

COMITÉ CONSULTATIF DE PHOTOMÉTRIE

SESSION DE 1971

COMITÉ INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES

COMITÉ CONSULTATIF
DE PHOTOMÉTRIE

7^e SESSION — 1971
(1-2 septembre)



BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES
Pavillon de Breteuil, F 92310 SÈVRES, France
Dépositaire : OFFILIB, 48 rue Gay-Lussac, F 75005 Paris

NOTICE HISTORIQUE

Les organes de la Convention du Mètre

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Une trentaine de physiciens ou techniciens travaillent dans les laboratoires du Bureau International; ils font des recherches métrologiques ainsi que des mesures dont les résultats sont consignés dans des certificats portant sur des étalons des grandeurs ci-dessus. Le budget annuel du Bureau International est de l'ordre de 3 000 000 de francs-or, soit environ 1 000 000 de dollars U.S.

(1) Au 31 décembre 1974, quarante et un États sont membres de cette Convention : Afrique du Sud, Allemagne, Amérique (É.-U. d'), Argentine (Rép.), Australie, Autriche, Belgique, Brésil, Bulgarie, Cameroun, Canada, Chili, Corée, Danemark, Dominicaine (Rép.), Espagne, Finlande, France, Hongrie, Inde, Indonésie, Irlande, Italie, Japon, Mexique, Norvège, Pays-Bas, Pologne, Portugal, République Arabe Unie, Roumanie, Royaume-Uni, Suède, Suisse, Tchécoslovaquie, Thaïlande, Turquie, U.R.S.S., Uruguay, Vénézuéla, Yougoslavie.

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

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

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

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

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

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

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

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

Comité International des Poids et Mesures

Secrétaire
J. DE BOER

Vice-Président
J. V. DUNWORTH

Président
J. M. OTERO

LISTE DES MEMBRES

DU

COMITÉ CONSULTATIF DE PHOTOMÉTRIE

Président

A. MARÉCHAL, Membre du Comité International des Poids et Mesures,
Directeur Général de l'Institut d'Optique, *Paris*.

Membres

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

CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET MÉTIERS [C.N.A.M.], *Paris*.

DEUTSCHES AMT FÜR MESSWESEN UND WARENPRÜFUNG [D.A.M.W.],
Berlin.

ELECTROTECHNICAL LABORATORY [E.T.L.], *Tokyo*.

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

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

NATIONAL PHYSICAL LABORATORY [N.P.L.], *Teddington*.

NATIONAL PHYSICAL RESEARCH LABORATORY [N.P.R.L.], *Pretoria*.

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

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

J. M. OTERO, Président de la Junta de Energia Nuclear, *Madrid*.

L. PLAZA, Institut d'Optique « Daza Valdes », *Madrid*.

F. ROTTER, Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen, *Vienne*.

G. A. W. RUTGERS, Laboratoire de Physique de l'Université, *Utrecht* *.

W. D. WRIGHT, Imperial College of Science and Technology, *Londres*.

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

* Le Bureau International des Poids et Mesures a appris avec un profond regret le décès du Prof. G. A. W. RUTGERS survenu le 4 octobre 1972.

ORDRE DU JOUR DE LA SESSION

1. Travaux sur l'étalon primaire; résultats des études sur la réalisation du corps noir; Groupe de travail de l'étalon primaire photométrique.
 2. Température du point de congélation du platine.
 3. Radiométrie absolue.
 4. Constante de Stefan-Boltzmann.
 5. Travaux de spectrophotométrie.
 6. Récepteur $V(\lambda)$.
 7. Examen des résultats de la cinquième comparaison des étalons nationaux d'intensité et de flux lumineux.
 8. Unification internationale des unités photométriques.
 9. Qualité des lampes étalons.
 10. Comparaisons futures.
 11. Rattachement du lumen à la candela.
 12. Résultats de la comparaison internationale de lampes étalonnées en unités énergétiques, organisée par le N.P.L.; rapport du Groupe de travail de la radiométrie.
 13. Définition de la candela.
 14. Publication des documents.
 15. Questions diverses.
-

7^e SESSION (1971)

RAPPORT

AU

COMITÉ INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES

Par H. KORTE, Rapporteur

Le Comité Consultatif de Photométrie (C.C.P.) a tenu sa septième session au Bureau International des Poids et Mesures, à Sèvres, au cours de quatre séances les mercredi 1^{er} et jeudi 2 septembre 1971.

Étaient présents :

A. MARÉCHAL, membre du C.I.P.M., président du C.C.P.

Les délégués des laboratoires membres :

Conseil National de Recherches [N.R.C.], Ottawa (C. L. SANDERS).
Conservatoire National des Arts et Métiers [C.N.A.M.], Paris
(J. BASTIE).

Electrotechnical Laboratory [E.T.L.], Tokyo (K. YOSHIÉ).

Institut de Métrologie D. I. Mendéléév [I.M.M.], Leningrad
(M^{me} V. E. KARTACHEVSKAIA) ⁽¹⁾.

National Bureau of Standards [N.B.S.], Washington (H. J. KOST-
KOWSKI, B. W. STEINER).

National Physical Laboratory [N.P.L.], Teddington (E. J. GILL-
HAM, O. C. JONES).

National Physical Research Laboratory [N.P.R.L.], Pretoria
(C. J. KOK).

National Standards Laboratory [N.S.L.], Chippendale (W. R.
BLEVIN).

Physikalisch-Technische Bundesanstalt [P.T.B.], Braunschweig
(H. KORTE, D. FÖRSTE, K. BISCHOFF).

* A sa 60^e session (septembre-octobre 1971), le Comité International des Poids et Mesures a décidé que ce Comité Consultatif porterait à l'avenir le nom de *Comité Consultatif de Photométrie et Radiométrie* (C.C.P.R.).

(1) M^{me} KARTACHEVSKAIA n'a pu assister qu'à la dernière séance.

Les membres nominativement désignés :

F. ROTTER (Vienne).

G. A. W. RUTGERS (Utrecht).

Le directeur du Bureau International (J. TERRIEN).

Assistaient aussi à la session : J. BONHOURE et H. MOREAU (Bureau International).

Excusés : Deutsches Amt für Messwesen und Warenprüfung [D.A.M.W.], Berlin (B. FISCHER, S. NÜNDEL), J. OTERO (Madrid), L. PLAZA (Madrid), W. D. WRIGHT (Londres), membres nominativement désignés.

Après avoir ouvert la séance et souhaité la bienvenue à toutes les personnes présentes, le *Président* évoque la mémoire et les mérites de deux membres du Comité Consultatif récemment disparus : M. Debure, décédé en mars 1969, et O. Reeb, décédé le 20 mars 1971.

Il informe également le Comité Consultatif de la décision de Mr Wright, qui désire donner sa démission de membre spécialiste à l'issue de cette session.

Mr Korte est désigné comme rapporteur, assisté de Mr Bonhoure comme secrétaire.

Travaux sur l'étalon primaire

Mr *Sanders* résume les délibérations du Groupe de travail de l'étalon primaire photométrique qui a tenu une réunion depuis la 6^e session du C.C.P.; il fait mention des diverses corrections qu'il paraît nécessaire d'appliquer au corps noir employé pour la réalisation de la candela (Annexe P 2).

On évoque ensuite très brièvement les travaux relatifs au corps noir réalisés au D.A.M.W. (Annexe P 5) et à l'I.M.M. (Annexe P 7), ainsi qu'un calcul fait au N.S.L. (Annexe P 6) sur l'éclairement de l'image de l'ouverture de l'étalon primaire.

Au N.P.L., on a construit un nouveau corps noir dans le but de déterminer la température du point de congélation du platine. On a examiné la possibilité d'utiliser ce corps noir à la détermination de la candela; cependant les opinions sur cette question demeurent partagées.

A une question de Mr Blevin, Mr *Terrien* rappelle qu'on n'a jamais imposé de spécifications particulières pour la réalisation du corps noir. Il s'ensuit une discussion sur les difficultés que l'on rencontre quand on veut utiliser un corps noir de conception habituelle. Mr *Jones* indique alors l'existence de la lampe à corps noir (Annexe P 8) mise au point au N.P.L. et qui, à son avis, pourrait peut-être convenir comme corps noir étalon primaire; il est nécessaire et suffisant pour cela de déterminer la température de la cavité par pyrométrie optique.

Le C.C.P. recommande finalement que l'on poursuive l'étude et l'emploi des sources de rayonnement ayant des propriétés voisines de celles du corps noir (*Recommandation P 2* (1971), p. P 18).

La P.T.B., le D.A.M.W., le N.B.S., le N.P.L., l'I.M.M. expriment leur intention de poursuivre des études sur l'étalon primaire photométrique dans le futur immédiat.

Température du point de congélation du platine

La détermination de la valeur du point de congélation du platine résulte de la comparaison des densités spectrales de la luminance énergétique à une longueur d'onde donnée du rayonnement d'un corps noir au point de congélation du platine et au point de congélation de l'or; cette valeur dépend donc des valeurs qui sont attribuées au point de l'or et à la seconde constante de rayonnement de l'équation de Planck. La mesure de la température dans l'Échelle Internationale Pratique de Température de 1968 (E.I.P.T.-68) est donc actuellement la meilleure façon d'obtenir la température thermodynamique.

La température du point de congélation du platine, qui est un point de référence secondaire de l'E.I.P.T.-68, repose sur des déterminations très anciennes (1930-1934), mais on signale une récente détermination faite au N.P.L. qui fournit une valeur plus faible que la valeur admise actuellement (Annexe P 9).

Le C.C.P. appuie en conséquence les travaux prévus pour une connaissance plus exacte de la température du point de congélation du platine (*Recommandation P 1* (1971), p. P 18).

Radiométrie absolue

Depuis plusieurs années on étudie les possibilités offertes par la radiométrie absolue pour définir la candela (Annexe P 10). Pour le moment il ne semble pas raisonnable d'effectuer un tel changement; les progrès obtenus dans le futur, soit sur le corps noir, soit sur la radiométrie absolue fixeront la voie à suivre.

En ce qui concerne les valeurs de l'efficacité lumineuse spectrale maximale K_m , on dispose des résultats suivants :

673 lm/W, valeur *calculée* avec $T(\text{Pt}) = 2\,045$ K (valeur admise dans l'E.I.P.T.-68).

690 lm/W, valeur *calculée* avec la plus récente valeur de $T(\text{Pt})$ obtenue au N.P.L. (2 040,8 K). (On rappelle que la valeur *mesurée* au N.P.L. par radiométrie absolue était de 686 lm/W).

On évoque alors en détail les propriétés des radiomètres absolus; on discute en particulier de l'équivalence de l'échauffement par rayonnement et de l'échauffement par énergie électrique.

On évoque également les différents types de construction des radiomètres absolus utilisés au N.S.L. ainsi que dans plusieurs autres laboratoires, et le C.C.P. adopte à ce sujet la *Recommandation P 3* (1971) p. 19.

Constante de Stefan-Boltzmann

Cette importante constante a été récemment déterminée au N.S.L. (*Metrologia*, 7, 1971, p. 15). La valeur obtenue après application des corrections nécessaires est pour la première fois en bon accord, à 0,1 % près, avec la valeur calculée à partir des constantes atomiques fondamentales.

Travaux de spectrophotométrie

Dans le but de rattacher les unités établies pour différentes répartitions spectrales du rayonnement, des travaux spectrophotométriques ont été effectués au D.A.M.W. (Annexe P 13), au N.B.S. et au N.R.C. (Annexe P 4, Question 3).

Les résultats obtenus ont conduit le N.B.S. à modifier son unité d'intensité lumineuse à 2 357 K de — 0,4 % et son unité de flux lumineux à 2 793 K de — 0,25 %; le N.R.C. a corrigé également son unité de flux lumineux à 2 793 K de — 0,8 %.

Récepteur $V(\lambda)$

Des photopiles au silicium, assez bien corrigées pour que l'on puisse les assimiler à des récepteurs $V(\lambda)$, sont disponibles sur le marché (*PTB-Mitteilungen*, 3, 1969, p. 153).

Mr *Blevin* donne alors un exemple d'un filtre de verre obtenu en Australie et qui permet la réalisation d'un récepteur absolu $V(\lambda)$, satisfaisant pour les rayonnements voisins de celui du corps noir à 2 856 K (Annexe P 11).

Puis Mr *Rutgers* indique une forme d'approximation de la courbe $V(\lambda)$ pour le calcul sur ordinateur des grandeurs photométriques à partir des grandeurs énergétiques (Annexe P 14).

Comparaisons internationales des étalons d'intensité et de flux lumineux

Mr *Bonhoure* expose rapidement dans quelles conditions, améliorées par rapport à la comparaison précédente, ont été effectuées au B.I.P.M. les mesures de la 5^e comparaison (1969) des étalons nationaux d'intensité et de flux lumineux, et il indique quels sont les résultats obtenus.

Aucune nouvelle réalisation de l'étalon primaire photométrique n'ayant été effectuée depuis la 4^e comparaison (1961), les résultats actuels permettent seulement de voir comment les divers laboratoires ont gardé leurs unités; les résultats peuvent être considérés comme satisfaisants pour les étalons d'intensité lumineuse à la température de congélation du platine et pour les étalons de flux lumineux; pour les étalons d'intensité lumineuse à température de couleur plus élevée, les résultats sont moins satisfaisants par suite de la moins bonne qualité des lampes utilisées (Annexe P 12).

Unification internationale des unités photométriques

Après avoir examiné les résultats de la 5^e comparaison internationale des étalons photométriques et compte tenu des incertitudes qui affectent la réalisation pratique de l'étalon primaire et l'utilisation des lampes à incandescence étalons secondaires, les représentants des laboratoires nationaux estiment tous qu'il n'est pas actuellement désirable d'ajuster les valeurs attribuées à leurs étalons pour réaliser un accord qui ne serait que temporaire et fallacieux.

On propose que, pour une comparaison internationale ultérieure, et dans le but de clarifier la situation, les laboratoires fournissent au B.I.P.M. les valeurs d'étalonnage de leurs lampes étalons :

1^o dans l'unité réellement en vigueur;

2^o *seulement s'il y a lieu*, dans l'unité que le laboratoire estime la plus exactement conforme à sa définition.

Qualité des lampes étalons

Dans plusieurs pays, et à la demande des laboratoires de métrologie, des travaux sont effectués en vue de construire de nouveaux types de lampes étalons d'intensité lumineuse à haute température de couleur avec des propriétés supérieures aux lampes actuelles (Annexe P 4, Question 4).

Mr Jones montre un type de lampe étudié au N.P.L. comme étalon de température de couleur jusqu'à 3 400 K, mais pouvant éventuellement servir d'étalon d'intensité lumineuse (filament spiralé, sans crochets supports; 17 V, 28 A à 3 000 K; durée de vie : 1 500 h).

Comparaisons internationales futures

Pour les étalons d'intensité lumineuse à la température du point de congélation du platine et pour les étalons de flux lumineux, il n'est pas envisagé de nouvelles comparaisons avant une ou plusieurs réalisations de l'étalon primaire de lumière.

Une nouvelle comparaison de lampes étalons d'intensité lumineuse à température de couleur élevée est souhaitable, mais elle ne sera envisagée que lorsqu'un type de lampe suffisamment stable sera disponible.

Mr *Blevin* annonce que le N.S.L. participera aux prochaines comparaisons internationales.

Rattachement du lumen à la candela

Le N.P.L. expose le travail effectué dans ce domaine; le résultat obtenu conduit à une unité de flux lumineux plus grande de 0,5 %, mais le N.P.L. estime que ce résultat doit être confirmé par d'autres mesures avant d'envisager une modification de l'unité en vigueur (Annexe P 4, Question 3).

Comparaison internationale de lampes étalonnées en unités énergétiques

Cette comparaison, organisée par le N.P.L. avec sept autres laboratoires nationaux, s'est effectuée en 1966 sur des lampes étalons à filament de tungstène (Osram Wi 41), réglées à 2 700 K, et étalonnées suivant l'éclairement énergétique qu'elles produisent dans des conditions spécifiées.

Mr *Gillham* présente les résultats de cette comparaison (Annexe P 3) et indique que l'écart maximal entre les échelles radiométriques est un peu supérieur à 2 %.

Définition de la candela

Au cours d'une discussion longue et animée, tous les aspects du problème sont soulevés, ce qui permet d'établir les mérites respectifs de la définition actuelle de la candela et d'une autre définition fondée sur une relation convenue entre les grandeurs photométriques et radiométriques (*Recommandation* P 4 (1971), p. P 19).

Les arguments suivants sont destinés à stimuler les discussions ultérieures du C.C.P.

A. Arguments en faveur de la définition actuelle

1. Le fait que la définition existe est un argument pour qu'elle soit conservée, à moins qu'il n'y ait de bonnes raisons d'en changer.

2. Les incertitudes sur la valeur thermodynamique de $T(\text{Pt})$ n'ont aucune importance lorsqu'on réalise la candela et elles en ont peu dans les mesures des grandeurs photométriques lorsqu'on réalise la candela en construisant effectivement un corps noir à $T(\text{Pt})$ [mais elles ont une importance considérable dans d'autres méthodes de réalisation, telles que celles qui utilisent un radiomètre absolu et un filtre $V(\lambda)$].

3. L'unité définie est indépendante des constantes de rayonnement et de $V(\lambda)$; par voie de conséquence, elle s'applique à la photométrie photopique, mésopique et scotopique.

B. *Arguments en faveur d'une autre définition, fondée sur une relation convenue entre les grandeurs photométriques et radiométriques* (c'est-à-dire une valeur convenue en watts par stéradian pour l'intensité énergétique qui équivaut à 1 candela pour le rayonnement monochromatique d'une longueur d'onde donnée, ou une valeur convenue en watts pour le flux énergétique qui équivaut à 1 lumen pour une longueur d'onde donnée).

1. Cette définition, avec la fonction $V(\lambda)$ admise internationalement, donnerait une relation exacte et connue entre les grandeurs spectroradiométriques et photométriques pour le rayonnement monochromatique de n'importe quelle longueur d'onde.

2. La nature objective et physique des grandeurs photométriques, et leur dépendance de la courbe $V(\lambda)$ seraient mieux comprises par les hommes de science en général.

3. Comme elle n'implique aucune préférence pour une méthode expérimentale particulière pour réaliser la candela, cette définition devrait conduire à une diversification des méthodes utilisées et par conséquent à une meilleure compréhension des erreurs systématiques, à leur diminution, et peut-être à améliorer l'accord général.

4. Les incertitudes sur la valeur thermodynamique de $T(\text{Pt})$ seraient sans importance dans les réalisations de la candela [sauf dans certaines réalisations qui utilisent un corps noir à $T(\text{Pt})$].

Questions diverses

Situation des Groupes de travail. — Le Groupe de travail de l'étalon primaire photométrique ayant terminé les tâches particulières qui lui avaient été assignées, ses membres sont félicités pour le travail accompli et le Groupe est dissous.

Pour le Groupe de travail de la radiométrie, sa composition devrait être revue ou confirmée.

Modification du nom du Comité Consultatif. — Pour introduire officiellement la radiométrie dans les activités du C.C.P., celui-ci propose de changer son nom en *Comité Consultatif de Photométrie et Radiométrie* (C.C.P.R.) (*Recommandation* P 5 (1971), p. P 20).

Valeurs de $V(\lambda)$. — Le C.C.P. estime qu'il y aurait intérêt à utiliser dorénavant pour $V(\lambda)$, les valeurs $\bar{y}(\lambda)$ de 1 en 1 nm qui figurent dans le document de la Commission Internationale de l'Éclairage: « Colorimetry; Official Recommendations » (Publication CIE No. 15, 1971).

En conclusion de ses travaux, le Comité Consultatif adopte les cinq recommandations ci-après et le Président remercie ses collègues pour le travail accompli au cours de cette session.

(3 septembre 1971)

**Recommandations
du Comité Consultatif de Photométrie
présentées
au Comité International des Poids et Mesures (*)**

Sur la température thermodynamique du point de congélation du platine

RECOMMANDATION P 1 (1971)

Le Comité Consultatif de Photométrie,

CONSIDÉRANT que la liaison des études photométriques aux études radiométriques fait intervenir les lois du rayonnement et nécessite la connaissance de la température thermodynamique du point de congélation du platine,

APPUIE la recommandation que le Comité Consultatif de Thermométrie a adoptée à sa 9^e session (1971) afin que d'autres mesures de la température de congélation du platine soient effectuées.

Poursuite des études sur les sources de rayonnement du type corps noir

RECOMMANDATION P 2 (1971)

Le Comité Consultatif de Photométrie,

CONSIDÉRANT

— le rôle important joué en photométrie et en radiométrie par les sources de rayonnement ayant des propriétés voisines de celles du corps noir,

— les résultats prometteurs obtenus au National Physical Laboratory

(*) Ces cinq Recommandations ont été approuvées par le Comité International des Poids et Mesures à sa 60^e session (septembre-octobre 1971).

par l'emploi d'un nouveau type de cavité rayonnante dans la mesure du point de congélation du platine et par l'utilisation des lampes à incandescence simulants un corps noir,

RECOMMANDE que l'on poursuive l'étude et l'emploi de ces sources de rayonnement.

Poursuite des études sur les méthodes utilisant des récepteurs thermiques absolus

RECOMMANDATION P 3 (1971)

Le Comité Consultatif de Photométrie,

CONSIDÉRANT

— la Recommandation 2 adoptée par le Comité Consultatif de Photométrie en 1962 concernant la possibilité de définir les grandeurs photométriques par la fixation d'une valeur de l'efficacité lumineuse d'une radiation monochromatique, et de mesurer ces grandeurs au moyen d'un récepteur thermique absolu combiné à un filtre dont le facteur de transmission soit connu et approximativement proportionnel à $V(\lambda)$ aux diverses longueurs d'onde,

— l'existence d'autres méthodes également possibles, en particulier par spectroradiométrie absolue,

— les résultats précis et prometteurs obtenus dans quelques laboratoires et tout particulièrement au National Standards Laboratory dans le perfectionnement et l'utilisation de récepteurs thermiques absolus,

RECOMMANDE que des études relatives à ces diverses méthodes soient entreprises ou poursuivies et en particulier que les récepteurs thermiques absolus construits d'une façon différente par divers laboratoires soient échangés, afin que des mesures comparatives permettent de déceler leurs erreurs systématiques éventuelles.

Sur la relation entre les expressions en lumens et en watts du flux des rayonnements optiques monochromatiques

RECOMMANDATION P 4 (1971)

Le Comité Consultatif de Photométrie

INSISTE sur l'importance d'obtenir une relation beaucoup plus exacte qu'à présent entre l'expression en lumens et l'expression en watts du flux des rayonnements optiques monochromatiques à toute longueur d'onde.

Changement du nom du C.C.P.

RECOMMANDATION P 5 (1971)

Le Comité Consultatif de Photométrie,

CONSIDÉRANT la grande difficulté des mesures radiométriques en rayonnement total et en rayonnement spectral, et l'importance croissante de telles mesures dans maints domaines de la science et de la technologie,

RECOMMANDE que la radiométrie soit considérée comme une activité au moins aussi importante que la photométrie et que le nom du Comité Consultatif de Photométrie soit changé en celui de « Comité Consultatif de Photométrie et Radiométrie ».

Appendice

Plan d'étude proposé

par le Groupe de travail de la Radiométrie

Au cours d'une réunion officielle tenue le 1^{er} septembre 1971, on a étudié un certain nombre de propositions concernant la collaboration entre laboratoires nationaux, afin de poursuivre les recherches sur l'emploi de méthodes radiométriques, fondées sur la calorimétrie, pour conserver et améliorer la candela. On a considéré comme réalisables les projets suivants :

1° Échange de radiomètres absolus pour effectuer une comparaison entre les différents types d'instruments et les méthodes d'utilisation correspondantes.

Sauf dans les cas où la méthode de mesure est entièrement autonome, il serait nécessaire d'utiliser pour de telles comparaisons un rayonnement d'une qualité spectrale définie de façon suffisamment étroite en rapport avec la sélectivité du radiomètre. Une lampe à filament de tungstène à 2 859 K avec un filtre $V(\lambda)$ assez grossier conviendrait tout à fait.

2° Mise au point ultérieure, si nécessaire, de filtres $V(\lambda)$ de verre et échange de ces filtres pour des mesures de transmission spectrale.

3° Détermination de K_m par les laboratoires qui ont pris part aux travaux définis en 1° et 2°.

La partie radiométrique de cette détermination ne nécessiterait aucune collaboration entre laboratoires, mais de nouvelles comparaisons photométriques s'avèreraient peut-être nécessaires pour s'assurer que les valeurs de K_m obtenues se rapportent à la même unité photométrique, en particulier parce qu'il serait sans doute souhaitable d'utiliser des étalons à 2 859 K pour ces travaux.

Les mesures décrites ci-dessus n'ont pas un caractère de routine et ne sont pas de celles qui devraient être entreprises suivant un effort concerté avec un programme strict; plus probablement, elles devraient être effectuées entre paires de laboratoires, selon l'occasion. Toutefois, afin de constituer le stimulant nécessaire, une date devrait être fixée pour la réunion du Groupe de travail qui étudierait les progrès réalisés.

Obtenir une documentation complète des méthodes de mesure constituerait une partie essentielle du programme de coopération.

La comparaison des étalons d'intensité énergétique spectrale a un rôle essentiel à jouer dans l'unification des étalons photométriques et radiométriques. C'est pourquoi la comparaison des échelles nationales d'éclairement énergétique spectral qui est actuellement préparée par K. Yoshié (E.T.L.) dans le cadre des travaux du sous-comité de spectroradiométrie du Comité E-1.2 de la Commission Internationale de l'Éclairage (C.I.E.) sera très utile. Une comparaison semblable des échelles nationales de luminance énergétique spectrale devrait être effectuée ultérieurement.

ANNEXE P 1

Documents présentés à la 7^e session du C.C.P.

Document

CCP/

- 71-2 Rapport du Groupe de travail de l'étalon primaire photométrique au Comité Consultatif de Photométrie (Voir *Annexe P 2*).
- 71-3 Rapport du Groupe de travail de la radiométrie au Comité Consultatif de Photométrie (Voir *Annexe P 3*).
- 71-4 Consultation préalable par correspondance (Voir
71-5 *Annexe P 4*).
- 71-6 Conversion des grandeurs énergétiques en grandeurs photométriques, par J.A. ter Heerdt et G.A.W. Rutgers (Voir *Annexe P 14*).
- 71-7 D.A.M.W. (Allemagne).- Comparaison des unités relatives des groupes de lampes étalons destinés à la détermination de l'intensité lumineuse et du flux lumineux du D.A.M.W., et qui ont participé à la 4^e comparaison internationale (1962) du B.I.P.M., par B. Fischer (Voir le résumé à l'*Annexe P 13*).

Document

- CCP/
- 71-8 D.A.M.W. (Allemagne).- Étude de l'étalon primaire photométrique au D.A.M.W., par K.H. Sümlich (Voir *Annexe P 5*).
- 71-9 N.S.L. (Australie).- Éclairement lumineux de l'image de l'étalon primaire photométrique, par W.R. Blevin (Voir *Annexe P 6*).
- 71-10 N.S.L. (Australie).- Filtre $V(\lambda)$ en verre pour réaliser la candela par radiométrie, par J.E. Shaw et W.R. Blevin (Voir *Annexe P 11*).
- 71-11 N.S.L. (Australie).- Radiomètre absolu pour maintenir la candela, par W.J. Brown et W.R. Blevin (Voir *Annexe P 10*).
- 71-12 N.P.L. (Royaume-Uni).- The freezing point of platinum determined by the NPL photoelectric pyrometer, by T.J. Quinn and T.R.D. Chandler (Voir le résumé à l'*Annexe P 9*).
- 71-13 E.I.P.M.- Rapport sur la 5^e comparaison des étalons nationaux d'intensité et de flux lumineux (1969), par J. Bonhoure.(Voir *Annexe P 12*).
- 71-14 N.P.L. (Royaume-Uni).- La lampe à corps noir comme étalon de luminance et de température de couleur, par O.C. Jones et G.W. Gordon-Smith. (Ce document a fait l'objet d'une version plus complète dans le document 71-14bis).
- 71-14bis N.P.L. (Royaume-Uni).- Utilisation d'une lampe à corps noir comme étalon de température de couleur et de luminance, par O.C. Jones et G.W. Gordon-Smith (Voir *Annexe P 8*).
- 71-15 I.M.M. (U.R.S.S.).- Certain problems of improving a measuring installation for the primary standard of light, by V.E. Kartachevskaja and N.M. Kolossova (Voir *Annexe P 7*).

ANNEXE P 2

**Rapport du Groupe de travail
de l'étalon primaire photométrique
au
Comité Consultatif de Photométrie**

Quatrième réunion (Washington et Ottawa, 1967)

Le Groupe de travail s'est réuni à Washington le 27 juin 1967 et à Ottawa le 30 juin 1967.

Etaient présents soit à l'une, soit à l'autre séance : Mr SANDERS (N.R.C.), président, Mme KARTACHEVSKAIA (I.M.M.), MM. BARBROW (N.B.S.), JONES (N.P.L.), WILLENBERG (P.T.B.).

Assistaient également à la réunion : MM. BAK (N.R.C.), BEDFORD (N.R.C.), CRUZ (Espagne), HORNBECK (N.B.S.), KORTE (P.T.B.), McNISH (N.B.S.), MORREN (Belgique), ainsi que MM. BONHORE et MOREAU (B.I.P.M.).

A la demande du Président, Mr Hornbeck donne quelques informations sur les études poursuivies au N.B.S. et parle du chauffage par induction des lingots de platine ; les cavités observées dans les lingots examinés sont dues à la vigoureuse agitation qui résulte du chauffage par induction. Initialement on pensait que cette forte agitation du platine conduisait à une bonne uniformité de température, alors que les cavités pouvaient être éloignées du tube de visée en ne plaçant pas le lingot exactement dans l'axe de l'enroulement de chauffage. Actuellement on estime qu'il serait mieux d'utiliser une résistance de chauffage dans une enveloppe en iridium ou en graphite, immergée dans le lingot de platine ; on notera toutefois que l'iridium est fragile et difficile à travailler

et que le graphite doit être employé sous atmosphère inerte. Mr Hornbeck ajoute que les courbes de congélation obtenues au N.B.S. ne présentent pas un palier parfaitement dessiné et qu'il faut faire preuve de beaucoup de discernement pour établir la partie de chaque courbe à prendre en considération. Il faut avoir au moins une bonne reproductibilité pour que les résultats soient utilisables.

On propose ensuite de faire circuler un récepteur de laboratoire en laboratoire, pour comparer les corps noirs nationaux en éliminant ainsi l'étape intermédiaire des lampes à incandescence et de leur comparaison au P.I.P.M. ; on évoque alors la nécessité de spécifier la forme du récepteur et son optique. On pourrait aussi faire des comparaisons de luminance, avec des lampes à ruban, mais il ne semble pas que la stabilité de ce type de lampe soit suffisante ; quant à la nouvelle lampe corps noir mise au point au N.P.L., on ne possède pas encore d'expérience sur sa stabilité au cours des transports.

Mr Sanders s'étonne que les laboratoires, autres que le N.R.C., n'appliquent pas de correction à leur réalisation du corps noir ce qui, sans doute, entraîne une erreur sur la candela moyenne de l'ordre de 0,7 à 0,8 %. Pour sa part, Mr Jones estime que le calcul fait au N.R.C. sur l'erreur due au gradient de température et à l'émergence du tube de visée ne s'applique qu'à la réflexion diffuse, alors que l'alumine peut aussi réfléchir spéculairement. Parmi d'autres matériaux offrant la possibilité de donner au tube de visée, fait d'une seule pièce, des formes plus appropriées (cône muni d'une collerette autour de l'ouverture, par exemple), certains sont transparents ; on peut soit les recouvrir d'oxyde de nickel pour les rendre opaques, soit modifier la théorie.

En réponse à une question de Mr Hornbeck, Mme Kartachevskaja apporte quelques précisions sur le chauffage par induction à enroulement mobile qu'elle utilise à l'I.M.M. ; l'enroulement est déplacé suivant l'axe du creuset, d'une longueur qui excède celle du creuset de 3 cm environ ; le mouvement de va-et-vient, effectué précédemment à la main trois à cinq fois par minute, est obtenu maintenant par un moteur deux à dix fois par minute. Si le mouvement de va-et-vient est interrompu, le palier de congélation devient mauvais, mais dès la reprise du mouvement le palier retrouve sa position d'origine ; de plus les résultats sont les mêmes pour la fusion

et la congélation, aussi longtemps que l'enroulement est en mouvement.

Mr Jones expose ensuite la situation au N.P.L. qui consacre tous ses efforts à la radiométrie absolue. C'est ainsi qu'on a construit un corps noir en platine rhodié pouvant fonctionner jusqu'à 1800 °C, afin d'étendre les mesures radiométriques jusqu'à la longueur d'onde de 2 μm . C'est une cavité cylindrique de 25 mm de diamètre, de 100 mm de longueur et de 3 mm d'épaisseur de paroi ; l'ouverture est une fente de 0,25 x 6 mm ; le fond de la cavité est incliné de 17 ° sur la direction d'observation. L'émissivité de la cavité, d'après Gouffé, est 0,995 à 0,6 μm . La température absolue, repérée par un thermocouple, est stable à 0,1 deg durant 40 minutes, mais il semble que la présence du thermocouple dans la paroi de la cavité crée un abaissement de température de 30 deg environ. Le corps noir est chauffé par un enroulement en molybdène situé dans la double paroi d'un four en alumine.

Mr Sanders mentionne alors les études statistiques en cours de développement au N.B.S. qui permettent, à partir d'un petit nombre de mesures, de tirer plus d'informations que leur simple examen n'en laisse espérer ; il pense qu'il serait peut-être possible de traiter de cette façon les mesures faites par les laboratoires nationaux et le B.I.P.M. au cours de la comparaison internationale de la candela et du lumen.

On revient une dernière fois sur la question des fours et de leur mode de chauffage ; Mr Bedford estime qu'un chauffage à résistance électrique convient mieux à la réalisation de l'étalon primaire photométrique qu'un chauffage par induction, en fournissant une meilleure uniformité de température.

(Septembre 1967)

ANNEXE P 3

Rapport du Groupe de travail de la radiométrie au Comité Consultatif de Photométrie

Première réunion (Moscou, 1966)

Le Groupe de travail de la Radiométrie s'est réuni pour la première fois à Moscou le 22 septembre 1966.

Étaient présents : Mr GILLHAM (N.P.L.), président ; Mme KARTACHEVSKAIA (I.M.M.), MM. BEDFORD (N.R.C.), KAUFHOLD (D.A.M.W.), STAIR (N.B.S.), YOSHIÉ (E.T.L.).

Assistaient également à la réunion MM. JONES (N.P.L.) et KORTE (P.T.B.), ainsi que Mr BONHOURE (B.I.P.M.).

COMPARAISON INTERNATIONALE DES ÉCHELLES RADIOMÉTRIQUES

La comparaison internationale des échelles radiométriques organisée sous l'égide du National Physical Laboratory est maintenant presque achevée, toutefois les résultats de l'Institut de Métrologie D.I. Mendéléev n'ont pas encore été communiqués. La comparaison a été effectuée à l'aide de lampes à filament de tungstène (Osram, Allemagne, type W1 41/G) fonctionnant à une intensité de courant spécifiée (température de répartition d'environ 2 700 °K) et étalonnées suivant l'éclairage énergétique que produisent les lampes à une distance de 1 m dans une direction donnée. Un groupe de trois lampes a été envoyé par le N.P.L. à chacun des autres laboratoires participants, ainsi qu'une lame de verre destinée à être placée devant

chaque lampe pour absorber le rayonnement de l'ampoule aux grandes longueurs d'onde. A l'exception près indiquée ci-dessus, tous les groupes de lampes sont maintenant revenus au N.P.L. et les mesures de retour faites.

Les valeurs des différences de potentiel montrent que les caractéristiques de beaucoup de lampes ont évolué notablement pendant la durée de la comparaison. Certains changements sont intervenus durant les mesures dans un laboratoire, mais la plupart semblent être survenus pendant le transport des lampes, et sont vraisemblablement dus à une mauvaise manipulation. Cette conclusion est confirmée par le fait que d'autres lampes du même type qui sont restées au N.P.L. au cours de la même période se sont montrées beaucoup plus stables.

Comme les valeurs obtenues au N.P.L. pour la différence de potentiel aux bornes d'une lampe donnée diffèrent fréquemment de façon notable entre elles et avec la valeur donnée par le laboratoire auquel la lampe a été envoyée, il a été nécessaire de fixer la manière d'interpréter les valeurs correspondantes de l'éclairement énergétique au N.P.L. afin d'obtenir la meilleure valeur moyenne à comparer à la valeur donnée par l'autre laboratoire ; on a décidé, pour obtenir la valeur moyenne du N.P.L., de donner aux valeurs individuelles de l'éclairement énergétique un poids inversement proportionnel à la différence (arithmétique) entre les valeurs des différences de potentiel obtenues au N.P.L. et dans l'autre laboratoire.

Comme les mesures de l'éclairement énergétique au N.P.L. et ailleurs ont été effectuées dans des conditions variables d'humidité atmosphérique, il est nécessaire d'apporter aux valeurs de l'éclairement énergétique une correction pour l'absorption due à la vapeur d'eau. Les résultats de chaque lampe ont donc été ramenés à des conditions types correspondant à une pression partielle de vapeur d'eau de 7 torr, en adoptant la formule suivante pour l'absorption :

$$\text{absorption (en \%)} = 0,6 \sqrt{p} ,$$

où p est la pression partielle en torr.

Les résultats de la comparaison sont résumés dans le tableau ci-après qui donne la relation entre les échelles radiométriques des sept laboratoires qui ont communiqué leurs résultats. Les nombres indiquent la valeur relative de l'éclairement

énergétique qui serait assignée par chaque laboratoire à un rayonnement d'éclairement énergétique donné.

*Valeurs relatives de l'éclairement énergétique
mesuré dans huit laboratoires ⁽¹⁾*

IMM	NPL	PTB	ETL	DAMW	NRC	NSL	NBS	Moyenne
0,994	1,004	0,997	1,001	1,012	1,004	0,998	0,989	1,000

DISCUSSION DES RESULTATS ET PROGRAMME FUTUR

A cause des instabilités, la précision de la comparaison est inférieure à ce que l'on espérait au départ mais elle est toutefois suffisante pour révéler les principaux écarts entre les différentes échelles radiométriques. En gros, il semble y avoir une dispersion totale d'environ 3 %⁽²⁾ entre ces échelles, en dépit du fait que cinq d'entre elles concordent à moins de 0,7 %. Il est improbable qu'une comparaison plus précise modifie cette conclusion de façon fondamentale. Le Groupe de travail est tombé d'accord sur le fait qu'au stade actuel il ne serait d'aucune utilité de procéder à une autre comparaison avec un déroulement similaire, au moins tant que le problème de l'instabilité des lampes n'aura pas été surmonté.

La dispersion totale des échelles radiométriques est quelque peu supérieure à celle des différentes valeurs rapportées pour la luminance de l'étalon primaire actuel de lumière. Il ne peut donc en aucun cas être question d'adopter la méthode radiométrique pour l'établissement de l'unité de lumière tant qu'un meilleur accord entre les différentes échelles radiométriques n'aura pas été atteint. Les travaux sur ce point vont continuer mais on a le sentiment qu'il convient d'accorder entre-temps quelque attention à un autre aspect du sujet, c'est-à-dire à la façon dont une échelle radiométrique peut être employée pour établir une unité de lumière.

On a donc convenu que la prochaine étape du programme

(1) Les résultats de l'I.M.M. ont été connus peu après la réunion du Groupe de travail, ce qui a permis de les inclure dans ce tableau.

(2) Une correction apportée ultérieurement aux résultats du D.A.M.W. a ramené cette valeur à un peu plus de 2 %.

expérimental devrait être la détermination, par autant de laboratoires que possible, de l'efficacité lumineuse spectrale maximale (K_m).

Une telle détermination équivaut en tous points à une détermination radiométrique de l'unité de lumière. En conséquence on a discuté des questions suivantes : comment devraient être conduites les mesures ? Quels contrôles, s'il y en a, convient-il d'opérer aux différents stades des mesures par des comparaisons ultérieures entre les laboratoires concernés ?

Mr Yoshié (E.T.L.) suggéra de faire circuler des lampes à filament de tungstène étalonnées en éclairage énergétique spectral. Les intensités photométriques de telles lampes pourraient être déterminées directement dans l'échelle photométrique actuelle et pourraient être combinées aux valeurs de la répartition spectrale pour obtenir K_m . Toutefois, quoiqu'il soit souhaitable pour de nombreuses raisons d'établir et de faire circuler de tels étalons de répartition spectrale, un seul laboratoire (N.B.S.) est à l'heure actuelle en mesure de le faire. Il a donc été convenu, pour le moment, que l'attention se porterait sur la méthode plus simple employée par Mme Kartachevskaja, MM. Preston et Gillham, pour mesurer K_m .

Dans cette méthode, le rayonnement d'une lampe à filament de tungstène étalonnée en unités lumineuses traverse un filtre dont la transmission spectrale est identique dans sa forme à la courbe $V(\lambda)$; ce rayonnement est mesuré avec un récepteur non sélectif, tel qu'une thermopile étalonnée. Si la transmission spectrale du filtre correspond exactement à la forme de la courbe $V(\lambda)$, alors il n'est pas nécessaire de connaître la répartition spectrale du rayonnement de la lampe. En pratique il est impossible d'obtenir une correspondance parfaite et l'on a besoin de connaître quelque peu la répartition spectrale relative. Ordinairement il suffit pour cela de connaître la température de répartition de la lampe.

Il s'ensuit que la précision de la méthode dépend essentiellement de la précision avec laquelle on peut mesurer les grandeurs suivantes : 1) l'intensité lumineuse de la lampe ; 2) l'éclairage énergétique du rayonnement sortant du filtre et 3) la transmission spectrale du filtre.

La mesure de (1) pour une lampe à filament de tungstène présente peu de difficultés, en particulier si la lampe est employée à une température de répartition de 2042 °K ou 2854 °K,

puisque'une échelle photométrique unifiée est à la disposition de tous les laboratoires concernés, à la suite des comparaisons internationales périodiques d'étalons d'intensité lumineuse.

La mesure de (2) dans une échelle unifiée vient d'être rendue possible par la comparaison internationale des étalons d'éclairement énergétique décrite ci-dessus. Toutefois, on doit reconnaître que dans cette comparaison, les mesures ont été effectuées en prenant le rayonnement total de lampes à filament de tungstène, alors qu'une grande partie de ce rayonnement s'étend en dehors de la région visible du spectre. Il serait donc souhaitable de comparer les différentes échelles radiométriques en se limitant au rayonnement dans la région visible du spectre. On a été d'accord pour reconnaître que la meilleure façon de le faire serait non pas au moyen d'une comparaison complète du type de celle qui vient de s'achever, mais par des comparaisons partielles de laboratoire à laboratoire, effectuées quand le besoin ou l'occasion s'en présente, et par n'importe quel moyen jugé approprié (y compris l'emploi de récepteurs étalonnés).

La mesure de (3), la transmission spectrale du filtre, quoique simple dans son principe, est en pratique sujette à des erreurs étonnamment importantes. Il serait donc utile de vérifier de telles mesures au moyen d'un programme de comparaisons internationales entre les différents laboratoires. La difficulté essentielle ici est que le seul type de filtre qui s'est avéré jusqu'ici convenable est un filtre liquide, et la circulation de filtres de ce type dans le but de mesures comparatives semble quasiment impraticable. Un filtre composite en verre possédant la transmission spectrale nécessaire serait hautement apprécié dans ce cas, et cette possibilité doit être étudiée.

En conclusion, il semble probable que les erreurs expérimentales dans la détermination de K_m , ajoutées aux désaccords actuels dans les échelles radiométriques, conduiraient à une dispersion totale dans les résultats supérieure à 3 %. Si l'on pense que ce nombre donne une indication réelle de la précision absolue avec laquelle l'unité de lumière pourrait être établie au moyen d'une méthode radiométrique, ceci voudrait alors dire qu'il est prématuré d'envisager l'adoption de cette méthode, de préférence à la méthode actuelle fondée sur le corps noir au point de congélation du platine.

A l'heure actuelle, le besoin le plus urgent est un plus grand degré de concordance entre les échelles radiométriques des différents laboratoires nationaux.

On a convenu que le rapport de la comparaison internationale des échelles radiométriques serait rédigé par le N.P.L. et soumis à *Metrologia* pour publication⁽³⁾.

(Octobre 1966)

(3) BETTS (D.B.), GILLHAM (E.J.), An international comparison of radiometric scales, *Metrologia*, 4, 1968, p. 101.

ANNEXE P 4

Consultation préalable par correspondance

Dans le but de rendre plus efficaces les travaux de la 7e session du C.C.P., le Bureau International des Poids et Mesures a procédé à une enquête préalable par correspondance sur des sujets importants concernant la photométrie et la radiométrie (période de juin 1965 à juin 1971) :

- Réalisation du corps noir au point de congélation du platine ; causes d'erreurs (*Question 1*).
- Radiométrie et radiomètres absolus (*Question 2*).
- Contrôle de la grandeur relative des candelas et des lumens à diverses températures de répartition (*Question 3*).
- Lampes photométriques étalons (*Question 4*).
- Goniophotomètres automatiques (*Question 5*).
- Améliorations aux installations de mesure (*Question 6*).
- Utilisation d'ordinateurs (*Question 7*).

Les dix laboratoires nationaux consultés ont tous répondu au questionnaire qui leur avait été adressé le 20 janvier 1971 ; on trouvera ci-après la synthèse de leurs réponses.

QUESTION 1

Avez-vous réalisé un nouveau corps noir au point de congélation du platine, ou fait une étude systématique des diverses causes d'erreurs qui interviennent dans la détermination de sa luminance ?

Au D.A.M.W., où on a réalisé le corps noir au point de congélation du platine de 1959 à 1962, on a étudié les causes d'erreurs systématiques en se basant sur la liste établie par le "Groupe de travail de l'étalon primaire photométrique" au cours de sa 2^e réunion (Vienne, 1963 ; *Comité Consultatif de Photométrie*, 6^e session, 1965, p. P 17). On a en outre cherché à améliorer, par voie expérimentale, la constance de la luminance du corps noir au cours de la congélation du platine et à caractériser de manière objective la portion de la courbe de luminance devant servir à la définition de la candela (Annexe P 5).

Au N.B.S., après avoir recherché les conditions optimales pour la réalisation d'un nouveau corps noir, on a entrepris sa construction. On a également fait une estimation des incertitudes qui affectent la luminance de la cavité rayonnante ; l'incertitude la moins bien comprise est celle qui se rapporte à la comparaison de la cavité aux lampes étalons.

Au N.R.C., on a procédé à une étude théorique sur les caractéristiques de rayonnement thermique et spectral des cavités cylindriques utilisées comme corps noir. On est parvenu à établir un modèle réalisable, pour lequel les erreurs dues à la conduction thermique et à l'ouverture du tube de visée sont suffisamment petites [8] .

Le N.P.L. a construit récemment un nouveau corps noir au point de congélation du platine, non pas dans le but d'établir de nouveau la candela mais de redéterminer la température du point de congélation du platine ([15] et Annexe P 9). Il a fait en outre des mesures photométriques, y compris de température de couleur, sur une lampe à corps noir de tungstène réglée à différentes températures de luminance ; ces mesures, en liaison avec la redétermination de la température du point de congélation du platine, constituent une tentative nouvelle pour réaliser l'étalon primaire de lumière, la lampe à corps noir servant d'étalon de transfert (Annexe P 8).

A l'I.M.M., on a recherché comment modifier les installations de mesure pour améliorer l'étalon primaire (Annexe P 7).

Le N.S.L., bien qu'il n'ait jamais réalisé l'étalon primaire photométrique, a examiné comment calculer l'éclairement de l'image de l'ouverture du corps noir (Annexe P 6).

QUESTION 2

Avez-vous construit des radiomètres absolus d'un type nouveau et acquis une expérience qui vous permette d'estimer la précision de mesure de tels récepteurs ?

Quatre laboratoires seulement, le N.B.S., l'I.M.M., le N.P.R.L. et le N.S.L. ont effectué des travaux dans le domaine de la radiométrie au cours des six dernières années ; ces laboratoires ont étudié les propriétés de radiomètres construits suivant des modèles déjà essayés par E.J. Gillham au N.P.L. (*Comité Consultatif de Photométrie*, 5e session, 1962, p. 43) et N. Ooba à l'E.T.L. (*C.C.P.*, 6e session, 1965, p. P 23). L'incertitude sur les mesures d'éclairement énergétique est généralement estimée à $\pm 0,5 \%$.

Au N.S.L., on a procédé récemment à une détermination de la constante de Stefan-Boltzmann et obtenu une valeur en accord avec la valeur théorique à 0,1 % près [33]. Les radiomètres absolus utilisés à cette occasion étaient du type "disque" monté avec un miroir hémisphérique qui réduisait fortement les pertes de flux dues à la réflexion et à la résistance thermique non nulles du revêtement noir du récepteur. On a pu juger, au cours de ce travail, de l'importance de la diffraction et de la difficulté de se protéger de la lumière parasite en radiométrie de précision ; mais on a pu observer aussi combien la stabilité est améliorée quand le radiomètre est utilisé, non plus dans l'air, mais sous vide.

QUESTION 3

Avez-vous contrôlé, et par quelle méthode, la grandeur relative des candelas à 2045 K, 2357 K et 2859 K, et des lumens à 2357 K et 2793 K ?

Trois laboratoires avaient déjà fait un tel contrôle de leurs unités avant 1965 : l'E.T.L. (C.C.P., 5e session, 1962, p. 59), la P.T.B. et l'I.M.M. (C.C.P., 6e session, 1965, p. P31 et p. P33).

Trois autres laboratoires, le D.A.M.W., le N.B.S. et le N.R.C. ont fait ce contrôle plus récemment, et en particulier le passage du lumen à 2357 K au lumen à 2793 K, en utilisant un récepteur $V(\lambda)$ et par spectrophotométrie. Au N.P.L., on a vérifié la grandeur du lumen à 2793 K à partir de celle de la candela à 2859 K avec un goniophotomètre muni d'un récepteur $V(\lambda)$ [16].

Les divers résultats obtenus indiquent pour la grandeur du lumen à 2793 K une variation de :

DAMW	NBS	NRC	NPL
+ 0,7	- 0,25	- 0,8	+ 0,5 %

Seuls le N.B.S. et le N.R.C. ont corrigé leurs unités.

Au C.N.A.M., on a établi la candela à 2859 K par des mesures visuelles en utilisant un jeu de filtres de conversion de température de couleur appropriée.

Au N.S.L., on emploie également des verres colorés de transmissions spectrales connues, mais pour contrôler par spectrophotométrie la qualité du récepteur $V(\lambda)$.

QUESTION 4

Que pensez-vous des lampes utilisées au cours de la 5e comparaison des étalons nationaux d'intensité et de flux lumineux ? Avez-vous connaissance de nouvelles fabrications présentant des propriétés intéressantes ?

Les huit laboratoires ayant pris part à la 5e compa-

raison internationale (1969) sont d'accord sur la très bonne stabilité des lampes Toshiba (intensité lumineuse à 2045 K) et G.E.C. (flux lumineux à 2793 K), et sur la stabilité insuffisante, en particulier au cours des transports, des lampes Osram Wi 41 étalonnées en candelas à 2859 K. Le D.A.M.W. pense que la stabilité de ce dernier type de lampe serait meilleure en abaissant la température de couleur au voisinage de 2800 K. A l'I.M.M., on déplore la répartition spatiale non uniforme du flux lumineux des lampes G.E.C., plus spécialement au voisinage du plan équatorial dans lequel on effectue justement la comparaison aux étalons d'intensité lumineuse.

La P.T.B. signale la fabrication d'un nouveau modèle de lampe Osram Wi 41, sans crochets-supports, et qui aurait ainsi une stabilité satisfaisante.

A l'E.T.L., on a fait l'essai de deux nouveaux types de lampes de flux lumineux à filament soudé aux crochets-supports. L'un, prévu pour fonctionner à 2357 K, a un filament monté en cage d'écureuil. L'autre, utilisable à 2793 K, a un filament spiralé monté dans une ampoule dépolie ; ce type de lampes, dont la répartition spectrale du rayonnement est presque la même que celle de lampes à ampoule claire, est destiné à établir la grandeur relative des unités d'intensité et de flux lumineux.

L'avis des laboratoires sur l'emploi comme étalons de lampes à halogène n'est pas encore unanimement fixé ; pourtant, l'E.T.L. est sur le point d'organiser une comparaison internationale d'éclairage énergétique spectral avec des lampes au brome.

QUESTION 5

Avez-vous construit un goniophotomètre automatique ou semi-automatique, et quelles sont ses caractéristiques ?

Deux appareils de ce genre ont déjà été construits, l'un par l'E.T.L. (C.C.P., 6e session, 1965, p. P 66), l'autre par le N.P.L. [16].

La P.T.B., le N.B.S. et le N.S.L. ont des projets de goniophotomètres automatiques en cours d'étude.

QUESTION 6

Quelles sont les améliorations apportées aux installations de mesure de votre laboratoire ?

Dans presque tous les laboratoires, l'emploi d'alimentations en courant continu transistorisées, stabilisées maintenant à 10^{-5} , se généralise. On fait aussi de plus en plus souvent usage, avec les récepteurs photoélectriques, de voltmètres numériques comme appareils de mesure ; on commence aussi à remplacer, dans les dispositifs amplificateurs, le tube électromètre par un amplificateur opérationnel. Les tubes photoélectriques à cathode multi-alcaline sont quelquefois préférés aux tubes à cathode Cs-Sb.

La plupart des laboratoires ont réalisé et utilisent des photomètres $V(\lambda)$, soit à filtre liquide, soit à filtres de verre.

Le D.A.M.W. a construit un appareil pour la mesure absolue du facteur de réflexion d'échantillons ; cet appareil fonctionne suivant deux procédés de mesure, celui de Budde et celui de Taylor. L'incertitude sera de 0,3 % sur le facteur de réflexion d'un échantillon blanc.

Au N.R.C., on a construit un spectroradiomètre [9].

A l'E.T.L., on a rendu des étalons d'intensité lumineuse à 2859 K suffisamment reproductibles pour l'industrie, en adaptant au sommet de l'ampoule un support pour niveau à bulle d'air. Par ailleurs, on a construit un appareil automatique pour comparer des éclairagements énergétiques spectraux de 0,25 à 2,5 μm , par pas de 5 nm, avec une précision de $\pm 0,5$ %, ainsi qu'un appareil automatique de mesure des températures de répartition fonctionnant suivant la méthode du rapport Rouge/Bleu.

Au N.S.L., le corps noir au point de congélation de

l'or, construit pour la détermination de la constante de Stefan-Boltzmann, est conservé en vue d'autres applications.

QUESTION 7

Avez-vous accès à un ordinateur et quels services vous rend-il ?

Tous les laboratoires ont accès à un ou plusieurs ordinateurs, mais avec des possibilités qui vont du travail occasionnel et exceptionnel à l'emploi systématique. Outre des travaux de colorimétrie, l'ordinateur est utilisé pour le calcul de filtres $V(\lambda)$ [10], l'analyse de mesures goniophotométriques ou spectroradiométriques, l'établissement de tables numériques (rayonnement du corps noir, du tungstène, etc.), et même la publication de rapports.

BIBLIOGRAPHIE

1. Ein lichtelektrisches Präzisionsphotometer, *Feingerätetechnik*, 14, n° 4, 1965.
2. Ein Beitrag zur Anpassung lichtelektrischer Empfänger an der spektralen Hellempfindlichkeitsgrad $V(\lambda)$, *Feingerätetechnik*, 16, n° 4, 1967.
3. Photometrische Bewertung von Quecksilberdampfhochdrucklampen, *Feingerätetechnik*, 16, n° 12, 1967.
4. Quecksilberdampfhochdrucklampen als Lichtstromnormale, *Feingerätetechnik*, 17, n° 1, 1968.
5. Eine neue Heizungsmethodik bei der Darstellung der Lichteinheit, *Feingerätetechnik*, 17, n° 12, 1968.
6. Einfluss der spektralen Empfängerempfindlichkeit bei heterochromen Lichtmessungen, *Feingerätetechnik*, 20, n° 5, 1971.
7. Absolutmessungen des Reflexionsgrades von weissen Proben bei senkrechter und diffuser Beleuchtung, *Feingerätetechnik*, 20, n° 5, 1971.
8. Thermodynamic considerations in realizing the primary standard of light, by C.L. Sanders, *Metrologia*, 3, 1967, p. 119-129.
9. A versatile spectroradiometer and its applications, by C.L. Sanders and W. Gaw, *Applied Optics*, 6, 1967, p. 1639-1647.
10. Design of glass filter combinations for photometers, *Applied Optics*, 8, 1969, p. 2449-2455.
11. Absolute reflectance measurements in diffuse/0° geometry, by W. Budde and C.X. Dodd, *Die Farbe*, 1971, (à paraître).

12. Über die Messung relativer spektraler Empfindlichkeitsverteilungen von photoelektrischen Empfängern, von W. Budde, *Transactions 4th IMEKO Symposium on Photon Detectors*, Prague, 1969.
13. The calibration of standards for "absolute brightness" measurements with the Elrepho, by W. Budde and S.M. Chapman, *Pulp and Paper Magazine of Canada*, 69, 1968, p. 206-209.
14. Computation of correlated color temperature and distribution temperature, by A.R. Robertson, *J. Opt. Soc. Am.*, 58, 1968, p. 1528-1535.
15. A new determination of the freezing point of platinum, by T.J. Quinn and T.R. Chandler, *Metrologia*, 7, n° 3, 1971, p. 132-133.
16. A new determination of the lumen, by O.C. Jones and R.G. Berry, *Metrologia*, 6, 1970, p. 81-89.
17. An impedance converter for use with digital voltmeters, by O.C. Jones, *J. Sci. Instrum.*, 40, 1963, p. 196.
18. Photometric standards and the unit of light, by O.C. Jones and J.S. Preston, *NPL Notes on Applied Sciences No. 24* (2nd Edition).
19. Standard spectral power distributions, by O.C. Jones, *J. Phys.(D)*, 3, 1970, p. 1967-76.
20. Window corrections in spectroradiometry, by C. Forno and O.C. Jones, *J. Opt. Soc. Am.*, 61, 1971, p. 416-418.
21. The verification of spectral emission standards by filter radiometry, by J.R. Moore, (à paraître).
22. Installation photoélectrique pour la mesure de l'intensité lumineuse des lampes à incandescence, par T.N. Andreeva et V.E. Kartachevskaja, *Tryd. Metrol. Inst. U.R.S.S.*, n° 114 (174), 1970, p. 113-115 (en russe).
23. Installation pour le vieillissement des cellules photoélectriques, par T.N. Andreeva et V.E. Kartachevskaja, *Tryd. Metrol. Inst. U.R.S.S.*, n° 114 (174), 1970, p. 124-127 (en russe).
24. Nouvelles thermopiles à grande surface réceptrice, par V.E. Kartachevskaja et L.F. Litvinova, *Tryd. Metrol. Inst. U.R.S.S.*, n° 114 (174), 1970, p. 116-123 (en russe).
25. Calcul d'un filtre interférentiel reproduisant la courbe $V(\lambda)$, par Z.N. Elssner, *Tryd. Metrol. Inst. U.R.S.S.*, n° 114 (174), 1970, p. 128-133 (en russe).
26. Large-area bolometers of evaporated gold, by W.R. Blevin and W.J. Brown, *J. Sci. Instrum.*, 42, 1965, p. 19.
27. An infrared reflectometer with a spheroidal mirror, by W.R. Blevin and W.J. Brown, *J. Sci. Instrum.*, 42, 1965, p. 385.
28. Black coatings for absolute radiometers, by W.R. Blevin and W.J. Brown, *Metrologia*, 2, 1966, p. 139.
29. Development of a scale of optical radiation, by W.R. Blevin and W.J. Brown, *Australian J. Phys.*, 20, 1967, p. 567.
30. Corrections in radiometry for absorption by atmospheric water vapour, by W.R. Blevin and W.J. Brown, *Metrologia*, 5, 1969, p. 28.
31. A comparison of two radiometric scales, by W.R. Blevin, B.G. Collins and W.J. Brown, *Pure and Appl. Geophys.*, 6, 1969, p. 189.
32. Diffraction losses in radiometry and photometry, by W.R. Blevin, *Metrologia*, 6, 1970, p. 39.
33. A precise measurement of the Stefan-Boltzmann constant, by W.R. Blevin and W.J. Brown, *Metrologia*, 7, 1971, p. 15.
34. Graphical corrections for instrumental broadening, by W.R. Blevin, *J. Opt. Soc. Am.*, 61, 1971, p. 835.

35. Spectroradiometry over broad spectral regions by Fourier spectroscopy, by J.E. Shaw, *J. Opt. Soc. Am.*, 57, 1967, p. 1136-1140.
 36. Lamps with diffusing bulbs as standards of luminous intensity, by K.A. Wright, *Trans. Illum. Engng Soc. Lond.*, 32, 1967, p. 207.
 37. Réflexions sur l'état actuel des grandeurs, des unités et des étalons photométriques, par J. Terrien, *Rev. Gén. Electricité*, 78, n° 11, 1969, p. 997-1000.
 38. Comparaison internationale des échelles radiométriques, par J. Bonhoure, *Rev. Gén. Electricité*, 78, n° 11, p. 1001-1007.
 39. Situation actuelle de la photométrie fondamentale au Laboratoire National d'Essais, par M. Debure, *Rev. Gén. Electricité*, 78, n° 11, p. 1008-1014.
 40. Les installations de photométrie au Laboratoire Central des Industries Electriques, par S. Leuzinger, *Rev. Gén. Electricité*, 78, n° 11, p. 1015-1022.
 41. La Photométrie, par J. Terrien et F. Desvignes, Collection "Que sais-je?" N° 1467, Presses Universitaires de France, Paris, 1972, 128 pages.
-

Étude de l'étalon primaire photométrique au D.A.M.W.

Par K.-H. SÜMNICH

Deutsches Amt für Messwesen und Warenprüfung (Allemagne)

Zusammenfassung. - Die Arbeiten am photometrischen Primärnormal wurden im DAMW 1967 und 1970 mit der Untersuchung spezieller Probleme fortgesetzt. Neben der Angabe technischer Einzelheiten der Apparatur wird auf den Einfluss der Zwischenreflexionen im abbildungssystem hingewiesen. Zur objektiven Kennzeichnung der definierten Leuchtdichte innerhalb der Erstarrungskurven des Platins wurde eine Modulation der Heizleistung verwendet, die, auch im Falle der Unterkühlung des Platins, eine vorteilhafte Auswertung der Leuchtdichtekurven ermöglicht. Auf der Grundlage der experimentellen Befunde wurde eine Abschätzung des Temperaturabfalls in der Strahlerwand unter Berücksichtigung der Geometrie des Strahlers vorgenommen. Die auf mehrere Lampengruppen übertragene Grundeinheit reproduzierte sich innerhalb einer Messunsicherheit von 0,3 %.

I. INTRODUCTION

Après avoir réalisé et examiné de façon critique l'étalon primaire destiné à la détermination de l'intensité lumineuse [1], on a effectué en 1967 et 1970 d'autres travaux pour étudier les sources d'erreurs systématiques en se basant, avant tout, sur les erreurs énumérées dans le rapport du "Groupe de travail de l'étalon primaire photométrique" (Vienne, 1963 ; C.C.P., 6^e session, 1965, p. P17). En outre, il était nécessaire d'améliorer, par voie expérimentale, la constance de la luminance du corps noir au cours de la congélation du platine, et de chercher à caractériser de manière objective la partie de la courbe de luminance répondant à des conditions définies.

II. CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES DE L'ÉTALON PRIMAIRE

La forme du corps noir, tel qu'il était utilisé au D.A.M.W., est représentée à la figure 1. Le creuset, son couvercle et le tube de visée étaient en alumine. La quantité de platine utilisée variait de 150 à 180 g. Le chauffage était assuré par un générateur H.F. d'une puissance de 3 kW et d'une fréquence de 600 kHz. Le temps nécessaire pour atteindre la fusion était de 3 heures. Après cinq groupes de mesure environ, chacun permettant six à huit consécutions, les creusets étaient usés. La nécessité de changer souvent de creuset rendait plus difficile l'interprétation des résultats de mesure et risquait, en outre, par suite des manipulations, de contaminer le platine ; ces conditions avaient cependant l'avantage de fournir une valeur mesurée de la candela provenant, pour un modèle donné de corps noir, d'un grand nombre de réalisations indépendantes.

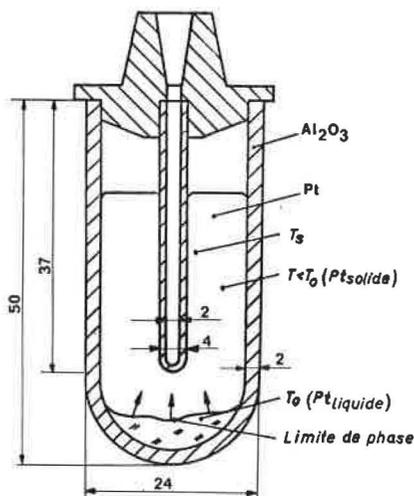


Fig. 1.- Vue du corps noir (cotes en millimètres) et mode de fusion du platine.

Le récepteur photoélectrique était une cellule Gillod-Boutry, adaptée à $V(\lambda)$. Le montage choisi permettait aussi bien l'enregistrement continu que l'indication de valeurs particulières du courant photoélectrique. A l'aide d'un système optique (prisme et lentille d'une distance focale de 467 mm), on projetait l'image du radiateur à une distance de 5 m sur la surface du récepteur. Le grossissement du fond du tube de visée était de 10 au cours des premiers essais, mais

on n'utilisait pour les mesures que la partie centrale de 3 mm de diamètre. Dans les essais suivants on projetait, comme c'est le cas dans les appareillages des autres laboratoires, l'ouverture du tube et on employait seulement une surface de 15 mm de diamètre de l'image obtenue.

Tant que le prisme a été disposé à une certaine distance de la lentille, on observait une dispersion pour toute une série de valeurs mesurées, exigeant un nouvel alignement du radiateur par rapport à l'appareillage. Au cours de cet alignement, on contrôlait la position verticale du radiateur à l'aide d'une fine tige introduite dans le tube de visée en comparant la position de la tige par rapport à deux diaphragmes fixes et centrés. Le réglage final précis de l'image de l'ouverture du tube de visée sur le récepteur dans les directions verticale et horizontale s'effectuait d'abord avec un prisme à réflexion totale en agissant sur le radiateur intégral, puis en inclinant ou en tournant le système optique. La mise au point précise pour obtenir la netteté de l'image s'effectuait par déplacement de la lentille.

Ce mode de réglage entraînait le changement répété de la position relative de la lentille et du prisme. Ainsi, il se pouvait que des images réfléchies de faible luminosité dues aux réflexions prisme-lentille tombent ou non sur le récepteur, suivant la position de la lentille par rapport au prisme. On tenait compte de ces réflexions dans les mesures du flux lumineux effectuées à l'aide d'un appareillage spécial en vue de la détermination du facteur de transmission (fig. 2), parce que le récepteur se trouvait alors tout près du système optique.

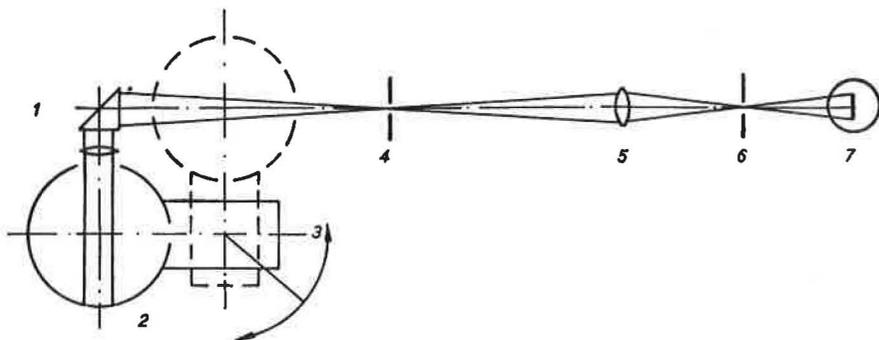


Fig. 2.- Mesure du facteur de transmission du système optique.

1, Système lentille-prisme ; 2, Sphère de 18 cm de diamètre ; 3, Ensemble récepteur ; 4, Diaphragme de 2 mm de diamètre ; 5, Lentille projetant 7 en 4 et 6 en 1 ; 6, Diaphragme à iris ; 7, Lampe à ruban de tungstène.

Le facteur de transmission mesuré était donc plus élevé qu'il ne devait être lors de l'utilisation du système optique avec l'appareillage normal. On a réussi à réduire la dispersion des valeurs mesurées en utilisant un système optique collé.

III. CARACTÉRISATION DE LA LUMINANCE DE CONGÉLATION PAR MODULATION DU CHAUFFAGE

En variant la puissance calorifique transmise au platine, on a cherché à caractériser, lors de la congélation, la partie de la courbe de luminance où la température du tube de visée est celle de la congélation du platine. Tant que les températures restent supérieures ou inférieures à celle de la congélation, les courbes de luminance doivent présenter des variations périodiques en fonction de la modulation du chauffage. La température de changement de phase atteinte, ces variations doivent subir des modifications caractéristiques. En particulier dans le cas du refroidissement du platine liquide, la température de congélation doit être atteinte lors d'une phase négative de la modulation du chauffage. La partie descendante de la courbe de luminance, d'allure générale presque sinusoïdale, doit donc être suivie d'une partie constante, par suite de la congélation d'une certaine quantité de platine près du tube de visée (temps t_2 de la figure 3). Au cours de la phase positive suivante de la modulation du chauffage, la puissance fournie doit suffire pour liquéfier de nouveau la totalité du platine et pour faire remonter la température. La courbe doit retrouver des variations périodiques. Le phénomène doit continuer à se développer, comme l'indique la figure 3.

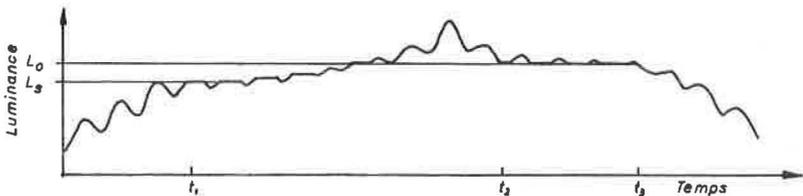


Fig. 3.- Courbe de luminance obtenue avec modulation du chauffage (représentation schématique).

A condition que le refroidissement du platine résulte essentiellement du rayonnement du tube, la température du corps noir doit être, au moment de l'apparition des premiers segments

droits de la courbe de congélation, celle de la congélation.

Le montage choisi pour la réalisation expérimentale de ces hypothèses comprenait, comme à l'Institut de Métrologie D.I. Mendéléév, une bobine mobile se déplaçant le long de l'axe du tube de visée [2]. Ainsi, il était possible de profiter des avantages présentés par ce type d'appareillage et de moduler la puissance H.F. fournie au platine. L'inhomogénéité du champ produit par une bobine à cinq enroulements de 80 mm de diamètre et de 70 mm de longueur était telle que, dans le cas d'une amplitude de 30 mm, une variation suffisante du couplage H.F. entre la bobine et le platine pouvait être atteinte. Le nombre des oscillations par minute était de 3 ou 4. La modulation des courbes de luminance obtenues était presque sinusoïdale et correspondait à l'allure attendue et représentée à la figure 3. L'intervalle $t_3 - t_2$, caractérisé par l'apparition des segments droits lors de la phase de modulation négative, avait une durée de 2 à 4 minutes ce qui permettait de faire environ dix mesures de la valeur de la luminance L_0 ; la dispersion des valeurs obtenues était inférieure à 0,1 %. En ne retenant pour les mesures que les segments de la courbe de congélation dus à la modulation du chauffage, on a réussi à supprimer l'appréciation subjective adoptée jusqu'ici pour l'évaluation des courbes de luminance qui sont généralement un peu bombées.

On a ainsi nettement réduit la dispersion des valeurs de luminance des différents essais de congélation.

Pour effectuer les mesures décrites, on devait éviter le refroidissement du platine liquide à une température inférieure à celle de la congélation, ce qui exigeait, dans la plupart des cas, un faible surchauffage (2080 K environ) et un refroidissement lent (5 à 10 K/min environ).

IV. MESURES SUR LE PLATINE SURFONDU

On a également essayé d'utiliser la surfusion du platine pour les mesures, en supposant que dans ce cas la paroi du creuset et celle du tube de visée sont aussi portées à une température très inférieure à celle de la congélation. La congélation brutale du platine surfondu doit avoir pour conséquence de transmettre la majeure partie de la chaleur de fusion dégagée à la paroi du creuset. Près du tube de visée, la température doit donc toujours être la plus élevée et correspondre à la température de congélation. Etant donné que ce sont les zones extérieures du platine qui commencent à se congeler, ce sont elles

aussi qui, les premières, doivent suivre la température de la modulation du chauffage, bien que cela n'influe sur la luminance observée qu'au moment de la congélation des parties en contact direct avec le tube de visée : cela veut dire que, la surfusion achevée, la température du radiateur doit être exactement celle de la congélation du platine jusqu'au commencement des variations périodiques.

Les courbes expérimentales obtenues ont répondu à ces hypothèses. La luminance mesurée pendant le temps de congélation qui était maintenant relativement court (2 à 3 min environ) était constante à 0,1 % près. La valeur mesurée correspondait à celle qui était obtenue à l'aide du même radiateur, mais sans surfusion.

V. ÉVALUATION DU GRADIENT DE TEMPÉRATURE DANS LA PAROI DU RADIATEUR

Au cours des études à puissance calorifique modulée, on a observé l'effet suivant que nous allons illustrer à l'aide de la figure 3. La progression de la fusion était accompagnée d'une augmentation échelonnée de la luminance dans la partie droite de la courbe jusqu'à ce que la luminance de congélation soit enfin atteinte. La différence entre les luminances L_s au commencement de la fusion et L_0 au moment de la congélation s'est révélée reproductible. On a admis que la cause de cette différence de luminance était le gradient de température qui apparaît lorsqu'au commencement de la fusion le platine au fond du creuset se liquéfie, tandis que la partie restante autour du tube de visée est encore solide (fig. 1). La progression de la fusion devrait être accompagnée du rapprochement de l'interface séparant les phases solide et liquide du tube de visée. On a calculé, à partir de la différence de luminance observée $\Delta L = L_0 - L_s$, la différence de température $\Delta T_p = T_0 - T_s$ au moment du commencement de la fusion, entre la température de congélation du platine T_0 et la température de la paroi extérieure du radiateur T_s . A partir de la valeur de ΔT_p on a calculé de manière très simplifiée, en tenant compte des conditions géométriques intérieures du creuset, le flux de chaleur qui, émis vers le tube de visée, passe ensuite à travers les parois de ce tube et le quitte enfin sous forme de rayonnement. En supposant un débit régulier du flux de chaleur dans cette partie du tube qui est immergée dans le platine, on peut calculer la

différence de température ΔT_s entre les faces externe et interne du tube de visée, puis la diminution de luminance ΔL_s . Les valeurs obtenues sont les suivantes : $\Delta L = 0,6 \%$; $\Delta T_p = 1 \text{ K}$; $\Delta T_s = 0,8 \text{ K}$; $\Delta L_s = 0,5 \%$.

Une valeur analogue de ΔL_s peut être obtenue en se basant sur les calculs de Sanders et Jones [3] concernant cet appareillage.

Il est évident que les phénomènes décrits ne se rapportent qu'au commencement des processus en question, fusion et congélation du platine. Les choses se compliquent ensuite à un point tel qu'elles échappent à l'évaluation. Les courbes de luminance montrent que les segments vraiment droits (L_s et L_0) ne peuvent être observés qu'au commencement de la fusion et de la congélation et qu'ils sont encore suivis d'une partie irrégulière avant même la fin du palier considéré.

VI. COMPARAISON DES RÉSULTATS DE DEUX DÉTERMINATIONS INDÉPENDANTES DE LA CANDELA

Au cours des expérimentations, l'étalon primaire a été comparé à un groupe de lampes soigneusement choisies (groupe N° 1). On a d'abord employé trois lampes de type Osram Wi 29 à la température de couleur de 2045 K. Puis on a porté le nombre des lampes à huit pour améliorer la reproductibilité. La répétition des mesures a permis d'étudier le comportement du groupe et de montrer que l'écart quadratique moyen sur la valeur moyenne du groupe était inférieur à 0,1 %. Il était ainsi possible de comparer les valeurs obtenues à partir de l'étalon primaire, pendant un laps de temps plus ou moins long, avec une précision suffisante.

En 1967 et en 1970, on a étalonné avec le groupe N° 1 très utilisé d'autres groupes peu utilisés (N° 2 à 2045 K et N° 3 à 2357 K). La comparaison des valeurs de 1967 et de 1970 montre une variation de + 0,1 % pour le groupe N° 2 et de - 0,2 % pour le groupe N° 3. L'écart quadratique moyen sur la valeur moyenne du groupe N° 1, obtenue par comparaison à l'étalon primaire, est de 0,1 % ; cette valeur a été obtenue en 1967 à partir de 63 courbes de congélation, et en 1970 à partir de 16 courbes seulement grâce à l'amélioration des conditions de mesure. Les limites d'erreurs pour les groupes N° 2 et N° 3 sont comprises entre 0,2 et 0,3 %.

Compte tenu de ces limites d'erreurs, il est possible de contrôler par de nouvelles mesures la reproductibilité de la valeur de l'unité de base.

(Mai 1971)

BIBLIOGRAPHIE

1. FISCHER (B.), KRÖHNERT (R.), *Feingerätetechnik*, 12, 1963, p. 405.
 2. KARTACHEVSKAIA (V.E.), TIKHODÉEV (P.M.), *Comité Consultatif de Photométrie*, 5^e session, 1962, p. 29.
 3. SANDERS (C.L.), JONES (O.C.), *J. Opt. Soc. Amer.*, 52, 1962, p. 743.
 4. SÜMNICH (K.-H.), *Feingerätetechnik*, 17, 1968, p. 565.
-

Éclairement lumineux de l'image de l'étalon primaire photométrique

Par W. R. BLEVIN

National Standards Laboratory (Australie)

Abstract. - It is suggested that the original expression given in 1931 for the illuminance at the image of the primary photometric standard is accurate in terms of geometrical optics, and that proposed corrections to take account of the finite size of the lens aperture are unnecessary.

L'étalon primaire photométrique, corps noir à la température de congélation du platine, a traditionnellement été utilisé avec une lentille qui forme l'image de l'ouverture de la cavité rayonnante sur le récepteur d'un photomètre. Pendant de longues années, l'éclairement lumineux de l'image a été donné par l'expression suivante, proposée lors de la première réalisation de l'étalon [1] :

$$(1) \quad E = LA\tau/l^2$$

où L est la luminance lumineuse de la cavité rayonnante, A l'aire de l'ouverture de la lentille, τ le facteur de transmission lumineux de la lentille, et l la distance axiale de l'ouverture de la lentille au photomètre. En 1962, le Groupe de travail de l'étalon primaire photométrique suggéra qu'une correction devrait être faite à la loi de l'inverse du carré des distances, à cause des dimensions finies de l'ouverture de la lentille [2].

En conséquence, le Groupe de travail a établi qu'en raison de cet effet, les grandeurs de la candela déterminées par sept laboratoires nationaux devraient être corrigées d'un facteur allant de 0,08 % (pour le Conseil National de Recherches) à 0,44 % (pour le Conservatoire National des Arts et Métiers) [3].

Le but de ce rapport est de rechercher si ces corrections ont été évaluées correctement et de montrer que les erreurs sur (1) sont sans doute négligeables.

Un calcul rigoureux à partir d'une expression pour l'éclairement lumineux en un point quelconque de l'image d'une source rayonnant suivant la loi de Lambert est donné par Born et Wolf [4], par exemple. Leur résultat équivaut à

$$(2) \quad E = \pi L \tau \sin^2 \theta \cos^4 \phi,$$

où θ est la demi-ouverture angulaire de la lentille, vue de l'image, et ϕ l'angle formé par l'axe et le rayon principal passant par le point de l'image considéré.

Pour la plupart des laboratoires nationaux, il semble que les données publiées soient insuffisantes pour évaluer θ et l'angle ϕ_{\max} correspondant au rayon principal passant par le bord du récepteur photométrique. Cependant, pour le Conseil National de Recherches [5] $\theta \approx 0,0019$ rad et $\phi_{\max} \approx 0,0006$ rad, et pour le Conservatoire National des Arts et Métiers [6] $\theta \approx 0,0027$ rad et $\phi_{\max} \approx 0,0035$ rad. Il s'ensuit que pour ces deux laboratoires, chacune des approximations $\pi \sin^2 \theta \approx A/l^2$ et $\cos^4 \phi_{\max} \approx 1$ est correcte à moins de 0,01 % et qu'en conséquence l'expression (1) est en accord avec (2) avec une bonne approximation. Il paraît hautement probable que cette conclusion s'applique aussi aux autres laboratoires.

Les corrections proposées par le Groupe de travail semblent avoir été calculées à partir d'une formule suggérée en 1962 par Kartachevskaia et Tikhodéev [7], apparemment avec l'intention de faire une correction pour la non-uniformité de l'éclairement de la lentille. Cependant, ce manque d'uniformité a déjà été pris en considération dans le calcul de (2), et la formule donnée à la référence [7] n'est pas applicable au cas de l'étalon primaire photométrique.

géométrique et ne dispensent pas de la correction nécessaire pour la diffraction à l'ouverture de la lentille.

(Mai 1971)

BIBLIOGRAPHIE

1. WENSEL (H.T.), ROESER (W.F.), BARBROW (L.E.), CALDWELL (F.R.),
J. Res. Nat. Bur. Std., 6, 1931, p. 1103.
 2. Comité Consultatif de Photométrie, 5^e session, 1962, p. 21.
 3. Comité Consultatif de Photométrie, 6^e session, 1965, p. P17.
 4. BORN (M.), WOLF (E.), Principles of Optics, 3rd Ed., Oxford, Pergamon,
1965, p. 188.
 5. SANDERS (C.L.), JONES (O.C.), *J. Opt. Soc. Am.*, 52, 1962, p. 731.
 6. DEBURE (M.), LEROY (N.), *Rev. Opt.*, 31, 1952, p. 529.
 7. KARTACHEVSKAIA (V.E.), TIKHODEEV (P.M.), Comité Consultatif de
Photométrie, 5^e session, 1962, p. 29.
-

ANNEXE P 7

Problèmes posés par l'amélioration d'une installation de mesure de l'étalon primaire de lumière

Par V. E. KARTACHEVSKAIA et N. M. KOLOSSOVA

Institut de Métrologie D. I. Mendéléev (U.R.S.S.)

A sa 6^e session (1965) le Comité Consultatif de Photométrie avait recommandé de continuer l'étude des différentes erreurs liées à la réalisation de l'étalon primaire de lumière sous la forme d'un corps noir au point de congélation du platine. En conformité avec cette recommandation l'I.M.M. a procédé à des travaux tendant à améliorer la technique de certaines mesures nécessaires à la réalisation de l'étalon primaire ou au transfert ultérieur de la candela aux étalons secondaires.

MESURE DU FACTEUR DE TRANSMISSION DU PRISME ET DE LA LENTILLE ET MESURE DE SA VARIATION

On a déjà attiré l'attention sur l'importance fondamentale à la fois des conditions et des méthodes de mesure du facteur de transmission τ de l'optique utilisée avec l'étalon primaire, de l'état de l'optique elle-même et du problème de maintenir ce facteur de transmission stable et sans modification pendant qu'on mesure la luminance du corps noir. Le choix des conditions et des méthodes détermine non seulement les erreurs sur la valeur de τ qui peuvent être introduites dans la formule de calcul de l'étalon primaire, mais aussi rend nécessaire ou non des corrections complémentaires pour la diffraction, la loi

de l'inverse du carré des distances, la lumière diffusée dans l'optique, etc. Comme il est assez difficile de tenir compte de tous ces facteurs, Sanders avait proposé en 1966 une méthode pour éviter les mesures du facteur de transmission de l'optique (en égalisant les conditions de mesures de la luminance du corps noir et de l'intensité lumineuse des étalons secondaires).

A diverses époques on a utilisé à l'I.M.M. différentes méthodes de mesure du facteur de transmission de l'optique [1, 2].

Pour ce qui est d'éliminer les erreurs mentionnées plus haut, on peut vraisemblablement considérer comme meilleure méthode de celle qui consiste à mesurer l'éclairement lumineux d'une image optique reproduisant les conditions de mesure de l'étalon primaire.

Toutefois, comme il a été dit [1], il est très important de définir non seulement la valeur absolue de τ , mais aussi les changements qui peuvent survenir au cours d'une utilisation plus ou moins longue de l'optique ou qui peuvent être produits par la contamination qu'il est difficile d'éviter lorsqu'on fait fondre du platine.

L'expérience que nous avons ne permet pas de se fier à l'invariabilité de la valeur absolue de τ au cours de la conservation à plus ou moins long terme de l'optique, pas plus qu'à la reproductibilité complète après chaque nettoyage. Il est par suite nécessaire d'effectuer des mesures de τ indépendantes et assez fréquentes ainsi qu'un contrôle de ses changements en cours d'utilisation de l'optique dans les mesures de luminance de l'étalon primaire. Pour la réalisation technique du problème on ne doit pas perdre de vue que les mesures de luminance de l'étalon primaire sont très difficiles et que par conséquent il est particulièrement important que toutes les opérations auxiliaires soient exécutées de la façon la plus simple et la plus efficace.

On a étudié d'abord à l'I.M.M. [1] une installation permettant des mesures de τ et de ses variations d'après la méthode de l'éclairement lumineux de l'image optique, ces mesures étant effectuées pratiquement en même temps que les mesures de la luminance de l'étalon primaire. Toutefois, l'exécution de ces deux mesures en même temps s'avéra assez difficile à cause des modifications nécessaires. Par ailleurs, la détermination de τ exigeait de tenir compte des nombreuses réflexions entre les diverses parties de l'optique du corps noir de l'installation. En même temps on a effectué des mesures de $\Delta\tau$ avec

assez de succès, ce qui a permis d'introduire des corrections pour la contamination de l'optique du corps noir pendant la fusion du platine.

Comme on n'est pas arrivé à réaliser avec une précision et une commodité suffisantes l'idée originelle d'effectuer en même temps les mesures de τ et de $\Delta\tau$ au moyen d'une seule installation, on a par la suite divisé la tâche en deux parties : on a mis au point deux installations indépendantes utilisant une seule et même source auxiliaire de lumière.

On a considéré la proposition de Sanders mentionnée ci-dessus en choisissant la méthode de mesure. Il ne fait aucun doute qu'il est particulièrement tentant d'exclure entièrement la nécessité de déterminer la valeur de τ . Toutefois, il s'est avéré assez complexe de mettre en oeuvre la méthode tout en effectuant les deux mesures - celle de la luminance de l'étalon primaire et celle de l'intensité lumineuse d'étalons secondaires en alternance étroite. De plus les étalons secondaires de l'I.M.M ont des filaments de bien plus grandes dimensions que la lampe proposée Osram Wi 41 ($4 \times 7 \text{ cm}^2$ au lieu de $2,5 \times 2,5 \text{ cm}^2$), ce qui complique encore le problème. En outre nous n'avons pour le moment aucunement l'intention de remplacer nos étalons secondaires, déjà contrôlés pour leur stabilité à long terme.

Pour les mesures de τ nous avons choisi dans la nouvelle installation la seconde méthode de Sanders et Jones [3] car elle permet de déterminer la valeur nécessaire simplement par le rapport de deux courants photoélectriques, en éliminant tout autre mesure d'aire ou de distance. Dans ce cas les montages optiques sont assez proches des conditions de mesures du corps noir.

Le schéma optique de l'installation est donné à la figure 1 ; une partie de l'installation en position (a) est donnée à la figure 2.

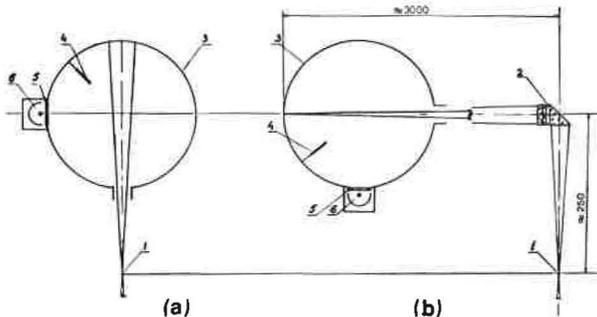


Fig. 1

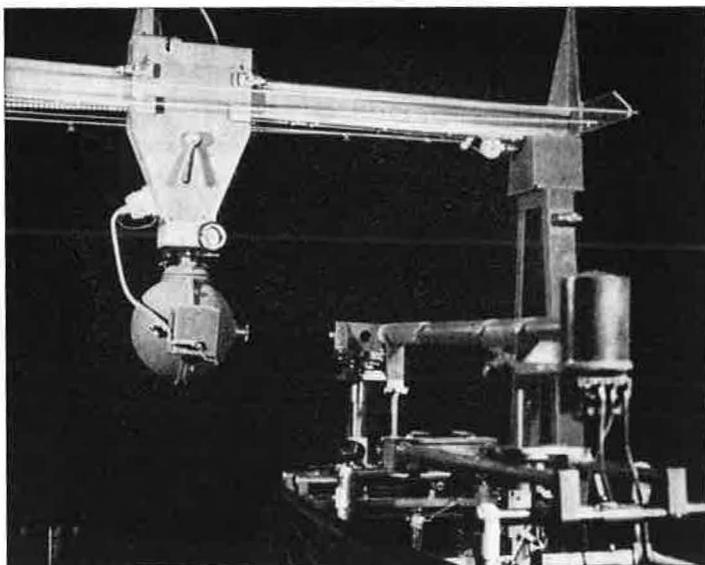


Fig. 2

On peut déplacer le long d'un rail et faire tourner autour d'un axe vertical (voir figure 1), une sphère d'Ulbricht de 20 cm de diamètre munie d'une cellule photoélectrique et d'un filtre $V(\lambda)$. L'axe du rail reste parallèle à celui d'un banc photométrique, bien qu'il soit déplacé en même temps dans le plan vertical et dans le plan horizontal. Le banc photométrique supporte un photomètre pour les mesures de la luminance du corps noir.

Les deux photomètres sont ainsi indépendants et en déplaçant l'optique (prisme et lentille) d'une installation à l'autre on peut effectuer rapidement l'une après l'autre les mesures de la luminance du corps noir et du facteur de transmission de l'optique.

Une lampe à ruban d'un type spécial sert de source auxiliaire de lumière ; le ruban de tungstène est fixé de façon coaxiale à l'intérieur d'un cylindre en molybdène muni d'une fenêtre de 4 x 3 mm. Grâce à cette fenêtre on n'utilise que la partie centrale du ruban de luminance uniforme. L'image de cette partie de ruban, réduite aux dimensions de l'ouverture du corps noir, se forme approximativement à la même distance de la face d'entrée du prisme que le radiateur lui-même.

La distance entre l'optique et le récepteur est d'environ 2,8 m dans le cas des mesures du facteur de transmission ;

elle est comprise entre 2,7 et 3,2 m au cours des mesures sur le corps noir.

La méthode comportant des mesures de deux courants photoélectriques presque égaux et ne nécessitant que la pleine utilisation d'un rayon lumineux dans les deux cas est assez simple en apparence. Toutefois elle n'exclut pas des sources d'erreurs systématiques, telles que la répartition non uniforme du faisceau lumineux sur la surface de la sphère d'Ulbricht, la non-uniformité de la peinture de la sphère, etc.

La déviation à la loi de l'inverse du carré des distances et l'influence de la diffraction ne sont pas non plus exclues dans ce cas.

On a fait des recherches expérimentales sur l'influence des facteurs suivants : diamètre du faisceau lumineux, son déplacement sur la surface de la sphère, température de couleur de la source de lumière, etc. On a effectué de nombreuses séries de ces mesures sur plusieurs jours et ceci a été répété plusieurs fois de 1967 à 1970. Les résultats sont les suivants.

Les mesures séparées de la valeur de τ dans les séries effectuées au cours d'une même journée sont reproductibles à $\pm 0,1$ % près. Des mesures périodiques à intervalles assez longs peuvent donner des écarts plus grands par rapport à la moyenne générale, jusqu'à 0,2 % et même 0,3 %. D'une certaine façon cela semble lié à la méthode de nettoyage, peu reproductible, des surfaces du prisme et de la lentille.

On n'a décelé aucune influence pratique du diamètre du faisceau lumineux dans la sphère quand ce diamètre passe de 10 à 20 mm, pas plus que du déplacement du faisceau dans les mêmes limites. Un nouvel accroissement du faisceau à l'intérieur de la sphère (cas de mesures sans optique) peut affecter les résultats dans un sens, et cette conclusion nous amène à envisager quelques changements à cette méthode de mesure.

La température de couleur de la source de lumière, lorsqu'on la modifie d'environ 300 à 400 K aux alentours de 2000 - 2400 K, n'affecte pas les résultats de façon notable.

La même lampe à ruban, comme on l'a dit plus haut, sert de source auxiliaire de lumière dans le montage pour la mesure de $\Delta\tau$ au cours des travaux avec l'étalon primaire.

La modification la plus récente de cette installation comprend deux parties indépendantes bien que liées dans leur fonctionnement : un support rotatif pour l'optique de l'étalon primaire et un montage auxiliaire pour contrôler la stabilité du faisceau lumineux.

Grâce au support rotatif il est possible de mesurer tour à tour (en passant rapidement d'une mesure à l'autre) la luminance soit de l'étalon primaire, soit de la source auxiliaire de lumière avec le faisceau de lumière traversant dans les deux cas l'optique de l'étalon primaire. Ces mesures permettent d'éprouver l'optique.

Le second montage, en envoyant le faisceau auxiliaire directement sur la cellule photoélectrique sans passer par l'optique de l'étalon primaire, offre la possibilité d'une troisième mesure en contrôlant la stabilité de ce faisceau lumineux.

Le schéma optique de toute l'installation est donné à la figure 3, et la vue générale à la figure 4. Le prisme (7), fixé sur un support spécial, peut tourner autour de l'axe horizontal, ce qui permet de faire à leur tour les mesures nécessaires avec l'étalon primaire et la lampe à ruban. Le prisme (2) et le miroir (5) du montage de contrôle doivent être enlevés de l'axe optique pendant ces mesures. En les remplaçant sur le faisceau, cela permet de contrôler la stabilité de l'ensemble du système : la lampe à ruban, l'optique (2-5) et le photomètre.

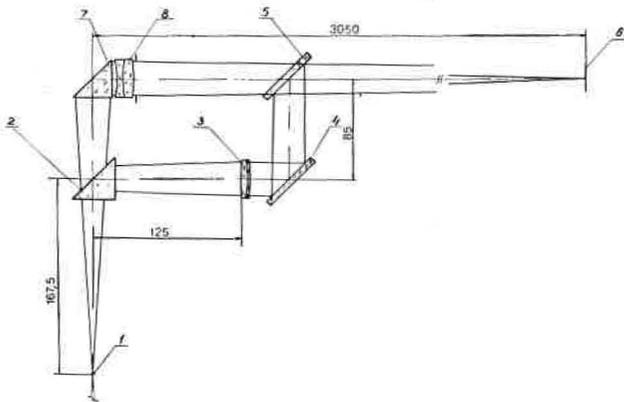


Fig. 3

Les courants photoélectriques pour toutes ces positions peuvent être écrits comme suit :

$$\alpha_1 = \frac{L_a s A_1 \tau_x}{d_1^2}, \quad \alpha_2 = \frac{L_s A_1 \tau'_x}{d_1^2}, \quad \alpha_3 = \frac{L_a s A_2 \tau_a}{d_2^2},$$

où L_a est la luminance de la lampe à ruban ; s la sensibilité du photomètre ; A_1 et A_2 les aires des diaphragmes au niveau des

lentilles (8) et (3) respectivement ; d_1 et d_2 les distances entre ces diaphragmes et le plan récepteur du photomètre ; τ_a le facteur de transmission du dispositif de contrôle. Les courants photoélectriques α_1 et α_3 sont tous les deux mesurés avant et après le palier de la courbe de congélation du corps noir, le courant photoélectrique α_2 étant mesuré pendant ce palier.

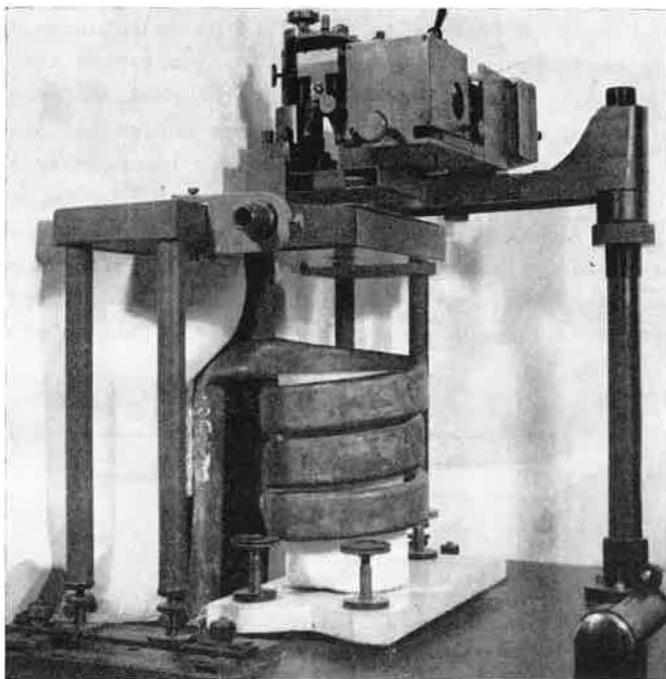


Fig. 4

Lorsqu'on compare α_1 (avant) et α'_1 (après) on suppose constant le produit $L_a.s$. A cette condition on peut déterminer le $\Delta\tau$ survenu au cours de la fusion. On s'assure à nouveau que le produit $L_a.s$ est constant en comparant les courants photoélectriques α_3 et α'_3 . La valeur de τ_a est considérée comme invariable au cours de la durée nécessaire pour toutes ces mesures. Cette dernière hypothèse semble assez raisonnable, au moins pour une durée d'un jour ou même de quelques heures (et à fortiori pour 0,5 - 1 heure, durée nécessaire à ces mesures), car l'optique (2-5) n'est soumise à aucune influence spéciale, comme par exemple à de l'air chaud, ce qui est le cas de l'optique (7-8).

Jusqu'ici tout l'appareillage a été vérifié dans des conditions artificielles pour de longs travaux continus mais pas avec l'étalon primaire. Les résultats obtenus permettent de penser que les erreurs de mesure ne sont pas supérieures à 0,1 %.

APPAREIL ROTATIF POUR LES COMPARAISONS D'ÉTALONS SECONDAIRES

L'exactitude du transfert de l'unité aux étalons secondaires, qui dépend en particulier de la stabilité de la sensibilité du photomètre, peut être accrue en rapprochant les comparaisons d'étalons secondaires et la mesure de la luminance de l'étalon primaire, et en augmentant le nombre des lampes qui participent à ces comparaisons.

Le fait de se servir inévitablement d'un seul et même photomètre empêche de passer rapidement d'une mesure à l'autre. Cela est d'autant plus difficile que, alors qu'on essaie d'obtenir le plus grand nombre de congélations par jour, on réduit inévitablement le temps entre deux congélations pendant lequel on effectue les comparaisons d'étalons secondaires.

Il est également nécessaire de considérer que toute interruption dans le rythme du chauffage et du refroidissement du radiateur intégral complique encore le travail et l'obtention de courbes convenables et fiables. Pour accélérer et faciliter le travail on a mis au point un dispositif rotatif grâce auquel trois lampes étalons, qui étaient auparavant conservées en position fixe, peuvent être mesurées chacune à leur tour de façon assez rapide. Le dispositif conçu ne possédant aucune particularité de principe apporte une solution technique très satisfaisante au problème.

La base du dispositif, qui a la forme d'un disque massif muni de bras, est fixé sur les tubes d'un banc photométrique (fig. 5). La partie mobile qui supporte trois douilles (à 120°) est montée sur l'axe vertical du disque. Ces douilles sont conçues pour permettre d'ajuster et de fixer avec précision les corps lumineux des lampes dans le plan perpendiculaire à l'axe du banc photométrique.

Le moment venu, chaque lampe est mise en position de travail au moyen d'un loquet au bas du disque ; dans cette position seulement, la lampe s'allume. Mais on peut aussi faire tourner et disposer les trois lampes de telle façon qu'aucune d'elles ne soit allumée. Le faisceau lumineux de l'étalon primaire peut alors atteindre librement le récepteur.

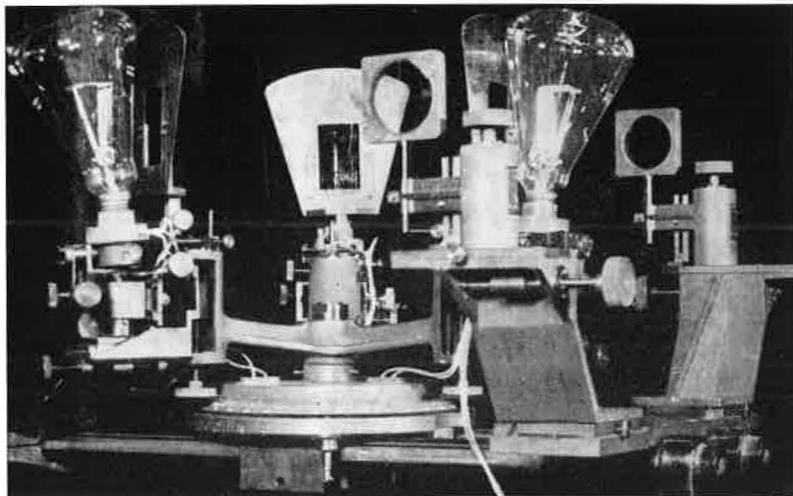


Fig. 5

PROBLÈME DES ERREURS DE DIFFRACTION

On a montré théoriquement [3] et vérifié expérimentalement [4] que la diffraction par les ouvertures circulaires des lentilles affecte de façon notable les résultats des mesures avec l'étalon primaire de lumière. Les erreurs sont de valeur différente dans les diverses installations de mesure à cause d'une part des paramètres de l'optique et d'autre part de la partie de l'image optique utilisée dans les mesures.

Comme les erreurs indiquées sont assez grandes (au total jusqu'à 0,2 - 0,3 %), le laboratoire de photométrie de l'I.M.M. a fait appel à des spécialistes travaillant dans ce domaine de façon à obtenir un autre examen du problème.

Selon certains résultats antérieurs les erreurs de diffraction semblaient être négligeables. Les récents calculs plus précis effectués par Parschin et Pokrovsky [5] ont toutefois confirmé l'effet, bien que d'une valeur quelque peu inférieure. Les résultats de ces calculs, étudiés par la suite à notre laboratoire, sont donnés à la figure 6.

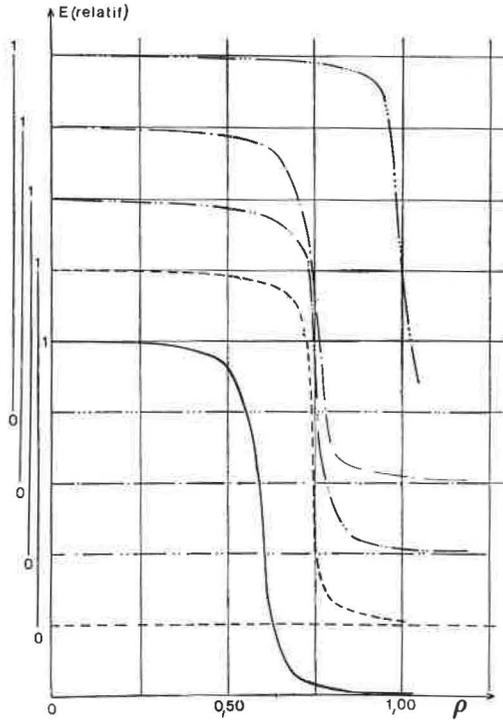


Fig. 6.- Répartition relative de l'éclairement dans le plan d'une image optique en fonction de $\rho = r/r_0$ (r_0 étant le rayon de l'image et r la distance au centre) pour les installations de différents laboratoires nationaux.

- E.T.L.
- - - I.M.M.
- . - . C.N.A.M.
- . . - N.R.C.
- P.T.B.

Le tableau I donne les erreurs possibles dues aux variations de l'éclairement au centre de l'image alors qu'on utilise une certaine partie de l'image pour les mesures.

Les erreurs totales estimées dans notre travail diffèrent assez considérablement de celles qui ont été indiquées antérieurement [3,4] . Il faudrait encore étudier le problème.

TABLEAU I

Erreurs de diffraction (en pour cent)

(Toutes les erreurs sont négatives)

		NRC	ETL	IMM	CNAM	PTB
Selon nos calculs	δ_1 (centre de l'image) ..	0,083	0,053	0,052	0,018	0,12
	δ_2 (répartition)	0,053	0,21	0,080	0,071	0,01
	$A = \delta_1 + \delta_2$	0,14	0,26	0,13	0,09	0,13
Selon Sanders	δ_1 (centre de l'image) ..	0,26	0,17	0,22	0,08	0,18
	δ_2 (répartition)	0,0	0,02	0,15	0,08	0,0
	$B = \delta_1 + \delta_2$	0,26	0,19	0,37	0,16	0,18
	$B - A$	+ 0,12	- 0,07	+ 0,24	+ 0,07	+ 0,05

BIBLIOGRAPHIE

1. KARTACHEVSKAIA (V.E.) et TIKHODÉEV (P.M.), Moyens pour augmenter la précision de l'étalon primaire de lumière (radiateur intégral), *Comité Consultatif de Photométrie*, 5^e session, 1962, p. 29.
2. TIKHODÉEV (P.M.), NESMACHNY (K.I.) et KARTACHEVSKAIA (V.E.), Détermination du facteur de transmission du prisme et de la lentille utilisés avec l'étalon primaire de lumière, *Tryd. Inst. Metr. D.I. Mendéléev*, 10(55), 1941, pp. 29-47 (en russe).
3. SANDERS (C.L.) and JONES (O.C.), The problem of realizing the primary standard of light, *J. Opt. Soc. Amer.*, 52, 1962, p. 731.
4. OOBA (N.), Experimental study of diffraction in the measurement of the primary standard of light, *J. Opt. Soc. Amer.*, 54, 1964, pp. 357-361.
5. PARCHIN (P.F.) et POKROVSKY (A.G.), Calcul de la répartition de la diffraction par un disque, *Optika i Spektroscopia*, XXIX, N° 6, 1970, pp. 1147-1149 (en russe). Traduction anglaise dans *Optics and Spectroscopy*, XXIX, N° 6, 1970, pp. 611-612.

Utilisation d'une lampe à corps noir comme étalon de température de couleur et de luminance

Par O. C. JONES et G. W. GORDON-SMITH

National Physical Laboratory (Royaume-Uni)

Abstract. - The Quinn-Barber blackbody lamp, which was designed for use in optical pyrometry, appears to be suitable for use as a standard of spectral power distribution covering the visible spectrum. In particular it may be used as a colour temperature or intensity standard with an accuracy comparable to that achieved by conventional cavity radiator techniques, although it is rather more convenient to use than conventional furnaces.

A preliminary experiment is reported here, showing that it is possible to establish the luminance temperature of the lamp to about ± 1 K at temperatures up to 2840 K. In order to use the lamp as a standard of power distribution it is necessary that its emissivity should be known. This difficulty is minimised by the relatively high emissivity of the cavity, as indicated by its low reflectance (although there may be other factors, such as thermal gradients which cause a noticeable reduction in the effective emissivity). In the present paper a value of unity is assumed for the spectral emissivity.

The other components of the system whose optical properties need to be known precisely are the lamp window and the lens which is used to convert the lamp from a radiance standard to an irradiance standard. These problems have been largely overcome and preliminary results are presented, comparing the calculated intensity and bilateral colour temperature of the lamp-lens system, with values measured relative to the NPL Photometric and Colour Temperature Scales, at four points.

Résumé. - La lampe à corps noir Quinn-Barber, qui a été conçue pour être utilisée en pyrométrie optique, semble pouvoir être utilisée comme étalon de répartition spectrale d'énergie dans tout le spectre visible. Elle peut en particulier être employée comme étalon de température de couleur ou d'intensité lumineuse avec une précision comparable à celle que permettent les méthodes fondées sur l'emploi d'une cavité rayonnante et elle est même plus commode à mettre en oeuvre que les fours classiques.

On décrit ici une expérience qui démontre la possibilité de mesurer la température de luminance de la lampe avec une précision d'environ ± 1 K à des températures atteignant jusqu'à 2840 K. Pour pouvoir utiliser la lampe à corps noir comme étalon de répartition d'énergie, il faut connaître son émissivité. Cette difficulté est rendue moins gênante par l'émissivité relativement élevée de la cavité, comme l'indique son faible facteur de réflexion (bien qu'il puisse y avoir d'autres facteurs tels que les gradients thermiques qui causent une réduction sensible de l'émissivité effective). Dans le présent exposé, l'émissivité spectrale est prise égale à l'unité.

Les autres composants du système dont les caractéristiques optiques doivent être connues avec précision sont la fenêtre de la lampe et l'objectif qui sert à convertir la lampe d'étalon de luminance énergétique en étalon d'éclairage énergétique. Les difficultés créées par la mesure de ces caractéristiques ont été grandement surmontées et les auteurs présentent les résultats préliminaires obtenus et comparent l'intensité lumineuse et la température de couleur calculées du système lampe-objectif aux valeurs mesurées en quatre points par rapport aux échelles photométrique et de température de couleur établies au National Physical Laboratory (N.P.L.).

I. INTRODUCTION

Le radiateur intégral est largement utilisé comme source de référence en photométrie et en spectroradiométrie car il possède deux qualités essentielles : une émissivité spectrale connue et une température connue ou reproductible ; la luminance énergétique spectrale de l'ouverture peut être déduite de ces caractéristiques. Les cavités en céramique ou en graphite sont souvent préférées en raison de leurs propriétés réfractaires et de la nature diffuse de leur réflectivité, ce qui permet d'utiliser les résultats des études théoriques déjà effectuées pour calculer l'émissivité des cavités de formes simples. Le graphite a l'avantage supplémentaire de posséder un facteur de réflexion faible et neutre, mais il ne peut être utilisé dans l'air aux températures élevées.

La conductivité thermique relativement basse de ces matériaux entraîne toutefois une incertitude de mesure due à la répartition non uniforme des températures à l'intérieur de la cavité quand on opère aux températures élevées [1]. Les auteurs du présent rapport ont étudié l'utilisation de cavités métalliques qui sont susceptibles de réduire les gradients thermiques, ou tout au moins de permettre de les mesurer avec plus de certitude. Nous avons commencé par essayer une cavité en platine-iridium fonctionnant dans l'air à l'intérieur d'un four à tube de céramique de type commercial avec chauffage par effet Joule. Bien que ce montage fût simple et très commode, ses inconvénients apparurent rapidement et nous conduisirent à essayer la lampe à corps noir de Quinn-Barber [2]. Dans cette lampe, c'est la cavité de tungstène elle-même qui est chauffée

par effet Joule ; aussi est-elle beaucoup plus facile à utiliser qu'un four. Nous ne décrivons ici que nos toutes premières expériences ; des mesures plus complètes sont en cours.

Les principaux inconvénients rencontrés au cours de l'utilisation du four en céramique sont les suivants :

1) L'étalonnage en température. Dans le domaine de température qui nous intéresse (2000 à 3000 K), la méthode de mesure de la température la plus sûre paraît être la pyrométrie optique [3], bien que les thermocouples puissent aussi être intéressants à l'extrémité inférieure de ce domaine [4]. Le four en céramique n'étant pas portatif, il fallait faire une mesure de transfert à l'aide d'une lampe de référence ou d'un pyromètre optique étalonné pour rapporter la température du four à celle du point de l'or. En revanche, la lampe Quinn-Barber peut être directement comparée au point de congélation de l'or si on le désire.

2) Le gradient de température dans le four de type commercial utilisé était de l'ordre de 15 K sur les 10 cm de longueur de la cavité rayonnante portée à 1800 K. Cette valeur était trop grande pour qu'on puisse la négliger. D'une part, il n'a pas été possible de la réduire par l'emploi d'écrans thermiques ; d'autre part, l'adjonction d'éléments chauffants à l'extrémité de la cavité aurait augmenté la complexité de fonctionnement. Nous avons essayé de faire des mesures précises de température à l'aide de thermocouples différentiels en platine-platine rhodié utilisés en liaison avec un thermocouple de référence. Les résultats ainsi obtenus n'étaient pas fiables à cause de l'instabilité des thermocouples. La lampe Quinn-Barber présente des gradients de température beaucoup plus grands que ceux du four, mais ils peuvent être mesurés avec un pyromètre optique placé à l'extérieur du tube.

3) La température de fonctionnement maximale du four était de 2000 K, ce qui réduisait fortement la luminance énergétique de la cavité en platine iridié dans le domaine bleu du spectre qui nous intéressait particulièrement, tandis que la lampe Quinn-Barber à atmosphère gazeuse peut être utilisée à 2850 K pendant de longues périodes.

Tous ces inconvénients nous ont fait vivement apprécier l'existence d'une version à atmosphère gazeuse de la lampe à corps noir, avec pour avantage immédiat une commodité d'emploi.

CARACTÉRISTIQUES DE LA LAMPE

La référence [2] donne la description complète de la lampe et de son fonctionnement. Avec un remplissage d'argon et des broches refroidies par circulation d'eau, il faut environ 57 A sous 11 V pour atteindre 2850 K. Nous avons pu acquérir une alimentation à courant continu stable à 10^{-6} . Les caractéristiques de la lampe ont été stabilisées par un vieillissement de 60 heures à 3000 K avant de commencer les mesures. Nous avons d'abord procédé à un étalonnage en température de luminance, puis nous avons fait brûler la lampe pendant un total de 20 heures à quatre températures données avant de refaire l'étalonnage.

Les résultats des deux étalonnages sont résumés au tableau I ; ils montrent que les caractéristiques de la lampe avaient légèrement varié. Nous avons en outre remarqué que le tube était légèrement courbé alors qu'il paraissait bien droit avant l'étalonnage. Le fabricant de la lampe nous a fait savoir que cette déformation était probablement due à des efforts excessifs exercés par les supports et que ce défaut ne devrait pas se produire avec les lampes fabriquées maintenant.

TABEAU I

Intensité du courant (A)	Température de luminance (EIPT 1968)		$\Delta(K)$
	Initiale(K)	Finale(K)	
56,518	2842,1	2843,7	+ 1,6
54,061	2764,4	2764,6	+ 0,2
44,670	2453,7	2452,2	- 1,4
40,950	2323,3	2321,2	- 1,9
32,906	2021,7	2021,2	- 0,5
31,288	1956,9	1956,9	0,0

Les caractéristiques de la lampe en fonctionnement nous ont parues très stables après une période de préallumage de 20 minutes. Chaque fois que nous changions de température de fonctionnement, nous coupions l'alimentation de la lampe et laissons cette dernière se refroidir.

MONTAGE EXPÉRIMENTAL ET MODE OPÉRATOIRE

Pour comparer le rayonnement émis par l'ouverture de 1 mm de diamètre de la lampe à corps noir au rayonnement émis par des lampes étalons d'intensité lumineuse ou de température de couleur, nous avons utilisé un objectif qui assure la conversion voulue luminance énergétique - éclairage énergétique. Le montage de la lampe à corps noir et de l'objectif est représenté à la figure 1. (a) représente le tube de tungstène contenant un tampon de fil fin de tungstène ; l'image de l'ouverture de 1 mm de diamètre en tantale (b) est formée sur le récepteur (P) par l'objectif (c). Les diaphragmes d_1 et d_2 servent à réduire la lumière parasite. L'aire du diaphragme d_3 est calculée pour réduire le cône de sortie à $f/11$, c'est-à-dire à la valeur utilisée lors de l'étalonnage en température de luminance. Le diaphragme d_4 devant le récepteur est placé à environ 1 m de l'objectif et ne laisse passer que les rayons centraux correspondant à la moitié du diamètre de l'image de la source afin d'éviter les erreurs dues à la diffraction [5]. Il convient de noter que si l'aire de la source lumineuse est petite, elle n'est pas plus petite que celle de l'étalon primaire de lumière actuel et que, de plus, la disposition horizontale du tube de tungstène supprime la nécessité d'un prisme. L'orientation du tube peut varier légèrement à chaque fois que la lampe est éteinte, puis rallumée ; il est donc nécessaire de vérifier l'alignement avant chaque mesure. Heureusement, il suffit pour cela d'examiner l'image obtenue.

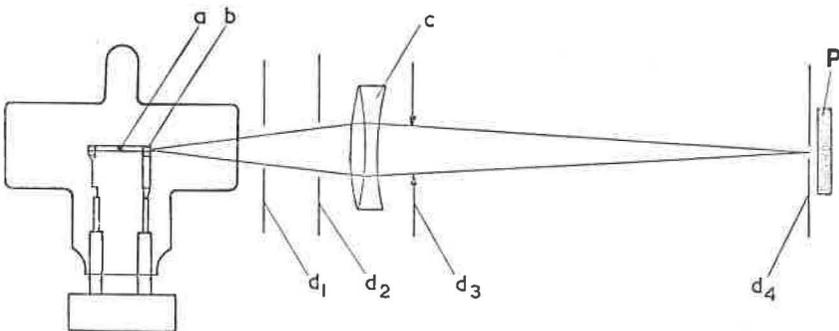


Fig. 1.- Lampe à corps noir : montage expérimental.

L'étude décrite n'étant qu'une étude préliminaire, nous n'avons employé qu'un nombre minimal de lampes, soit une lampe à corps noir, quatre étalons d'intensité lumineuse à chacune des trois températures 2045, 2356 et 2859 K, et six éta-

lons de température de couleur. Cela signifie que les résultats obtenus manquent de confirmation statistique et ne doivent pas être considérés comme définitifs. La comparaison aux étalons d'intensité lumineuse était considérée comme une mesure de l'intensité lumineuse de l'ensemble de la lampe à corps noir, objectif et ouverture compris. De même, la comparaison en température de couleur, qui impliquait l'emploi d'un monochromateur pour comparer le rapport des éclairagements énergétiques spectraux à 510 et 640 nm de la lampe à corps noir à celui d'une lampe étalon de température de couleur était considéré comme un étalonnage de l'ensemble de la lampe à corps noir.

Les résultats obtenus ont été comparés aux valeurs fournies par les calculs fondés sur l'étalonnage en température de luminance (effectué à 660 nm), sur les caractéristiques mesurées de la lampe et de l'objectif et sur l'hypothèse selon laquelle $K_m = 680 \text{ lm W}^{-1}$.

Il semble que des mesures plus rigoureuses justifieront l'inversion de cette méthode, de sorte que le système à lampe à corps noir deviendrait une source étalon fondée finalement sur la température du point de l'or. L'étalonnage en intensité lumineuse et en température de couleur (ainsi que l'étalonnage spectroradiométrique) d'autres sources pourraient alors être réalisés par comparaison de ces sources à la lampe à corps noir. Sous certains rapports, cette proposition ressemble à celle qui est mentionnée dans [6] et qui consiste à utiliser un four au point de l'or comme étalon photométrique.

Les caractéristiques de la lampe à corps noir qu'il faut connaître pour pouvoir calculer l'intensité du rayonnement qu'elle émet sont l'émissivité spectrale $\epsilon(\lambda)$ de la cavité, la température vraie T de la cavité, les facteurs de transmission spectraux $\tau(\lambda)$ de la fenêtre de la lampe et $\tau'(\lambda)$ de l'objectif, ainsi que l'aire A du diaphragme d_3 . Si la température est mesurée à l'aide d'un pyromètre optique sur la lampe seule (par exemple par mesure de la luminance énergétique spectrale à $\lambda = 660 \text{ nm}$ pour déterminer une température de luminance T_B), il faut connaître avec une grande précision le facteur de transmission spectral de la fenêtre à $\lambda = 660 \text{ nm}$ pour déduire T de T_B puisque :

$$\frac{1}{T} = \left[\frac{1}{T_B} + \frac{\lambda}{c_2} \log_e \tau(660) \right] K^{-1} .$$

Nous pouvons alors obtenir la luminance L de l'ensemble de la lampe à corps noir:

$$L = K_m \int_{380}^{770} \epsilon(\lambda) \tau(\lambda) \tau'(\lambda) J(\lambda, T) d\lambda \quad (\text{cd/m}^2),$$

où $J(\lambda, T)$ est la fonction de Planck, λ étant mesuré en nanomètres.

L'éclairement au centre de l'image à une distance de l mètres du diaphragme d_3 est alors simplement LA/l^2 (lux).

ÉMISSIVITÉ DE LA CAVITÉ

Le calcul très simplifié de l'émissivité de la cavité, fondé sur la formule de Gouffé [7] (strictement valable seulement si le facteur de réflexion de la paroi obéit à la loi de Lambert), en admettant un rapport de 1/160 entre l'aire de l'ouverture et celle de la surface de la cavité et en prenant le facteur de réflexion du tungstène poli, donne la valeur 0,997. Cette estimation est certainement optimiste pour une cavité en tungstène à paroi lisse mais, si elle est tant soit peu proche de la vérité, l'émissivité de la cavité peut être considérée comme pratiquement indépendante de la longueur d'onde étant donné la variation relativement petite de l'émissivité du tungstène dans le spectre visible.

Le facteur de réflexion à froid d'un certain nombre de tubes tels que celui de la lampe étudiée a été mesuré à l'aide d'un laser hélium-néon et d'une sphère d'Ulbricht [8], et il semble qu'on puisse admettre une valeur moyenne de 0,001 pour un tube neuf, tandis que pour un tube déjà utilisé on pourrait atteindre 0,003. Ces faibles valeurs sont dues au faible facteur de réflexion de la touffe de fils de tungstène qui forme le fond de la cavité. Elles donnent à penser que l'émissivité de la cavité à chaud doit se situer autour de 0,997 puisque la baisse de l'émissivité du tungstène due à la température est vraisemblablement d'environ 10 %.

Comme nous l'avons déjà mentionné, il est évident que la présence de gradients de température importants (voir figure 2) réduit la fiabilité de ces estimations de l'émissivité : le rayonnement émis par la lampe est probablement un mélange de 90 % de rayonnement dû aux fils de tungstène et obéissant presque à la loi de Planck à une certaine température, et de 10 % de rayonnement proche de celui de Planck, mais à une température différente, émis par la paroi latérale du tube. Nous croyons que ce mélange de rayonnements est si proche du rayonnement de Planck qu'on peut négliger toute différence avec la fonction théorique

$J(\lambda, T)$, tout au moins pour les besoins de la présente communication. Pour la même raison, nous négligerons les variations de l'émissivité de la cavité en fonction de la température.

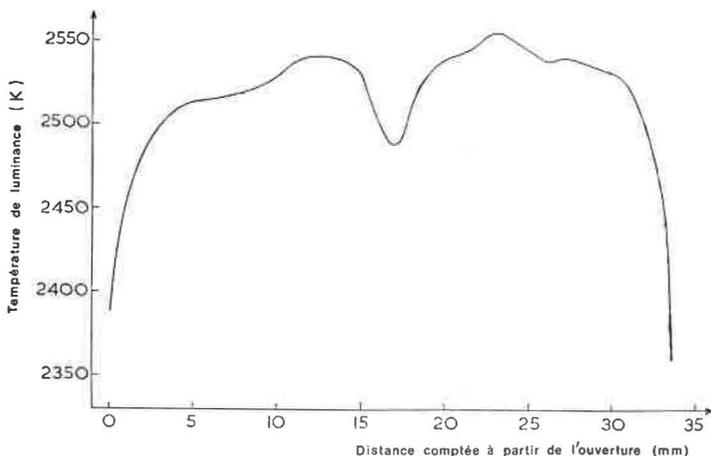


Fig. 2.- Répartition de la température mesurée le long d'une génératrice extérieure du tube de tungstène de la lampe à corps noir.

FACTEUR DE TRANSMISSION DE LA FENÊTRE DE LA LAMPE

S'il est aisé de mesurer le facteur de transmission spectral de l'objectif, tel qu'il est monté à la figure 1, avec une précision d'environ 0,1 %, il est beaucoup plus difficile de mesurer celui de la fenêtre de la lampe : c'est d'ailleurs probablement le point critique de toute l'expérience. La raison en est que la fenêtre se couvre progressivement d'un dépôt absorbant - vraisemblablement de tungstène - pendant la période de vieillissement. Ce dépôt s'oxydant très rapidement à l'air, son facteur de transmission varie fortement [9]. Cette particularité interdit d'appliquer la méthode la plus évidente pour mesurer la transmission de la fenêtre, méthode qui consiste tout simplement à enlever la fenêtre de la lampe après avoir fait les mesures. La lampe étant de forme symétrique, il a été suggéré [9] qu'on pourrait obtenir des résultats intéressants en mesurant le facteur de transmission des deux fenêtres en série, en gardant ainsi la lampe intacte, et en prenant la racine carrée de la valeur trouvée. Cette proposition suppose que le dépôt est identique sur les deux fenêtres, ce qui a été vérifié par la mesure du facteur de réflexion des deux fenêtres d'une autre lampe ; les valeurs trouvées ont été considérées comme suffisamment proches l'une de l'autre pour les besoins de la correction en cause.

La courbe obtenue pour le facteur de transmission spectral de la fenêtre avec dépôt non oxydé est représentée à la figure 3.

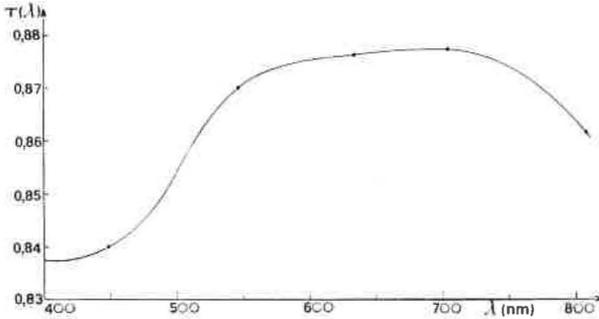


Fig. 3.- Facteur de transmission spectral de la fenêtre de la lampe à corps noir, après vieillissement de la lampe.

RÉSULTATS DES MESURES

Les résultats de la première série de mesures effectuées sur la lampe 100/10 à atmosphère gazeuse sont donnés au tableau II, ainsi que les valeurs calculées en posant $K_m = 680 \text{ lm W}^{-1}$, $\epsilon(\lambda) = 1,00$ et en utilisant les valeurs mesurées de $\tau(\lambda)$ et $\tau'(\lambda)$. Les valeurs de la température de luminance obtenues pour cette lampe sont fondées sur la réalisation au N.P.L. de l'E.I.P.T.-68.

TABLEAU II

*Résultats obtenus avec la lampe à corps noir 100/10
à atmosphère gazeuse*

Les valeurs calculées ont été obtenues en posant $\epsilon(\lambda) = 1$, sauf celles qui sont entre parenthèses, pour lesquelles $\epsilon(\lambda) = 0,99$.

Température de luminance (lampe seule) (K)	Luminance (cd/cm^2)		Température de couleur (K)	
	Mesurée	Calculée	Mesurée	Calculée
2021,4	47,25	47,61 (47,72)	2042,2	2033,3 (2036,4)
2322,2	232,4	235,1 (235,7)	2345,7	2337,9 (2342,1)
2453,0	412,6	418,0 (419,1)	2475,1	2470,5 (2475,2)
2764,5	1306,2	1328,5 (1332,2)	2788,1	2786,5 (2792,6)

N.B. Les températures de couleur et les luminances sont données pour l'ensemble formé par la lampe et l'objectif.

On remarquera particulièrement la bonne concordance qui existe entre les valeurs expérimentales et les valeurs théoriques de la luminance $L(T)$. Il convient de noter, pourvu que le facteur de transmission de la fenêtre de la lampe soit à peu près neutre, que l'erreur commise en attribuant une température à la cavité d'après la luminance énergétique spectrale à $\lambda = 660$ nm est partiellement compensée par une erreur similaire sur la luminance de la lampe (qui est étroitement liée à la luminance énergétique spectrale à la longueur d'onde de Crova $\lambda = 570$ nm). L'accord observé entre les valeurs mesurées et les valeurs calculées de la température de couleur à 2840 K confirme la conclusion [10] d'une étude précédente selon laquelle les échelles de température de luminance et de température de couleur du N.P.L. concordent à 10 K près, précision de l'étude précédente. La situation à 2045 K est moins encourageante étant donné les résultats de la récente comparaison du B.I.P.M. [11] qui fait apparaître une concordance à 2 K près entre les échelles de température de couleur de sept laboratoires nationaux, parmi lesquels figure le N.P.L. Ce fait peut être rapproché du désaccord entre les valeurs expérimentales de T_{pt} récemment rapporté par Quinn [12].

CONCLUSIONS

La lampe à corps noir de Quinn-Barber semble être un moyen intéressant pour réaliser un étalon de répartition spectrale d'énergie utilisable en photométrie et en spectroradiométrie. La base de référence de cet étalon est le point de l'or, mais on peut aussi l'employer en toute sécurité à des températures de couleur atteignant 2840 K.

La principale incertitude dans la méthode décrite provient de la nécessité de mesurer le facteur de transmission spectral de la fenêtre de la lampe. Cette difficulté n'est pas insurmontable. Par ailleurs, l'émissivité élevée de la cavité est due principalement aux caractéristiques du fond de cette dernière, de sorte que l'existence d'un gradient de température suivant l'axe longitudinal de la cavité n'a probablement pas trop d'importance.

Les résultats de cette première série de mesures font apparaître une concordance acceptable entre, d'une part, les mesures relatives aux échelles existantes d'intensité lumineuse et de température de couleur du N.P.L. et, d'autre part, les valeurs calculées d'après l'échelle de température de

luminance du N.P.L. et les caractéristiques connues de l'ensemble de la lampe à corps noir.

Cette étude fait partie du programme de recherches du National Physical Laboratory. Les auteurs remercient en particulier J. Andrews, du Centre de Métrologie, pour les étalonnages en température de luminance, ainsi que L. Mayger qui a participé à une grande partie des expériences.

(Septembre 1971)

BIBLIOGRAPHIE

1. SANDERS (C.L.), *Metrologia*, 3, 1967, p. 119-129.
 2. QUINN (T.J.) and BARBER (C.R.), *Metrologia*, 3, 1967, p. 19-23.
 3. QUINN (T.J.) and FORD (M.C.), *Proc. Roy. Soc.*, A-312, 1969, p. 31-50.
 4. BEDFORD (R.E.), *Rev. Sci. Instr.*, 36, 1965, p. 1571-1580.
 5. SANDERS (C.L.) and JONES (O.C.), *J. Opt. Soc. Amer.* 52, 1962, p. 731-746.
 6. JONES (O.C.) and SANDERS (C.L.), *Comité Consultatif de Photométrie*, 5^e session, 1962, p. 37-42.
 7. GOUFFÉ (A.), *Rev. Opt.*, 24, 1945, p. 1-10.
 8. JONES (O.C.) and FORNO (C.), (à paraître).
 9. FORNO (C.) and JONES (O.C.), *J. Opt. Soc. Amer.*, 61, 1971, p. 416-418.
 10. JONES (O.C.) and GORDON-SMITH (G.W.), N.P.L. Divisional Report Optical Metrology, 1970, p. 10.
 11. BONHOURS (J.), *Comité Consultatif de Photométrie*, 6^e session, 1965, p. P 47 - P 65.
 12. QUINN (T.J.), *Metrologia*, 7, 1971, p. 132-133.
-

ANNEXE P 9

Détermination du point de congélation du platine avec le pyromètre photoélectrique du N.P.L.*

Par T. J. QUINN et T. R. D. CHANDLER
National Physical Laboratory (Royaume-Uni)

Résumé

On a déterminé le point de congélation du platine en se servant du pyromètre photoélectrique du N.P.L. pour mesurer la température de la cavité d'un corps noir immergé dans un lingot de platine d'environ 400 g. On a pris des précautions spéciales pour éviter la contamination du platine en utilisant un creuset en alumine de grande pureté maintenu dans une atmosphère oxydante. On a obtenu de bonnes conditions d'uniformité de température dans le lingot en utilisant un four chauffé par résistance, dont les extrémités étaient équipées d'un chauffage auxiliaire. On a montré que l'assimilation de la cavité à un corps noir était satisfaisante en doublant le diamètre de l'ouverture en cours de fonctionnement sans occasionner de changement significatif dans la température apparente de la cavité. Les mesures ont donné pour le point de congélation du platine la valeur $1767,6 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0,3 \text{ }^\circ\text{C}$ (EIP-68).

* A paraître en anglais dans *Temperature, its measurement and control in science and industry*, 5th Symposium, Washington, juin 1971 ; voir aussi *Metrologia*, 7, 1971, p. 132.

Radiomètre absolu pour maintenir la candela

Par W. J. BROWN et W. R. BLEVIN

National Standards Laboratory (Australie)

Abstract.— Radiometric measurements of luminous intensity are described in which the radiant flux measurements have been made directly with an absolute radiometer. The value of K_m has been taken to be 673.1 lm W^{-1} , as calculated from the IPTS-68 value of 2045 K for the platinum point. The magnitude of the candela so derived appears to be 1.3 % greater than the 1952 mean international candela at 2357 K, but it is not obvious which of these units is in the better agreement with the fundamental definition of the candela.

I. INTRODUCTION

Dans le passé, le National Standards Laboratory a fondé ses mesures photométriques sur des lampes étalonnées à l'extérieur mais il prévoit, à l'heure actuelle, d'établir l'unité d'intensité lumineuse, la candela, par ses propres moyens. Cet article décrit les recherches effectuées au début de l'année 1971 pour voir dans quelle mesure on peut établir la candela à partir de mesures absolues de flux énergétique au lieu de la technique conventionnelle du radiateur intégral au point de congélation du platine. Les mesures de flux énergétique ont été faites directement avec un radiomètre absolu, alors que dans les expériences précédentes de ce type [1,2,3], d'autres récepteurs avaient été utilisés comme instruments de transfert.

La méthode radiométrique pour mesurer l'intensité lumineuse d'une source de lumière a été décrite en détail par Preston [2]. Un récepteur non sélectif, de réponse connue, est utilisé pour mesurer l'éclairement énergétique E à une distance d de la source ; entre le récepteur et la source on interpose un filtre vert dont la courbe de transmission spectrale $\tau(\lambda)$ simule la fonction $V(\lambda)$ acceptée internationalement pour l'efficacité lumineuse relative spectrale d'un rayonnement monochromatique. L'intensité lumineuse I_v de la source peut être alors calculée à partir de l'équation :

$$(1) \quad I_v = EK_m (d-\Delta)^2 \frac{\int_0^\infty S(\lambda)V(\lambda)d\lambda}{\int_0^\infty S(\lambda)\tau(\lambda)d\lambda} ,$$

où K_m est l'efficacité lumineuse spectrale maximale d'un rayonnement monochromatique (en lm W⁻¹), Δ est une petite correction apportée à d , correction dont la valeur dépend de l'épaisseur et de l'indice de réfraction du filtre, et $S(\lambda)$ est la répartition spectrale relative d'énergie de la source.

II. ÉTUDE EFFECTUÉE

Comme source, nous avons utilisé des lampes à filament de tungstène Osram Wi41/G, alimentées par l'intensité de courant à des valeurs correspondant à une température de couleur proximale de 2856 K (source normalisée CIE A). Deux types de filtres ont été utilisés pour simuler $V(\lambda)$. Le premier est un filtre liquide d'une réalisation semblable à celle de Preston [2] et qui fournit $V(\lambda)$ avec une précision raisonnable. Le deuxième est un filtre de verre [4] qui représente $V(\lambda)$ avec moins de précision mais qui a été réalisé de façon que la valeur de I_v donnée par (1) ne soit pas trop fortement affectée par les incertitudes inévitables de $S(\lambda)$. L'éclairement énergétique E à une distance de 1 m a été mesurée avec l'un des radiomètres absolus recouverts de noir d'or et utilisés au cours de la récente détermination de la constante de Stefan-Boltzmann [5]. Ce radiomètre comprend essentiellement un radiomètre à disque du type Gillham [6], monté avec un miroir hémisphérique qui réduit considérablement les pertes de flux dues au facteur de

réflexion et à la résistance thermique non nuls du revêtement noir du récepteur. Dans le cas présent, le miroir a été alu- d'absorption effectif du récepteur de 0,990 à 0,9990.

Comme les éclairagements énergétiques à mesurer sont faibles, environ $0,22 \text{ W m}^{-2}$ avec le filtre liquide et $0,34 \text{ W m}^{-2}$ avec le filtre en verre, des précautions spéciales sont nécessaires. Pour éviter les instabilités causées par des fluctuations de la pression atmosphérique, le radiomètre a été utilisé dans une enceinte hermétiquement scellée, le filtre $V(\lambda)$ formant fenêtre. Bien que le laboratoire soit maintenu à une température constante à mieux que $\pm 1 \text{ K}$, il a été nécessaire de prévoir un bon isolement thermique, à la fois pour l'enceinte et pour l'amplificateur galvanométrique utilisé pour mesurer la réponse du radiomètre, et d'éviter toute variation de la dissipation de chaleur dans le laboratoire pendant une série de mesures.

Trois lampes d'essai ont été utilisées comme source, chacune servant deux fois avec le filtre liquide et deux fois avec le filtre en verre. Pour calculer I_v à partir de (1), on a pris $K_m = 673,1 \text{ lm W}^{-1}$, ce qui est la valeur calculée d'après la définition de la candela et de la loi de Planck, en adoptant les valeurs données dans l'Échelle Internationale Pratique de Température de 1968 [7] pour le point de congélation du platine et pour la constante de rayonnement c_2 , et la valeur $3,74150 \times 10^{-16} \text{ W m}^2$ pour c_1 . Les courbes de transmission des filtres ont été mesurées avec un spectrophotomètre, et la répartition $g(\lambda)$ a été déduite de la température de couleur proximale des lampes, en tenant compte des écarts entre les rayonnements du tungstène et du corps noir et de la légère sélectivité des ampoules des lampes. Le tableau I donne les quatre valeurs de I_v obtenues pour chacune des lampes.

Enfin, l'intensité lumineuse de chaque lampe a été mesurée en fonction de la valeur moyenne de la candela qui résulte de la comparaison des unités nationales à la température de couleur proximale de 2357 K effectué au Bureau International des Poids et Mesures en 1952. Ceci a été fait en utilisant un photomètre photoélectrique de précision pour comparer entre elles les lampes d'essai et six lampes à vide étalonnées par le B.I.P.M. en 1953 en fonction de la candela moyenne 1952, de petites corrections étant appliquées pour tenir compte des écarts mesurés entre $V(\lambda)$ et la courbe de réponse spectrale du photomètre. Le tableau I donne également ces résultats.

TABLEAU I

*Intensités lumineuses de trois lampes à filament de tungstène
fonctionnant à la température de couleur proximale de 2856 K*

(Les valeurs obtenues par radiométrie avec $K_m = 673,1 \text{ lm W}^{-1}$ sont comparées à celles obtenues par photométrie photoélectrique en fonction de la "candela moyenne 1952" à 2357 K)

	Intensité lumineuse (cd)			
	Lampe 1	Lampe 2	Lampe 3	Moyenne
Méthode radiométrique :				
Filtre $V(\lambda)$ liquide	{ 272,5 272,4	{ 275,2 275,1	{ 265,5 265,3	{ 271,0
Filtre $V(\lambda)$ en verre	{ 272,8 273,0	{ 275,4 275,8	{ 266,6 266,3	{ 271,6
Méthode photoélectrique				
("candela moyenne 1952")	276,8	279,2	269,0	275,0

III. DISCUSSION DES RÉSULTATS

Bien que les lampes d'essai aient été moins stables qu'on ne l'aurait souhaité et qu'elles aient montré certaines fluctuations dans leurs caractéristiques électriques, les deux valeurs d'intensité lumineuse obtenues par radiométrie pour chaque combinaison lampe-filtre $V(\lambda)$ sont généralement en bon accord à mieux que 0,1 %. Cependant, il y a une différence moyenne d'environ 0,2 % entre les valeurs d'intensité lumineuse obtenues avec le filtre liquide et celles obtenues avec le filtre en verre. La grandeur moyenne de la candela déduite de l'ensemble des mesures radiométriques apparaît comme étant supérieure de 1,3 % à celle de la "candela moyenne 1952".

La précision de la méthode radiométrique dépend principalement de la grandeur des erreurs systématiques 1° dans la mesure de l'éclairement énergétique E , 2° dans l'évaluation du rapport des intégrales de (1), et 3° dans la valeur utilisée pour K_m . Dans nos mesures, les incertitudes au niveau de confiance de 99 % sont estimées à environ 0,2 % sur E , 0,4 % sur le rapport des intégrales, et par conséquent à 0,5 % sur la détermination du rapport I_v/K_m . Les filtres $V(\lambda)$ utilisés dans cette étude ont été d'une qualité optique inférieure à ce qui est souhaitable et les valeurs des transmissions mesurées sont en conséquence moins sûres ; nous anticipons en

disant qu'en accordant ultérieurement plus d'attention à cet aspect, on devrait diminuer de moitié l'incertitude sur le rapport des intégrales et par suite ramener l'incertitude de I_v/K_m à environ 0,3 %.

L'imprécision sur la valeur calculée de $673,1 \text{ lm W}^{-1}$ pour K_m est principalement due à l'incertitude sur la valeur de la température thermodynamique du point de congélation du platine. Nos mesures suggèrent que la "candela moyenne 1952" est plus en accord avec une valeur de 682 lm W^{-1} , de même que les mesures de Preston [2] et Gillham [3] ont montré qu'une valeur d'environ 686 lm W^{-1} donnerait un meilleur accord entre les échelles d'intensité lumineuse et de flux énergétique en usage au National Physical Laboratory (Grande-Bretagne). Mais les grandeurs établies pour les unités de lumière à partir de l'étalon primaire traditionnel sont reconnues comme étant trop basses [8], peut-être de près de 1 %, et ceci amènerait les valeurs expérimentales de K_m à être corrélativement trop hautes. Il n'est donc pas évident que les mesures radiométriques d'intensité lumineuse fondées sur une valeur de K_m calculée à partir du point de congélation du platine pris égal à 2045 K conduisent, pour la définition fondamentale de la candela, à un meilleur accord que les mesures photométriques fondées sur un procédé photométrique ancien.

IV. CONCLUSION

Cette étude a montré que, si l'incertitude sur la valeur de K_m était supprimée, la candela pourrait être réalisée par radiométrie absolue avec une précision probable de 0,3 %. Par opposition avec l'étalon primaire actuel, les mesures nécessaires sont faciles à répéter avec une précision d'environ 0,1 %, et en conséquence les lampes étalons pourraient être vérifiées fondamentalement avec un radiomètre absolu à intervalles réguliers, disons annuellement. La méthode radiométrique est mieux adaptée aux lampes à températures et intensités lumineuses plus élevées, évitant ainsi les difficultés de l'étape intermédiaire des lampes à vide, à basse température ; elle a en outre l'avantage d'être plus apte à la recherche et à la correction des erreurs systématiques. Pour ces raisons, nous entreprenons maintenant un programme plus détaillé en vue d'établir les unités photométriques du National Standards Laboratory sur la radiométrie absolue.

Le N.S.L. n'a pas encore pris de décision finale sur la

valeur à adopter pour K_m . Nous aimerions voir remplacer rapidement la définition actuelle de la candela par un accord international sur une valeur de K_m . En attendant, il y a tout lieu d'adopter la valeur calculée qui est en accord avec l'EIPT-68, bien que le rattachement actuel du point de congélation du platine au point de congélation de l'or soit basé sur de très anciennes mesures. C'est pourquoi nous sollicitons l'assistance du Comité Consultatif de Thermométrie pour 1° encourager de nouvelles mesures de la température thermodynamique du point de congélation du platine et 2° estimer l'incertitude de la meilleure valeur actuelle (2045 K).

Les auteurs remercient K.A. Wright et F.J. Wilkinson pour leur assistance dans les mesures.

(Mai 1971)

BIBLIOGRAPHIE

1. KARTACHEVSKAIA (V.E.), *Comité Consultatif de Photométrie*, 5^e session, 1962, p. 55.
2. PRESTON (J.S.), *Proc. Roy. Soc.*, A-272, 1963, p. 133.
3. GILLHAM (E.J.), *Proc. Roy. Soc.*, A-278, 1964, p. 137.
4. SHAW (J.E.), BLEVIN (W.R.), *Comité Consultatif de Photométrie*, ce volume, Annexe P 11.
5. BLEVIN (W.R.), BROWN (W.J.), *Metrologia*, 7, 1971, p. 15.
6. GILLHAM (E.J.), *Proc. Roy. Soc.*, A-269, 1962, p. 249.
7. *Comité Consultatif de Thermométrie*, 8^e session, 1967, p. A1.
8. *Comité Consultatif de Photométrie*, 6^e session, 1965, p. P17.

**Filtre $V(\lambda)$ en verre
pour réaliser la candela par radiométrie**

Par J. E. SHAW et W. R. BLEVIN
National Standards Laboratory (Australie)

Abstract. - A description is given of a three-component glass filter that simulates $V(\lambda)$ for the specific application of measuring by radiometry the luminous intensity of a tungsten filament lamp at the correlated colour temperature 2856 K.

Dans la méthode radiométrique [1] pour réaliser l'unité d'intensité lumineuse, la candela, un détecteur non sélectif est utilisé avec un filtre vert dont la courbe de transmission spectrale $\tau(\lambda)$ fournit la fonction $V(\lambda)$ admise internationalement pour l'efficacité lumineuse relative spectrale d'un rayonnement monochromatique. Le filtre doit satisfaire deux conditions. Tout d'abord, son pic de transmission spectrale τ_{\max} doit être raisonnablement élevé pour obtenir une énergie suffisante. Ensuite, l'accord avec $V(\lambda)$ doit être suffisamment bon pour que les erreurs dans la répartition spectrale relative d'énergie $S(\lambda)$ de la source lumineuse en cours d'étalonnage aient peu d'effet sur la valeur du rapport

$$(1) \quad R = \frac{\int_0^{\infty} S(\lambda)V(\lambda)d\lambda}{\int_0^{\infty} S(\lambda)\tau(\lambda)d\lambda} \cdot$$

Il est d'usage de prendre comme source une lampe à filament de tungstène réglée à la température de couleur proximale de 2856 K, et la principale erreur sur $S(\lambda)$ provient des erreurs possibles dans la détermination de la température. Les erreurs sur $S(\lambda)$ n'ont pas de conséquence si $\tau(\lambda)$ correspond parfaitement à $V(\lambda)$, car il découle alors de (1) que $R = 1/\tau_{\max}$ quelle que soit la répartition d'énergie.

Au cours d'essais de réalisation de filtres absorbants qui correspondent de très près à $V(\lambda)$ pour toutes les longueurs d'onde, Preston [2] et d'autres chercheurs ont trouvé nécessaire d'utiliser des composants liquides. Cependant, au Groupe de travail de la radiométrie [3] on a mis l'accent sur les avantages considérables qu'auraient les filtres entièrement en verre.

Wright *et al* [4] ont montré que l'ajustement à toutes les longueurs d'onde n'est pas nécessairement le meilleur critère pour réaliser des filtres $V(\lambda)$ réservés à des applications spécifiques, ce qui nous a conduits à étudier un filtre entièrement en verre par une nouvelle voie d'approche. Nous avons travaillé sur ordinateur pour réaliser un filtre composé de trois éléments, les critères d'acceptabilité étant que $\tau_{\max} > 0,5$ et que la valeur de R soit insensible aux petits écarts de température de la source autour de 2856 K. Le tableau I donne les caractéristiques d'un tel filtre et la figure 1 compare à $V(\lambda)$ la courbe de transmission spectrale d'un filtre ainsi réalisé et celle du filtre liquide de Preston. Pour chacun de ces filtres, même une grossière erreur de 50 K dans la température de la source n'affecte pas la valeur de R de plus de 0,1 %. Le filtre en verre laisse passer 60 % de flux énergétique de plus que le filtre liquide, grâce à son pic de transmission plus élevé et à sa bande de transmission plus large.

TABLEAU I

Caractéristiques d'un filtre en verre à trois éléments

Type de verre	Epaisseur (mm)
Corning 9788	1,1
Chance-Pilkington HA3	6,4
Schott GG10	1,5

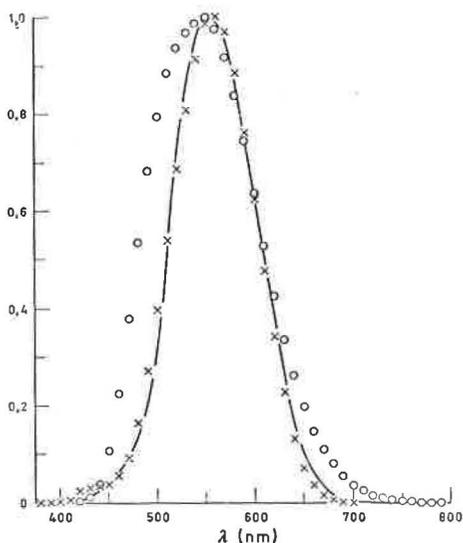


Fig. 1.- Courbes de transmission spectrale du filtre en verre indiqué au tableau I et du filtre liquide de Preston[2], comparées à la courbe $V(\lambda)$.

—————	$V(\lambda)$
oooooooo	Filtre en verre, $\tau_{\max} = 0,691$
xxxxxxxx	Filtre liquide, $\tau_{\max} = 0,556$

Dans le programme d'ordinateur nous avons utilisé la répartition d'énergie de Planck pour $S(\lambda)$, mais en pratique la répartition peut être significativement différente par suite des propriétés émissives des filaments de tungstène et de la sélectivité spectrale de l'ampoule de la lampe et des dépôts sur l'ampoule. Pour les rubans et les filaments droits, il est plus approprié d'utiliser pour $S(\lambda)$ les valeurs obtenues par de Vos [5] pour la répartition du rayonnement du tungstène ; le calcul a montré que les valeurs alors obtenues pour R diffèrent de celles de la répartition de Planck d'environ 0,10 % avec le filtre en verre, mais seulement de 0,01 % avec le filtre liquide. Les différences pour les filaments spiralés devraient être plus petites mais sont difficiles à estimer sans mesures détaillées de la répartition spectrale d'énergie. Les corrections pour la sélectivité de l'ampoule devraient reposer sur des mesures spectrophotométriques ; ainsi, pour une lampe Osram Wi 41/G vieillie, on a trouvé que ces corrections étaient de 0,05 % avec le filtre en verre et de 0,01 % avec le filtre liquide.

Le filtre en verre a le défaut commun à d'autres filtres $V(\lambda)$ [2], celui d'avoir une faible bande de transmission

dans l'infrarouge, au-delà de la longueur d'onde 1,4 μm . Cependant, 0,1 % seulement du flux total transmis se trouve dans cette bande et ceci peut être corrigé très précisément soit par expérimentation, soit par le calcul.

On insiste sur le fait que ce filtre en verre ne convient pas à d'autres types de sources lumineuses.

(Mai 1971)

BIBLIOGRAPHIE

1. BROWN (W.J.), BLEVIN (W.R.), *Comité Consultatif de Photométrie*, ce volume, Annexe P 10.
2. PRESTON (J.S.), *Proc. Roy. Soc.*, A-272, 1963, p. 133.
3. *Comité Consultatif de Photométrie*, ce volume, Annexe P 3.
4. WRIGHT (H.), SANDERS (C.L.), GIGNAC (D.), *Appl. Opt.*, 8, 1969, p. 2449.
5. DE VOS (J.C.), *Physica*, 20, 1954, p. 690.

ADDENDUM

Les filtres réalisés avec les caractéristiques indiquées au tableau I se sont malheureusement révélés de qualité optique inférieure à celle désirée, par suite des inhomogénéités optiques des échantillons de verre Corning 9788 dont nous avons pu disposer. En conséquence, on a conçu le nouveau filtre composé de quatre éléments spécifié au tableau II (fig. 2). Ce filtre est même moins sujet que le filtre original aux erreurs résultant des incertitudes sur $S(\lambda)$, mais il laisse passer environ 30 % de flux énergétique en moins. L'épaisseur du verre Schott GG10 est très critique et sa valeur optimale dépend probablement de la coulée particulière utilisée.

TABLEAU II

Caractéristiques d'un filtre en verre à quatre éléments

Type de verre	Epaisseur (mm)
Schott BG38	2,00
Schott GG10	1,32
Chance-Pilkington OY11	3,60
Chance-Pilkington HA3	8,40

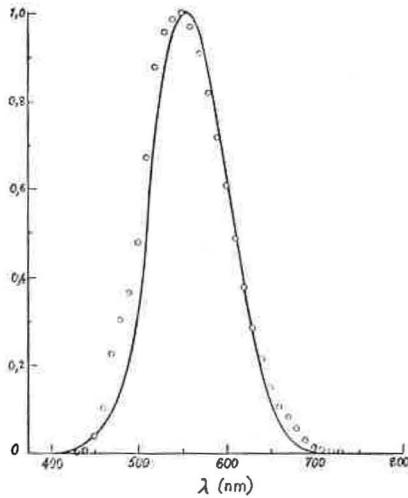


Fig. 2.- Courbe de transmission spectrale du filtre en verre indiqué au tableau II, comparée à la courbe $V(\lambda)$.

————— $V(\lambda)$
oooooo Filtre en verre, $\tau_{\max} = 0,600$

(Août-Septembre 1971)

**Rapport
sur la cinquième comparaison
des étalons nationaux d'intensité et de flux lumineux
(1969)**

Par J. BONHOURE

Bureau International des Poids et Mesures

La cinquième comparaison des étalons nationaux d'intensité et de flux lumineux a été effectuée au Bureau International de juillet 1968 à mai 1969. Elle comprenait exclusivement des étalons d'intensité lumineuse réglés en température de couleur à 2045 K et 2859 K, et des étalons de flux lumineux réglés à 2793 K.

Les huit laboratoires nationaux suivants participaient à la comparaison :

Physikalisch-Technische Bundesanstalt	(PTB)	Allemagne
Deutsches Amt für Messwesen und Warenprüfung	(DAMW)	Allemagne
National Bureau of Standards	(NBS)	Amérique (Etats-Unis d')
Conseil National de Recherches	(NRC)	Canada
Conservatoire National des Arts et Métiers	(CNAM)	France
Electrotechnical Laboratory	(ETL)	Japon
National Physical Laboratory	(NPL)	Royaume-Uni
Institut de Métrologie D.I. Mendéléév	(IMM)	U.R.S.S.

Ces laboratoires se conformaient à la Recommandation P 4 adoptée par le Comité Consultatif de Photométrie en 1965, à savoir :

"Après avoir pris connaissance des résultats de l'enquête menée par le Bureau International sur les conditions d'exécution de la prochaine comparaison internationale des étalons d'intensité et de flux lumineux, le Comité Consultatif de Photométrie recommande :

"a) qu'une comparaison d'étalons d'intensité à 2042 °K ait lieu, chaque laboratoire national envoyant au B.I.P.M. huit lampes du type Toshiba, l'alimentation étant contrôlée par la différence de potentiel mesurée sur la douille adaptée à ces lampes (préallumage des lampes : 15 minutes) ;

"b) que la comparaison des étalons d'intensité à 2854 °K se fasse dans les mêmes conditions, les lampes étant du type Osram Wi 41, l'alimentation étant contrôlée par l'intensité du courant (préallumage des lampes : 12 minutes) ;

"c) que la comparaison des étalons de flux lumineux à 2788 °K ne comporte que des lampes à ampoule claire (huit) du type G.E.C., l'alimentation étant contrôlée par la différence de potentiel (préallumage des lampes : 7 minutes)."

I. EXÉCUTION ET ORGANISATION DES COMPARAISONS

Toutes les mesures au Bureau International ont été faites photoélectriquement en respectant scrupuleusement les spécifications rappelées ci-dessus concernant le fonctionnement des lampes. La température ambiante durant les mesures était de 20 à 21 °C et l'état hygrométrique voisin de 50 %. Les lampes ont été nettoyées à l'alcool au début des comparaisons et étaient essuyées avec une peau de chamois au début de chaque mesure.

a) *Intensité lumineuse.*— Les étalons d'intensité ont été comparés au moyen de deux photomètres à réponse linéaire, comprenant une cellule à vide à cathode sensibilisée soit par une couche de Cs-Bi, soit par une couche de Cs-Sb. Des filtres correcteurs et un verre diffusant étaient interposés devant chaque photomètre.

La distance "lampe-verre diffusant" était de 1,3 m pour les étalons à 2045 K ; pour les étalons à 2859 K, cette distance était de 1,5 m avec le photomètre Cs-Bi et de 2,4 m avec le photomètre Cs-Sb.

b) *Flux lumineux.*— Les étalons de flux ont été comparés dans une sphère lumenmètre de 1,5 m de diamètre, sans fenêtre diffusante, avec un revêtement intérieur blanc diffusant réalisé en 1967 et conforme aux prescriptions antérieures (*Procès-Verbaux C.I.P.M.*, 25, 1956, p. 32 et 26-B, 1958, p. P 80, fig. 8 et 9). Un chauffage de la sphère pendant plusieurs heures, au moyen d'une lampe placée en son centre, précédait chaque série de mesure afin de stabiliser les caractéristiques du revêtement diffusant. Les étalons de flux ont été comparés au moyen des deux même photomètres utilisés pour les étalons d'intensité.

c) *Corrections.*— Les différences de température de couleur

entre les divers étalons étant faibles (inférieures à 20 K pour les intensités lumineuses et inférieures à 30 K pour les flux lumineux), aucune correction n'a été appliquée.

Tous les étalons de flux étant du même type, aucune correction d'absorption due à la présence de la lampe dans la sphère n'était nécessaire.

d) *Organisation des mesures.* - Pour chacune des trois catégories de comparaisons, on a utilisé le même schéma d'organisation des mesures :

- On a constitué un "Groupe de référence BIPM 1969" de sept lampes du même type que celles des laboratoires nationaux ; toutefois pour les lampes Osram à 2859 K, le "Groupe de référence BIPM 1969" a été réduit à quatre lampes lors des calculs ; les trois autres lampes, trop instables, ont été éliminées.

- La participation de huit laboratoires nationaux, avec des groupes de huit lampes, a permis d'apporter aux mesures une très grande symétrie. Pour cela, on a effectué huit séries de comparaisons ; chaque série comprenait quinze lampes : une lampe de chaque laboratoire national et les sept lampes du B.I.P.M. régulièrement intercalées ; la place attribuée aux lampes d'un même laboratoire national variait d'une série à l'autre par permutation circulaire.

- Après avoir terminé les huit séries de comparaisons avec le premier récepteur photoélectrique, on a effectué huit autres séries identiques avec le deuxième récepteur photoélectrique.

- La valeur du "Groupe de référence BIPM 1969" (qui a fonctionné huit fois plus que les lampes des laboratoires nationaux) a été contrôlée par comparaison au "Groupe de référence BIPM 1961" au début, au milieu et à la fin des mesures.

II. RÉSULTATS DES MESURES

Les tableaux 1 à 8 rassemblent les résultats des mesures photométriques et électriques faites sur les différents groupes de lampes envoyés au Bureau International.

Les lignes (1) et (2) donnent le rapport photométrique

$$\frac{\text{"Groupe de référence BIPM 1969"}}{\text{Etalon national}}$$

pour chacun des deux récepteurs photoélectriques ; il a été tenu compte de l'usure du "Groupe de référence BIPM 1969", et l'écart entre les lignes (1) et (2) peut être considéré comme un critère

de reproductibilité pour chaque étalon national.

A partir de la valeur attribuée par le laboratoire national à chacun de ses étalons, on a calculé (lignes "candelas" ou "lumens") la valeur photométrique du "Groupe de référence BIPM 1969".

La ligne ΔM donne les écarts en pour cent par rapport à la valeur moyenne ; c'est une indication sur la cohérence entre les valeurs d'étalonnages attribuées aux huit étalons nationaux.

Les lignes (3) et (4) donnent les caractéristiques électriques, mesurées deux fois, des étalons nationaux ; la ligne (3) correspond aux mesures photométriques de la ligne (1), et la ligne (4) à celles de la ligne (2). Les lignes "ampères" ou "volts" sont donc les valeurs moyennes mesurées au B.I.P.M.

La ligne ΔE donne l'écart en pour cent (B.I.P.M. - Laboratoire national) pour les caractéristiques électriques.

Les résultats montrent que les types de lampes choisis pour les étalons d'intensité lumineuse à 2045 K et pour les étalons de flux lumineux à 2793 K sont très stables, tandis que le type retenu pour les étalons d'intensité lumineuse à 2859 K ne donne pas entière satisfaction. L'écart entre les deux mesures photométriques qui correspondent respectivement aux deux récepteurs, n'excède jamais 0,2 % pour les étalons à 2045 K et, à une exception près, pour les étalons de flux lumineux ; par contre, cet écart dépasse souvent 0,5 % pour les étalons d'intensité lumineuse à 2859 K. L'examen des caractéristiques électriques des lampes corrobore ces observations.

III. RÉSULTATS DES COMPARAISONS 1969

Depuis la quatrième comparaison (1961) aucun laboratoire n'a effectué de mesures nouvelles sur l'étalon primaire susceptibles de modifier ses unités ; la présente comparaison n'a donc aucune raison d'améliorer la concordance entre les unités des différents laboratoires ; elle peut seulement indiquer comment chaque laboratoire a maintenu ses unités depuis 1961.

Pour cela il suffit que

- les laboratoires nous aient communiqué les valeurs de leurs étalons, soit dans la même unité qu'en 1961, soit dans une unité que l'on sache rattacher à celle de 1961 ;

- le rapport entre la valeur du "Groupe de référence BIPM 1969" et la valeur du "Groupe de référence BIPM 1961" correspondant, supposé stable, soit connu.

Pour plus de commodité et aussi pour essayer d'apporter un peu de clarté dans une situation assez confuse, on a utilisé les résultats obtenus en 1969 avec le "Groupe de référence BIPM 1969" pour calculer les résultats qu'aurait fourni le "Groupe de référence BIPM 1961" s'il avait été à nouveau employé en 1969.

Tous ces résultats sont rassemblés dans les tableaux 9, 10 et 11 ; la signification de chaque colonne est la suivante :

(1) Nom du laboratoire.

(2) "Unité" choisie par chaque laboratoire pour exprimer les valeurs des étalons envoyés au B.I.P.M. en 1969 ; c'est souvent l'unité qui correspond à la réalisation d'un corps noir et on indique alors l'année de référence ; mais c'est aussi :

- m(52) : l'unité moyenne qui résulte de la comparaison internationale de 1952 (*Procès-Verbaux C.I.P.M.*, 26-B, 1958, p. P 98, Tableau X, y) ;

- m(52/57) : l'unité moyenne qui résulte des comparaisons internationales de 1952 et de 1957 (*Procès-Verbaux C.I.P.M.*, 26-B, 1958, p. P 98, Tableau X, x) ;

- m(61) : l'unité moyenne qui résulte de la comparaison internationale de 1961 (*Comité Consultatif de Photométrie*, 5e session, 1962, p. 84, Tableau X).

(3) Valeur du "Groupe de référence BIPM 1969" dans l'unité indiquée en (2).

(4) Unité dans laquelle on désire exprimer les résultats actuels pour qu'ils soient comparables à des résultats antérieurs.

(5) Valeur du "Groupe de référence BIPM 1969" dans l'unité indiquée en (4).

(6) Valeur qu'aurait eu le "Groupe de référence BIPM 1961" s'il avait été employé pour la comparaison de 1969, dans l'unité indiquée en (4). On passe de (5) à (6) en multipliant par F .

(7) Écart entre les valeurs des colonnes (6) et (8).

(8) Valeur du "Groupe de référence BIPM 1961" employé pour la comparaison de 1961, dans l'unité indiquée en (4).

(9) Écart entre les valeurs des colonnes (8) et (10).

(10) Valeur qu'aurait eu le "Groupe de référence RIPM 1961" s'il avait été employé pour la comparaison de 1957, dans l'unité indiquée en (4).

Les valeurs des colonnes (8), (9), (10) des tableaux 9 et 11 sont extraites de *C.C.P.*, 5e session, 1962, p. 85, Tableau XI ; les valeurs de la colonne (8) du tableau 10 proviennent de *C.C.P.*, 5e session, 1962, pp. 80-84, Tableaux VIII, IX, X.

Les valeurs de la colonne (7), qui sont à rapprocher de celles de la colonne (9), montrent comment les laboratoires nationaux ont maintenu leurs unités entre les comparaisons de 1961 et de 1969.

Pour l'intensité lumineuse à 2045 K, les résultats peuvent être considérés comme très satisfaisants puisque les écarts n'excèdent jamais 0,3 % ; ils sont meilleurs que pour la période précédente 1957-1961.

Pour l'intensité lumineuse à 2859 K, la confiance que l'on peut accorder aux résultats est limitée par la moins bonne stabilité des étalons.

Pour le flux lumineux à 2793 K, l'écart anormalement élevé observé en 1961 sur l'unité de l'E.T.L. disparaît ; quant aux autres résultats, ils sont du même ordre de grandeur que pour la période 1957-1961.

Ces résultats reposent sur une très bonne stabilité des groupes d'étalons conservés au B.I.P.M. Cette hypothèse paraît acceptable pour des lampes étalons qui ne sont pas utilisées dans l'intervalle de deux comparaisons et surtout qui ne voyagent pas ; il est en effet généralement admis que les transports constituent l'épreuve la plus redoutable pour les lampes étalons.

Cependant, si l'on préférerait contrôler la permanence des "unités" nationales en s'appuyant sur la stabilité de l'ensemble des étalons nationaux, on parviendrait à des résultats analogues ; il suffit pour cela de considérer les valeurs moyennes des colonnes (7) et (9) qui n'excèdent jamais les incertitudes de reproductibilité des types d'étalons utilisés et ne font donc pas apparaître d'écarts significatifs.

IV. CONCLUSION

Depuis vingt ans, on a progressivement codifié et unifié les conditions dans lesquelles s'effectuent les comparaisons internationales des étalons photométriques : mode d'alimentation des étalons, durée d'allumage préalable à toute mesure, choix d'un type unique de lampes, augmentation du nombre d'étalons, etc., sans pour autant voir apparaître plus de sûreté dans la connaissance des relations existant entre les "unités" nationales. Il est vrai que l'une des dernières spécifications adoptées (augmentation du nombre d'étalons) n'aura son plein effet qu'au cours de la prochaine comparaison.

Cependant, il existe une condition, évidente à priori mais que cette cinquième comparaison a rappelée : il n'y a pas de bonne comparaison internationale sans étalons suffisamment stables.

(Juillet 1971 ;
révisé en septembre 1971)

TABEAU 1.1

PHYSIKALISCH-TECHNISCHE BUNDESANSTALT

(Etalons d'intensité lumineuse à 2 045 K)

	<u>R 203</u>	<u>R 204</u>	<u>R 205</u>	<u>R 206</u>	<u>R 207</u>	<u>R 208</u>	<u>R 209</u>	<u>R 210</u>	<u>Moyenne</u>
(1)	1,005 6	1,014 7	1,002 2	0,976 0	0,982 4	0,981 7	0,983 6	1,020 3	
(2)	6 1	3	1	6	8	5	5 5	19 4	
	<u>1,005 8</u>	<u>1,014 5</u>	<u>1,002 2</u>	<u>0,976 3</u>	<u>0,982 6</u>	<u>0,981 6</u>	<u>0,984 6</u>	<u>1,019 8</u>	
candelas	14,589	14,462	14,507	14,566	14,552	14,542	14,543	14,563	14,540
ΔM (%)	+ 0,34	- 0,54	- 0,23	+ 0,18	+ 0,08	+ 0,01	+ 0,02	+ 0,16	
(3)	5,353 3	5,334 6	5,374 1	5,322 0	5,335 0	5,359 8	5,346 7	5,323 7	
(4)	2 7	9	2	1 6	0	9	7 0	7	
ampères	<u>5,353 0</u>	<u>5,334 8</u>	<u>5,374 1</u>	<u>5,321 8</u>	<u>5,335 0</u>	<u>5,359 8</u>	<u>5,346 8</u>	<u>5,323 7</u>	
ΔE (%)	- 0,04	- 0,04	- 0,02	- 0,03	- 0,03	- 0,02	- 0,02	- 0,03	- 0,03

TABLEAU 2.1

DEUTSCHES AMT FÜR MESSWESEN UND WARENPRÜFUNG

(Etalons d'intensité lumineuse à 2 045 K)

	<u>661 026</u>	<u>661 027</u>	<u>661 033</u>	<u>661 073</u>	<u>661 079</u>	<u>661 083</u>	<u>661 107</u>	<u>661 124</u>	<u>Moyenne</u>
(1)	0,987 4	1,000 6	0,994 2	0,987 1	0,997 5	0,979 0	1,011 5	0,988 0	
(2)	4	7	0	8 5	8	8 8	10 2	7 7	
	<u>0,987 4</u>	<u>1,000 6</u>	<u>0,994 1</u>	<u>0,987 8</u>	<u>0,997 6</u>	<u>0,978 9</u>	<u>1,010 8</u>	<u>0,987 8</u>	
candelas	14,683	14,689	14,663	14,679	14,635	14,664	14,677	14,679	14,671
ΔM (‰)	+ 0,08	+ 0,12	- 0,05	+ 0,05	- 0,25	- 0,05	+ 0,04	+ 0,05	
(3)	5,297 1	5,287 3	5,312 4	5,390 8	5,315 1	5,345 2	5,305 2	5,339 2	
(4)	7	5	4	2	2	4 9	5	8 7	
ampères	<u>5,297 4</u>	<u>5,287 4</u>	<u>5,312 4</u>	<u>5,390 5</u>	<u>5,315 1</u>	<u>5,345 0</u>	<u>5,305 3</u>	<u>5,338 9</u>	
ΔE (‰)	- 0,01	- 0,02	0,00	0,00	0,00	- 0,02	0,00	- 0,01	- 0,01

TABLEAU 3.1

NATIONAL BUREAU OF STANDARDS

(Etalons d'intensité lumineuse à 2 045 K)

	8460	8461	8462	8463	8464	8465	8466	8467	Moyenne
(1)	0,975 0	0,977 0	0,983 3	0,973 6	0,975 0	0,980 8	0,973 1	0,987 0	
(2)	8	1	3	3	4 3	79 5	2 5	3	
	0,975 4	0,977 0	0,983 3	0,973 4	0,974 6	0,980 2	0,972 8	0,987 2	
candèlas	14,748	14,772	14,730	14,776	14,765	14,762	14,748	14,759	14,758
ΔM (%)	- 0,07	+ 0,09	- 0,19	+ 0,12	+ 0,05	+ 0,03	- 0,07	+ 0,01	
(3)	5,350 2	5,347 0	5,369 5	5,340 0	5,379 8	5,339 0	5,372 2	5,354 5	
(4)	49 9	6 5	3	2	7	8 8	2	3	
ampères	5,350 0	5,346 7	5,369 4	5,340 1	5,379 7	5,338 9	5,372 2	5,354 4	
ΔE (%)	- 0,04	- 0,02	+ 0,02	- 0,02	0,00	- 0,02	- 0,01	- 0,01	- 0,01

TABLEAU 4.1

NATIONAL RESEARCH COUNCIL

(Etalons d'intensité lumineuse à 2 045 K)

	<u>661 016</u>	<u>661 035</u>	<u>661 041</u>	<u>661 045</u>	<u>661 048</u>	<u>661 057</u>	<u>661 060</u>	<u>661 067</u>	<u>Moyenne</u>
(1)	0,984 7	0,996 2	1,004 4	0,973 7	0,966 4	0,959 3	0,984 8	0,971 1	
(2)	<u>5 4</u>	<u>5 3</u>	<u>3</u>	<u>4 6</u>	<u>2</u>	<u>7 8</u>	<u>3 7</u>	<u>0 3</u>	
	0,985 0	0,995 8	1,004 4	0,974 2	0,966 3	0,958 6	0,984 2	0,970 7	
candelas	14,611	14,622	14,627	14,615	14,579	14,622	14,611	14,615	14,613
ΔM (%)	- 0,01	+ 0,06	+ 0,10	+ 0,01	- 0,23	+ 0,06	- 0,01	+ 0,01	
(3)	5,353 5	5,359 0	5,341 0	5,335 0	5,357 1	5,386 2	5,381 4	5,379 1	
(4)	<u>3</u>	<u>5</u>	<u>0</u>	<u>2</u>	<u>6 1</u>	<u>0</u>	<u>5</u>	<u>2</u>	
ampères	5,353 4	5,359 2	5,341 0	5,335 1	5,356 6	5,386 1	5,381 4	5,379 1	
ΔE (%)	- 0,01	- 0,01	- 0,01	- 0,01	- 0,02	- 0,01	- 0,01	- 0,01	- 0,01

TABLEAU 5.1

CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET METIERS

(Etalons d'intensité lumineuse à 2 045 K)

	<u>661 020</u>	<u>661 064</u>	<u>661 068</u>	<u>661 072</u>	<u>661 080</u>	<u>661 094</u>	<u>661 115</u>	<u>661 117</u>	<u>Moyenne</u>
(1)	1,001 2	0,972 1	0,968 2	1,001 1	0,987 1	0,988 4	0,999 7	1,003 8	
(2)	4	1 6	2	2 5	5 7	7 9	0	0	
	<u>1,001 3</u>	<u>0,971 8</u>	<u>0,968 2</u>	<u>1,001 8</u>	<u>0,986 4</u>	<u>0,988 2</u>	<u>0,999 4</u>	<u>1,003 4</u>	
candelas	14,789	14,742	14,726	14,767	14,816	14,774	14,781	14,750	14,768
ΔM (%)	+ 0,14	- 0,18	- 0,28	- 0,01	+ 0,33	+ 0,04	+ 0,09	- 0,12	
(3)	5,303 3	5,345 2	5,369 8	5,352 7	5,353 1	5,321 9	5,315 4	5,323 2	
(4)	5	3	7	3 0	2 9	8	4	1	
ampères	<u>5,303 4</u>	<u>5,345 2</u>	<u>5,369 7</u>	<u>5,352 8</u>	<u>5,353 0</u>	<u>5,321 8</u>	<u>5,315 4</u>	<u>5,323 1</u>	
ΔE (%)	- 0,04	- 0,04	- 0,04	- 0,05	- 0,03	- 0,04	- 0,04	- 0,03	- 0,04

TABLEAU 6.1

ELECTROTECHNICAL LABORATORY

(Etalons d'intensité lumineuse à 2 045 K)

	<u>661 011</u>	<u>661 021</u>	<u>661 024</u>	<u>661 062</u>	<u>661 065</u>	<u>661 111</u>	<u>661 135</u>	<u>661 153</u>	<u>Moyenne</u>
(1)	1,003 2	1,000 4	0,989 5	1,017 7	0,998 3	1,002 8	0,985 6	0,988 3	
(2)	<u>6</u>	<u>1 1</u>	<u>90 0</u>	<u>8 1</u>	<u>3</u>	<u>4</u>	<u>4 9</u>	<u>2</u>	
	1,003 4	1,000 8	0,989 8	1,017 9	0,998 3	1,002 6	0,985 2	0,988 2	
candelas	14,751	14,765	14,776	14,778	14,781	14,766	14,790	14,764	14,771
ΔM (%)	- 0,14	- 0,04	+ 0,03	+ 0,05	+ 0,07	- 0,03	+ 0,13	- 0,05	
(3)	5,287 8	5,303 3	5,321 4	5,307 3	5,353 5	5,350 0	5,363 0	5,330 9	
(4)	<u>8 2</u>	<u>0</u>	<u>0 9</u>	<u>7</u>	<u>4 1</u>	<u>49 7</u>	<u>3</u>	<u>1 3</u>	
ampères	5,287 9	5,303 1	5,321 1	5,307 5	5,353 8	5,349 8	5,363 1	5,331 1	
ΔE (%)	- 0,01	- 0,02	- 0,02	- 0,02	- 0,01	- 0,01	- 0,03	- 0,02	- 0,02

TABLEAU 7.1

NATIONAL PHYSICAL LABORATORY

(Etalons d'intensité lumineuse à 2 045 K)

	<u>661 051</u>	<u>661 074</u>	<u>661 096</u>	<u>661 098</u>	<u>661 109</u>	<u>661 110</u>	<u>661 129</u>	<u>661 137</u>	<u>Moyenne</u>
(1)	0,964 4	0,987 2	1,028 1	0,976 7	0,976 0	0,984 5	1,013 0	0,978 5	
(2)	4	8 5	7 9	0	4	2	4	9 8	
	<u>0,964 4</u>	<u>0,987 8</u>	<u>1,028 0</u>	<u>0,976 4</u>	<u>0,976 2</u>	<u>0,984 4</u>	<u>1,013 2</u>	<u>0,979 2</u>	
candelas	14,707	14,689	14,695	14,724	14,711	14,687	14,696	14,693	14,700
ΔM (%)	+ 0,05	- 0,07	- 0,03	+ 0,16	+ 0,07	- 0,09	- 0,03	- 0,05	
(3)	5,392 6	5,342 8	5,289 6	5,356 9	5,346 6	5,324 0	5,281 4	5,392 4	
(4)	2	9	5	8	5	4	1	3	
ampères	<u>5,392 4</u>	<u>5,342 8</u>	<u>5,289 5</u>	<u>5,356 8</u>	<u>5,346 5</u>	<u>5,324 2</u>	<u>5,281 2</u>	<u>5,392 3</u>	
ΔE (%)	- 0,01	0,00	+ 0,01	0,00	- 0,01	0,00	- 0,02	- 0,01	0,00

TABLEAU 8.1

INSTITUT DE METROLOGIE D.I. MENDELEEV

(Etalons d'intensité lumineuse à 2 045 K)

	<u>661 042</u>	<u>661 059</u>	<u>661 069</u>	<u>661 071</u>	<u>661 082</u>	<u>661 108</u>	<u>661 117</u>	<u>Moyenne</u>
(1)	0,982 5	0,977 6	0,983 1	0,983 3	0,979 2	0,991 2	0,980 9	
(2)	<u>3 9</u>	<u>6</u>	<u>2 6</u>	<u>1</u>	<u>1</u>	<u>5</u>	<u>9</u>	
	0,983 2	0,977 6	0,982 8	0,983 2	0,979 2	0,991 4	0,980 9	
candelas	14,792	14,747	14,786	14,787	14,737	14,762	14,753	14,766
ΔM (%)	+ 0,18	- 0,13	+ 0,14	+ 0,14	- 0,20	- 0,03	- 0,09	
(3)	5,328 4	5,345 9	5,320 8	5,361 0	5,361 8	5,303 8	5,357 5	
(4)	<u>4</u>	<u>7</u>	<u>8</u>	<u>5</u>	<u>9</u>	<u>8</u>	<u>6</u>	
ampères	5,328 4	5,345 8	5,320 8	5,361 2	5,361 8	5,303 8	5,357 5	
ΔE (%)	- 0,02	0,00	- 0,02	- 0,02	- 0,01	- 0,01	- 0,01	- 0,01

Note. Une lampe (N° 661 084) a été éliminée.

TABLEAU 1.2

PHYSIKALISCH-TECHNISCHE BUNDESANSTALT

(Etalons d'intensité lumineuse à 2 859 K)

	<u>R 192</u>	<u>R 198</u>	<u>R 199</u>	<u>R 200</u>	<u>R 201</u>	<u>R 202</u>	<u>Moyenne</u>
(1)	1,017 9	1,005 2	1,041 1	1,012 0	0,993 7	1,009 1	
(2)	<u>9 8</u>	<u>3</u>	<u>0</u>	<u>4 3</u>	<u>2 9</u>	<u>0</u>	
	1,018 8	1,005 2	1,040 6	1,013 2	0,993 3	1,009 0	
candelas	259,6	259,9	260,3	258,8	260,0	260,8	259,9
ΔM (%)	- 0,1	0,0	+ 0,2	- 0,4	0,0	+ 0,3	
(3)	31,526	31,667	31,181	31,703	31,823	31,821	
(4)	<u>36</u>	<u>5</u>	<u>8</u>	<u>12</u>	<u>9</u>	<u>7</u>	
volts	31,531	31,666	31,184	31,707	31,826	31,824	
ΔE (%)	+ 0,04	+ 0,05	+ 0,01	+ 0,03	0,00	+ 0,03	+ 0,03

Note. Deux lampes (Nos R 193 et R 194) ont été éliminées.

TABLEAU 2.2

DEUTSCHES AMT FÜR MESSWESEN UND WARENPRÜFUNG

(Etalons d'intensité lumineuse à 2 859 K)

	<u>3 020</u>	<u>3 021</u>	<u>3 022</u>	<u>3 023</u>	<u>3 024</u>	<u>3 026</u>	<u>3 027</u>	<u>3 029</u>	<u>Moyenne</u>
(1)	0,994 1	1,021 3	1,071 3	0,983 9	1,030 4	1,009 4	1,013 7	1,007 5	
(2)	8 6	2 3	5 5	4 6	28 3	10 3	07 0	8 0	
	<u>0,996 4</u>	<u>1,021 8</u>	<u>1,073 4</u>	<u>0,984 2</u>	<u>1,029 4</u>	<u>1,009 8</u>	<u>1,010 4</u>	<u>1,007 8</u>	
candelas	264,8	265,8	265,0	266,4	265,5	265,2	265,9	265,7	265,5
ΔM (‰)	- 0,3	+ 0,1	- 0,2	+ 0,3	0,0	- 0,1	+ 0,1	+ 0,1	
(3)	31,597	31,560	31,415	31,682	31,586	31,786	31,707	31,851	
(4)	1	6	2	3	4	0	29	0	
volts	<u>31,594</u>	<u>31,563</u>	<u>31,414</u>	<u>31,683</u>	<u>31,585</u>	<u>31,783</u>	<u>31,718</u>	<u>31,851</u>	
ΔE (‰)	- 0,03	- 0,02	+ 0,02	- 0,21	0,00	- 0,01	- 0,07	- 0,03	- 0,04

TABLEAU 3.2 -

NATIONAL BUREAU OF STANDARDS

(Etalons d'intensité lumineuse à 2 859 K)

Note. Les huit lampes ont été retirées de la comparaison.

TABLEAU 4.2

NATIONAL RESEARCH COUNCIL

(Etalons d'intensité lumineuse à 2 859 K)

	<u>012</u>	<u>014</u>	<u>015</u>	<u>016</u>	<u>017</u>	<u>018</u>	<u>019</u>	<u>020</u>	<u>Moyenne</u>
(1)	0,925 0	0,931 0	0,931 4	0,944 8	0,939 1	0,919 5	0,936 6	0,930 0	
(2)	9	8	28 4	5 0	7 8	23 3	3 2	23 7	
	<u>0,925 4</u>	<u>0,931 4</u>	<u>0,929 9</u>	<u>0,944 9</u>	<u>0,938 4</u>	<u>0,921 4</u>	<u>0,934 9</u>	<u>0,926 8</u>	
candelas	263,3	263,4	262,9	261,7	262,4	261,6	263,4	262,4	262,6
ΔM (%)	+ 0,3	+ 0,3	+ 0,1	- 0,3	- 0,1	- 0,4	+ 0,3	- 0,1	
(3)	32,156	32,522	32,352	32,132	32,236	32,351	32,170	32,018	
(4)	62	15	68	8	42	34	4	48	
volts	<u>32,159</u>	<u>32,519</u>	<u>32,360</u>	<u>32,135</u>	<u>32,239</u>	<u>32,342</u>	<u>32,172</u>	<u>32,033</u>	
ΔE (%)	- 0,05	0,00	- 0,01	+ 0,06	+ 0,01	+ 0,03	- 0,01	+ 0,03	+ 0,01

TABLEAU 5.2

CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET METIERS

(Etalons d'intensité lumineuse à 2 859 K)

	<u>254</u>	<u>257</u>	<u>258</u>	<u>260</u>	<u>267</u>	<u>268</u>	<u>269</u>	<u>271</u>	<u>Moyenne</u>
(1)	0,981 8	0,979 9	0,985 3	0,975 5	0,996 8	0,973 1	1,001 2	0,986 0	
(2)	<u>2 4</u>	<u>80 6</u>	<u>6 8</u>	<u>7 5</u>	<u>5 2</u>	<u>66 8</u>	<u>0,997 8</u>	<u>1</u>	
	0,982 1	0,980 2	0,986 0	0,976 5	0,996 0	0,970 0	0,999 5	0,986 0	
candelas	261,2	260,3	260,0	260,1	260,5	260,3	261,2	260,7	260,5
ΔM (%)	+ 0,3	- 0,1	- 0,2	- 0,2	0,0	- 0,1	+ 0,3	+ 0,1	
(3)	31,405	31,638	31,650	31,756	31,677	31,978	31,656	31,601	
(4)	<u>399</u>	<u>9</u>	<u>3</u>	<u>4</u>	<u>81</u>	<u>84</u>	<u>66</u>	<u>599</u>	
volts	31,402	31,638	31,651	31,755	31,679	31,981	31,661	31,600	
ΔE (%)	+ 0,02	+ 0,06	+ 0,06	+ 0,06	+ 0,01	+ 0,08	+ 0,04	+ 0,02	+ 0,04

TABLEAU 6.2

ELECTROTECHNICAL LABORATORY

(Etalons d'intensité lumineuse à 2 859 K)

	<u>282/591</u>	<u>283/592</u>	<u>286/595</u>	<u>287/596</u>	<u>291/600</u>	<u>293/602</u>	<u>Moyenne</u>
(1)	0,991 4	0,998 2	0,989 1	0,990 7	0,977 5	0,999 5	
(2)	<u>2 3</u>	<u>1,002 5</u>	<u>90 2</u>	<u>4</u>	<u>3</u>	<u>6 8</u>	
	0,991 8	1,000 4	0,989 6	0,990 6	0,977 4	0,998 2	
candelas	262,8	264,0	263,0	263,0	264,2	263,9	263,5
ΔM (%)	- 0,3	+ 0,2	- 0,2	- 0,2	+ 0,3	+ 0,2	
(3)	<u>31,563</u>	<u>31,358</u>	<u>31,621</u>	<u>31,613</u>	<u>31,925</u>	<u>31,498</u>	
(4)	<u>0</u>	<u>1</u>	<u>15</u>	<u>5</u>	<u>30</u>	<u>516</u>	
volts	31,562	31,354	31,618	31,614	31,928	31,507	
ΔE (%)	+ 0,01	- 0,04	- 0,04	- 0,03	- 0,09	- 0,05	- 0,04

Note. Deux lampes (Nos 289/598 et 294/603) ont été éliminées.

TABLEAU 7.2

NATIONAL PHYSICAL LABORATORY

(Etalons d'intensité lumineuse à 2 859 K)

	<u>264 A</u>	<u>264 B</u>	<u>264 C</u>	<u>264 D</u>	<u>264 E</u>	<u>264 G</u>	<u>264 H</u>	<u>269 A</u>	<u>Moyenne</u>
(1)	1,010 3	0,972 0	0,992 5	1,026 6	0,977 5	0,983 5	0,952 6	0,988 8	
(2)	0,997 8	66 3	1 5	4	3 2	9	8 0	4	
	<u>1,004 0</u>	<u>0,969 2</u>	<u>0,992 0</u>	<u>1,026 5</u>	<u>0,975 4</u>	<u>0,983 7</u>	<u>0,955 3</u>	<u>0,988 6</u>	
candelas	266,4	264,6	265,1	265,6	265,7	265,3	263,9	264,8	265,2
ΔM (‰)	+ 0,5	- 0,2	0,0	+ 0,2	+ 0,2	0,0	- 0,5	- 0,2	
(3)	31,694	31,932	31,866	31,681	31,819	31,926	32,306	31,701	
(4)	83	27	0	71	9	0	14	697	
volts	<u>31,689</u>	<u>31,930</u>	<u>31,863</u>	<u>31,676</u>	<u>31,819</u>	<u>31,923</u>	<u>32,310</u>	<u>31,699</u>	
ΔE (‰)	0,00	0,00	- 0,02	+ 0,02	- 0,03	- 0,02	0,00	0,00	- 0,01

TABLEAU 8.2

INSTITUT DE METROLOGIE D. I. MENDELÉEV

(Etalons d'intensité lumineuse à 2 859 K)

	<u>349/668</u>	<u>350/669</u>	<u>351/670</u>	<u>352/671</u>	<u>353/672</u>	<u>354/673</u>	<u>359/678</u>	<u>360/679</u>	<u>Moyenne</u>
(1)	1,028 4	1,002 5	1,014 7	1,011 5	1,024 6	0,986 6	1,036 9	1,038 5	
(2)	<u>9 0</u>	<u>3 8</u>	<u>2 5</u>	<u>8</u>	<u>3 1</u>	<u>4</u>	<u>5 3</u>	<u>7</u>	
	1,028 7	1,003 2	1,013 6	1,011 6	1,023 8	0,986 5	1,036 1	1,038 6	
candelas	262,3	261,0	261,5	262,0	261,1	261,4	262,1	262,6	261,8
ΔM (%)	+ 0,2	- 0,3	- 0,1	+ 0,1	- 0,3	- 0,2	+ 0,1	+ 0,3	
(3)	31,414	31,529	31,596	31,358	31,648	31,672	31,464	31,634	
(4)	<u>4</u>	<u>36</u>	<u>609</u>	<u>62</u>	<u>62</u>	<u>81</u>	<u>76</u>	<u>4</u>	
volts	31,414	31,532	31,603	31,360	31,655	31,677	31,470	31,634	
ΔE (%)	- 0,02	+ 0,10	+ 0,03	- 0,04	+ 0,04	+ 0,03	0,00	+ 0,01	+ 0,02

TABLEAU 1.3

PHYSIKALISCH-TECHNISCHE BUNDESANSTALT

(Etalons de flux lumineux à 2 793 K)

	<u>G 3000</u>	<u>G 3001</u>	<u>G 3002</u>	<u>G 3003</u>	<u>G 3004</u>	<u>G 3005</u>	<u>G 3006</u>	<u>G 3007</u>	<u>Moyenne</u>
(1)	0,957 4	0,985 9	0,979 9	0,957 8	0,952 8	0,965 6	0,977 9	0,927 8	
(2)	<u>3</u>	<u>6 7</u>	<u>80 9</u>	<u>4</u>	<u>8</u>	<u>7 1</u>	<u>8 6</u>	<u>5 8</u>	
	0,957 4	0,986 3	0,980 4	0,957 6	0,952 8	0,966 4	0,978 2	0,926 8	
lumens	2450,9	2452,4	2453,5	2451,9	2449,6	2448,4	2447,5	2447,7	2450,2
ΔM (‰)	+ 0,03	+ 0,09	+ 0,13	+ 0,07	- 0,02	- 0,07	- 0,11	- 0,10	
(3)	2,026 3	2,027 2	2,045 0	2,033 3	2,032 0	2,028 9	2,024 9	2,045 9	
(4)	<u>3</u>	<u>4</u>	<u>0</u>	<u>3</u>	<u>2</u>	<u>8</u>	<u>9</u>	<u>6 1</u>	
ampères	2,026 3	2,027 3	2,045 0	2,033 3	2,032 1	2,028 9	2,024 9	2,046 0	
ΔE (‰)	0,00	0,00	- 0,01	0,00	0,00	0,00	- 0,01	0,00	0,00

TABLEAU 2.3

DEUTSCHES AMT FÜR MESSWESEN UND WARENPRÜFUNG

(Etalons de flux lumineux à 2 793 K)

	<u>3 050</u>	<u>3 051</u>	<u>3 052</u>	<u>3 053</u>	<u>3 054</u>	<u>3 055</u>	<u>3 056</u>	<u>3 057</u>	<u>Moyenne</u>
(1)	0,929 1	0,935 1	0,939 7	0,962 0	0,945 5	0,971 9	0,922 4	0,914 3	
(2)	<u>1</u>	<u>4 6</u>	<u>8 0</u>	<u>0 8</u>	<u>3 9</u>	<u>9</u>	<u>1 6</u>	<u>2 6</u>	
	0,929 1	0,934 8	0,938 8	0,961 4	0,944 7	0,971 9	0,922 0	0,913 4	
lumens	2481,6	2479,1	2480,3	2478,5	2477,9	2475,4	2474,6	2474,4	2477,7
ΔM (%)	+ 0,15	+ 0,06	+ 0,10	+ 0,03	+ 0,01	- 0,09	- 0,13	- 0,13	
(3)	2,040 8	2,042 9	2 049 2	2,028 6	2,053 7	2,028 5	2,055 6	2,068 5	
(4)	<u>8</u>	<u>3 1</u>	<u>2</u>	<u>4</u>	<u>7</u>	<u>5</u>	<u>7</u>	<u>5</u>	
ampères	2,040 8	2,043 0	2,049 2	2,028 5	2,053 7	2,028 5	2,055 7	2,068 5	
ΔE (%)	0,00	- 0,02	- 0,01	0,00	- 0,01	- 0,01	0,00	0,00	- 0,01

TABLEAU 3.3

NATIONAL BUREAU OF STANDARDS

(Etalons de flux lumineux à 2 793 K)

	<u>8 380</u>	<u>8 381</u>	<u>8 382</u>	<u>8 384</u>	<u>8 385</u>	<u>8 386</u>	<u>8 387</u>	<u>Moyenne</u>
(1)	0,982 6	0,994 4	0,948 9	0,959 7	0,982 9	0,934 8	0,996 4	
(2)	<u>3 9</u>	<u>6 5</u>	<u>50 2</u>	<u>8 7</u>	<u>0</u>	<u>3 9</u>	<u>3</u>	
	0,983 2	0,995 4	0,949 6	0,959 2	0,982 4	0,934 4	0,996 4	
lumens	2494,4	2492,5	2495,5	2493,9	2493,3	2493,9	2495,0	2494,1
ΔM (%)	+ 0,01	- 0,06	+ 0,06	- 0,01	- 0,03	- 0,01	+ 0,04	
(3)	2,049 4	2,033 4	2,053 3	2,024 1	2,037 0	2,068 9	2,041 2	
(4)	<u>2</u>	<u>5</u>	<u>5</u>	<u>2</u>	<u>0</u>	<u>9</u>	<u>1</u>	
ampères	2,049 3	2,033 5	2,053 4	2,024 2	2,037 0	2,068 9	2,041 1	
ΔE (%)	- 0,01	- 0,02	- 0,03	- 0,01	0,00	0,00	- 0,02	- 0,01

Note. Une lampe (N° 8 383) a été éliminée.

TABLEAU 4.3

NATIONAL RESEARCH COUNCIL

(Etalons de flux lumineux à 2 793 K)

	<u>GE 140</u>	<u>GE 141</u>	<u>GE 145</u>	<u>GE 146</u>	<u>GE 147</u>	<u>GE 149</u>	<u>GE 150</u>	<u>GE 151</u>	<u>Moyenne</u>
(1)	0,997 0	1,024 5	1,016 5	0,952 1	0,987 3	0,967 0	0,996 3	1,005 1	
(2)	8 4	8	7 2	6	6 3	3	7 1	4 7	
	<u>0,997 7</u>	<u>1,024 6</u>	<u>1,016 8</u>	<u>0,952 4</u>	<u>0,986 8</u>	<u>0,967 2</u>	<u>0,996 7</u>	<u>1,004 9</u>	
lumens	2460,3	2457,5	2461,2	2462,4	2465,0	2467,3	2461,4	2462,5	2462,2
ΔM (%)	- 0,08	- 0,19	- 0,04	+ 0,01	+ 0,11	+ 0,21	- 0,03	+ 0,01	
(3)	2,025 6	2,015 9	2,026 9	2,019 6	2,027 3	2,031 9	2,019 9	2,016 4	
(4)	7	6 0	7 0	6	5	7	20 1	7	
ampères	<u>2,025 6</u>	<u>2,016 0</u>	<u>2,026 9</u>	<u>2,019 6</u>	<u>2,027 4</u>	<u>2,031 8</u>	<u>2,020 0</u>	<u>2,016 5</u>	
ΔE (%)	- 0,03	- 0,02	- 0,01	- 0,02	- 0,01	- 0,04	- 0,02	- 0,01	- 0,02

TABLEAU 5.3

CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET METIERS

(Etalons de flux lumineux à 2 793 K)

	D 181	D 182	D 188	D 191	D 197	D 199	D 203	D 210	Moyenne
(1)	0,988 6	0,978 1	0,983 7	0,947 0	0,967 5	0,953 6	0,952 5	0,933 7	
(2)	8	9 5	4 6	8 3	6 8	1 5	1 8	2 3	
	<u>0,988 7</u>	<u>0,978 8</u>	<u>0,984 2</u>	<u>0,947 6</u>	<u>0,967 2</u>	<u>0,952 6</u>	<u>0,952 2</u>	<u>0,933 0</u>	
lumens	2485,6	2483,2	2487,1	2479,9	2486,7	2485,3	2486,2	2486,4	2485,0
ΔM (%)	+ 0,02	- 0,07	+ 0,08	- 0,20	+ 0,07	+ 0,01	+ 0,05	+ 0,06	
(3)	2,014 8	2,029 5	2,014 3	2,022 3	2,017 1	2,036 1	2,029 5	2,032 0	
(4)	9	5	5	0	6 8	1	5	0	
ampères	<u>2,014 9</u>	<u>2,029 5</u>	<u>2,014 4</u>	<u>2,022 1</u>	<u>2,017 0</u>	<u>2,036 1</u>	<u>2,029 5</u>	<u>2,032 0</u>	
ΔE (%)	0,00	+ 0,01	- 0,01	0,00	- 0,03	- 0,03	+ 0,01	0,00	- 0,01

TABLEAU 6.3

ELECTROTECHNICAL LABORATORY

(Etalons de flux lumineux à 2 793 K)

	<u>122</u>	<u>124</u>	<u>127</u>	<u>132</u>	<u>134</u>	<u>137</u>	<u>138</u>	<u>139</u>	<u>Moyenne</u>
(1)	1,010 8	0,961 3	1,002 3	0,996 6	0,996 0	0,983 7	0,975 2	1,006 4	
(2)	5 4	3	9	8	5 9	4 6	4	5 5	
	<u>1,013 1</u>	<u>0,961 3</u>	<u>1,002 6</u>	<u>0,996 7</u>	<u>0,996 0</u>	<u>0,984 2</u>	<u>0,975 3</u>	<u>1,006 0</u>	
lumens	2491,5	2491,1	2489,1	2495,7	2492,8	2490,8	2487,4	2490,5	2491,1
ΔM (%)	+ 0,02	0,00	- 0,08	+ 0,18	+ 0,07	- 0,01	- 0,15	- 0,02	
(3)	1,991 8	2,034 2	2,013 5	2,013 6	2,025 1	2,017 7	2,023 7	2,042 5	
(4)	2	4	4	5	1	7	8	4	
ampères	<u>1,991 5</u>	<u>2,034 3</u>	<u>2,013 4</u>	<u>2,013 5</u>	<u>2,025 1</u>	<u>2,017 7</u>	<u>2,023 8</u>	<u>2,042 4</u>	
ΔE (%)	- 0,04	- 0,01	- 0,01	- 0,01	- 0,01	0,00	- 0,02	- 0,01	- 0,01

TABLEAU 7.3

NATIONAL PHYSICAL LABORATORY

(Etalons de flux lumineux à 2 793 K)

	<u>273 A</u>	<u>273 B</u>	<u>273 C</u>	<u>273 D</u>	<u>273 E</u>	<u>273 F</u>	<u>273 G</u>	<u>273 H</u>	<u>Moyenne</u>
(1)	0,971 1	0,991 8	0,958 2	0,956 6	0,970 5	0,933 7	0,947 1	0,945 3	
(2)	0 9	3 0	0	0	9	4 2	6 6	4 8	
	<u>0,971 0</u>	<u>0,992 4</u>	<u>0,958 1</u>	<u>0,956 3</u>	<u>0,970 7</u>	<u>0,934 0</u>	<u>0,946 8</u>	<u>0,945 0</u>	
lumens	2472,2	2475,0	2470,9	2471,1	2469,5	2469,5	2469,3	2469,3	2470,8
ΔM (%)	+ 0,06	+ 0,17	0,00	+ 0,01	- 0,05	- 0,05	- 0,06	- 0,06	
(3)	2,041 5	2,027 6	2,050 6	2,043 6	2,018 2	2,061 9	2,043 4	2,048 5	
(4)	5	7	5	6	0	7	4	4	
ampères	<u>2,041 5</u>	<u>2,027 7</u>	<u>2,050 6</u>	<u>2,043 6</u>	<u>2,018 1</u>	<u>2,061 8</u>	<u>2,043 4</u>	<u>2,048 5</u>	
ΔE (%)	0,00	- 0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	+ 0,01	0,00	0,00

TABLEAU 8.3

INSTITUT DE METROLOGIE D. I. MENDELEEV

(Etalons de flux lumineux à 2 793 K)

	<u>154</u>	<u>160</u>	<u>164</u>	<u>170</u>	<u>174</u>	<u>179</u>	<u>Moyenne</u>
(1)	1,047 0	1,012 1	1,003 1	1,022 9	1,029 5	1,044 0	
(2)	0	4 1	4 3	4 9	30 1	3 5	
	<u>1,047 0</u>	<u>1,013 1</u>	<u>1,003 7</u>	<u>1,023 9</u>	<u>1,029 8</u>	<u>1,043 8</u>	
lumens	2481,4	2472,0	2471,6	2477,8	2476,7	2473,8	2475,5
ΔM (%)	+ 0,24	- 0,14	- 0,16	+ 0,09	+ 0,05	- 0,07	
(3)	2,001 6	2,004 7	2,026 5	2,005 6	2,002 4	2,004 9	
(4)	5	8	5	5	4	9	
ampères	<u>2,001 5</u>	<u>2,004 8</u>	<u>2,026 5</u>	<u>2,005 6</u>	<u>2,002 4</u>	<u>2,004 9</u>	
ΔE (%)	- 0,01	- 0,01	0,00	+ 0,01	0,00	0,00	0,00

Noté. Ce groupe de l'I.M.M. ne comprenait que six lampes.

TABLEAU 9

INTENSITE LUMINEUSE A 2045 K

<i>Valeur photométrique du</i> "Groupe de référence BIPM 1969"		<i>Valeur photométrique du</i> "Groupe de référence BIPM 1961"								
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	comparaison 1969	(6)	(7)	(8)	(9)	comparaison 1957
PTB	1955/6	14,540 cd	1955/6	14,540 cd	12,201 cd	+ 0,3 %	12,242 cd	+ 0,1 %	12,249 cd	
DAMM	m(61)	14,671	1955/6	14,515	12,179	+ 0,1	12,187	+ 0,5	12,249	
NBS	1937/8	14,758	1937/8	14,758	12,383	0,0	12,385	- 0,7	12,303	
NRC	1960/1	14,613	1953	14,745	12,373	0,0	12,374	+ 0,3	12,416	
CNAM	m(52/57)	14,768	1950/1	14,694	12,330	0,0	12,326	- 0,3	12,289	
ETL	m(52/57)	14,771	1939	14,771	12,394	- 0,1	12,377	0,0	12,380	
NNPL	1937	14,700	1937	14,700	12,335	0,0	12,341	- 0,1	12,327	
IMM	1947	14,766	1947	14,766	12,390	+ 0,2	12,412	- 0,1	12,394	
						+ 0,1			0,0	

"Groupe de référence BIPM 1961" : 12,361 cd en unité m(52) } $R = 0,839$ 1
 "Groupe de référence BIPM 1969" : 14,731 cd en unité m(52)

Unité DAMM (1955/6) = Unité m(61) x 1,011
 Unité NRC (1960/1) = Unité NRC (1953) x 1,009
 Unité CNAM (1950/1) = Unité m(52/57) x 1,005
 Unité ETL (1939) = Unité m(52/57) x 1,000

TABLEAU 10

INTENSITÉ LUMINEUSE A 2859 K

		Valeur photométrique du "Groupe de référence BIPM 1969"			Valeur photométrique du "Groupe de référence BIPM 1961"		
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	comparaison 1969	(7)	comparaison 1961
PTB	1955/6	259,9 cd	1955/6	259,9 cd	238,0 cd	+ 0,4 %	238,8 cd
DAMW	m(61)	265,5	1955/6	267,4	244,9	- 0,7	243,1
NBS			1937/8				243,0
NRC	1960/1	262,6	1960/1	262,6	240,5	+ 0,5	241,8
CNAM	m(52/57)	260,5	1950/1	260,0	238,0		
ETL	m(52/57)	263,5	1955	263,3	241,1	- 0,2	240,5
NPL	1937	265,2	1937	265,2	242,8	- 0,4	241,9
INM	1947	261,8	1947	261,8	239,7	- 0,2	239,2
						<u>- 0,1</u>	

"Groupe de référence BIPM 1961" : 241,3 cd en unité m(61) } R = 0,915 7
 "Groupe de référence BIPM 1969" : 263,5 cd en unité m(61)

Unité DAMW (1955/6) = Unité m(61) x 0,993
 Unité CNAM (1950/1) = Unité m(52/57) x 1,002
 Unité ETL (1955) = Unité m(52/57) x 1,001

TABLEAU 11

FLUX LUMINEUX A 2793 K

		Valeur photométrique du "Groupe de référence BIPM 1969"				Valeur photométrique du "Groupe de référence BIPM 1961"				
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	comparaison 1969	(6)	(7)	(8)	(9)	comparaison 1957
PTB	1955/6	2450,2 lm	1955/6	2450,2 lm	2698,9 lm	+ 0,2 ‰	2704,8 lm	- 0,4 ‰	2692,8 lm	
DAMW	m(61)	2477,7	1955/6	2470,3	2721,0	0,0	2721,7	- 1,1	2692,8	
NBS	1967	2494,1	1937/8	2487,9	2740,4	- 0,4	2730,2	0,0	2730,0	
NRC	1967	2462,2	1953	2464,7	2714,9	+ 0,2	2721,4	- 0,2	2715,4	
CNAM	m(52/57)	2485,0	1950/1	2492,5	2745,5	0,0	2745,5	0,0	2746,0	
ETL	1955	2491,1	1939	2488,5	2741,1	+ 0,7	2760,8	- 0,8	2737,8	
NPL	1937	2470,8	1937	2470,8	2721,6	+ 0,2	2725,7	- 0,3	2717,8	
IMM	1947	2475,5	1947	2475,5	2726,8	+ 0,5	2741,4	+ 0,1	2745,4	
						+ 0,2			- 0,3	

"Groupe de référence BIPM 1961" : 2743,5 lm en unité m(52) } R = 1,101 5
 "Groupe de référence BIPM 1969" : 2490,6 lm en unité m(52) }

Unité DAMW (1955/6) = Unité m(61) x 1,003
 Unité NBS (1967) = Unité NBS (1937/8) x 0,997 5
 Unité NRC (1967) = Unité NRC (1961) x 0,992 = Unité NRC (1953) x 1,001
 Unité CNAM (1950/1) = Unité m(52/57) x 0,997
 Unité ETL (1955) = Unité ETL (1939) x 0,999

**Comparaison des unités relatives
des groupes de lampes étalons destinés à la détermination
de l'intensité lumineuse et du flux lumineux du D.A.M.W.,
et qui ont participé à la 4^e comparaison internationale (1962)
du B.I.P.M.**

Par B. FISCHER

Deutsches Amt für Messwesen und Warenprüfung (Allemagne)

Zusammenfassung

Ein Vergleich der relativen Einheiten der Lampengruppen, die am 4. internationalen Vergleich des BIPM beteiligt und entsprechend der vom BIPM festgelegten Mittelwerte korrigiert worden waren, wurde durchgeführt. Neben der goniophotometrischen Methode, bei der ein $V(\lambda)$ -angepasster Empfänger benutzt wurde, dessen Empfindlichkeitsabweichung von der CIE-Augenempfindlichkeitsverteilung bekannt war, wurde die spektralphotometrische Methode angewendet. Es konnten nicht nur die Lichtstromlampengruppen an die Lichtstärkelampengruppen angeschlossen werden, sondern es liessen sich auch gleichzeitig Lichtstärke- und Lichtstromlampengruppen untereinander vergleichen.

Die Messungen wurden zwischen den Jahren 1967 und 1970 mehrfach wiederholt. Die Abweichungen der Messergebnisse (siehe Tabelle), die nach den zwei Messmethoden erzielt wurden, lagen innerhalb $\pm 0,1$ %. Grössere Abweichungen waren immer auf inkonstantes Verhalten der Normallampen zurückzuführen. Eindeutig war, dass Lampen, die bei $T_v = 2859$ K gemessen wurden, sehr unbefriedigend reproduzierbare Werte lieferten. Es wird deshalb vorgeschlagen, die Lichtstärkelampengruppe der hohen Temperatur beim nächsten Vergleich, ebenfalls wie beim Lichtstrom, bei $T_v = 2793$ K einzumessen. Ausserdem wird empfohlen, die relativen Einheiten der einzelnen Lampengruppen vor dem nächsten Vergleich in den beteiligten Staatsinstituten auf eine noch festzulegende Bezugslampengruppe zu korrigieren.

Résumé

On a effectué une comparaison des unités relatives des groupes de lampes qui ont participé à la 4^e comparaison internationale du B.I.P.M. et dont les valeurs avaient été corrigées conformément aux unités moyennes établies au B.I.P.M. Outre la méthode goniophotométrique, pour laquelle on a utilisé un récepteur $V(\lambda)$ dont on connaissait les écarts à la courbe de l'efficacité lumineuse relative spectrale pour l'observateur de référence photométrique C.I.E., on a également employé la méthode spectrophotométrique. Ces mesures ont permis, non seulement de rattacher les étalons de flux lumineux aux étalons d'intensité lumineuse, mais encore de comparer entre eux les étalons d'intensité lumineuse d'une part, et les étalons de flux lumineux d'autre part.

On a répété plusieurs fois les mesures de 1967 à 1970 (voir tableau). Les écarts sur les résultats provenant des deux méthodes de mesure sont généralement inférieurs à $\pm 0,1$ %. Les écarts plus grands sont à attribuer à l'instabilité des lampes étalons. C'est la seule explication pour les lampes fonctionnant à 2859 K qui montrèrent une reproductibilité très insuffisante. C'est la raison pour laquelle on estime qu'on devrait, lors de la prochaine comparaison internationale, faire fonctionner les étalons d'intensité lumineuse à température de couleur élevée à 2793 K, comme on le fait pour les étalons de flux lumineux. En outre, on devrait recommander de corriger, dans chaque laboratoire national et avant la prochaine comparaison, les unités relatives des différents groupes de lampes à partir d'un groupe de référence bien établi.

Représentation de l'unité relative

Année de mesure	Intensité lumineuse			Flux lumineux	
	2045 K	2357 K	2859 K	2357 K	2793 K
1967	- 0,5 %	0	- 1,7 %	+ 0,4 %	+ 1,4 %
1969	- 0,3	0	- 1,7	+ 0,5	+ 0,7
1970	- 0,1	0	- 1,7	+ 0,4	+ 0,7

(Mai 1971)

Conversion des grandeurs énergétiques en grandeurs photométriques

Par J. A. ter HEERDT et G. A. W. RUTGERS

Laboratoire de Physique, Rijksuniversiteit, Utrecht (Pays-Bas)

I. INTRODUCTION

Pour la conversion des grandeurs énergétiques en grandeurs photométriques on doit utiliser la courbe $V(\lambda)$, qui a été définie par la C.I.E. au moyen d'un tableau de valeurs de 10 en 10 nanomètres [1]. Pour calculer le produit d'une courbe énergétique S_λ et de la courbe $V(\lambda)$, on doit connaître les grandeurs énergétiques aux mêmes longueurs d'onde que $V(\lambda)$, ou l'on doit interpoler $V(\lambda)$ pour les longueurs d'onde où l'on connaît S_λ (les deux éventuellement). Un tableau de $V(\lambda)$ de 1 en 1 nanomètre a aussi été publié par la C.I.E. [2]. Néanmoins, ce tableau ne suffit pas encore quand on veut utiliser une procédure d'intégration, autre qu'une méthode de sommation pour des points équidistants, à l'aide d'un ordinateur. Une telle procédure serait facilitée si l'on pouvait représenter $V(\lambda)$ par une fonction continue de λ .

Dans cet article nous présentons une méthode d'approximation, basée sur le programme ORTHOFIT en ALGOL-60, et exécutée sur le EL-X8 de l'Université. Nous avons appliqué cette approximation au calcul de quelques grandeurs, dérivées du rayonnement d'un corps noir, à savoir la luminance lumineuse L_v et l'efficacité K en fonction de la température T , ainsi qu'au calcul de l'éclairement lumineux produit par une lampe étalon

d'éclairement énergétique spectral (paragraphe III). Des suggestions pour d'autres applications sont indiquées au paragraphe IV.

II. MÉTHODE D'APPROXIMATION

II.1. Nous avons représenté la courbe $V(\lambda)$ par une fonction exponentielle $\exp [p_k(x)]$, où $p_k(x)$ est un polynôme de degré k^* et x la variable liée à la longueur d'onde. $p_k(x)$ a été déterminé à l'aide d'un programme, écrit en ALGOL par K. Delcour [3] et nommé ORTHOFIT. D'après ce programme, on détermine pour une série de couples $(x_1, y_1), (x_2, y_2) \dots (x_n, y_n)$, un polynôme en x de degré k , qui représente les valeurs de y le mieux possible (selon la règle des moindres carrés).

ORTHOFIT utilise un système g_p de polynômes de degré $p = 0, 1, \dots, k$, qui sont orthogonaux en ce qui concerne la sommation de leurs produits aux points

$$x'_i = x_i - D, \quad (i = 1, 2, \dots, n) ;$$

D désigne la distance comptée sur l'abscisse entre l'origine et la moyenne des valeurs extrêmes des points x_i . On doit choisir une valeur de k d'avance.

Les polynômes g_p suffisent à une relation de récurrence, qui est utilisée pour le calcul de la fonction. La méthode d'approximation utilisée dans le programme ORTHOFIT est empruntée à Forsythe [4]. Pour calculer les valeurs de la fonction qui représente $V(\lambda)$ nous avons utilisé le programme VALOFIT [5]. Avec ce programme on peut calculer la fonction en chaque point avec les valeurs des polynômes trouvées lors de l'exécution d'ORTHOFIT.

Une valeur de $k = 24$ a été utilisée dans le domaine 390-780 nm et de $k = 32$ dans le domaine 360-820 nm. Probablement, on peut optimiser k , mais il est difficile de définir un critère objectif pour choisir une valeur optimale de k .

Le tableau I donne les résultats du calcul pour le domaine 390-780 nm, comparés à la courbe $V(\lambda)$ de la C.I.E. 1924 [1] (voir colonne (1)). Pour fournir les données à l'ordinateur, nous avons utilisé les valeurs de $V(\lambda)$ de 10 en 10 nanomètres du tableau III de la référence [2]. Les valeurs interpolées de $V(\lambda)$ pour les longueurs d'onde intermédiaires ([2], tableau II), sont données dans la colonne (2b) du tableau I. Les valeurs calculées pour les longueurs d'onde choisies initialement pour la courbe

* Pour une courbe de Gauss par exemple, $p_i = a(x-x_i)^2$; $k = 2$

C.I.E. sont mentionnées dans la colonne (3a) et celles pour les longueurs d'onde intermédiaires dans la colonne (3b). Finalement, les valeurs de (3a) et (3b), arrondies à la même décimale que $V(\lambda)$ de la colonne (1), sont mentionnées dans la colonne (4). On voit que les écarts entre les valeurs des colonnes (1) et (4) ne dépassent pas 1 % dans la plupart des cas.

En étendant le domaine spectral de 360 à 820 nm, l'approximation avec $k = 24$ donne des écarts considérables ; aussi avons nous essayé une approximation avec $k = 32$. Dans ce cas, les résultats pour les points choisis initialement pour $V(\lambda)$ sont meilleurs, mais pour les longueurs d'onde intermédiaires les écarts observés aux extrémités du domaine spectral restent trop grands pour permettre une intégration. Cependant, comme on le verra au paragraphe III, on peut se limiter dans la plupart des calculs au domaine 380-780 nm. Le programme de l'ordinateur est disponible pour les lecteurs intéressés par les détails du calcul.

II.2. On peut utiliser la même méthode pour représenter d'autres grandeurs, par exemple la répartition spectrale de l'éclairement énergétique d'une source de lumière donnée. Nous avons appliqué la méthode à une lampe étalon du N.B.S. [6]. Dans ce cas, $k = 12$ suffit. Les résultats du calcul sont indiqués au tableau II dans lequel $E_{e,\lambda}$ est l'éclairement énergétique provenant de l'étalonnage (précision 8 % pour les longueurs d'onde ultraviolettes les plus courtes et 3 % pour les longueurs d'onde visibles et infrarouges), et $E_{ap,\lambda}$ est l'éclairement énergétique calculé. Les écarts entre $E_{e,\lambda}$ et $E_{ap,\lambda}$ sont inférieurs à la précision des valeurs de $E_{e,\lambda}$.

III. APPLICATIONS

Les intégrations décrites dans ce paragraphe ont été faites avec les programmes QAD [7] ou GAUSLEG [8] en ALGOL. Avec ces programmes on peut calculer l'intégrale finie d'une fonction continue, avec une tolérance fixée d'avance. Pour juger de la qualité des résultats obtenus avec ORTHOFIT, on peut les comparer avec les résultats obtenus par intégration selon les méthodes usuelles.

III.1. Spectre équiénergétique

Le produit de $V(\lambda)$ et du spectre équiénergétique est, après intégration, une épreuve simple de la précision globale du procédé d'approximation dans l'ensemble du domaine visible.

(a) $\int_{380\text{ nm}}^{780\text{ nm}} V(\lambda) d\lambda$ (par la méthode ORTHOFIT-QAD) : 106,858 20

(b) $\sum_{380\text{ nm}}^{780\text{ nm}} V(\lambda) \Delta\lambda$ (courbe CIE avec $\Delta\lambda = 10\text{ nm}^*$) : 106,857 79

La différence relative est $\approx 4 \times 10^{-6}$.

L'extension du domaine spectral aux limites 360 et 820 nm porte la somme (b) à 106,858 09, soit un écart de $3 \times 10^{-4} \%$. Cet écart, qui est inférieur à la précision des mesures énergétiques, justifie l'usage des limites de 380 et 780 nm dans la plupart des cas pratiques.

III.2. Calcul de K_m

La valeur de l'efficacité lumineuse spectrale maximale K_m est, selon la définition de l'étalon primaire de lumière :

$$(1) \quad K_m = \frac{60 \times 10^4}{\int_{380\text{ nm}}^{780\text{ nm}} L_{e,\lambda}(T_{Pt}) V(\lambda) d\lambda} \quad (\text{unité : lm/W}),$$

où $L_{e,\lambda}(T_{Pt})$ est la luminance énergétique spectrale du corps noir au point de congélation du platine T_{Pt} . Dans l'Échelle Internationale Pratique de Température de 1968 [9], $T_{Pt} = 2045\text{ K}$ et $c_2 = 1,438\ 8 \times 10^{-2}\text{ m}\cdot\text{K}$; $c_1 = 2\pi h c^2 = 3,741\ 5 \times 10^{-16}\text{ W}\cdot\text{m}^2\text{ [10]}$.

Les résultats du calcul de K_m selon trois méthodes différentes, ainsi que le résultat de deux auteurs sont les suivants :

K_m d'après	{	ORTHOFIT-GAUSLEG	672,69 lm/W
		$\sum V(\lambda) L_{e,\lambda}(T_{Pt}) \Delta\lambda$ ($\Delta\lambda = 10\text{ nm}$)	672,68
		la règle de Simpson [11] ($\Delta\lambda = 10\text{ nm}$)	672,98
		Preston [12] et Krochmann [13] ($\Delta\lambda = 1\text{ nm}$) ..	673

Les valeurs extrêmes de ces nombres diffèrent de moins de 0,05 %, ce qui est inférieur à la précision expérimentale de la grandeur elle-même. Ainsi, dans ce cas, la méthode ORTHOFIT-GAUSLEG est bien utilisable.

III.3. Calcul de K et L_v d'un corps noir

Une autre application est le calcul de l'efficacité lumineuse K et de la luminance L_v d'un corps noir en fonction de la température

* Méthode recommandée par la C.I.E. [2].

$$(2) \quad K = L_v(T) / L_e(T),$$

où L_e est la luminance énergétique du corps noir. D'après la loi de Stefan-Boltzmann :

$$(3) \quad L_e = \frac{\sigma T^4}{\pi} \quad (\text{unité : W/(m}^2 \cdot \text{sr)}), \quad \text{avec } \sigma = \frac{\pi^4 c_1}{15c_2^4} \quad (\text{unité : W/(m}^2 \cdot \text{K}^4));$$

pour c_1 et c_2 voir III.2.

L_v a été calculé à l'aide d'ORTHOFIT et GAUSLEG par l'expression

$$(4) \quad L_v(T) = K_m \int_{380nm}^{780nm} L_{e,\lambda}(\lambda, T) V(\lambda) d\lambda \quad (\text{unité : lm/(m}^2 \cdot \text{sr)}).$$

Les résultats sont indiqués au tableau III. Par comparaison nous avons cité les valeurs récentes de Helwig et Krochmann [14] qui diffèrent des nôtres de 2 % à 1000 K et de 1,1 % à 10 000 K, parce que ces auteurs ont utilisé $K_m = 680 \text{ lm/W}$ et $c_2 = 1,438 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$. Avec les mêmes constantes, les résultats auraient été identiques.

III.4. L_v en fonction de T

On peut représenter L_v en fonction de T par une expression proposée d'abord par Geiss [15, 16, 14]:

$$(5) \quad \log \frac{L_v}{L'_v} = a + \frac{b}{T} + \frac{c}{T^2}, \quad \text{avec } L'_v = 1 \text{ cd/m}^2.$$

Nous avons déduit les constantes a, b et c des valeurs de L_v

(voir III.3) par la méthode des moindres carrés. En utilisant L_v aux températures de la série 1500, 1600, ... 3200 K, on trouve pour le domaine de 1500 à 3200 K :

$$\begin{aligned} a &= 11,212 \ 664 \ 796 \ 4 \\ b &= -1,143 \ 850 \ 642 \ 56 \times 10^4 \ \text{K} \\ c &= 6,650 \ 628 \ 077 \ 99 \times 10^5 \ \text{K}^2 \end{aligned}$$

Avec les températures 1500, 2000, 2500, ... 10 000 K, on trouve pour le domaine de 1500 à 10 000 K :

$$\begin{aligned} a &= 11,265 \ 248 \ 854 \ 9 \\ b &= -1,170 \ 642 \ 138 \ 83 \times 10^4 \ \text{K} \\ c &= 9,605 \ 945 \ 632 \ 54 \times 10^5 \ \text{K}^2 \end{aligned}$$

La différence entre L_v d'après (5) et L_v d'après (4) est $\approx 0,07 \%$ à 1500 K ; à 3000 K, les différences sont $\approx 0,01 \%$ (premier cas d'approximation) et $\approx 2 \%$ (deuxième cas d'approximation).

III.5. Calcul de l'éclairement

Dans le paragraphe II.2, nous avons déjà donné une approximation de la répartition spectrale d'énergie d'une lampe étalon du N.B.S. En multipliant cette approximation par celle de $V(\lambda)$, on peut calculer l'éclairement lumineux d'un plan à une certaine distance de la lampe. Pour la lampe donnée, nous avons calculé un éclairement de 8596 lux à une distance de 50 cm. La sommation selon la règle de Simpson donne 8561 lux. La différence relative est $\approx 0,4 \%$.

IV. AUTRES APPLICATIONS

Nous pensons que la même méthode d'approximation peut être appliquée à la courbe scotopique $V'(\lambda)$.

D'autres applications d'approximation de la courbe $V(\lambda)$ sont encore possibles :

a) Mesures spectrales avec correction de $V(\lambda)$ pour travailler en temps réel avec l'ordinateur.

b) Calcul de L_v d'une lampe à ruban de tungstène, analogue au calcul de L_v pour le corps noir. Dans ce cas, il serait nécessaire de représenter d'abord la répartition spectrale de la luminance énergétique selon ORTHOFIT.

c) Calcul de la répartition spectrale d'énergie du rayonnement d'une lampe à ruban de tungstène, la température de couleur et l'intensité lumineuse étant données, comme l'a fait récemment Jones [17].

d) Calcul de l'éclairement, après passage de la lumière à travers un filtre interférentiel. La transmission spectrale $\tau(\lambda)$ d'un tel filtre peut être représentée par une expression de la forme :

$$(6) \quad \tau(\lambda) = \frac{\tau_{\max}}{1 + c \cdot \sin^2(\pi \lambda_0 / \lambda)} .$$

Les auteurs remercient vivement H. de Vries et G. Bakker de l'Electronisch Rekencentrum de l'Université pour leurs nombreux conseils pendant la préparation des programmes de l'ordinateur.

BIBLIOGRAPHIE

1. Vocabulaire International de l'Éclairage, Publ. CIE N° 17 (E-1.1), 1970, p. 51.
2. Principles of light measurements, Publ. CIE N° 18 (E-1.2), 1970.
3. DELCOUR (K.), Programma-catalogus Electronisch Rekencentrum, Utrecht, no.ercai-06.
4. FORSYTHE (G.E.), *J. Soc. Industr. Appl. Math.*, 5, 1957, p. 34.
5. DELCOUR (K.), Programma-catalogus Electronisch Rekencentrum, Utrecht, no.ercai-08.
6. STAIR (R.), SCHNEIDER (W.E.) and JACKSON (J.K.), *Appl. Optics*, 2, 1963, p. 1151.
7. Math. Centrum Amsterdam, Procedure AP 251.
8. VORST (H. van der), Programma-catalogus Electronisch Rekencentrum, Utrecht, no.ercin-01.
9. *Comptes rendus 13^e Conférence Générale Poids et Mesures*, 1967-1968, Annexe 2 ; *Metrologia*, 5, 1969, p. 35.
10. COHEN (E.R.) and DUMOND (J.W.N.), *Rev. Mod. Phys.*, 37, 1965, p. 590.
11. Handbook of Chemistry and Physics, 49th ed. (1968-1969), p. A-259.
12. PRESTON (J.S.), *Lighting Research and Technology*, 2, 1969, p. 248.
13. KROCHMANN (J.), *Optik*, 32, 1970, p. 205.
14. HELWIG (H.J.) und KROCHMANN (J.), *Lichttechnik*, 17, 1965, p. 13A.
15. GEISS (W.), *Das Licht*, 13, 1943, p. 33.
16. RUTGERS (G.A.W.) and DE VOS (J.C.), *Physica*, 20, 1954, p. 715.
17. JONES (O.C.), *Appl. Phys.*, 3, 1970, p. 1967.

TABLEAU I (k = 24)

λ (nm)	V(λ) (CIE 1924)	V(λ) (CIE 1970, [2])			V(λ) calculé		V(λ) abrégé déduit de 3a et 3b
		1	2a	2b	3a	3b	
390	.0001	.0001200000			.000119999		.0001
395	.0004	.0003960000	.0002170000		.000396011	.000201901	.0002
400	.0012	.001210000	.0006400000		.001209729	.000701959	.0004
405	.0040	.004000000	.002180000		.004003977	.002173510	.0007
410	.0116	.01160000	.007300000		.011567626	.007109193	.0012
415	.023	.02300000	.01684000		.023111392	.017025979	.0022
420	.038	.03800000	.02980000		.037854138	.029886007	.0040
425	.060	.06000000	.04800000		.059816179	.047662888	.0071
430	.091	.09098000	.07390000		.092052557	.074566132	.0116
435	.139	.1390200	.1126000		.137441142	.112663629	.0170
440	.208	.2080200	.1693000		.207988947	.168307361	.023
445	.323	.3230000	.2586000		.325741770	.259589585	.030
450	.503	.5030000	.4073000		.502092135	.407326350	.038
455	.710	.7100000	.6082000		.704255488	.604009697	.048
460	.862	.8620000	.7932000		.866503921	.793832097	.060
465	.954	.9540000	.9148501		.957023051	.920385377	.075
470							.092
475							.113
480							.137
485							.168
490							.208
495							.260
500							.326
505							.407
510							.502
515							.604
520							.704
525							.794
530							.867
535							.920
540							.957

TABLEAU II

Répartition de l'éclairement énergétique spectral d'une lampe

λ (nm)	$E_{e,\lambda}$ (étalonnage)	$E_{ap,\lambda}$ (calculé)	Δ (%)
250	.0200	.0203	1.50
260	.0356	.0356	.00
270	.0600	.0591	-1.50
280	.0956	.0938	-1.88
290	.144	.1425	-1.04
300	.207	.2084	.67
320	.394	.4044	2.63
350	.899	.8992	.02
370	1.38	1.3862	.44
400	2.39	2.3720	-.75
450	4.70	4.6881	-.25
500	7.79	7.7241	-.84
550	11.2	11.2140	.12
600	14.7	14.7920	.62
650	18.0	18.0790	.43
700	20.8	20.7850	-.07
750	22.8	22.7710	-.12
800	24.1	24.0450	-.22
900	24.9	24.8880	-.04
1000	24.3	24.2630	-.15
1100	22.8	22.8070	.03
1200	20.8	20.8700	.33
1300	18.7	18.7360	.19
1400	16.7	16.6510	-.29
1500	14.8	14.7400	-.40
1600	13.0	13.0000	.00
1700	11.3	11.3740	.65
1800	9.85	9.8510	.01
1900	8.53	8.4919	-.44
2000	7.37	7.3620	-.10
2100	6.44	6.4563	.25
2200	5.69	5.7009	.19
2300	5.07	5.0530	-.33
2400	4.58	4.5870	.15
2500	4.19	4.1890	-.02

TABLEAU III

Luminance L_v et efficacité lumineuse K d'un corps noir

T (K)	L_v (cd/m ²)		K (lm/W)	
	Les auteurs	Helwig et Krochmann [14]	Les auteurs	Helwig et Krochmann [14]
1 000	2,655 7	2,706 9	1,471 6 $\times 10^{-4}$	1,500 6 $\times 10^{-4}$
1 500	7,625 7 $\times 10^3$	7,768 5 $\times 10^3$	8,346 7 $\times 10^{-2}$	8,506 9 $\times 10^{-2}$
2 000	4,568 4 $\times 10^5$	4,645 0 $\times 10^5$	1,582 1	1,609 4
2 500	5,540 1 $\times 10^6$	5,625 5 $\times 10^6$	7,858 8	7,983 6
3 000	2,976 9 $\times 10^7$	3,020 2 $\times 10^7$	20,365	20,671
3 500	9,988 3 $\times 10^7$		36,882	
3 600	1,223 1 $\times 10^8$	1,240 0 $\times 10^8$	40,352	40,925
4 000	2,490 6 $\times 10^8$	2,523 9 $\times 10^8$	53,909	54,655
4 500	5,089 9 $\times 10^8$		68,779	
5 000	9,045 2 $\times 10^8$	9,159 9 $\times 10^8$	80,193	81,248
5 500	1,451 8 $\times 10^9$		87,915	
6 000	2,158 9 $\times 10^9$	2,185 3 $\times 10^9$	92,305	93,477
6 500	3,027 1 $\times 10^9$		93,966	
7 000	4,053 0 $\times 10^9$	4,101 3 $\times 10^9$	93,537	94,694
7 500	5,230 1 $\times 10^9$		91,593	
8 000	6,549 8 $\times 10^9$	6,626 2 $\times 10^9$	88,606	89,681
8 500	8,002 8 $\times 10^9$		84,950	
9 000	9,579 2 $\times 10^9$	9,689 2 $\times 10^9$	80,902	81,621
9 500	1,127 0 $\times 10^{10}$		76,667	
10 000	1,306 5 $\times 10^{10}$	1,321 3 $\times 10^{10}$	72,393	73,247

TABLE DES MATIÈRES

COMITÉ CONSULTATIF DE PHOTOMÉTRIE 7^e Session (1971)

	Pages
	P
Notice historique	5
Liste des membres	7
Ordre du jour	10
Rapport au Comité International des Poids et Mesures, par H. Korte.	11
Hommage à la mémoire de deux membres décédés : M. Debure (1969) et O. Reeb (1971). Démission de W. D. Wright, membre spécialiste	12
Travaux sur l'étalon primaire (Rapport du « Groupe de travail de l'étalon primaire photométrique ». Travaux effectués au D.A.M.W., à l'I.M.M., au N.S.L. et au N.P.L. Lampe à corps noir du N.P.L. Adoption de la <i>Recommandation P 2</i>)	12
Température du point de congélation du platine (Intérêt de nouvelles déterminations de cette température; détermination récente du N.P.L. Adoption de la <i>Recommandation P 1</i>)	13
Radiométrie absolue (Possibilités de la radiométrie absolue pour définir la candela; valeurs de K_m ; radiomètres absolus. Adoption de la <i>Recommandation P 3</i>)	13
Constante de Stefan-Boltzmann (Détermination récente de cette constante au N.S.L.)	14
Travaux de spectrophotométrie (Travaux effectués au D.A.M.W., au N.B.S. et au N.R.C.; modification de la valeur des unités photométriques du N.B.S. et du N.R.C.)	14
Récepteur $V(\lambda)$ (Travaux de la P.T.B. et du N.S.L. Approximation de la courbe $V(\lambda)$ pour le calcul sur ordinateur des grandeurs photométriques à partir des grandeurs énergétiques)	14
Comparaisons internationales (Compte rendu sur la 5 ^e comparaison des étalons nationaux d'intensité et de flux lumineux effectuée au B.I.P.M.)	14

Unification internationale des unités photométriques (Aucun ajustage des valeurs attribuées aux étalons nationaux n'est actuellement envisagé)	15
Qualité des lampes étalons (Travaux poursuivis dans les laboratoires pour améliorer la qualité des étalons d'intensité lumineuse)	15
Comparaisons internationales futures (Programme envisagé)	15
Rattachement du lumen à la candela (Travail effectué au N.P.L.)	16
Comparaison internationale de lampes étalonnées en unités énergétiques (Présentation des résultats de la comparaison organisée par le N.P.L.)	16
Définition de la candela (Examen des mérites respectifs de la définition actuelle et d'une définition fondée sur une relation convenue entre les grandeurs photométriques et radiométriques. Adoption de la <i>Recommandation</i> P 4)	16
Questions diverses :	
— Situation des Groupes de travail (Dissolution du Groupe de travail de l'étalon primaire photométrique; Groupe de travail de la radiométrie)	17
— Valeurs de $V(\lambda)$ (Emploi des valeurs publiées dans la Publication CIE N° 15)	17
— Modification du nom du C.C.P. qui devient « Comité Consultatif de Photométrie et Radiométrie (C.C.P.R.) »	17
Recommandations présentées au Comité International des Poids et Mesures :	
<i>Recommandation</i> P 1 (1971) (Sur la température thermodynamique du point de congélation du platine)	18
<i>Recommandation</i> P 2 (1971) (Poursuite des études sur les sources de rayonnement du type corps noir)	18
<i>Recommandation</i> P 3 (1971) (Poursuite des études sur les méthodes utilisant des récepteurs thermiques absolus)	19
<i>Recommandation</i> P 4 (1971) (Sur la relation entre les expressions en lumens et en watts du flux des rayonnements optiques monochromatiques)	19
<i>Recommandation</i> P 5 (1971) (Changement du nom du C.C.P.)	20
Plan d'étude proposé par le Groupe de travail de la radiométrie	20

Annexes

P 1. Documents présentés à la 7 ^e session du C.C.P.	21
P 2. Rapport du Groupe de travail de l'étalon primaire photométrique au Comité Consultatif de Photométrie (4 ^e réunion, Washington et Ottawa, 1967)	23
P 3. Rapport du Groupe de travail de la radiométrie au Comité Consultatif de Photométrie (1 ^{re} réunion, Moscou, 1966)	26
P 4. Consultation préalable par correspondance (Réponse à un questionnaire du B.I.P.M.)	32
— Réalisation du corps noir au point de congélation du platine; causes d'erreurs (Question 1: p. P 33).	
— Radiométrie et radiomètres absolus (Question 2: p. P 34).	
— Contrôle de la grandeur relative des candelas et des lumens à diverses températures de répartition (Question 3: p. P 35).	
— Lampes photométriques étalons (Question 4: p. P 35).	
— Goniophotomètres automatiques (Question 5: p. P 36).	
— Améliorations aux installations de mesure (Question 6: p. P 37).	
— Utilisation d'ordinateurs (Question 7: p. P 38).	

P 5.	D.A.M.W. (Allemagne). — <i>Étude de l'étalon primaire photométrique au D.A.M.W.</i> , par K.-H. Sümnich	41
P 6.	N.S.L. (Australie). — <i>Eclairement lumineux de l'image de l'étalon primaire photométrique</i> , par W. R. Blevin	49
P 7.	I.M.M. (U.R.S.S.). — <i>Problèmes posés par l'amélioration d'une installation de mesure de l'étalon primaire de lumière</i> , par V. E. Kartachev-skaia et N. M. Kolossova	52
P 8.	N.P.L. (Royaume-Uni). — <i>Utilisation d'une lampe à corps noir comme étalon de température de couleur et de luminance</i> , par O. C. Jones et G. W. Gordon-Smith	63
P 9.	N.P.L. (Royaume-Uni). — <i>Détermination du point de congélation du platine avec le pyromètre photoélectrique du N.P.L. (Résumé)</i> , par T. J. Quinn et T. R. D. Chandler	74
P 10.	N.S.L. (Australie). — <i>Radiomètre absolu pour maintenir la candela</i> , par W. J. Brown et W. R. Blevin	75
P 11.	N.S.L. (Australie). — <i>Filtre $V(\lambda)$ en verre pour réaliser la candela par radiométrie</i> , par J. E. Shaw et W. R. Blevin	81
P 12.	B.I.P.M. — <i>Rapport sur la cinquième comparaison des étalons nationaux d'intensité et de flux lumineux (1969)</i> , par J. Bonhoure	86
P 13.	D.A.M.W. (Allemagne). — <i>Comparaison des unités relatives des groupes de lampes étalons destinés à la détermination de l'intensité lumineuse et du flux lumineux du D.A.M.W., et qui ont participé à la 4^e comparaison internationale (1962) du B.I.P.M. (Résumé)</i> , par B. Fischer	120
P 14.	<i>Conversion des grandeurs énergétiques en grandeurs photométriques</i> , par J. A. ter Heerdt et G. A. W. Rutgers	122



IMPRIMERIE DURAND

28-LUISANT (FRANCE)

Dépôt légal, Imprimeur, 1972, n° 1610

Dépôt légal, Éditeur, 1972, n° 19

ACHEVÉ D'IMPRIMER LE 30-11-1972

Imprimé en France