 4 étaient moins purs que les autres.

Le rapport ci-dessus a été établi par MM. Johnson-Matthey and Co. Ltd. d'après des résultats obtenus dans leur section de recherches. Avant que le rapport n'ait été achevé, on n'a pas révélé quels étaient les échantillons analysés. Parmi les cinq thermocouples examinés, G, H et B. 39 satisfaisaient au critérium, mais non 3 et 4, et ceux-ci se sont montrés moins purs, l'impureté étant du palladium dans le fil de platine-rhodium. Il est intéressant que les thermocouples qui ne satisfaisaient pas aux critères proposés étaient précisément ceux-là mêmes qui se sont montrés impurs à l'analyse spectrographique et présentaient une anomalie appréciable de courbure entre 550° et 630° C.



ANNEXE V

Institut de Métrologie de l'U. R. S. S.

NOTES SUR LE PROJET DE RÈGLEMENT

DE

L'ÉCHELLE INTERNATIONALE

DE TEMPÉRATURE DE 1948

ÉTABLI PAR LE

NATIONAL BUREAU OF STANDARDS DES ÉTATS-UNIS

(21 MAI 1948)

(Traduction remise).

Le projet de « Règlement sur l'Échelle Internationale de Température de 1948 », proposé par le National Bureau of Standards, correspond en général au projet élaboré à la première session du Comité Consultatif de Thermométrie en 1939 et peut servir de base à la discussion sur l'échelle de température à la prochaine session du Comité Consultatif de Thermométrie.

Pourtant nous jugeons nécessaire de faire sur le projet du N. B. S. les quelques remarques suivantes et les propositions qui en résultent.

PARTIE 2.

3 b. N'ayant pas assez d'expériences dans la réalisation du point triple de l'eau, il serait plus sage de maintenir l'ancienne définition du point zéro. La relation du point zéro avec le point triple pourrait être donnée sous forme de remarque.

3 e. Il serait rationnel, selon notre opinion, de mettre le point de solidification de l'argent dans le groupe des points auxiliaires à

cause de l'incertitude considérable ($\pm 0,3$ degré) avec laquelle on connaît à présent la valeur de ce point sur l'échelle thermodynamique; ainsi qu'à cause de la nécessité de maintenir rigoureusement au cours de la fusion de l'argent l'atmosphère de réduction intense ou le vide, pour garantir la précision nécessaire du résultat.

4. Il convient d'introduire ici un certain nombre de perfectionnements essentiels. Tout d'abord, il faut indiquer, pour le thermomètre de platine, les formules des différences, car la pratique de plusieurs années dans l'emploi des thermomètres de résistance en platine a montré que la constance des valeurs $R_{100} - R_0$, δ et β est observée à un plus haut degré que celle des valeurs R_0 , A, B et C. Les formules des différences sont en outre plus commodes pour le calcul de la température.

4 a. Le texte de ce paragraphe devrait être formulé comme suit :

« Depuis 0°C jusqu'au point de solidification de l'antimoine la température t est définie à l'aide de la formule

$$t = \frac{R_t - R_0}{R_{100} - R_0} 100 + \delta \left(\frac{t}{100} - 1 \right) \frac{t}{100},$$

dans laquelle R_t est la résistance, à la température t , du thermomètre à résistance-étalon en platine; R_0 et R_{100} sont les résistances du thermomètre à 0° et 100° . La constante δ est déterminée³ au moyen de la mesure de la résistance au point d'ébullition du soufre.

La pureté et les propriétés physiques du platine dont le thermomètre est fait, doivent être telles que le rapport $\frac{R_{100}}{R_0}$ soit plus grand que 1,3920.

La relation $\frac{R_s - R_0}{R_{100} - R_0}$ (R_s = résistance au point d'ébullition du soufre) du thermomètre-étalon doit être comprise entre 4,2165 et 4,2180 ».

4 b. La limitation de ce domaine au point d'ébullition de l'oxygène ne trouve pas d'objections. Le texte du paragraphe doit être formulé comme suit :

« Du point d'ébullition de l'oxygène à 0°C la température est définie à l'aide de la formule

$$t = \frac{R_t - R_0}{R_{100} - R_0} 100 + \delta \left(\frac{t}{100} - 1 \right) \frac{t}{100} + \beta \left(\frac{t}{100} - 1 \right) \left(\frac{t}{100} \right)^3,$$

dans laquelle R_t , R_0 et R_{100} ont le sens indiqué au paragraphe 4a.

La constante δ est déterminée au moyen de la mesure de la résistance du thermomètre au point d'ébullition du soufre en se servant de la formule, sans le terme contenant β . La constante β est déterminée au moyen de la mesure de la résistance au point d'ébullition de l'oxygène.

Le thermomètre employé dans ce domaine doit conduire à un rapport

$$\frac{R_0 - R_{0_2}}{R_{100} - R_0}$$

(R_{0_2} = résistance au point d'ébullition de l'oxygène) compris entre 1,926 et 1,928 ».

4c. Nos recherches ont démontré qu'à cause de la proximité des températures de solidification de l'or et de l'argent, ainsi qu'à cause des valeurs considérables d'incertitudes avec lesquelles les valeurs de ces températures sont admises dans l'échelle thermodynamique, la méthode actuelle de définition de l'échelle d'après les points Sb, Ag et Au a pour résultat des écarts très grands entre l'Échelle pratique internationale et l'échelle thermodynamique, ces déviations atteignant $\pm 0,54$ degré dans le domaine de 800 à 850°C. Nous jugeons rationnel d'exclure le point de solidification de l'argent et de réaliser la construction de la région thermodynamique de l'échelle d'après les points Zn, Sb et Au et la température de solidification des échantillons donnés, Zn et Sb étant définis au moyen d'un thermomètre à résistance étalon au point d'ébullition du soufre et les points de solidification Sb et Au. Les déviations probables d'une pareille échelle avec l'échelle thermodynamique dans la région de 800 à 850°C ne dépassent pas $\pm 0,26$ degré.

Également, pour définir la température t d'après la force électromotrice d'un thermocouple en platine platine-rhodié, nous jugeons rationnel d'employer la formule analogue à celle de Callendar pour le thermomètre en platine :

$$t = t_{Zn} + \frac{e_t - e_{Zn}}{e_{Sb} - e_{Zn}} (t_{Sb} - t_{Zn}) + \epsilon \left(\frac{t}{t_{Zn}} - 1 \right) \left(\frac{t}{t_{Sb}} - 1 \right),$$

où ϵ est une constante déterminée au moyen des observations au point de solidification de l'or.

L'emploi de cette formule établit l'uniformité des formules d'interpolation.

4 d. La proposition du Bureau of Standards concernant le changement de la valeur C_2 , 1,432 pour 1,438 cm. degré nous semble ne pas être assez fondée. C'est pourquoi nous jugeons rationnel de nous abstenir pour le moment du changement de la valeur admise de C_2 jusqu'à ce qu'on ait obtenu des données expérimentales plus sûres.

PARTIE 3.

1. Il faudrait transférer les exigences aux relations des intervalles dans les paragraphes correspondants de la partie 2. La nécessité de se servir du critère $\frac{R_S - R_0}{R_{100} - R_0}$ n'est pas fondée.

3. Il n'est pas nécessaire de traiter en détail l'introduction des corrections au baromètre.

11. La valeur que nous avons admise cette année pour la température absolue du point de glace $T_0 = 273^{\circ},16$ avec l'erreur probable $\pm 0^{\circ},01$ correspond complètement à la recommandation de ce paragraphe.

PARTIE 4.

1. Ce paragraphe doit être exclu, car il n'y a pas de raisons de garder dans le texte du « Règlement » deux genres de formules d'interpolation.

2. D'après notre expérience, il faut attribuer au point de solidification du mercure la valeur $-38^{\circ},86$.

4. Ce paragraphe, qui concerne la divergence entre l'Échelle Internationale jusqu'à 400° C et l'échelle thermodynamique, devrait, selon notre opinion, être exclu, malgré l'importance de la question posée. Les données citées dans cette partie ne touchent qu'une région comparativement petite de l'échelle de température, et, outre cela, elles ne sont pas assez incontestables pour qu'on puisse les introduire dans le « Règlement sur l'Échelle Internationale de Température ».

ANNEXE VI.

Laboratoire Électrotechnique de Tokio.

SUR L'ERREUR CAUSÉE

PAR LA

CONDUCTION THERMIQUE DU THERMOCOUPLE

ET SON INFLUENCE SUR L'ÉCHELLE
INTERNATIONALE DE TEMPÉRATURE

Par le Dr. M. TANAKA et M. K. OKADA

(1^{er} AVRIL 1948).

1. *Introduction.* — Quand on mesure la température d'équilibre d'un métal en fusion ou en solidification par un thermocouple, différentes valeurs de la température (T_J) sont obtenues qui s'approchent de la valeur ultime (t_0) à mesure qu'augmente la profondeur d'immersion dans le métal.

Le présent article expose une méthode pour déceler et pour compenser l'erreur susmentionnée ($\theta_0 = T_J - t_0$), afin que la valeur ultime (t_0) soit obtenue.

Les causes⁽¹⁾ du changement de la température observée sont les suivantes :

a. Changement de la répartition de la température dans les bras du couple dont la propriété thermoélectrique n'est pas strictement homogène.

⁽¹⁾ *Researches of the Electrotechnical Laboratory*, n° 404, p. 3-16 (août 1936); *Electrotechnical Journal*, Vol. 1, n° 2, p. 42-48 (juillet 1937).

b. Changement de la température à la soudure de mesure avec le changement du courant de chaleur dû à la conduction thermique.

Les auteurs de cette Note ont étudié le traitement thermique des fils conducteurs et ont découvert une nouvelle méthode pour examiner strictement l'homogénéité de ces fils. En utilisant des fils ainsi obtenus, ils ont construit un thermocouple d'un type spécial qu'ils appellent le thermocouple à trois bras.

Au moyen de ce thermocouple, les auteurs ont réussi à compenser l'erreur causée par conduction thermique dans la détermination des températures, c'est-à-dire que les températures obtenues s'accordent, dans la limite des erreurs d'observation, malgré le changement de la profondeur d'immersion, de la condition du four et de la répartition de la température dans les bras.

De plus, il a été démontré que la température d'équilibre est bien la même au moment de la solidification et de la fusion d'un métal.

II. *L'erreur causée par la conduction thermique.* — Quand les conditions dans le four sont maintenues constantes autant qu'il est possible, les températures d'équilibre observées dans les fusions répétées d'un métal varient régulièrement avec la profondeur d'immersion. La relation entre l'immersion (a) et l'erreur $\theta_{0,a}$ est représentée par la courbe F de la figure 1.

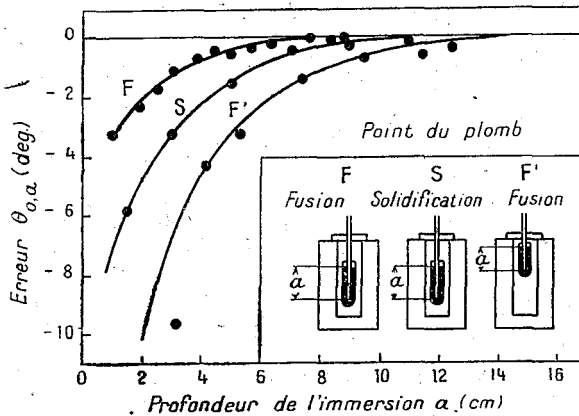


Fig. 1. — Relation entre l'immersion et l'erreur causée par la conduction thermique.

La courbe S est obtenue lors de solidifications répétées, et la courbe F', lors de fusions répétées en élevant le creuset plus haut que dans le premier cas.

Dans toutes ces conditions la température observée (T_J) s'est approchée de la même température ultime (t_0) à mesure qu'on augmentait la profondeur de l'immersion.

Désignant la profondeur de l'immersion par a , et les erreurs causées par la conduction par $\theta_{0,a}$, la relation suivante pourra être déduite de ces courbes :

$$(1) \quad \theta_{0,a} = \theta_0 e^{-\alpha a}.$$

Dans cette formule, θ_0 , erreur correspondant à une profondeur

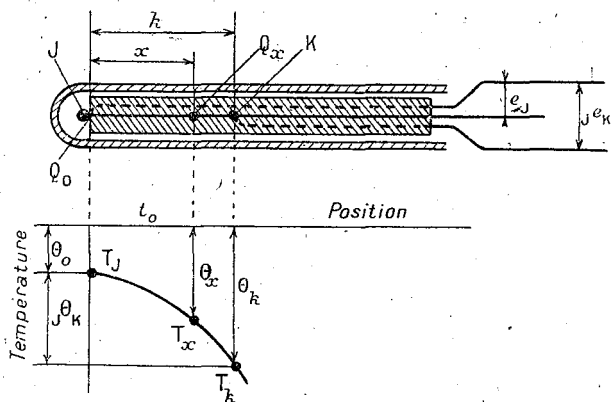


Fig. 2. — Schéma du thermocouple à trois bras.

nulle, est déterminé par les conditions extérieures, et α est une constante propre définie par la matière et par la construction du thermocouple.

La relation établie par l'équation (1) s'accorde avec les considérations théoriques développées par un des auteurs (1).

3. *Principe du thermocouple à 3 bras.* — Le thermocouple à 3 bras possède 3 fils conducteurs et une soudure auxiliaire K, séparée de k cm. de la soudure de mesure J, comme il est montré dans la figure 2.

(1) *Denkishikenjo-icho*, p. 310, n° 8, 1945 (en japonais).

On peut mesurer les forces électromotrices (e_J et $e_{J,K}$) qui correspondent respectivement à la température (T_J) de la soudure de mesure J et à la différence de température ($\theta_{J,K}$) entre J et K.

Dans une partie infinitésimale de longueur dx (cm) d'un fil élémentaire on exprime la résistance thermique en direction axiale, la résistance entre l'extérieur du tube protecteur et la surface du fil dx , et la résistance à l'extrémité du tube protecteur, respectivement par γdx , $\frac{dx}{\rho}$ et Γ (degré/W).

La relation entre Q et θ peut être représentée par des équations telles que

$$(2) \quad \begin{cases} Q_x = Q_0 + \int_0^x \frac{\theta_x}{\rho} dx \\ \theta_x = \theta_0 + \int_0^x \gamma Q_x dx, \end{cases}$$

où la différence des températures T_x et t_0 est θ_x (degré), et le courant thermique de conduction est Q (W), et la variable x représente la distance entre le point considéré et la soudure de mesure (J).

En tenant compte de la condition extérieure $\theta_0 = \Gamma Q_0$, la solution de θ_x peut être obtenue, et l'équation suivante peut en être déduite :

$$(3) \quad \frac{\theta_0}{\theta_{J,K}} = \frac{\theta_0}{\theta_k - \theta_0} = \frac{1}{\cos h \alpha k + \beta \sin h \alpha k - 1} = K,$$

où

$$\sqrt{\frac{\gamma}{\rho}} = \alpha, \quad \frac{\sqrt{\gamma}}{\Gamma} = \beta.$$

Ainsi, K devient une constante parce que α est une constante. Donc, on peut avoir

$$(4) \quad t_0 = T_J + K(\theta_{J,K}),$$

$$(5) \quad e_0 = e_J + K(e_{J,K}).$$

La valeur de e_0 ne peut être mesurée directement, mais elle peut être calculée en utilisant les valeurs mesurées de e_J et de $e_{J,K}$, parce que la valeur de K peut être obtenue à partir du résultat de plus de deux mesures.

Voici un exemple de la détermination de e_0 d'après la méthode susmentionnée.

La figure 3 montre le cas de la courbe de fusion et de celle de solidification au point de l'or, et la figure 4 prouve que toutes les valeurs de e_j en fonction de $e_{j,k}$ se trouvent sur une ligne droite inclinée, et ainsi la valeur ultime de e_0 peut être trouvée au point d'intersection de cette ligne avec l'axe des ordonnées ($e_{j,k} = 0$).

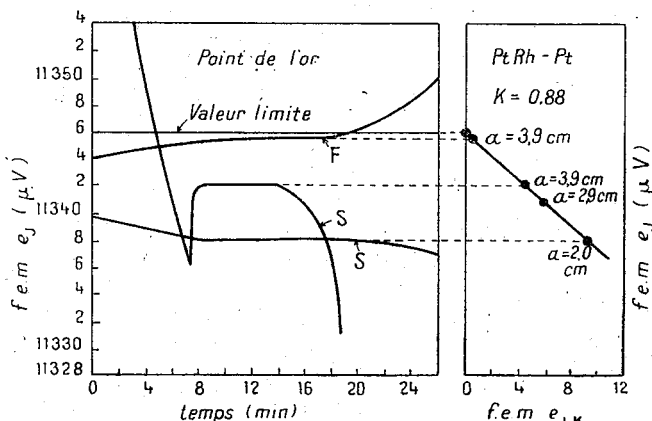


Fig. 3 et 4. — Relation entre les températures apparentes de fusion et de solidification de l'or et la valeur limite.

4. *Vérification expérimentale de l'utilité du thermocouple à 3 bras.* — Afin de vérifier l'utilité du thermocouple à 3 bras, les trois expériences suivantes ont été exécutées avec succès.

A. La température de l'huile (200° C environ) chauffée uniformément dans un épais creuset a été mesurée avec un thermocouple à 3 bras; d'autre part, la température (t_{01}) de la même huile a été mesurée directement avec un autre thermocouple mince et nu qui est enroulé autour du tube protecteur.

Les résultats sont montrés dans la figure 5, où θ_0 désigne la différence de température ($T_j - t_{01}$).

On trouvera que chaque température déduite des résultats observés avec le thermocouple à 3 bras s'accorde presque avec celle qui a été mesurée directement.

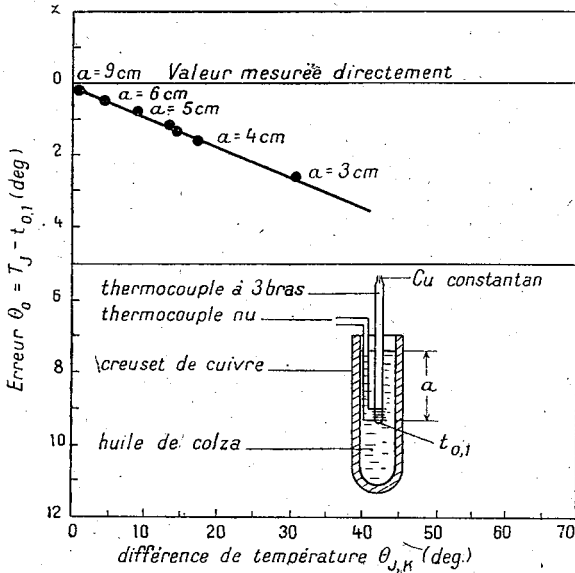


Fig. 5. — Relation entre l'erreur θ_0 et la différence de température $\theta_{J,K}$.

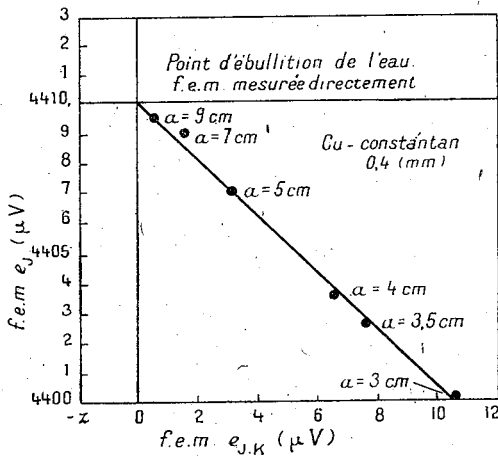


Fig. 6. — Comparaison de la valeur limite obtenue avec le thermocouple à trois bras, à la valeur mesurée directement.

B. Une autre expérience similaire a été exécutée au point d'ébullition de l'eau. Cette fois, pour mesurer la température de vapeur directement, on a utilisé le même thermocouple à 3 bras, sans tube protecteur, et le résultat a été inscrit dans la figure 6.

La valeur obtenue par le thermocouple à 3 bras et celle qui est mesurée directement se sont accordées à 4410,1 μ V.

C. La troisième expérience est la mesure de la température d'équilibre au point de l'antimoine, l'erreur causée par conduction thermique étant compensée par le thermocouple à 3 bras. La valeur obtenue a été trouvée la même à n'importe quelle profondeur d'immersion.

Valeurs obtenues au point de solidification de l'antimoine.

Métal.	Profondeur d'immersion (cm).	e_J (μ V).	$e_{J,K}$ (μ V).	K.	e_0 (μ V).
Antimoine (Schering Kahlbaum) 99,99 %.	1,9	5918,3	10,9	0,34	5922,0
	2,7	5919,8	7,0	»	5922,2
	3,2	5920,9	3,6	»	5922,1
	4,3	5921,1	2,3	»	5922,0
			Moyenne.....		5922,1
	1,9	5920,3	6,2	0,21	5922,1
	2,7	5921,5	3,5	»	5922,2
	3,2	5921,7	2,5	»	5922,2
	5,4	5921,5	2,2	»	5922,0
			Moyenne.....		5922,1
	4,3	5921,3	2,2	0,35	5922,1
	2,1	5918,1	11,3	»	5922,1
	3,2	5920,1	3,7	»	5922,1
	2,7	5919,4	7,7	»	5922,1
			Moyenne.....		5922,1
	4,3	5921,4	2,3	0,33	5922,2
3,2	5921,3	2,6	»	5922,2	
2,7	5920,6	4,6	»	5922,1	
2,1	5919,4	8,4	»	5922,2	
		Moyenne.....		5922,2	
		Moyenne générale...		5922,1	

5. *Erreur causée par conduction thermique dans la reproduction de l'Échelle Internationale de Température.* — Désignons par $\theta_{0,a}$ l'erreur du thermocouple immergé dans un métal à la profondeur de a cm et par $\Delta\theta_0$ le changement de la température indiquée lors de l'augmentation de 1^{cm} de la profondeur de cette immersion; la relation entre ces deux grandeurs peut s'exprimer par

$$(8) \quad \theta_{0,a} = \frac{\Delta\theta_0}{1 - e^{-\alpha}}$$

Dans l'article 5 des spécifications détaillées du texte corrigé concernant l'adoption d'une Échelle Internationale de Température (1933), la clause suivante est spécifiée.

« La profondeur de l'immersion doit être telle que, pendant le temps de solidification, on puisse élever ou abaisser le thermocouple d'au moins 1^{cm} à partir de sa position normale, sans changer d'un microvolt la force électromotrice. »

Quand la limite admissible de déplacement (1^{cm}) et celle de changement de la force électromotrice ($1 \mu\text{V}$) sont appliquées à l'équation (8), on voit que l'erreur peut atteindre $1,6 \mu\text{V} \sim 1,1 \mu\text{V}$, puisque la valeur de α varie de 1,0 à 2,0 pour un thermocouple précis de platine et platine-rhodié.

Donc, il peut arriver que la reproductibilité à moins de 0,1 degré, ne soit pas réalisée à la limite admise dans les spécifications.

De plus, la clause suivante est indiquée dans les mêmes spécifications :

« On peut aussi, au lieu de déplacer le thermocouple pour constater qu'il n'y a pas d'influence des conditions extérieures sur la température observée, déterminer les points de congélation et de fusion; si ceux-ci ne diffèrent pas de plus de 2 microvolts, les points de congélation peuvent être considérés comme satisfaisants. »

D'après l'opinion des auteurs de cette Note, l'existence d'une différence entre ces deux forces électromotrices prouve la présence d'une erreur causée par la conduction. Lorsque la limite admissible de la différence susmentionnée est de $2 \mu\text{V}$, l'erreur du point de congélation se monte à plus de $2 \mu\text{V}$ assurément.

Par conséquent, la reproductibilité à 0,1 degré près ne peut être obtenue.

Il n'est donc pas nécessaire de distinguer les points de solidification et de fusion dans les spécifications détaillées de l'Échelle Internationale de Température, parce qu'ils s'accordent étroitement, l'erreur causée par conduction pouvant être compensée comme il est décrit ci-dessus.

Les auteurs de cette Note proposent de réviser la rédaction de l'article 5 des spécifications détaillées dans le texte corrigé (1933) de l'Échelle Internationale de Température, et de recommander l'adoption du thermocouple à 3 bras.

Ils voudraient que ce problème soit étudié de façon plus approfondie dans tous les laboratoires nationaux dont ils espèrent le concours pour soutenir cette proposition.



ANNEXE VII.

National Bureau of Standards.

SUR LE CHOIX DE LA CONSTANTE C_2

PAR M. H. F. STIMSON

Extrait d'une lettre adressée au Directeur du Bureau International
des Poids et Mesures (Traduction).

Washington, le 6 avril 1948.

.....

Depuis que le projet d'une Échelle Internationale de Température de 1948 a été distribué en octobre dernier, on a mis en doute les fondements de la valeur 1,438 adoptée pour la constante C_2 de la loi du rayonnement et la confiance que l'on pouvait avoir en cette valeur. Le choix de la valeur proposée reposait principalement sur le poids des arguments apportés par l'examen critique minutieux des constantes physiques du Professeur R. T. Birge, mais notre confiance a été quelque peu renforcée par un article récent de Van Dusen et Dahl, dans lequel la valeur moyenne de C_2 a été trouvée 1,4382, le domaine d'incertitude s'étendant, il est vrai, de 1,4364 à 1,4396.

Depuis l'établissement du projet du National Bureau of Standards, nous avons reçu quelques exemplaires d'une mise au point sur « Notre connaissance des constantes atomiques F, N, m et h en 1947 et d'autres constantes qui s'en déduisent » par DuMond et Cohen. Cette mise au point tient grand compte de celle du Professeur Birge, mais y incorpore les résultats d'expériences nouvelles et d'améliorations dans la technique expérimentale, et paraît être par conséquent la mise au point la plus digne de confiance que nous connaissions à l'heure actuelle.

.....

Note du Bureau International :

D'après les documents joints à cette lettre, qui constituent une mise au point de Jesse W. M. DuMond et E. Richard Cohen, la valeur la plus probable de la deuxième constante de la loi de Planck est

$$C_2 = 1,43847 \pm 0,00019 \text{ cm. degré.}$$

Le nombre qui suit le signe \pm est l'erreur probable qui découle de l'emploi de la méthode des moindres carrés pour le calcul des constantes F , N , m et h d'après les données expérimentales choisies.

La valeur 1,438, proposée par le National Bureau of Standards dans son projet d'une Échelle Internationale de Température de 1948, se trouve donc confirmée par l'étude récente de DuMond et Cohen.

23 avril 1948.

ANNEXE VIII.

OBSERVATIONS SUR L'ÉCHELLE THERMOMÉTRIQUE
ET SUR L'UNITÉ DE CHALEUR

présentées

PAR M. W. SWIETOSLAWSKI.

(14 AVRIL 1948)

Thermométrie des très basses températures.

Je suis d'accord en principe avec la proposition du National Bureau of Standards de Washington D. C., mais je considère comme utile d'annexer à la décision une instruction avec indications sur le mode des mesures de températures à l'aide de thermomètres électriques à résistance, pour éviter des erreurs systématiques ou accidentelles qui seraient dues à l'introduction de chaleur par le courant électrique parcourant le thermomètre à résistance. Cette source d'erreurs peut être pratiquement éliminée par l'usage d'un amplificateur et par la réduction de l'intensité du courant au minimum possible.

Des fautes appréciables de ce genre ont été commises dans la pratique, fautes qui étaient dues au manque de corrections pour la chaleur de Joule.

Question du point triple de l'eau.

Je ne vois pas en principe de difficulté pour la substitution du point triple de l'eau au point de fusion de la glace comme point fixe fondamental, mais il faudrait, à mon avis, souligner le fait que nous possédons aujourd'hui des appareils cryométriques permettant de constater le point triple de l'eau sans aucune difficulté. Ne devrait-on donc pas ajourner la décision pour ne pas se voir

obligés de la changer prochainement, surtout lorsque ces appareils seront en usage courant aux laboratoires?

Unité de chaleur.

Comme président des Commissions réunies :

1^o Commission des Constantes Physico-Chimiques du Conseil International des Unions Scientifiques,

2^o Commission des Données Physico-Chimiques,

3^o Commission du Bureau des Étalons Physico-Chimiques de l'Union Internationale de Chimie,

je vous communique que la séance commune des trois Commissions susdites a conçu la résolution suivante :

a. L'unité de quantité de chaleur est la quantité de chaleur équivalente à l'unité d'énergie, désignée sous le nom de joule et égale à 10^7 ergs.

b. Lorsque les quantités de chaleur sont déterminées avec une haute précision, par comparaison avec la chaleur spécifique de l'eau à une certaine température θ° , elles seront évaluées en « calories à θ° ».

L'auteur des mesures devra indiquer dans sa publication le facteur de conversion qu'il a choisi pour lier le joule à la calorie.

c. Les termes précédemment employés de « Calorie Kilogramme » et « Grande Calorie » seront remplacés par celui de « Kilocalorie ».

Nous voyons que les points *a.* et *c.* de cette résolution, à laquelle s'est jointe aussi la Commission permanente de thermo-chimie et qui a été approuvée par le Conseil de l'Union Internationale de Chimie, sont identiques à la proposition du Comité Consultatif de Thermométrie (et Calorimétrie).

Le point *b.* présente une modification sérieuse de la motion du Comité Consultatif de Thermométrie. Je mentionne qu'elle a été acceptée à l'unanimité non seulement par les chimistes mais aussi par la Commission des Constantes Physico-Chimiques du Conseil International des Unions Scientifiques, où ont participé les physiciens prenant part à cette Commission de la part de l'Union Internationale de Physique.

La question d'une nouvelle définition de l'unité de chaleur se heurte à une résistance accentuée de maints spécialistes de divers pays et cet état de chose devrait être pris en considération par le Comité Consultatif de Thermométrie.

Les résolutions sus-mentionnées, ont été publiées dans les Comptes Rendus de la XIV^e conférence, Londres 17-24 juillet 1947 (p. 72).

ANNEXE 'IX.

Scientific Research Institute, Ltd., Tokio.

(précédemment : Institute of Physical and Chemical Research)

SUR LA TEMPÉRATURE DE FUSION DE LA GLACE
DANS L'ÉCHELLE KELVIN

PAR M. MASAO KINOSHITA

Extrait d'une lettre adressée au Président du Comité Consultatif
de Thermométrie et Calorimétrie (Traduction).

31 Komagome Kamifujimae-cho,
Bunkyo-ku, Tokyo.

5 mai 1948.

.....
En ce qui concerne la valeur la plus probable de T_0 , Oishi et moi-même sommes d'avis que les résultats obtenus depuis 1929 sont suffisants pour qu'on en tienne compte.

En utilisant les valeurs moyennes $[d(pv)/dp]_0$ et $[d(pv)/dp]_{100}$ adoptées à la P. T. R., à Leyde et au M. I. T., on obtient :

$T_0 = 273^{\circ},152$ par 37 points (1929-1937),

$T_0 = 273^{\circ},155$ par 47 points (1929-1939) y compris
10 points obtenus par Beattie,

$T_0 = 273^{\circ},154$ par 55 points (1929-1942) y compris

8 points obtenus par Oishi sur He, H₂, Ne et A.

On obtient les valeurs moyennes suivantes pour chacun des expérimentateurs :

Auteurs.	T ₀ .	Méthodes.
Heuse et Otto, 1929, 1930.	273, 147	α et β pour He, H ₂ , N ₂ et Ne
Keesom et autres, 1934.	273, 149	β pour He
Kinoshita et Oishi, 1937.	273, 165	α et β pour He, H ₂ , N ₂ et Ne
Beattie et autres, 1939.	273, 170	β pour N ₂
Oishi, 1942.	273, 145	α et β pour He, H ₂ , Ne et A
Moyenne.....	273, 155	

Les mesures sur Ne et A ne sont pas nombreuses. Si l'on met à part ces deux gaz, les nombres deviennent les suivants :

Heuse et Otto.....	273, 150
Keesom et autres.....	149
Kinoshita et Oishi.....	163
Beattie et autres.....	170
Oishi.....	147
Moyenne.....	273, 156

La valeur de la pente des isothermes obtenue par Oishi en 1942 sur six gaz comprenant l'air et CO₂, étudiés à des pressions inférieures à deux atmosphères, ne s'accorde pas avec celle qui a été adoptée dans les trois laboratoires. Mais, comme il est peu probable qu'une erreur systématique soit présente dans la méthode des isothermes qu'il a employée, on devrait accorder la considération qui lui est due à la valeur qu'il a obtenue 273^o, 148, valeur moyenne tenant compte de l'air et de CO₂.

APPENDICE.

Le tableau suivant est extrait d'un Mémoire de M. Jiro Oishi, intitulé *Isothermes à 0° C et 100° C de l'hélium, de l'hydrogène, du néon, de l'argon, de l'air et du gaz carbonique aux pressions inférieures à deux atmosphères, et température absolue du point de fusion de la glace* et publié dans le *Bulletin of the Institute of Physical and Chemical Research*, Volume 21, N° 11, novembre 1942.

L'auteur a déterminé des isothermes à 0° et 100° et à des pressions inférieures à deux atmosphères. Leurs équations peuvent être écrites comme suit :

$$(p\nu)_{0,p} = a_0 + K_0.p,$$

$$(p\nu)_{100,p} = a_{100} + K_{100}.p.$$

Les résultats sont rassemblés dans le tableau suivant :

Gaz.	$K_0 \cdot 10^5 (1/\text{mHg})$.	$K_{100} \cdot 10^5 (1/\text{mHg})$.	α_0 .	α_{100} .	T_0 .
He...	60 ± 1	58 ± 3	0,99940	1,36528	273,15
H ₂ ...	72 ± 4	79 ± 2	0,99928	1,36511	273,15
Ne...	51 ± 1	60 ± 3	0,99949	1,36542	273,14
A....	-133 ± 2	-29 ± 2	1,00133	1,36790	273,16
Air..	-80 ± 2	21 ± 1	1,00080	1,36721	273,14
CO ₂ ..	-921 ± 1	-446 ± 1	1,00921	1,37868	273,15
Moyenne.....					273,15

Considérant les résultats trouvés depuis 1929, la meilleure valeur de T_0 est prise égale à

$$T_0 = 273^{\circ},155 \pm 0,015.$$

ANNEXE X.

L'ÉCHELLE ABSOLUE DES TEMPÉRATURES D'APRÈS GIAUQUE

PAR M. W. J. DE HAAS

(Extrait d'une lettre adressée au Directeur du Bureau International).

Leiden, 30 avril 1948.

.....

1° D'abord, je crois qu'il n'y a pas beaucoup de discordance à propos du point triple de l'eau. Je pense que ce sujet ne donnera pas beaucoup de difficultés. En réalité la détermination est tellement sûre et précise qu'on préférera le point triple au point de fusion de la glace. Reste la réduction du point de fusion de la glace au point triple.

2° L'échelle absolue d'après M. Giauque (*Nature*, 16 avril 1939, vol. 143, p. 623).

J'ai étudié cette question soigneusement, et il y a beaucoup à dire pour l'adoption d'une échelle absolue avec un seul point fixe. En développant le $p\nu$ en série, on a

$$(1) \quad p\nu = A + Bp + Cp^2 + Dp^3,$$

A, B, C sont seulement des fonctions de T.

En adoptant avec la précision actuelle

$$(2) \quad p\nu = A + Bp$$

pour p infiniment petit,

$$p\nu = A.$$

Bp a la dimension de $p\nu$, alors $B \ll \nu$.

$p\nu = A$ donne la température Kelvin, qui donne ensuite l'échelle thermodynamique.

La valeur d'un degré est adoptée arbitrairement :

$$T_{\text{vapeur à 1 atmosphère}} - T_{\text{glace}} = 100 \text{ degrés.}$$

Il faut remarquer que les points T_{vap} et T_{gl} ne sont pas fixés sur l'échelle.

On peut remarquer

$$(3) \quad \frac{T}{T_1} = \frac{A}{A_1} \quad \text{pour } T = 0, \quad A = 0, \\ \text{zéro abs} \\ A = p(\nu - B)$$

et ensuite,

$$\frac{T}{T_1} = \frac{p(\nu - B)}{p_1(\nu_1 - B_1)}$$

Pour un point T_x arbitraire on aura

$$(4) \quad T_x = \frac{A_x}{A_{100} - A_0} (T_{\text{vap}} - T_{\text{gl}}) = \frac{p_x(\nu_x - B_x) \cdot 100}{p_{100}(\nu_{100} - B_{100}) - p_0(\nu_0 - B_0)}$$

Pour déterminer exactement une température T_x , il faut déterminer soit les B_x , B_0 et B_{100} avec une grande exactitude, soit le B_x en adoptant les B_0 et B_{100} . Cela dépendra.

Pour toutes les mesures qui ne demandent pas une exactitude excessive, on adoptera le B_0 et B_{100} , qui sont à présent connus avec une grande précision.

Quand il sera nécessaire d'avoir la plus grande précision il faudra déterminer trois nombres fondamentaux B_x , B_0 et B_{100} .

$$(5) \quad T_{\text{glace}} = \frac{A_0 \cdot 100}{A_{100} - A_0} = \frac{p_0(\nu_0 - B_0) \cdot 100}{p_{100}(\nu_{100} - B_{100}) - p_0(\nu_0 - B_0)}$$

Système Giaque. — Adoptons le point triple (pour fixer les idées) à 273,1600.

Pour déterminer une température quelconque on aura

$$(6) \quad T_x = \frac{A_x}{A} T_0 = \frac{p(\nu - B)}{p_{\text{tr}}(\nu_{\text{tr}} - B_{\text{tr}})} 273,1600.$$

Dans le système de Giaque le nombre 273,1600 est fixe.

Comme on voit, quand on veut déterminer avec la plus grande exactitude une température T_x , on a besoin seulement de deux valeurs B et B_{tr} et non pas trois comme dans le système ancien.

Pour

$$\begin{aligned} T_{\text{vap}} - T_{\text{gl}} &= \frac{A_{100} - A_0}{A_{tr}} 273,1600 \\ &= \frac{p_{100}(\nu_{100} - B_{100}) - p_0 \nu_0}{p_{tr}(\nu_{tr} - B_{tr})} 273,1600. \end{aligned}$$

Maintenant T_0 , $T_{\text{vap}} - T_{\text{gl}}$, T_{vap} , T_{gl} peuvent changer.

Cependant, il faut remarquer qu'en adoptant le T_{gl} à 273,1500 (comme on le fait à présent) rien ne changera. Quand on déterminera des isothermes avec une précision excessive, de sorte que le B_{tr} change un peu, toutes les températures changeront. Mais dans le système qui est en vigueur à présent ce sera la même chose.

.....

ANNEXE XI.

National Bureau of Standards.

SUR LA DÉPENDANCE DES COEFFICIENTS
DANS LES FORMULES D'INTERPOLATION

Par M. H. F. STIMSON.

(17 mai 1948 - Traduction)

Il est quelquefois difficile de déterminer pratiquement le point d'ébullition du soufre à l'aide d'un thermomètre à résistance conçu pour n'être employé qu'aux basses températures. On a trouvé qu'au moyen d'étalonnages aux points d'ébullition de l'eau, de fusion de la glace et d'ébullition de l'oxygène et en faisant usage de la relation empirique $0,5852 \delta - \beta = 0,7622$, on pouvait déduire des valeurs, pour les constantes R_0 , α , δ et β , qui suffisent à interpoler toutes les températures de l'Échelle Internationale de Température, en dessous du point de fusion de la glace, avec un écart ne dépassant pas 0,01 degré.

ANNEXE XII.

SUR L'OPPORTUNITÉ DU CHANGEMENT DE LA DÉFINITION
DE L'UNITÉ DE CHALEUR

BREF RAPPORT ET DEMANDE D'AVIS
A LA COMMISSION DES DONNÉES PHYSICO-CHIMIQUES
DE L'UNION INTERNATIONALE DE CHIMIE

Par Albert PÉRARD,
Directeur du Bureau International.

3 mai 1947.

En 1938, sur les instances des Instituts nationaux de certains pays, le Comité International des Poids et Mesures avait chargé son Comité Consultatif de Thermométrie (et Calorimétrie) d'étudier la question de l'unité de chaleur.

Le Comité Consultatif de Thermométrie (et Calorimétrie) auprès du Comité International des Poids et Mesures est composé, comme les Comités Consultatifs semblables d'Électricité et de Photométrie, des délégués des six grands Laboratoires nationaux d'Allemagne, des États-Unis d'Amérique, de France, de Grande-Bretagne, du Japon, de l'U. R. S. S., et de spécialistes nominativement désignés.

Avant la session, la discussion avait été amorcée par correspondance, et elle avait abouti à un Rapport signé du savant spécialiste, alors Président du Comité Consultatif, le Professeur Keesom. Ce Rapport (*voir* Comité Consultatif de Thermométrie de 1939, p. T 110) doit servir de préambule au texte actuel.

Le Comité Consultatif a tenu session les 11 et 12 juillet 1939, et l'on avait prié d'y assister, à titre consultatif, MM. Cabrera, Fabry, membres du Comité International, et M. Abraham, alors

Secrétaire Général de l'Union Internationale de Physique, qui, les uns et les autres, ont pris une part active à la discussion.

Tous les membres présents se sont trouvés de l'avis qu'il convenait de réaliser la substitution d'une unité d'énergie (le joule) à l'unité spéciale de chaleur (la calorie), et, après des modifications de détail au texte présenté, on a abouti à la Résolution suivante, votée à l'unanimité :

RÉSOLUTION.

a. L'unité de quantité de chaleur est la quantité de chaleur équivalente à l'unité d'énergie désignée sous le nom de « joule », égale 10^7 ergs.

b. La calorie est équivalente à 3600/860 joules ou 1/860 watt-heure.

c. Les termes précédemment employés de « calorie-kilogrammè » et « grande calorie » sont remplacés par celui de « kilocalorie ». La kilocalorie se trouve ainsi égale à 1/860 kilowattheure.

REMARQUE 1. — *Le kilojoule est très voisin de l'unité de chaleur britannique*

$$1 \text{ BTU} = 1,055 \text{ kilojoule.}$$

REMARQUE 2. — *La calorie est pratiquement égale à l'ancienne calorie dite « à 15° C ».*

REMARQUE 3. — *En l'état actuel de la technique, la manière la plus précise de mesurer les quantités de chaleur est d'opérer par comparaison avec les quantités équivalentes d'énergie électrique.*

Cependant, il a été spécifié que cette Résolution, avec les remarques qui l'accompagnent, ne serait pas présentée pour sanction au Comité International des Poids et Mesures, avant que les autres organismes que la question intéressait aient été consultés. Ces organismes étaient au nombre de trois : l'Union Internationale de Physique Pure et Appliquée, la Conférence des Steam Tables, et la Commission des Données Physico-Chimiques de l'Union Internationale de Chimie.

Rien à dire de la Conférence des Steam Tables. Au moment où se faisait la consultation en 1939-1940, cette Conférence, dont le secrétariat était assuré par les Tchécoslovaques, avait cessé d'exister. A l'heure actuelle, il ne semble pas qu'elle ait été reconstituée.

Pour l'Union Internationale de Physique, M. Abraham, dans une lettre du 14 juillet 1939, répondait :

« ...Je vous prie de vouloir bien vous assurer, en comparant ce texte avec celui que la dernière Assemblée Générale de l'Union de Physique avait adopté en 1934, qu'il n'y a entre ces deux textes que des différences de rédaction absolument insignifiantes ; les deux textes sont en réalité identiques quant au fond.

« Dans ces conditions, il me semble que je n'outrepasse pas les devoirs de mes fonctions de Secrétaire Général de l'Union en vous demandant de considérer que l'Union Internationale de Physique est d'accord avec le Comité Consultatif de Thermométrie ».

A la session que vient de tenir, en janvier 1947, l'Union Internationale de Physique, la question n'a pas été abordée.

Quant à la Commission des Données Physico-Chimiques, son Secrétaire, M. Timmermans, en procédant, en 1939, à une enquête auprès de ses membres, a reçu des réponses favorables à la Résolution du Comité International, sauf deux oppositions individuelles de personnalités marquantes : celle de l'éminent Président lui-même de la Commission, M. Swietoslawski, et celle de M. Edgar Reynolds Smith. Les deux avis défavorables se trouvent résumés, par leur auteur, dans des Notes annexées au présent Rapport.

Le signataire du présent Rapport n'est aucunement compétent sur la question de l'unité de chaleur. Sans doute, ayant assisté à la discussion du Comité Consultatif de 1939, il s'est laissé entraîner par la conviction unanime de tous les spécialistes qui se trouvaient là, et il lui semble que les raisons des deux personnalités d'un avis opposé reposent sur la constatation de ce fait général dans tous les domaines des connaissances humaines, que les comparaisons entre grandeurs identiques sont⁶ infiniment plus précises que les déterminations en valeur absolue ou les comparaisons entre grandeurs de constitutions différentes. Un

tel phénomène par exemple, qui se retrouve dans les grandeurs électriques, n'a pas empêché d'adopter les unités absolues.

Cependant, son opinion personnelle, qui est celle d'un profane, n'a qu'un faible poids, et la mission que lui a confiée le Comité Consultatif de Thermométrie (et Calorimétrie) est seulement de solliciter, auprès de la Commission des Données Physico-Chimiques, une approbation éventuelle, sans laquelle ce Comité Consultatif ne voudra pas présenter, au Comité International des Poids et Mesures, la Résolution qu'il préconise.

ALBERT PÉRARD,

*Membre de la Commission
des Données Physico-Chimiques.*

COMMENTAIRES SUR LA RÉOLUTION DU COMITÉ CONSULTATIF DE THERMOMÉTRIE AU SUJET DE L'UNITÉ DE CHALEUR.

Par M. Edgar Reynolds SMITH,

MEMBRE DU COMITÉ POUR LES DONNÉES PHYSICO-CHIMIQUES

(28 août 1939)

En ce qui concerne le paragraphe (a), qui définit le joule égal à 10^7 ergs comme unité de quantité d'énergie thermique, je suis complètement d'accord.

Au sujet du paragraphe (b), qui définit la calorie comme étant égale à $3600/860$ joules, et de la remarque 2, qui affirme que cette calorie est pratiquement égale à la calorie 15° , je pense que c'est une erreur d'introduire cette unité additionnelle et arbitraire et ceci pour les raisons suivantes :

1. Beaucoup de savants considèrent le terme calorie comme un nom pour la capacité calorifique de l'eau. A ce point de vue il ne faudrait pas assigner à la calorie une valeur n'ayant aucune relation avec la capacité calorifique de l'eau. Il pourrait se créer une confusion entre ceux qui adoptent cette « calorie » comme une unité définie d'énergie thermique, et ceux qui considèrent

la calorie comme un nom pour la capacité thermique de l'eau dont la valeur doit être déterminée par expérience.

2. Lorsqu'un expérimentateur mesure un effet calorifique en fonction des volts, des ohms et du temps, il exprime ses valeurs d'abord en joules. Ensuite, s'il désire les exprimer en calories ayant une signification en rapport avec la chaleur spécifique de l'eau, il peut utiliser le facteur de conversion pour la calorie 15° adopté par l'Union Internationale de Chimie en 1934, ou il peut choisir un autre facteur de conversion, y compris celui qui fait l'objet de cette discussion, à condition qu'il spécifie le facteur utilisé. On peut discuter si la proposition d'un facteur nouveau et dépourvu de signification produira l'uniformité ou augmentera la discordance dans la manière de présenter les résultats. Il semble trop optimiste de supposer que chaque expérimentateur abandonnera la vieille calorie en faveur de cette calorie nouvelle.

3. Il existe déjà en usage limité en Amérique une autre « calorie » arbitraire ayant une valeur définie de 4,1833 joules internationaux correspondant à une valeur intermédiaire entre 4,1837 et 4,1846 (en admettant que le facteur pour convertir le joule international en joule absolu est situé entre 1,00019 et 1,00031) au lieu de $3600/860 = 4,1860$ joules.

4. Cette proposition ajoutera une nouvelle unité au nombre d'unités inutiles qui se trouvent dans la littérature. Il semblerait meilleur de proposer que la calorie soit abandonnée comme unité d'énergie thermique et de travailler vers l'obtention graduelle de ce but.

Mon opinion est que les paragraphes (b) et (c) soient remplacés par une recommandation que la calorie en tant qu'unité d'énergie thermique soit abandonnée en faveur d'une adoption universelle du joule. Jusqu'à ce que ce but soit atteint, la Commission Permanente de Thermochimie de l'Union Internationale de Chimie Pure, si elle le juge nécessaire, publiera de temps en temps un rapport sur la valeur de la calorie 15° en fonction du joule, ainsi qu'elle l'a déjà fait en 1934.

EDGAR REYNOLDS SMITH,

*Membre du Comité
pour les Données Physico-Chimiques.*

REMARQUES
CONCERNANT LA DÉFINITION DE LA CALORIE

Par M. W. SWIETOSLAWSKI

(29 mars 1947.)

Au sujet de la réunion du Comité de Thermométrie tenu en 1939 et de la proposition de changer la définition de la calorie, il semble que les considérations suivantes devraient être examinées avant que l'on accepte une décision finale :

1. Les recherches calorimétriques récentes sont pour la plupart basées sur la méthode des mesures comparatives (1). Cette méthode consiste à effectuer les mesures de façon à éliminer un certain nombre de corrections thermométriques et calorimétriques. Pour cette raison, un accroissement considérable dans la précision et l'homogénéité des données numériques obtenu par divers auteurs utilisant des appareils différents, a été accompli. Ceci fut possible, parce que la quantité de chaleur mesurée était comparée dans des conditions expérimentales identiques à une quantité de chaleur connue cédée par la substance reconnue comme étalon, ou à une quantité connue d'énergie électrique cédée par un courant (2).

2. L'utilisation d'étalons thermochimiques (acide benzoïque et hydrogène pour la chaleur de combustion des composés organiques) a produit un accroissement de précision des données aussi bien que de leur homogénéité. Par exemple l'erreur $\pm 0,3$ p. 100 admise dans le passé a été réduite à $\pm 0,03$ p. 100 (3).

(1) W. SWIETOSLAWSKI, *General principles relating to the application of comparative measurements* (Comptes Rendus de la reprise de contact, Union Internationale de Chimie, Paris, 1946).

(2) W. SWIETOSLAWSKI, *A proposal for determining the energy equivalent of certain calorimeters by the comparative method* (Comptes Rendus de la reprise de contact, Paris, 1946).

(3) *First report of the Standing Committee on Thermochemistry of the International Union of Chemistry*, Paris, 1934.

3. La capacité calorifique des substances peut être mesurée au moyen de méthodes strictement comparatives (1). L'eau est utilisée comme substance de référence depuis des années. Le rapport $\frac{c_x}{c_w}$, dans lequel c_x représente la valeur mesurée et c_w la capacité calorifique de l'eau, peut souvent être déterminé avec une exactitude plus grande que l'équivalent mécanique de la chaleur, par ce que ce dernier doit être mesuré en employant la méthode absolue de mesure. Pour ces expériences il est important de fixer la valeur c_w d'une façon convenable, sans s'occuper de savoir si des unités de mesures conventionnelles ou absolues doivent être utilisées.

Prenant ces faits en considération, il semble que la solution proposée, qui consiste en une nouvelle définition de la calorie, va produire plutôt une confusion parmi les expérimentateurs et spécialement parmi ceux qui sont en train de publier des données numériques et des constantes physicochimiques.

Il semble que la seule solution du problème consiste :

1° à publier de temps en temps des Tables contenant des données numériques pour la capacité calorifique de l'eau et son enthalpie pour une région de température comprise entre 0° et 40° C ou au-dessus. Ceci peut être réalisé d'une façon analogue à ce qui a été fait par N. S. Osborne (2).

2° à recommander l'eau comme étalon primaire pour les mesures dans lesquelles la chaleur spécifique d'une substance est comparée à celle de l'eau.

W. SWIETOSLAWSKI.

(1) W. SWIETOSLAWSKI, *Microcalorimetry*, pp. 28-41, Reinhold Publishing Corp., New-York, 1946.

(2) [Voir référence (?) de la page précédente.]

ANNEXE XIII.

LETTRE

DU PROFESSEUR D^r J. DE BOER
Secrétaire de la Commission S. U. N.
de l'Union Internationale de Physique,

AU BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES.

(Extrait.)

Amsterdam, le 21 janvier 1948.

.....
La Commission des Symboles, Unités et Nomenclature de l'Union Internationale de Physique s'est réunie récemment en même temps que la Commission de Thermodynamique et les Commissions apparentées de l'Union de Chimie, à Londres.

Nous voudrions connaître vos critiques au sujet des propositions suivantes, qui ont été adoptées par l'unanimité des membres présents, et qui seront soumises à l'approbation de l'Assemblée générale de l'Union de Physique en juillet 1948 à Amsterdam.

PROPOSITION I, CONCERNANT L'UNITÉ DE QUANTITÉ DE CHALEUR.

a. *L'unité de quantité de chaleur est le joule, égal à 10^7 ergs.*
(N. B. — Cette proposition confirme celle déjà adoptée en 1934 par l'Assemblée générale de l'Union de Physique).

b. *Il est demandé que tous les résultats d'expériences calorimétriques soient exprimés en joules, et que, si les expériences ont été faites par comparaison avec un échauffement d'eau, les températures extrêmes et le facteur de conversion utilisé soient indiqués.*

c. *Si pour une raison quelconque on ne peut éviter l'usage d'une « calorie », le facteur de conversion admis devra être indiqué.*

d. Il est demandé que la Commission mixte des Constantes physicochimiques du Conseil International des Unions Scientifiques provoque si possible une entente entre les spécialistes des mesures de précision pour qu'ils emploient les mêmes facteurs de conversion.

PROPOSITION II, CONCERNANT L'ÉCHELLE ABSOLUE DE TEMPÉRATURE.

a. La Commission approuve le principe, proposé par W. F. Giaque (*Nature*, t. 143, 1939, p. 623 à 626) d'après lequel les températures absolues doivent être rattachées à un point fixe (et non à deux).

b. Elle propose que ce point fixe soit le point triple de l'eau pure.

c. Elle propose que la température adoptée pour ce point fixe soit choisie une fois pour toutes par le Comité International des Poids et Mesures, de façon à concorder le mieux possible avec l'échelle centigrade actuelle.

ANNEXE XIV.

RÉPONSE .

DU DIRECTEUR DU BUREAU INTERNATIONAL
DES POIDS ET MESURES

A L'UNION INTERNATIONALE DE PHYSIQUE.

(Extrait.)

Sèvres, le 2 mars 1948.

.....

C'est évidemment l'avis du Comité International des Poids et Mesures, plutôt que celui du Bureau, qui est ainsi sollicité. Précisément, le Comité Consultatif de Thermométrie (et Calorimétrie), constitué auprès du Comité International, est convoqué pour le 25 mai, et vous verrez, d'après l'Ordre du Jour, dont copie ci-incluse, qu'il ne manquera pas de s'intéresser aux deux premières propositions de la lettre. Le Comité International lui-même doit tenir session au début du mois d'octobre; j'aurai soin de lui remettre la lettre en question et, en attendant, je vais seulement, si vous le permettez, vous donner mon impression personnelle sur ces importantes propositions.

Proposition I. — Je remarque d'abord que le texte de cette proposition, tel qu'il figure dans la lettre, est très différent de celui que m'avait communiqué M. Timmermans dans son avis du 25 septembre, et de celui qui se trouve imprimé à la page 72 des Comptes Rendus de la quatorzième Conférence de l'Union de Chimie, ces deux derniers concordant entre eux. Cependant, l'esprit général est à peu près le même.

J'avais établi, au mois de mai dernier, un « Bref Rapport » que j'avais adressé, par l'intermédiaire de M. Delaby, à la Commission des Données Physico-Chimiques de l'Union Internationale de Chimie. Ce Rapport demandait l'adoption de la Résolution proposée par notre Comité Consultatif; et j'ai été un

peu surpris, et même ennuyé, de ce que, contrairement à l'avis de feu M. Abraham dans la lettre insérée à mon Rapport, les propositions entières du Comité Consultatif n'aient pas recueilli l'approbation totale de votre Commission. Je comprend bien que le paragraphe *b* des deux rédactions, *c* et *d* de la rédaction de la lettre, se ressentent de l'impossibilité où l'on s'est trouvé d'obtenir un accord sur l'équivalence précise de la calorie et du joule. C'est peut-être regrettable, parce que la « calorie à n degrés » (n étant d'ailleurs variable d'un auteur à l'autre) s'en trouverait moins bien définie, que par la Résolution du Comité Consultatif.

Proposition II a. — Une telle proposition avait été déjà présentée au Comité Consultatif de Thermométrie de 1939 par le délégué du NBS; mais « il avait été spécifié que le Comité des « Échelles des Basses Températures présentait cette question « bien plutôt en vue d'une discussion que dans le but de faire « prendre une décision formelle à la réunion de cette année » (Procès-Verbaux du Comité International des Poids et Mesures, 2^e série, t. 19, 1939, p. T 55). J'avais moi-même attiré l'attention du Comité Consultatif sur l'inconvénient qu'il pourrait y avoir à créer une incertitude sur la température de définition des calibres et sur les formules de dilatation des étalons de précision du Bureau International. Le Comité Consultatif avait écarté la proposition comme prématurée à cette époque, se réservant d'y réfléchir pour y revenir dans une prochaine session.

Cette disposition serait évidemment favorable et très commode pour les usagers des températures voisines du zéro absolu; mais par contre, l'imprécision sur la position du point zéro (glace fondante) dans l'échelle Kelvin serait reportée proportionnellement sur toutes les températures supérieures à 0°, qui sont tout de même celles où la plus haute précision est indispensable.

Proposition II b. — Il semble en effet que l'unanimité des physiciens soit à peu près acquise pour reconnaître la supériorité en précision du point triple de l'eau sur le point de fusion de la glace, pour la définition d'un point fixe. Des expériences sont encore faites en ce moment précis au Bureau International pour s'assurer que l'écart de température entre le fil résistant du thermomètre et l'eau à son point triple est négligeable en toute

rigueur, malgré l'enveloppe de verre qui les sépare et la conductibilité propre du thermomètre.

Proposition II c. — La proposition précédente étant acquise, le Comité Consultatif ne manquera pas ensuite de déterminer la température qu'il convient d'admettre pour ce nouveau point fixe.

ANNEXE XV.

RÉSUMÉ CHRONOLOGIQUE
DE DEUX QUESTIONS FIGURANT A L'ORDRE DU JOUR

PAR ALBERT PÉRARD,
Directeur du Bureau International.

(31 mars 1948.)

UNITÉ DE CHALEUR

I. Peu avant la session du Comité consultatif de 1939, avaient été adressés, à tous les Membres, les Rapports intéressant l'unité de chaleur, qui figurent en Annexes T 11, T 12, T 13, aux Procès-Verbaux du Comité consultatif de Thermométrie⁽¹⁾ de 1939. Parmi eux se trouvait l'important Rapport de M. W. H. Keesom, intitulé « Note sur la calorie » (Annexe T 11 de 1939).

Au cours de la session, cette question a été discutée (*voir* pages T 26 à T 32), et les Résolutions adoptées à l'unanimité par le Comité consultatif se trouvent dans le « Bref Rapport » du 3 mai 1947 (*voir* Annexe XII, p. T 119).

II. Les divers organismes intéressés ayant été sollicités de donner leur avis à ce sujet, on a reçu seulement deux critiques : celle de M. E. R. Smith datée du 28 août 1939 (*voir* p. T 121) et celle de M. W. Świetosławski en date du 29 mars 1947 (*voir* p. T 123).

En vue de la réunion, au mois de juillet 1947, à Londres, de la Commission des Données Physico-Chimiques de l'Union internationale de Chimie, le signataire du présent résumé a adressé au Secrétaire général de cette Union le « Bref Rapport » du

(1) Publiés au tome XIX, 2^e série de la collection des Procès-Verbaux du Comité International des Poids et Mesures.

3 mai 1947, qui présentait la question et était accompagné des documents auxquels il vient d'être fait allusion.

III. A cette réunion de la Commission des Données Physico-Chimiques, a été adopté le texte suivant avec le Projet de Résolution, communiqué d'abord par une lettre du Secrétaire de cette Commission, M. J. Timmermans, en date du 18 septembre 1947, et reproduit dans les Comptes Rendus de la XIV^e Conférence de l'Union Internationale de Chimie, page 72 :

« M. Pérard a communiqué à la Commission, pour avis, différentes notes et rapports sur la définition de l'Unité de chaleur qui ont été présentés à la dernière réunion du Comité Consultatif de Thermométrie et de Calorimétrie du Bureau international des Poids et Mesures.

« Après un échange de vues entre les physiciens et les physico-chimistes assistant à la réunion, leur accord s'est fait pour proposer au dit Comité Consultatif de modifier son projet de résolution antérieur de la manière suivante :

PROJET DE RÉOLUTION.

a. L'unité de quantité de chaleur est la quantité de chaleur équivalente à l'unité d'énergie, désignée sous le nom de joule et égale à 10^7 ergs.

b. Lorsque les quantités de chaleur sont déterminées avec une haute précision, par comparaison avec la chaleur spécifique de l'eau à une certaine température θ° , elles seront évaluées en calories à θ° . L'auteur des mesures devra indiquer dans sa publication le facteur de conversion qu'il a choisi pour lier le joule à la calorie.

c. Les termes précédemment employés de « calorie kilogramme » et « grande calorie » seront remplacés par celui de « kilocalorie ».

« Les paragraphes *a* et *c* sont le texte primitif du Comité Consultatif, le changement proposé ne portant que sur le paragraphe *b*. »

IV. Simultanément, la Commission des Symboles, Unités et Nomenclature (Commission S. U. N.) de l'Union Internationale de Physique Pure et Appliquée, tenait session et aboutissait à une proposition peu différente de la précédente, que l'on trouvera (voir Annexe XIII, p. T 125) dans l'Extrait de la lettre écrite en date du 21 janvier 1948 par le Secrétaire de cette Commission, M. de Boer, au Bureau international des Poids et Mesures. Le 2 mars 1948, le Directeur du Bureau international a fait seulement à cette lettre une réponse d'attente, dont on trouvera un extrait ci-joint (Annexe XIV, p. T 127).

Le Comité Consultatif de Thermométrie aura à décider, s'il maintient, pour la proposer au Comité international d'octobre 1948, sa Résolution de 1939, ou s'il veut l'amender pour tenir compte des suggestions que lui apportent les autres rédactions. Il y a d'ailleurs lieu de signaler que dans l'intervalle, au mois de juillet, doit se réunir de nouveau, à Amsterdam, l'Union Internationale de Physique, dont la Commission S. U. N. ne manquera pas de reconsidérer sa propre Résolution à la lumière des délibérations nouvelles de notre Comité Consultatif.

ECHELLE DE TEMPÉRATURE A UN SEUL POINT FIXE ET POINT TRIPLE DE L'EAU.

I. Une proposition tendant à supprimer l'un des deux points fixes de l'échelle thermométrique avait été présentée au Comité Consultatif de Thermométrie de 1939 par le délégué du N. B. S., avec l'avis qu'il ne s'agissait pas de faire prendre une décision formelle à la réunion de cette année-là (Comité Consultatif de Thermométrie 1939, ou Procès-Verbaux du Comité international des Poids et Mesures, 2^e série, tome XIX, 1939, p. T 55). Cette proposition avait été discutée (pp. T 10 et T 11) sans qu'aucune décision ne suivît, mais avec l'intention d'y revenir ultérieurement.

II. La proposition a été reprise à la Commission S. U. N. de l'Union Internationale de Physique, et figure en *b* (Proposition II) dans la lettre susmentionnée du Secrétaire de cette Commission, adressée au Bureau international. La réponse provisoire qui lui a été faite figure dans la lettre du 2 mars 1948 (voir p. T 127).

Le Comité Consultatif de Thermométrie aura donc à étudier cette fois de plus près, la double question qui lui est ainsi sou-

mise, de la réduction à un seul du nombre des points fixes de l'échelle de température (le zéro absolu tenant lieu du second) et aussi du remplacement du point de fusion de la glace par le point triple de l'eau, avec fixation, dans l'échelle absolue, de la position exacte de ces deux points.

ANNEXE XVI.

COMMENTAIRES SUR LES PROJETS DE RÉSOLUTION

Par M. J. DE BOER,

Secrétaire de la Commission des Symboles, Unités et Nomenclature
de l'Union Internationale de Physique

(Extrait d'une lettre adressée au Directeur du Bureau International).

Amsterdam, le 19 avril 1948.

.....

Le texte précis de la proposition I acceptée par la Conférence est celui donné dans ma lettre et non pas celui publié par M. Timmermans dans les Comptes Rendus de la XIV^e Conférence de l'Union de Chimie, mais je crois qu'il n'y a pas beaucoup de différences entre les deux textes. Le texte (b) de Timmermans demande aussi d'exprimer les résultats en joules, même dans le cas où les mesures sont faites par comparaison avec la chaleur spécifique de l'eau et de publier alors le facteur de conversion pour lier la calorie au joule.

Je crois qu'il n'y a pas un grand désaccord avec la « Résolution II » acceptée par le Comité Consultatif de Thermométrie le 12 juillet 1939. La différence est seulement qu'on ne veut pas exprimer les résultats directement en joules mais en $\frac{3600}{860}$ joules = 1 « calorie ». Je crains que ce nom n'apporte beaucoup de confusion et pense qu'une calorie liée au joule devrait être nommée peut-être « calorie absolue » (cal. abs.).

La résolution I de la Commission S. U. N. avait simplement pour but de stimuler les discussions sur ce point et d'exprimer son désir (et, puisque cette proposition a été acceptée aussi par l'assemblée de juillet 1948, aussi le désir de l'Union de Physique) d'abandonner aussitôt que possible la « calorie à t^oC ».

.....

En ce qui concerne la proposition II, il y a essentiellement deux propositions :

a. La proposition de Giauque, qui est présentée par le « Comité des Échelles des Basses Températures du National Research Council des États-Unis » au Comité Consultatif de juillet 1939.

b. La proposition de prendre comme point fixe le point triple et non pas le point de fusion de l'eau.

La proposition (*a*) est discutée dans la lettre du National Research Council « Proposition relative à la définition de l'échelle thermodynamique absolue » qui se trouve dans les Procès-Verbaux du Comité international des Poids et Mesures 1939, p. T 55.

La proposition (*b*) ne donnerait pas lieu à beaucoup de discussion. Aux États-Unis, ainsi que dans les autres laboratoires, on considère le point triple comme un point fixe très reproductible et aisément réalisable. Au laboratoire Van der Waals par exemple, on peut réaliser le point triple avec une reproductibilité de 0,0002 degré pendant quelques heures.

La distance entre le point triple et le point de fusion de la glace peut être déterminée avec beaucoup de précision, avec la valeur $\frac{dP}{dT}$ de la courbe de fusion, à 0,0001 degré près.

La dernière valeur du point de fusion de l'eau étant environ 273°,15 K, on pourrait fixer le point triple comme point fixe fondamental de l'échelle des températures absolues à (273,1500 + Δt) degrés absolus, Δt étant la distance du point de fusion au point triple, avec une précision de 0,0001 degré.

ANNEXE XVII.

Institut de Métrologie de l'U. R. S. S.

SUR LA DÉTERMINATION
DE
L'UNITÉ DE QUANTITÉ DE CHALEUR.

(21 MAI 1948)

(Traduction remise).

Dans son communiqué à la VIII^e Conférence générale des Poids et Mesures, l'auteur ⁽¹⁾ a proposé de prendre en qualité d'unité principale de quantité de chaleur l'unité absolue d'énergie, le joule, en conservant l'unité pratique, la calorie, comme facultative.

Le choix de l'unité pratique de chaleur est déterminé par le choix de l'unité de masse, de l'échelle de température et de la température à laquelle on rapporte l'unité de chaleur. Les conventions et accords internationaux déterminèrent le choix de la calorie, comme d'une unité rapportée à l'unité métrique de masse et basée sur l'échelle centigrade internationale. L'admission de la température de 20° C en qualité de température normale pour la plupart des mesures résout la question en faveur de la calorie, rapportée à la même température.

L'établissement de la calorie, comme une unité, déduite de

⁽¹⁾ S. LIPINE, *Sur la valeur numérique de l'équivalent mécanique de la chaleur et sur la corrélation entre la calorie 15° C et la calorie 20° C.* (Édition WJMS, n° 130, 1933).

l'unité absolue d'énergie, exige la détermination de la valeur exacte de l'équivalent mécanique de chaleur. L'examen fait par l'auteur, dès travaux sur la détermination de cet équivalent, l'a conduit à la conclusion, que seules les déterminations effectuées par Jäger et Steinwehr, Laby et Jessel, peuvent être considérées comme étant d'accord avec l'état actuel de la métrologie. C'est pourquoi l'auteur, dans son exposé au Comité international des Poids et Mesures en 1935 ⁽²⁾, a proposé de prendre pour l'équivalent mécanique de la chaleur la valeur de $4,1812 \times 10^7$ ergs : moyenne des déterminations faites par les auteurs déjà mentionnés en prenant le joule international égal à 1,00035 joule absolu.

La différence trop grande trouvée par Jessel ⁽³⁾ pour l'eau distillée ordinaire et pour l'eau ne contenant pas d'air, a provoqué les critiques de Laby et Hercus ⁽⁴⁾. Ces critiques ont forcé l'auteur de traiter avec quelque prudence les données de Jessel et de ne pas les prendre en considération dans le calcul de la valeur moyenne.

C'est pourquoi, dans son troisième communiqué ⁽⁵⁾, présenté au Comité Consultatif de Thermométrie en 1939, l'auteur a proposé de prendre en qualité d'unité facultative la calorie à 20° C, égale à $4,1807 \times 10^7$ ergs.

Cette valeur était la moyenne des données de Jäger et Steinwehr, Laby et Hercus, en prenant comme base, la valeur du joule international égale à 1,00024 joule absolu, déduite des corrélations entre les unités électriques absolues et internationales, établies par le Comité international des Poids et Mesures en 1937.

En 1939, déjà après la présentation par l'auteur du susdit communiqué, Osborne, Stimson et Ginnings ont fait la nouvelle détermination de l'équivalent mécanique de la chaleur, répondant par sa précision à l'état actuel de la technique des mesures. Cette circonstance et l'établissement des corrélations nouvelles entre les unités électriques absolues et internationales qui

⁽²⁾ S. LIPINE, *Sur l'unité de la chaleur. Les travaux de WJMS*, 9 (25), 1935, p. 75.

⁽³⁾ JESSEL, *Proc. Phys. Soc.*, 46, 1935, p. 747.

⁽⁴⁾ LABY et HERCUS, *Proc. Phys. Soc.*, 47, 1934, p. 1003; HERCUS, *Ibid.*, 48, 1936, p. 282.

⁽⁵⁾ S. LIPINE, *La calorie 20° C et sa corrélation avec l'unité absolue de l'énergie. (L'exposé de WNJJM au Comité Consultatif de Thermométrie, 1939).*

doivent être sanctionnées par la IX^e Conférence internationale des Poids et Mesures, nous force au nouvel examen des valeurs probables de l'équivalent mécanique de la chaleur déduites antérieurement des résultats des trois recherches déjà mentionnées.

Jæger et Steinwehr (6) ont déterminé l'équivalent mécanique de la chaleur par la méthode électrique et ont trouvé pour la calorie à 15° C la valeur correspondante, égale à 4,1842 joules internationaux. Birge (7) a montré que la formule quadratique d'interpolation déduite par ces auteurs, exprime avec une précision insuffisante les résultats trouvés et il a proposé une formule d'interpolation du quatrième degré. En utilisant cette formule Birge a trouvé d'après les données de Jæger et Steinwehr, que la calorie à 15° C est équivalente à $4,1832, \pm 0,0008_0$ joules internationaux.

Laby et Hercus ont déterminé l'équivalent mécanique de la chaleur par la méthode mécanique et ont trouvé sa valeur pour la température de 17°,7 C égale à $4,1841 \times 10^7$ ergs. Birge a corrigé les données des susdits auteurs et en a déduit la valeur de l'équivalent mécanique de la chaleur pour 15° C, en utilisant la formule d'interpolation calculée d'après les données de Jæger et Steinwehr. Il a trouvé de cette façon que la calorie à 15° C est équivalente à $4,1852, \pm 0,0008_0$ joules absolus.

En 1939, Osborne, Stimson et Ginnings ont publié (8) les résultats de la détermination de la capacité calorifique de l'eau faits par eux par la méthode électrique dans l'intervalle de 0° à 100° C. Ils ont trouvé qu'à 15° C, la capacité calorifique de l'eau est égale à $4,1850_2 \pm 0,0004_0$ joules internationaux (9).

Pour la réduction des données de Jæger et Steinwehr et les résultats des déterminations d'Osborne, Stimson et Ginnings au système absolu des unités, l'auteur a pris comme base les corrélations suivantes entre les unités absolues et internationales : corrélations présentées à la IX^e Conférence générale des Poids et Mesures pour être sanctionnées :

$$\begin{aligned} 1 \text{ volt inter. moyen} &= 1,00034 \text{ volt absolu,} \\ 1 \text{ ohm } \text{ » } \text{ » } &= 1,00049 \text{ ohm absolu,} \end{aligned}$$

(6) JÆGER et STEINWEHR, *Ann. der Phys.*, 64, 1921, p. 305.

(7) BIRGE, *Rev. Mod. Phys.*, 1, 1929, p. 1.

(8) OSBORNE, STIMSON et GINNINGS, *B. S. Journ. Res.*, 23, 1939, p. 197.

(9) BIRGE, *Proc. Phys. Soc. London*, 8, 1941, p. 3.

d'où

1 joule inter. moyen = 1,00019 joule absolu.

D'après les données mentionnées, nous pouvons calculer les valeurs suivantes pour la calorie 15° C en unités absolues :

Jæger et Steinwehr	(4,1840 ₆ ± 0,0008) 10 ⁷ ergs,
Laby et Hercus	(4,1852 ₆ ± 0,0008) 10 ⁷ ergs,
Osborne, Stimson et Ginnings.	(4,1858 ₂ ± 0,0004 ₀) 10 ⁷ ergs,
Moyenne.....	(4,1850 ₃ ± 0,0006 ₇) 10 ⁷ ergs,
Moyenne avec les poids	(4,1854 ₃ ± 0,0003 ₂) 10 ⁷ ergs.

La valeur arrondie de la calorie à 15° C, calculée d'après les résultats des trois déterminations contemporaines, est égale à

$$1 \text{ calorie à } 15^{\circ} \text{ C} = (4,1854 \pm 0,0003) 10^7 \text{ ergs.}$$

La valeur trouvée est d'accord avec la valeur de 4,1855 ± 0,0004 joules absolus, calculée par Birge à partir des mêmes déterminations.

En admettant plus loin, d'après les recherches de l'auteur (1), le rapport entre les calories 20° C et 15° C comme égal à 0,9990, nous trouvons pour la calorie 20° C la valeur

$$1 \text{ calorie à } 20^{\circ} \text{ C} = (4,1812 \pm 0,0003) 10^7 \text{ ergs.}$$

La valeur trouvée de la calorie à 20° C coïncide avec la valeur calculée par l'auteur en 1935, comme moyenne des données de Jæger et Steinwehr, Laby et Hercus, et Jessel (1).

En 1930, la Conférence internationale Énergétique à Londres a établi la kilocalorie électrique, égale à $\frac{1}{860}$ kilowattheure international, c'est-à-dire,

$$1 \text{ kcal} = \frac{3600}{860} = 4,18605 \text{ kjoules internationaux.}$$

En prenant la corrélation mentionnée entre les unités électriques absolues et internationales, nous trouvons comme valeur correspondante de la calorie, exprimée en unités absolues,

$$1 \text{ cal} = 4,18685 \times 10^7 \text{ ergs.}$$

En 1939, le Comité Consultatif de Thermométrie a reçu outre la proposition de l'auteur sur l'établissement de la calorie à 20° C en qualité d'unité facultative, la proposition de Keesom, faite par lui au nom de Stark, sur l'établissement en qualité d'unité facultative de la calorie, égale à $\frac{1}{860}$ wattheure absolu, soit $4,18605 \times 10^7$ ergs.

Toutes les valeurs mentionnées des différentes calories et les corrélations entre elles sont données dans le tableau suivant. Ces corrélations restent les mêmes pour les valeurs différentes de la kilocalorie et du kilojoule.

On voit d'après ce tableau que pas une seule des valeurs trouvées de la calorie n'est égale à $\frac{1}{860}$ wattheure absolu; on doit ajouter encore que les différences sortent des limites de l'erreur probable du résultat. En prenant en considération cette circonstance et en n'oubliant pas que la température normale pour la plupart des mesures est la température de 20° C, l'auteur est partisan de la calorie à 20° C.

PROPOSITIONS DE L'INSTITUT DE MÉTROLOGIE DE MENDELÉEF
DE L'U. R. R. S.

1. En qualité d'unité de quantité de chaleur, nous proposons le joule = 10^7 ergs.

2. En qualité d'unité pratique, nous proposons la

calorie = 4,1812 joules.

TABLEAU.

	Joule	Cal. 20°	Cal. 15°	$\frac{1}{860}$ int. Wh.	$\frac{1}{860}$ abs. Wh.
Joule.....	1	0,23916	0,23892	0,23884	0,23888
Calorie 20°...	4,1812	1	0,9990	0,9987	0,9988
Calorie 15°...	4,1854	1,0010	1	0,9997	0,9999
$\frac{1}{860}$ Wh. int..	4,18685	1,0013	1,0003	1	1,0002
$\frac{1}{860}$ Wh. abs.	4,18605	1,0012	1,00015	0,9998	1

ANNEXE XVIII.

NOTE SUR LE POINT TRIPLE DE L'EAU
ET LA CALORIE A 0°

Par M. le Professeur E. PERUCCA

(Commentaires rédigés à la suite de la séance du 25 mai 1948
du Comité Consultatif de Thermométrie).

Paris, le 26 mai 1948.

1. *Point triple de l'eau.* — Avec l'appareil décrit par M. Stimson, si l'on veut atteindre le 0,001 degré il faudra fixer la profondeur du thermomètre à quelques centimètres près et l'on mesurera la température d'équilibre non du point triple mais de l'eau-glace à la pression correspondante à cette profondeur. Encore faut-il s'assurer de l'absence de tensions dans la couche de glace.

Si ma mémoire ne me trompe pas, il y a déjà un travail ancien (1910 ?) d'un physicien belge sur cette cause d'erreur dans la constance du point fixe de la glace.

La difficulté d'assurer la saturation de l'eau par l'air dans le point actuel de la glace m'encourage à revenir sur l'idée déjà exprimée à M. Stimson que le même appareil pour le point triple pourrait servir à réaliser avec la même précision le point d'équilibre eau-glace sous pression normale en absence de l'air, en y faisant entrer du mercure par le bas jusqu'à la pression normale.

2. *Calorie à la température 0.* — Je dois insister sur son inopportunité. Rien n'empêche qu'un expérimentateur emploie cette série d'unités (une pour chaque température); mais je crains que, par l'adoption du projet de résolution A₂, b, elles soient encouragées à être reconnues officiellement.

Ce serait comme si, par exemple, dans les mesures interférométriques de haute précision on reconnaissait les unités *longueur d'onde rouge du cadmium à la température θ dans l'air*; ou, dans les mesures manométriques de haute précision on reconnaissait les unités *centimètre de mercure à la température θ et latitude, et altitude, etc.*

Les physiciens emploient ces unités en laboratoire, mais ils les abandonnent dans leur rapport définitif.

Enfin, si la calorie conventionnelle (3600/860 joules) et les calories à θ° sont des unités de chaleur on écrira :

$$Q = m \Delta\theta \cdot C_{H_2O, \theta};$$

exemple :

$$Q = 305 \text{ g. } 1,5 \text{ degré. } C_{H_2O, \theta}$$

(Q , quantité de chaleur; m , masse d'eau; $\Delta\theta$, variation de θ ; $C_{H_2O, \theta}$, chaleur spécifique de l'eau à θ°) et l'on pourra même dire que $C_{H_2O, \theta}$ est une unité, mais elle doit être une $\frac{\text{quantité de chaleur}}{\text{g. degré}}$ afin que Q soit une quantité de chaleur.

Si donc on veut introduire les calories à θ° , il faudra auparavant ou en même temps accepter la résolution que *la calorie est une unité de chaleur spécifique* (et non de quantité de chaleur) *choisie afin que la chaleur spécifique de l'eau soit mesurée par la valeur 1 à une température quelconque.*

Voir les discussions analogues (plus simples parce que indépendantes de la température) pour la perméabilité magnétique du vide.

ANNEXE XIX.

BIBLIOGRAPHIE RELATIVE

A L'ÉCHELLE INTERNATIONALE DE TEMPÉRATURE.

National Bureau of Standards, Washington.

- E. F. MUELLER, Wheatstone bridges and some accessory apparatus for resistance thermometry, *Bul. BS* 13, 1916-1917, p. 547.
- T. S. SLIGH Jr., Recent modifications in the construction of platinum resistance thermometers, *Sci. Pap.*, BS 17, 1922, p. 49.
- C. H. MEYERS, Coiled-filament resistance thermometers, *BS J. Research*, 9, 1932, p. 807.
- E. F. MUELLER, Precision Resistance Thermometry. « Temperature, Its Measurement and Control in Science and Industry », p. 162 (*Reinhold Publishing Corp.* New York, N. Y., 1941).
- Harold J. HOGE and Ferdinand G. BRICKWEDDE, Intercomparison of platinum Resistance Thermometers between -190° and 445° C. *J. Research NBS* 28, 1942, p. 217.
- Wm. F. ROESER, F. H. SCHOFIELD, and H A. MOSER, An international comparison of temperature scales between 660° and 1063° C. *BS J. Research*, 11, 1933, p. 1.
- Paul D. FOOTE, « Center of gravity » and « effective wave length » of transmission of pyrometer color screens, and the extrapolation of the high temperature scale, *Bul. BS* 12, 1915-1916, p. 483.
- Paul D. FOOTE, F. L. MOHLER, and C. O. FAIRCHILD, The proper type of an absorption glass for an optical pyrometer, *J. Wash. Acad. Sci.* (450 Ahnaip St., Menasha, Wis.), 7, 1917, p. 545.
- C. O. FAIRCHILD and W. H. HOOVER, Disappearance of the filament and diffraction effects in improved forms of an optical pyrometer, *J. Opt. Soc. Am.* and *Rev. Sci. Insts.* (Cornell Univ., Ithaca, N. Y.), 7, 1923, 543.
- R. B. SCOTT and F. G. BRICKWEDDE, A precision cryostat with automatic temperature regulation, *BS J. Research*, 6, 1931, p. 401.
- James L. THOMAS, Reproducibility of the ice point. *BS J. Research*, 12, 1934, p. 323.

- R. M. WILHELM, Freezing point of mercury, *Bul.* BS 13, 1916-1917, p. 655.
- E. F. MUELLER and H. A. BURGESS, Standardization of the sulphur boiling point, *Sci. Pap.* BS 15, 1919-1920, p. 163.
- C. O. FAIRCHILD, W. H. HOOVER and M. F. PETERS, A new determination of the melting point of palladium, *BS J. Research* 2, 1929, p. 931.
- H. T. WENSEL and W. F. ROESER, The freezing point of nickel as a fixed point on the international temperature scale, *BS J. Research*, 5, 1930, p. 1309.
- Wm. F. ROESER, F. R. CALDWELL, and H. T. WENSEL, The freezing point of platinum, *BS J. Research*, 6, 1931, p. 1119.
- Wm. F. ROESER and A. I. DAHL, Conditions affecting the freezing temperature of silver, *BS J. Research*, 10, 1933, p. 661.
- F. HENNING and H. T. WENSEL, The freezing point of iridium, *BS J. Research*, 10, 1933, p. 809.
- Wm. F. ROESER and H. T. WENSEL, The freezing point of rhodium, *BS J. Research*, 12, 1934, p. 519.
- Wm. F. ROESER and H. T. WENSEL, Freezing Temperatures of High-Purity Iron and of some Steels, *J. Research*, NBS, 26, 1941, p. 273.

National Physical Laboratory, Teddington.

- (1) J.-A. HALL, A bath for use in the graduation and testing of thermometers. *Journ. Sci. Inst.*, 20, 1943.
(Bain utilisé à Teddington pour les intercomparaisons précises jusqu'à 650°C.)
- (2) M. de SÉLINCOURT, The reproducibility of the platinum thermocouple at the freezing points of gold, silver and antimony. *Proc. Phys. Soc.*, 51, 1939.
- (3) F. H. SCHOFIELD, The Melting Point of Palladium. *Proc. Roy. Soc.*, A, 125, 1929.
- (4) F. H. SCHOFIELD, The Freezing Point of Platinum. *Proc. Roy. Soc.*, A, 146, 1934.
- (5) F. H. SCHOFIELD, The Freezing Point of Palladium, *Proc. Roy. Soc.*, A, 155, 1936.
- (6) C. R. BARBER and F. H. SCHOFIELD, The Freezing Point of Rhodium. *Proc. Roy. Soc.*, A, 173, 1939.
- (7) J.-A. HALL, A design for precision platinum resistance thermometers. *Journ. Sci. Inst.*, 10, 1933.
(Construction de la monture en quartz pour les thermomètres à résistance.)

- (8) J.-A. HALL, The International Temperature Scale between 0°C and 100°C. *Phil. Trans. Roy. Soc., A*, 229, 1929.
(Comparaison entre les thermomètres à résistance et les thermomètres à mercure étalons primaires du B. I. P. M.)
- (9) J. E. SEARS and J. S. CLARK, A new primary standard barometer. *Proc. Roy. Soc., A*, 139, 1933.
- (10) J. C. EVANS, The determination of thermal lagging times. *Proc. Phys. Soc.*, 59, 1947.
(Étude de l'effet du retard sur la mesure de la température d'une colonne barométrique.)
- (11) F. E. SMITH, On Bridge Methods for Resistance Measurements of High Precision in Platinum Thermometry. *Phil. Mag.*, 24, 1912, p. 561.

Laboratoire Kamerlingh Onnes, Leiden.

POINTS FIXES.

- W. H. KEESOM, H. van der HORST, *Comm. L.*, 188*a*; *Proc. Amst.*, 30, 1927, p. 970 (100°).
- H. KAMERLINGH ONNES, C. BRAAK, *Comm. L.*, 107*a*, 1908 (O₂).
- P. G. CATH, *Comm. L.*, 152*d*, 1918; *Proc. Amst.*, 21, 1929, p. 656 (O₂).
- W. H. KEESOM, H. van der HORST, A. F. J. JANSEN, *Comm. L.*, 203*b*, 1929 (O₂).
- W. H. KEESOM, B. G. DAMMERS, *Comm. L.*, 239*d*, 1935 (O₂); *Physica*, 2, 1935, p. 1051.
- W. H. KEESOM, B. G. DAMMERS, *Comm. L.*, 239*e*, 1935; *Physica*, 2, 1935, p. 1080.
- W. H. KEESOM, B. G. DAMMERS, Rapport n° 3 du VII^e Congrès Intern. du Froid, 1936 (résumé).
- W. H. KEESOM, Rapport n° 5 du VII^e Congrès Intern. du Froid, 1936; *Comm. Suppl.*, 80 (therm. des basses températures).
- J. M. van SANTEN, *Thèse*, Leiden, 1934.
- B. G. DAMMERS, *Thèse*, Leiden, 1936.
- H. van der HORST, *Thèse*, Leiden, 1940.

THERMOMÉTRIE DES GAZ.

- W. H. KEESOM, W. TUYN, *Comm. Suppl.*, 78, *Travaux et Mémoires du Bureau International des Poids et Mesures* (résumé).

Hélium :

- W. H. KEESOM, H. van der HORST, *Comm. L.*, 188*a*, 1927.
- W. H. KEESOM, H. van der HORST, K. W. TACONIS, *Comm. L.*, 230*d*

1934; *Physica*, 1, 1934, p. 324; *Physica*, 4, 1937, p. 494.
W. H. KEESOM, J. J. M. van SANTEN, *Comm. L.*, 227b, 1933.

Hydrogène :

H. KAMERLINGH ONNES, C. BRAAK, *Comm. L.*, 101b, 1907.

H. KAMERLINGH ONNES, M. BOUDIN, *Comm. L.*, 60, 1900.

Divers.

BEATTIE, TZU-CHING HUANG and MANSON BENEDICT, Reproducibility of the Ice Point and Triple Point of Water. *Proc. Amer. Acad. of Sc.*, 72, 1938, p. 137.

BEATTIE, BENEDICT, BLAISDELL, Reproducibility of the Sulphur Point. The Effect of Pressure on the Sulphur Point. *Proc. Amer. Acad. of Sc.*, 71, 1937, pp. 327-360.

BEATTIE and BLAISDELL, Reproducibility of the Steam Point. The Effect of Pressure on the Steam Point. *Proc. Amer. Acad. of Sc.*, 71, 1937, pp. 361-374.

BEATTIE, BLAISDELL and KAMINSKY, Reproducibility of the Mercury Boiling Point. The Effect of Pressure on the Mercury Boiling Point. *Proc. Amer. Acad. of Sc.*, 71, 1937, pp. 375-385.

BIRGE, Eighth Report on Progress in Physics. London, 1942, p. 90.

Dates des prochaines sessions des Comités Consultatif et du Comité International.....	96
Annexes des Procès-Verbaux des séances de 1948.	97-107
I. <i>Dotation annuelle du Bureau International des Poids et Mesures</i>	97-100
Lettre-circulaire à tous les Membres du Comité.	97
Rapport.....	98
II. <i>Résolutions concernant la Thermométrie et la Calorimétrie</i> (telles qu'elles ont été votées par la Neuvième Conférence Générale des Poids et Mesures).	101
III. <i>Projet d'accord provisoire (Formal Agreement) entre l'Organisation des Nations Unies pour l'Éducation, la Science et la Culture (UNESCO) et le Comité International des Poids et Mesures (CIPM)</i>	103
IV. <i>Proposition de M. John Wennerberg : Nom des unités de mesure impliquant des puissances de 10. Résumé et Propositions</i>	105

COMITÉ CONSULTATIF DE THERMOMÉTRIE
Session de 1948.

Liste des Membres du Comité consultatif de Thermométrie.....	T 3
Procès-verbal de la première séance, mardi 25 mai 1948	T 7-T 15
Bienvenue aux Membres du Comité consultatif de Thermométrie	T 7
Élection du Secrétaire et du Rapporteur	8
Thermométrie des basses températures (Échelle à un seul point fixe)	8
Point triple de l'eau	10
L'unité de chaleur.....	12
Procès-verbal de la deuxième séance, jeudi 27 mai 1948	T 16-T 23
Résolution relative au point triple.....	16
Résolution relative à l'échelle thermodynamique.....	18
Résolution relative à l'unité de chaleur.....	19

	Pages.
Echelle Internationale de Température	T 19
Pureté du platine et du platine-rhodié	20
La constante C_2	20
Montage du thermocouple	21
Pureté de l'eau	21
Point de l'argent	21
Références bibliographiques	22
Échange de publications	22
Clôture de la session	23
Deuxième Rapport du Comité Consultatif de Thermométrie au Comité International des Poids et Mesures; par M. J. A. Hall	T 24-T 49
Texte de l'Échelle Internationale de Température de 1948	30
Annexes des procès-verbaux du Comité Consul- tatif de Thermométrie	T 50-T 142
I. NATIONAL BUREAU OF STANDARDS. — <i>Mémo- randum relatif au projet d'une Échelle Internationale de Tempé- rature de 1948.</i>	50
Première Partie : Introduction	53
Deuxième Partie : Définition de l'Échelle Interna- tionale de Température de 1948	55
Troisième Partie : Recommandations	58
Quatrième Partie : Renseignements supplémentaires ..	66
II. NATIONAL PHYSICAL LABORATORY. — <i>Com- mentaires sur le projet d'Échelle Internationale de Température de 1948 proposé par le National Bureau of Standards.</i>	72
III. NATIONAL BUREAU OF STANDARDS. — <i>Mémo- randum relatif à une 5^e Section pour la quatrième partie du projet d'Échelle Internationale de Température de 1948.</i>	84
IV. NATIONAL PHYSICAL LABORATORY. — <i>Note sur le thermocouple étalon en platine et platine à 10 % de rhodium. Défini- tion de la courbe : force électromotrice- température.</i>	89

V. INSTITUT DE MÉTROLOGIE DE L'U. R. S. S. — <i>Notes sur le projet de règlement sur l'Échelle Internationale de Tempé- rature de 1948 établi par le National Bureau of Standards des États-Unis.</i>	T 93
VI. LABORATOIRE ÉLECTROTECHNIQUE DE TOKIO. — <i>Sur l'erreur causée par la conduc- tion thermique du thermocouple et son influence sur l'Échelle Internationale de Température; D^r M. Tanaka et M. K. Okada.....</i>	97
VII. NATIONAL BUREAU OF STANDARDS. — <i>Sur le choix de la constante C_2; par M. H. F. Stimson.....</i>	106
VIII. <i>Observations sur l'Échelle Thermomé- trique et sur l'unité de chaleur; pré- sentées par M. W. Swietoslowski.....</i>	108
IX. SCIENTIFIC RESEARCH INSTITUTE LTD, TOKIO. — <i>Sur la température de fusion de la glace dans l'échelle Kelvin; par M. M. Kinoshita</i>	111
X. <i>L'échelle absolue des températures, d'après GIAUQUÉ; par M. W. J. de Haas.</i>	114
XI. NATIONAL BUREAU OF STANDARDS. — <i>Sur la dépendance des coefficients dans les formules d'interpolation; par M. H. F. Stimson.....</i>	117
XII. <i>Sur l'opportunité du changement de la définition de l'unité de chaleur. Bref rapport et demande d'avis à la Com- mission des Données Physico-Chimiques de l'Union Internationale de Chimie; par M. A. Pérard.....</i>	118
<i>Commentaires sur la Résolution du Comité Consultatif de Thermométrie au sujet de l'unité de chaleur; par M. E. R. Smith.....</i>	121
<i>Remarques concernant la définition de la calorie; par M. W. Swietoslowski.</i>	123

XIII. <i>Lettre du Professeur D^r J. de Boer, Secrétaire de la Commission S. U. N. de l'Union Internationale de Physique, au Bureau International des Poids et Mesures</i>	T 125
XIV. <i>Réponse du Directeur du Bureau International des Poids et Mesures à l'Union Internationale de Physique.</i>	127
XV. <i>Résumé chronologique de deux questions figurant à l'Ordre du Jour; par M. A. Pérard</i>	130
XVI. <i>Commentaires sur les projets de Résolution; par M. J. de Boer</i>	134
XVII. INSTITUT DE MÉTROLOGIE DE L'U. R. S. S. — <i>Sur la détermination de l'unité de quantité de chaleur</i>	136
XVIII. <i>Note sur le point triple de l'eau et la calorie à 0°; par M. E. Perucca</i>	141
XIX. <i>Bibliographie relative à l'Échelle Internationale de Température</i>	143
TABLES DES MATIÈRES	I-X

FIN DE LA TABLE DES MATIÈRES.