

COMITÉ CONSULTATIF DE PHOTOMÉTRIE ET RADIOMÉTRIE

SESSION DE 1975

ISBN 92-822-2038-9

COMITÉ INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES

COMITÉ CONSULTATIF
DE PHOTOMÉTRIE ET RADIOMÉTRIE

8^e SESSION — 1975

(3-5 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* (BIPM) a été créé par la *Convention du Mètre* signée à Paris le 20 mai 1875 par dix-sept États, lors de la dernière séance de la Conférence Diplomatique du Mètre. Cette Convention a été modifiée en 1921.

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

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

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

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

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

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

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

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

Une trentaine de physiciens ou techniciens travaillent dans les laboratoires du Bureau International; ils font des recherches métrologiques ainsi que des mesures dont les résultats sont consignés dans des certificats portant sur des étalons des grandeurs ci-dessus. Le budget annuel du Bureau International est de l'ordre de 4 000 000 de francs-or, soit environ 1 600 000 dollars U.S.

(1) Au 31 décembre 1975, quarante-quatre États sont membres de cette Convention : Afrique du Sud, Allemagne (Rép. Fédérale d'), Allemande (Rép. Démocratique), Amérique (É.-U. d'), Argentine (Rép.), Australie, Autriche, Belgique, Brésil, Bulgarie, Cameroun, Canada, Chili, Corée, Danemark, Dominicaine (Rép.), Égypte, Espagne, Finlande, France, Hongrie, Inde, Indonésie, Iran, Irlande, Italie, Japon, Mexique, Norvège, Pakistan, Pays-Bas, Pologne, Portugal, Roumanie, Royaume-Uni, Suède, Suisse, Tchécoslovaquie, Thaïlande, Turquie, U.R.S.S., Uruguay, Venezuela, Yougoslavie.

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

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

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

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

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

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

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

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

Comité International des Poids et Mesures

<i>Secrétaire</i>	<i>Vice-Président</i>	<i>Président</i>
J. DE BOER	U. STILLE	J. V. DUNWORTH

LISTE DES MEMBRES

DU

COMITÉ CONSULTATIF
DE PHOTOMÉTRIE ET RADIOMÉTRIE

Président

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

Membres

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

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

CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET MÉTIERS [CNAM]: Institut
National de Métrologie [INM], *Paris*.

ELECTROTECHNICAL LABORATORY [ETL], *Tokyo*.

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

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

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

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

NATIONAL PHYSICAL RESEARCH LABORATORY [NPRL], *Pretoria*.

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

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

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

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

K. YOSHIÉ, University of Chiba, *Chiba-City* (Japon).

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

ORDRE DU JOUR DE LA SESSION

1. Partage des responsabilités entre le CCPR, le BIPM et la CIE.
 2. Nouvelle définition de l'unité SI de base de la photométrie.
 3. Étalon primaire ; nouvelles réalisations du corps noir.
 4. Température thermodynamique du point de congélation du platine.
 5. Sources de rayonnement de type corps noir.
 6. Récepteurs thermiques absolus ; progrès réalisés.
 7. Filtres en verre ; récepteurs $V(\lambda)$.
 8. Qualité des lampes étalons.
 9. Comparaisons internationales futures.
 10. Information sur les travaux réalisés sous l'égide de la Commission Internationale de l'Éclairage (TC-1.2).
 11. Questions diverses.
 12. Publication des documents.
-

COMITÉ CONSULTATIF
DE PHOTOMÉTRIE ET RADIOMÉTRIE *

8^e SESSION (1975)

RAPPORT

AU

COMITÉ INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES

par E. J. GILLHAM, Rapporteur

Le Comité Consultatif de Photométrie et Radiométrie (CCPR) s'est réuni pour sa huitième session au National Physical Laboratory, Teddington, où il a tenu quatre séances les 3 et 4 septembre 1975, suivies d'une brève réunion le 5.

Étaient présents :

A. MARÉCHAL, membre du CIPM, Président du CCPR.

Les délégués des laboratoires membres :

Amt für Standardisierung, Messwesen und Warenprüfung,
[ASMW], Berlin (S. NÜNDEL).

Conseil National de Recherches [NRC], Ottawa
(G. WYSZECKI, C.L. SANDERS).

Conservatoire National des Arts et Métiers [CNAM] :

Institut National de Métrologie [INM], Paris (J. BASTIE).

Electrotechnical Laboratory [ETL], Tokyo (N. OOBA).

National Bureau of Standards [NBS], Washington (K.G.
KESSLER, H.J. KOSTKOWSKI, J. GEIST).

National Measurement Laboratory [NML], Chippendale
(W.R. BLEVIN).

National Physical Laboratory [NPL], Teddington (E.J.
GILLHAM, O.C. JONES, F.J.J. CLARKE, J.R. MOORE).

National Physical Research Laboratory [NPRL], Pretoria
(C.J. KOK).

* Nouveau nom donné en octobre 1971 au Comité Consultatif de Photométrie (CCP).

Physikalisch-Technische Bundesanstalt [PTB], Braunschweig (G. BAUER, D. FÖRSTE).

Les membres nominativement désignés :

L. PLAZA, Madrid ; F. ROTTER, Wien ; K. YOSHIE, Tokyo.

Le Directeur du BIPM (J. TERRIEN).

Le délégué d'un laboratoire et deux experts, invités :

Istituto Elettrotecnico Nazionale Galileo Ferraris [IEN], Turin (P. SOARDO).

C. FRÖLICH, Davos ; E. INGELSTAM, Stockholm.

Assistaient aussi à la session : P. GIACOMO et

J. BONHOURS (BIPM).

Absents : Institut de Métrologie D.I. Mendéléév [IMM], Leningrad ; J.M. OTERO.

La session s'est tenue à Teddington afin de permettre aux membres du CCPR d'assister à une réunion préliminaire du Comité Technique TC-1.2 ("Photométrie et radiométrie") de la Commission Internationale de l'Eclairage (CIE), réunion qui avait lieu avant la 18^e Assemblée Générale de cette Commission.

Après un discours d'accueil de J.V. Dunworth, Directeur du National Physical Laboratory et Président du CIPM, le Président du CCPR ouvre la séance.

Mr Terrien, se rapportant à la décision de tenir cette session à Teddington, rappelle qu'il est de règle pour les Comités Consultatifs de se réunir au BIPM à Sèvres. En faisant exception à cette règle, le Bureau International a été poussé par le désir d'accroître la collaboration entre le Bureau, le CCPR et la CIE ; Mr Terrien souligne les profits d'une telle collaboration.

Mr Gillham est désigné comme rapporteur, assisté de MM. Moore et Bonhours comme secrétaires.

1. PARTAGE DES RESPONSABILITÉS ENTRE LE CCPR, LE BIPM ET LA CIE

Mr Sanders présente un document (Annexe P 3) relatif au partage des responsabilités dans les domaines de la radiométrie, de la photométrie et de la colorimétrie. Il conviendrait d'étendre le rôle du CCPR à l'adoption officielle des relations qui permettent d'évaluer les effets visuels du rayonnement, y compris les fonctions de pondération de la CIE. La formulation des fonctions de pondération et de l'ensemble des performances visuelles incombe à la CIE. Le CCPR et le BIPM devraient s'occuper de la réalisation des échelles radiométriques et visuelles

dans les laboratoires nationaux, et de la comparaison de ces échelles. Les besoins en mesure du commerce et de l'industrie et les problèmes posés par les mesures pratiques devraient en revanche relever de la responsabilité de la CIE.

Ce document reçoit l'approbation du Comité comme donnant une description générale des domaines d'intérêt du CCPR, de la CIE et du BIPM ; tout en ne constituant pas une charte officielle, c'est un guide utile pour la répartition des tâches à l'avenir.

*2. NOUVELLE DÉFINITION DE L'UNITÉ PHOTOMÉTRIQUE

Mr Blevin souligne les avantages, exposés en détail dans un document présenté conjointement par le NBS et le NML (Annexe P 4), d'une nouvelle définition de l'unité photométrique en fonction du watt ; il considère comme urgente une décision du Comité sur cette question. Les réponses à l'enquête faite auprès des laboratoires nationaux par le BIPM en préparation de cette session laissent apparaître un accord général sur le principe de la nouvelle définition ; beaucoup pensent toutefois qu'une proposition formelle serait prématurée étant donné que les résultats expérimentaux dont on dispose sur la relation entre le lumen et le watt sont insuffisants pour assurer la continuité de l'unité photométrique. Mr Blevin n'est pas d'accord sur ce dernier point ; il pense que, d'après les résultats dont on dispose, les relations entre les réalisations des unités photométriques et l'unité SI seraient connues avec au moins autant d'exactitude avec la nouvelle définition proposée qu'avec celle qui est actuellement en vigueur. Sollicité de donner l'avis du BIPM, Mr Terrien dit qu'il est d'accord sur le principe de la nouvelle définition mais que la question de son adoption doit être résolue par ceux qui seront responsables de sa mise en oeuvre, c'est-à-dire par les laboratoires nationaux, en liaison avec la CIE représentant les intérêts des utilisateurs des mesures photométriques.

Le Comité exprime à nouveau son adhésion au principe de la nouvelle définition (*Recommandation P 1* (1975), p. P 11) ; la discussion se porte sur la formulation de celle-ci et en particulier sur la proposition de Blevin et Steiner (Annexe P 4) de remplacer la candela par le lumen comme unité de base du SI pour la photométrie. Cette proposition rencontre une forte opposition de la part de Mr Terrien ; à son avis, bien qu'il existe plusieurs précédents au changement de définition d'une unité, le changement de l'unité elle-même serait préjudiciable à la répu-

tation du SI, système destiné non seulement aux besoins scientifiques mais également aux usages courants dans le monde entier. Mr Kessler estime au contraire que l'une des objections à l'unité actuelle vient de la difficulté que rencontrent les profanes pour comprendre le concept d'intensité lumineuse. En revanche le concept de flux lumineux, équivalent photométrique de la puissance, est aisément compréhensible. D'autres membres appuient cet argument, et on arrive à la conclusion que les avantages du lumen comme unité de base de la photométrie sont suffisants pour justifier une recommandation dans ce sens (*Recommandation P 2 (1975)*, p. P 11).

Une question se pose : à quelle longueur d'onde faut-il définir la relation entre le lumen et le watt ? On se met d'accord pour choisir la longueur d'onde à laquelle la fonction $V(\lambda)$ prend la valeur unité, c'est-à-dire 555 nm dans l'air normal. Toutefois, afin d'éviter de faire référence à l'air normal dans la nouvelle définition, il faudra spécifier non pas la longueur d'onde mais la fréquence correspondante, c'est-à-dire $540,015 4 \times 10^{12}$ Hz (*Recommandation P 3 (1975)*, p. P 12).

Le Comité passe ensuite à la question de la valeur de K_m qu'il conviendra d'adopter dans la nouvelle définition. Le tableau I, présenté par Mr Blevin et complété par Mr Bauer, donne les valeurs obtenues par calcul à partir de différentes valeurs de la température de congélation du platine (T_{Pt}), les valeurs les plus récentes déduites de mesures radiométriques dans les échelles photométriques qui existent, et les valeurs obtenues à partir de mesures spectroradiométriques.

Il est décidé que le critère qui présidera au choix de K_m sera la continuité des unités photométriques effectivement réalisées par les laboratoires nationaux et matérialisées dans leur échelle photométrique. On ne sait pas dans quelle mesure ces unités sont bien en accord avec la définition actuelle du SI, et à cet égard les valeurs de K_m obtenues par calcul à partir de T_{Pt} sont moins significatives que les valeurs obtenues par mesure directe. Mr Jones fait remarquer que des travaux récents au NPL avec la lampe à corps noir Quinn-Barber ont indiqué des écarts considérables entre l'échelle photométrique du NPL et l'échelle de température de luminance.

Compte tenu de la dispersion totale d'environ 1,6 % entre les unités photométriques des différents pays, plusieurs membres du Comité sont d'avis qu'on pourrait adopter la valeur admise actuellement pour K_m (680 lm/W) sans nuire à la continuité de l'unité photométrique. Toutefois d'autres membres du Comité,

en même nombre, considèrent qu'il est prématuré d'adopter cette valeur. Après une longue discussion, on se met d'accord sur une proposition faite par Mr Kostkowski pour que, dans deux ans, chaque laboratoire national soumette au Comité la valeur de K_m qu'il préfère ; le Comité prendra alors une décision sur la valeur qu'il convient d'adopter pour une nouvelle définition de l'unité photométrique (*Recommandation P 4 (1975)*, p. P 12).

TABLEAU I

Récentes valeurs de K_m

A) calculées à partir de T_{Pt}

$T_{Pt} = 2045$ K (E IPT-68)	671 lm/W
2041 (NPL, 1972)	687
2043 (NML, 1974)	680
2042 (PTB, 1975)	683
2042 (E IPT-68, édition amendée de 1975)	683

B) à partir de mesures radiométriques

	référence*	
NPL (1963-1964, moyenne)	cd _{NPL}	686 lm/W
NML** (1974)	cd _{moy.}	683
ETL (1975)	cd _{moy.}	683

C) à partir de mesures spectroradiométriques

		référence*	
NPL (1969-1971-1973, moyenne)	$T_c : 2040$ K	cd _{NPL}	671 ± 7 lm/W
NPL (1969-1971, moyenne)	2788	cd _{NPL}	660 ± 7
ETL (1973)	3147	cd _{moy.}	676
PTB (1974)	2859	cd _{moy.}	678

* cd_{moy.} : moyenne des réalisations nationales de la candela (ASMW, NRC, ETL, IMM, NBS, NPL, PTB) ;

cd_{NPL} : réalisation de la candela faite au NPL (cd_{NPL} = 0,994 cd_{moy.}).

** Le NML n'a jamais réalisé effectivement le corps noir au point de congélation du platine ; il utilise des lampes à incandescence étalonnées en candelas au NPL et au BIPM.

On renonce alors à poursuivre la discussion d'une autre proposition suivant laquelle, indépendamment de la redéfinition de l'unité photométrique, le Comité devrait recommander immédiatement une valeur de K_m afin d'assurer en pratique l'uniformité dans les domaines de la photométrie et de la spectroradiométrie.

3. DOCUMENT EXPLICATIF SUR LES UNITÉS ET LES GRANDEURS PHOTOMÉTRIQUES

La relation entre l'unité et la méthode de mesure est bien moins évidente en photométrie que dans les autres domaines de la métrologie. Les grandeurs photométriques font appel aux propriétés spatiales et spectrales du rayonnement ; elles sont souvent mal comprises. Pour cette raison Mr Blevin suggère que, dans deux ans, la recommandation d'une nouvelle définition de l'unité photométrique soit accompagnée d'un document explicatif dans le genre de ce qui a été fait pour l'EIPT-68. On se met d'accord sur la création d'un Groupe de travail, présidé par Mr Wyszecski et comprenant MM. Blevin et Kessler, pour préparer ce document.

4. ADOPTION DES FONCTIONS DE PONDÉRATION DE LA CIE

A la suite des conclusions mentionnées au point 1 concernant les responsabilités du Comité, on décide de recommander au CIPM qu'il sanctionne la fonction de pondération en vision scotopique $V'(\lambda)$ (*Recommandation* P 5 (1975), p. P 13) et les fonctions $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ qui définissent l'observateur de référence colorimétrique CIE 1931 (*Recommandation* P 6 (1975), p. P 13).

5. NOUVELLES RÉALISATIONS DE L'ÉTALON PRIMAIRE

Il n'est fait état d'aucune nouvelle réalisation.

6. TEMPÉRATURE THERMODYNAMIQUE DU POINT DE CONGÉLATION DU PLATINE

Mr Bonhoure indique que le Comité Consultatif de Thermométrie (CCT) a adopté la valeur de 2042 K pour T_{Pt} . Les changements qui en résultent dans l'échelle de température de répartition, quand cette échelle est fondée sur le point de congélation du platine, sont les suivants :

Ancienne valeur ($T_{Pt} = 2045$ K), 2357 K, 2859 K
Nouvelle valeur ($T_{Pt} = 2042$ K), 2353 K, 2853 K.

7. SOURCES DE RAYONNEMENT DE TYPE CORPS NOIR

Mr Jones indique que les travaux du NPL avec la lampe à corps noir Quinn-Barber sont achevés ; comme il a été indiqué au point 2, les résultats laissent à penser qu'il peut y avoir des divergences importantes entre l'échelle photo-

métrique et celle de température de luminance. Mr Kostkowski signale que ces lampes ont été expérimentées au NBS, pour des travaux sur les températures de luminance ; elles se sont révélées instables et l'on ne s'en sert plus.

8. RADIOMÉTRIE ABSOLUE

Mr Fröhlich indique qu'un radiomètre absolu mis au point au Physikalisch-Meteorologisches Observatorium (Davos) pour la mesure du rayonnement solaire permet de mesurer un flux énergétique dans la gamme de 2 à 20 mW avec une incertitude de $\pm 0,04$ mW. A plusieurs reprises, entre 1970 et 1975, on a comparé cet instrument et quatre autres radiomètres absolus mis au point par différents laboratoires (JPL*, NBS, IRM*) pour des travaux sur la rayonnement solaire ; l'écart maximal entre ces cinq instruments était d'environ 1,1 %. Mr Geist indique qu'une comparaison de deux types de radiomètres du NBS, l'un conçu pour des recherches sur les étalons radiométriques et l'autre pour des mesures de puissance de lasers, a montré un accord à mieux que 0,2 %.

Mr Blevin souligne qu'on peut être amené à utiliser des radiomètres absolus, avec un filtre $V(\lambda)$ pour les travaux de photométrie, pour mesurer un éclairage énergétique aussi faible que $30 \mu\text{W}/\text{cm}^2$. Le radiomètre du NML, du type "disque", a une limite de détection tout à fait appropriée (environ 5 nW) ; la principale source d'inexactitude est la résistance thermique du revêtement noir. Le radiomètre de type pyroélectrique présente un certain nombre d'avantages pratiques, comme une réponse rapide et une sensibilité uniforme sur l'ensemble de la surface réceptrice, mais il est peu probable qu'il puisse entrer en concurrence avec les types plus conventionnels de radiomètres aux niveaux les plus élevés d'exactitude.

Mr Maréchal décrit une expérience faite à l'Institut d'Optique (Orsay) sur la pression de rayonnement : on a mesuré le couple de torsion exercé par le passage d'un faisceau laser de 0,2 W sur une lame bi-réfringente suspendue**. La sensibilité du système de détection de la torsion était étonnamment élevée ; si l'on accroissait la torsion en utilisant la réflexion d'un miroir plutôt que la réfraction, il serait pos-

* Jet Propulsion Laboratory (Etats-Unis d'Amérique) ; Institut Royal Météorologique (Belgique).

** ROOSEN (G.) et IMBERT (C.), *Can. J. Phys.*, 52, 1974, p. 1903.

sible de déceler un flux énergétique d'environ $1 \mu\text{W}$. Il semble qu'un radiomètre absolu fondé sur ce principe serait utilisable; il pourrait se substituer à la méthode calorimétrique habituelle, avec des caractéristiques intéressantes.

9. FILTRES EN VERRE ; RÉCEPTEURS $V(\lambda)$

Mr Blevin attire l'attention sur un point qui concerne la réalisation des filtres $V(\lambda)$ utilisés pour la photométrie radiométrique. Si l'on suppose que le rayonnement utilisé est approximativement un rayonnement de Planck, la transmission spectrale du filtre peut s'écarter sensiblement de la courbe $V(\lambda)$ pourvu que la relation entre la puissance transmise par le filtre et le flux lumineux incident soit, en première approximation, indépendante de la température de couleur du rayonnement. (*Comité Consultatif de Photométrie*, 7^e session; 1971, p. 81). Cette condition a été remplie à un degré très satisfaisant par les deux types de filtres en verre que l'on a utilisés dans la réalisation récente de la candela faite au NML (Annexe P 5).

Mr Kok signale la mise au point en Afrique du Sud de nouveaux types de verre auxquels on peut donner des facteurs de transmission spectrale approchant soit $V(\lambda)$ soit $V'(\lambda)$. A l'heure actuelle, toutefois, il est difficile d'obtenir une qualité optique satisfaisante et ces verres en sont encore au stade expérimental.

10. QUALITÉ DES LAMPES ÉTALONS

Mr Clarke décrit une lampe à filament de tungstène à atmosphère gazeuse et à courant élevé qui a été mise au point, en collaboration avec la GEC, pour être utilisée comme étalon de température de couleur et, sous une forme améliorée, comme étalon d'intensité lumineuse (Annexe P 10). La lampe fonctionne à des températures de couleur allant jusqu'à 3 300 K et elle est particulièrement robuste. Le NPL poursuit la mise au point et l'étude de ce type de lampe dans l'espoir qu'il pourra constituer un étalon secondaire satisfaisant d'intensité lumineuse à la température de couleur de 2853 K. Mr Moore parle de travaux de mise au point sur des lampes à ruban à atmosphère gazeuse destinées à servir d'étalons de luminance énergétique spectrale. On a trouvé que les fluctuations de la puissance rayonnée présentées par ce type de lampe, par suite des instabilités des courants de convection, peuvent être nettement réduites au moyen d'une cheminée montée au-dessus du ruban.

Ces travaux, bien qu'ils en soient encore à leur tout début, peuvent amener des améliorations considérables dans le fonctionnement des lampes étalons à atmosphère gazeuse.

11. COMPARAISONS FUTURES

Une suggestion est faite par le NPL pour que la récente comparaison internationale d'étalons d'éclairement énergétique spectral* soit suivie d'une comparaison semblable d'étalons de luminance énergétique spectrale ; une comparaison des étalons photométriques serait également souhaitable en vue de la redéfinition proposée de l'unité photométrique. Mr Kostkowski est d'avis que des comparaisons générales de ce genre devraient faire place à des comparaisons d'un type plus souple, organisées par un laboratoire pilote au lieu du BIPM, et limitées aux quelques laboratoires particulièrement intéressés. L'accord se faisant sur ce point, le NPL propose de jouer le rôle de laboratoire pilote pour une comparaison de luminance énergétique spectrale aussitôt que les travaux de mise au point des lampes à ruban améliorées auront abouti. Le CNAM, l'ETL, le NBS et la PTB sont intéressés par cette comparaison ; le NRC et l'IEN désirent être tenus informés en vue de leur participation éventuelle ; le NBS accepte de participer à une comparaison préliminaire avec le NPL pour contrôler la stabilité des lampes. On est provisoirement d'accord pour que la comparaison couvre le domaine des longueurs d'onde entre 300 nm et 800 nm.

Pour ce qui est des étalons d'intensité lumineuse, Mr Terrien fait remarquer que les étalons à 2042 K sont si stables qu'une comparaison donnerait des résultats semblables à ceux de la dernière comparaison (1969) et serait donc superflue. Par ailleurs, il n'existe pas actuellement de lampe satisfaisante pour une comparaison d'étalons à 2853 K ; cependant, la situation pourra être différente dans un an ou deux quand on connaîtra les résultats des travaux sur la lampe à courant élevé décrite par Clarke. On suggère des échanges de lampes de ce type comme moyen d'évaluer leur stabilité pour une comparaison d'intensité lumineuse ; le NBS et le NML pourraient participer à ces échanges avec le NPL.

Mr Geist dit que certains types de cellules photovoltaïques au silicium ont une sensibilité très stable, au moins dans le domaine des longueurs d'onde de 400 à 900 nm ; une récente comparaison entre des laboratoires américains s'étendant sur une période de six mois l'a prouvé. Ces cellules présentent

* Comparaison organisée par la CIE en 1973.

d'autres caractéristiques intéressantes, telles que l'uniformité de la sensibilité ; en liaison avec des filtres en verre appropriés, elles peuvent s'avérer plus satisfaisantes que les lampes pour des comparaisons internationales de photométrie. Le NBS est prêt à jouer le rôle de laboratoire pilote pour une comparaison de ce type. Le NML serait désireux de collaborer aux études préliminaires des cellules.

12. DIVERS

Développement de la radiométrie au BIPM. - A une question de Mr Sanders concernant le financement des travaux de radiométrie au BIPM, Mr Terrien répond qu'aucun accroissement des fonds destinés à ces recherches n'a été accordé par la Conférence Générale des Poids et Mesures ; toutefois, comme la charge des comparaisons internationales a diminué par rapport à ce qu'elle était auparavant, certains efforts pourraient se porter sur la radiométrie dans l'avenir.

Réunion du CCPR. - Pour procéder au choix de la meilleure valeur à attribuer à K_m suivant les modalités indiquées au point 2, le Comité décide de se réunir à Sèvres, au cours de la première ou de la seconde semaine de septembre 1977 (*Recommandation P 7 (1975)*, p. P 13).

*
* *

Les conclusions du Comité Consultatif en ce qui concerne la redéfinition de l'unité SI de base de la photométrie et le partage des responsabilités entre le CCPR, le BIPM et la CIE ont été présentées à la réunion préliminaire du Comité Technique TC-1.2 de la CIE, le 5 septembre. Ce Comité Technique n'ayant pas formulé de remarques nécessitant de nouvelles discussions, le Comité Consultatif, au cours de sa dernière et très brève réunion, constate seulement que son ordre du jour est épuisé.

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

(12 septembre 1975)

RECOMMANDATIONS
du Comité Consultatif de Photométrie et Radiométrie
présentées
au Comité International des Poids et Mesures

Ces Recommandations concernent :

- l'éventualité d'une nouvelle définition de l'unité SI de base de la photométrie,
 - la sanction par le CIPM des valeurs de $V'(\lambda)$ et de $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$.
- Elles doivent être examinées par le CIPM à sa session de septembre 1976 (voir *Procès-Verbaux CIPM*, 44, 1976).

RECOMMANDATION P 1 (1975)

Le Comité Consultatif de Photométrie et Radiométrie, considérant

- *les arguments exposés par le National Measurement Laboratory (Australie) et le National Bureau of Standards (Etats-Unis d'Amérique) dans l'un des documents qu'ils ont distribués au Comité Consultatif^(*) et en particulier*
 - *l'utilisation croissante de la spectroradiométrie dans les mesures photométriques et dans d'autres mesures optiques,*
 - *l'utilité d'ajouter de nouvelles méthodes aux méthodes traditionnelles de réalisation des unités photométriques,*
- recommande que l'on donne à l'unité SI de base de la photométrie une nouvelle définition qui fournisse une relation numérique exacte et explicitement énoncée entre cette unité photométrique et le watt pour une radiation monochromatique ayant une fréquence spécifiée.*

RECOMMANDATION P 2 (1975)

Le Comité Consultatif de Photométrie et Radiométrie, considérant

- *les arguments exposés par le National Measurement Laboratory (Australie) et le National Bureau of Standards (Etats-Unis d'Amérique) dans l'un des documents qu'ils ont distribués au Comité Consultatif^(*),*
- *la difficulté fréquente et persistante de faire comprendre le concept d'intensité lumineuse,*

* BLEVIN (W.R.) et STEINER (B.), Redéfinition de la candela et du lumen, Annexe P 4 et *Metrologia*, 11, 1975, p. 97 (texte anglais).

- Le fait que le concept de flux lumineux est plus simple, est compris plus facilement et correspond à une grandeur physique bien connue, la puissance,

recommande que l'on remplace l'unité d'intensité lumineuse, la candela, par l'unité de flux lumineux, le lumen, en tant qu'unité SI de base.

RECOMMANDATION P 3 (1975)

Le Comité Consultatif de Photométrie et Radiométrie, considérant

- que l'efficacité lumineuse relative spectrale $V(\lambda)$ a son maximum pour la radiation de longueur d'onde 555 nm dans l'air,

- que la fréquence est une grandeur plus fondamentale que la longueur d'onde,

recommande que l'on redéfinisse l'unité SI de base de la photométrie en utilisant la radiation monochromatique de fréquence $540,015\ 4 \times 10^{12}$ Hz, fréquence qui correspond à la longueur d'onde 555 nm dans l'air normal.

RECOMMANDATION P 4 (1975)

Le Comité Consultatif de Photométrie et Radiométrie, considérant

- que la nouvelle définition recommandée de l'unité SI de base pour la photométrie exige l'adoption préalable d'une valeur de l'efficacité lumineuse spectrale maximale (K_m) en lumens par watt,

- que des recherches sont en cours sur les meilleures valeurs de K_m ,

- que la valeur $K_m = 680$ lumens par watt a été largement utilisée,

recommande

- que les laboratoires nationaux fassent connaître au Bureau International des Poids et Mesures, avant la réunion prévue en 1977 du Comité Consultatif de Photométrie et Radiométrie, la valeur qu'ils préfèrent de l'efficacité lumineuse spectrale, en lumens par watt, pour la radiation de fréquence $540,015\ 4 \times 10^{12}$ Hz,

- que le Comité Consultatif de Photométrie et Radiométrie examine les valeurs proposées, et

- que, s'il n'en est pas décidé autrement, la valeur 680 lumens par watt soit adoptée.

RECOMMANDATION P 5 (1975)

Le Comité Consultatif de Photométrie et Radiométrie, considérant

- que les définitions des grandeurs photométriques, que l'on mesure en unités SI photométriques, reposent sur des fonctions de pondération adoptées par convention,

- que les efficacités lumineuses relatives spectrales $V(\lambda)$ établies par la Commission Internationale de l'Eclairage (CIE) pour la vision photopique ont déjà été sanctionnées par le Comité International des Poids et Mesures (CIPM),

recommande que la fonction correspondante $V'(\lambda)$ établie par la CIE pour la vision scotopique soit elle aussi sanctionnée par le CIPM.

RECOMMANDATION P 6 (1975)

Le Comité Consultatif de Photométrie et Radiométrie, considérant

- que son domaine d'activité a été étendu à la colorimétrie par la 13^e Conférence Générale des Poids et Mesures (1967),

- que l'observateur de référence colorimétrique CIE 1931 est fondamental pour la colorimétrie,

recommande que les composantes trichromatiques spectrales $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ qui définissent l'observateur de référence colorimétrique CIE 1931 soient sanctionnées par le Comité International des Poids et Mesures.

RECOMMANDATION P 7 (1975)

Le Comité Consultatif de Photométrie et Radiométrie, considérant que de nombreux laboratoires expriment l'opinion qu'il est urgent de mettre en oeuvre les Recommandations P 1 à P 4 adoptées à sa session de 1975,

recommande que le Comité Consultatif de Photométrie et Radiométrie se réunisse en 1977 en temps utile pour présenter à la session de 1977 du Comité International des Poids et Mesures les propositions de mise en oeuvre de ces Recommandations.

ANNEXE P 1

**Documents de travail
présentés à la 8^e session du CCPR**

Document
CCPR/

- 75-1 Ordre du jour provisoire.
- 75-2 Consultation préalable par correspondance (Voir Annexe P 2).
- 75-3 NML (Australie), NBS (États-Unis d'Amérique).-
Redefinition of the candela and the lumen, by
W.R. Blevin and B. Steiner (Voir Annexe P 4).
- 75-4 Commentaires au document 75-3, faits par : ASMW, NRC,
CNAM, ETL, IMM, NPL, NPRL, PTB, IEN, BIPM, F. Rotter
(Voir Annexe P 4).
- 75-5 ETL (Japon).- An experimental determination of the
maximum spectral luminous efficacy of radiation, by
H. Katsuyama and H. Kikuchi (Voir le résumé à
l'Annexe P 6).
- 75-6 NRC (Canada).- Suggestions sur le partage des respon-
sabilités entre le CCPR, le BIPM et la CIE, par
C.L. Sanders (Voir Annexe P 3).

Document

CCPR/

- 75-7 NML (Australie).- A radiometric realization of the photometric units, by W.J. Brown (Voir le résumé à l'Annexe P 5).
- 75-8 NML (Australie).- A new NML scale of spectral irradiance, by F.J. Wilkinson (Voir le résumé à l'Annexe P 8).
- 75-9 Réponses au document 75-2, faites par ASMW, NRC, CNAM, ETL, IMM, NBS, NML, NPL, NPRL, PTB, IEN, C. Fröhlich (Voir Annexe P 2).
- 75-10 NRC (Canada).- Review of basis of photometry, by G. Wyszeccki (Voir Annexe P 7).
- 75-11 NBS (États-Unis d'Amérique).- Light emitting diode calibrations at NBS, by J.B. Shumaker (Voir Annexe P 12).
- 75-12 NBS (États-Unis d'Amérique).- Report on a self-study manual on optical radiation measurements, by F.E. Nicodemus and H.J. Kostkowski.
- 75-13 NML (Australie).- Reply to the comments on the Blevin/Steiner redefinition proposal, by W.R. Blevin (Voir Annexe P 4).
- 75-14 BIPM.- L'unité SI de base pour la photométrie, par J. Terrien (Voir Annexe P 4).
- 75-15 NML (Australie).- A proposed subdivision of the redefinition issue for discussion by CCPR, by W.R. Blevin.
- 75-16 NPL (Royaume-Uni).- Comment on proposed redefinition of the photometric unit, by O.C. Jones.

Document

CCPR/

- 75-17 NRC (Canada).- Filtre composé de verres colorés pour la photométrie, par D.S. Gignac (Voir Annexe P 9).
- 75-18 NPL (Royaume-Uni).- Notes on a new type of photometric standard of luminous intensity, by R.G. Berry and F.J.J. Clarke (Voir le résumé à l'Annexe P 10).
- 75-19 NBS (États-Unis d'Amérique).- Measurements characteristics with an absolute pyroelectric radiometer.
- 75-20 Recommandations présentées au CIPM (Voir le Rapport au CIPM).
- 75-21 NRC (Canada).- Possible comparisons arising from survey of calibration facilities, by C.L. Sanders (Voir le résumé à l'Annexe P 11).
-

ANNEXE P 2

Consultation préalable par correspondance

Dans le but de rendre plus efficaces les travaux de la 8^e session du CCPR, 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 1971 à juin 1975) :

- Corps noir au point de congélation du platine (*Question 1*).
- Radiométrie et radiomètres absolus (*Questions 2 et 3*).
- Rayonnement synchrotron (*Question 4*).
- Lampes photométriques étalons (*Questions 5, 6, 7*).
- Améliorations des installations de mesure (*Question 8*).
- Travaux futurs (*Question 9*).

Les douze laboratoires consultés ont tous répondu au questionnaire qui leur avait été adressé le 18 décembre 1974 ; on trouvera ci-après une synthèse de leurs réponses, suivie d'une importante bibliographie.

QUESTION 2

Avez-vous construit des radiomètres absolus d'un type nouveau ? En avez-vous amélioré les caractéristiques ?

Plusieurs laboratoires ont construit des radiomètres absolus ou ont effectué des travaux dans le domaine de la radiométrie au cours des quatre dernières années. Cependant trois laboratoires n'ont encore aucune activité radiométrique ; le développement de cette discipline reste donc lent.

Au NRC, un radiomètre absolu est en cours de développement ; il est du même type que ceux réalisés au NPL (*Comité Consultatif de Photométrie*, 5^e session, 1962, p. 43) et au NML (*Aust. J. Phys.*, 20, 1967, p. 567). Cependant, la technologie du radiomètre est différente ; les éléments principaux (disque en cuivre, résistance de chauffage, revêtement absorbant, thermopile) sont préparés par évaporation sous vide. On espère obtenir ainsi une plus grande sensibilité et une constante de temps plus courte.

A l'IMM, on a construit des radiomètres absolus du type NPL et du type ETL (*Comité Consultatif de Photométrie*, 6^e session, 1965, p. P 23), à quelques particularités près ; on estime que l'incertitude des mesures énergétiques est de l'ordre de $\pm 0,3$ à $\pm 0,5$ % [41,42,43,44,45].

Au NBS, on a mis au point un radiomètre absolu du type pyroélectrique [80,87], de grande surface réceptrice (1 cm^2) et de sensibilité bien uniforme (± 1 %), qui peut être modulé à 10 Hz. Ce type de radiomètre est commercialisé.

Le NML a modifié des radiomètres absolus du type de ceux qu'il a utilisé pour la mesure de la constante de Stefan-Boltzmann (*Metrologia*, 7, 1971, p. 15) ; en leur associant un filtre $V(\lambda)$, on a pu établir les unités photométriques (Annexe P 5). Le NML a commencé également l'étude des radiomètres du type pyroélectrique [80,87].

Au NPRL, le radiomètre absolu qui vient d'être construit, du type bolométrique, a été prévu pour fonctionner dans le vide et à basse température ; il peut être facilement converti en spectroradiomètre.

A la PTB, on a réalisé plusieurs modèles de radiomètres absolus à compensation électrique (*PTB Jahresbericht*, 1972, p. 155 et 1974, p. 193) ; le flux énergétique maximal est de 10 mW, 10 W ou 1000 W, suivant le modèle.

Le PMO (Physikalisch-Meteorologisches Observatorium, Davos) est responsable de l'uniformité et de la comparaison des mesures du rayonnement en ce qui concerne la météorologie. Il a mis au point un radiomètre absolu, à compensation électrique, pour mesurer des flux énergétiques de 2 à 20 mW avec une incertitude de $\pm 0,04$ mW (*World Radiation Center Davos, Note technique 1, 1972*).

QUESTION 3

Au cours d'une réunion officielle (1^{er} septembre 1971), le Groupe de travail de la Radiométrie a proposé un plan d'étude prévoyant, en particulier, des échanges de radiomètres absolus entre laboratoires. Avez-vous participé à de tels échanges ? Quels en sont les résultats ?

Les laboratoires nationaux n'ont procédé à aucun échange de radiomètres absolus au cours de la période considérée. Seule une comparaison de radiomètres pour mesurer l'énergie solaire devait être organisée en mai 1975 par le PMO, sous les auspices de l'Organisation Météorologique Mondiale.

QUESTION 4

Avez-vous des études en cours sur le rayonnement obtenu à partir d'un synchrotron ? Est-ce pour établir des étalons de luminance énergétique relative spectrale ? Dans quel domaine spectral ? Quels résultats avez-vous obtenus ?

Cinq laboratoires utilisent le rayonnement synchrotron, les uns à titre expérimental, les autres de façon régulière pour des étalonnages de lampes.

Au CNAM, on étudie la réalisation d'étalons de luminance énergétique absolue à l'aide du rayonnement synchrotron émis par l'anneau de collision d'Orsay ; le domaine spectral prévu est de 160 à 360 nm. Une première série de mesures a été faite dans le domaine visible pour étudier l'accord existant entre la luminance spectrale absolue calculée à partir des équations du rayonnement synchrotron et celle calculée à partir de la

formule de Planck pour le corps noir ; les résultats sont très satisfaisants puisqu'ils sont dans les limites des erreurs expérimentales.

A l'ETL aussi, on a exploré les possibilités du rayonnement synchrotron comme étalon primaire de densité spectrale de flux énergétique dans l'ultraviolet. Pour cela, on a comparé le rayonnement émis par le synchrotron électronique de l'Institut d'Etude Nucléaire (Université de Tokyo) et le rayonnement d'une lampe étalon d'éclairement énergétique de l'ETL, entre 360 et 750 nm ; on a estimé l'incertitude totale à $\pm 10 \%$.

Au NBS, on dispose de l'installation SURF (Synchrotron Ultraviolet Radiation Facility). SURF I, synchrotron électronique, vient d'être converti en SURF II, anneau de stockage, pour servir exclusivement de source radiométrique et spectroradiométrique, de 4 nm au visible et au-delà.

Au NPL, on utilise le synchrotron de Daresbury pour déterminer la répartition spectrale relative de lampes à deutérium entre 200 et 400 nm. La répartition spectrale absolue est obtenue par une comparaison supplémentaire avec les lampes à incandescence qui constituent les étalons de référence au-dessus de 300 nm. Les répartitions spectrales relatives attribuées aux deux types d'étalons, l'une provenant du synchrotron, l'autre du corps noir, sont en accord à 1 % près dans le domaine 300-400 nm couvert par les deux types.

A la PTB, le rayonnement du synchrotron électronique est utilisé comme étalon de répartition spectrale relative de 230 à 600 nm.

QUESTION 5

Existe-t-il un nouveau type de lampe étalon dans votre pays ? Avez-vous utilisé la lampe Osram W1 40 sans crochets supports et qu'en pensez-vous ? La stabilité des lampes au brome utilisées pour une comparaison d'éclairement énergétique spectral (CIE) est-elle satisfaisante ?

Au NPL, en collaboration avec la GEC, on a mis au point une lampe à incandescence, à filament spiralé, alimentée à intensité de courant élevée. Cette lampe pourra servir d'étalon d'intensité lumineuse et, sous une forme simplifiée, d'étalon de température de répartition ou d'éclairement énergétique (Annexe P 10).

La nouvelle lampe Osram Wi 40 G (ou Wi 41 G), sans crochets supports, a été utilisée par plusieurs laboratoires (ASMW, CNAM, NML, PTB). Elle est plus stable et constitue un étalon mieux reproductible que l'ancien modèle ; en revanche, elle semble moins bien supporter les transports (plusieurs cas de rupture du filament au niveau des soudures). On manque encore d'expérience à long terme.

La lampe au brome, utilisée pour la comparaison d'éclairément énergétique spectral, a généralement donné satisfaction (NRC, ETL, NML, NPL, PTB). Entre les mesures *aller* et les mesures *retour* des trente-deux lampes envoyées par l'ETL dans d'autres laboratoires nationaux, la variation de l'éclairément lumineux calculé à partir des données spectrales a été de $\pm 0,3 \%$ pour vingt-deux lampes et de $\pm 0,7 \%$ pour vingt-huit lampes.

Au NBS, on dispose d'un modèle amélioré de lampe à halogène (désignation "FEL") qui est utilisé comme étalon d'éclairément énergétique spectral ; c'est une lampe à filament bispiralé (1000 W) et à ampoule claire, dont le culot à broches a été modifié. La mise en place et l'alignement sont plus précis (reproductibilité 0,1 %) et la répartition spectrale de la lampe ne présente ni raies d'émission, ni bandes d'absorption ; le vieillissement est de 1 à 2 % pour cent heures de fonctionnement à la température de couleur de 3050 K. Munie d'un écran approprié, la lampe servira aussi d'étalon de flux total spectral entre 250 et 800 nm.

Au NML, on utilise comme étalons d'éclairéments énergétique et lumineux la lampe à halogène Philips 12216 (120 V, 420 W) ; elle vieillit moins rapidement que la lampe Osram Wi 41 G (Annexe P 5).

QUESTION 6

On demande très souvent au BIPM où l'on peut acheter des lampes à incandescence suffisamment stables pour constituer des étalons d'intensité lumineuse, de flux lumineux ou de température de répartition. Quels sont les types de lampes disponibles dans votre pays ? Quels en sont les prix ? Où peut-on se les procurer ?

- General Electric Company
Nela Park
Cleveland, Ohio 44112 (USA)

fabrique des lampes étalons d'intensité lumineuse (500 et 1000 W), de flux lumineux (25, 60, 100, 200, 500 W) et de température de répartition.

- General Electric Company
Hirst Research Centre (D.H. Price)
East Lane, Wembley, Middlesex (Grande-Bretagne)

peut fournir la nouvelle lampe étalon d'intensité lumineuse (£ 65 environ) ou de température de couleur (£ 35 environ) ; la lampe étalon de flux lumineux (200 W), utilisée pour la comparaison internationale de 1969, est toujours disponible.

- Osram GmbH
Hellabrunnerstrasse 1
8 München 90 (Rép. Féd. d'Allemagne)

produit des lampes étalons d'intensité lumineuse ou de température de répartition, type Wi 41 G (350 DM environ) et de flux lumineux, type Wi 5 (100 DM environ).

- Toshiba (Japon) a cessé toute fabrication de lampes étalons.

QUESTION 7

Si une nouvelle comparaison d'étalons d'intensité et de flux lumineux, ou de température de répartition, devait être organisée et si tous les laboratoires nationaux se mettaient d'accord sur un même type de lampes, lequel préféreriez-vous dans chacun des cas suivants :

- Intensité lumineuse, 2045 K
- " " , 2357 K
- " " , 2859 K
- Flux lumineux, 2357 K
- " " , 2793 K
- Températures de répartition 2045-3000 K ?

Souhaiteriez-vous abaisser de 2859 K à 2800 K environ la température de répartition la plus élevée des étalons d'intensité lumineuse ?

L'intérêt des laboratoires nationaux se porte principalement sur les étalons d'intensité lumineuse à 2859 K et de flux lumineux à 2793 K ; une comparaison d'étalons d'intensité lumineuse à 2045 K ou d'étalons de température de répartition ne semble utile qu'à quelques laboratoires ; quant aux étalons de flux lumineux à 2357 K, ils n'intéressent personne. On insiste sur le fait qu'une comparaison ne doit être envisagée que si l'on dispose de lampes très stables.

- A 2045 K, la lampe Toshiba fait l'unanimité.

- A 2859 K, la lampe Osram Wi 41 G, sans crochets supports, est la plus souvent citée ; il conviendrait cependant de ramener sa température d'emploi au voisinage de 2800 K. Le NPL propose d'utiliser la nouvelle lampe GEC et le NML la lampe à halogène Philips 12216 ou la lampe au brome Ushio Electric.

- A 2793 K, la lampe GEC est presque seule citée, bien qu'on lui reproche sa répartition spatiale peu uniforme ; la lampe Osram Wi 5 est proposée par la PTB.

- Pour les températures de répartition, la nouvelle lampe GEC, la lampe Osram Wi 41 G ou des lampes de projection conviendraient.

Toutefois l'IMM préférerait que chaque laboratoire national utilise ses propres types de lampes.

Q U E S T I O N 8

Quelles sont les améliorations apportées aux installations de mesure de votre laboratoire ? En particulier comment sont composés les photomètres que vous utilisez pour les comparaisons de lampes étalons (types de récepteur, d'amplificateur, d'appareil de lecture) ?

Les photomètres des laboratoires nationaux diffèrent par le récepteur utilisé, mais se ressemblent beaucoup pour l'amplification et la lecture. Comme récepteur, on rencontre le tube photoélectrique (à cathode Cs-Bi ou multialcaline) et la diode au silicium, corrigés par des filtres en verres ou liquides, ou la photopile au silicium $V(\lambda)$. Pour l'amplification et la lecture, l'amplificateur opérationnel et le voltmètre numérique sont largement employés.

Au NML, on a mis au point un goniophotomètre semi-automatique, tandis qu'au NPL on a remis en service celui qui fut utilisé en 1967 pour le rattachement du lumen à la candela (*Metrologia*, 6, 1970, p. 81).

Au NRC, on a construit un photomètre pour la mesure des lampes à éclats.

Au NBS, on a développé l'automatisation des mesures pour réduire le temps et le coût des étalonnages. Le coeur du dispositif est un système d'acquisition de données (appellation "MIDAS"), conçu pour simplifier la connexion des ordinateurs

aux installations de mesure et pour fournir un contrôle programmé de ces installations [78]. Avec ce dispositif, un type donné d'expérimentation peut être entièrement piloté à partir d'un télétipe. Plusieurs domaines de mesure sont déjà largement automatisés : échelle d'éclairement énergétique spectral, échelle de flux total spectral ; dans d'autres cas, l'automatisation a permis d'améliorer la qualité des résultats : mesure de la transmission spectrale de filtres, étalonnage de diodes électroluminescentes, étude spectrale de récepteurs au silicium.

QUESTION 9

Quelles études comptez-vous entreprendre dans les deux ou trois prochaines années pour faire progresser la photométrie ?

Trois sujets d'étude sont prédominants dans les réponses des laboratoires nationaux :

- La réalisation, l'amélioration ou la modernisation du corps noir au point de congélation du platine (IMM, PTB, IEN).

- Le développement de la radiométrie absolue et de la spectroradiométrie, soit pour réaliser la candela, soit pour déterminer K_m , soit pour établir une échelle d'éclairement énergétique spectral (NRC, CNAM, IMM, NBS, NML, NPL, NPRL, IEN) ; le NML et le NBS s'intéressent aux radiomètres du type pyroélectrique.

- La réalisation et l'emploi d'un goniophotomètre automatique ou semi-automatique pour le passage de la candela au lumen (ASMW, ETL, NML, NPL, NPRL, PTB, IEN).

D'autres études sont aussi envisagées par quelques laboratoires : l'amélioration de la mesure des températures de répartition (NBS, PTB), la détermination de la répartition énergétique spectrale de sources lumineuses par spectroscopie de Fourier (NML), l'emploi du rayonnement synchrotron pour établir des répartitions spectrales relatives (PTB), la recherche de nouvelles sources lumineuses capables de fournir de bons étalons (ASMW).

Au NBS, une nouvelle technique pour faciliter les mesures spectrales est en cours de développement. On utilise un radiomètre absolu du type pyroélectrique pour mesurer la puissance

rayonnée dans le faisceau d'un laser à colorant accordable continûment. Le laser sert ensuite à déterminer la réponse spectrale d'une photodiode au silicium munie ou non d'un filtre interférentiel à bande passante étroite. La photodiode est alors utilisée comme récepteur étalon pour mesurer l'éclairement énergétique spectral de diverses sources. Cette nouvelle technique est prometteuse car elle combine les avantages des nouvelles sources laser (bonne résolution spectrale, forte densité énergétique, accord spectral continu) aux avantages des radiomètres absolus du type pyroélectrique (large étendue de mesure, contrôle interne d'étalonnage).

B I B L I O G R A P H I E

1. NÜNDEL (S.), Photometrische Arbeitsergebnisse ASMW und ihre Überführung in die Praxis, *Tagungsbericht : Konferenz über Photometrie und Kolorimetrie, Varna 1973*, pp. 63-74.
2. FISCHER (B.), Die Einführung nationaler photometrischer Einheiten in der DDR, *Ibid.*, pp. 99-107.
3. KRÖHNERT (R.), Internationale Vergleichsmessung der relativen spektralen Energieverteilung, *Feingerätetechnik*, 6, 1973, p. 277.
4. KRÖHNERT (R.), Spektralphotometer für Transmissionsgradmessungen. A paraître dans *Feingerätetechnik*, 9, 1975.
5. BEDFORD (R.E.) and MA (C.K.), Emissivities of Diffuse Cavities : Isothermal and nonisothermal Cones and Cylinders, *J. Opt. Soc. Am.*, 64, 1974, p. 339.
6. BOIVIN (L.P.), Diffraction Losses Associated with Tungsten Lamps in Absolute Radiometry, *Appl. Opt.*, 14, 1975, p. 197.
7. BOIVIN (L.P.), Diffraction Corrections in Radiometry : Comparison of two Different Methods of Calculation, *Ibid.*, 14, 1975, p. 2002.
8. BUDDE (W.) and DODD (C.X.), Measurement of Relative Spectral Sensitivity Distributions of Photoelectric Receivers, *Ibid.*, 10, 1971, p. 2607.
9. BUDDE (W.) and KELLY (P.), Variations of the Spectral Sensitivity of RCA 6217 and 5819 Photomultipliers at Low Temperatures, *Ibid.*, 10, 1971, p. 2612.
10. BUDDE (W.) and DITTMAN (D.), Untersuchungen an Silicium-Schottky Photodioden, *PTB-Mitt.* 1/73, 1973, p. 1.
11. BUDDE (W.), ROBERTSON (A.R.) and McNEELY (F.T.), Correction of Wavelength Errors in a Digitally Recording Spectrophotometer, *Appl. Opt.*, 12, 1973, p. 2872.
12. BUDDE (W.) and SANDERS (C.L.), CIE Interlaboratory Comparison of Measurements of Photocell Spectral Sensitivity, *Ibid.*, 12, 1973, p. 2099.
13. BUDDE (W.), Ageing of S-10 Photocathodes, *Ibid.*, 12, 1973, p. 2108.
14. BUDDE (W.), Measurement of Brightness and Opacity According to ISO Standards, *Trans. Can. Pulp & Paper Assoc. Tech. Section 1*, 1975.
15. SANDERS (C.L.), BAK (J.) and GAW (W.), Corrections of Luminous Flux of Fluorescent Lamps for Sphere Selectivity and Imperfect Receivers, *Proc. Conf. on Photometry and Colorimetry, Varna, 1973*, pp. 81-86.

16. SANDERS (C.L.), Photometry : Tasks, Problems, and Organizations, *Appl. Opt.*, 10, 1971, p. 2589.
17. SANDERS (C.L.) and JEROME (C.W.), Interlaboratory Comparison of Measurements of the Spectral Irradiance from Fluorescent and Incandescent Lamps : A Report, *Ibid.*, 12, 1973, p. 2088.
18. SANDERS (C.L.), Required and Achieved Accuracy in Photometry and Radiometry, *Proc. Conf. on Photometry and Colorimetry, Varma*, 1973, pp. 1-12.
19. WYSZECKI (G.), Current Developments in Colorimetry, *Proc. AIC 'Colour 73'*, Adam Hilger Publishers, London, 1973, pp. 21-51.
20. OHTA (N.), WYSZECKI (G.), Extreme Errors of Numerical Integrations in Colorimetry Calculations, *J. Opt. Soc. Am.*, 65, 1975, p. 834.
21. WYSZECKI (G.), Recent Developments on Color-Difference Evaluations, *Color Metrics*, Helmholtz Memorial Symp. Ed. J.J. Vos, L.F.C. Priele and P.L. Walraven, AIC/Holland, c/o Inst. for Perception TNO, Soesterberg, 1972, pp. 339-379.
22. OTT (W.R.), FIEFFE-PREVOST (P.) and WIESE (W.L.), VUV Radiometry with hydrogen arcs. 1. Principle of the method and comparison with black-body calibration from 1 650 Å to 3 600 Å, *Appl. Opt.*, 12, 1973, p. 1616.
23. BASTIE (J.), La photométrie photoélectrique à l'Institut National de Métrologie du Conservatoire National des Arts et Métiers, *Bulletin d'Information du BNM*, 5, 1974, p. 15.
24. MISHIMA (Y.) *et al.*, Tungsten Halogen Lamps as the Working Standard of Distribution Temperature at 3 400 °K, *J. Illum. Engng Inst. Japan*, 55, 1971, pp. 329-334.
25. SUZUKI (M.) *et al.*, Standards of Spectral Radiance and Irradiance for the Wavelength Region of 0.25-2.5 µm, *Researchs of the ETL*, No. 742, 1973.
26. SUZUKI (M.) *et al.*, A Quartz-bromine Lamp as a Secondary Standard of Spectral Irradiance, *J. Illum. Engng Inst. Japan*, 57, 1973, pp. 528-535.
27. WATARAI (Y.) *et al.*, Relative Spectral Distribution of Tungsten Coil Filament Lamps, *J. Illum. Engng. Inst. Japan*, 57, 1973, pp. 632-641.
28. NONAKA (M.), Improved paint coating for photometric integrators, *Lighting Research and Technology*, 6, 1974, pp. 30-31.
29. SUZUKI (M.) *et al.*, Radiometric Measurements on the UV-Standard, *J. Illum. Engng Inst. Japan*, 58, 1974, pp. 97-102.
30. SHIRAISHI (H.), Measurement of Spectral Sensitivity of Photoelectric Tubes in the Ultraviolet Region, *J. Illum. Engng. Inst. Japan*, 56, 1972, pp. 636-641.
31. AZUMA (T.), A report of Technical Committee on the Ultraviolet Rays Measurements, *Ibid.*, 57, 1973, pp. 196-202.
32. SHIRAISHI (H.), Angular Response Corrected Receiver for the Ultraviolet Radiometer, *Ibid.*, 57, 1973, pp. 116-120.
33. NAKAGAWA (Y.) *et al.*, The Radiometric Calibration of Thermopiles by Luminous Standard Lamps, *Ibid.*, 57, 1973, pp. 121-124.
34. KURIOKA (Y.) *et al.*, Establishment of Spectral Power Distribution of Xe Standard White Light Source, *Ibid.*, 58, 1974, pp. 58-67.

35. NANJO (M.) and NAYATANI (Y.), An Analysis of Response Curves and its Application to Directional Spectral Reflectance Measurements, *J. Illum. Engrng Inst. Japan*, 56, 1972, pp. 141-149.
36. HIGO (T.) and MUROI (N.), Theoretical Study on the Photocurrent Measuring circuits of Si Photovoltaic Cell, *Ibid.*, 56, 1972, pp. 590-595.
37. KURIOKA (Y.) *et al.*, A Method for programmed Precise Setting of Wavelength in Spectrophotometry, *Ibid.*, 55, 1971, pp. 654-658.
38. NONAKA (M.) *et al.*, Spectroradiometric Measurements on Fluorescent Lamps, *Metrologia*, 8, 1972, pp. 133-142.
39. KARTACHEVSKAIA (V.E.), Etalon national de la candela, *Izmerit. Tekhn.*, 10, 1971, pp. 9-10.
40. DREIFUS (B.M.), KARTACHEVSKAIA (V.E.) et PIVOVAROVA (N.V.), Installation pour les mesures de sensibilité spectrale de photorécepteurs; *Trudy Métrologitch. Inst., VNIIM Mendeleev*, publ. 144(204), 1973, pp. 58-62.
41. KARTACHEVSKAIA (V.E.) et LITVINOVA (L.F.), Récepteurs thermoélectriques absolus, *Trudy, Glav. Geophys. Obs., Gidrometeorizdat.*, publ. 295, 1973, pp. 160-171.
42. LITVINOVA (L.F.), Bolomètres pour mesures absolues de flux énergétique, *Ibid.*, publ. 295, 1973, pp. 179-183.
43. KARTACHEVSKAIA (V.E.), KOUCHPIL (V.I.) et PETCHKOVSKAIA (V.A.), Comparaisons internationales de mesures d'éclairément énergétique, *Impulsnaia photometria*, Coll. 3, edit. Machinostroenie, 1973, pp. 9-14.
44. KALININ (Y.A.), KARTACHEVSKAIA (V.E.), KOUBAREV (A.V.), LITVINOVA (L.F.) et PROTASSOV (N.I.), Comparaison des appareils étalons de mesure d'éclairément énergétique dans deux Instituts Métrologiques, *Impulsnaia photometria*, Coll. 3, edit. Machinostroenie, 1973, pp. 14-23.
45. KARTACHEVSKAIA (V.E.), LITVINOVA (L.F.), POKROVSKAIA (I.A.), et PROTASSOV (N.I.), Comparaison des appareils étalons de mesure d'éclairément énergétique employés au VNIIM et au GGO, *Trudy, Glav. Geophys. Obs., Gidrometeorizdat, Leningrad*, publ. 317, 1973, pp. 127-132.
46. KARTACHEVSKAIA (V.E.) et MATVEEV (M.S.), Mesures de répartition spectrale du rayonnement des lampes à incandescence dans le visible, *Svetotekhnika*, 10, 1974, pp. 5-8.
47. HAUPT (G.W.), Glass Limit Standards Deposited at NBS for Railway, Highway and Airways Traffic Signal Colors - History, Permanence and Colorimetric Properties, *NBS Technical Note 564*, 1971.
48. GEIST (J.C.), On the Absorptance of Cavity-Type Receivers, *NBS Technical Note 575*, 1971.
49. GEIST (J.C.), Note on the Quality of Freezing Point Blackbodies, *Applied Optics*, 10, 1971, pp. 2188-2190.
50. FUSSELL (W.B.), Effect of Ceramic Spectral Emissivity Variations on the Computed Luminous Emissivity of the NBS Standard of Light, *NBS Technical Note 595*, 1971.

51. GEIST (J.), A New Type of Boundary Value Coupling for Second Order Sturm-Liouville Systems, *J. of Research NBS*, 75B, Nos. 3 & 4, 1971.
52. DOUGLAS (C.A.), A Survey of the Use of Flashing Lights in Aviation, *Journal - Adam Hilger Ltd.*, International Symposium on "The Perception and Application of Flashing Lights", 1971.
53. DOUGLAS (C.A.), Development, Testing, and Evaluation of Visual Landing Aids, Consolidated Progress Report for January 1 to March 31, 1972, *NBS Report No. 10837*.
54. MIELENZ (K.D.), ECKERLE (K.L.), Accuracy of Polarization Attenuators, *Applied Optics*, 11, No. 3, 1972.
55. GEIST (J.), Effect of Wall Roughness on the Spectral Density of Radiation Within Symmetric Closed Cavities in Good Conductors, *JOSA*, 62, No. 4, 1972.
56. HAUPT (G.W.), SCHLETER (J.C.) and ECKERLE (K.L.), The Ideal Lovibond Color System for CIE Standard Illuminants A and C Shown in Three Colorimetric Systems, *NBS Technical Note 718*, 1972.
57. RICHMOND (J.C.) and HSIA (J.J.), Preparation and Calibration of Standards of Spectral Specular Reflectance, *NBS Special Public. 260-38*, 1972.
58. GEIST (J.), Fundamental Principles of Absolute Radiometry and the Philosophy of This NBS Program (1968 to 1971), *NBS Technical Note 594-1*, 1972.
59. GEIST (J.) and KENDALL (J.M.), Circumsolar Radiation and the International Pyrheliometric Scale, *Applied Optics*, 11, 1972, p. 1437.
60. MIELENZ (K.D.), ECKERLE (K.L.), Design, Construction, and Testing of a New High Accuracy Spectrophotometer, *NBS Technical Note 729*, 1972.
61. FUSSELL (W.B.), Normal Emissivity of an Isothermal, Diffusely Reflecting Cylindrical Cavity (With Top) as a Function of Inside Radius, *J. of Research NBS*, 76A, No. 4, 1972.
62. ZALEWSKI (E.F.), RUSSELL SCHAEFER (A.), MOHAN (K.), and McSPARRON (D.A.), Optical Radiation Measurements : Photometric Instrumentation and Research (1970 to 1971), *NBS Technical Note 594-2*, 1972.
63. VENABLE Jr. (W.H.), Spectrophotometric Standards, *J. of Research NBS*, 76-A, No. 5, 1972.
64. MIELENZ (K.D.) and ECKERLE (K.L.), Spectrophotometer Linearity Testing Using the Double-Aperture Method, *Applied Optics*, 11, 1972, pp. 2294-2303.
65. BURNS (V.I.) and McSPARRON (D.A.), Optical Radiation Measurements : Photometric Calibration Procedures, *NBS Technical Note 594-3*, 1972.
66. GEIST (J.), Waveform-Independent Lock-in Detection, *Rev. of Sc. Inst.*, 43, No. 11, 1972.
67. QUINN (T.J.) (NPL) and LEE (R.D.) (NBS), Vacuum Tungsten Strip Lamps with Improved Stability as Radiance Temperature Standards, *Temperature* (Instrument Society of America, Pittsburgh, 1972), Vol. 4, Part 1, pp. 395-411.

68. LEE (R.D.), KOSTKOWSKI (H.J.) (NBS) ; QUINN (T.J.), CHANDLER (P.R.) (NPL) ; JONES (T.P.), TAPPING (J.) (NSL) and KUNZ (H.) (PTB), Inter-comparison of the IPTS 68 above 1 064 °C by Four National Laboratories, *Temperature*, (Instrument Society of America, Pittsburgh, 1972), Vol. 4, Part 1, pp. 377-393.
69. DOUGLAS (C.A.), Visual Range of Luminous Signals, à paraître dans *IES Lighting Handbook*, 5th edition (1972).
70. DeWITT (D.P.) and RICHMOND (J.C.), Theory and Measurement of the Thermal Radiation Properties of Metals, *Measurement of Physical Properties : Some Special Properties*, Ed. E. Passaglia, Interscience Publishers, Div. of Wiley & Sons, Inc., 1972 VI, Part I, pp. 1-90.
71. GEIST (J.) and ZALEWSKI (E.), Chinese Restaurant Nomenclature for Radiometry, *Applied Optics*, 12, 1973, p. 435.
72. STEINER (B.W.), Optical Radiation Measurements : The Impact of Radiometry and Photometry and the Role of NBS, *NBS Technical Note 594-4*, 1973.
73. GEIST (J.), New NBS Scale of Irradiance, *Applied Optics*, 12, 1973, p. 907.
74. FRÖHLICH (C.), GEIST (J.), KENDALL Sr. (J.) and MARCHGRABER (R.M.), The Third International Comparisons of Pyrheliometers and a Comparison of Radiometric Scales, *Applied Optics*, 12, 1973, p. 1325.
75. GEIST (J.), Theoretical Analysis of Laboratory Blackbodies. I : A Generalized Integral Equation, *Ibid.*, p. 1325.
76. KSHITIJ MOHAN, RUSSELL SCHAEFER (A.) and ZALEWSKI (E.F.), Optical Radiation Measurements : Stability and Temperature Characteristics of some Silicon and Selenium Photodetectors, *NBS Technical Note 594-5*, 1973.
77. MIELENZ (K.D.), ECKERLE (K.L.), MADDEN (R.P.) and READER (J.), New Reference Spectrophotometer, *Applied Optics*, 12, 1973, pp. 1630-1641.
78. POPENOE (C.H.) and CAMPBELL (M.S.), MIDAS - Modular Interactive Data Acquisition System - Description and Specification, *NBS Technical Note 790*, 1973.
79. GEIST (J.), SCHMIDT (L.B.) and CASE (W.E.), Comparison of the Laser Power and Total Irradiance Scales Maintained by the National Bureau of Standards, *Applied Optics*, 12, 1973, pp. 2773-2776.
80. GEIST (J.) and BLEVIN (W.R.), Chopper Stabilized Null Radiometer Based Upon an Electrically Calibrated Pyroelectric Detector, *Ibid.*, p. 2532.
81. BLEVIN (W.R.), Sinusoidal Radiation Chopper, *Ibid.*, p. 2802.
82. Meeting Report, Conference on Photometry and Colorimetry, Zlatni Piasti, 27-30 June 1973, Reported by Bruce Steiner, *Ibid.*, p. 2992.
83. STEINER (B.), New Needs for Accurate Optical Radiation Measurement, II. A Growing Concern of the National Bureau of Standards and of American CIE, *Proc. Conf. on Photometry and Colorimetry, Varanasi*, 1973.
84. STEINER (B.), Optical Radiation Measurements : The present State of Radiometry and Photometry, *NBS Technical Note 594-6*, 1974.
85. FUSSELL (W.B.), Optical Radiation Measurements : Approximate Theory of the Photometric Integrating Sphere, *Ibid.* 594-7, 1974.

86. RICHMOND (J.C.), A Standard for Passive Night Vision Devices for Law Enforcement Use, *Optical Engineering*, 13, 1974, pp. 162-167.
87. BLEVIN (W.R.) and GEIST (J.), Influence of Black Coatings on Pyroelectric Detectors, *Applied Optics*, 13, 1974, pp. 1171-1178.
88. RICHMOND (J.C.), Survey of Image Quality Criteria for Passive Night Vision Devices, Law Enforcement Standards Program Report 0301.00, 1974.
89. FUSSELL (W.B.), Optical Radiation Measurements : Tables of Diffraction Losses, *NBS Technical Note 594-8*, 1974.
90. RICHMOND (J.C.), Test Procedures for Night Vision Devices, Law Enforcement Standards Program Report 0302.00, 1974.
91. RUSSELL SCHAEFER (A.) and KSHITIF MOHAN, A New Goniometer for Total Flux Measurements, *Journal of IES*, 1974.
92. Report of the Workshop on Accurate Radiometry for Solar Conversion, National Bureau of Standards, Washington D.C., June 11-13, 1974, dans *Report and Recommendations of the Solar Energy Data Workshop*, U.S. Government Printing Office , 1974.
93. BLEVIN (W.R.) and GEIST (J.), Infrared Reflectometry with a Cavity-shaped Pyroelectric Detector, *Applied Optics*, 13, 1974, pp. 2212-2217.
94. VENABLE Jr. (W.H.) and HSIA (J.J.), Optical Radiation Measurements : Describing Spectrophotometric Measurements, *NBS Technical Note 594-9*, 1974.
95. KSHITIJ MOHAN, RUSSELL SCHAEFER (A.) and ZALEWSKI (E.F.), On the Measurement of Geometrically Total Radiant Power, Letter, *Applied Optics*, 14, 1975, p. 1035.
96. HSIA (J.J.), Optical Radiation Measurements : The NBS 20-, 60-, and 85-Degree Specular Gloss Scales, *NBS Technical Note 594-10*, à paraître vers août 1975.
97. BLEVIN (W.R.), Corrections in optical pyrometry and photometry for the refractive index of air, *Metrologia*, 8, 1972, p. 146.
98. BLEVIN (W.R.) and STEINER (B.), Redefinition of the candela and the lumen, *Metrologia*, 11, 1975, p. 97.
99. BROWN (W.J.), A radiometric realization of the photometric units, *Metrologia*, 11, 1975, p. 111.
100. STEEL (W.H.), DE (M.) and BELL (J.A.), Diffraction corrections in radiometry, *J.O.S.A.*, 62, 1972, p. 1099.
101. WILKINSON (F.J.), A new NML scale of spectral irradiance, *Metrologia*, 11, 1975, p. 105.
102. JONES (O.C.) and GORDON-SMITH (G.W.), Absolute radiometry by means of a blackbody source, *Proc. Roy. Soc., A* 335, 1973, p. 369.
103. QUINN (T.J.) and CHANDLER (T.R.D.), The freezing point of platinum determined by the NPL photoelectric pyrometer, *Proc. of 5th Symposium on Temperature*, 1971, p. 295.
104. BERRY (R.G.) and CLARKE (F.J.J.), Notes on a new type of photometric standards of luminous intensity, présenté à la CIE (TC-1.2), février 1975.

105. MOORE (J.R.), Verification of the NPL standards of relative spectral power distribution by filter radiometry, *Appl. Opt.*, 10, 1971, p. 2651.
106. FORNO (C.) and GILLHAM (E.J.), A new sector-disk method for comparing light intensities, *Appl. Opt.*, 12, 1973, p. 1034.
107. RES (M.A.) and KOK (C.J.), A single glass filter with spectral transmittance showing $V(\lambda)$ characteristics, *J. Phys. D : Appl. Phys.*, 1, 1974, p. L 196.
108. RES (M.A.), KOK (C.J.), KRÖGER (K.) and HENGSTBERGER (F.), New filter glasses for photometric application, *Appl. Opt.*, 14, 1975, p. 1017.
109. KOK (C.J.) and HENGSTBERGER, Spectroradiometry of metal halide lamps, *Metrologia*, 10, 1974, p. 53.
110. KOK (C.J.) and BOSHOFF (M.C.), A new spectrophotometer and tristimulus mask colorimeter, *Appl. Opt.*, 10, 1971, p. 2617.
111. KOK (C.J.), Spectral irradiance of daylight at Pretoria, *J. Phys. D : Appl. Phys.*, 5, 1972, p. 1513.
112. KOK (C.J.), Absolute radiometry and the unit of light, *S.A. Eng. & El. Rev.*, 63, 1972, p. 17.
113. KOK (C.J.), Measurement of spectral irradiance of UV normal and standard 75 lamps, *S.A. Eng. & El. Rev.*, 63, 1972, p. 15.
114. HENGSTBERGER (F.), Entwurf eines Messsystem zur absoluten Messung spektraler Verteilung und Bau eines Absolutempfängers für elektromagnetische Strahlung im optischen Bereich, Thèse de Doctorat, Techn. Univ., Wien, 1975.
115. BAUER (G.), BISCHOFF (K.), Hohlraumstrahler mit Temperaturgefälle, *Optik*, 31, 1970, pp. 507-517.
116. BAUER (G.), Empfindlichkeit und Quotienten von Empfindlichkeiten bei Strahlungsempfängern für den optischen Bereich, *Lichttechnik*, 22, 1970, pp. 489-491.
117. BAUER (G.), BISCHOFF (K.), Evaluation of the Emissivity of a Cavity Source by Reflection Measurements, *Appl. Opt.*, 10, 1971, pp. 2639-2643.
118. BAUER (G.), Spektrale Strahlungsmessung, *Lichttechnik*, 25, 1973, pp. 566-571.
119. ERB (W.), Änderungen der Strahlungsphysikalischen Eigenschaften von Reflexionsnormalen nach UV-Bestrahlung, *Ibid.*, pp. 345-349.
120. FISCHER (D.), Betrachtungen und Messungen über die Leuchtdichteverteilung von Leuchtstofflampen, *Optik*, 31, 1970, pp. 477-487.
121. FISCHER (U.), HOFFMANN (P.), Der Transmissionsgrad lichtdurchlässiger Materialien bei nicht senkrechtem Lichteinfall, *Lichttechnik*, 24, 1972, pp. 416-418, 460-462.
122. FÖRSTE (D.), Zur Prüfung von Kennleuchten für blaues und für gelbes Blinklicht, *Ibid.*, 22, 1970, pp. 438-440.
123. FUHRMANN (H.), Automatisches Nullpunkt-Kompensationsverfahren von Betriebsphotometern, *Arch. Techn. Messen*, 1973, pp. R221-R226.

124. HAASE (R.), KROCHMANN (J.), Über den Einfluss polarisierter Strahlung auf die Empfindlichkeit photoelektronischer Bauelements, *Arch. Techn. Messen*, V 45-2 Lfg 433, 1972, pp. 31-34.
125. HAEGER (F.), Über die Methoden der Beleuchtungsvektor-Messung, *Lichttechnik*, 24, 1972, pp. 564-566, 611-612.
126. HAEGER (F.), MARX (P.), Ein modernes analoges Beleuchtungsstärkemessgerät, *Ibid.*, 25, 1973, pp. 473-474.
127. HAEGER (F.) Ein Messgerät zur Messung der mittleren zylindrischen Beleuchtungsstärke, *Arch. Techn. Messen*, Bl. V. 423-9, 1974, pp. 67-68.
128. HAEGER (F.), Über die Messung von Lichtfeldgrößen zur räumlichen Bewertung der Beleuchtung mit einfachem Messinstrumentarium, *Lichttechnik*, 9, 1974, pp. 385-388.
129. HELBIG (E.), *Grundlagen der Lichtmesstechnik*, Akademische Verlagsgesellschaft Geest u. Portig KG, Leipzig, 1972 ; voir aussi *Buchbesprechung in Lichttechnik*, 25, 1973, pp. 65-66.
130. HELWIG (H.J.), KROCHMANN (J.), A review of methods for measuring the reflectance and transmittance of lighting materials, *Lighting Research and Technology*, 3, 1971, pp. 211-218.
131. KAASE (H.), Die elektromagnetischen Strahlungsgrößen des 140 MeV Elektronensynchrotrons der PTB, *PTB-Bericht, Optik*, 1/71, 1971
132. KAASE (H.), Measurement of the irradiance of UV-sources by comparison with the synchrotron radiation, *J. of Phys.* (à paraître).
133. KAASE (H.), Erste Messungen der elektromagnetischen Strahlung des 140 MeV Elektronensynchrotrons der PTB, *PTB-Mitt.*, 1, 1973, pp. 9-12.
134. KORTE (H.), Über des Messen in der Lichttechnik, *Lichttechnik*, 25, 1973, pp. 59-61.
135. KRENZKE (G.), Die Messung des Reflexions-, Absorptions- und Transmissionsgrades im Lichtstromfotometer mit der Probe als Wandteil, *Ibid.*, 24, 1972, pp. 22-25.
136. KROCHMANN (J.), Über den Maximalwert des photometrischen Strahlungsäquivalentes, *Optik*, 32, 1970, pp. 205-211.
137. KROCHMANN (J.), ÖZVER (Z.), Über die Strahlung des Planckschen Strahlers und des Wolframs, *Optik*, 34, 1972, pp. 456-474.
138. KROCHMANN (J.), ÖZVER (Z.), Über den Angleich der relativen spektralen Empfindlichkeit photoelektronischer Bauelements an vorgegebene Bewertungsfunktionen, *Arch. Techn. Messen*, V 432-1, 1972, pp. 181-186.
139. KROCHMANN (J.), Über den Stand der Messtechnik einiger lichttechnischer Größen, *Scientia Electrica*, 29, 1973, pp. 37-56.
140. KROCHMANN (J.), Über die Messung von Lichtstärkeverteilung und Lichtstrom, *Tagungsbericht : Konferenz über Photometrie und Kolorimetrie, Varna 1973*, p. 23 et *Arch. Techn. Messen*, Bl V 423-10, 1974, pp. 181-184.
141. KROCHMANN (J.), Section 3.12 : "Lichtmessung" dans *Handbuch der Industriellen Messtechnik*, Ed. P.Profos, Vulkan Verlag, Essen 1974.

142. MARX (P.), MÜLLER (K.), Lichtstromstabilisierung einer Xenon-Hochdrucklampe, *Fernseh- und Kino-Technik*, 27, 1973, pp. 235-237.
 143. MARX (P.), Das Spiral-Photometer, ein modernes elektronisches Lichtstrom-Messsystem, *Tagungsbericht : Konferenz über Photometrie und Kolorimetrie, Varna 1973*, pp. 135-140.
 144. MARX (P.), PRAHL (W.), Ein digitales Gerät zur Messung von Verteilungstemperatur und Verhältnistemperatur, *Lichttechnik*, 9, 1974, pp. 389-392.
 145. REEB (O.), DUKEK (W.), Zur Frage der optimalen Flimmerfrequenz beim photometrischen Abgleich verschiedenfarbiger Lichter, *Farbe*, 19, 1970, pp. 248-252.
 146. RICHTER (K.), Gütebewertung des Strahldichteangleichs an die Normlichtart, *Lichttechnik*, 24, 1972, pp. 370-373.
 147. SINDERMANN (W.), Hochgeschwindigkeits-Momentanwert-Spektrometer, *Ibid.*, 25, 1973, pp. 475-479.
 148. STEMPFLE (H.), Ein Drehspiegelgerät mit Einrichtungen zur Datenerfassung und -verarbeitung, *Ibid.*, 22, 1970, pp. 498-500, 502.
 149. STEMPFLE (H.), ROTHE (W.), Anwendung der Datenverarbeitung bei der Photometrie von Leuchten, *Siemens-Zeitschrift*, 45, 1971, pp. 544-549.
 150. TANNEBERGER (T.), Zu einigen Fragen der industriellen Licht- und Farbmessstechnik an Lichtquellen, *Elektroprakt*, 28, 1974, pp. 50-52.
 151. TERSTIEGE (H.), Spektralphotometrische Untersuchungen an Weissstandards, *Lichttechnik*, 26, 1974, pp. 277-282.
 152. PASTA (M.), RUFFINO (G.), SOARDO (P.), TOSELLI (G.), A new two colour pyrometer, *High Temperatures, High Pressures*, 5, 1973, pp. 99-104.
 153. FALLETTI (V.), SOARDO (P.), The determination of the relative spectral sensitivity of photoelectric receptors ; a wideband multifilter method, présenté à la CIE (TC-1.2), 1975.
 154. SOARDO (P.), A new goniophotometer, *Alta Frequenza*, 1975 (à paraître).
 155. DEAGLIO (R.), GENTILE (C.), Considerazioni sulla situazione attuale della fotometria, *III Congresso Internazionale AIDI*, Firenze, octobre 1972, mem. II/6.
 156. PASTA (M.), SOARDO (P.), Luminanzimetro con regolazione automatica della sensibilità, *Ibid.*, mem. II/9.
 157. BRUSA (R.W.), FRÖHLICH (C.), World Radiation Center Davos, Technical note No. 1, 1972.
 158. BRUSA (R.W.), FRÖHLICH (C.), "Conference on Infrared Physics", Zurich, août 1975.
-

ANNEXE P 3

Suggestions sur le partage des responsabilités entre le CCPR, le BIPM et la CIE

par G. L. SANDERS

Conseil National de Recherches (Canada)

(Document CCPR/75-6)

INTRODUCTION

Afin d'assurer l'accomplissement de toutes les tâches nécessaires et afin de prévenir le chevauchement des programmes de travail du CCPR, du BIPM et de la CIE*, on doit préciser le partage des responsabilités. Les suggestions ci-dessous, après discussion, pourraient éventuellement mener à une règle de conduite adoptée mutuellement par le CIE (TC-1.2) et le CCPR et suivie dans l'avenir.

RESPONSABILITÉS DU CCPR

- 1) Définir les unités, en accord avec le CCU.
- 2) Définir les échelle pour la radiométrie.
- 3) Définir les échelles pour la photométrie, fondées sur les recommandations de la CIE.
- 4) Définir les échelles pour la colorimétrie, fondées sur les recommandations de la CIE.

Transmettre les définitions ci-dessus au CIPM et à la CGPM.

* CIE Commission Internationale de l'Eclairage.
TC-1.2 Comité technique "Photométrie et Radiométrie".
CGPM Conférence Générale des Poids et Mesures.
CIPM Comité International des Poids et Mesures.
CCPR Comité Consultatif de Photométrie et Radiométrie.
CCU Comité Consultatif des Unités.

5) Vérifier les échelles nationales à l'aide de comparaisons organisées par le BIPM ou par les Groupes de travail du CCPR.

6) Assurer la distribution des échelles par l'entremise du BIPM ou de certains laboratoires nationaux, par la distribution d'étalons de travail.

7) Examiner les divergences entre les échelles.

8) Informer le comité concerné de la CIE des rapports qui montreraient une déficience d'une échelle.

RESPONSABILITÉS DE LA CIE

1) Recommander la définition d'échelles nouvelles ou la modification d'échelles existantes selon les besoins.

2) Recommander des procédés de mesure simplifiés.

3) Recommander des tables abrégées.

4) Examiner les échelles et confirmer la corrélation avec l'effet visuel.

5) Informer le CCPR des désaccords entre les échelles nationales.

6) Examiner les méthodes de mesure.

7) Recommander les méthodes fondées sur un consensus général des représentants des pays membres de la CIE.

8) Veiller à la distribution des échelles au niveau industriel.

9) Comparer les mesures faites sur des sources ou sur des matériaux nouveaux ou spéciaux.

RESPONSABILITÉS DU BIPM

1) Agir comme secrétariat du CCPR et veiller à ce que les recommandations du CCPR soient considérées par le CIPM et la CGPM.

2) Conserver les unités et effectuer les étalonnages pour les laboratoires nationaux.

3) Tenir à jour une liste des laboratoires qui sont prêts à faire des étalonnages spécifiés. (Un projet pilote entrepris par le TC-1.2 de la CIE est présentement en cours d'exécution et, si les résultats sont satisfaisants, on souhaite qu'il soit poursuivi par le BIPM).

4) Recueillir et étudier les rapports sur les divergences entre les unités ou les mesures faites dans deux ou plusieurs laboratoires nationaux.

5) Entretien d'un laboratoire et conservation d'étalons fondés sur l'unité moyenne internationale, pour l'étalonnage et la distribution d'étalons secondaires.

6) Examiner les problèmes spéciaux pour aider à éliminer les désaccords entre laboratoires nationaux.

7) Coordonner l'achat en nombre de lampes ou de récepteurs spéciaux pour les laboratoires nationaux.

(mai 1975)

Redéfinition de la candela et du lumen*

par W. R. BLEVIN

National Measurement Laboratory (Australie)

et B. STEINER

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

(Traduction du Document CCPR/75-3**)

Résumé. - On propose :

- de redéfinir l'unité de base de la photométrie de telle façon qu'on ait une relation numérique exacte entre cette unité et l'unité SI de puissance, le watt, pour un rayonnement monochromatique donné ;
- de remplacer comme unité de base l'unité d'intensité lumineuse, la candela, par l'unité de flux lumineux, le lumen.

On estime que les définitions actuelles résultent essentiellement d'anciennes pratiques photométriques aujourd'hui désuètes. Un lien plus étroit entre la photométrie et la spectroradiométrie est maintenant souhaitable. Ces propositions permettraient de déduire les valeurs des grandeurs photométriques des résultats de mesures spectroradiométriques, par un calcul exact, et de ne plus avoir besoin d'un étalon lumineux primaire. Cela ne modifierait pas de façon significative la grandeur actuelle des unités photométriques, ni ne changerait les relations entre la photométrie et la perception visuelle. Toutefois, comme les nouvelles définitions que l'on propose se réfèrent à un rayonnement monochromatique et non à un rayonnement complexe, elles constitueraient une base plus commode pour l'adoption ultérieure de nouvelles méthodes de pondération spectrale.

Abstract. - It is proposed :

- that the basic photometric unit be redefined so as to provide an exact numerical relationship between it and the SI unit of power, the watt, for a specified monochromatic radiation ;
- that the unit of luminous intensity, the candela, be replaced as the basic unit by the unit of luminous flux, the lumen.

* Ce texte est suivi, dans l'ordre chronologique, des commentaires auxquels il a donné lieu avant la réunion du CCPR.

It is claimed that the existing definitions are predominantly the product of early photometric practices that have been superseded. A closer link between photometry and spectroradiometry is now desirable. The proposals would enable photometric values to be derived from spectroradiometric data by exact computation, and would remove the need for a primary standard of light. They would not alter significantly the present magnitudes of the photometric units, nor change the existing relationship between photometry and visual perception. Because the proposed redefinitions are in terms of monochromatic rather than complex radiation, however, they would provide a more convenient basis for the future adoption of new spectral weighting procedures.

1. INTRODUCTION

Au cours des dernières décennies, on a éprouvé un besoin rapidement croissant de tenir compte en photométrie non seulement des grandeurs photométriques traditionnelles mais également des grandeurs radiométriques associées et de leurs composantes spectrales. Il y a à cela de nombreuses raisons, en particulier les caractéristiques spectrales extrêmement variées des sources lumineuses modernes, l'intérêt croissant de calculer la chromaticité et les indices de rendu des couleurs, un désir fréquent de considérer, dans les recherches sur la vision et dans d'autres domaines, des fonctions de pondération spectrale autres que les fonctions conventionnelles adoptées par la CIE, et les besoins plus complexes des industries telles que la photographie, la télévision et l'électro-optique. Par conséquent, il est maintenant extrêmement souhaitable que les systèmes d'unités de la radiométrie et de la photométrie soient étroitement liés afin que les données spectrales soient convertibles d'un système dans l'autre par un calcul exact.

Les discussions qui ont abouti au système d'unités photométrique actuel se sont déroulées essentiellement avant 1940, à une époque où les techniques visuelles de mesure étaient encore prédominantes en photométrie et où il n'était que peu question de spectroradiométrie. Par conséquent, il n'est pas surprenant que ce système ne soit pas bien adapté aux développements ultérieurs de la photométrie et qu'il ait même tendance à entraver l'application des méthodes fondamentales de spectroradiométrie. En particulier, l'unité choisie comme base du système, la candela, est définie à partir d'un rayonnement complexe, et non pas monochromatique, et la répartition de la puissance spectrale de ce rayonnement complexe n'est pas encore connue avec une exactitude satisfaisante. En conséquence, pour un rayonnement monochromatique à n'importe quelle longueur d'onde, il existe une incertitude avoisinant 2 % dans la rela-

tion entre les grandeurs correspondantes en photométrie et en radiométrie. Cette incertitude est de plus en plus préoccupante et en fait elle devient intolérable.

Dans le présent document nous proposons que la base du système d'unités en photométrie soit modernisée pour l'adapter aux techniques physiques de mesure, objectives et d'un usage courant. Nous recommandons

- de redéfinir l'unité de base de telle façon qu'on ait des relations numériques exactement connues entre les unités photométriques et l'unité SI de puissance, le watt,

- de remplacer la candela par le lumen comme unité de base.

Avant de discuter de ces recommandations, il est nécessaire de faire rapidement l'historique de la photométrie (section 2) et de discuter plus en détail des relations qui existent entre les grandeurs photométriques et radiométriques (section 3). On a donné en appendice les définitions actuelles, acceptées sur le plan international, des grandeurs flux lumineux et intensité lumineuse et des unités candela et lumen. Pour les définitions des autres grandeurs et des autres unités photométriques et radiométriques, il convient de se reporter au Vocabulaire International de l'Eclairage [1].

2. HISTORIQUE

La photométrie est devenue une branche importante de la métrologie au tout début du dix-huitième siècle ; depuis lors, deux traditions se sont perpétuées : l'unité d'intensité lumineuse est considérée comme l'unité de base et sa grandeur est établie en adoptant une source artificielle spécifiée comme étalon primaire de lumière [2]. La recherche continue de sources ayant une constance et une reproductibilité plus grandes a conduit à une succession d'étalons - d'abord des bougies, ensuite d'autres sources à flamme, des lampes à filament de carbone, et pour finir un corps noir à la température de congélation du platine. Le corps noir étalon a été adopté par la CGPM en 1948 [3], à la suite de discussions qui avaient pour la plupart eu lieu avant la seconde guerre mondiale ; il correspondait assez bien aux besoins de l'époque. Comme l'ont fait remarquer Jones et Preston [4], les photométristes de l'époque "recherchaient encore une source matérielle possédant une constance et une reproductibilité meilleures. En tout état de cause, ils ne

recherchaient pas un étalon dont on pourrait prévoir, par la théorie, le flux énergétique et lumineux ...". En conséquence, les considérations principales étaient la facilité de spécification du nouvel étalon, sa reproductibilité et sa couleur, qui devait être très semblable à celle des premiers étalons à flamme et à filament de carbone pour convenir en photométrie visuelle. Que les caractéristiques radiométriques de l'étalon puissent être calculées à partir de la loi de Planck, cela paraissait d'un intérêt secondaire, et les incertitudes dans des calculs de ce genre importaient peu à l'époque.

À l'origine, la photométrie s'occupait essentiellement des sources lumineuses et, encore en 1922, Walsh [5] la définissait comme "le domaine de la physique appliquée qui se rapporte à la comparaison quantitative de sources lumineuses et à leur évaluation par rapport à un étalon quelconque convenu". Dans les débuts de l'histoire de la photométrie visuelle, il s'avéra que l'intensité lumineuse, ou "candlepower" comme on l'appelait alors en anglais, était la caractéristique d'une source la plus commode pour les comparaisons, et l'on s'accorda à la considérer comme la grandeur fondamentale de la photométrie. Jusque vers 1920 la plupart des sources de provenance commerciale étaient évaluées en bougies, mais depuis lors les ingénieurs éclairagistes ont eu tendance à mettre davantage l'accent sur le flux lumineux total émis. De plus, la photométrie a élargi son domaine pour y inclure les mesures faites sur les champs de rayonnement et sur les récepteurs, aussi bien que sur les sources ; sa définition actuelle, acceptée sur le plan international, est : "mesure des grandeurs relatives aux rayonnements, évaluées selon l'impression visuelle produite par ceux-ci et sur la base de certaines conventions". Ainsi la grandeur intensité lumineuse, qui se rapporte seulement aux sources, est maintenant considérée comme moins fondamentale que des grandeurs plus largement utilisables comme le flux lumineux et la luminance.

Le passage des techniques visuelles aux techniques physiques en photométrie fut pour une large part dû aux progrès technologiques des récepteurs, mais l'adoption internationale des fonctions d'efficacité lumineuse relative spectrale (figure 1) joua également un rôle essentiel. La fonction $V(\lambda)$ pour la vision photopique a été adoptée d'abord en 1924 par la CIE [6] ; en 1933 elle fut adoptée aussi par le CIPM [7]. À l'origine, elle permettait surtout de déterminer par spectrophotométrie les valeurs du facteur de transmission lumineuse de certains filtres bleus et jaunes utilisés pour la photométrie visuelle de lampes

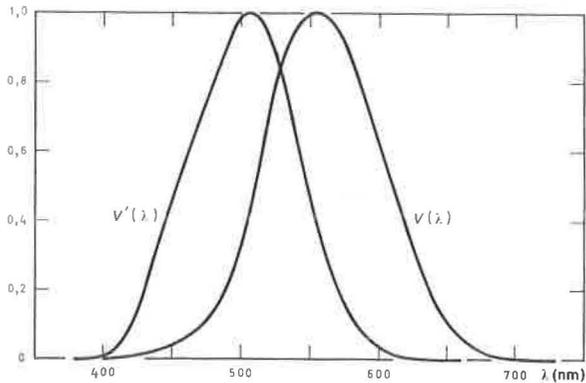


Fig. 1.- Fonctions d'efficacité lumineuse relative spectrale, $V(\lambda)$ pour la vision photopique et $V'(\lambda)$ pour la vision scotopique.

à incandescence fonctionnant à des températures de répartition différentes. Ultérieurement, avec le passage aux récepteurs physiques, la pratique s'est répandue d'utiliser des photomètres photoélectriques dont la réponse spectrale simulait la fonction $V(\lambda)$. En 1951, la CIE adopta provisoirement la fonction $V'(\lambda)$ pour la vision scotopique d'observateurs jeunes [8], mais cette fonction n'a pas été adoptée par le CIPM. Pour le cas intermédiaire d'adaptation, la vision mésopique, il n'existe encore aucune convention correspondant aux fonctions $V(\lambda)$ et $V'(\lambda)$, bien que la CIE étudie activement cette question. En attendant, on ne dispose d'aucune méthode satisfaisante pour la photométrie mésopique, les techniques visuelles étant particulièrement difficiles et imprécises dans ce domaine.

On peut résumer les conventions actuelles de la photométrie au moyen de trois expressions mathématiques qui sont données ci-dessous dans le cas de la luminance photopique L_v en un point d'un champ arbitraire de rayonnement. Des expressions semblables sont valables pour les autres grandeurs photométriques et pour la vision scotopique. La première convention est une loi d'additivité, qui postule que la luminance est reliée à ses composants spectraux, $L_{v,\lambda} = dL_v/d\lambda$, par l'intégrale

$$L_v = \int L_{v,\lambda} d\lambda \quad (1)$$

La seconde convention introduit la fonction $V(\lambda)$ et note que pour chaque longueur d'onde, $L_{v,\lambda}$ est proportionnel à $L_{e,\lambda} V(\lambda)$,

où $L_{e,\lambda}$ est la luminance énergétique spectrique. Ceci permet de donner à l'équation (1) la forme

$$L_v = \int L_{e,\lambda} V(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

La troisième convention est la définition de la candela, qui permet d'exprimer l'intensité lumineuse $I_v(Pt)$ d'un corps noir, de section droite A , au point de congélation du platine, sous la forme $I_v(Pt) = 600\ 000\ A\text{cd}$, où A est exprimé en mètres carrés. Dans le contexte actuel il est plus commode d'écrire cette relation en faisant apparaître la luminance $L_v(Pt)$ du corps noir, ce qui donne

$$L_v(Pt) = \frac{I_v(Pt)}{A} = 600\ 000\ \text{cd}\cdot\text{m}^{-2} \quad (3)$$

Il découle de l'équation (2) que la luminance L_v dans le champ de rayonnement arbitraire est reliée à $L_v(Pt)$ par l'équation

$$L_v = \frac{L_v(Pt) \int L_{e,\lambda} V(\lambda) d\lambda}{\int L_{e,\lambda}(Pt) V(\lambda) d\lambda} \quad (4)$$

où $L_{e,\lambda}(Pt)$ est la luminance énergétique spectrique du corps noir au point de congélation du platine. La plupart des mesures photométriques impliquent la solution d'une équation du type (4). Toutefois dans l'équation (4) on ne peut résoudre les intégrales de façon analytique et, pour évaluer leur rapport, il est nécessaire d'adopter soit une méthode de sommation numérique, soit une méthode expérimentale, analogique, utilisant un récepteur à large bande passante dont la réponse spectrale simule la fonction $V(\lambda)$. La définition actuelle de la candela fut adoptée en pensant à cette dernière méthode et en admettant que soit l'oeil soit un récepteur photoélectrique avec correction de couleur serait utilisé comme récepteur à large bande. Malheureusement, cette façon de faire ne donne pas les informations spectrales de base dont on a si fréquemment besoin aujourd'hui ; de plus, il est difficile de corriger comme il convient les courbes de réponse spectrale des cellules photoélectriques pour faire des comparaisons précises avec la grande variété de sources que l'on utilise aujourd'hui. La définition actuelle désavantage la méthode de sommation numérique car, comme on le verra plus loin (section 3), il n'a pas encore été possible de déterminer $L_{e,\lambda}(Pt)$ avec une exactitude suffisante.

3. RELATION ACTUELLE ENTRE LES UNITÉS PHOTOMÉTRIQUES ET LES UNITÉS RADIOMÉTRIQUES

On peut écrire l'équation (4) sous la forme

$$L_v = K_m \int L_{e,\lambda} V(\lambda) d\lambda \quad (5)$$

où la constante de proportionnalité K_m , connue comme l'efficacité lumineuse spectrale maximale du rayonnement pour la vision photopique, est donnée par

$$K_m = \frac{L_v(Pt)}{\int L_{e,\lambda}(Pt) V(\lambda) d\lambda} \quad (6)$$

K_m a comme unité lm W^{-1} et sa valeur donne la relation entre le lumen et le watt à la longueur d'onde $\lambda_m = 555 \text{ nm}$ pour laquelle $V(\lambda)$ est maximal. Pour les autres longueurs d'onde le quotient lumen par watt est donné par la fonction $K(\lambda) = K_m V(\lambda)$, que l'on appelle efficacité lumineuse spectrale du rayonnement. Pour la vision scotopique, les grandeurs correspondantes sont K'_m , $\lambda'_m = 507 \text{ nm}$ et $K'(\lambda) = K'_m V'(\lambda)$.

Pour évaluer K_m , on utilise la loi de Planck pour exprimer $L_{e,\lambda}(Pt)$ dans l'équation (6), ce qui donne [9]

$$K_m = L_v(Pt) / \left[\frac{\sigma_1}{\pi n^2} \int \frac{\lambda^{-5} V(\lambda) d\lambda}{\exp \left[\frac{\sigma_2}{n\lambda T(Pt)} \right] - 1} \right] \quad (7)$$

où σ_1 et σ_2 sont les constantes du rayonnement de Planck, n est l'indice de réfraction du milieu traversé et $T(Pt)$ la température thermodynamique de congélation du platine. Par suite d'un oubli, ni la définition de la candela ni la table donnant la fonction $V(\lambda)$ ne spécifient le milieu ; nous supposons qu'il s'agit de l'air avec un indice de réfraction de 1,000 28 et ne tiendrons pas compte des effets de dispersion. Les incertitudes dans l'évaluation de K_m proviennent essentiellement des incertitudes sur $T(Pt)$ et, dans une moindre mesure, des incertitudes sur σ_1 et σ_2 . La valeur calculée pour K_m varie de 670,8 lm/W , si l'on prend $T(Pt) = 2045 \text{ K}$, valeur qui figure comme point secondaire de référence dans l'EIPT-68 [10], à 686,7 lm/W , si l'on prend $T(Pt) = 2041,05 \text{ K}$, valeur résultant d'une mesure récente faite par Quinn [11] après correction pour l'indice de réfraction de l'air [9]. Une mesure encore plus récente de $T(Pt)$ faite par Jones et Tapping [12] a fourni une valeur intermédiaire 2042,85 K, ce qui donne 679,4 lm/W pour K_m . Les valeurs calculées correspondantes pour K'_m sont respectivement 1720, 1765 et 1744 lm/W .

Les fonctions $K(\lambda)$ et $K'(\lambda)$ (figure 2) ont par définition une forme identique aux courbes $V(\lambda)$ et $V'(\lambda)$, mais à chaque longueur d'onde leurs valeurs présentent les mêmes incertitudes que celles qui existent pour K_m et K'_m . On verra plus loin le cas particulier de la longueur d'onde λ_i pour laquelle les courbes $K(\lambda)$ et $K'(\lambda)$ se recoupent, c'est-à-dire pour laquelle le quotient lumen par watt est le même pour la vision photopique et pour la vision scotopique. Les calculs pour cette longueur d'onde sont peu sensibles à l'incertitude sur $T(\text{Pt})$ et montrent que $\lambda_i = 555,80 \pm 0,05$ nm. La proximité de λ_i et de λ_m n'a pas de signification fondamentale, ce n'est qu'une pure coïncidence résultant de la définition arbitraire actuelle de la candela.

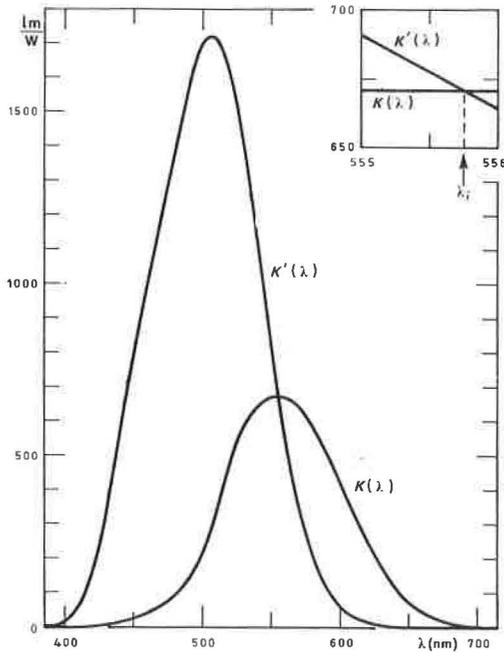


Fig. 2.- Fonctions d'efficacité lumineuse spectrale, $K(\lambda)$ pour la vision photopique et $K'(\lambda)$ pour la vision scotopique, calculées sur la base de $c_1 = 3,741\ 50 \times 10^{-16}$ W·m² ; $c_2 = 1,438\ 80 \times 10^{-2}$ m·K $T(\text{Pt}) = 2045$ K et $n = 1,000\ 28$. Le cartouche montre à plus grande échelle l'intersection des deux courbes.

4. POINTS FAIBLES DE LA DÉFINITION ACTUELLE DE LA CANDELA

L'expérience pratique et les progrès techniques réalisés depuis 1948 montrent que la définition actuelle de la candela

présente plusieurs points faibles, que l'on peut résumer comme suit.

1) Le principal point faible vient de ce que la définition ne permet pas d'obtenir les fonctions d'efficacité lumineuse spectrale $K(\lambda)$ et $K'(\lambda)$ avec une exactitude suffisante pour donner une liaison satisfaisante entre la photométrie et la radiométrie. On ne dispose d'une valeur photométrique exacte que pour un seul rayonnement complexe particulier, et non pour le cas fondamental des rayonnements monochromatiques. Toutefois, la tendance actuelle de la photométrie est de s'orienter vers la spectroradiométrie fondamentale et l'emploi d'équations comme l'équation (5), ainsi qu'il est indiqué dans la note jointe à la définition internationale du flux lumineux (voir appendice). Mais la définition actuelle, conçue pour des techniques à large bande plutôt que pour des techniques spectrales, continue de donner des incertitudes dépassant un pour cent sur le quotient lumen par watt, et par conséquent interdit l'utilisation de méthodes spectroradiométriques en photométrie.

2) La réalisation expérimentale de la candela au moyen du corps noir au point de congélation du platine s'est avérée plus difficile et malcommode qu'il n'est souhaitable pour un étalon primaire. A cause de cela, et du peu d'autres applications de ce corps noir, les laboratoires nationaux d'étalonnage ont été peu disposés à réaliser l'étalon primaire, ne serait-ce qu'une fois tous les dix ans. Sur les huit laboratoires qui ont participé à la dernière comparaison internationale des échelles d'intensité lumineuse [13], comparaison effectuée en 1969 par le BIPM, aucun n'utilisait une échelle réalisée depuis la comparaison antérieure de 1961. Deux laboratoires, le NBS et le NPL utilisaient des échelles réalisées avant 1940.

3) Il subsiste des différences beaucoup trop importantes entre les grandeurs des unités photométriques conservées dans les différents laboratoires nationaux. Par exemple, les résultats de la comparaison de 1969 des échelles d'intensité lumineuse, montrent une dispersion de 1,6 % pour les lampes à vide à la température de répartition de 2045 K, et de 2,4 % pour les lampes remplies de gaz à 2859 K. Il n'y a donc pas eu d'amélioration nette depuis la première comparaison internationale de photométrie faite au BIPM en 1948, pour laquelle les résultats des six laboratoires participants faisaient apparaître une dispersion de 2,0 % pour les lampes à 2042 K et de 1,0 % pour les lampes à 2353 K [14].

4) La plupart des laboratoires nationaux qui réalisent la candela ont répugné à faire des corrections pour les erreurs systématiques résultant de la forme simple adoptée pour le corps noir au point de congélation du platine. Un Groupe de travail du CCP a montré que presque toutes ces erreurs semblent aller dans le même sens et risquent de faire que la candela réalisée soit nettement plus petite que la candela de la définition, ce qui a pour conséquence d'accroître les valeurs assignées aux étalons photométriques [15]. Le président du Groupe de travail a estimé que, pour sept laboratoires, l'erreur systématique totale allait d'environ 0,4 % à 1,5 %, avec une valeur moyenne de 0,9 %. Une tentative faite par un des laboratoires pour éviter ces erreurs en utilisant un appareillage plus complet donna une précision améliorée, mais introduisit une sérieuse contamination du platine [16].

5) Les sources lumineuses modernes sont rarement étalonnées directement d'après l'étalon au point de congélation du platine, à cause de sa température relativement basse. On utilise plutôt une chaîne indirecte de mesures photométriques comportant des lampes à vide à filament comme étalons secondaires. Cette pratique a souvent eu pour résultat de mettre l'accent de façon anormale sur la photométrie des lampes à vide, tant dans les laboratoires nationaux que lors des comparaisons internationales.

6) La plupart des laboratoires nationaux ont maintenant une activité en radiométrie et en spectroradiométrie beaucoup plus grande qu'avant 1948. En conséquence, la construction d'un corps noir au point de congélation du platine, uniquement pour réaliser la candela est maintenant considérée par certains d'entre eux comme faisant double emploi sans en valoir la peine. Ainsi, le NBS a décidé de fonder la conservation des unités photométriques sur ses échelles de luminance énergétique spectrale et d'éclairement énergétique spectral ; c'est là un exemple d'un laboratoire déjà ancien, qui a choisi la méthode spectroradiométrique. Le NML (anciennement National Standards Laboratory) est un jeune laboratoire ; il a récemment effectué sa première réalisation de la candela ; d'emblée il a décidé de ne pas construire de corps noir au point de congélation du platine, préférant utiliser des radiomètres étalonnés électriquement et des filtres simulant la fonction $V(\lambda)$.

5. REDÉFINITION DE L'UNITÉ PHOTOMÉTRIQUE DE BASE
EN FONCTION DU WATT

Nous considérons que les points faibles indiqués ci-dessus justifient d'envisager un changement de la définition de l'unité photométrique de base. La nouvelle définition, si l'on tient compte des fonctions $V(\lambda)$ et $V'(\lambda)$ existantes, devrait conduire à des valeurs connues avec exactitude du quotient lumen par watt pour un rayonnement monochromatique à n'importe quelle longueur d'onde.

Une manière d'atteindre ce but consisterait à adopter des valeurs numériques formelles pour les constantes K_m et K'_m . Toutefois, quand cette possibilité fut envisagée en 1971 à la septième session du CCP, on objecta que la nécessité d'inclure des constantes séparées pour la vision photopique et la vision scotopique constituait un désavantage, en particulier parce que la définition actuelle est indépendante de l'état d'adaptation de l'oeil. Par la suite Blevin a souligné [17] que l'on peut écarter cette objection très facilement en convenant, non pas de valeurs distinctes pour K_m et K'_m , mais d'une valeur commune pour les fonctions $K(\lambda)$ et $K'(\lambda)$ à la longueur d'onde λ_i à laquelle elles se recourent par suite de la définition actuelle (figure 2). On a déjà vu que, par hasard, λ_i coïncide presque avec λ_m . Il importerait donc peu dans la nouvelle définition que les valeurs de $K(\lambda)$ et de $K'(\lambda)$ soient égales pour $\lambda_i = 555,8$ nm, pour $\lambda_m = 555,0$ nm, ou pour une longueur d'onde intermédiaire. Nous préférons que le point d'intersection soit spécifié au moyen de la fréquence plutôt qu'au moyen de la longueur d'onde ; on évite ainsi d'avoir à préciser l'indice de réfraction du milieu. La valeur arrondie de 540×10^{12} Hz correspond à une longueur d'onde de 555,016 nm dans l'air ayant un indice de réfraction de 1,000 28, et nous recommandons l'adoption de cette fréquence.

La valeur qu'il convient d'assigner à $K(\lambda)$ et $K'(\lambda)$ à cette fréquence devrait être décidée par le CIPM, le meilleur critère étant d'assurer la continuité avec les grandeurs des unités photométriques utilisées dans la pratique actuelle. Il y a là une légère différence avec l'idée d'assurer la continuité avec l'unité telle qu'elle est actuellement définie. Pour choisir la valeur la mieux appropriée, il faudra que plusieurs laboratoires nationaux mesurent K_m d'après leurs propres échelles photométriques et, à partir de ces résultats, il faudra obtenir un accord international sur la valeur à inclure dans

la nouvelle définition. On dispose déjà des résultats de quelques déterminations de K_m . Au NPL des mesures avec des radiomètres étalonnés électriquement ont donné des valeurs de 685 lm/W [18] et 687 lm/W [19], alors qu'une mesure faite à partir d'une lampe à corps noir et de l'EIPT-68 a donné 676 lm/W [20]. Le NML a mesuré K_m avec des radiomètres étalonnés électriquement. Une expérience pilote a donné une valeur de 682 lm W^{-1} [21], mais à la suite de mesures plus fines cette valeur est devenue 683 lm/W [22]. A l'ETL, on a obtenu la valeur de 684 lm/W en utilisant un radiomètre étalonné électriquement et un filtre simulant la fonction $V(\lambda)$, 683 lm/W en utilisant le radiomètre avec d'autres filtres et 676 lm/W en utilisant une lampe à corps noir et l'EIPT-68 [23]. Toutes ces valeurs sont dans les limites de un pour cent par rapport à 680 lm/W et par commodité nous adopterons cette valeur dans la suite de la discussion, sans vouloir impliquer que cette valeur particulière soit nécessairement celle sur laquelle on s'accordera ultérieurement.

Si les recommandations ci-dessus étaient adoptées et si l'on conservait la candela comme unité de base, la nouvelle définition prendrait la forme suivante :

Candela

Intensité lumineuse d'une source émettant de façon uniforme dans la totalité de l'angle solide de 4π stéradians, un rayonnement monochromatique qui est caractérisé par une fréquence de 540×10^{12} hertz et par un flux énergétique de $4 \pi/680$ watt.

Note : La fréquence de 540×10^{12} hertz correspond assez étroitement à la longueur d'onde de 555×10^{-9} mètre dans l'air ou dans tout autre milieu ayant un indice de réfraction de 1,000 28.

L'adoption d'une nouvelle définition sous cette forme n'obligerait pas à changer la définition actuelle du lumen.

6. CONSÉQUENCES DE LA NOUVELLE DÉFINITION

Nous pensons que la nouvelle définition de l'unité de base en fonction du watt apporterait les avantages suivants :

1) La nouvelle définition, avec les fonctions $V(\lambda)$ et $V'(\lambda)$, donnerait des valeurs numériques connues avec exactitude pour les fonctions d'efficacité lumineuse $K(\lambda)$ et $K'(\lambda)$, ce qui permettrait de faire le calcul exact des valeurs photométriques à partir des données spectroradiométriques. Par conséquent, le premier des inconvénients mentionnés pour la définition actuelle serait complètement éliminé.

2) Il ne serait plus nécessaire d'avoir un étalon primaire de lumière, puisque le watt est déjà défini en fonction du mètre, du kilogramme et de la seconde. Comme l'a souligné Moon [24], il est de règle en physique de définir un concept d'une seule façon. Chaque laboratoire national serait entièrement libre de choisir sa propre méthode pour réaliser les unités photométriques et par conséquent on éviterait la duplication d'efforts, mentionnée comme le sixième inconvénient de la définition actuelle. Le choix de la méthode serait sans doute grandement influencé par l'expérience particulière de chaque laboratoire. On a par exemple indiqué à la section 4 que le NBS et le NML ont déjà choisi des techniques radiométriques très différentes. Avec l'une ou l'autre de ces techniques il sera commode de réaliser la candela bien plus souvent que par le passé. Il faut souligner que le changement de définition n'empêcherait pas les laboratoires de continuer à utiliser le corps noir au point de congélation du platine, s'ils le désirent. Cependant, la luminance de ce corps noir risque de différer légèrement de $600\ 000\ \text{cd/m}^2$ et il faudrait la calculer à partir de la meilleure valeur disponible pour $T(\text{Pt})$.

3) On n'attribuerait plus une importance excessive aux lampes à incandescence à vide, en partie parce que l'on pourrait étalonner directement les sources courantes et en partie parce que, grâce aux réalisations plus fréquentes de l'unité de base, la photométrie dépendrait moins de la stabilité à long terme des lampes étalons. Par exemple, le NML a réalisé la candela par des mesures radiométriques faites directement sur des lampes à incandescence remplies de gaz fonctionnant à 2 859 K, et le NBS utilise des lampes à halogène à quartz dans ses études spectroradiométriques.

4) Il est à peu près certain que la nouvelle définition entraînerait en fait une amélioration de l'exactitude et de l'accord international en photométrie, parce qu'elle encouragerait des techniques nouvelles, variées et plus fondamentales. Elle permettrait également à la photométrie de bénéficier directement des progrès de la radiométrie effectués dans les autres domaines, tels que la météorologie et la physique de l'espace. De plus, il est déjà très habituel en radiométrie de tenir compte de toutes les erreurs systématiques connues plutôt que de les négliger comme cela a souvent été le cas avec l'étalon au point de congélation du platine. Pour cette raison, la nouvelle définition devrait également conduire à un meilleur accord entre l'unité telle qu'elle est réalisée et l'unité

telle qu'elle est définie.

Il n'est pas évident que la nouvelle définition donnerait à court terme un meilleur accord entre les laboratoires nationaux ou entre les réalisations des unités et leurs définitions. Tandis que Brown et Blevin [21] prétendent que l'on peut réaliser la candela dans sa nouvelle définition au moyen de radiomètres étalonnés électriquement avec une incertitude d'environ 0,3 %, Jones et Gordon-Smith [20] considèrent que cette méthode ne paraît pas encore susceptible d'améliorer l'exactitude actuelle. Ces derniers affirment cependant qu'on obtiendrait une meilleure précision si l'on remplaçait l'étalon primaire actuel par un corps noir dont on mesurerait la température par pyrométrie optique, méthode qui est compatible avec la nouvelle définition proposée. Avec la nouvelle définition, le NBS serait en mesure de réduire immédiatement de plus de 4 % à environ 1 % l'incertitude indiquée pour ses étalonnages d'intensité lumineuse par rapport au SI. La meilleure façon de se faire une idée de la manière dont le changement de définition affecterait l'accord international à court terme est probablement de considérer la dispersion des récentes mesures de K_m , bien que cette dispersion soit influencée non seulement par les erreurs radiométriques mais aussi par les différences qui existent entre les échelles photométriques nationales. Les valeurs mesurées de K_m données à la section 5 vont de 676 à 687 lm/W ; cet écart de 1,6 % est d'un ordre de grandeur comparable à celui des écarts obtenus lors des comparaisons d'intensité lumineuse en 1969.

5) La nouvelle définition simplifierait l'enseignement de la photométrie et montrerait à l'évidence aux scientifiques en général que la photométrie physique est une branche tout à fait objective de la métrologie, se réduisant à la pondération spectrale de la radiométrie. Bien qu'il en ait été ainsi, en fait, depuis l'adoption des fonctions $V(\lambda)$ et $V'(\lambda)$ et de la définition au point de congélation du platine, la situation est restée obscure pour les non-spécialistes, surtout parce que la définition fait appel à un rayonnement complexe plutôt que monochromatique et parce que la pondération spectrale a très souvent été effectuée par des récepteurs corrigés.

6) Il est maintenant généralement admis qu'aucune fonction simple de pondération telle que $V(\lambda)$ ne peut donner des valeurs de luminance qui concordent toujours de façon satisfaisante avec les luminosités perçues, en particulier lorsqu'il y a de grosses différences de chromaticité. Il faudra des méthodes

plus compliquées de pondération spectrale pour surmonter cette difficulté ; les propositions de Thornton [25] en sont un exemple. La définition proposée serait plus commode que la définition actuelle pour introduire de telles modifications, parce qu'elle fait appel à un rayonnement monochromatique. Toutefois, le changement de la définition en lui-même n'entraînerait aucune modification dans les conventions photométriques actuelles qui sont résumées par les équations (1) et (2).

Les principaux arguments contre l'adoption de la définition - et nos commentaires à leur sujet - sont les suivants :

1) Il n'est pas certain que la nouvelle définition conduirait à un meilleur accord international en photométrie à court terme. Mais, comme il a été déjà dit, il est certain que l'accord ne serait pas pire.

2) La proposition conduit à changer la définition d'une unité de base du SI, alors qu'il est souhaitable que de tels changements soient rares.

Nous considérons toutefois que la définition actuelle est dépassée par les progrès techniques et que le changement est nécessaire pour progresser davantage. Il ne faudrait pas non plus penser que la définition actuelle a été de courte durée. Parmi les autres unités de base du SI, seuls le kilogramme et l'ampère n'ont pas eu de modifications importantes de leur définition depuis l'adoption de la candela au point de congélation du platine en 1948.

3) Maintenir la définition actuelle conduirait à des valeurs précises pour le quotient lumen par watt, lorsque l'on connaîtrait $T(\text{Pt})$ avec suffisamment d'exactitude. Mais nous pensons qu'il ne faut pas faire dépendre l'époque à laquelle on parviendra à clarifier les relations entre la photométrie et la spectroradiométrie, de la rapidité des progrès effectués dans la mesure des températures. De plus, si l'incertitude sur $T(\text{Pt})$ devait devenir négligeable, la définition actuelle ne serait de toute façon guère mieux qu'une méthode extrêmement indirecte d'exprimer la relation entre le lumen et le watt.

4) Certaines des méthodes que permettrait la nouvelle définition pour réaliser la candela comporteraient des mesures de température ; dans ces cas-là, la grandeur de l'unité réalisée pourrait être modifiée de façon appréciable à la suite de révisions futures de l'EIPT. Bien que cela ne soit pas souhaitable, toutes les nouvelles méthodes ne feraient pas appel à des mesures de température et les laboratoires seraient

libres de choisir celle des méthodes qu'ils jugeraient la meilleure.

Nous en tirons la conclusion générale que les avantages d'une définition nouvelle de l'unité photométrique de base en fonction du watt surpassent nettement les inconvénients.

7. PRÉFÉRENCE POUR LE LUMEN COMME UNITÉ DE BASE

Les arguments ci-dessus mentionnés pour une définition en fonction du watt ne reposent pas sur le maintien de la candela comme unité de base. En fait, nous considérons que l'emploi de la candela comme unité de base est devenu un anachronisme historique et, pour les raisons données ci-après, nous recommandons que la candela soit remplacée par le lumen comme unité de base. Cette proposition est loin d'être nouvelle : elle a été faite par l'IMM en 1937 à la première session du CCP [26]. Il serait commode d'effectuer en même temps ces deux changements.

En radiométrie, tout le monde considère que la grandeur *flux énergétique* et son unité, le *watt*, sont plus fondamentales que la grandeur *intensité énergétique* et son unité, le *watt par stéradian*. En fait on n'utilise que très rarement ces deux derniers termes. De la même façon, en photométrie, on considère le *flux lumineux* comme plus fondamental que l'intensité lumineuse, comme le montrent les définitions acceptées sur le plan international, de ces grandeurs (voir appendice). Mais, pour la grande confusion des étudiants, on a donné aux unités photométriques correspondantes un ordre de préséance inverse, moins logique. Ainsi on a donné à la *candela* le rôle d'unité de base, et le *lumen* en est dérivé. En 1926 Walsh [27] tenta de justifier ce renversement des rôles en disant que "la seule grandeur que l'on puisse utiliser de façon commode dans le but d'étalonnage est l'intensité lumineuse d'une source spécifiée de lumière". Un argument semblable a conduit le CCP en 1937 à conserver la candela comme unité de base. Pourtant, le raisonnement de Walsh et du CCP est moins valable depuis 1948 : le corps noir au point de congélation du platine, qui fut alors adopté comme étalon primaire de lumière, est en réalité un étalon de luminance lumineuse, et non d'intensité lumineuse, et il a toujours été utilisé comme tel. Si l'on redéfinissait l'unité de base en fonction du watt on ferait disparaître complètement la nécessité d'un ordre illogique des unités photométriques et l'on pourrait établir une correspondance directe avec les unités radiométriques.

Il existe également de fortes raisons pratiques pour abandonner l'unité d'intensité lumineuse comme unité photométrique de base. Le terme *intensité* est probablement le terme le plus galvaudé et ambigu en optique et dans les domaines voisins [28, 29]; de plus, la plupart des physiciens qui n'ont pas de connaissances particulières en photométrie l'utilisent à des fins incompatibles avec les usages photométriques. En optique, par exemple, l'intensité désigne en général simplement le carré de l'amplitude d'une onde, alors que, dans la théorie du transfert d'énergie rayonnante, on l'utilise pour la grandeur que les photométristes appellent luminance énergétique. Il est malencontreux qu'à une grandeur dont le nom est si diversement utilisé corresponde une unité qui a été choisie comme unité de base.

De plus, comme l'a souligné Zalewski [30], il est particulièrement difficile d'appliquer le concept d'intensité lumineuse aux sources de lumière utilisées couramment.

La relation simple

$$I_v = d\phi_v / d\Omega \quad (8)$$

qui relie par définition l'intensité lumineuse I_v à l'élément de flux $d\phi_v$ à l'intérieur d'un angle solide élémentaire $d\Omega$, ne s'applique qu'au cas hypothétique d'une source ponctuelle. Il faut une note (voir appendice) pour étendre la définition aux sources de dimensions finies ; (8) devient alors

$$I_v = \lim_{x \rightarrow \infty} d\phi_v / d\Omega, \quad (9)$$

où x est la distance entre la source et une surface élémentaire recevant le flux $d\phi_v$ et sous-tendant l'angle solide $d\Omega$. Comme l'a fait remarquer Moon [24], personne ne mesure en fait ni le flux ni l'angle solide, et (9) prend la forme plus pratique de

$$I_v = \lim_{x \rightarrow \infty} x^2 E_v(x) \quad (10)$$

où $E_v(x)$ est l'éclairement lumineux à la distance x de la source. En principe, il est nécessaire de mesurer $E_v(x)$ pour plusieurs valeurs de x , et d'évaluer ensuite par extrapolation l'expression donnée par l'équation (10). Des difficultés surviennent pour choisir l'origine correcte pour la mesure de x et une méthode convenable d'extrapolation ; les incertitudes qui en résultent sont plus apparentes avec les récepteurs précis modernes qu'elles ne l'étaient en photométrie visuelle. De plus, dans la pratique, on mesure souvent $E_v(x)$ pour une valeur

seulement de x et l'on prend simplement $x^2 E_v(x)$ comme valeur de l'intensité. Une approximation de ce type s'accompagne quelquefois de l'emploi de termes vagues, tels que "intensité lumineuse efficace à la distance x " ou "intensité lumineuse telle qu'elle est vue par le récepteur", mais on admet rarement de façon explicite ne pas avoir en fait évalué du tout l'intensité lumineuse.

Une autre raison encore de préférer le lumen comme unité de base est le fait que le concept d'intensité lumineuse s'applique seulement aux sources, comme on l'a exposé à la section 2. La grandeur flux lumineux s'utilise partout où il existe un rayonnement visible, et la référence au flux lumineux total émis par une source n'est qu'un exemple d'un emploi particulier de cette grandeur. Nous ne voulons pas dire que, dans la hiérarchie des lampes utilisées comme étalons photométriques secondaires, il faudrait donner aux étalons de flux lumineux total une plus grande priorité qu'à l'heure actuelle. L'ordre choisi pour réaliser les étalons physiques n'a pas besoin de correspondre au meilleur ordre pour établir le système d'unités correspondant.

Si l'on adoptait le lumen comme unité de base et si on le définissait en fonction du watt, sa définition prendrait la forme suivante :

lumen

Flux lumineux d'un rayonnement monochromatique qui est caractérisé par une fréquence de 540×10^{12} hertz et par un flux énergétique de $1/680$ watt.

Note. La fréquence de 540×10^{12} hertz correspond assez étroitement à la longueur d'onde de 555×10^{-9} m dans l'air ou tout autre milieu ayant un indice de réfraction de 1,000 28.

Cette définition est plus simple que la définition de la candela en fonction du watt que nous avons proposée à la section 5. Nous recommandons son adoption ; dans ce cas la candela deviendrait une unité dérivée et pourrait être aisément définie comme suit :

candela

Intensité lumineuse d'une source émettant un flux lumineux de 4π lumens de façon uniforme dans l'angle solide total de 4π stéradians.

Le seul inconvénient de l'adoption du lumen comme unité photométrique de base semble être qu'elle implique un change-

ment et une rupture avec la tradition. Il semble que cela soit largement compensé par les avantages présentés.

8. CONCLUSION

Ce document a pour but de recommander que les définitions actuelles du lumen et de la candela soient remplacées par les définitions en fonction du watt, données section 7. Bien qu'à première vue les changements proposés puissent paraître assez radicaux, nous considérons les nouvelles définitions plutôt comme des modifications ou des modernisations des définitions actuelles. Elles retiennent l'idée d'attribuer à un rayonnement spécifié une valeur photométrique qui demeure fixe pour toutes les étapes d'adaptation visuelle. Toutefois, le rayonnement dont il est question dans la nouvelle définition est monochromatique avec une fréquence et un flux énergétique spécifiés, tandis que dans la définition actuelle le rayonnement est complexe et sa répartition spectrale d'énergie n'est connue que de façon approximative. On a montré que, tant pour la vision photopique que scotopique, on peut faire en sorte que la grandeur des nouvelles unités ne diffère pas de façon significative de celle des unités utilisées actuellement.

L'adoption des nouvelles définitions mettrait un terme à une période de transition, qui dure déjà depuis 50 ans, au cours de laquelle on a de plus en plus reconnu que la photométrie devrait être fondée sur des mesures spectroradiométriques plutôt que sur des mesures dans de larges bandes spectrales. Cela donnerait directement des facteurs numériques exacts pour passer des résultats spectroradiométriques aux valeurs photométriques en accord avec les fonctions existantes $V(\lambda)$ et $V'(\lambda)$; le système ainsi défini serait plus approprié pour l'introduction ultérieure de fonctions de pondération complémentaires plus élaborées. La nature de la photométrie physique serait plus accessible aux non-spécialistes et, pour réaliser les unités photométriques, les laboratoires nationaux d'étalonnage auraient davantage de liberté pour choisir les méthodes les mieux appropriées à leur expérience particulière.

On ne sait pas encore si, dans l'immédiat, les définitions proposées amélioreraient notablement l'uniformité internationale des mesures photométriques mais, compte tenu d'autres avantages immédiats, nous sommes en faveur de l'adoption sans délai de ces propositions sur le plan international.

La question se pose de savoir si l'unité photométrique de base devrait demeurer une unité de base du SI, lorsqu'elle serait définie en fonction du watt. Il paraît prématuré d'en discuter ici, et nous laissons au CIPM et aux Comités Consultatifs approuvés le soin d'étudier ultérieurement cette question.

Remerciements. Nous tenons à remercier nos nombreux collègues, en particulier J.C. Geist, H.J. Kostkowski et E. Zalewski pour le profit que nous avons tiré de stimulantes discussions avec eux.

BIBLIOGRAPHIE

1. CIE Publ. No. 17 : International Lighting Vocabulary, 3rd Ed., Bureau Central de la CIE, Paris, 1970.
2. WALSH (J.W.T.), *Photometry*, 2nd Ed., London, Constable, 1953.
3. *Comptes Rendus 9^e CGPM*, 1948, p. 53.
4. JONES (O.C.), PRESTON (J.S.), *Photometric standards and the unit of light*, *NPL Notes on Appl. Sc. No. 24*, London, HMSO, 1969.
5. WALSH (J.W.T.), *Photometry and Illumination*. In "Dictionary of applied physics", ed. by R. Glazebrook, London, Macmillan, 1922.
6. CIE, *Comptes rendus 6^e session*, 1924, p. 67.
7. *Procès-Verbaux CIPM*, 15, 1933, p. 61.
8. CIE, *Comptes rendus 12^e session*, 3, 1951, p. 32.
9. BLEVIN (W.R.), *Metrologia*, 8, 1972, p. 146.
10. The International Practical Temperature Scale of 1968, *Metrologia*, 5, 1969, p. 35.
11. QUINN (T.J.), CHANDLER (T.R.D.), The freezing point of platinum determined by the NPL photoelectric pyrometer, In "Temperature, its measurement and control ...", Vol. 4, ed. by H.H. Plumb, Pittsburgh, Instrument Society of America, 1972.
12. JONES (T.P.), TAPPING (J.), private communication, January 1974.
13. BONHOURE (J.), *Comité Consultatif de Photométrie*, 7^e session, 1971, p. P 86.
14. TERRIEN (J.), MOREAU (H.), *Comité Consultatif de Photométrie*, 3^e session, In "*Procès-Verbaux CIPM*, 23-B, 1952, p. P 44.
15. *Comité Consultatif de Photométrie*, 6^e session, 1965, p. 17.
16. SANDERS (C.L.), JONES (O.C.), *J.O.S.A.*, 52, 1962, p. 731.
17. BLEVIN (W.R.), *Precise measurement in radiometry and photometry*, D. Sc. Thesis, University of New England, Armidale, Australie, 1972.
18. PRESTON (J.S.), *Proc. Roy. Soc.*, A 272, 1963, p. 133.
19. GILLHAM (E.J.), *Ibid.*, A 278, 1964, p. 137.
20. JONES (O.C.), GORDON-SMITH (G.W.), *Ibid.*, A 335, 1973, p. 369.
21. BROWN (W.J.), BLEVIN (W.R.), *Comité Consultatif de Photométrie*, 7^e session, 1971, p. 75.
22. BROWN (W.J.), private communication, June 1974.

23. CIE Committee TC-1.2 (photometry and radiometry), Minutes of meeting of subcommittee on spectral irradiance scale intercomparison, Varna, 26 June 1973.
24. MOON (P.), The scientific basis of illuminating Engineering, Appendix B, New York, McGraw-Hill, 1936.
25. THORNTON (W.A.), *J. Illum. Engng Soc.*, 3, 1973, p. 99.
26. *Comité Consultatif de Photométrie*, 1^{re} session, In "*Procès-Verbaux CIPM*, 18, 1937, p. 233".
27. WALSH (J.W.T.), *Photometry*, 1st Ed., London, Constable, 1926.
28. MANDEL (L.), WOLF (E.), *J. Opt. Soc. Am.*, 58, 1968, p. 1678.
29. BARBROW (L.E.), *Ibid.*, 59, 1969, p. 242.
30. ZALEWSKI (E.), *NBS Techn. News Bull.*, 57, 1973, p. 148.

APPENDICE

Définitions actuelles du flux lumineux,
de l'intensité lumineuse, de la candela et du lumen

Flux lumineux

Grandeur dérivée du flux énergétique par l'évaluation du rayonnement d'après son action sur un récepteur sélectif dont la sensibilité spectrale est définie par les efficacités lumineuses relatives spectrales normalisées.

symb. Φ_v, ϕ unité : lumen lm

Note. Sauf indication contraire, le flux lumineux considéré se rapporte à la vision photopique et se rattache au flux énergétique d'après les convention adoptées en 1948 par la C.I.E., c'est-à-dire par la relation

$$\Phi_v = K_m \int \frac{d\phi_e}{d\lambda} V(\lambda) d\lambda$$

dans laquelle $\frac{d\phi_e}{d\lambda} d\lambda$ est le flux énergétique correspondant aux radiations comprises entre λ et $\lambda + d\lambda$ et $V(\lambda)$ est l'efficacité lumineuse relative spectrale dont les valeurs en fonction de λ sont indiquées dans les Publications N° 18 (1970) et N° 15 (1971) de la CIE*. Appliquée au rayonnement du corps noir à la température de congélation du platine, la formule ci-dessus détermine la valeur de K_m (lm/W).

Intensité lumineuse (d'une source dans une direction donnée)

Quotient du flux lumineux quittant la source et se propageant dans un élément d'angle solide contenant la direction, par cet élément d'angle solide.

symb. I_v, I $I_v = \frac{d\phi_v}{d\Omega}$

unité : candela cd

* Ces références ont été modifiées pour tenir compte des récentes décisions de la CIE.

Note 1 : Pour une source non ponctuelle : Si une source étendue envoie un certain flux énergétique sur une surface élémentaire vue, depuis un point quelconque de la source, sous un certain angle solide, l'intensité énergétique de la source dans une direction est la limite du quotient de ce flux par cet angle solide lorsque cette surface s'éloigne à l'infini dans la direction considérée.

Note 2 : Le terme anglais "candlepower" désigne une intensité lumineuse exprimée en candelas.

Candela

Unité SI d'intensité lumineuse : Intensité lumineuse, dans la direction perpendiculaire, d'une surface de $1/600\ 000$ mètre carré d'un corps noir à la température de congélation du platine sous la pression de $101\ 325$ newtons par mètre carré. (13^e Conférence Générale des Poids et Mesures, 1967)

symbl. cd 1 cd = $1\text{ lm}\cdot\text{sr}^{-1}$

Lumen

Unité SI de flux lumineux : Flux lumineux émis dans l'angle solide unité (stéradian) par une source ponctuelle uniforme ayant une intensité lumineuse de 1 candela. (9^e Conférence Générale des Poids et Mesures, 1948).

symbl. lm

DISCUSSION PAR CORRESPONDANCE

Commentaires de J. Bonhoure (BIPM)

Personnellement, je trouve la proposition de W.R. Blevin et B. Steiner prématurée ; mon point de vue sur la question peut se résumer de la façon suivante :

- La définition de la candela à partir du watt est très logique et s'il n'existait pas déjà une définition, c'est probablement celle que l'on adopterait aujourd'hui.

- Mais, dans la situation actuelle, changer de définition n'est justifié que si la nouvelle définition entraîne un meilleur accord entre les réalisations de la candela des différents laboratoires.

- Ce n'est pas le cas si on se réfère à la comparaison de lampes étalonnées en unités énergétiques, organisée par le NPL en 1966 ; mais les lampes n'étaient peut-être pas très stables.

- Il faudrait donc, avant d'envisager un changement de définition de la candela, organiser une nouvelle comparaison qui pourrait être la suivante :

1. Le BIPM fait circuler de laboratoire en laboratoire un groupe de quelques lampes dont il contrôle périodiquement la stabilité.

2. On suppose que la définition actuelle de la candela n'existe plus et on attribue provisoirement une valeur à K_m , par exemple 680 lm/W.

3. On demande à chaque laboratoire d'étalonner les lampes en candelas, par la méthode radiométrique de son choix.

- Le résultat de cette comparaison, si un nombre suffisant de laboratoires y participent, serait très instructif et permettrait de juger s'il est opportun de changer la définition de la candela.

(16 janvier 1975)

Commentaires de F. Rotter

En ce qui concerne le problème de la définition des unités photométriques, il faut faire une distinction stricte entre les considérations théoriques et les nécessités métrologiques.

- Du point de vue théorique, il est important de savoir laquelle des quatre unités photométriques (lumen, candela, lux, candela par mètre carré) doit être mise en tête et utilisée comme unité de base afin d'en déduire les trois autres au moyen des relations de passage appropriées. Ces relations sont bien connues ; je ne veux pas les répéter ici. Chacune d'elles peut être lue de gauche à droite ou de droite à gauche. Formellement il serait mieux de mettre en tête des unités le lumen ; cependant, cela est sans importance pour la métrologie pratique, comme on le sait déjà.

- Du point de vue métrologique, on doit partir d'une expérience qui fournit l'une des quatre unités ci-dessus avec la plus grande exactitude possible. Je voudrais souligner que chacune des quatre unités peut toujours être définie au moyen de l'expérience choisie ; il suffit de modifier légèrement le texte de la définition. Par exemple dans le cas de la définition actuelle de la candela, on peut définir, non seulement la candela par mètre carré, mais aussi le lumen ou le lux, si l'on prend le rayonnement total émis par la surface du corps noir au lieu du rayonnement dans la direction perpendiculaire.

Dans le cas de la nouvelle définition proposée, le rayonnement du corps noir à la température de congélation du platine

est remplacé par un rayonnement monochromatique à 555 nm. Quatre définitions entièrement équivalentes sont alors possibles ; elles s'expriment par les relations suivantes, dans lesquelles le facteur 1/680 a été choisi arbitrairement :

$$1 \text{ lm} \hat{=} \frac{1}{680} \text{ W}$$

$$1 \text{ cd} \hat{=} \frac{1}{680} \text{ W/sr}$$

$$1 \text{ lx} \hat{=} \frac{1}{680} \text{ W/m}^2$$

$$1 \text{ cd/m}^2 \hat{=} \frac{1}{680} \text{ W/(sr}\cdot\text{m}^2)$$

En conséquence, j'appuie la proposition faite par J. Bonheure d'une nouvelle comparaison de lampes étalons pour voir quel niveau de concordance pourra être atteint avec la nouvelle définition proposée de la candela (ou du lumen). Une modification de la définition actuelle ne devrait être faite qu'au moment où on sera sûr d'une amélioration véritable de la précision de mesure.

(6 février 1975)

Commentaires de E.J. Gillham (NPL)

Les avantages d'une définition de l'unité photométrique en fonction du watt sont exposés par W.R. Blevin et B. Steiner d'une façon claire et complète. Ces avantages seront sans aucun doute suffisants pour justifier l'adoption d'une telle définition, dès qu'on aura surmonté les difficultés inhérentes au passage d'une définition à l'autre. Mais, si je comprends bien, c'est l'adoption immédiate de la nouvelle définition que préconisent les auteurs, ce qui implique qu'à leur avis les difficultés ont déjà été surmontées ; c'est ce qu'il faut examiner.

La difficulté principale est d'assurer la continuité de l'unité photométrique. A cet égard, il faut rappeler la distinction que font les auteurs entre l'unité actuelle selon sa définition théorique, et l'unité telle qu'elle a été réalisée et incorporée dans les échelles pratiques des différents laboratoires nationaux. A mon avis, c'est des échelles pratiques qu'il faut assurer la continuité et la stabilité ; c'est en effet à partir de ces échelles qu'il faudra choisir

la valeur de K_m qui servira à définir la nouvelle unité. Donc, ce que l'on peut craindre dans le cas de l'adoption prématurée de la définition proposée, c'est une valeur inexacte de K_m qui ferait apparaître ultérieurement par suite des progrès réalisés en radiométrie, un écart important entre la nouvelle unité et les échelles pratiques. Naturellement, les inconvénients de cette éventualité doivent être appréciés en sachant que des écarts assez grands existent actuellement entre les échelles des différents laboratoires, et qu'un tel écart pourrait bien se produire même en conservant la définition actuelle.

En bref, il y a deux questions auxquelles il faut répondre avant de recommander l'adoption de la nouvelle définition :

1) Quelle sera l'incertitude sur la valeur proposée de K_m par rapport aux échelles pratiques des laboratoires nationaux ?

2) Peut-on accepter un écart éventuel du même ordre entre ces échelles et la nouvelle unité ?

Objectivement, je me rends bien compte que ces questions n'admettent pas de réponses précises. Néanmoins, elles servent à souligner ce que je considère comme le véritable obstacle à l'adoption immédiate de la nouvelle définition.

Remarques

- 1. Les nombreuses réalisations de l'unité actuelle faites dans le passé ne fournissent des valeurs utiles de K_m que si T_{pt} est connue avec une exactitude suffisante. Il faut donc espérer que l'incertitude sur T_{pt} révélée par les recherches de T.J. Quinn, sera réduite dans un proche avenir.

- 2. L'avantage du choix de la longueur d'onde pour laquelle les valeurs de $K(\lambda)$ et $K'(\lambda)$ sont égales est compensé par l'inconvénient que cette valeur commune n'est le maximum ni de la fonction photopique, ni de la fonction scotopique. Je préfère la définition classique, suivant K_m .

- 3. Je suis tout à fait de l'avis exprimé par W.R. Blevin et B. Steiner que la grandeur fondamentale de la photométrie devrait être le flux lumineux, et non l'intensité. Les arguments contre l'emploi de l'intensité sont bien présentés ; encore faut-il y ajouter les difficultés éprouvées par les débutants pour saisir en même temps le concept de flux (correspond-t-il à la puissance ou à l'énergie ?) et celui d'intensité le plus abstrait sans doute des concepts spatiaux employés en radiométrie.

W.R. Blevin et B. Steiner exposent clairement les avantages d'une définition nouvelle de l'unité photométrique à partir du watt.

Nous désirons faire les remarques suivantes :

1) Nous sommes partisans de redéfinir les unités photométriques existantes et partageons l'opinion que l'unité de base devrait être le lumen et non la candela.

2) Nous considérons comme purement académique la question de savoir si K devrait être défini à la longueur d'onde correspondant au maximum de $V(\lambda)$ ou à celle de l'intersection de $V(\lambda)$ et $V'(\lambda)$.

3) Toute nouvelle définition devrait être exprimée en fonction de la fréquence, pour éviter l'introduction de l'indice de réfraction du milieu.

4) Même si on ne pouvait espérer un progrès immédiat dans la réalisation précise de l'unité photométrique de base, une nouvelle définition serait justifiée ; l'ensemble du problème serait ainsi placé dans une perspective beaucoup plus large. Les méthodes actuelles utilisant une source étalon, seraient toujours valables dans le cadre de la nouvelle définition ; de plus, celle-ci permettrait d'officialiser de nouvelles méthodes, par exemple la radiométrie absolue, la spectroradiométrie ou la spectrophotométrie.

Un plus grand nombre de pays et de laboratoires pourraient ainsi contribuer aux recherches dans ce domaine. On a constaté que les laboratoires qui n'étaient pas équipés dès l'origine du corps noir au point de congélation du platine ne sont toujours pas disposés à l'utiliser. A notre avis, c'est une des principales raisons pour lesquelles si peu de progrès ont été accomplis au cours des trente dernières années en ce qui concerne l'étalon primaire de lumière. C'est pourquoi nous pensons que, grâce à la nouvelle définition proposée, la photométrie en général profiterait énormément des progrès effectués dans d'autres disciplines.

5) Nous ne pensons pas que de nouvelles comparaisons de lampes étalons présenteraient un intérêt pour le moment ; le problème de base ne serait pas résolu pour autant. Cela contribuerait tout au plus à prolonger l'état de stagnation actuel.

6) Nous estimons qu'il faudrait attribuer une valeur à K_m , même si cela implique de légères modifications aux échelles pratiques nationales. Si une meilleure valeur devenait ultérieure-

ment disponible, une modification pourrait être acceptée comme on l'a fait dans le passé pour la vitesse de la lumière ou l'échelle pratique de température.

7) Nous proposons qu'un effort international soit fait le plus tôt possible, pour réduire l'incertitude sur la valeur numérique de K_m .

En conclusion, nous voudrions exprimer aux auteurs notre gratitude pour la façon claire et précise avec laquelle ils ont établi leur document.

(17 mars 1975)

Commentaires de G. Bauer (PTB)

1. Les difficultés de réalisation de la candela telle qu'elle est définie depuis le 1er janvier 1948 d'une part, les progrès de la radiométrie d'autre part, sont des raisons de réfléchir à la manière de redéfinir l'unité de lumière. Cela a déjà été exprimé lors de la septième session du CCPR, en 1971.

2. La proposition de W.R. Blevin et B. Steiner doit être considérée comme un pas essentiel dans ce sens. Les points suivants sont intéressants :

a) Comme grandeur de base, on ne propose plus l'intensité lumineuse mais le flux lumineux. Ce dernier étant la grandeur qui, en fait, est mesurée par les récepteurs physiques, ce changement signifierait une adaptation à la technique de mesure actuelle. On pourrait éventuellement prendre en considération l'éclairement lumineux.

b) La référence à une radiation monochromatique de fréquence spécifiée est souhaitable parce qu'elle exclut toutes les complications dues à l'indice de réfraction, ainsi que celles concernant des modifications éventuelles de l'efficacité lumineuse relative spectrale. Toutefois, la définition proposée ne contient pas d'indication qui explique comment le rayonnement à d'autres fréquences doit être évalué photométriquement ; un supplément d'information semble nécessaire.

c) Il faudrait encore discuter du choix de la fréquence. En pratique, il serait probablement bon de se référer à une fréquence facile à réaliser, par exemple la fréquence qui correspond à la raie du mercure 546 nm ; on pourrait tenir compte, par le calcul, de la petite différence entre la valeur de $V(\lambda)$ à 546 nm et 1 (environ 2 %).

d) La détermination de la valeur de l'efficacité lumineuse spectrale maximale K_m ne serait actuellement possible qu'avec difficulté. D'autres mesures seraient encore nécessaires pour maintenir la continuité. En dehors de cette condition, elle-même secondaire, la question est sans grande importance.

e) Pour les autres cas où le rayonnement est aussi évalué suivant une fonction d'action (par exemple érythème, conjonctivite, etc.) il faudrait réfléchir et voir si la technique de mesure du rayonnement a besoin d'unités particulières. Sinon, cela signifierait qu'il faudrait mesurer le flux lumineux en watt. En Allemagne, les techniciens de la lumière ne sont pas absolument opposés à une telle possibilité.

3. Actuellement, toutefois, il serait prématuré de changer la définition de la candela. Il faudrait d'abord voir si la nouvelle définition apporterait vraiment une amélioration.

4. Pour répondre à cette question, il faudrait organiser une comparaison au cours de laquelle chaque Laboratoire national devrait faire les mesures suivantes sur trois lampes étalons :

a. Détermination de l'intensité lumineuse suivant la définition actuelle ; l'éclairement lumineux peut être calculé avec précision pour une distance suffisamment grande x .

b. Mesure de l'éclairement lumineux à la distance x

$E_v^x = \int E_{e\lambda}(\lambda) V(\lambda) d\lambda$, avec un récepteur $V(\lambda)$ calibré radiométriquement.

c. Mesure de la densité spectrale de l'éclairement énergétique $E_{e\lambda}(\lambda)$, à partir de laquelle on peut calculer l'éclairement lumineux évalué suivant E_v^x .

On pourrait alors voir avec quelle précision les méthodes radiométriques b et c mènent au même résultat. Des mesures a et b (b est indépendante de l'échelle de température) résulte une valeur de K_m .

Ensuite, chaque Laboratoire national enverrait ses trois lampes étalons au BIPM qui comparerait toutes les lampes entre elles. Au BIPM, les mesures pourraient être faites en valeurs relatives avec un récepteur $V(\lambda)$ (par exemple, une photopile au silicium munie d'un filtre).

Enfin, les lampes seraient rendues aux Laboratoires nationaux qui feraient des mesures de contrôle.

Comme type de lampe, on propose la lampe Osram Wi 41 à la température de répartition de 2800 K environ.

Les résultats des comparaisons de la densité spectrale de l'éclairement énergétique de lampes à halogène (TC-1.2 de la

CIE ; Londres, septembre 1975) pourront donner des informations importantes.

(7 avril 1975)

Commentaires de C.L. Sanders (NRC)

Introduction

D'une façon générale la proposition de W.R. Blevin et B. Steiner sur le changement de l'étalon primaire de lumière est justifiée, opportune et utile. Les remarques sur certains points sont :

- a) que la définition des unités pourrait être plus simple,
- b) que la proposition n'est pas assez étendue pour définir complètement les mesures photométriques,
- c) qu'aucun calendrier de travail n'est suggéré pour le changement,
- d) qu'une période de transition serait utile pour permettre le changement de l'étalon actuel à celui proposé,
- e) qu'il serait utile de maintenir comme étalon secondaire pratique le corps noir au point de congélation du platine.

Recommandation modifiée

Pour ces raisons, on propose la recommandation modifiée suivante :

Un lumen est la puissance lumineuse produite par 0,001 470 59 watt, émise à la fréquence de 540,015 4 THz.

Une candela est l'intensité lumineuse d'une source de petites dimensions qui émet uniformément Ω lumen dans un angle solide de Ω stéradian.

Remarque 1 : La fréquence 540,015 4 THz correspond sensiblement à la longueur d'onde de 555,00 nm pour l'indice de réfraction 1,000 28, qui est l'indice de réfraction de l'air à la température et à la pression atmosphérique normales ; c'est aussi l'indice de réfraction utilisé dans les tables de la CIE pour les fonctions d'efficacité lumineuse données dans "Principles of Light Measurements", Publ. CIE N° 18 (E-1.2), 1970.

Remarque 2 : En vision photopique, la relation pour le calcul de la valeur photométrique d'un rayonnement complexe est

$$\phi_v = K_m \int_{360}^{830} V(\lambda) \phi_{e\lambda} d\lambda ; \quad (1)$$

K_m vaut 680,00 lm/W ; $V(\lambda)$ est l'efficacité lumineuse relative spectrale recommandée par le CIPM et la CIE pour la vision photopique ; $\phi_{e\lambda}$ est la puissance énergétique spectrique en watts par nanomètre ; λ est en nanomètres ; ϕ_v est la puissance lumineuse en lumens.

Remarque 3 : En vision scotopique, cette définition de l'unité photométrique situe K'_m à 1691,5 lm/W dans la relation

$$\phi'_v = K'_m \int_{360}^{800} V'(\lambda) \phi_{e\lambda} d\lambda \quad (2)$$

où $V'(\lambda)$ est l'efficacité lumineuse relative spectrale recommandée par la CIE pour la vision scotopique.

Remarque 4 : Occasionnellement, la CIE recommande d'autres méthodes pour établir des échelles photométriques qui s'appliquent à des cas spéciaux. Les recommandations appropriées de la CIE devraient être appliquées. Elles pourront bientôt inclure une méthode de calcul de la luminosité ou de la clarté à partir de la luminance lumineuse et des coordonnées trichromatiques de la CIE.

Remarque 5 : Dans les cas où le mécanisme visuel utilisé ne correspondrait en aucune façon aux définitions précitées, l'équivalence photométrique serait déterminée visuellement à l'aide d'une source de référence ayant une répartition spectrale correspondant à la source A (CIE).

La valeur photométrique de chacune des deux sources doit être calculée pour la répartition spectrale de l'illuminant A (CIE), en se servant de la relation (1) et en ajustant les deux stimuli pour qu'ils donnent le même effet visuel. Ceci correspond à la définition de la *luminance équivalente* donnée dans la publ. CIE N° 17 (E-1.1), 1970, 45-10-085, au changement près de la source de référence.

Calendrier de travail proposé

- a) Septembre 1975 : le CCPR adopte le principe du changement de définition contenu dans la recommandation de W.R. Blevin et B. Steiner.
- b) Septembre 1975 : le CCPR discute de la rédaction de la recommandation sur le changement de la définition et se met d'accord sur le texte à soumettre au CCU.
- c) Septembre 1975 : le CCPR forme un Groupe de travail pour déterminer les valeurs de K_m et de K'_m qui entraîneront un minimum de changement aux unités moyennes internationales photométriques.

d) Septembre 1977 : la recommandation du Groupe de travail est étudiée (acceptée ou modifiée).

e) Janvier 1980 : les valeurs de $K_m V(\lambda)$ et de $K'_m V'(\lambda)$, ainsi que le texte indiqué en b) décrivant toutes les échelles photométriques nécessaires au commerce international, sont adoptées internationalement, sauf si des preuves certaines (présentées avant mai 1979) démontrent que l'usage de l'étalon primaire actuel est une méthode plus exacte, ou que d'autres valeurs de $K_m V(\lambda)$ et de $K'_m V'(\lambda)$ sont préférables.

f) Les valeurs adoptées de $K_m V(\lambda)$ et de $K'_m V'(\lambda)$ devraient être acceptées comme étalons secondaires pratiques pour la photométrie après janvier 1980.

Remarques sur la recommandation modifiée

1) Je crois qu'il serait préférable d'utiliser *puissance lumineuse* au lieu de *flux lumineux* dans la définition du lumen. Le mot *flux* a plusieurs significations ; celles qui se rapportent à la physique sont équivalentes à "vitesse d'écoulement d'un fluide à travers une surface donnée" (Shorter Oxford Dictionary). En revanche, *puissance* est défini d'une manière plus proche de ce que nous entendons et utilisons pour la grandeur mesurée en lumens. Conformément aussi à la définition du lumen en fonction du watt, il semblerait logique d'appeler la grandeur *puissance lumineuse*.

2) La proposition de W.R. Blevin et B. Steiner est d'utiliser, pour la définition de K_m , une longueur d'onde dont la valeur dans l'air ne serait pas un nombre entier de nanomètres. Ceci prêterait inutilement à confusion et nécessiterait aussi la révision des Tables $V(\lambda)$ et $V'(\lambda)$ ou l'usage pour K_m et K'_m , de valeurs autres que celles données dans la définition officielle des unités. La critique de E.J. Gillham sur cette question prendrait alors toute son importance. La Remarque 2 et la Remarque 3 ci-dessus offrent une solution.

3) Dans la définition de la candela, *petites dimensions* signifie que les dimensions sont assez petites par rapport à la distance au récepteur, pour que la source soit considérée comme ponctuelle ; la valeur de l'éclairement lumineux peut être calculée sans erreur appréciable en utilisant la loi de l'inverse du carré des distances.

4) Bien que s'ajoutant à la recherche de la meilleure valeur de K_m , il serait opportun de considérer aussi la nécessité de modifier la courbe $V(\lambda)$ pour qu'elle corresponde mieux à celle suggérée par D.B. Judd en 1951. Il est universellement reconnu

que les valeurs de la courbe officielle $V(\lambda)$ sont trop basses dans la partie bleue du spectre. On doit noter qu'une telle révision de $V(\lambda)$ n'entraînerait aucun changement à la Remarque 2, si ce n'est que la valeur de K_m devrait être ajustée. Les discussions du Comité CIE TC-1.4 (Londres, septembre 1975) pourraient aboutir à un changement de la courbe $V(\lambda)$, si le Comité CIE TC-1.2 et le CCPR montrent qu'une courbe améliorée pourrait être incorporée aux échelles photométriques sans trop d'inconvénients.

5) L'usage du terme *intensité* lumineuse porte souvent à confusion puisque, comme le mot *flux*, il a plusieurs sens dont la plupart ne s'appliquent pas à la photométrie ou à la radiométrie. Le terme anglais *pointance* a été suggéré pour remplacer *intensity*. Il serait préférable de trouver un terme plus approprié que le terme *intensité* pour cette grandeur. Le CCU et le CIE TC-1.1 devraient être consultés sur ce point.

Autres remarques

D'ici à septembre 1975, date des réunions du CCPR, il serait utile que chaque laboratoire évalue les changements à apporter à ses échelles photométriques, changements dus à l'adoption de 680 lm/W comme valeur de K_m . Plusieurs laboratoires (NML et NBS) ont déjà déclaré qu'ils utiliseront $K_m = 680$ lm/W pour rattacher leurs échelles photométriques à leurs échelles spectroradiométriques. Le NPL détermine déjà son échelle énergétique absolue à partir des étalons photométriques en utilisant $K_m = 680$ lm/W. Ainsi, la révision se limiterait peut-être seulement à reconnaître un fait accompli.

La demande croissante par l'industrie d'une valeur officielle de K_m , est due au fait que beaucoup de sources sont mesurées par spectroradiométrie et que les grandeurs photométriques ne sont que quelques-unes des grandeurs intégrales utilisées dans le commerce pour caractériser une source. Donc l'opinion suivant laquelle il serait important de garder l'échelle photométrique inchangée quand la nouvelle définition de K_m entrera en vigueur, ne serait pas facilement acceptée par certains laboratoires industriels. Si la stabilité avait été la seule condition essentielle on aurait pu suggérer à chaque laboratoire national de déterminer la valeur de K_m à utiliser avec ses échelles énergétiques.

Une telle méthode suggérerait l'existence d'échelles photométriques différentes mais stables, d'échelles radiométriques différentes mais stables, ou des différences à la fois entre les échelles radiométriques et les échelles photométriques.

ques ; ce dernier cas représente probablement la situation actuelle.

Quand il existe un écart dans l'une et l'autre de ces deux échelles indépendantes, l'écart sur la valeur de K_m peut être plus grand que l'écart de l'une ou de l'autre échelle. Ainsi un écart de 2,9 % pour l'échelle d'éclairement énergétique et un écart de 2,0 % pour l'échelle d'intensité lumineuse (BIPM, 1969), peuvent causer un écart de 4,9 % sur K_m . Cet écart est à l'origine de l'erreur qui affecte les résultats lorsqu'on mesure des sources en utilisant les échelles d'éclairement énergétique spectral pour le calcul de leurs propriétés photométriques. C'est aussi, en partie, la cause de l'écart entre les mesures des valeurs de K_m .

J. Bonhoure préconise qu'une comparaison internationale d'étalons radiométriques soit à nouveau entreprise avant d'apporter des changements à l'étalon primaire de lumière. Pour effectuer une telle comparaison internationale, une période de 5 ou 6 ans serait nécessaire ; cette comparaison n'est probablement pas nécessaire.

Le problème de l'utilisation d'une seule valeur pour K_m a sans doute été résolu par le Comité CIE TC-1.2 à propos de la comparaison des échelles d'éclairement énergétique spectral. Le rapport préliminaire de N. Ooba (ETL), fondé sur les mesures d'éclairement énergétique spectral de huit laboratoires, donne pour valeur moyenne de K_m 680 lm/W. Les écarts qui en résulteraient dans les échelles photométriques nationales ont été calculés. La moyenne des différences pour chaque laboratoire est d'environ 1 % ; l'écart maximal entre laboratoires est de 2,9 %. Si les valeurs des deux laboratoires ayant les plus grands écarts sont rejetées, l'écart entre les laboratoires est réduit à 1 % et la moyenne des différences pour chaque laboratoire devient 0,4 % ; la valeur moyenne est presque inchangée par le rejet de ces deux laboratoires. De plus, la plupart des laboratoires connaissent le rapport de leur échelle radiométrique à leur échelle photométrique, même s'ils ne connaissent pas le rapport de l'une ou l'autre au corps noir au point de congélation du platine.

Conclusion

Il y aura donc suffisamment de données disponibles au cours de la prochaine année pour choisir la valeur de K_m . Les résultats montreront probablement qu'un changement de définition serait tout aussi satisfaisant pour établir une échelle

photométrique. La nouvelle définition est essentielle pour ceux qui désirent calculer les valeurs photométriques à partir de données spectroradiométriques, sans avoir à subir les effets des écarts entre les deux échelles. Elle intéresse aussi les laboratoires nationaux qui n'ont pas d'échelle photométrique stable à conserver, mais désirent établir parallèlement une échelle spectroradiométrique et une échelle photométrique. Il est donc essentiel de choisir, dès que possible, une valeur officielle de K_m qui sera utilisée avec $V(\lambda)$ pour faire la conversion d'une échelle à l'autre.

Les étapes proposées permettent un changement opportun de la définition de l'Etalon Primaire de lumière comme l'ont proposé W.R. Blevin et B. Steiner, sans bouleverser les échelles des laboratoires qui ne sont pas présentement prêts à effectuer le changement.

(9 mai 1975)

Commentaires de P. Soardo (IEN)

Le document présenté par W.R. Blevin et B. Steiner montre clairement les avantages d'une nouvelle définition de l'unité photométrique. La proposition est très séduisante, mais l'opinion qu'on nous demande d'exprimer à ce propos ne peut que refléter l'expérience de notre laboratoire dans ce domaine.

Sur le plan expérimental, nous ne pouvons exprimer un avis ni en faveur de la définition actuelle ni en faveur de la définition proposée : d'une part, nous avons rencontré beaucoup de difficultés dans la réalisation de l'étalon primaire au point de congélation du platine, d'autre part nous n'avons pas une expérience suffisante en ce qui concerne la spectroradiométrie.

Sur le plan théorique, la définition proposée, bien qu'intéressante, nous semble se heurter à l'objection déjà soulevée lors de la 7^e session du CCPR en 1971. En effet, l'idée de fixer les valeurs de $K(\lambda)$ et $K'(\lambda)$ à la longueur d'onde où les deux courbes se coupent, ne résout pas le problème dans son ensemble, mais seulement pour les visions photopique et scotopique, et sur la base des conventions admises aujourd'hui. Il ne faut pas oublier que la photométrie est "la mesure des grandeurs relatives aux rayonnements, évaluées selon l'impres-

sion visuelle produite par ceux-ci et sur la base de certaines conventions". Ces conventions ne sont que des hypothèses de travail, qui peuvent changer à mesure que les recherches sur la vision font des progrès (les auteurs eux-mêmes mentionnent le travail de Thornton), mais qui ne doivent pas affecter l'unité de mesure. De ce point de vue, la définition actuelle de la candela est au-dessus de toute objection.

En conclusion, nous estimons qu'une définition en fonction du watt est très souhaitable, mais son adoption immédiate nous semble prématurée.

(12 mai 1975)

*Commentaires de S. Nündel (ASMW)
(Traduction)*

La proposition d'une nouvelle définition de la candela faite par W.R. Blevin et B. Steiner est une contribution essentielle à la nécessaire coopération dans le domaine de la radiométrie et de la photométrie.

D'une façon générale, nous estimons que la définition d'une unité de base - ou d'une unité importante - ne devrait être remplacée par une nouvelle définition que dans l'un ou l'autre des cas suivants :

- lorsqu'on a réussi à améliorer nettement la représentation de la définition en vigueur, c'est-à-dire que l'on connaît ou que l'on est capable d'évaluer l'ensemble des erreurs qui y sont attachées, et que l'on a atteint ou quasiment atteint l'exactitude de la définition ;

- lorsque, pour des raisons économiques et pratiques, il est nécessaire d'accroître l'exactitude ou d'élargir le domaine de mesures, par exemple en rendant plus facile la réalisation pratique de l'unité (en particulier en vue du rattachement des étalons secondaires aux étalons primaires) ;

- lorsque la nouvelle définition constitue par rapport à l'ancienne un véritable progrès scientifique et technique.

Dans le cas présent, avant l'adoption de la nouvelle définition il faudrait en particulier s'assurer qu'elle garantit une réalisation facile et par conséquent exacte des échelles photométriques dans les laboratoires nationaux de métrologie et qu'il en résulte un meilleur accord international.

En conséquence, et pour parvenir à une décision, on propose que soit organisée une comparaison internationale de lampes à incandescence qui, pour chaque laboratoire participant, comprendrait le programme suivant :

1. Détermination de la valeur des lampes suivant la nouvelle définition.

2. Détermination de la valeur des lampes dans l'échelle photométrique actuellement en vigueur.

3. Rattachement de la valeur des lampes directement au corps noir selon la définition actuelle.

4. Chaque laboratoire participant à cette comparaison communiquerait ensuite sa valeur de K_m .

Cette comparaison pourrait fournir les résultats et indications suivants :

- Un accord des valeurs d'après 1 meilleur que d'après 2 et 3 serait un bon argument expérimental en faveur de la nouvelle définition.

- Au cas où le rattachement selon 2 et 3 serait meilleur que selon 1, on disposerait au moins, au niveau international, de données relatives à l'exactitude que l'on peut atteindre avec la technique de mesure correspondant à la nouvelle définition. On pourrait en tirer des enseignements en vue d'améliorations.

- Il serait intéressant de connaître les différences entre les échelles photométriques utilisées à l'heure actuelle, échelles qui sont en partie influencées par les comparaisons internationales de lampes à incandescence, et les valeurs obtenues à partir de mesures de rattachement à des corps noirs perfectionnés.

- La communication des différents résultats pour K_m pourrait aider à lui attribuer une valeur plus certaine.

- On pourrait espérer obtenir des renseignements complémentaires sur la stabilité des lampes utilisées.

(13 mai 1975)

Commentaires de N. Ooba (ETL)

La nouvelle définition proposée par W.R. Blevin et B. Steiner semble raisonnable dans son ensemble et opportune des points de vue théorique et pratique ; je suis d'accord avec les auteurs sauf sur les deux points mineurs suivants :

des unités lumineuses, actuellement indépendant, en système dérivé, à l'aide d'un coefficient de passage qui établit le rapport précis entre les unités lumineuses et énergétiques. Une telle façon d'aborder le problème est tout à fait possible compte tenu du rapport qui existe entre les grandeurs correspondantes.

2. L'importance du changement proposé exige beaucoup de précaution. On ne peut accepter la nouvelle définition de l'unité qu'aux deux conditions suivantes vérifiées expérimentalement :

- 1) continuité de la grandeur de l'unité en vigueur ;
- 2) amélioration importante de l'exactitude de l'unité réalisée et meilleur accord entre les laboratoires nationaux.

Les auteurs le disent eux-mêmes "Il n'est pas évident que la nouvelle définition donnerait à court terme un meilleur accord entre les laboratoires nationaux ou entre les réalisations des unités et leurs définitions".

Cette question est indiscutable ; avant d'envisager un changement de la définition, il faut organiser des comparaisons internationales selon un programme assez large, par exemple :

- 1) mesure de $\int_{0,35}^{0,8} P(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda$ en unités énergétiques ;
- 2) mesure de $\tau(\lambda)$ pour des filtres de type $V(\lambda)$;
- 3) mesure de K_m .

Tous les laboratoires nationaux qui ont participé aux comparaisons précédentes d'étalons lumineux devraient prendre part à ces mesures-ci ; le BIPM devrait contrôler la stabilité des lampes et des filtres pendant les comparaisons, selon la proposition de J. Bonhure.

A l'issue de ces comparaisons, il serait aussi désirable de disposer de nouvelles valeurs de la température de congélation du platine obtenues dans plusieurs laboratoires.

Il faudra alors examiner avec minutie les résultats de ces comparaisons. Pour l'instant il est prématuré de discuter du contenu possible des recommandations ou résolutions futures.

Remarques diverses

a. On propose une définition théorique de l'unité et, en même temps, le libre choix des méthodes pour réaliser les unités photométriques.

L'étude de méthodes différentes est sans doute très utile et nécessaire pour le progrès en général et pour la recherche d'une meilleure solution pour l'avenir. Les recommandations du

CCPR de poursuivre les recherches sur les corps noirs et les radiomètres absolus avaient précisément ce but. Mais on peut redouter que l'emploi de voies différentes pour réaliser l'unité ne conduise dans l'immédiat à des divergences plus grandes encore qu'auparavant dans les résultats des mesures lumineuses.

b. L'utilisation du radiomètre absolu ne donne pas directement les caractéristiques spectrales du rayonnement. En fait nous avons ici "une radiométrie à large bande passante" (selon la terminologie employée par les auteurs). Le passage de ce type de mesure aux caractéristiques spectrales d'une source rayonnante est assez long et compliqué. Il est ainsi difficile de parler de calcul précis des grandeurs lumineuses à partir de telles données spectroradiométriques. Quant aux mesures lumineuses avec un radiomètre absolu, on y emploie des filtres du type $V(\lambda)$ dont les défauts ont été examinés par les auteurs suivant les méthodes photométriques actuelles. Evidemment, les mêmes considérations sont encore valables dans ce cas.

Les corps noirs sont des sources de rayonnement absolument nécessaires en radiométrie et spectroradiométrie. La plupart des laboratoires nationaux les emploient pour établir leurs étalons $L(\lambda)$ et $E(\lambda)$; on s'appuie ainsi sur une mesure de température, habituellement par les méthodes de la pyrométrie optique. En employant ce processus de reproduction des unités lumineuses, on introduit dans les résultats les erreurs propres aux valeurs de la température du corps noir et des constantes c_1 et c_2 , ce qui augmente inévitablement les erreurs sur les unités lumineuses comparativement à leur réalisation indépendante (sans parler des changements possibles des unités lumineuses en fonction des modifications de l'EIPT).

c. Il faut se rappeler aussi que, malgré des divergences notables entre les différents laboratoires, les valeurs des unités nationales reproduites à l'aide de l'étalon primaire ont été conservées assez exactement de $\pm 0,1$ à $0,3$ % au cours des dix ou vingt dernières années ; c'est ce qu'ont montré les comparaisons de 1969.

d. Les auteurs citent les valeurs expérimentales de K_m d'après les travaux de trois laboratoires.

Non seulement le nombre de laboratoires n'est pas suffisant pour juger des divergences possibles, mais encore chacun des deux laboratoires qui ont employé deux méthodes différentes pour déterminer K_m , ont obtenu des résultats différents suivant la méthode utilisée ($\pm 0,7$ %).

e. Dès 1937 l'IMM avait proposé le lumen comme unité de base. L'IMM avait répété cette proposition en 1939 et avait formulé une définition fondée sur le nouvel étalon de lumière : "Le lumen est le flux lumineux émis par un radiateur intégral, à la température de congélation du platine, d'une aire de $0,005\ 305\ \text{cm}^2$ ".

Pour préciser notre point de vue, il faut ajouter qu'on peut considérer séparément les définitions théoriques qui donnent les relations mutuelles des grandeurs et des unités et la définition pratique à l'aide de l'étalon actuel. Dans le système des unités lumineuses où l'on emploie les définitions théoriques, le lumen devrait être reconnu comme unité de base ; cela aiderait en particulier à comprendre le système des grandeurs et des unités lumineuses et leur rapport avec le système radiométrique correspondant.

Quant à la réalisation pratique, dans le cas de l'étalon primaire (corps noir), il serait sans doute plus correct de choisir l'unité de luminance comme unité reproduite avec cet étalon parce que c'est justement cette grandeur qui est fournie directement par le corps noir. Cependant on peut estimer que le radiateur intégral reproduit aussi les autres unités.

Il ne faut pas introduire $4\ \pi$ dans la définition de la candela. Il est préférable de ne pas employer de coefficient, quel qu'il soit, comme c'est habituellement le cas dans les systèmes d'unités. On peut dire que la candela est l'intensité lumineuse d'une source ponctuelle, dans une direction où le flux lumineux est émis uniformément dans un angle solide de 1 stéradian.

(26 mai 1975)

Commentaires de J. Bastie (CNAM)

La nouvelle définition proposée par W.R. Blevin et B. Steiner, sur le plan théorique, est bonne et beaucoup plus valable que l'ancienne, puisqu'elle replace la candela dans le cas général de la physique et du SI. Son adoption sera souhaitable dès que tous les problèmes pratiques posés par ce genre d'opération auront trouvé leur solution, ce qui ne semble pas être encore le cas.

Deux conditions sont nécessaires pour réaliser un changement de définition d'une unité dans de bonnes conditions :

1° Amélioration de l'accord des mesures effectuées dans les différents laboratoires ;

2° Continuité de la valeur des grandeurs mesurées avec cette unité.

Pour le premier point, dans l'état actuel des choses, rien ne permet d'affirmer que la nouvelle définition apportera une amélioration des résultats obtenus, les mesures radiométriques, lors des dernières comparaisons internationales, ayant donné des résultats sensiblement comparables aux mesures photométriques. Ces comparaisons étant anciennes, il est probable que, depuis, des progrès sensibles ont été faits dans ce domaine. On pourrait donc, dans le cadre du BIPM, organiser une comparaison internationale dont les modalités seraient à définir en vue d'obtenir le maximum d'informations possible pour permettre l'adoption de la nouvelle définition de la candela.

Le deuxième point, c'est-à-dire la continuité de la valeur des grandeurs mesurées avec cette unité, est directement lié au choix qui sera fait de la valeur K_m (ou de $K(\lambda_i)$). Ce problème peut être envisagé sous deux aspects :

- L'aspect théorique consiste à rechercher la valeur de K_m qui permet le meilleur accord de l'ancienne et de la nouvelle définition. Si on admet que la courbe $V(\lambda)$ est valable, la valeur calculée pour K_m dépend uniquement de la température thermodynamique du point de congélation du platine. Cette approche du problème nécessite donc l'obtention en nombre suffisant de nouvelles déterminations de cette valeur.

- L'aspect pratique du problème consiste à rechercher la valeur de K_m qui, appliquée à la nouvelle définition, laisserait inchangée la candela telle qu'elle est réalisée actuellement. Cette démarche nécessite alors la comparaison des mesures photométriques et des mesures radiométriques. Une opération de ce type pourrait être faite conjointement avec la comparaison internationale dont il a été question dans le paragraphe précédent.

En conclusion, nous pouvons dire que la nouvelle définition de la candela est très intéressante, mais que son adoption et son application sont un peu prématurées, compte tenu des résultats connus jusqu'ici. D'autre part, je pense que dans le cadre d'une réforme de ce type, il serait souhaitable de prendre comme unité de base le lumen à la place de la candela.

Réponse de W.R. Blevin (NML) aux commentaires

Je remercie les membres du CCPR pour leurs commentaires sur la proposition de redéfinition de l'unité photométrique. Ma réponse se limite à certaines questions fondamentales qui ont été soulevées et ne traduit pas nécessairement l'avis de B. Steiner. Elle traite en premier lieu du principe de la redéfinition et ensuite de remarques de détail sur les nouvelles définitions proposées.

A. Principe de la redéfinition

(1) D'après les renseignements obtenus, il semble que l'IEN soit le seul laboratoire qui ait réalisé la candela au moyen du corps noir au point de congélation du platine au cours de la période 1971-1975. En général on continue à conserver la candela au moyen de lampes étalons, sans qu'il soit beaucoup question de sa définition. C'est la stabilité de ces étalons secondaires, et non la commodité de l'étalon primaire, qui a permis de conserver les unités nationales avec une constance raisonnable depuis dix à vingt ans.

(2) La plupart des laboratoires nationaux paraissent favorables à une éventuelle redéfinition de l'unité photométrique de base en fonction du watt et au remplacement éventuel de la candela par le lumen comme unité de base. Plusieurs laboratoires estiment qu'une telle redéfinition serait prématurée pour le moment. Tous les laboratoires non européens (ETL, NBS, NML, NPRL, NRC) semblent être favorables à un changement rapide.

(3) Je suis complètement d'accord avec le point de vue de l'ETL qui estime que la spectroradiométrie devrait être regardée maintenant comme la mesure fondamentale commune à tous les domaines scientifiques et techniques qui se rapportent aux rayonnements optiques. Le NML estime que la généralisation de ce point de vue est non seulement inévitable mais en fait en bonne voie et pour cette raison ce laboratoire a déjà fondé ses travaux de photométrie sur des étalons radiométriques et spectroradiométriques (voir Annexe P 5). Le NML craint que le CCPR ne soit de plus en plus coupé des besoins de la technique et du commerce s'il persiste à séparer la photométrie de la radiométrie fondamentale et à s'intéresser à des grandeurs non fondamentales comme la température de répartition.

(4) Les laboratoires nationaux sont à juste titre préoccupés d'améliorer l'accord international des valeurs attribuées aux

lampes à filament utilisées comme étalons photométriques secondaires, mais cela ne devrait pas leur faire perdre de vue les avantages plus étendus d'un changement de définition. De toute façon, la récente comparaison (faite par l'ETL) des échelles d'éclairement énergétique spectral semble avoir montré que les six participants qui utilisent des échelles mises au point de toutes pièces auraient pu avoir des échelles d'éclairement lumineux concordantes dans les limites de $\pm 0,5$ % par rapport à la moyenne, si la redéfinition avait déjà été en vigueur. Comme ces laboratoires utilisaient des corps noirs et des techniques variés, cela diminuait le risque d'une erreur systématique commune. Un laboratoire au moins (NML) utilisait une méthode qui ne dépendait ni de l'EIPT-68 ni des valeurs de c_1 et c_2 .

(5) Le NPL a posé l'importante question de la grandeur de l'incertitude acceptable sur la valeur proposée pour K_m , dans les échelles pratiques existantes. Dans les comparaisons de 1969, les réalisations nationales de l'unité d'intensité lumineuse avaient une dispersion de 1,6 % à 2045 K et 2,1 % à 2859 K ; les écarts par rapport à la moyenne pour chaque laboratoire pris séparément étaient respectivement de 0,5 % et 0,6 %. Que les unités soient redéfinies ou non, on ne pourra atteindre un meilleur accord international que si les réalisations pratiques nationales sont ajustées de façon appropriée. Dans ces conditions, le NML serait prêt à accepter une incertitude de ± 1 % sur la valeur adoptée pour K_m par rapport à la "candela moyenne internationale" en vigueur. Les mesures de l'ETL et du NML ont, pour les deux laboratoires, donné $K_m = 683$ lm/W en utilisant la "candela moyenne internationale de 1952", alors que les mesures du NPL ont donné $K_m = 685$ et 687 lm/W en utilisant la "candela NPL". Par hasard peut-être, la moyenne des récentes valeurs du NML et du NPL pour le point de congélation du platine, c'est-à-dire 2041,85 K, donne une valeur théorique de $K_m = 683,5$ lm/W, ce qui est dans les limites des erreurs expérimentales.

(6) Je ne suis pas d'accord avec le commentaire de l'IEN d'après lequel la nouvelle définition ne résoudrait le problème de la photométrie que pour les visions photopique et scotopique et pour les fonctions $V(\lambda)$ et $V'(\lambda)$ existantes. Attribuer une valeur photométrique, pour tous les types de vision, à un rayonnement monochromatique de fréquence donnée n'est pas plus arbitraire que de le faire pour le rayonnement du corps noir au point de congélation du platine.

(7) Il se peut que les résultats de la récente comparaison organisée par l'ETL (étalons d'éclairement énergétique spectral) aient donné entière satisfaction aux laboratoires qui suggéreraient de faire une grande série de comparaisons internationales. Tout en reconnaissant que les comparaisons sont essentielles de temps en temps, d'une façon générale le NML estime que le temps passé à des études et à des recherches est plus profitable.

B. Remarques de détails sur les nouvelles définitions proposées

(8) Le NML préfère utiliser la fréquence pour caractériser un rayonnement monochromatique dans la nouvelle définition du lumen, mais n'est pas opposé à continuer d'utiliser la longueur d'onde dans la photométrie générale.

(9) Le NML est opposé à l'introduction dans la définition du lumen de fréquences et de valeurs du quotient lumen par watt différentes pour la vision photopique et pour la vision scotopique. Ce serait une duplication inutile et cela donnerait prise à la critique de l'IEN de ne pas laisser place à de nouvelles conventions photométriques qui pourraient être adoptées à l'avenir.

(10) Il ne semble pas que la fréquence correspondant à la radiation du mercure de longueur d'onde $\lambda = 546$ nm convienne pour être introduite dans la définition, car les valeurs de $K(\lambda)$ et $K'(\lambda)$ diffèrent par trop à cette longueur d'onde (respectivement environ 670 lm/W et 960 lm/W).

(11) Plusieurs laboratoires préféreraient que la définition du lumen soit donnée pour la fréquence $540,0154 \times 10^{12}$ Hz correspondant à $\lambda = 555,00$ nm dans l'air, au lieu de la valeur arrondie 540×10^{12} Hz correspondant à $\lambda = 555,02$ nm. Le NML pourrait accepter l'une ou l'autre valeur.

(12) Comme l'a mentionné la PTB, la définition proposée n'explique pas comment on devrait évaluer le rayonnement aux autres fréquences du point de vue photométrique. De même, la définition actuelle n'explique pas comment faire de la photométrie hétérochrome. Dans chaque cas, il vaudrait mieux régler la question en dehors de la définition, par exemple au moyen d'une liste de conventions comme l'a proposé le NRC.

(13) Si l'on remplaçait la courbe $V(\lambda)$ par celle de Judd de 1951, comme l'a suggéré le NRC, un ajustement simultané de la valeur attribué à K_m ne pourrait pas donner une compensation totale dans le cas général, mais seulement pour un rayonnement de répartition d'énergie spectrale particulière. Pour le rayonnement du corps noir il faudrait sur K_m un ajustement d'environ

- 0,05 % à 2042 K, - 0,15 % à 2856 K, - 0,7 % à 6500 K et
- 1,7 % à température infinie.

(14) Une certaine opposition s'est manifestée à l'introduction de 4π dans la définition de la candela par rapport au lumen. Nous proposons la formulation suivante comme alternative possible :

Candela.- Intensité lumineuse, dans les directions délimitées par un angle solide de 1 stéradian, d'une source émettant un flux lumineux de 1 lumen de façon uniforme dans ces directions.

(Juillet 1975)

Commentaires de J. Terrien (BIPM)

La photométrie - je veux dire la métrologie des grandeurs évaluées en tenant compte de $V(\lambda)$ ou $V'(\lambda)$ - a des unités SI qui dérivent de l'unité SI de base, la candela.

L'unité SI de base de la photométrie est donc l'unité d'intensité lumineuse. On aurait pu choisir l'unité de flux, parce qu'elle s'apparente à l'unité radiométrique le watt, ou l'unité de luminance parce qu'elle se rattache plus directement aux sensations visuelles qui sont la raison d'être de la photométrie. Le choix a été discuté, une majorité s'est prononcée en faveur de l'unité d'intensité lumineuse. Il est à mon avis inutile et même nuisible de recommencer cette discussion pour deux raisons : 1° on ne pourrait que répéter les mêmes arguments ; 2° tout changement du SI entrave sa diffusion et compromet les efforts pour que le monde bénéficie d'un seul système d'unités universellement adopté. Conclusion : il est préférable de conserver la candela comme unité de base pour la photométrie.

Mais on pourrait changer la définition de la candela. On a bien changé la définition du mètre et de la seconde, mais c'était parce que ces changements apportaient de grands avantages de précision, d'invariabilité et de commodité, et parce que l'on disposait de résultats expérimentaux permettant d'affirmer que la nouvelle définition n'introduisait pas de discontinuité mesurable par rapport à l'ancienne. Quels seraient les avantages de remplacer la définition actuelle de la candela par une définition "radiométrique", je veux dire

une définition du genre de celle qui est proposée par W.R. Blevin et B. Steiner ? Le CCPR, à sa session de 1971, a déjà donné la réponse à cette question : il existe des arguments en faveur du changement, mais il existe des arguments pour ne pas changer. Pour le moment, j'ai l'impression qu'une nouvelle définition de la candela n'apporterait pas de grands avantages de précision, d'invariabilité et de commodité, ni qu'elle serait capable de se substituer à l'actuelle définition sans introduire de discontinuité dans les résultats de mesures. Conclusion : il est prématuré de changer la définition de la candela.

Cependant, esthétiquement et conceptionnellement, la nouvelle définition proposée est plus séduisante et mérite d'être préparée. Le rôle du CCPR est de choisir et de recommander les travaux nécessaires à cette préparation.

(1^{er} septembre 1975)

ANNEXE P 5

Réalisation radiométrique des unités photométriques*

par W. J. BROWN

National Measurement Laboratory (Australie)

(Document CCPR/75-7)

Traduction du Résumé

On décrit les méthodes expérimentales utilisées pour donner aux échelles photométriques du National Measurement Laboratory une base radiométrique. Comme étalons d'éclairement lumineux on utilise des lampes à incandescence à halogène et des lampes à filament de tungstène remplies de gaz, fonctionnant à une température de répartition de 2856 K ; on se sert d'un radiomètre étalonné électriquement pour mesurer l'éclairement énergétique après interposition entre la lampe et le radiomètre d'un filtre simulant la fonction $V(\lambda)$. On a adopté la valeur de 682 lm/W pour K_m , efficacité lumineuse spectrale maximale du rayonnement, car les mesures ont indiqué que cette valeur assure la continuité avec l'échelle d'intensité lumineuse du NML. On pense que l'unité de base de la photométrie sera par la suite redéfinie de façon à donner pour K_m une valeur connue avec exactitude et adoptée par accord international.

(mars 1975)

* *Metrologia*, 11, 1975, p. 111 (en anglais).

Détermination expérimentale de l'efficacité lumineuse spectrale maximale*

par H. KATSUYAMA et H. KIKUCHI

Electrotechnical Laboratory (Japon)

(Document CCPR/75-5)

Traduction du Résumé

En se fondant sur l'échelle d'éclairement énergétique pour un rayonnement complexe établie en 1965 au moyen de radiomètres absolus, l'ETL a effectué une détermination expérimentale de l'efficacité lumineuse spectrale maximale (K_m).

On a étalonné, à partir de la "candela moyenne 1952 à 2042 °K" et au moyen de la méthode spectrophotométrique préconisée par J. Terrien, trois lampes étalons d'intensité lumineuse réglées à 2859 K. On a préparé deux filtres dont les facteurs de transmission étaient approximativement proportionnels aux efficacités lumineuses spectrales de l'observateur photométrique moyen. Ils comprennent, l'un une cellule remplie d'eau et un filtre liquide (filtre A), l'autre une cellule remplie d'eau et trois filtres en verre (filtre B). Une thermopile de haute sensibilité et de bonne linéarité a été étalonnée par rapport aux radiomètres absolus ; elle a servi à mesurer l'éclairement énergétique dans un plan vertical situé à une distance de 1 m du filament des lampes étalons après interposition, soit du filtre A, soit du filtre B, entre la lampe et la thermopile. On a comparé l'éclairement énergétique ainsi mesuré à l'éclairement lumineux calculé à partir de l'intensité lumineuse de la

* *Metrologia*, 11, 1975, p. 165 (en anglais).

lampe et de la distance lampe-thermopile ; on a déterminé la valeur de K_m en prenant pour le calcul le facteur de transmission spectrale à 555 nm. On a appliqué des corrections pour tenir compte de la modification du chemin optique due à l'interposition du filtre et de la correspondance imparfaite entre les facteurs de transmission spectrale du filtre et les efficacités lumineuses spectrales.

On a obtenu comme valeurs moyennes pour les trois lampes 682 lm/W et 684 lm/W en utilisant respectivement le filtre A et le filtre B ; on a pris la moyenne de ces valeurs, 683 lm/W comme valeur de K_m avec une incertitude de $\pm 0,3 \%$. Ce résultat est d'environ 0,4 % inférieur à la valeur moyenne au NPL en 1963 et 1964. Si l'on tient compte des erreurs expérimentales, on peut considérer cette différence comme acceptable.

(Janvier 1975)

ANNEXE P 7

Sur les bases de la photométrie

par G. WYSZECKI

Conseil National de Recherches (Canada)

(Document CCPR/75-10)

Nous devons veiller à ce qu'il y ait une relation satisfaisante entre les étalons photométriques actuels et les méthodes de mesure de la lumière d'une part, et ce qui est perçu par l'oeil moyen d'autre part. La corrélation entre la luminance et la luminosité perçue est souvent très mauvaise, ce qui met notre système photométrique actuel sérieusement en doute.

La couleur de lumières à comparer photométriquement prend beaucoup d'importance dans la détermination précise de leurs luminosités. Pour faire de la photométrie une activité métrologique mieux adaptée, on doit prendre en considération l'aspect colorimétrique dans les mesures.

La 13^e Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM) a approuvé l'intention exprimée par le CIPM en 1965 d'inclure dans ses activités et dans celles du BIPM, les aspects métrologiques fondamentaux de la colorimétrie et de la radiométrie (*Comptes rendus 13^e CGPM, 1967, p. 76 et p. 105*). Le CCPR n'a jamais tenu compte de cette décision se rapportant à la colorimétrie.

Nous proposons que cette situation soit discutée à la 8^e session du CCPR.

(Avril 1975)

Nouvelle échelle d'éclairement énergétique spectral du NML*

par F. J. WILKINSON

National Measurement Laboratory (Australie)

(Document CCPR/75-8)

Traduction du Résumé

Pour le domaine de longueurs d'onde compris entre 350 et 800 nm, on a réalisé au NML une nouvelle échelle d'éclairement énergétique spectral. La première étape a consisté à étalonner en tant qu'étalon de luminance énergétique spectrale relative, un radiateur à cavité constitué d'une feuille de tungstène et fonctionnant à 2600 K environ. A cet effet, on a utilisé la radiométrie avec filtre au lieu de la méthode plus courante fondée sur la pyrométrie optique. On a ensuite étalonné des lampes à filament de tungstène comme étalons d'éclairement énergétique spectral relatif par comparaison avec le radiateur à cavité ; enfin, on a rendu absolus ces étalonnages en utilisant des radiomètres étalonnés électriquement.

(mars 1975)

* *Metrologia*, 11, 1975, p. 105 (en anglais).

Filtre composé de verres colorés pour la photométrie

par D. S. GIGNAC

Conseil National de Recherches (Canada)

(Document CCPR/75-17)

Afin de donner approximativement la sensibilité spectrale $V(\lambda)$ à un radiomètre absolu de sensibilité spectrale neutre, un filtre en verre ayant une courbe de transmission proche de la courbe $V(\lambda)$ a été conçu par ordinateur, à l'aide d'un programme réalisé par H. Wright *et al.*

Le filtre est composé de cinq verres colorés dont les épaisseurs sont calculées pour donner le minimum d'erreurs photométriques lorsqu'on mesure sept sources sélectionnées. Les résultats obtenus avec ce filtre sont comparés aux résultats obtenus avec le filtre conçu par W.J. Brown*.

Les épaisseurs des quatre verres utilisés par Brown ont été modifiées à l'aide du même programme pour obtenir des erreurs photométriques beaucoup moindres.

La composition du filtre N° 2 de Brown inclut un verre fluorescent (Schott GG17) dont la courbe de transmission est très difficile à établir par spectrophotométrie. Les verres colorés employés pour le filtre du NRC ont été choisis pour leur absence de fluorescence et leur transmission favorable pour la réalisation du filtre $V(\lambda)$. Le résultat est une transmission plus faible à la longueur d'onde du maximum de la

* BROWN (W.J.), A radiometric realization of the photometric units, *Metrologia*, 11, 1975, p. 111.

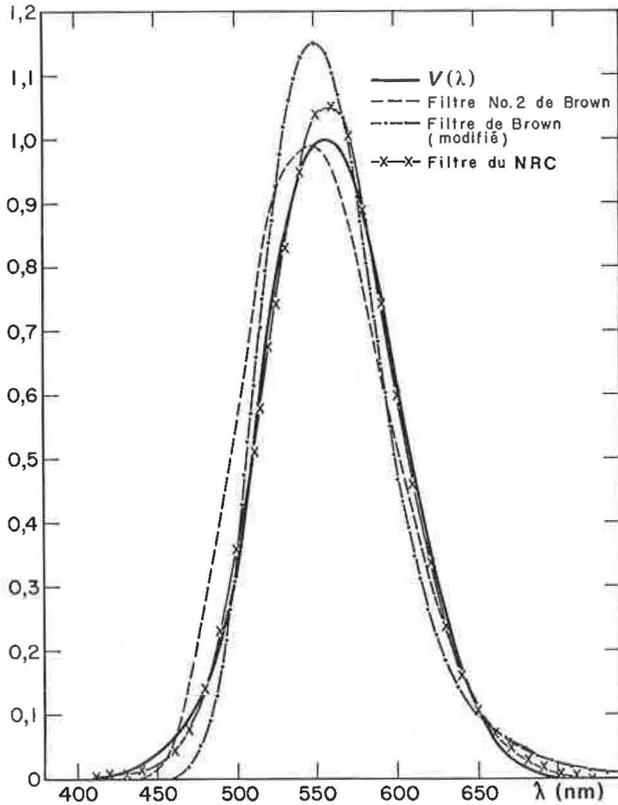


Fig. 1.- Courbes de transmission relative des filtres composés.

courbe de transmission du filtre composé. Le filtre N° 2 de Brown a une transmission calculée de 50 % à 550 nm alors que le filtre du NRC a une transmission calculée de 18 % à la même longueur d'onde.

Le tableau I donne les types de verre, et leurs épaisseurs, utilisés pour le filtre de Brown et pour le filtre du NRC.

Les erreurs photométriques dans les mesures des sept sources sélectionnées (trois sources à corps noir, la source C de la CIE et trois sources fluorescentes) sont données au tableau II pour les trois filtres composés.

La figure représente les courbes de transmission spectrale relative du filtre N° 2 de Brown, du filtre de Brown modifié et du filtre du NRC, ainsi que la courbe $V(\lambda)$.

TABLEAU I

Types de verre avec leurs épaisseurs

Type de verre	Filtre N° 2 de Brown	Filtre de Brown modifié	Filtre du NRC
Schott BG 38	1,80 mm	1,74 mm	1,31 mm
Schott GG10	2,55 mm	6,00 mm	
Schott GG17	5,60 mm	6,00 mm	
Schott GG395			2,07 mm
Schott KG1	9,60 mm	6,00 mm	
Schott KG3			4,00 mm
Corning 3307			4,04 mm
Corning 4309			5,00 mm

TABLEAU II

Erreurs photométriques pour sept sources sélectionnées

Source	Filtre N° 2 de Brown	Filtre de Brown modifié	Filtre du NRC
CIE A	0,00 %	0,00 %	0,00 %
Corps noir à 2042 K	1,73 %	0,14 %	- 0,16 %
Corps noir à 2360 K	1,14 %	0,19 %	- 0,05 %
CIE C	- 5,28 %	- 0,04 %	- 0,11 %
Fluorescente (3000 K)	6,97 %	2,17 %	- 0,07 %
Fluorescente (4500 K)	2,12 %	0,88 %	- 0,16 %
Fluorescente (6500 K)	- 1,43 %	1,25 %	- 0,06 %

(Septembre 1975)

**Notes sur un nouveau type d'étalon photométrique
d'intensité lumineuse***

par R. G. BERRY et F. J. J. CLARKE
National Physical Laboratory (Royaume-Uni)

(Document CCPR/75-18)

Traduction du Résumé

Le NPL et la General Electric Company Ltd. ont ensemble mis au point une lampe étalon d'intensité lumineuse à courant élevé, robuste, pour remplacer les lampes étalons actuelles remplies de gaz qui dans bien des cas sont trop fragiles (en particulier pour les comparaisons internationales ou pour servir d'étalons de travail de façon courante). Les caractéristiques de la nouvelle lampe vont d'environ 25 A, 13 V, 470 cd, durée de vie 9000 heures (2856 K), à environ 32 A, 19 V, 1600 cd, durée de vie 90 h (3300 K) ; la stabilité à long terme de la lampe, après un vieillissement préalable égal à 5 % de sa durée de vie, correspond à un changement de - 0,15 % en cd pour 1 % de la durée de vie. La stabilité à court terme est limitée à $\pm 0,15$ % par les fluctuations dues aux mouvements de convection du gaz, mais elle peut être améliorée en utilisant une constante de temps du photomètre de 3 s. De nouvelles recherches au NPL permettront vraisemblablement de résoudre ce problème. Le fait d'incliner la lampe de $\pm 1^\circ$ par rapport à la verticale et(ou) de la faire tourner de $\pm 2^\circ$ en azimuth ne modifie l'intensité lumineuse que de $\pm 0,2$ %.

(février 1975)

* Commission Internationale de l'Eclairage, Comité TC-1.2, document de février 1975.

ANNEXE P 11

Aperçu des facilités d'étalonnage : comparaisons possibles

par C. L. SANDERS

Conseil National de Recherches (Canada)

(Document CCPR/75-21)

Traduction du Résumé

Dans le cadre du programme de travail du TC-1.2 de la Commission Internationale de l'Eclairage, on a invité 43 laboratoires à préciser quels étaient les étalonnages en photométrie et en radiométrie que leurs installations leur permettaient de fournir. Un rapport intitulé "Possible comparisons arising from survey of calibration facilities" pourra être obtenu auprès du NRC* au début de l'année 1976.

On a en même temps demandé aux laboratoires s'ils souhaitent comparer leurs mesures avec celles qui sont faites dans d'autres laboratoires. En ce qui concerne les comparaisons, les réponses reçues du BIPM, de 17 laboratoires nationaux et de 6 laboratoires commerciaux, sont résumées dans une lettre de C.L. Sanders (NRC). Pour diverses grandeurs telles que l'intensité lumineuse, la température de couleur, etc., et pour des sources appropriées, on a fait une liste des laboratoires intéressés par une comparaison. Pour trente-neuf combinaisons de grandeurs et de sources, quatre laboratoires ou davantage se déclarent intéressés par une comparaison.

* Division de Physique, Conseil National de Recherches, Montreal Road, Ottawa (Canada) K1A 0R6.

Dix-sept comparaisons faisant appel à des étalonnages de détecteurs ou d'autres appareils de photométrie ou de radiométrie intéressent au moins quatre laboratoires ou davantage.

Ces renseignements peuvent être utiles pour faire un choix de comparaisons extensives ou pour connaître les laboratoires avec qui prendre contact, si un laboratoire souhaite vérifier ses mesures par comparaison avec celles d'un autre. Pour chaque laboratoire, on mentionne le nom et l'adresse.

(août 1975)

Étalonnage de diodes électroluminescentes au NBS

par J. B. SHUMAKER

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

(Traduction du Document CCPR/75-11)

Abstract.— A very brief report is given of some aspects of spectral irradiance calibrations of red LEDs at NBS. A typical spectral distribution is given and the treatment of temperature effects is discussed.

Résumé.— On rend très brièvement compte de certains aspects des étalonnages en éclairage énergétique spectral de diodes électroluminescentes au NBS. On donne une répartition spectrale typique et l'on discute les effets de la température.

A la fin de 1973 on a effectué au NBS des étalonnages en éclairage énergétique spectral sur un échantillonnage de dix diodes émettrices de lumière rouge. Comme ces étalonnages comportaient quelques aspects que l'on ne rencontre en général pas avec les étalonnages de lampes incandescentes, nous aimerions décrire très brièvement quelques caractéristiques de ces mesures.

Les diodes ont été fabriquées spécialement pour servir d'étalons. La surface émettrice de chaque diode ($1,2 \text{ mm}^2$) est entourée d'un fond noir, plan, de 1 cm de diamètre, et protégée par une lame de verre polie, plane, claire et incolore. Chaque diode est montée sur un boîtier en aluminium de $3 \times 6 \times 11 \text{ cm}$ qui sert de stabilisateur thermique tout en fournissant des surfaces de référence destinées à définir l'axe optique de la diode. Avec un courant de 0,1 A l'éclairage énergétique spectrique maximal est d'environ 1 W/cm^3 à environ 660 nm et 5 cm de

distance du récepteur. La demi-largeur à mi-hauteur de la répartition spectrale est d'environ 8 nm. Les mesures d'éclairement énergétique ont été faites seulement sur l'axe géométrique de symétrie de la diode électroluminescente.

Après avoir vieilli chaque diode pendant 1200 heures, on a mesuré l'éclairement énergétique spectral à environ 20 longueurs d'onde entre 600 et 730 nm et à quatre distances : 5, 10, 15 et 20 cm. Pour ces distances, les mesures n'ont montré aucune divergence par rapport au comportement d'une source ponctuelle dans les limites de précision des mesures (environ 1 %). On a mesuré l'éclairement énergétique spectral en utilisant une petite sphère diffusante et un monochromateur double à prisme et réseau. L'étalon de référence d'éclairement énergétique spectral était une lampe à incandescence à halogène étalonnée. La linéarité du système récepteur-amplificateur était déterminée par des mesures de luminance énergétique d'une lampe à ruban de tungstène étalonnée sur quatre ordres de grandeur. On a essayé d'exprimer les résultats de mesures des diodes selon une fonction analytique pour obtenir une intégration numérique plus exacte pour les calculs de l'éclairement énergétique total ou de l'éclairement lumineux, pour faciliter les corrections des fonctions spectrales d'appareil et pour permettre d'exprimer de façon concise les effets de température sur l'émission des diodes. La fonction purement empirique que l'on a finalement retenue est

$$E(\lambda) = C \exp \left\{ - \left[\frac{(\lambda - \lambda_0)}{27,0} \right]^2 \right\} \left\{ 1 + 1,8284 \left[\frac{(\lambda - \lambda_0)}{\omega} \right]^2 \right\}^{-\frac{2}{3}},$$

dans laquelle λ et λ_0 sont exprimés en nanomètres.

Elle contient trois constantes C , λ_0 , ω , qu'il faut déterminer par la méthode des moindres carrés*. C est l'éclairement énergétique spectral maximal à la longueur d'onde centrale λ_0 . ω est la demi-largeur à mi-hauteur du pseudo facteur de dispersion ; pour les répartitions spectrales de ces diodes électroluminescentes la véritable demi-largeur à mi-hauteur est à peu près $0,91 \omega$. On a choisi la forme de la partie asymptotique, $E(\lambda) \propto \left[\frac{(\lambda - \lambda_0)}{\omega} \right]^{-4/3}$, pour représenter au mieux un échantillonnage de mesures allant jusqu'à 150 nm dans la partie bleue de la répartition spectrale. On a pu faire coïncider les fonctions analytiques avec les résultats typiquement à mieux que $0,01 C$ sur 40 nm au centre de la répartition (fig. 1).

* WOLBERG (J.R.), Prediction Analysis, Van Nostrand, New York, 1967.

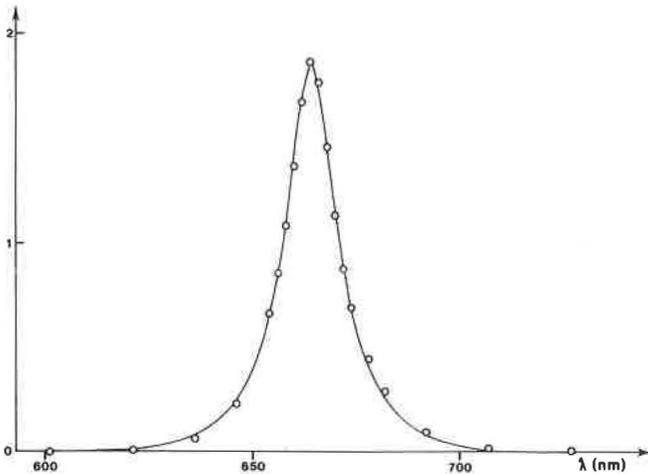


Fig. 1.- Eclairage énergétique spectral d'une diode électroluminescente (en unités arbitraires).
On donne les valeurs observées et la courbe obtenue par la méthode des moindres carrés.

L'émission des diodes électroluminescentes dépend de la température ; elle diminue d'environ 1 % pour une augmentation de 1 K de la température de fonctionnement. En conséquence, pendant toutes les mesures, on a contrôlé la température intérieure du boîtier en aluminium sur lequel est montée la diode (en général environ 24 °C). De plus, des mesures ont été faites au voisinage de 20 °C et de 28 °C. Dans ce domaine de température, l'éclairage énergétique total, l'éclairage lumineux et les paramètres C , λ_0 et ω pouvaient être évalués de façon satisfaisante comme des fonctions linéaires de la température, si bien que l'on a pu tenir compte de cet effet en utilisant un petit nombre de coefficients de température.

On estime l'incertitude des étalonnages en éclairage énergétique à moins de 3 %. Les facteurs contribuant à cette incertitude (tous d'un ordre de grandeur comparable) sont le bruit aléatoire des mesures, les éventuelles erreurs systématiques dans la méthode d'intégration de la distribution à l'aide d'une fonction analytique adaptée et les éventuelles erreurs dans les corrections de non-linéarité du récepteur. Des mesures très limitées des modifications de l'étalonnage des diodes électroluminescentes avec le temps laissent à penser qu'il faut s'attendre à des modifications de ± 1 % pour 100 heures de fonctionnement. Le tableau I donne un exemple des résultats d'étalonnage pour une diode électroluminescente.

TABLEAU I

Distance au récepteur = 5,07 cm
 Intensité de courant = 0,099 99 A
 Température du boîtier = 24,5 °C

Longueur d'onde	Eclairement énergétique spectrique
nm	W/cm ³
601,1	0,000
621,1	0,005
636,1	0,045
646,1	0,175
650,1	0,300
654,1	0,498
656,1	0,637
658,1	0,804
660,1	1,012
662,1	1,201
664,1	1,285
666,1	1,157
668,1	0,934
670,1	0,726
672,1	0,568
674,1	0,447
678,1	0,296
682,1	0,198
692,1	0,065
707,1	0,011
727,1	0,003

Distance au récepteur = 10,15 cm
 Intensité de courant = 0,099 98 A
 Température du boîtier = 24,4 °C

Longueur d'onde	Eclairement énergétique spectrique
nm	W/cm ³
601,1	0,000
621,1	0,001
636,1	0,012
646,1	0,045
650,1	0,077
654,1	0,129
656,1	0,165
658,1	0,209
660,1	0,261
662,1	0,312
664,1	0,333
666,1	0,299
668,1	0,240
670,1	0,185
672,1	0,145
674,1	0,114
678,1	0,076
682,1	0,050
692,1	0,016
707,1	0,003
727,1	0,001

Distance au récepteur = 15,21 cm
 Intensité de courant = 0,100 00 A
 Température du boîtier = 24,1 °C

Longueur d'onde	Eclairement énergétique spectrique
nm	W/cm ³
601,1	0,000
621,1	0,001
636,1	0,005
646,1	0,020
650,1	0,035
654,1	0,058
656,1	0,074
658,1	0,094
660,1	0,118
662,1	0,141
664,1	0,149
666,1	0,134
668,1	0,108
670,1	0,083
672,1	0,066
674,1	0,054
678,1	0,034
682,1	0,023
692,1	0,007
707,1	0,002
727,1	0,000

Distance au récepteur = 20,29 cm
 Intensité de courant = 0,100 00 A
 Température du boîtier = 24,7 °C

Longueur d'onde	Eclairement énergétique spectrique
nm	W/cm ³
601,1	0,000
621,1	0,000
636,1	0,003
646,1	0,011
652,1	0,025
656,1	0,041
660,1	0,065
664,1	0,083
668,1	0,061
672,1	0,037
676,1	0,023
682,1	0,013
692,1	0,004
707,1	0,001
727,1	0,000

Intensité de courant = 0,099 99 A

Température du boîtier = 24,4 °C

Longueur d'onde axiale du pic d'éclairement énergétique spectral = 663,74 nm

Demi-largeur à mi-hauteur du pseudo facteur de dispersion = 8,27 nm

Distance au récepteur cm	Pic W/cm ³	Eclairement énergétique W/cm ²	Eclairement lumineux lm/cm ²
5,07	1,273 2	2,54 x 10 ⁻⁶	1,02 x 10 ⁻⁴
10,15	0,328 8	6,56 x 10 ⁻⁷	2,62 x 10 ⁻⁵
15,21	0,147 9	2,95 x 10 ⁻⁷	1,18 x 10 ⁻⁵
20,29	0,082 5	1,65 x 10 ⁻⁷	6,58 x 10 ⁻⁶

Intensité énergétique = 6,86 x 10⁻⁵ W/sr

Intensité lumineuse = 2,74 x 10⁻³ cd

Luminance énergétique = 4,98 x 10⁻³ W/(cm²·sr)

Luminance lumineuse = 0,199 cd/cm²

Coefficients de température :

Longueur d'onde axiale + 0,19 nm/K

Demi-largeur à mi-hauteur + 0,02 nm/K

Pic - 0,009 K⁻¹

Eclairement énergétique - 0,008 K⁻¹

Eclairement lumineux - 0,018 K⁻¹

(Juin 1975)

TABLE DES MATIÈRES

COMITÉ CONSULTATIF DE PHOTOMÉTRIE ET RADIOMÉTRIE 8^e Session (1975)

	Pages
Notice historique sur les organes de la Convention du Mètre	v
Liste des membres	vii
Ordre du jour	x
Rapport au Comité International des Poids et Mesures, par E. J. Gillham	P 1
Partage des responsabilités entre le CCPR, le BIPM et la CIE	2
Nouvelle définition de l'unité photométrique (Projet de définition en fonction du watt; préférence pour le lumen comme unité de base; spécification de la fréquence au lieu de la longueur d'onde; meilleure valeur de K_m)	3
Document explicatif sur les unités et les grandeurs photométriques (Constitution d'un groupe de travail pour préparer ce document)	6
Fonctions de pondération de la CIE ($V'(\lambda)$ et $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$)	6
Étalon primaire (Pas de nouvelle réalisation)	6
Température thermodynamique du point de congélation du platine (Valeurs nominales des températures de répartition des lampes étalons)	6
Sources de rayonnement de type corps noir (Travaux du NPL)	6
Radiométrie absolue (Propriétés des radiomètres du type thermoélectrique ou bolométrique; cas des radiomètres du type pyroélectrique. Expérience sur la pression de rayonnement: nouveau type de radiomètre possible)	7
Filtres en verre; récepteurs $V(\lambda)$ (Études du NML et du NPRL)	8
Qualité des lampes étalons (Mise au point d'un nouveau type de lampe au NPL)	8
Comparaisons futures (Luminance énergétique spectrale, intensité lumineuse; cellules au silicium)	9

Questions diverses (Développement de la radiométrie au BIPM; réunion du CCPR)	10
Recommandations présentées au Comité International des Poids et Mesures :	
<i>Recommandation</i> P 1 (1975) (Sur une nouvelle définition de l'unité SI de base en fonction du watt)	11
<i>Recommandation</i> P 2 (1975) (Sur le remplacement de la candela par le lumen en tant qu'unité SI de base)	11
<i>Recommandation</i> P 3 (1975) (Sur l'utilisation de la fréquence $540,0154 \times 10^{12}$ Hz dans la définition de l'unité SI de base)	12
<i>Recommandation</i> P 4 (1975) (Sur le choix de la meilleure valeur de K_m)	12
<i>Recommandation</i> P 5 (1975) (Sur la fonction de pondération des efficacités lumineuses relatives spectrales $V'(\lambda)$ en vision scotopique)	13
<i>Recommandation</i> P 6 (1975) (Sur les composantes trichromatiques spectrales $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$)	13
<i>Recommandation</i> P 7 (1975) (Sur la réunion du CCPR en 1977)	13

Annexes

P 1. <i>Documents de travail présentés à la 8^e session du CCPR</i>	14
P 2. <i>Consultation préalable par correspondance</i> (Réponse à un questionnaire du BIPM)	17
-- Corps noir au point de congélation du platine (Question 1 : p. P 18).	
-- Radiométrie et radiomètres absolus (Questions 2 et 3 : p. P 19).	
-- Rayonnement synchrotron (Question 4 : p. P 20).	
-- Lampes photométriques étalons (Questions 5, 6, 7 : p. P 21).	
-- Améliorations des installations de mesure (Question 8 : p. P 24).	
-- Travaux futurs (Question 9 : p. P 25).	
-- Bibliographie (p. P 26).	
P 3. NRC (Canada). — <i>Suggestions sur le partage des responsabilités entre le CCPR, le BIPM et la CIE</i> , par C. L. Sanders	35
P 4. NML (Australie), NBS (États-Unis d'Amérique). — <i>Redéfinition de la candela et du lumen</i> , par W. R. Blevin et B. Steiner	38
Discussion par correspondance :	
Commentaires de J. Bonhoure (BIPM)	59
Commentaires de F. Rotter	60
Commentaires de E. J. Gillham (NPL)	61
Commentaires de C. J. Kok et F. Hengstberger (NPRL)	63
Commentaires de G. Bauer (PTB)	64
Commentaires de C. L. Sanders (NRC)	66
Commentaires de P. Soardo (IEN)	71
Commentaires de S. Nundel (ASMW)	72
Commentaires de N. Ooba (ETL)	73
Commentaires de V. E. Kartachevskaja (IMM)	74
Commentaires de J. Bastie (CNAM)	77
Réponse de W. R. Blevin (NML) aux commentaires	79
Commentaires de J. Terrien (BIPM)	82
P 5. NML (Australie). — <i>Réalisation radiométrique des unités photométriques</i> , par W. J. Brown (Résumé)	84

P 6. ETL (Japon). — <i>Détermination expérimentale de l'efficacité lumineuse spectrale maximale</i> , par H. Katsuyama et H. Kikuchi (Résumé)	85
P 7. NRC (Canada). — <i>Sur les bases de la photométrie</i> , par G. Wyszecki	87
P 8. NML (Australie). — <i>Nouvelle échelle d'éclairement énergétique spectral du NML</i> , par F. J. Wilkinson (Résumé)	88
P 9. NRC (Canada). — <i>Filtre composé de verres colorés pour la photométrie</i> , par D. S. Gignac	89
P 10. NPL (Royaume-Uni). — <i>Notes sur un nouveau type d'étalon photométrique d'intensité lumineuse</i> , par R. G. Berry et F. J. J. Clarke (Résumé)	92
P 11. NRC (Canada). — <i>Aperçu des facilités d'étalonnage: comparaisons possibles</i> , par C. L. Sanders (Résumé)	93
P 12. NBS (États-Unis d'Amérique). — <i>Étalonnage de diodes électroluminescentes au NBS</i> , par J. B. Schumaker	95

IMPRIMERIE DURAND
28600 LUISANT (FRANCE)

Dépôt légal, Imprimeur, 1976, n° 502
ISBN 92-822-2038-9

ACHEVÉ D'IMPRIMER LE 1976-07-12

Imprimé en France