

COMITÉ CONSULTATIF DE PHOTOMÉTRIE ET RADIOMÉTRIE

SESSION DE 1982

COMITÉ INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES

COMITÉ CONSULTATIF
DE
PHOTOMÉTRIE ET RADIOMÉTRIE

10^e SESSION — 1982



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 qui interviennent dans les activités ci-dessus.

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

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

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

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

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

(¹) Au 31 décembre 1982, quarante-six États sont membres de cette Convention : Afrique du Sud, Allemagne (Rép. Fédérale d'), Allemande (Rép. Démocratique), Amérique (É.-U. d'), Argentine (Rép.), Australie, Autriche, Belgique, Brésil, Bulgarie, Cameroun, Canada, Chili, Chine (Rép. Pop. de), Corée (Rép. de), Corée (Rép. Pop. Dém. de), Danemark, Dominicaine (Rép.), Égypte, Espagne, Finlande, France, Hongrie, Inde, Indonésie, Iran, Irlande, Italie, Japon, Mexique, Norvège, Pakistan, Pays-Bas, Pologne, Portugal, Roumanie, Royaume-Uni, Suède, Suisse, Tchécoslovaquie, Thaïlande, Turquie, U.R.S.S., Uruguay, Venezuela, Yougoslavie.

Une trentaine de physiciens ou techniciens travaillent dans les laboratoires du Bureau International; ils font des recherches métrologiques ainsi que des mesures dont les résultats sont consignés dans des certificats portant sur des étalons des grandeurs ci-dessus. La dotation annuelle du Bureau International est de l'ordre de 10 720 000 francs-or (en 1983), soit environ 19 450 000 francs français.

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

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

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

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

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

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

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

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

Comité International des Poids et Mesures

Secrétaire
J. DE BOER

Président
J. V. DUNWORTH

LISTE DES MEMBRES
DU
COMITÉ CONSULTATIF
DE PHOTOMÉTRIE ET RADIOMÉTRIE

Président

W. R. BLEVIN, membre du Comité International des Poids et Mesures,
Directeur adjoint de la Division de Physique Appliquée, CSIRO,
Lindfield (Australie).

Membres

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

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

CONSEIL NATIONAL DE RECHERCHES [NRC], Ottawa.

CSIRO, DIVISION OF APPLIED PHYSICS [CSIRO], Lindfield (Australie).

ELECTROTECHNICAL LABORATORY [ETL], Ibaraki (Japon).

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

INSTITUT NATIONAL DE MÉTROLOGIE [NIM], Beijing (Rép. Pop. de Chine).

ISTITUTO ELETTEOTECNICO NAZIONALE GALILEO FERRARIS [IEN], Turin.

NATIONAL BUREAU OF STANDARDS [NBS], Washington.

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

NATIONAL PHYSICAL RESEARCH LABORATORY [NPRL], Pretoria.

OFFICE FÉDÉRAL DE MÉTROLOGIE [OFMET], Wabern/WORLD RADIATION
CENTER [WRC], Davos (Suisse).

PHYSIKALISCH-TECHNISCHE BUNDESANSTALT [PTB], Braunschweig.

L. PLAZA, Instituto de Optica Daza de Valdés, Madrid.

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

J. SCHANDA, Research Institute for Technical Physics, Budapest.

K. YOSHIÉ, Université de Chiba, Tokyo.

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

ORDRE DU JOUR

de la 10^e Session

1. État d'avancement du document explicatif CCPR sur les unités et les grandeurs photométriques (NRC).
2. Rapport sur la comparaison faite, à titre d'essai, par circulation d'étalons d'intensité lumineuse à intensité de courant élevée NPL/GEC (NPL).
3. Rapport sur la comparaison faite, à titre d'essai, par circulation de récepteurs $V(\lambda)$ et d'étalons d'intensité lumineuse Osram Wi 41 G (PTB).
4. Mesures de luminance énergétique spectrale (comparaison entre le NPL et le NBS).
5. État d'avancement, dans chaque laboratoire national, de la réalisation de la nouvelle définition de la candela (Résolution 3, 16^e CGPM, 1979).
 - 5.1. Étalons d'intensité lumineuse (ou d'éclairement).
 - 5.2. Étalons de flux lumineux.
6. Organisation de comparaisons internationales pour contrôler l'uniformité des résultats des mesures photométriques obtenus avec la nouvelle définition de la candela (Résolution 4, 16^e CGPM, 1979).
 - 6.1. Comparaisons d'intensité lumineuse (ou d'éclairement).
 - 6.2. Comparaisons de flux lumineux.
7. État d'avancement, dans les laboratoires nationaux ou non, de l'établissement des étalons de premier ordre des grandeurs radiométriques fondamentales.
 - 7.1. Éclairement énergétique.
 - 7.2. Éclairement énergétique spectrique.
 - 7.3. Luminance énergétique spectrique.
 - 7.4. Autres grandeurs fondamentales.
8. Examen des activités futures du CCPR et du besoin éventuel de comparaisons internationales supplémentaires.

9. Examen du programme de travail à long terme du BIPM en radiométrie et photométrie (CIPM/80-3).
 10. Forme d'expression des incertitudes expérimentales en radiométrie et photométrie (Recommandation 1 (CI-1981)).
 11. Informations sur les travaux effectués dans le cadre de la CIE (F. Rotter).
 12. Autres travaux de recherche.
 13. Questions diverses.
 14. Publication des documents.
-

RAPPORT
DU
COMITÉ CONSULTATIF
DE PHOTOMÉTRIE ET RADIOMÉTRIE
(10^e Session — 1982)
AU
COMITÉ INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES
par O. C. JONES, Rapporteur

Le Comité Consultatif de Photométrie et Radiométrie (CCPR) s'est réuni pour sa dixième session au Bureau International des Poids et Mesures (BIPM), à Sèvres, où il a tenu cinq séances entre le mardi 28 et le jeudi 30 septembre 1982.

Étaient présents :

W. R. BLEVIN, membre du CIPM, président du CCPR.

Les délégués des laboratoires membres :

Bureau National de Métrologie, Paris: Institut National de Métrologie [INM] du Conservatoire National des Arts et Métiers (J. BASTIE).

Conseil National de Recherches du Canada [NRC], Ottawa (G. WYSZECKI).

CSIRO, Division of Applied Physics [CSIRO], Lindfield (J. L. GARDNER).

Electrotechnical Laboratory [ETL], Ibaraki (N. OBA).

Institut National de Métrologie [NIM], Beijing (CHEN XIAJU).

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

National Bureau of Standards [NBS], Washington (K. D. MIELENZ, E. ZALEWSKI, D. McSPARRON).

National Physical Laboratory [NPL], Teddington (O. C. JONES, P. J. KEY).

National Physical Research Laboratory [NPRL], Pretoria
(F. HENGSTBERGER).

Office Fédéral de Métrologie [OFMET], Wabern (P. BLASER)/World
Radiation Center [WRC], Davos (P. BLASER, par interim).

Physikalisch-Technische Bundesanstalt [PTB], Braunschweig
(D. HAHN, K. BISCHOFF, D. FÖRSTE).

Les membres nominativement désignés :

L. PLAZA (Madrid).

F. ROTTER (Wien).

J. SCHANDA (Budapest).

K. YOSHIÉ (Tokyo).

Le Directeur du BIPM (P. GIACOMO).

Invités :

A. CORRÓNS, Instituto de Optica Daza de Valdés [IOM], Espagne.

R. D. LOZANO, Instituto Nacional de Tecnología Industrial [INTI],
Argentine.

J. ŽATKOVIČ, Československý Metrologický Ústav [CSMU],
Tchécoslovaquie.

Assistaient aussi à la session :

J. TERRIEN, directeur honoraire; T. J. QUINN, sous-directeur et
J. BONHOURS (BIPM).

Excusés :

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

World Radiation Center [WRC], Davos (R. BRUSA).

Absent :

Institut de Métrologie D.I. Mendéléév [IMM], Leningrad.

Le Président ouvre la séance et Mr Jones est nommé rapporteur.

1. État d'avancement du document explicatif du CCPR sur les grandeurs et les unités photométriques

Mr Wyszecki fait l'historique de ce document qui n'est pas destiné à devenir un manuel de photométrie ni à faire double emploi avec les publications de la CIE qui sont beaucoup plus détaillées. On s'accorde à dire que ce document correspond à un besoin bien défini et qu'il devrait être publié en annexe au rapport de cette session (Annexe P 2) ainsi que sous forme d'un tirage à part du BIPM; il devrait aussi être publié dans

Metrologia avec des tableaux abrégés. Un groupe de rédaction, comprenant Mr Wyszecki (président), Mr Mielenz et Mr Blevin, est chargé de préparer le document en vue de sa publication. Le document ne sera pas diffusé à nouveau aux membres du CCPR; toute nouvelle suggestion d'amélioration doit être faite par écrit au groupe de rédaction.

2. Rapport sur la comparaison internationale de lampes étalons d'intensité lumineuse à forte intensité de courant

Mr Key indique que ces nouvelles lampes ont été mises au point conjointement par le NPL et la General Electric Company (GEC). La comparaison avait pour objectif d'étudier la reproductibilité de ce type de lampes, lorsqu'elles sont acheminées par colis postal entre pays différents, et de comparer les valeurs de l'intensité lumineuse mesurées par les participants. Les lampes se sont révélées très robustes et on a estimé qu'elles pourraient être utilisées lors de la prochaine comparaison internationale d'étalons à température de couleur élevée organisée par le BIPM. Les relations entre les valeurs d'intensité lumineuse attribuées par les laboratoires participants sont à peu près celles qui étaient attendues (Annexe P 3).

3. Rapport sur l'essai de comparaison internationale d'intensité lumineuse, organisé par la PTB avec des récepteurs corrigés $V(\lambda)$ et des lampes étalons Osram Wi 41 G

Mr Bischoff indique que le rapport (Annexe P 4) montre le comportement de lampes et de récepteurs comme étalons de transfert; il ne s'agissait pas d'une comparaison d'échelles d'intensité. Les lampes ont bien fonctionné; elles étaient suffisamment robustes pour être acheminées simplement par la poste à la condition d'être convenablement emballées. Une inversion de polarité explique une discontinuité mineure de la caractéristique intensité-temps pour l'un des participants. Les résultats obtenus avec les récepteurs ont été un peu moins satisfaisants, vraisemblablement parce que les propriétés optiques du ciment employé dans la construction du filtre $V(\lambda)$ s'étaient modifiées avec le temps. On espère que les récepteurs de remplacement que le fabricant a fournis seront plus stables.

Le Président souligne que ce sont les filtres, plutôt que les photodiodes elles-mêmes, qui ont été sources de difficultés. Il remercie la PTB et le NPL pour leurs efforts dans l'organisation de ces comparaisons et fait remarquer qu'il existe maintenant deux types de lampes qui fonctionnent mieux que les lampes dont on disposait auparavant à cette température de couleur.

4. Essai de comparaison internationale de mesures de luminance énergétique spectrale entre le NBS et le NPL

Mr Key indique que ce travail résulte d'une proposition faite en 1975 au CCPR, d'étudier l'emploi d'une lampe étalon améliorée de luminance énergétique spectrale mise au point par le NPL. Sur les quatre lampes envoyées au NBS en avril 1982, deux sont parvenues en bon état et ont été mesurées par le NBS. Elles ont été renvoyées au NPL où, bien que les mesures ne soient pas encore achevées, elles semblent parvenues sans dommage apparent. Les résultats seront communiqués au CCPR dès qu'ils seront disponibles.

5. État d'avancement de la réalisation de la nouvelle définition de la candela par les laboratoires nationaux

On discute des programmes de travail des laboratoires nationaux en relation avec la Résolution 3 de la 16^e CGPM (1979). Le Président expose la situation telle qu'elle ressort des réponses à un questionnaire qui a été diffusé avant la présente session. Mr Bastie indique que l'INM est en train de réaliser la candela. Les premiers résultats laissent à penser que la nouvelle unité sera inférieure de 1,5 % à l'unité conservée; c'est un résultat qui est en accord avec les conclusions des récents essais de comparaison internationale faits par le NPL et la PTB.

Il est vraisemblable qu'il y aura jusqu'à seize laboratoires nationaux qui auront déterminé la candela selon la nouvelle définition avant que la prochaine comparaison internationale organisée par le BIPM n'ait lieu. Un certain nombre d'entre eux, dont le NBS et l'INTI, envisagent d'utiliser concurremment des radiomètres étalonnés électriquement et des cellules au silicium autoétalonnées.

Mr Chen pense que l'unité du NIM variera d'environ 1 %. Après avoir un peu discuté du Document CCPR/82-8, le Président constate le bon travail qui a été effectué au NIM, en particulier la mise au point de nouvelles lampes étalons à atmosphère gazeuse. Pour le NPL, Mr Jones indique que l'unité conservée correspond à une valeur de K_m de 686 lumens par watt plutôt qu'à la valeur adoptée de 683 lumens par watt. Néanmoins, le NPL préfère attendre les résultats de la prochaine comparaison internationale, ainsi que de la nouvelle réalisation de la candela au NPL par radiométrie absolue, avant de décider s'il est nécessaire de modifier son unité conservée.

Mr Hengstberger signale que le NPRL réalise la candela en permanence puisque toutes les mesures sont faites en utilisant un des six radiomètres absolus disponibles, de préférence à des lampes étalons secondaires. Mr Wyszeczi dit que le NRC emploie des radiomètres absolus pour

étalonner des diodes au silicium qu'on utilise ensuite avec des filtres $V(\lambda)$ étalonnés. On opère un contrôle sur la réponse de l'ensemble ainsi constitué. Mr Blaser fondera sa détermination sur un radiomètre absolu que lui a procuré le WRC. La sensibilité de ce radiomètre est faible; on utilisera donc une source laser comme étape intermédiaire pour étalonner les cellules au silicium corrigées $V(\lambda)$. Mr Plaza pense que la valeur de la nouvelle réalisation de la candela à l'IOM devrait être de 1 % environ inférieure à la moyenne internationale « BIPM 1952 » utilisée précédemment.

Le Président constate que treize laboratoires environ préparent une nouvelle détermination de la candela. Cela traduit à l'évidence l'effet stimulant qu'a produit l'adoption d'une nouvelle définition de la candela.

Mr Oba présente le Document CCPR/82-5. Pour les lampes à température de couleur de 2 800 K, on pense que le lumen conservé par l'ETL est proche de l'unité SI. A 2 353 K, toutefois, l'unité conservée précédemment était de 1,4 % supérieure à la nouvelle unité. Mr Soardo introduit le Document CCPR/82-11 qui décrit un goniophotomètre dont l'incertitude est de 0,3 %. On utilise un réflecteur ayant la forme d'un prisme annulaire pour éviter l'absorption du flux par la douille portant la lampe. A l'avenir, l'IEN a l'intention d'utiliser le goniophotomètre associé à des étalons d'intensité pour conserver l'unité de flux; l'emploi de lampes étalons secondaires de flux sera abandonné. Mr Hahn indique que la PTB aura une ligne d'action identique. D'autres laboratoires font part d'intentions similaires.

6. Organisation de futures comparaisons internationales de mesures d'intensité lumineuse

Le Président rappelle la Résolution 4 de la 16^e CGPM (1979) qui souligne la nécessité « de contrôler l'uniformité des résultats des mesures photométriques obtenus avec la nouvelle définition de la candela ». Il apparaît que neuf des treize laboratoires qui ont répondu au questionnaire ont exprimé le souhait d'avoir des comparaisons internationales à la fois de flux et d'intensité lumineuse. Il souligne qu'il y a deux objectifs pour ces comparaisons internationales, comme il est indiqué à la question 9 du Document CCPR/82-1. En premier lieu, un objectif « scientifique » qui consiste à assurer l'approche des réalisations pratiques de la candela la plus voisine de la définition du SI. Le second objectif consiste à établir, pour des raisons commerciales, la relation entre les unités conservées (pour dissémination) par les différents laboratoires. Il suggère que les laboratoires nationaux donnent deux séries de valeurs pour les lampes qui feront l'objet de ces comparaisons internationales. La première série serait fondée sur la meilleure détermination absolue effectuée par le laboratoire et la seconde donnerait les valeurs fondées sur les unités conservées. Pour certains laboratoires, la première et la seconde séries de valeurs seraient identiques.

Mr Jones craint qu'il n'y ait un risque de confusion en opérant de cette façon. Il faut séparer les deux objectifs. Les laboratoires doivent toujours donner les valeurs en fonction des unités conservées qui sont connues avec le moins d'incertitude. Les résultats des déterminations absolues récentes doivent être, soit publiés, soit communiqués séparément au BIPM sous forme de facteur de correction. Mr Hahn fait remarquer que l'idéal serait que les valeurs scientifiques concordent avec les valeurs conservées mais cela n'est pas toujours commode dans la pratique. Mr Wyszeczi s'intéresse seulement aux valeurs scientifiques. D'autres soulignent qu'il est important pour les milieux industriels de connaître la relation entre les valeurs conservées des différents pays.

Mr Giacomo pense que le BIPM doit mettre l'accent sur le contrôle à long terme et qu'en conséquence seuls les laboratoires qui ont effectué des mesures absolues doivent prendre part à ce programme de comparaisons internationales. Les autres laboratoires doivent participer à un autre programme : il souhaite éviter de mélanger les deux. Le Président estime que le BIPM doit disséminer les « meilleures valeurs scientifiques disponibles ». Mr Terrien suggère que le BIPM puisse être en mesure d'ajuster les valeurs des lampes qui conservent la moyenne internationale de 1952 à la suite de la prochaine comparaison internationale, en supposant que celle-ci soit couronnée de succès.

Mr Quinn fait remarquer l'analogie qui existe entre la discussion actuelle et celles qui eurent lieu au sein du CCT avant que l'on n'invente l'EIPT. On est en train de confondre deux sujets différents. Le Président répond que seuls quelques grands laboratoires nationaux ont fondé les unités photométriques qu'ils conservent sur la moyenne des précédentes comparaisons internationales et Mr Hahn rétorque qu'il n'existe pas encore d'échelle internationale pratique photométrique : avant cela, il faut encore beaucoup travailler. Mr Förste pense que si le BIPM n'établit pas les différences entre les unités conservées, alors d'autres organisations entreprendront ce travail.

En résumé, le Président dit que seuls pourront participer à la prochaine comparaison internationale les laboratoires qui ont réalisé la candela selon la nouvelle définition et que l'accent sera mis sur l'établissement de la meilleure valeur scientifique de l'unité SI. Il présente une proposition de compromis suivant laquelle chaque laboratoire qui a réalisé la candela devra donner :

- a) les valeurs des lampes fondées sur sa meilleure réalisation scientifique de l'unité,
- b) les valeurs fondées sur l'unité qu'il conserve ou qui est distribuée à l'échelon national,
- c) les valeurs fondées sur d'autres travaux du même genre, par exemple des déterminations de sources corps noir.

On décidera de ce que l'on fera de toutes ces valeurs seulement lorsque l'on connaîtra les résultats de la comparaison internationale. On organisera

un groupe de travail pour étudier le détail des dispositions nécessaires. Cette proposition est adoptée sans avis contraire.

Il est également convenu que le BIPM continuera, comme par le passé, à jouer le rôle de laboratoire organisateur pour les comparaisons internationales d'intensité et de flux lumineux.

Le Président attire l'attention sur les réponses aux questions 12 et 13 du Document CCPR/82-1. Le choix du dispositif étalon de transfert se porte en premier lieu sur une série de lampes étalons à atmosphère gazeuse et, en second lieu, sur un récepteur corrigé $V(\lambda)$. Trois types de lampes sont proposés : NPL/GEC, Osram Wi 41 G, des lampes quartz-halogène de fabrication japonaise. Une autre possibilité consisterait à utiliser concurremment des lampes et des récepteurs. Après discussion, une étroite majorité se prononce pour la seule utilisation de lampes lors de la prochaine comparaison internationale.

On se demande ensuite s'il faut n'utiliser qu'un seul type de lampe pour la comparaison d'intensité à température de couleur élevée. Mr Jones pense qu'au vu de l'expérience antérieure malheureuse, il serait préférable d'utiliser deux types de lampe, avec quatre lampes de chaque type. Mr Key ajoute que, d'un lot à l'autre, il peut y avoir des variations dans la fabrication en faible quantité de n'importe quel type de lampe. Certains laboratoires se montrent réticents pour faire l'achat de nouvelles lampes en plus de celles qu'ils possèdent déjà. Bien qu'il soit possible de s'épargner du travail en optant pour une comparaison circulaire, il est décidé de s'en tenir à une comparaison en étoile comme précédemment. Mr Bonheure dit que le BIPM peut travailler sur deux types de lampes et suggère, soit six lampes d'un même type, soit trois ou, de préférence, quatre lampes pour chacun des deux types. Mr Schanda souhaite qu'au moins trois des laboratoires participants utilisent les deux types de lampes. En fait cinq laboratoires font part de leur intention de le faire (CSIRO, NBS, NPL, INM, NPRL).

Mr Gardner dit que les lampes en quartz à halogène se sont révélées satisfaisantes au CSIRO et coûtent environ le sixième du prix des lampes NPL/GEC ou des lampes Osram. Mr Oba estime qu'il serait probablement nécessaire de sélectionner les lampes de façon à fournir des étalons d'intensité offrant une uniformité d'éclairement convenable : il est probable que 10 % seulement des lampes en quartz à halogène conviendraient. En conclusion, on utilisera seulement des lampes Osram et NPL/GEC. Le NPL se chargera de fournir à tous les pays qui voudraient les utiliser des lampes NPL/GEC qui ont été contrôlées et dont on est sûr que le fonctionnement est satisfaisant. Le Président invite les clients éventuels à faire connaître au NPL et à la PTB les nombres de lampes qu'ils sont susceptibles de commander (58 lampes Osram, 50 lampes NPL/GEC, 21 lampes de flux GEC). Il propose aussi un programme de réalisation de la comparaison, qui devrait se terminer à la mi-1985.

Il est convenu que l'on adoptera une température de couleur de $2\ 800\ \text{K} \pm 30\ \text{K}$. On fera fonctionner les lampes, placées à une distance donnée (2,5 m) du photomètre, à intensité de courant constante et à

polarité spécifiée. On recommandera une période minimale de vieillissement, bien que les participants soient chargés d'assurer la stabilité des lampes qu'ils envoient au BIPM. On indiquera aussi les techniques d'alignement recommandées et les durées minimales de préallumage des lampes. Les résultats communiqués seront les valeurs de l'intensité lumineuse des lampes. On devra aussi fournir les dimensions du récepteur et sa courbe de réponse angulaire. Un Groupe de travail comportant des représentants du BIPM, du NPL et de la PTB, est constitué pour établir dans le détail le programme de la comparaison et régler tout problème qui pourrait survenir en cours d'exécution. Le représentant du BIPM aura la charge de convoquer le Groupe de travail.

7. Futures comparaisons internationales de mesures de flux lumineux

Il est convenu que ne pourront participer à la prochaine comparaison internationale de flux lumineux que les laboratoires qui ont réalisé le lumen à partir de l'actuelle définition de la candela. Les autres laboratoires qui sont intéressés pourront envoyer des lampes au BIPM ultérieurement. On devra communiquer aussi bien les valeurs scientifiques que les valeurs conservées, comme dans le cas de l'intensité lumineuse. Les lampes à utiliser sont des étalons de flux GEC, à atmosphère gazeuse, à température de couleur élevée; la puissance sera vraisemblablement de 200 W mais cela reste à confirmer. La température de couleur nominale est de 2 750 K mais il faut envisager la possibilité de faire fonctionner les lampes à 2 800 K. Les spécifications détaillées d'une douille satisfaisante seront fournies et les participants devront indiquer tout écart par rapport à ces spécifications.

La comparaison internationale de flux lumineux pourra être menée en même temps que celle d'intensité lumineuse. Toutefois, le BIPM établira des rapports séparés afin que les résultats de la comparaison d'intensité lumineuse soient connus sans qu'il soit nécessaire d'attendre l'achèvement de la comparaison de flux lumineux. Chaque laboratoire utilisera un groupe de six lampes. Pour cette comparaison, le BIPM sera secondé par le Groupe de travail déjà créé pour la comparaison d'intensité lumineuse.

8. Progrès réalisés dans l'établissement d'étalons primaires pour les grandeurs radiométriques

Mr Key présente le Document CCPR/82-10. Au NPL, on a comparé un radiomètre, étalonné électriquement et fonctionnant à basse température, avec des récepteurs à diode au silicium provenant du NBS, dont on a déterminé le rendement quantique; on a obtenu un accord à $\pm 0,2$ % près. En ce moment le NPL construit une version plus petite, plus simple et plus commode de ce radiomètre. Mr Quinn fait l'historique du radiomètre absolu du NPL. On l'a utilisé pour déterminer la constante de Stefan-

Boltzmann; il a donné une valeur qui concorde avec la valeur calculée à 10^{-4} près. L'importance de son encombrement vient de l'utilisation d'un corps noir fonctionnant à 273 K : la plus grosse partie de la puissance est émise à grandes longueurs d'onde. Le Président ajoute que sa propre détermination de la constante de Stefan-Boltzmann au point de l'or concorde aussi avec la valeur calculée, mais il peut y avoir des problèmes à des températures encore plus élevées.

Bien que la plupart des participants aient déjà rendu compte de l'état d'avancement de leurs travaux (Document CCPR/82-4), voici quelques indications supplémentaires. Mr Bastie poursuit la mise au point d'un radiomètre absolu à faisceau d'électrons. Mr Oba mentionne l'emploi du rayonnement synchrotron provenant d'un anneau de stockage comme source étalon. L'ETL a aussi mis au point un radiateur à carbure de silicium comme source à haute température. Mr Zalewski attire l'attention sur la mesure de la constante solaire faite par le California Institute of Technology au moyen d'instruments mis en orbite spatiale. On recherche une exactitude de $\pm 0,1\%$ et les observations vont se poursuivre sur un cycle solaire complet de onze ans. Mr Chen mentionne la mise au point d'un corps noir à température ambiante comme source étalon. Mr Hengstberger a automatisé le radiomètre absolu du NPRL et mis au point des techniques de mesure de l'énergie de lasers pulsés.

Le NRC a fabriqué une série de radiomètres absolus étalonnés électriquement qui nécessitent une seule correction pour donner une incertitude de $0,1\%$. Des comparaisons avec des récepteurs au silicium autoétalonnés concordent à $\pm 0,1\%$ près. Des travaux se poursuivent pour déterminer l'éclairement énergétique spectral absolu en utilisant des diodes au silicium étalonnées au moyen de rayonnements laser. Mr Blaser utilise un radiomètre absolu que lui a procuré le WRC.

A la PTB, la source corps noir à 3 000 K a été améliorée pour éliminer l'absorption par la vapeur d'eau. On a terminé une comparaison des répartitions spectrales relatives d'énergie du rayonnement synchrotron et du rayonnement de l'arc à argon. L'anneau de stockage BESSY fournit 800 MeV avec un courant de 100 mA. Des récepteurs absolus coniques à réflexion spéculaire, pour des mesures de lasers de fortes puissances, donnent une incertitude de $\pm 0,2\%$. On dispose d'éclairéments énergétiques allant jusqu'à 1 W/cm^2 pour des étalonnages de photopiles solaires.

Mr Jones demande si l'on sait quelque chose sur la stabilité à long terme des radiomètres absolus, sur une période de 10 ans par exemple. Les réponses indiquent que les revêtements au noir d'or ne sont pas fiables mais que la peinture absorbante 3-M qui a été recuite et que l'on a laissée se stabiliser pendant quelques mois, peut conserver un facteur de réflexion constant à quelques dixièmes de pourcent près. Mr Hengstberger dit que l'utilisation d'un disque en BeO, au lieu du support habituel en mica, apporte une grande amélioration à l'uniformité spatiale de la réponse au travers de la surface absorbante d'un radiomètre absolu.

9. Photodiodes au silicium autoétalonnées

Mr Zalewski pense que la connaissance approfondie de la physique des photodiodes au silicium, ou à autres semi-conducteurs, devrait permettre de déterminer à quelques 10^{-4} près leur rendement quantique dans le spectre visible. Des recherches sont encore nécessaires pour améliorer l'exactitude dans l'ultraviolet et vérifier les propriétés des types de semi-conducteurs autres que le silicium. On peut déduire le facteur de réflexion spectrale tout simplement d'après une mesure de l'épaisseur d'oxyde. Mr Corróns dit que ces techniques sont d'utilisation plus facile, et presque aussi exactes que les radiomètres absolus pyroélectriques. Mr Hahn indique que la PTB étudie l'emploi des récepteurs au germanium dans l'infrarouge et des récepteurs à arséniure de gallium dans l'ultraviolet. Mr Schanda souhaite des dispositifs plus sensibles qui ne nécessitent pas des niveaux d'éclairement énergétique de lasers. Mr Zalewski explique comment, en disposant quatre récepteurs UDT * pour en faire un piège à lumière, on évite d'avoir besoin de faire une correction pour le rayonnement réfléchi. L'efficacité quantique de ce dispositif est de $0,999 \pm 0,002$ entre 407 et 676 nm.

10. Rayonnement synchrotron

Mr Bastie a utilisé la source synchrotron ACO ** pour étalonner des lampes à deutérium et des arcs à argon. La répartition spectrale relative d'énergie est bien connue mais on déduit la valeur absolue du rayonnement à partir du nombre d'électrons avec une incertitude de $\pm 10\%$. On utilise comme référence absolue une photodiode au silicium étalonnée avec un filtre à 680 nm. Entre 200 et 350 nm, on est en accord avec l'échelle en usage à l'INM. Mr Oba indique que, durant les huit années écoulées, on n'a effectué qu'une série limitée de mesures et les résultats présentent une incertitude assez grande. L'ETL possède maintenant un anneau de stockage d'électrons et entame un programme plus ambitieux.

Mr Mielenz dit qu'une diode au silicium pourvue d'un filtre a été comparée au rayonnement provenant de l'anneau de stockage du NBS, dans lequel le courant est déterminé au moyen d'une technique de comptage des électrons. L'éclairement énergétique à 600 nm concordait à $\pm 1\%$ près avec l'échelle du NBS. Le filtre interférentiel s'est révélé instable. Mr Key parle de l'expérience du NPL sur les dix dernières années et de sa récente collaboration avec l'INM et l'ACO. On emploie comme étalon de travail un petit arc à argon stabilisé par circulation d'eau;

* United Detector Technology.

** Anneau de collision d'Orsay.

lorsqu'il est conforme aux spécifications, cet arc donne une répartition spectrale d'énergie reproductible avec une incertitude de $\pm 1\%$ entre 170 et 350 nm. Un travail de collaboration est aussi en cours avec la PTB et BESSY *. Le Président suggère de mesurer les arcs à argon du NPL en utilisant des récepteurs thermiques absolus. Mr Bischoff mentionne des comparaisons internationales dans l'ultraviolet lointain. La PTB (Berlin) doit comparer des sources corps noir avec BESSY, afin de vérifier l'équation de Schwinger; on déterminera le courant de façon absolue par comptage d'électrons.

11. Étalons de luminance énergétique spectrale et d'éclairement énergétique spectral

Mr Gardner dit que l'échelle 1975 du CSIRO dans le visible va être complétée avec un corps noir à plus haute température pour fournir des étalons de luminance énergétique et d'éclairement énergétique dans l'ultraviolet.

Mr McSparron indique les domaines couverts par les installations du NBS. Pour l'éclairement énergétique : lampes à deutérium entre 200 et 350 nm; lampes en quartz à halogène entre 250 et 600 nm (devant aller ultérieurement jusqu'à $2\ \mu\text{m}$). Entre 225 et 2 500 nm (et ultérieurement jusqu'à $14\ \mu\text{m}$), on dispose de lampes étalons de luminance énergétique spectrale.

Mr Key emploie couramment des lampes à deutérium comme étalons de luminance énergétique spectrale et d'éclairement énergétique spectral jusqu'à 200 nm. Pour servir d'étalon de transfert, on met au point une lampe en quartz à halogène améliorée ayant un champ bien uniforme. Pour la luminance énergétique spectrale, on a trouvé une nouvelle conception inversée de la lampe à ruban de tungstène qui est relativement dépourvue de bruit.

Mr Wyszecki signale que le NRC possède un nouveau spectroradiomètre qui fonctionne entre 185 et 5 000 nm et qui est entièrement automatisé. On étalonne les diodes au silicium en utilisant des radiomètres absolus et des rayonnements laser. Un observatoire surélevé est équipé pour faire des mesures de rayonnement solaire total et spectral. Un spectromètre à transformation de Fourier pour les mesures en infrarouge entre 500 et 100 000 nm est en fonctionnement. Mr Plaza indique que l'échelle de luminance énergétique spectrale de l'IOM, établie dans le visible dès 1979, s'étend maintenant à l'ultraviolet et à l'infrarouge; c'est une installation entièrement automatisée.

Mr Wyszecki demande à quel domaine de longueurs d'onde s'intéresse le CCPR. Le Président pense que cela dépend des compétences qui existent au sein du CCPR : on prend des décisions en fonction de l'utilité des

* Berliner Elektronenspeicherring-Gesellschaft für Synchrotronstrahlung m.b.H.

activités qui sont proposées. Mr Jones pense que les mesures pourraient s'étendre à 40 μm en liaison avec les programmes d'économie d'énergie. Le NPL met au point des étalons de réflexion appropriés. Mr Giacomo fait remarquer que le Comité Consultatif d'Électricité (CCE), lui aussi, s'intéresse aux mesures de puissance de lasers et qu'il existe au sein du CCE un Groupe de travail pour les grandeurs aux radiofréquences qui est chargé du domaine des gigahertz. Finalement, on décide de créer un Groupe de travail comprenant des représentants du NRC (présidence), du NPL et du NBS pour conseiller le CCPR sur l'opportunité d'étendre son activité dans l'infrarouge.

12. Activités futures du CCPR et nécessité d'autres comparaisons internationales

Le Président demande s'il est nécessaire d'organiser une comparaison internationale de mesures de luminance énergétique spectrale. Six laboratoires préfèrent la reporter après l'achèvement des deux comparaisons photométriques. Sept laboratoires s'intéressent à d'autres comparaisons internationales radiométriques. Le NPL et le NBS effectuent en ce moment une comparaison limitée pour étudier le fonctionnement de la nouvelle lampe du NPL. Mr Key demande qui serait intéressé par une comparaison internationale de luminance spectrale dans un ou deux ans. Le CSIRO et le NBS sont intéressés. Mr Lozano préfère attendre des améliorations dans les mesures de récepteurs au silicium. Mr Hahn fait remarquer que la PTB procède à des déménagements d'installations et ne sera pas prête avant deux ans.

Mr Zalewski parle de la possibilité de faire circuler des diodes au silicium sans filtre que l'on mesurerait à une seule longueur d'onde (633 nm); la grandeur à mesurer serait la réponse spectrale absolue. Le NBS pourrait faire circuler les diodes en 1984. La CIE travaille aussi un peu sur ce sujet, bien qu'elle s'intéresse davantage aux mesures spectrales relatives. Mr Schanda dit que les mesures de ce type qui sont faites dans l'industrie ne peuvent encore donner des composantes trichromatiques à $\pm 0,001$. Une douzaine de laboratoires sont prêts à envisager une participation en 1984. Mr Key pense qu'il vaudrait la peine de faire un effort supplémentaire et de faire une mesure à deux longueurs d'onde, dont l'une dans la région du vert. Mr Hahn estime qu'il y a suffisamment d'activités prévues pour le moment. Toute le monde en convient.

On forme un Groupe de travail de spectroradiométrie pour la comparaison internationale de cellules au silicium et la comparaison de mesures de luminance énergétique spectrale. Ce Groupe, présidé par le NBS, comprend des représentants du NRC, du NPRL, ainsi que Mr Schanda.

Le Président demande si la PTB souhaite que l'on organise de futures comparaisons de récepteurs corrigés $V(\lambda)$. Mr Hahn pense qu'il faut

d'abord étudier plus complètement les instruments. Il faudrait aussi inclure la mesure spectrophotométrique de filtres $V(\lambda)$ mais cela représente trop de travail. Il est convenu de remettre ces études à plus tard.

13. Programme à long terme du BIPM en radiométrie et en photométrie

Mr Quinn attire l'attention sur le Document CIPM/80-3, suivant lequel il n'est pas prévu actuellement d'augmenter le personnel de cette section : qu'en pense le CCPR ? Le Président souhaite aborder seulement des points précis mais il a le sentiment qu'il faut conserver les installations du BIPM. Mr Wyszecki fait remarquer qu'au-dessous d'un certain niveau minimal d'activité le travail n'est plus valable. Si le BIPM cessait son activité dans ce domaine, le NRC serait prêt à accepter que d'autres laboratoires organisent les comparaisons internationales. Mr Jones demande en quoi consiste actuellement le travail du BIPM en photométrie. Mr Bonheure répond que 90 % de l'activité comprend des étalonnages de routine effectués pour des laboratoires extérieurs. En moyenne, on étalonne 30 à 40 lampes par an, pour quatre pays différents. Dix pays s'appuient sur le BIPM pour relier leurs étalons à l'unité de base du SI. Il faut un effort supplémentaire pour organiser des comparaisons internationales. Mr Schanda se demande pourquoi davantage de pays ne s'appuient pas sur le BIPM. Il est certain que ce service du BIPM est essentiel pour quelques pays.

Mr Jones croit que les changements dans les techniques en photométrie et en radiométrie exigent que la compétence du BIPM soit mise à jour pour répondre aux besoins futurs, par exemple en spectroradiométrie, en ce qui concerne les récepteurs autoétalonnés, etc. Mr Mielenz est d'accord : il suggère que l'on adjoigne un jeune physicien à cette section. Mr Rotter dit que l'Autriche dépend du BIPM et souhaite qu'il y ait là tous les moyens modernes. D'autres rétorquent que le rôle principal du BIPM consiste à organiser des comparaisons internationales. Au cours des années récentes, les laboratoires ont dû réduire leurs efforts de recherche au bénéfice d'activités de routine et la même tendance doit se refléter au BIPM. Compte tenu de l'importance des mesures photométriques pour la société, par rapport à d'autres activités, il est peut-être nécessaire de répartir différemment les ressources du BIPM. Mr Schanda parvient à une conclusion différente. L'action du BIPM devrait réduire certains travaux dans les laboratoires nationaux. En laissant au BIPM le soin de disséminer les étalons, et les laboratoires nationaux se mettant d'accord pour se partager les domaines de recherche, on devrait faire des économies. Il n'est pas nécessaire que le BIPM réalise des unités, simplement pour comparer entre elles les réalisations nationales de ces unités. Mr Soardo est d'accord ; il souligne l'importance du rôle du BIPM pour orienter les Gouvernements sur les questions de métrologie. L'activité du BIPM dans ce domaine doit se poursuivre.

Mr Lozano fait remarquer que l'importance des récepteurs comme étalons de transfert ira en s'accroissant dans l'avenir. Il sera sans doute nécessaire dans le futur de remplacer les lampes par des récepteurs; il s'agit là d'un changement significatif. A l'avenir aussi, il sera peut-être nécessaire que le BIPM conserve des étalons pour l'infrarouge en liaison avec les recherches sur l'énergie solaire. Mr Hengstberger pense que la radiométrie est un domaine où il est difficile d'obtenir une bonne exactitude et l'effort qui y est consacré actuellement au BIPM paraît insuffisant. Mr Plaza croit aussi que le BIPM doit avoir une bonne compétence dans ce domaine et suggère qu'on recrute un physicien supplémentaire.

Mr Giacomo demande au CCPR de prévoir la meilleure façon pour le BIPM de conserver ses unités au cours des dix prochaines années. En général, le BIPM attend que les techniques aient été bien mises au point par les laboratoires nationaux avant de les adopter. Quels sont les nouveaux progrès attendus? Quel est le domaine le plus fructueux dans lequel des progrès devraient se faire? Mr Zalewski pense que les mesures d'éclairement énergétique spectral, de transmission spectrale et de réponse spectrale seront importantes à l'avenir et qu'il faudra faire des comparaisons internationales. MM. Hengstberger et Wyszecski sont du même avis. On estime que cela risque d'impliquer un déplacement de l'effort du BIPM par rapport à d'autres domaines.

Le Président souligne que le CIPM est heureux d'être guidé sur ce que le BIPM doit faire dans ce domaine. Aussi bien les grands que les petits laboratoires nationaux souhaitent avoir des avis circonstanciés du BIPM pour poursuivre leurs travaux. Il faut par conséquent au moins un physicien au BIPM capable de s'adapter dans ce domaine et qu'il y ait quelque activité de recherche. Le Président est d'accord pour dire que l'effort actuel est inférieur au seuil critique. Mr Quinn souligne l'importance d'un minimum de recherche pour maintenir la qualité du travail. C'est bien la politique du BIPM mais le problème est de choisir les domaines appropriés. Mr Hahn remarque que si l'effectif du BIPM ne peut augmenter, on ne peut que transférer les efforts. Cela risque seulement de déplacer le problème d'un domaine à un autre. Mr Jones se demande si les suggestions qui ont été faites d'abandonner la candela comme unité de base, ainsi que les faibles efforts déployés dans ce domaine au BIPM, sont le signe d'un manque d'intérêt pour ces questions au sein du CIPM. Mr Terrien le rassure: le statut de la candela n'affecte pas le besoin d'étalonnages. Mr Giacomo pense que le CIPM et la CGPM verront la nécessité qu'il y a de continuer à assurer un service en photométrie et en radiométrie. La difficulté est d'estimer correctement l'équilibre. Il faut justifier une augmentation des efforts.

Le Président propose de soumettre une recommandation au CIPM et de nommer un groupe pour la rédiger (MM. Jones, Hengstberger, Mielenz, Quinn). Des versions en français et en anglais de la Recommandation P 1 (1982) sont donc préparées et votées.

14. Activités de la Commission Internationale de l'Éclairage (CIE)

Mr Rotter indique que le TC 1.2 (Photométrie et Radiométrie) et le TC 2.2 (Détecteurs) se sont réunis le 23 et le 24 septembre 1982, à Berlin. Parmi les documents qui vont être publiés, il y a une version révisée du Document CIE N° 18, « Bases de la photométrie physique » et un nouveau document sur les « Mesures spectroradiométriques des sources lumineuses ». Les résultats provisoires d'une comparaison internationale de mesures du flux de lampes à vapeur de mercure à haute pression font apparaître un accord à $\pm 2\%$ près. Une comparaison de mesures sur des diodes électroluminescentes vient de commencer. On a prévu de rédiger huit autres documents. Une collaboration étroite avec le CCPR sera maintenue.

Mr Schanda demande si le CCPR doit s'occuper des propriétés des matériaux ou si cette question doit être laissée au soin de la CIE. Mr Blevin estime que le CCPR est surtout concerné par les unités plutôt que par les grandeurs sans dimension, mais dans le passé on a discuté d'étalons de réflexion diffuse. Mr Quinn dit qu'il s'agit d'une question difficile. En général, le BIPM essaie d'aider les laboratoires nationaux chaque fois que cela est possible, mais dans le passé il a évité de s'occuper d'étalonnage des matériaux de référence. Mr Mielenz ajoute que la CIE n'est pas plus avancée que ne l'est le CCPR en ce qui concerne les travaux sur les matériaux dans l'infrarouge.

Mr Terrien attire l'attention sur le travail de révision de la 4^e édition du Vocabulaire de la CIE qui est bientôt achevé. Il sera tenu compte de nouvelles grandeurs, comme l'exposition sphérique ou cylindrique et on y a introduit une nouvelle classe de grandeurs photoniques. A l'avenir, lorsque l'on définira des grandeurs biologiques, le facteur équivalent à K_m sera sans dimension et de préférence égal à l'unité. Cela est conforme à la Recommandation P 1 (1977) du CCPR qui a été approuvée par le CIPM.

15. Autres travaux de recherche

Mr Žatkovič présente les Documents CCPR/82-20 et 21 qui traitent des calculs de températures de répartition. On discute du choix optimal des deux longueurs d'onde utilisées dans cette méthode.

Mr Wyszeccki dit que le CCPR a autrefois discuté des bases fondamentales de la photométrie. Il désire attirer l'attention sur de nouvelles preuves de la corrélation non satisfaisante qui existe entre luminance et luminosité. Des désaccords allant jusqu'à 40 % peuvent survenir lorsque l'on a affaire à des mesures de diodes électroluminescentes, des affichages lumineux, etc. parmi les techniques modernes en électro-optique. Le NRC

veille à ce que la photométrie convienne aux besoins modernes. Un modèle amélioré du mécanisme de la vision doit inclure à la fois les fonctions \bar{x} et \bar{z} , aussi bien que $V(\lambda)$. Le fait que le CIPM ait précédemment adopté les trois fonctions colorimétriques le laissait prévoir. C'est là un problème urgent pour les ingénieurs dans l'industrie. Dans un an, le Comité de la CIE chargé de la vision proposera un schéma qui permettra une conversion plus correcte des mesures de luminance aux indications sur la luminosité dont on a besoin. Il faudra 10 à 15 ans pour régler entièrement le problème. Mr Hahn indique que la PTB étudie aussi des problèmes de ce genre. Mr Schanda dit qu'on a des difficultés avec les sources blanches telles que les tubes fluorescents à trois bandes spectrales. Le système colorimétrique actuel fondé sur \bar{x} , \bar{y} , \bar{z} n'est pas satisfaisant; il faut le modifier.

Mr Terrien indique que le problème de l'établissement d'une échelle de luminosité pour les êtres humains n'est pas résolu; le Comité technique de la CIE y travaille encore. Les grandeurs que l'on essaie de mesurer actuellement sont artificielles mais au moins sont-elles simples et acceptées par tout le monde, bien qu'elles ne permettent pas de faire face à tous les besoins. Le document de la CIE intitulé « La lumière comme véritable grandeur de la vision : principes de mesure » donne des informations utiles. Mr Wyszecki fait remarquer qu'il y a deux façons de considérer le problème : personnellement il pense que l'on peut mesurer la lumière, mais d'autres pensent le contraire. Mr Lozano attire l'attention sur le document n° 18 de la CIE qui donne des définitions acceptables. Comme la lumière concerne les êtres humains, il est peu probable que des solutions d'ordre général apparaissent. Nous devons traiter les problèmes particuliers au fur et à mesure où ils se posent. Le Président rappelle que le CCPR s'occupe des mesures objectives précises et exactes. La CIE est en train de concevoir le modèle d'une grandeur différente qui risque d'être mieux reliée à la luminosité que ne l'est la luminance. Lorsqu'elle sera établie et si elle peut faire l'objet de mesures objectives, le CCPR devra essayer de mettre au point des techniques pour en faciliter l'utilisation en métrologie de précision. Mr Wyszecki n'envisage aucun changement important. La méthode fondamentale de mesure demeurera la spectroradiométrie. Ultérieurement, on pourra faire appel à des méthodes mathématiques plus complexes que la multiplication par $V(\lambda)$ et l'intégration. Il est vraisemblable que l'on obtiendra la nouvelle grandeur par combinaison non linéaire de trois intégrales de ce genre. Mr Terrien pense que le problème risque d'être plus complexe pour d'autres effets actiniques biologiques. Par exemple, ceux pour lesquels la loi d'additivité est moins rigoureuse qu'elle ne l'est dans le cas de la vision.

Mr Förste revient sur l'existence, mentionnée précédemment, d'importants désaccords. Quelle est la dispersion constatée entre les observations? Mr Wyszecki dit qu'il ne s'agit pas simplement d'un accroissement de la dispersion; on constate une dérive systématique par rapport aux résultats obtenus en utilisant seulement $V(\lambda)$. Mr Plaza fait remarquer que l'observateur de la CIE s'est révélé très utile pendant 50 ans.

Il est peut-être temps de le remplacer par un meilleur. En résumé, le Président dit que le CCPR s'intéresse beaucoup aux travaux de pionnier de la CIE, mais qu'il est prématuré que le CCPR les exploite.

16. Expression des incertitudes expérimentales

Mr Giacomo présente le Document CCPR/82-12; il signale aussi le texte présenté par le BIPM * à la « Second International Conference on Precision Measurement and Fundamental Constants » en 1981 et le projet de code de procédure préparé par WECC **/PTB. Il n'est pas d'accord sur les détails de celui-ci mais le trouve acceptable en général. La conclusion principale est qu'il faut abandonner la classification en incertitudes systématiques et incertitudes aléatoires. Le concept d'« incertitude systématique » n'est pas valable et il faudra l'abandonner à l'avenir. On peut alors traiter mathématiquement toutes les incertitudes en utilisant les mêmes techniques qui ont été mises au point pour traiter les incertitudes aléatoires. Par conséquent, nous pouvons continuer à utiliser les écarts-types, etc. Le concept très vague de « limites d'incertitude » est remplacé par un paramètre qui a davantage de sens. On obtient l'« intervalle de confiance » à partir de l'écart-type composé en le multipliant par un facteur convenable afin de prévoir la probabilité qu'un résultat tombera dans l'intervalle indiqué. Il demeure bien entendu encore essentiel de donner la liste complète de toutes les composantes de l'incertitude. Le CIPM n'a pas directement approuvé la Recommandation INC-1 (1980), mais a préconisé, avant de prendre une décision, une période d'essai pendant laquelle le BIPM appliquera ces principes aux comparaisons qu'il organisera.

Le Président dit que CCPR doit à l'avenir indiquer une incertitude de 1σ et combiner, de manière quadratique, les composantes de l'incertitude. Il demande si tout le monde est d'accord pour adopter cette façon de faire. Mr Wyszecski dit que c'est une initiative louable mais il demande comment on se propose de déterminer les valeurs des incertitudes que l'on appelait auparavant « systématiques » et que l'on doit maintenant « évaluer par d'autres moyens ». Comment faut-il le faire ? Si cela n'est pas clair, peu importe la façon de les combiner. Mr Giacomo répond que l'on peut, dans des situations difficiles, évaluer ou estimer les incertitudes à partir de l'expérience antérieure, comme auparavant. C'est dans la façon de combiner ces estimations qu'il y a changement.

Mr Mielenz dit que le NBS aura à affronter un problème pour appliquer cette nouvelle méthode. La façon dont les incertitudes sont établies dans les rapports du NBS est étroitement contrôlée, selon les

* J. W. MÜLLER, The Assignment of Uncertainties to the Results of Experimental Measurements.

** Proposal for a WECC (Western Europe Calibration Cooperation) Code of Practice for the Calculation of Uncertainties in the Field of Electrical Measurements.

recommandations d'un groupe de statisticiens du NBS. Le Président demande aux participants, pour les prochaines comparaisons internationales, de faire de leur mieux pour se conformer aux nouvelles propositions pour exprimer les incertitudes.

17. Publication des documents

Mr Quinn dit que, pour réduire le travail de secrétariat et de préparation des publications, les rapports des Comités Consultatifs ne seront accompagnés à l'avenir que d'un petit nombre de documents de travail. On ne retiendra pas les communications dont l'importance est momentanée ou celles qui seront publiées par ailleurs. Une liste de tous les documents de travail présentés à la session sera annexée au Rapport et il sera toujours possible d'obtenir des exemplaires de ces documents sur demande adressée au BIPM.

Mr Schanda demande si l'on peut publier un bref rapport de la session dans le Journal de la CIE. Mr Giacomo dit que c'est possible. Tout participant peut rendre compte de la session dans les revues appropriées afin de faire connaître largement les travaux du CCPR. En tant que directeur du BIPM, il soumet un rapport à *Metrologia*.

*
* *

Le Président remercie tous les membres pour leur active participation et clôt la session.

18 octobre 1982

Recommandation
du Comité Consultatif de Photométrie et Radiométrie
présentée
au Comité International des Poids et Mesures

Développement de la photométrie et de la radiométrie au BIPM

RECOMMANDATION P 1 (1982)

Le Comité Consultatif de Photométrie et Radiométrie,

considérant

— que les besoins des mesures photométriques et radiométriques se sont modifiés récemment, en particulier à cause de l'importance accrue des applications industrielles de l'électro-optique,

— que le BIPM a joué et doit continuer à jouer un rôle central dans ce domaine en conservant des étalons de référence pour ces mesures, en organisant des comparaisons internationales, en fournissant des étalonnages et en rendant des services d'assistance scientifique,

— que les besoins d'exactitude de l'industrie dans ce domaine sont souvent très proches des limites que peuvent garantir les laboratoires nationaux,

— que des changements fondamentaux apparaissent dans les techniques radiométriques utilisées pour fournir des étalons, changements qui se traduisent, par exemple, par l'utilisation de récepteurs absolus de divers types ou de méthodes spectroradiométriques à côté des méthodes utilisant des rayonnements de spectre étendu,

— que la nouvelle définition de la candela a donné naissance, dans plusieurs pays, à de nouvelles réalisations de cette unité, à tel point que seize pays ont demandé à participer à la prochaine comparaison,

— que, de plus, des comparaisons internationales d'étalons spectroradiométriques sont projetées, et qu'elles mettront en jeu le BIPM,

— qu'on adjoindra vraisemblablement des récepteurs étalons aux groupes de lampes étalons utilisés jusqu'ici pour conserver les unités photométriques au BIPM et pour transférer ces unités d'un laboratoire à l'autre,

— que le personnel du BIPM actuellement affecté à la photométrie et à la radiométrie (0,2 physicien + 0,5 technicien) est déjà en nombre à peine suffisant pour satisfaire les besoins actuels en matière d'étalonnages, que ce nombre n'est pas suffisant pour assurer dans de bonnes conditions les obligations du BIPM en ce qui concerne les comparaisons internationales et qu'il est *a fortiori* insuffisant pour permettre au BIPM de renouveler sa compétence et de la maintenir, dans l'avenir, au plus haut niveau,

— que le nombre de personnes affectées à ces activités semble de toute façon disproportionné par rapport à l'importance économique des industries concernées et aux besoins des laboratoires nationaux,

— qu'il y a au BIPM des physiciens de haut niveau qui possèdent une large expérience dans les domaines en question et sont parfaitement capables de diriger le développement d'activités nouvelles en photométrie et en radiométrie,

recommande

— que, de toute urgence, le BIPM consacre des moyens supplémentaires à la photométrie et à la radiométrie,

— qu'en particulier au moins un physicien supplémentaire soit affecté à ce domaine d'activité pour le renforcer en ce qui concerne les comparaisons, les étalonnages, l'assistance scientifique et les nouveaux développements, les sujets à développer comprenant :

— l'étude de la concordance des diverses méthodes de réalisation des unités photométriques et radiométriques,

— l'étude des techniques et des méthodes spectroradiométriques d'étalonnage,

— l'utilisation de récepteurs semi-conducteurs ayant une efficacité quantique calculable et de récepteurs thermiques étalonnés par effet Joule.

ANNEXE P 1

**Documents de travail présentés
à la 10^e Session du CCPR**

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

Document
CCPR/

- 82-1 Preliminary questionnaire.
- 82-2 CSMU (Tchécoslovaquie). — Interpolation et extrapolation des valeurs de la température de répartition obtenues par les sources de températures mesurées, par J. Žatkovič.
- 82-3 CSMU (Tchécoslovaquie). — Comparaison de deux méthodes de détermination des valeurs de température de répartition, par J. Žatkovič.
- 82-4 Réponses au document CCPR/82-1 (Preliminary questionnaire).
- 82-4 bis Summary of the Replies to the Preliminary questionnaire CCPR/82-1.
- 82-5 ETL (Japon). — Recent experimental realization of the lumen, by H. Katsuyama and H. Kikuchi.
- 82-6 NPL (Royaume-Uni). — International circulation of heavy-current luminous intensity standards, by R. G. Berry and F. J. J. Clarke (Voir *Annexe P 3*).
- 82-7 PTB (Rép. Féd. d'Allemagne). — International intercomparison of luminous scales, by K. Bischoff and D. Förste (Voir *Annexe P 4*).
- 82-8 NIM (Rép. Pop. de Chine). — The realization of the basic unit for photometry, the candela, with the electrically calibrated radiometer, by Gao Zhizhong, Wang Chenchang, Piao Dazhi, Mao Shihua, Yang Chuihong.
- 82-9 NRC (Canada), NBS (États-Unis d'Amérique), CSIRO (Australie). — Principles Governing Photometry (Voir *Annexe P 2*).

- 82-10 NPL (Royaume-Uni). — Recent developments in absolute radiometry at NPL, by P. J. Key.
- 82-11 IEN (Italie). — A new realization of the lumen, by C. Gentile, M. L. Rastello, P. Soardo.
- 82-12 Recommandation du Groupe de travail sur l'expression des incertitudes (Recommandation INC-1 (1980) et Recommandation du Comité International des Poids et Mesures (Recommandation 1 (CI-1981)).
-

ANNEXE P 2

Principes régissant la photométrie

(Traduction du document CCPR/82-9)

Avant-propos

Ce document a pour but essentiel de rassembler des définitions et des tableaux de valeurs numériques déjà adoptés (ou recommandés) et publiés, soit par la Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM), soit par le Comité International des Poids et Mesures (CIPM), soit par la Commission Internationale de l'Éclairage (CIE).

Le document a été préparé par un groupe de travail comprenant :

G. WYSZECKI (Conseil National de Recherches, Canada), Président;

W. R. BLEVIN (CSIRO, Australie);

K. G. KESSLER et K. D. MIELENZ (National Bureau of Standards, États-Unis d'Amérique).

Il a été approuvé à la 10^e session (28-30 septembre 1982) du Comité Consultatif de Photométrie et Radiométrie (CCPR), organe destiné à renseigner le CIPM sur ces questions.

Introduction

La photométrie a pour objet de mesurer la « lumière », c'est-à-dire de mesurer l'attribut indispensable et commun à toutes les perceptions et sensations qui sont particulières au système visuel humain et se produisent par son intermédiaire. Il s'ensuit que les grandeurs photométriques doivent tenir compte à la fois des caractéristiques purement physiques du flux énergétique qui stimule le système visuel et de la sensibilité spectrale de ce système visuel. Le caractère subjectif de ce second facteur place les grandeurs photométriques dans une catégorie bien distincte des grandeurs purement physiques.

Le but de ce document est de donner une définition des grandeurs photométriques les plus importantes ainsi que de leurs unités, et d'expliquer brièvement les conventions qui les relient à la grandeur physique, le flux énergétique, et à son unité, le watt. Ces définitions et ces conventions doivent permettre d'effectuer les mesures photométriques avec des méthodes purement physiques tout en donnant des résultats qui soient en bon accord avec l'expérience visuelle.

Si un rayonnement électromagnétique a une puissance suffisante et si ses composantes ont des longueurs d'onde comprises entre 360 et 830 nm (environ), il stimule l'organe visuel. Les éléments réceptifs de la rétine qui entrent en jeu sont surtout les cônes en vision photopique (œil adapté à des niveaux de luminance assez élevés), les bâtonnets en vision scotopique (œil adapté à des niveaux de luminance assez faibles) ou une combinaison des cônes et des bâtonnets en vision mésopique (vision intermédiaire entre la vision photopique et la vision scotopique).

1. Grandeurs photométriques

Les grandeurs photométriques les plus importantes [1] sont :

le flux lumineux,
l'intensité lumineuse,
la luminance lumineuse,
l'éclairement lumineux.

Le flux lumineux est la grandeur la plus commode à définir la première en photométrie parce que c'est celle qui présente la relation la plus simple avec le flux énergétique. On peut le définir ainsi :

Le *flux lumineux* ϕ_v est la grandeur dérivée du flux énergétique ϕ_e par l'évaluation du rayonnement d'après son action sur l'observateur de référence photométrique CIE.

La relation donnant ϕ_v est indiquée au point 4 du présent document.

On peut définir les trois autres grandeurs en fonction du flux lumineux et des grandeurs géométriques appropriées.

L'*intensité lumineuse* I_v (d'une source, dans une direction donnée) est le quotient du flux lumineux $d\phi_v$, quittant la source et se propageant dans l'élément d'angle solide $d\Omega$ contenant la direction donnée, par cet élément d'angle solide.

$$I_v = \frac{d\phi_v}{d\Omega}$$

La *luminance lumineuse* L_v (dans une direction donnée, en un point donné d'une surface réelle ou fictive) est définie par la formule :

$$L_v = \frac{d^2\phi_v}{d\Omega \cdot dA \cos \theta}$$

où $d\phi_v$ est le flux lumineux transmis par un faisceau élémentaire passant par le point donné et se propageant dans l'angle solide $d\Omega$ contenant la direction donnée; dA est l'aire d'une section de ce faisceau au point donné; θ est l'angle entre la normale à cette section et la direction du faisceau.

L'*éclairage lumineux* E_v (en un point d'une surface) est le quotient du flux lumineux $d\phi_v$ reçu par un élément de la surface contenant le point, par l'aire dA de cet élément.

$$E_v = \frac{d\phi_v}{dA}$$

2. Unités photométriques

L'unité de base du SI pour la photométrie est la *candela* (cd), unité d'intensité lumineuse. La définition de la candela est la suivante [2] :

La candela est l'intensité lumineuse, dans une direction donnée, d'une source qui émet un rayonnement monochromatique de fréquence 540×10^{12} hertz et dont l'intensité énergétique dans cette direction est 1/683 watt par stéradian.

La définition ci-dessus de la candela s'applique à la vision photopique, scotopique et mésopique.

La fréquence 540×10^{12} Hz correspond à une longueur d'onde de 555,016 nm dans l'air normal [3].

A partir de l'unité de base photométrique du SI, la candela, et des unités des grandeurs géométriques, superficie et angle solide, on peut dériver les unités SI des trois autres grandeurs photométriques, le flux lumineux, la luminance lumineuse et l'éclairage lumineux, définies au point 1 du présent document.

L'unité SI de flux lumineux est la candela stéradian (cd.sr), que l'on appelle généralement le *lumen* (lm).

L'unité SI de luminance lumineuse est la *candela par mètre carré* (cd.m⁻²) ou (lm.sr⁻¹.m⁻²).

L'unité SI d'éclairement lumineux est la candela stéradian par mètre carré (cd.sr.m⁻²) ou (lm.m⁻²). On appelle souvent cette unité le *lux* (lx).

3. Fonctions de pondération de base

La sensibilité de l'organe visuel au flux énergétique de différentes longueurs d'onde est complexe et on ne la connaît pas encore très bien. Toutefois, pour des conditions données de stimulation, on a déterminé de façon expérimentale un certain nombre de fonctions de la longueur d'onde qui constituent des représentations utiles de la sensibilité spectrale relative de l'organe visuel. Ces fonctions servent de fonctions de pondération du flux énergétique spectral stimulant l'organe visuel.

3.1. Fonctions d'efficacité lumineuse relative spectrale

L'efficacité lumineuse relative spectrale (d'un rayonnement monochromatique de longueur d'onde λ) est le rapport du flux énergétique de longueur d'onde λ_m (ou λ'_m pour la vision scotopique) au flux de longueur d'onde λ , les deux rayonnements produisant des sensations lumineuses également intenses dans des conditions photométriques spécifiées et λ_m (ou λ'_m) étant choisi de façon que la valeur maximale de ce rapport soit égale à 1.

Pour la vision photopique, la fonction d'efficacité lumineuse relative spectrale est symbolisée par $V(\lambda)$; ses valeurs figurent au tableau 1. λ_m vaut 555 nm [4].

Pour la vision scotopique, la fonction d'efficacité lumineuse relative spectrale est symbolisée par $V'(\lambda)$; ses valeurs figurent au tableau 2. λ'_m vaut 507 nm [4].

Pour la vision mésopique, il n'existe pour le moment aucune méthode convenue de pondération spectrale, mais la CIE est en train d'étudier ce problème [5].

3.2. Fonctions colorimétriques CIE 1931

Les fonctions colorimétriques CIE 1931 définissent les propriétés d'égalisation de couleur d'un observateur moyen ayant une vision normale des couleurs, pour des champs d'observation en vision centrale d'étendue angulaire comprise entre 1° et 4° (0,017 et 0,07 rad). Ces fonctions colorimétriques sont les composantes trichromatiques de stimulus monochromatiques de même flux énergétique et de longueurs d'onde contenues dans le spectre visible (360 à 830 nm). Elles sont symbolisées par $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ et leurs valeurs figurent au tableau 3 [6].

La fonction $\bar{y}(\lambda)$ est identique à la fonction $V(\lambda)$ donnée au tableau 1.

Tableau I. — Efficacité lumineuse relative spectrale $V(\lambda)$
pour la vision photopique [cônes] (λ dans l'air normal)

Table 1. — Spectral luminous efficiencies $V(\lambda)$ for photopic [cone] vision
(λ in standard air)

λ nm	$V(\lambda)$	λ nm	$V(\lambda)$	λ nm	$V(\lambda)$
360	0.000 003 917 000	410	0.001 210 000	460	0.060 000 00
61	0.000 004 393 581	11	0.001 362 091	61	0.062 601 97
62	0.000 004 929 604	12	0.001 530 752	62	0.065 277 52
63	0.000 005 532 136	13	0.001 720 368	63	0.068 042 08
64	0.000 006 208 245	14	0.001 935 323	64	0.070 911 09
365	0.000 006 965 000	415	0.002 180 000	465	0.073 900 00
66	0.000 007 813 219	16	0.002 454 800	66	0.077 016 00
67	0.000 008 767 336	17	0.002 764 000	67	0.080 266 40
68	0.000 009 839 844	18	0.003 117 800	68	0.083 666 80
69	0.000 011 043 23	19	0.003 526 400	69	0.087 232 80
370	0.000 012 390 00	420	0.004 000 000	470	0.090 980 00
71	0.000 013 886 41	21	0.004 546 240	71	0.094 917 55
72	0.000 015 557 28	22	0.005 159 320	72	0.099 045 84
73	0.000 017 442 96	23	0.005 829 280	73	0.103 367 4
74	0.000 019 583 75	24	0.006 546 160	74	0.107 884 6
375	0.000 022 020 00	425	0.007 300 000	475	0.112 600 0
76	0.000 024 839 65	26	0.008 086 507	76	0.117 532 0
77	0.000 028 041 26	27	0.008 908 720	77	0.122 674 4
78	0.000 031 531 04	28	0.009 767 680	78	0.127 992 8
79	0.000 035 215 21	29	0.010 664 43	79	0.133 452 8
380	0.000 039 000 00	430	0.011 600 00	480	0.139 020 0
81	0.000 042 826 40	31	0.012 573 17	81	0.144 676 4
82	0.000 046 914 60	32	0.013 582 72	82	0.150 469 3
83	0.000 051 589 60	33	0.014 629 68	83	0.156 461 9
84	0.000 057 176 40	34	0.015 715 09	84	0.162 717 7
385	0.000 064 000 00	435	0.016 840 00	485	0.169 300 0
86	0.000 072 344 21	36	0.018 007 36	86	0.176 243 1
87	0.000 082 212 24	37	0.019 214 48	87	0.183 558 1
88	0.000 093 508 16	38	0.020 453 92	88	0.191 273 5
89	0.000 106 136 1	39	0.021 718 24	89	0.199 418 0
390	0.000 120 000 0	440	0.023 000 00	490	0.208 020 0
91	0.000 134 984 0	41	0.024 294 61	91	0.217 119 9
92	0.000 151 492 0	42	0.025 610 24	92	0.226 734 5
93	0.000 170 208 0	43	0.026 958 57	93	0.236 857 1
94	0.000 191 816 0	44	0.028 351 25	94	0.247 481 2
395	0.000 217 000 0	445	0.029 800 00	495	0.258 600 0
96	0.000 246 906 7	46	0.031 310 83	96	0.270 184 9
97	0.000 281 240 0	47	0.032 883 68	97	0.282 293 9
98	0.000 318 520 0	48	0.034 521 12	98	0.295 050 5
99	0.000 357 266 7	49	0.036 225 71	99	0.308 578 0
400	0.000 396 000 0	450	0.038 000 00	500	0.323 000 0
01	0.000 433 714 7	51	0.039 846 67	01	0.338 402 1
02	0.000 473 024 0	52	0.041 768 00	02	0.354 685 8
03	0.000 517 876 0	53	0.043 766 00	03	0.371 698 6
04	0.000 572 218 7	54	0.045 842 67	04	0.389 287 5
405	0.000 640 000 0	455	0.048 000 00	505	0.407 300 0
06	0.000 724 560 0	56	0.050 243 68	06	0.425 629 9
07	0.000 825 500 0	57	0.052 573 04	07	0.444 309 6
08	0.000 941 160 0	58	0.054 980 56	08	0.463 394 4
09	0.001 069 880	59	0.057 458 72	09	0.482 939 5

λ nm	$V(\lambda)$	λ nm	$V(\lambda)$	λ nm	$V(\lambda)$	λ nm	$V(\lambda)$
510	0.503 000 0	560	0.995 000 0	610	0.503 000 0	655	0.081 600 00
11	0.523 569 3	61	0.992 600 5	11	0.490 468 8	56	0.077 120 64
12	0.544 512 0	62	0.989 742 6	12	0.478 030 4	57	0.072 825 52
13	0.565 690 0	63	0.986 444 4	13	0.465 677 6	58	0.068 710 08
14	0.586 965 3	64	0.982 724 1	14	0.453 403 2	59	0.064 769 76
515	0.608 200 0	565	0.978 600 0	615	0.441 200 0	660	0.061 000 00
16	0.629 345 6	66	0.974 083 7	16	0.429 080 0	61	0.057 396 21
17	0.650 306 8	67	0.969 171 2	17	0.417 036 0	62	0.053 955 04
18	0.670 875 2	68	0.963 856 8	18	0.405 032 0	63	0.050 673 76
19	0.690 842 4	69	0.958 134 9	19	0.393 032 0	64	0.047 549 65
520	0.710 000 0	570	0.952 000 0	620	0.381 000 0	665	0.044 580 00
21	0.728 185 2	71	0.945 450 4	21	0.368 918 4	66	0.041 758 72
22	0.745 463 6	72	0.938 499 2	22	0.356 827 2	67	0.039 084 96
23	0.761 969 4	73	0.931 162 8	23	0.344 776 8	68	0.036 563 84
24	0.777 836 8	74	0.923 457 6	24	0.332 817 6	69	0.034 200 48
525	0.793 200 0	575	0.915 400 0	625	0.321 000 0	670	0.032 000 00
26	0.808 110 4	76	0.907 006 4	26	0.309 338 1	71	0.029 962 61
27	0.822 496 2	77	0.898 277 2	27	0.297 850 4	72	0.028 076 64
28	0.836 306 8	78	0.889 204 8	28	0.286 593 6	73	0.026 329 36
29	0.849 491 6	79	0.879 781 6	29	0.275 624 5	74	0.024 708 05
530	0.862 000 0	580	0.870 000 0	630	0.265 000 0	675	0.023 200 00
31	0.873 810 8	81	0.859 861 3	31	0.254 763 2	76	0.021 800 77
32	0.884 962 4	82	0.849 392 0	32	0.244 889 6	77	0.020 501 12
33	0.895 493 6	83	0.838 622 0	33	0.235 334 4	78	0.019 281 08
34	0.905 443 2	84	0.827 581 3	34	0.226 052 8	79	0.018 120 69
535	0.914 850 1	585	0.816 300 0	635	0.217 000 0	680	0.017 000 00
36	0.923 734 8	86	0.804 794 7	36	0.208 161 6	81	0.015 903 79
37	0.932 092 4	87	0.793 082 0	37	0.199 548 8	82	0.014 837 18
38	0.939 922 6	88	0.781 192 0	38	0.191 155 2	83	0.013 810 68
39	0.947 225 2	89	0.769 154 7	39	0.182 974 4	84	0.012 834 78
540	0.954 000 0	590	0.757 000 0	640	0.175 000 0	685	0.011 920 00
41	0.960 256 1	91	0.744 754 1	41	0.167 223 5	86	0.011 068 31
42	0.966 007 4	92	0.732 422 4	42	0.159 646 4	87	0.010 273 39
43	0.971 260 6	93	0.720 003 6	43	0.152 277 6	88	0.009 533 311
44	0.976 022 5	94	0.707 496 5	44	0.145 125 9	89	0.008 846 157
545	0.980 300 0	595	0.694 900 0	645	0.138 200 0	690	0.008 210 000
46	0.984 092 4	96	0.682 219 2	46	0.131 500 3	91	0.007 623 781
47	0.987 418 2	97	0.669 471 6	47	0.125 024 8	92	0.007 085 424
48	0.990 312 8	98	0.656 674 4	48	0.118 779 2	93	0.006 591 476
49	0.992 811 6	99	0.643 844 8	49	0.112 769 1	94	0.006 138 485
550	0.994 950 1	600	0.631 000 0	646	0.107 000 0	695	0.005 723 000
51	0.996 710 8	01	0.618 155 5	647	0.101 476 2	96	0.005 343 059
52	0.998 098 3	02	0.605 314 4	648	0.096 188 64	97	0.004 995 796
53	0.999 112 0	03	0.592 475 6	649	0.091 122 96	98	0.004 676 404
54	0.999 748 2	04	0.579 637 9	650	0.086 264 85	99	0.004 380 075
555	1.000 000 0	605	0.566 800 0	51	0.101 476 2	700	0.004 102 000
56	0.999 856 7	06	0.553 961 1	52	0.096 188 64	01	0.003 838 453
57	0.999 304 6	07	0.541 137 2	53	0.091 122 96	02	0.003 589 099
58	0.998 325 5	08	0.528 352 8	54	0.086 264 85	03	0.003 354 219
59	0.996 898 7	09	0.515 632 3			04	0.003 134 093

λ nm	$V(\lambda)$	λ nm	$V(\lambda)$	λ nm	$V(\lambda)$
705	0.002 929 000	755	0.000 084 800 00	805	0.000 002 607 800
06	0.002 738 139	56	0.000 079 146 67	06	0.000 002 431 220
07	0.002 559 876	57	0.000 073 858 00	07	0.000 002 266 531
08	0.002 393 244	58	0.000 068 916 00	08	0.000 002 113 013
09	0.002 237 275	59	0.000 064 302 67	09	0.000 001 969 943
710	0.002 091 000	760	0.000 060 000 00	810	0.000 001 836 600
11	0.001 953 587	61	0.000 055 981 87	11	0.000 001 712 230
12	0.001 824 580	62	0.000 052 225 60	12	0.000 001 596 228
13	0.001 703 580	63	0.000 048 718 40	13	0.000 001 488 090
14	0.001 590 187	64	0.000 045 447 47	14	0.000 001 387 314
715	0.001 484 000	765	0.000 042 400 00	815	0.000 001 293 400
16	0.001 384 496	66	0.000 039 561 04	16	0.000 001 205 820
17	0.001 291 268	67	0.000 036 915 12	17	0.000 001 124 143
18	0.001 204 092	68	0.000 034 448 68	18	0.000 001 048 009
19	0.001 122 744	69	0.000 032 148 16	19	0.000 000 977 057 8
720	0.001 047 000	770	0.000 030 000 00	820	0.000 000 910 930 0
21	0.000 976 589 6	71	0.000 027 991 25	21	0.000 000 849 251 3
22	0.000 911 108 8	72	0.000 026 113 56	22	0.000 000 791 721 2
23	0.000 850 133 2	73	0.000 024 360 24	23	0.000 000 738 090 4
24	0.000 793 238 4	74	0.000 022 724 61	24	0.000 000 688 109 8
725	0.000 740 000 0	775	0.000 021 200 00	825	0.000 000 641 530 0
26	0.000 690 082 7	76	0.000 019 778 55	26	0.000 000 598 089 5
27	0.000 643 310 0	77	0.000 018 452 85	27	0.000 000 557 574 6
28	0.000 599 496 0	78	0.000 017 216 87	28	0.000 000 519 808 0
29	0.000 558 454 7	79	0.000 016 064 59	29	0.000 000 484 612 3
730	0.000 520 000 0	780	0.000 014 990 00	830	0.000 000 451 810 0
31	0.000 483 913 6	81	0.000 013 987 28		
32	0.000 450 052 8	82	0.000 013 051 55		
33	0.000 418 345 2	83	0.000 012 178 18		
34	0.000 388 718 4	84	0.000 011 362 54		
735	0.000 361 100 0	785	0.000 010 600 00		
36	0.000 335 383 5	86	0.000 009 885 877		
37	0.000 311 440 4	87	0.000 009 217 304		
38	0.000 289 165 6	88	0.000 008 592 362		
39	0.000 268 453 9	89	0.000 008 009 133		
740	0.000 249 200 0	790	0.000 007 465 700		
41	0.000 231 301 9	91	0.000 006 959 567		
42	0.000 214 685 6	92	0.000 006 487 995		
43	0.000 199 288 4	93	0.000 006 048 699		
44	0.000 185 047 5	94	0.000 005 639 396		
745	0.000 171 900 0	795	0.000 005 257 800		
46	0.000 159 778 1	96	0.000 004 901 771		
47	0.000 148 604 4	97	0.000 004 569 720		
48	0.000 138 301 6	98	0.000 004 260 194		
49	0.000 128 792 5	99	0.000 003 971 739		
750	0.000 120 000 0	800	0.000 003 702 900		
51	0.000 111 859 5	01	0.000 003 452 163		
52	0.000 104 322 4	02	0.000 003 218 302		
53	0.000 097 335 60	03	0.000 003 000 306		
54	0.000 090 845 87	04	0.000 002 797 139		

Tableau 2. — Efficacité lumineuse relative spectrale $V'(\lambda)$
pour la vision scotopique [bâtonnets] (λ dans l'air normal)

Table 2. — Spectral luminous efficiencies $V'(\lambda)$ for scotopic [rod] vision
(λ in standard air)

λ nm	$V'(\lambda)$	λ nm	$V'(\lambda)$	λ nm	$V'(\lambda)$	λ nm	$V'(\lambda)$
380	0.000 589	430	0.199 8	480	0.793	530	0.811
81	0.000 665	31	0.211 9	81	0.805	31	0.796
82	0.000 752	32	0.224 3	82	0.817	32	0.781
83	0.000 854	33	0.236 9	83	0.828	33	0.765
84	0.000 972	34	0.249 6	84	0.840	34	0.749
385	0.001 108	435	0.262 5	485	0.851	535	0.733
86	0.001 268	36	0.275 5	86	0.862	36	0.717
87	0.001 453	37	0.288 6	87	0.873	37	0.700
88	0.001 668	38	0.301 7	88	0.884	38	0.683
89	0.001 918	39	0.314 9	89	0.894	39	0.667
390	0.002 209	440	0.328 1	490	0.904	540	0.650
91	0.002 547	41	0.341 2	91	0.914	41	0.633
92	0.002 939	42	0.354 3	92	0.923	42	0.616
93	0.003 394	43	0.367 3	93	0.932	43	0.599
94	0.003 921	44	0.380 3	94	0.941	44	0.581
395	0.004 53	445	0.393 1	495	0.949	545	0.564
96	0.005 24	46	0.406	96	0.957	46	0.548
97	0.006 05	47	0.418	97	0.964	47	0.531
98	0.006 98	48	0.431	98	0.970	48	0.514
99	0.008 06	49	0.443	99	0.976	49	0.497
400	0.009 29	450	0.455	500	0.982	550	0.481
01	0.010 70	51	0.467	01	0.986	51	0.465
02	0.012 31	52	0.479	02	0.990	52	0.448
03	0.014 13	53	0.490	03	0.994	53	0.433
04	0.016 19	54	0.502	04	0.997	54	0.417
405	0.018 52	455	0.513	505	0.998	555	0.402
06	0.021 13	56	0.524	06	1.000	56	0.386 4
07	0.024 05	57	0.535	07	1.000	57	0.371 5
08	0.027 30	58	0.546	08	1.000	58	0.356 9
09	0.030 89	59	0.557	09	0.998	59	0.342 7
410	0.034 84	460	0.567	510	0.997	560	0.328 8
11	0.039 16	61	0.578	11	0.994	61	0.315 1
12	0.043 9	62	0.588	12	0.990	62	0.301 8
13	0.049 0	63	0.599	13	0.986	63	0.288 8
14	0.054 5	64	0.610	14	0.981	64	0.276 2
415	0.060 4	465	0.620	515	0.975	565	0.263 9
16	0.066 8	66	0.631	16	0.968	66	0.251 9
17	0.073 6	67	0.642	17	0.961	67	0.240 3
18	0.080 8	68	0.653	18	0.953	68	0.229 1
19	0.088 5	69	0.664	19	0.944	69	0.218 2
420	0.096 6	470	0.676	520	0.935	570	0.207 6
21	0.105 2	71	0.687	21	0.925	71	0.197 4
22	0.114 1	72	0.699	22	0.915	72	-0.187 6
23	0.123 5	73	0.710	23	0.904	73	0.178 2
24	0.133 4	74	0.722	24	0.892	74	0.169 0
425	0.143 6	475	0.734	525	0.880	575	0.160 2
26	0.154 1	76	0.745	26	0.867	76	0.151 7
27	0.165 1	77	0.757	27	0.854	77	0.143 6
28	0.176 4	78	0.769	28	0.840	78	0.135 8
29	0.187 9	79	0.781	29	0.826	79	0.128 4

λ nm	$V'(\lambda)$	λ nm	$V'(\lambda)$	λ nm	$V'(\lambda)$	λ nm	$V'(\lambda)$
580	0.121 2	630	0.003 335	680	0.000 071 5	730	0.000 002 546
81	0.114 3	31	0.003 079	81	0.000 066 6	31	0.000 002 393
82	0.107 8	32	0.002 842	82	0.000 062 0	32	0.000 002 250
83	0.101 5	33	0.002 623	83	0.000 057 8	33	0.000 002 115
84	0.095 6	34	0.002 421	84	0.000 053 8	34	0.000 001 989
585	0.089 9	635	0.002 235	685	0.000 050 1	735	0.000 001 870
86	0.084 5	36	0.002 062	86	0.000 046 7	36	0.000 001 759
87	0.079 3	37	0.001 903	87	0.000 043 6	37	0.000 001 655
88	0.074 5	38	0.001 757	88	0.000 040 6	38	0.000 001 557
89	0.069 9	39	0.001 621	89	0.000 037 89	39	0.000 001 466
590	0.065 5	640	0.001 497	690	0.000 035 33	740	0.000 001 379
91	0.061 3	41	0.001 382	91	0.000 032 95	41	0.000 001 299
92	0.057 4	42	0.001 276	92	0.000 030 75	42	0.000 001 223
93	0.053 7	43	0.001 178	93	0.000 028 70	43	0.000 001 151
94	0.050 2	44	0.001 088	94	0.000 026 79	44	0.000 001 084
595	0.046 9	645	0.001 005	695	0.000 025 01	745	0.000 001 022
96	0.043 8	46	0.000 928	96	0.000 023 36	46	0.000 000 962
97	0.040 9	47	0.000 857	97	0.000 021 82	47	0.000 000 907
98	0.038 16	48	0.000 792	98	0.000 020 38	48	0.000 000 855
99	0.035 58	49	0.000 732	99	0.000 019 05	49	0.000 000 806
600	0.033 15	650	0.000 677	700	0.000 017 80	750	0.000 000 760
01	0.030 87	51	0.000 626	01	0.000 016 64	51	0.000 000 716
02	0.028 74	52	0.000 579	02	0.000 015 56	52	0.000 000 675
03	0.026 74	53	0.000 536	03	0.000 014 54	53	0.000 000 637
04	0.024 87	54	0.000 496	04	0.000 013 60	54	0.000 000 601
605	0.023 12	655	0.000 459	705	0.000 012 73	755	0.000 000 567
06	0.021 47	56	0.000 425	06	0.000 011 91	56	0.000 000 535
07	0.019 94	57	0.000 393 5	07	0.000 011 14	57	0.000 000 505
08	0.018 51	58	0.000 364 5	08	0.000 010 43	58	0.000 000 477
09	0.017 18	59	0.000 337 7	09	0.000 009 76	59	0.000 000 450
610	0.015 93	660	0.000 312 9	710	0.000 009 14	760	0.000 000 425
11	0.014 77	61	0.000 290 1	11	0.000 008 56	61	0.000 000 401
12	0.013 69	62	0.000 268 9	12	0.000 008 02	62	0.000 000 379 0
13	0.012 69	63	0.000 249 3	13	0.000 007 51	63	0.000 000 358 0
14	0.011 75	64	0.000 231 3	14	0.000 007 04	64	0.000 000 338 2
615	0.010 88	665	0.000 214 6	715	0.000 006 60	765	0.000 000 319 6
16	0.010 07	66	0.000 199 1	16	0.000 006 18	66	0.000 000 302 1
17	0.009 32	67	0.000 184 8	17	0.000 005 80	67	0.000 000 285 5
18	0.008 62	68	0.000 171 6	18	0.000 005 44	68	0.000 000 269 9
19	0.007 97	69	0.000 159 3	19	0.000 005 10	69	0.000 000 255 2
620	0.007 37	670	0.000 148 0	720	0.000 004 78	770	0.000 000 241 3
21	0.006 82	71	0.000 137 5	21	0.000 004 49	71	0.000 000 228 2
22	0.006 30	72	0.000 127 7	22	0.000 004 21	72	0.000 000 215 9
23	0.005 82	73	0.000 118 7	23	0.000 004 04	73	0.000 000 204 2
24	0.005 38	74	0.000 110 4	24	0.000 003 951	74	0.000 000 193 2
625	0.004 97	675	0.000 102 6	725	0.000 003 82	775	0.000 000 182 9
26	0.004 59	76	0.000 095 4	26	0.000 003 70	76	0.000 000 173 1
27	0.004 24	77	0.000 088 8	27	0.000 003 070	77	0.000 000 163 8
28	0.003 913	78	0.000 082 6	28	0.000 002 884	78	0.000 000 155 1
29	0.003 613	79	0.000 076 9	29	0.000 002 710	79	0.000 000 146 8
						80	0.000 000 139 0

Tableau 3. — Fonctions colorimétriques CIE 1931
et coordonnées trichromatiques (λ dans l'air normal)

Table 3. — CIE 1931 color-matching functions and chromaticity coordinates
(λ in standard air)

λ nm	Fonctions colorimétriques <i>Color-matching functions</i>			Coordonnées trichromatiques <i>Chromaticity coordinates</i>		
	$\bar{x}(\lambda)$	$\bar{y}(\lambda)$	$\bar{z}(\lambda)$	$x(\lambda)$	$y(\lambda)$	$z(\lambda)$
360	0.000 129 900 0	0.000 003 917 000	0.000 606 100 0	0.175 56	0.005 29	0.819 15
61	0.000 145 847 0	0.000 004 393 581	0.000 680 879 2	0.175 48	0.005 29	0.819 23
62	0.000 163 802 1	0.000 004 929 604	0.000 765 145 6	0.175 40	0.005 28	0.819 32
63	0.000 184 003 7	0.000 005 532 136	0.000 860 012 4	0.175 32	0.005 27	0.819 41
64	0.000 206 690 2	0.000 006 208 245	0.000 966 592 8	0.175 24	0.005 26	0.819 50
365	0.000 232 100 0	0.000 006 965 000	0.001 086 000	0.175 16	0.005 26	0.819 58
66	0.000 260 728 0	0.000 007 813 219	0.001 220 586	0.175 09	0.005 25	0.819 66
67	0.000 293 075 0	0.000 008 767 336	0.001 372 729	0.175 01	0.005 24	0.819 75
68	0.000 329 388 0	0.000 009 839 844	0.001 543 579	0.174 94	0.005 23	0.819 83
69	0.000 369 914 0	0.000 011 043 23	0.001 734 286	0.174 88	0.005 22	0.819 90
370	0.000 414 900 0	0.000 012 390 00	0.001 946 000	0.174 82	0.005 22	0.819 96
71	0.000 464 158 7	0.000 013 886 41	0.002 177 777	0.174 77	0.005 23	0.820 00
72	0.000 518 986 0	0.000 015 557 28	0.002 435 809	0.174 72	0.005 24	0.820 04
73	0.000 581 854 0	0.000 017 442 96	0.002 731 953	0.174 66	0.005 24	0.820 10
74	0.000 655 234 7	0.000 019 583 75	0.003 078 064	0.174 59	0.005 22	0.820 19
375	0.000 741 600 0	0.000 022 020 00	0.003 486 000	0.174 51	0.005 18	0.820 31
76	0.000 845 029 6	0.000 024 839 65	0.003 975 227	0.174 41	0.005 13	0.820 46
77	0.000 964 526 8	0.000 028 041 26	0.004 540 880	0.174 31	0.005 07	0.820 62
78	0.001 094 949	0.000 031 531 04	0.005 158 320	0.174 22	0.005 02	0.820 76
79	0.001 231 154	0.000 035 215 21	0.005 802 907	0.174 16	0.004 98	0.820 86
380	0.001 368 000	0.000 039 000 00	0.006 450 001	0.174 11	0.004 96	0.820 93
81	0.001 502 050	0.000 042 826 40	0.007 083 216	0.174 09	0.004 96	0.820 95
82	0.001 642 328	0.000 046 914 60	0.007 745 488	0.174 07	0.004 97	0.820 96
83	0.001 802 382	0.000 051 589 60	0.008 501 152	0.174 06	0.004 98	0.820 96
84	0.001 995 757	0.000 057 176 40	0.009 414 544	0.174 04	0.004 98	0.820 98
385	0.002 236 000	0.000 064 000 00	0.010 549 99	0.174 01	0.004 98	0.821 01
86	0.002 535 385	0.000 072 344 21	0.011 965 80	0.173 97	0.004 97	0.821 06
87	0.002 892 603	0.000 082 212 24	0.013 655 87	0.173 93	0.004 94	0.821 13
88	0.003 300 829	0.000 093 508 16	0.015 588 05	0.173 89	0.004 93	0.821 18
89	0.003 753 236	0.000 106 136 1	0.017 730 15	0.173 84	0.004 92	0.821 24
390	0.004 243 000	0.000 120 000 0	0.020 050 01	0.173 80	0.004 92	0.821 28
91	0.004 762 389	0.000 134 984 0	0.022 511 36	0.173 76	0.004 92	0.821 32
92	0.005 330 048	0.000 151 492 0	0.025 202 88	0.173 70	0.004 94	0.821 36
93	0.005 978 712	0.000 170 208 0	0.028 279 72	0.173 66	0.004 94	0.821 40
94	0.006 741 117	0.000 191 816 0	0.031 897 04	0.173 61	0.004 94	0.821 45
395	0.007 650 000	0.000 217 000 0	0.036 210 00	0.173 56	0.004 92	0.821 52
96	0.008 751 373	0.000 246 906 7	0.041 437 71	0.173 51	0.004 90	0.821 59
97	0.010 028 88	0.000 281 240 0	0.047 503 72	0.173 47	0.004 86	0.821 67
98	0.011 421 70	0.000 318 520 0	0.054 119 88	0.173 42	0.004 84	0.821 74
99	0.012 869 01	0.000 357 266 7	0.060 998 03	0.173 38	0.004 81	0.821 81
400	0.014 310 00	0.000 396 000 0	0.067 850 01	0.173 34	0.004 80	0.821 86
01	0.015 704 43	0.000 433 714 7	0.074 486 32	0.173 29	0.004 79	0.821 92
02	0.017 147 44	0.000 473 024 0	0.081 361 56	0.173 24	0.004 78	0.821 98
03	0.018 781 22	0.000 517 876 0	0.089 153 64	0.173 17	0.004 78	0.822 05
04	0.020 748 01	0.000 572 218 7	0.098 540 48	0.173 10	0.004 77	0.822 13
405	0.023 190 00	0.000 640 000 0	0.110 200 0	0.173 02	0.004 78	0.822 20
06	0.026 207 36	0.000 724 560 0	0.124 613 3	0.172 93	0.004 78	0.822 29
07	0.029 782 48	0.000 825 500 0	0.141 701 7	0.172 84	0.004 79	0.822 37
08	0.033 880 92	0.000 941 160 0	0.161 303 5	0.172 75	0.004 80	0.822 45
09	0.038 468 24	0.001 069 880	0.183 256 8	0.172 66	0.004 80	0.822 54

λ nm	Fonctions colorimétriques <i>Color-matching functions</i>			Coordonnées trichromatiques <i>Chromaticity coordinates</i>		
	$\bar{x}(\lambda)$	$\bar{y}(\lambda)$	$\bar{z}(\lambda)$	$x(\lambda)$	$y(\lambda)$	$z(\lambda)$
410	0.043 510 00	0.001 210 000	0.207 400 0	0.172 58	0.004 80	0.822 62
11	0.048 995 60	0.001 362 091	0.233 692 1	0.172 49	0.004 80	0.822 71
12	0.055 022 60	0.001 530 752	0.262 611 4	0.172 39	0.004 80	0.822 81
13	0.061 718 80	0.001 720 368	0.294 774 6	0.172 30	0.004 80	0.822 90
14	0.069 212 00	0.001 935 323	0.330 798 5	0.172 19	0.004 82	0.822 99
415	0.077 630 00	0.002 180 000	0.371 300 0	0.172 09	0.004 83	0.823 08
16	0.086 958 11	0.002 454 800	0.416 209 1	0.171 98	0.004 86	0.823 16
17	0.097 176 72	0.002 764 000	0.465 464 2	0.171 87	0.004 89	0.823 24
18	0.108 406 3	0.003 117 800	0.519 694 8	0.171 74	0.004 94	0.823 32
19	0.120 767 2	0.003 526 400	0.579 530 3	0.171 59	0.005 01	0.823 40
420	0.134 380 0	0.004 000 000	0.645 600 0	0.171 41	0.005 10	0.823 49
21	0.149 358 2	0.004 546 240	0.718 483 8	0.171 21	0.005 21	0.823 58
22	0.165 395 7	0.005 159 320	0.796 713 3	0.170 99	0.005 33	0.823 68
23	0.181 983 1	0.005 829 280	0.877 845 9	0.170 77	0.005 47	0.823 76
24	0.198 611 0	0.006 546 160	0.959 439 0	0.170 54	0.005 62	0.823 84
425	0.214 770 0	0.007 300 000	1.039 050 1	0.170 30	0.005 79	0.823 91
26	0.230 186 8	0.008 086 507	1.115 367 3	0.170 05	0.005 97	0.823 98
27	0.244 879 7	0.008 908 720	1.188 497 1	0.169 78	0.006 18	0.824 04
28	0.258 777 3	0.009 767 680	1.258 123 3	0.169 50	0.006 40	0.824 10
29	0.271 807 9	0.010 664 43	1.323 929 6	0.169 20	0.006 64	0.824 16
430	0.283 900 0	0.011 600 00	1.385 600 0	0.168 88	0.006 90	0.824 22
31	0.294 943 8	0.012 573 17	1.442 635 2	0.168 53	0.007 18	0.824 29
32	0.304 896 5	0.013 582 72	1.494 803 5	0.168 15	0.007 49	0.824 36
33	0.313 787 3	0.014 629 68	1.542 190 3	0.167 75	0.007 82	0.824 43
34	0.321 645 4	0.015 715 09	1.584 880 7	0.167 33	0.008 17	0.824 50
435	0.328 500 0	0.016 840 00	1.622 960 0	0.166 90	0.008 55	0.824 55
36	0.334 351 3	0.018 007 36	1.656 404 8	0.166 45	0.008 96	0.824 59
37	0.339 210 1	0.019 214 48	1.685 295 9	0.165 98	0.009 40	0.824 62
38	0.343 121 3	0.020 453 92	1.709 874 5	0.165 48	0.009 87	0.824 65
39	0.346 129 6	0.021 718 24	1.730 382 1	0.164 96	0.010 35	0.824 69
440	0.348 280 0	0.023 000 00	1.747 060 0	0.164 41	0.010 86	0.824 73
41	0.349 599 9	0.024 294 61	1.760 044 6	0.163 83	0.011 38	0.824 79
42	0.350 147 4	0.025 610 24	1.769 623 3	0.163 21	0.011 94	0.824 85
43	0.350 013 0	0.026 958 57	1.776 263 7	0.162 55	0.012 52	0.824 93
44	0.349 287 0	0.028 351 25	1.780 433 4	0.161 85	0.013 14	0.825 01
445	0.348 060 0	0.029 800 00	1.782 600 0	0.161 11	0.013 79	0.825 10
46	0.346 373 3	0.031 310 83	1.782 968 2	0.160 31	0.014 49	0.825 20
47	0.344 262 4	0.032 883 68	1.781 699 8	0.159 47	0.015 23	0.825 30
48	0.341 808 8	0.034 521 12	1.779 198 2	0.158 57	0.016 02	0.825 41
49	0.339 094 1	0.036 225 71	1.775 867 1	0.157 63	0.016 84	0.825 53
450	0.336 200 0	0.038 000 00	1.772 110 0	0.156 64	0.017 71	0.825 65
51	0.333 197 7	0.039 846 67	1.768 258 9	0.155 60	0.018 61	0.825 79
52	0.330 041 1	0.041 768 00	1.764 039 0	0.154 52	0.019 56	0.825 92
53	0.326 635 7	0.043 766 00	1.758 943 8	0.153 40	0.020 55	0.826 05
54	0.322 886 8	0.045 842 67	1.752 466 3	0.152 22	0.021 61	0.826 17
455	0.318 700 0	0.048 000 00	1.744 100 0	0.150 99	0.022 74	0.826 27
56	0.314 025 1	0.050 243 68	1.733 559 5	0.149 69	0.023 95	0.826 36
57	0.308 884 0	0.052 573 04	1.720 858 1	0.148 34	0.025 25	0.826 41
58	0.303 290 4	0.054 980 56	1.705 936 9	0.146 93	0.026 63	0.826 44
59	0.297 257 9	0.057 458 72	1.688 737 2	0.145 47	0.028 12	0.826 41

λ nm	Fonctions colorimétriques <i>Color-matching functions</i>			Coordonnées trichromatiques <i>Chromaticity coordinates</i>		
	$\bar{x}(\lambda)$	$\bar{y}(\lambda)$	$\bar{z}(\lambda)$	$x(\lambda)$	$y(\lambda)$	$z(\lambda)$
460	0.290 800 0	0.060 000 00	1.669 200 0	0.143 96	0.029 70	0.826 34
61	0.283 970 1	0.062 601 97	1.647 528 7	0.142 41	0.031 39	0.826 20
62	0.276 721 4	0.065 277 52	1.623 412 7	0.140 80	0.033 21	0.825 99
63	0.268 917 8	0.068 042 08	1.596 022 3	0.139 12	0.035 20	0.825 68
64	0.260 422 7	0.070 911 09	1.564 528 0	0.137 37	0.037 40	0.825 23
465	0.251 100 0	0.073 900 00	1.528 100 0	0.135 50	0.039 88	0.824 62
66	0.240 847 5	0.077 116 00	1.486 111 4	0.133 51	0.042 69	0.823 80
67	0.229 851 2	0.080 266 40	1.439 521 5	0.131 37	0.045 88	0.822 75
68	0.218 407 2	0.083 666 80	1.389 879 9	0.129 09	0.049 45	0.821 46
69	0.206 811 5	0.087 232 80	1.338 736 2	0.126 66	0.053 43	0.819 91
470	0.195 360 0	0.090 980 00	1.287 640 0	0.124 12	0.057 80	0.818 08
71	0.184 213 6	0.094 917 55	1.237 422 3	0.121 47	0.062 59	0.815 94
72	0.173 327 3	0.099 045 84	1.187 824 3	0.118 70	0.067 83	0.813 47
73	0.162 688 1	0.103 367 4	1.138 761 1	0.115 81	0.073 58	0.810 61
74	0.152 283 3	0.107 884 6	1.090 148 0	0.112 78	0.079 89	0.807 33
475	0.142 100 0	0.112 600 0	1.041 900 0	0.109 60	0.086 84	0.803 56
76	0.132 178 6	0.117 532 0	0.994 197 6	0.106 26	0.094 49	0.799 25
77	0.122 569 6	0.122 674 4	0.947 347 3	0.102 78	0.102 86	0.794 36
78	0.113 275 2	0.127 992 8	0.901 453 1	0.099 13	0.112 01	0.788 86
79	0.104 297 9	0.133 452 8	0.856 619 3	0.095 31	0.121 94	0.782 75
480	0.095 640 00	0.139 020 0	0.812 950 1	0.091 29	0.132 70	0.776 01
81	0.087 299 55	0.144 676 4	0.770 517 3	0.087 08	0.144 32	0.768 60
82	0.079 308 04	0.150 469 3	0.729 444 8	0.082 68	0.156 87	0.760 45
83	0.071 717 76	0.156 461 9	0.689 913 6	0.078 12	0.170 42	0.751 46
84	0.064 580 99	0.162 717 7	0.652 104 9	0.073 44	0.185 03	0.741 53
485	0.057 950 01	0.169 300 0	0.616 200 0	0.068 71	0.200 72	0.730 57
86	0.051 862 11	0.176 243 1	0.582 328 6	0.063 99	0.217 47	0.718 54
87	0.046 281 52	0.183 558 1	0.550 416 2	0.059 32	0.235 25	0.705 43
88	0.041 150 88	0.191 273 5	0.520 337 6	0.054 67	0.254 09	0.691 24
89	0.036 412 83	0.199 418 0	0.491 967 3	0.050 03	0.274 00	0.675 97
490	0.032 010 00	0.208 020 0	0.465 180 0	0.045 39	0.294 98	0.659 63
91	0.027 917 20	0.217 119 9	0.439 924 6	0.040 76	0.316 98	0.642 26
92	0.024 144 40	0.226 734 5	0.416 183 6	0.036 20	0.339 90	0.623 90
93	0.020 687 00	0.236 857 1	0.393 882 2	0.031 76	0.363 60	0.604 64
94	0.017 540 40	0.247 481 2	0.372 945 9	0.027 49	0.387 92	0.584 59
495	0.014 700 00	0.258 600 0	0.353 300 0	0.023 46	0.412 70	0.563 84
96	0.012 161 79	0.270 184 9	0.334 857 8	0.019 70	0.437 76	0.542 54
97	0.009 919 960	0.282 293 9	0.317 552 1	0.016 27	0.462 95	0.520 78
98	0.007 967 240	0.295 050 5	0.301 337 5	0.013 18	0.488 21	0.498 61
99	0.006 296 346	0.308 578 0	0.286 168 6	0.010 48	0.513 40	0.476 12
500	0.004 900 000	0.323 000 0	0.272 000 0	0.008 17	0.538 42	0.453 41
01	0.003 777 173	0.338 402 1	0.258 817 1	0.006 28	0.563 07	0.430 65
02	0.002 945 320	0.354 685 8	0.246 483 8	0.004 87	0.587 12	0.408 01
03	0.002 424 880	0.371 698 6	0.234 771 8	0.003 98	0.610 45	0.385 57
04	0.002 236 293	0.389 287 5	0.223 453 3	0.003 64	0.633 01	0.363 35
505	0.002 400 000	0.407 300 0	0.212 300 0	0.003 86	0.654 82	0.341 32
06	0.002 925 520	0.425 629 9	0.201 169 2	0.004 64	0.675 90	0.319 46
07	0.003 836 560	0.444 309 6	0.190 119 6	0.006 01	0.696 12	0.297 87
08	0.005 174 840	0.463 394 4	0.179 225 4	0.007 99	0.715 34	0.276 67
09	0.006 982 080	0.482 939 5	0.168 560 8	0.010 60	0.733 41	0.255 99

λ nm	Fonctions colorimétriques <i>Color-matching functions</i>			Coordonnées trichromatiques <i>Chromaticity coordinates</i>		
	$\bar{x}(\lambda)$	$\bar{y}(\lambda)$	$\bar{z}(\lambda)$	$x(\lambda)$	$y(\lambda)$	$z(\lambda)$
510	0.009 300 000	0.503 000 0	0.158 200 0	0.013 87	0.750 19	0.235 94
11	0.012 149 49	0.523 569 3	0.148 138 3	0.017 77	0.765 61	0.216 62
12	0.015 535 88	0.544 512 0	0.138 375 8	0.022 24	0.779 63	0.198 13
13	0.019 477 52	0.565 690 0	0.128 994 2	0.027 27	0.792 11	0.180 62
14	0.023 992 77	0.586 965 3	0.120 975 1	0.032 82	0.802 93	0.164 25
515	0.029 100 00	0.608 200 0	0.111 700 0	0.038 85	0.812 02	0.149 13
16	0.034 814 85	0.629 345 6	0.103 904 8	0.045 33	0.819 39	0.135 28
17	0.041 120 16	0.650 306 8	0.096 667 48	0.052 18	0.825 16	0.122 66
18	0.047 985 04	0.670 875 2	0.089 982 72	0.059 32	0.829 43	0.111 25
19	0.055 378 61	0.690 842 4	0.083 845 31	0.066 72	0.832 27	0.101 01
520	0.063 270 00	0.710 000 0	0.078 249 99	0.074 30	0.833 80	0.091 90
21	0.071 635 01	0.728 185 2	0.073 208 99	0.082 05	0.834 09	0.083 86
22	0.080 462 24	0.745 463 6	0.068 678 16	0.089 94	0.833 29	0.076 77
23	0.089 739 96	0.761 969 4	0.064 567 84	0.097 94	0.831 59	0.070 47
24	0.099 456 45	0.777 836 8	0.060 788 35	0.106 02	0.829 18	0.064 80
525	0.109 600 0	0.793 200 0	0.057 250 01	0.114 16	0.826 21	0.059 63
26	0.120 167 4	0.808 110 4	0.053 904 35	0.122 35	0.822 77	0.054 88
27	0.131 114 5	0.822 496 2	0.050 746 64	0.130 55	0.818 93	0.050 52
28	0.142 367 9	0.836 306 8	0.047 752 76	0.138 70	0.814 78	0.046 52
29	0.153 854 2	0.849 491 6	0.044 898 59	0.146 77	0.810 40	0.042 83
530	0.165 500 0	0.862 000 0	0.042 160 00	0.154 72	0.805 86	0.039 42
31	0.177 257 1	0.873 810 8	0.039 507 28	0.162 53	0.801 24	0.036 23
32	0.189 140 0	0.884 962 4	0.036 935 64	0.170 24	0.796 52	0.033 24
33	0.201 169 4	0.895 493 6	0.034 458 36	0.177 85	0.791 69	0.030 46
34	0.213 365 8	0.905 443 2	0.032 088 72	0.185 39	0.786 73	0.027 88
535	0.225 749 9	0.914 850 1	0.029 840 00	0.192 88	0.781 63	0.025 49
36	0.238 320 9	0.923 734 8	0.027 711 81	0.200 31	0.776 40	0.023 29
37	0.251 066 8	0.932 092 4	0.025 694 44	0.207 69	0.771 05	0.021 26
38	0.263 992 2	0.939 922 6	0.023 787 16	0.215 03	0.765 59	0.019 38
39	0.277 101 7	0.947 225 2	0.021 989 25	0.222 34	0.760 02	0.017 64
540	0.290 400 0	0.954 000 0	0.020 300 00	0.229 62	0.754 33	0.016 05
41	0.303 891 2	0.960 256 1	0.018 718 05	0.236 89	0.748 52	0.014 59
42	0.317 572 6	0.966 007 4	0.017 240 36	0.244 13	0.742 62	0.013 25
43	0.331 438 4	0.971 260 6	0.015 863 64	0.251 36	0.736 61	0.012 03
44	0.345 482 8	0.976 022 5	0.014 584 61	0.258 58	0.730 51	0.010 91
545	0.359 700 0	0.980 300 0	0.013 400 00	0.265 78	0.724 32	0.009 90
46	0.374 083 9	0.984 092 4	0.012 307 23	0.272 96	0.718 06	0.008 98
47	0.388 639 6	0.987 418 2	0.011 301 88	0.280 13	0.711 72	0.008 15
48	0.403 378 4	0.990 312 8	0.010 377 92	0.287 29	0.705 32	0.007 39
49	0.418 311 5	0.992 811 6	0.009 529 306	0.294 45	0.698 84	0.006 71
550	0.433 449 9	0.994 950 1	0.008 749 999	0.301 60	0.692 31	0.006 09
51	0.448 795 3	0.996 710 8	0.008 035 200	0.308 76	0.685 71	0.005 53
52	0.464 336 0	0.998 098 3	0.007 381 600	0.315 92	0.679 06	0.005 02
53	0.480 064 0	0.999 112 0	0.006 785 400	0.323 06	0.672 37	0.004 57
54	0.495 971 3	0.999 748 2	0.006 242 800	0.330 21	0.665 63	0.004 16
555	0.512 050 1	1.000 000 0	0.005 749 999	0.337 36	0.658 85	0.003 79
56	0.528 295 9	0.999 856 7	0.005 303 600	0.344 51	0.652 03	0.003 46
57	0.544 691 6	0.999 304 6	0.004 899 800	0.351 67	0.645 17	0.003 16
58	0.561 209 4	0.998 325 5	0.004 534 200	0.358 81	0.638 29	0.002 90
59	0.577 821 5	0.996 898 7	0.004 202 400	0.365 96	0.631 38	0.002 66

λ nm	Fonctions colorimétriques <i>Color-matching functions</i>			Coordonnées trichromatiques <i>Chromaticity coordinates</i>		
	$\bar{x}(\lambda)$	$\bar{y}(\lambda)$	$\bar{z}(\lambda)$	$x(\lambda)$	$y(\lambda)$	$z(\lambda)$
560	0.594 500 0	0.995 000 0	0.003 900 000	0.373 10	0.624 45	0.002 45
61	0.611 220 9	0.992 600 5	0.003 623 200	0.380 24	0.617 50	0.002 26
62	0.627 975 8	0.989 742 6	0.003 370 600	0.387 38	0.610 54	0.002 08
63	0.644 760 2	0.986 444 4	0.003 141 400	0.394 51	0.603 57	0.001 92
64	0.661 569 7	0.982 724 1	0.002 934 800	0.401 63	0.596 59	0.001 78
565	0.678 400 0	0.978 600 0	0.002 749 999	0.408 73	0.589 61	0.001 66
66	0.695 239 2	0.974 083 7	0.002 585 200	0.415 83	0.582 62	0.001 55
67	0.712 058 6	0.969 171 2	0.002 438 600	0.422 92	0.575 63	0.001 45
68	0.728 828 4	0.963 856 8	0.002 309 400	0.429 99	0.568 65	0.001 36
69	0.745 518 8	0.958 134 9	0.002 196 800	0.437 04	0.561 67	0.001 29
570	0.762 100 0	0.952 000 0	0.002 100 000	0.444 06	0.554 72	0.001 22
71	0.778 543 2	0.945 450 4	0.002 017 733	0.451 06	0.547 77	0.001 17
72	0.794 825 6	0.938 499 2	0.001 948 200	0.458 04	0.540 84	0.001 12
73	0.810 926 4	0.931 162 8	0.001 889 800	0.464 99	0.533 93	0.001 08
74	0.826 824 8	0.923 457 6	0.001 840 933	0.471 90	0.527 05	0.001 05
575	0.842 500 0	0.915 400 0	0.001 800 000	0.478 78	0.520 20	0.001 02
76	0.857 932 5	0.907 006 4	0.001 766 267	0.485 61	0.513 39	0.001 00
77	0.873 081 6	0.898 277 2	0.001 737 800	0.492 41	0.506 61	0.000 98
78	0.887 894 4	0.889 204 8	0.001 711 200	0.499 15	0.499 89	0.000 96
79	0.902 318 1	0.879 781 6	0.001 683 067	0.505 85	0.493 21	0.000 94
580	0.916 300 0	0.870 000 0	0.001 650 001	0.512 49	0.486 59	0.000 92
81	0.929 799 5	0.859 861 3	0.001 610 133	0.519 07	0.480 03	0.000 90
82	0.942 798 4	0.849 392 0	0.001 564 400	0.525 60	0.473 53	0.000 87
83	0.955 277 6	0.838 622 0	0.001 513 600	0.532 07	0.467 09	0.000 84
84	0.967 217 9	0.827 581 3	0.001 458 533	0.538 46	0.460 73	0.000 81
585	0.978 600 0	0.816 300 0	0.001 400 000	0.544 79	0.454 43	0.000 78
86	0.989 385 6	0.804 794 7	0.001 336 667	0.551 03	0.448 23	0.000 74
87	0.999 548 8	0.793 082 0	0.001 270 000	0.557 19	0.442 10	0.000 71
88	1.009 089 2	0.781 192 0	0.001 205 000	0.563 27	0.436 06	0.000 67
89	1.018 006 4	0.769 154 7	0.001 146 667	0.569 26	0.430 10	0.000 64
590	1.026 300 0	0.757 000 0	0.001 100 000	0.575 15	0.424 23	0.000 62
91	1.033 982 7	0.744 754 1	0.001 068 800	0.580 94	0.418 46	0.000 60
92	1.040 986 0	0.732 422 4	0.001 049 400	0.586 65	0.412 76	0.000 59
93	1.047 188 0	0.720 003 6	0.001 035 600	0.592 22	0.407 19	0.000 59
94	1.052 466 7	0.707 496 5	0.001 021 200	0.597 66	0.401 76	0.000 58
595	1.056 700 0	0.694 900 0	0.001 000 000	0.602 93	0.396 50	0.000 57
96	1.059 794 4	0.682 219 2	0.000 968 640 0	0.608 03	0.391 41	0.000 56
97	1.061 799 2	0.669 471 6	0.000 929 920 0	0.612 98	0.386 48	0.000 54
98	1.062 806 8	0.656 674 4	0.000 886 880 0	0.617 78	0.381 71	0.000 51
99	1.062 909 6	0.643 844 8	0.000 842 560 0	0.622 46	0.377 05	0.000 49
600	1.062 200 0	0.631 000 0	0.000 800 000 0	0.627 04	0.372 49	0.000 47
01	1.060 735 2	0.618 155 5	0.000 760 960 0	0.631 52	0.368 03	0.000 45
02	1.058 443 6	0.605 314 4	0.000 723 680 0	0.635 90	0.363 67	0.000 43
03	1.055 224 4	0.592 475 6	0.000 685 920 0	0.640 16	0.359 43	0.000 41
04	1.050 976 8	0.579 637 9	0.000 645 440 0	0.644 27	0.355 33	0.000 40
605	1.045 600 0	0.566 800 0	0.000 600 000 0	0.648 23	0.351 40	0.000 37
06	1.039 036 9	0.553 961 1	0.000 547 866 7	0.652 03	0.347 63	0.000 34
07	1.031 360 8	0.541 137 2	0.000 491 600 0	0.655 67	0.344 02	0.000 31
08	1.022 666 2	0.528 352 8	0.000 435 400 0	0.659 17	0.340 55	0.000 28
09	1.013 047 7	0.515 632 3	0.000 383 466 7	0.662 53	0.337 22	0.000 25

λ nm	Fonctions colorimétriques <i>Color-matching functions</i>			Coordonnées trichromatiques <i>Chromaticity coordinates</i>		
	$\bar{x}(\lambda)$	$\bar{y}(\lambda)$	$\bar{z}(\lambda)$	$x(\lambda)$	$y(\lambda)$	$z(\lambda)$
610	1.002 600 0	0.503 000 0	0.000 340 000 0	0.665 76	0.334 01	0.000 23
11	0.991 367 5	0.490 468 8	0.000 307 253 3	0.668 87	0.330 92	0.000 21
12	0.979 331 4	0.478 030 4	0.000 283 160 0	0.671 86	0.327 95	0.000 19
13	0.966 491 6	0.465 677 6	0.000 265 440 0	0.674 72	0.325 09	0.000 19
14	0.952 847 9	0.453 403 2	0.000 251 813 3	0.677 46	0.322 36	0.000 18
615	0.938 400 0	0.441 200 0	0.000 240 000 0	0.680 08	0.319 75	0.000 17
16	0.923 194 0	0.429 080 0	0.000 229 546 7	0.682 58	0.317 25	0.000 17
17	0.907 244 0	0.417 036 0	0.000 220 640 0	0.684 97	0.314 86	0.000 17
18	0.890 502 0	0.405 032 0	0.000 211 960 0	0.687 25	0.312 59	0.000 16
19	0.872 920 0	0.393 032 0	0.000 202 186 7	0.689 43	0.310 41	0.000 16
620	0.854 449 9	0.381 000 0	0.000 190 000 0	0.691 51	0.308 34	0.000 15
21	0.835 084 0	0.368 918 4	0.000 174 213 3	0.693 49	0.306 37	0.000 14
22	0.814 946 0	0.356 827 2	0.000 155 640 0	0.695 39	0.304 48	0.000 13
23	0.794 186 0	0.344 776 8	0.000 135 960 0	0.697 21	0.302 67	0.000 12
24	0.772 954 0	0.332 817 6	0.000 116 853 3	0.698 94	0.300 95	0.000 11
625	0.751 400 0	0.321 000 0	0.000 100 000 0	0.700 61	0.299 30	0.000 09
26	0.729 583 6	0.309 338 1	0.000 086 133 33	0.702 19	0.297 73	0.000 08
27	0.707 588 8	0.297 850 4	0.000 074 600 00	0.703 71	0.296 22	0.000 07
28	0.685 602 2	0.286 593 6	0.000 065 000 00	0.705 16	0.294 77	0.000 07
29	0.663 810 4	0.275 624 5	0.000 056 933 33	0.706 56	0.293 38	0.000 06
630	0.642 400 0	0.265 000 0	0.000 049 999 99	0.707 92	0.292 03	0.000 05
31	0.621 514 9	0.254 763 2	0.000 044 160 00	0.709 23	0.290 72	0.000 05
32	0.601 113 8	0.244 889 6	0.000 039 480 00	0.710 50	0.289 45	0.000 05
33	0.581 105 2	0.235 334 4	0.000 035 720 00	0.711 73	0.288 23	0.000 04
34	0.561 397 7	0.226 052 8	0.000 032 640 00	0.712 90	0.287 06	0.000 04
635	0.541 900 0	0.217 000 0	0.000 030 000 00	0.714 03	0.285 93	0.000 04
36	0.522 599 5	0.208 161 6	0.000 027 653 33	0.715 12	0.284 84	0.000 04
37	0.503 546 4	0.199 548 8	0.000 025 560 00	0.716 16	0.283 80	0.000 04
38	0.484 743 6	0.191 155 2	0.000 023 640 00	0.717 16	0.282 81	0.000 03
39	0.466 193 9	0.182 974 4	0.000 021 813 33	0.718 12	0.281 85	0.000 03
640	0.447 900 0	0.175 000 0	0.000 020 000 00	0.719 03	0.280 94	0.000 03
41	0.429 861 3	0.167 223 5	0.000 018 133 33	0.719 91	0.280 06	0.000 03
42	0.412 098 0	0.159 646 4	0.000 016 200 00	0.720 75	0.279 22	0.000 03
43	0.394 644 0	0.152 277 6	0.000 014 200 00	0.721 55	0.278 42	0.000 03
44	0.377 533 3	0.145 125 9	0.000 012 133 33	0.722 32	0.277 66	0.000 02
645	0.360 800 0	0.138 200 0	0.000 010 000 00	0.723 03	0.276 95	0.000 02
46	0.344 456 3	0.131 500 3	0.000 007 733 333	0.723 70	0.276 28	0.000 02
47	0.328 516 8	0.125 024 8	0.000 005 400 000	0.724 33	0.275 66	0.000 01
48	0.313 019 2	0.118 779 2	0.000 003 200 000	0.724 91	0.275 08	0.000 01
49	0.298 001 1	0.112 769 1	0.000 001 333 333	0.725 47	0.274 53	0.000 00
650	0.283 500 0	0.107 000 0	0.000 000 000 000	0.725 99	0.274 01	0.000 00
51	0.269 544 8	0.101 476 2		0.726 49	0.273 51	
52	0.256 118 4	0.096 188 64		0.726 98	0.273 02	
53	0.243 189 6	0.091 122 96		0.727 43	0.272 57	
54	0.230 727 2	0.086 264 85		0.727 86	0.272 14	

λ nm	Fonctions colorimétriques <i>Color-matching functions</i>			Coordonnées trichromatiques <i>Chromaticity coordinates</i>		
	$\bar{x}(\lambda)$	$\bar{y}(\lambda)$	$\bar{z}(\lambda)$	$x(\lambda)$	$y(\lambda)$	$z(\lambda)$
655	0.218 700 0	0.081 600 00	0.000 000 0	0.728 27	0.271 73	0.000 00
56	0.207 097 1'	0.077 120 64		0.728 66	0.271 34	
57	0.195 923 2	0.072 825 52		0.729 02	0.270 98	
58	0.185 170 8	0.068 710 08		0.729 36	0.270 64	
59	0.174 832 3	0.064 769 76		0.729 68	0.270 32	
660	0.164 900 0	0.061 000 00		0.729 97	0.270 03	
61	0.155 366 7	0.057 396 21		0.730 23	0.269 77	
62	0.146 230 0	0.053 955 04		0.730 47	0.269 53	
63	0.137 490 0	0.050 673 76		0.730 69	0.269 31	
64	0.129 146 7	0.047 549 65		0.730 90	0.269 10	
665	0.121 200 0	0.044 580 00		0.731 09	0.268 91	
66	0.113 639 7	0.041 758 72		0.731 28	0.268 72	
67	0.106 465 0	0.039 084 96		0.731 47	0.268 53	
68	0.099 690 44	0.036 563 84		0.731 65	0.268 35	
69	0.093 330 61	0.034 200 48		0.731 83	0.268 17	
670	0.087 400 00	0.032 000 00		0.731 99	0.268 01	
71	0.081 900 96	0.029 962 61		0.732 15	0.267 85	
72	0.076 804 28	0.028 076 64		0.732 30	0.267 70	
73	0.072 077 12	0.026 329 36		0.732 44	0.267 56	
74	0.067 686 64	0.024 708 05	0.732 58	0.267 42		
675	0.063 600 00	0.023 200 00	0.732 72	0.267 28		
76	0.059 806 85	0.021 800 77	0.732 86	0.267 14		
77	0.056 282 16	0.020 501 12	0.733 00	0.267 00		
78	0.052 971 04	0.019 281 08	0.733 14	0.266 86		
79	0.049 818 61	0.018 120 69	0.733 28	0.266 72		
680	0.046 770 00	0.017 000 00	0.733 42	0.266 58		
81	0.043 784 05	0.015 903 79	0.733 55	0.266 45		
82	0.040 875 36	0.014 837 18	0.733 68	0.266 32		
83	0.038 072 64	0.013 810 68	0.733 81	0.266 19		
84	0.035 404 61	0.012 834 78	0.733 94	0.266 06		
685	0.032 900 00	0.011 920 00	0.734 05	0.265 95		
86	0.030 564 19	0.011 068 31	0.734 14	0.265 86		
87	0.028 380 56	0.010 273 39	0.734 22	0.265 78		
88	0.026 344 84	0.009 533 311	0.734 29	0.265 71		
89	0.024 452 75	0.008 846 157	0.734 34	0.265 66		
690	0.022 700 00	0.008 210 000	0.734 39	0.265 61		
91	0.021 084 29	0.007 623 781	0.734 44	0.265 56		
92	0.019 599 88	0.007 085 424	0.734 48	0.265 52		
93	0.018 237 32	0.006 591 476	0.734 52	0.265 48		
94	0.016 987 17	0.006 138 485	0.734 56	0.265 44		
695	0.015 840 00	0.005 723 000	0.734 59	0.265 41		
96	0.014 790 64	0.005 343 059	0.734 62	0.265 38		
97	0.013 831 32	0.004 995 796	0.734 65	0.265 35		
98	0.012 948 68	0.004 676 404	0.734 67	0.265 33		
99	0.012 129 20	0.004 380 075	0.734 69	0.265 31		
700	0.011 359 16	0.004 102 000	0.734 69	0.265 31		
01	0.010 629 35	0.003 838 453	0.734 69	0.265 31		
02	0.009 938 846	0.003 589 099	0.734 69	0.265 31		
03	0.009 288 422	0.003 354 219	0.734 69	0.265 31		
04	0.008 678 854	0.003 134 093	0.734 69	0.265 31		

λ nm	Fonctions colorimétriques <i>Color-matching functions</i>			Coordonnées trichromatiques <i>Chromaticity coordinates</i>		
	$\bar{x}(\lambda)$	$\bar{y}(\lambda)$	$\bar{z}(\lambda)$	$x(\lambda)$	$y(\lambda)$	$z(\lambda)$
705	0.008 110 916	0.002 929 000	0.000 000 0	0.734 69	0.265 31	0.000 00
06	0.007 582 388	0.002 738 139		0.734 69	0.265 31	
07	0.007 088 746	0.002 559 876		0.734 69	0.265 31	
08	0.006 627 313	0.002 393 244		0.734 69	0.265 31	
09	0.006 195 408	0.002 237 275		0.734 69	0.265 31	
710	0.005 790 346	0.002 091 000		0.734 69	0.265 31	
11	0.005 409 826	0.001 953 587		0.734 69	0.265 31	
12	0.005 052 583	0.001 824 580		0.734 69	0.265 31	
13	0.004 717 512	0.001 703 580		0.734 69	0.265 31	
14	0.004 403 507	0.001 590 187	0.734 69	0.265 31		
715	0.004 109 457	0.001 484 000	0.734 69	0.265 31		
16	0.003 833 913	0.001 384 496	0.734 69	0.265 31		
17	0.003 575 748	0.001 291 268	0.734 69	0.265 31		
18	0.003 334 342	0.001 204 092	0.734 69	0.265 31		
19	0.003 109 075	0.001 122 744	0.734 69	0.265 31		
720	0.002 899 327	0.001 047 000	0.734 69	0.265 31		
21	0.002 704 348	0.000 976 589 6	0.734 69	0.265 31		
22	0.002 523 020	0.000 911 108 8	0.734 69	0.265 31		
23	0.002 354 168	0.000 850 133 2	0.734 69	0.265 31		
24	0.002 196 616	0.000 793 238 4	0.734 69	0.265 31		
725	0.002 049 190	0.000 740 000 0	0.734 69	0.265 31		
26	0.001 910 960	0.000 690 082 7	0.734 69	0.265 31		
27	0.001 781 438	0.000 643 310 0	0.734 69	0.265 31		
28	0.001 660 110	0.000 599 496 0	0.734 69	0.265 31		
29	0.001 546 459	0.000 558 454 7	0.734 69	0.265 31		
730	0.001 439 971	0.000 520 000 0	0.734 69	0.265 31		
31	0.001 340 042	0.000 483 913 6	0.734 69	0.265 31		
32	0.001 246 275	0.000 450 052 8	0.734 69	0.265 31		
33	0.001 158 471	0.000 418 345 2	0.734 69	0.265 31		
34	0.001 076 430	0.000 388 718 4	0.734 69	0.265 31		
735	0.000 999 949 3	0.000 361 100 0	0.734 69	0.265 31		
36	0.000 928 735 8	0.000 335 383 5	0.734 69	0.265 31		
37	0.000 862 433 2	0.000 311 440 4	0.734 69	0.265 31		
38	0.000 800 750 3	0.000 289 165 6	0.734 69	0.265 31		
39	0.000 743 396 0	0.000 268 453 9	0.734 69	0.265 31		
740	0.000 690 078 6	0.000 249 200 0	0.734 69	0.265 31		
41	0.000 640 515 6	0.000 231 301 9	0.734 69	0.265 31		
42	0.000 594 502 1	0.000 214 685 6	0.734 69	0.265 31		
43	0.000 551 864 6	0.000 199 288 4	0.734 69	0.265 31		
44	0.000 512 429 0	0.000 185 047 5	0.734 69	0.265 31		
745	0.000 476 021 3	0.000 171 900 0	0.734 69	0.265 31		
46	0.000 442 453 6	0.000 159 778 1	0.734 69	0.265 31		
47	0.000 411 511 7	0.000 148 604 4	0.734 69	0.265 31		
48	0.000 382 981 4	0.000 138 301 6	0.734 69	0.265 31		
49	0.000 356 649 1	0.000 128 792 5	0.734 69	0.265 31		
750	0.000 332 301 1	0.000 120 000 0	0.734 69	0.265 31		
51	0.000 309 758 6	0.000 111 859 5	0.734 69	0.265 31		
52	0.000 288 887 1	0.000 104 322 4	0.734 69	0.265 31		
53	0.000 269 539 4	0.000 097 335 60	0.734 69	0.265 31		
54	0.000 251 568 2	0.000 090 845 87	0.734 69	0.265 31		

λ nm	Fonctions colorimétriques <i>Color-matching functions</i>			Coordonnées trichromatiques <i>Chromaticity coordinates</i>		
	$\bar{x}(\lambda)$	$\bar{y}(\lambda)$	$\bar{z}(\lambda)$	$x(\lambda)$	$y(\lambda)$	$z(\lambda)$
755	0.000 234 826 1	0.000 084 800 00	0.000 000 0	0.734 69	0.265 31	0.000 00
56	0.000 219 171 0	0.000 079 146 67		0.734 69	0.265 31	
57	0.000 204 525 8	0.000 073 858 00		0.734 69	0.265 31	
58	0.000 190 840 5	0.000 068 916 00		0.734 69	0.265 31	
59	0.000 178 065 4	0.000 064 302 67		0.734 69	0.265 31	
760	0.000 166 150 5	0.000 060 000 00		0.734 69	0.265 31	
61	0.000 155 023 6	0.000 055 981 87		0.734 69	0.265 31	
62	0.000 144 621 9	0.000 052 225 60		0.734 69	0.265 31	
63	0.000 134 909 8	0.000 048 718 40		0.734 69	0.265 31	
64	0.000 125 852 0	0.000 045 447 47		0.734 69	0.265 31	
765	0.000 117 413 0	0.000 042 400 00		0.734 69	0.265 31	
66	0.000 109 551 5	0.000 039 561 04		0.734 69	0.265 31	
67	0.000 102 224 5	0.000 036 915 12		0.734 69	0.265 31	
68	0.000 095 394 45	0.000 034 448 68		0.734 69	0.265 31	
69	0.000 089 023 90	0.000 032 148 16		0.734 69	0.265 31	
770	0.000 083 075 27	0.000 030 000 00		0.734 69	0.265 31	
71	0.000 077 512 69	0.000 027 991 25		0.734 69	0.265 31	
72	0.000 072 313 04	0.000 026 113 56		0.734 69	0.265 31	
73	0.000 067 457 78	0.000 024 360 24		0.734 69	0.265 31	
74	0.000 062 928 44	0.000 022 724 61		0.734 69	0.265 31	
775	0.000 058 706 52	0.000 021 200 00		0.734 69	0.265 31	
76	0.000 054 770 28	0.000 019 778 55		0.734 69	0.265 31	
77	0.000 051 099 18	0.000 018 452 85		0.734 69	0.265 31	
78	0.000 047 676 54	0.000 017 216 87		0.734 69	0.265 31	
79	0.000 044 485 67	0.000 016 064 59		0.734 69	0.265 31	
780	0.000 041 509 94	0.000 014 990 00		0.734 69	0.265 31	
81	0.000 038 733 24	0.000 013 987 28		0.734 69	0.265 31	
82	0.000 036 142 03	0.000 013 051 55		0.734 69	0.265 31	
83	0.000 033 723 52	0.000 012 178 18		0.734 69	0.265 31	
84	0.000 031 464 87	0.000 011 362 54		0.734 69	0.265 31	
785	0.000 029 353 26	0.000 010 600 00		0.734 69	0.265 31	
86	0.000 027 375 73	0.000 009 885 877		0.734 69	0.265 31	
87	0.000 025 524 33	0.000 009 217 304		0.734 69	0.265 31	
88	0.000 023 793 76	0.000 008 592 362		0.734 69	0.265 31	
89	0.000 022 178 70	0.000 008 009 133		0.734 69	0.265 31	
790	0.000 020 673 83	0.000 007 465 700		0.734 69	0.265 31	
91	0.000 019 272 26	0.000 006 959 567		0.734 69	0.265 31	
92	0.000 017 966 40	0.000 006 487 995		0.734 69	0.265 31	
93	0.000 016 749 91	0.000 006 048 699		0.734 69	0.265 31	
94	0.000 015 616 48	0.000 005 639 396		0.734 69	0.265 31	
795	0.000 014 559 77	0.000 005 257 800		0.734 69	0.265 31	
96	0.000 013 573 87	0.000 004 901 771		0.734 69	0.265 31	
97	0.000 012 654 36	0.000 004 569 720		0.734 69	0.265 31	
98	0.000 011 797 23	0.000 004 260 194		0.734 69	0.265 31	
99	0.000 010 998 44	0.000 003 971 739		0.734 69	0.265 31	
800	0.000 010 253 98	0.000 003 702 900		0.734 69	0.265 31	
01	0.000 009 559 646	0.000 003 452 163		0.734 69	0.265 31	
02	0.000 008 912 044	0.000 003 218 302		0.734 69	0.265 31	
03	0.000 008 308 358	0.000 003 000 300		0.734 69	0.265 31	
04	0.000 007 745 769	0.000 002 797 139		0.734 69	0.265 31	

λ nm	Fonctions colorimétriques <i>Color-matching functions</i>			Coordonnées trichromatiques <i>Chromaticity coordinates</i>		
	$\bar{x}(\lambda)$	$\bar{y}(\lambda)$	$\bar{z}(\lambda)$	$x(\lambda)$	$y(\lambda)$	$z(\lambda)$
805	0.000 007 221 456	0.000 002 607 800	0.000 000 0	0.734 69	0.265 31	0.000 00
06	0.000 006 732 475	0.000 002 431 220		0.734 69	0.265 31	
07	0.000 006 276 423	0.000 002 266 531		0.734 69	0.265 31	
08	0.000 005 851 304	0.000 002 113 013		0.734 69	0.265 31	
09	0.000 005 455 118	0.000 001 969 943		0.734 69	0.265 31	
810	0.000 005 085 868	0.000 001 836 600		0.734 69	0.265 31	
11	0.000 004 741 466	0.000 001 712 230		0.734 69	0.265 31	
12	0.000 004 420 236	0.000 001 596 228		0.734 69	0.265 31	
13	0.000 004 120 783	0.000 001 488 090		0.734 69	0.265 31	
14	0.000 003 841 716	0.000 001 387 314		0.734 69	0.265 31	
815	0.000 003 581 652	0.000 001 293 400		0.734 69	0.265 31	
16	0.000 003 339 127	0.000 001 205 820		0.734 69	0.265 31	
17	0.000 003 112 949	0.000 001 124 143		0.734 69	0.265 31	
18	0.000 002 902 121	0.000 001 048 009		0.734 69	0.265 31	
19	0.000 002 705 645	0.000 000 977 057 8		0.734 69	0.265 31	
820	0.000 002 522 525	0.000 000 910 930 0		0.734 69	0.265 31	
21	0.000 002 351 726	0.000 000 849 251 3		0.734 69	0.265 31	
22	0.000 002 192 415	0.000 000 791 721 2		0.734 69	0.265 31	
23	0.000 002 043 902	0.000 000 738 090 4		0.734 69	0.265 31	
24	0.000 001 905 497	0.000 000 688 109 8		0.734 69	0.265 31	
825	0.000 001 776 509	0.000 000 641 530 0		0.734 69	0.265 31	
26	0.000 001 656 215	0.000 000 598 089 5		0.734 69	0.265 31	
27	0.000 001 544 022	0.000 000 557 574 6		0.734 69	0.265 31	
28	0.000 001 439 440	0.000 000 519 808 0		0.734 69	0.265 31	
29	0.000 001 341 977	0.000 000 484 612 3		0.734 69	0.265 31	
830	0.000 001 251 141	0.000 000 451 810 0		0.734 69	0.265 31	

4. Équations de base reliant les grandeurs photométriques et colorimétriques au flux énergétique

4.1. Flux lumineux

Pour la vision photopique :

$$\phi_v = K_m \int_{\lambda} \phi_{e,\lambda} V(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

avec

- ϕ_v : flux lumineux en lumens
- $\phi_{e,\lambda} = \frac{d\phi_e}{d\lambda}$: densité spectrale du flux énergétique en watts par mètre
- $V(\lambda)$: fonction d'efficacité lumineuse relative spectrale pour la vision photopique

$$K_m = 683 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1} [V(\lambda_m)/V(555,016 \text{ nm})] = 683 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1} \text{ (environ).}$$

Pour la vision scotopique :

$$\phi_v = K'_m \int_{\lambda} \phi_{e,\lambda} V'(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

avec

- ϕ_v : flux lumineux en lumens
 $\phi_{e,\lambda} = \frac{d\phi_e}{d\lambda}$: densité spectrale du flux énergétique en watts par mètre
 $V'(\lambda)$: fonction d'efficacité lumineuse relative spectrale pour la vision scotopique

$$K'_m = 683 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1} [V'(\lambda'_m)/V'(555,016 \text{ nm})] = 1\,700 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1} \text{ (environ).}$$

4.2. Composantes trichromatiques et coordonnées trichromatiques

Composantes trichromatiques :

$$\begin{aligned} X &= k \int_{\lambda} \phi_{e,\lambda} \bar{x}(\lambda) d\lambda \\ Y &= k \int_{\lambda} \phi_{e,\lambda} \bar{y}(\lambda) d\lambda \\ Z &= k \int_{\lambda} \phi_{e,\lambda} \bar{z}(\lambda) d\lambda \end{aligned} \quad (3)$$

avec

- X, Y, Z : composantes trichromatiques
 $\phi_{e,\lambda} = \frac{d\phi_e}{d\lambda}$: densité spectrale du flux énergétique
 $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$: fonctions colorimétriques CIE 1931
 k : facteur de normalisation rendant les composantes trichromatiques X, Y, Z sans dimension; par exemple, si

$$k = 100 / \int_{\lambda} \phi_{e,\lambda} \bar{y}(\lambda) d\lambda,$$

- : les composantes trichromatiques sont données en pour cent et l'on a Y toujours égal à 100.

Coordonnées trichromatiques :

Les coordonnées trichromatiques définissent la chromaticité d'un stimulus visuel donné par sa répartition spectrale relative du flux

énergétique. La chromaticité peut être représentée par un point dans le diagramme de chromaticité (x, y) CIE 1931.

$$\begin{aligned} x &= \frac{X}{X + Y + Z} \\ y &= \frac{Y}{X + Y + Z} \end{aligned} \quad (4)$$

avec

x, y : coordonnées trichromatiques
 X, Y, Z : composantes trichromatiques.

Note : Dans le cas particulier où l'on a $X = \bar{x}(\lambda)$, $Y = \bar{y}(\lambda)$, $Z = \bar{z}(\lambda)$, les coordonnées trichromatiques sont symbolisées par $x(\lambda)$, $y(\lambda)$. Elles définissent la chromaticité des stimulus visuels monochromatiques de longueur d'onde λ (voir tableau 3).

5. Remarques générales

a) Les intégrations nécessaires dans les équations (1), (2), (3) et (5) sont, dans la pratique, remplacées par des sommations étendues au domaine du spectre visible dont les limites et les intervalles de longueurs d'onde sont ceux qui figurent aux tableaux 1, 2 et 3. Lorsque l'on a besoin d'évaluer les fonctions de pondération à des longueurs d'onde intermédiaires entre celles qui figurent dans les tableaux, il convient d'utiliser une interpolation linéaire.

b) On peut exprimer la grandeur photométrique luminance L_v au moyen d'une équation semblable à l'équation (1) en faisant appel à la grandeur radiométrique densité spectrale de luminance énergétique, $L_{e,\lambda}$, au lieu du flux énergétique :

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

La luminance est destinée à assurer la correspondance avec la perception de la luminosité; c'est le cas en vision scotopique et en vision photopique pour des lumières qui ont la même couleur.

c) On a établi de façon expérimentale que des lumières qui ont des luminances lumineuses ou des intensités lumineuses identiques mais des couleurs différentes, c'est-à-dire des valeurs différentes des coordonnées trichromatiques, ne sont en général pas perçues comme ayant la même luminosité. Les différences de luminosité dépendent des couleurs concernées.

Pour le moment, il n'existe aucune grandeur qui soit reconnue comme plus satisfaisante que la luminance lumineuse ou l'intensité lumineuse pour prévoir les luminosités relatives de lumières hétérochromes. Des progrès sont toutefois en cours et il se peut qu'une grandeur faisant très probablement appel à la fois aux chromaticités et aux luminances lumineuses des lumières comparées puisse servir à cette fin.

6. Bibliographie

- [1] CIE (Commission Internationale de l'Éclairage), Vocabulaire International de l'Éclairage (3^e édition), Publication CIE No. 17 (E-1.1) 1970, Bureau Central de la CIE, 52, boulevard Malesherbes, 75008 Paris, France. La 4^e édition du Vocabulaire International de l'Éclairage est en cours de préparation; elle devrait être publiée en 1984.
 - [2] CGPM (Conférence Générale des Poids et Mesures), Comptes Rendus des Séances de la 16^e Conférence Générale des Poids et Mesures, Paris, 1979, p. 100, Bureau International des Poids et Mesures, F-92310 Sèvres, France.
 - [3] Edlén, B., The refractive index of air, *Metrologia*, **2**, 1966, pp. 71-80.
 - [4] CIE (Commission Internationale de l'Éclairage), Principles of Light Measurements, Publication CIE No. 18 (E-1.2) 1970, Bureau Central de la CIE. Une nouvelle édition de ce document, intitulée : The Basis of Physical Photometry, est prête; elle doit être publiée en 1983.
 - [5] CIE (Commission Internationale de l'Éclairage), Light as a True Visual Quantity : Principles of Measurement, Publication CIE No. 41 (TC-1.4) 1978, Bureau Central de la CIE.
 - [6] CIE (Commission Internationale de l'Éclairage), Colorimétrie, Recommandations officielles de la Commission Internationale de l'Éclairage, Publication CIE No. 15 (E-1.3.1) 1971, Bureau Central de la CIE. Une nouvelle édition de ce document est en cours de préparation; elle doit être publiée en 1984.
-

ANNEXE P 3

Comparaison internationale d'étalons d'intensité lumineuse à forte intensité de courant

par R. G. BERRY et F. J. J. CLARKE

National Physical Laboratory (Royaume-Uni)

(Traduction du Document CCPR/82-6)

Introduction

Jusqu'à maintenant les comparaisons internationales d'intensité lumineuse organisées par le CCPR portaient sur des lampes étalons photométriques fragiles, transportées à la main entre le BIPM et les laboratoires par des photométristes. Depuis plus de vingt ans, la préférence est allée aux lampes à température de couleur supérieure à 2 360 K, du type Osram Wi 41 G à filament maintenu par des supports. Toutefois, les résultats des comparaisons internationales de 1961 et de 1969 présentaient des anomalies et n'ont pas permis de bien connaître la valeur de l'« unité » effectivement conservée par chaque participant. Les valeurs relatives des « unités » obtenues lors des comparaisons de 1961 et de 1969 à 2 042 K et à 2 856 K étaient d'une piètre concordance; il est évident que les problèmes de reproductibilité et de transport des étalons avaient au moins autant d'importance que les différences effectives existant entre les étalons primaires sur lesquels reposaient les « échelles » photométriques des laboratoires. On s'est aperçu que les valeurs d'étalonnage de beaucoup de lampes Wi 41 G avaient varié pendant les transports entre les laboratoires et le BIPM, ou pendant le séjour au BIPM, de 1 % environ, ou même de 2 % dans certains cas. Cela s'est produit en dépit d'une manipulation soigneuse par des personnes consciencieuses, ce qui a confirmé que les lampes Wi 41 G étaient très fragiles. Au NPL, l'expérience a montré que ces lampes deviennent plus fragiles au fur et à mesure qu'elles vieillissent. Toutefois, lorsqu'elles sont manipulées et conservées avec beaucoup de soin, elles peuvent donner une bonne reproductibilité des mesures, avec $\sigma = 0,2 \%$.

Mis à part ces problèmes de comparaisons entre laboratoires et d'utilisation interne des étalons photométriques, le NPL a aussi étudié le problème du transport d'étalons vers des pays lointains comme l'Argentine, la Chine ou la Nouvelle-Zélande, pour lesquels il est difficile d'organiser des transports de séries de lampes en bagage à main. C'est pourquoi le NPL et la GEC [1,2] ont conjointement mis au point des étalons d'intensité lumineuse et de température de couleur à forte intensité de courant. Ces étalons peuvent fonctionner à peu près 9 000 heures à 2 856 K ou 1 800 heures à 3 000 K, par exemple, et ont pour caractéristiques : 12,6 V et 25,5 A environ à 2 856 K. Les crochets-supports de filament s'étant révélés une source d'ennuis avec les lampes étalons traditionnelles, on les a supprimés. Toutefois, à la différence des nouvelles lampes Wi 41 G sans supports, les lampes NPL/GEC à forte intensité de courant sont très robustes : leur filament ne casse pas et ne présente pas de variation significative même en cas de gros choc (voir ci-après).

Lors de la réunion du CCPR en 1975, il avait été convenu que plusieurs grands laboratoires coopéreraient avec le NPL pour faire de sérieux essais et étudier si les lampes NPL/GEC étaient susceptibles d'être utilisées comme étalons de transfert. Si les participants le souhaitaient, ces essais pratiques pourraient aussi servir de comparaison internationale à petite échelle des « unités » conservées : tous les laboratoires concernés ont été d'accord pour effectuer cette comparaison.

Organisation de la comparaison circulaire

Une série de 19 lampes NPL/GEC à forte intensité de courant a été vieillie, réglée à la température de couleur de 2 856 K et étalonnée quatre fois en intensité lumineuse. Cette série a été divisée en trois groupes : un groupe d'étalons de référence pour le NPL, un groupe d'étalons de travail pour le NPL et le groupe de quatre lampes qui a circulé. Ces dernières lampes ont été emballées séparément en utilisant des matériaux courants : une boîte extérieure en carton remplie de frison; à l'intérieur, un tube en carton fort, de 6 mm d'épaisseur, avec des embouts, contenait une lampe montée enveloppée dans du coton. Le but de l'emballage était essentiellement de protéger la lampe contre l'écrasement et le bris de l'ampoule; la protection contre les chocs et les vibrations était faible afin que la robustesse du filament soit bien mise à l'épreuve. Chaque lampe a fait l'objet d'un double circuit comportant dix voyages autour du monde dans l'ordre suivant : NPL, BIPM, INM, NBS, CSIRO, NPL, BIPM, INM, NBS, CSIRO, NPL. Ce double circuit a permis à chaque laboratoire de vérifier la reproductibilité de ses mesures en fonction de la conservation et de la stabilité de chaque lampe. On a utilisé les services postaux aériens ordinaires pour tous les voyages sauf pour la première partie entre le NPL et le BIPM (train et bateau) et dans Paris; on a demandé à chaque

laboratoire de ne pas expédier les lampes en même temps pour que les voyages forment la variété la plus représentative possible des conditions de transport.

Il convient de remarquer que le changement était complet par rapport aux comparaisons antérieures organisées par le CCPR. Il en était de même vis-à-vis de la comparaison de nouvelles lampes Wi 41 G sans crochets-supports et de détecteurs au silicium, qui a eu lieu à la même époque et qui était organisée par la PTB; dans ce dernier cas, les lampes étaient emballées de façon très compliquée pour les préserver des chocs et des vibrations et seule une série déterminée de trois lampes avait à supporter deux voyages de ce genre.

Pendant les mesures de la première partie du circuit, le NPL a acheté des enregistreurs de chocs; ils étaient constitués d'une balle en caoutchouc, encreée, prise dans un cube doublé de papier. Ce dispositif enregistre de façon continue les composantes des plus violents impacts sous forme de taches circulaires de plus ou moins grand diamètre sur les six faces du cube. Lors de la seconde partie du circuit, on a mis un de ces enregistreurs à l'intérieur de chaque tube en carton contenant une lampe; chaque participant a pris note des accélérations maximales enregistrées. Le tableau I donne les résultats: on peut voir que la composante maximale

TABLEAU I
Enregistrement des chocs
(valeurs en multiple de g)

Laboratoire	Date	Lampe N°				Emballage vide
		(Entrée d'air) D5-75	D9-75	D12-76	D14-76	
NPL	Mars 1980	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5
BIPM	Juin 1980	27	35	15	29	23
INM	Juil. 1980	27	35	15	29	23
NBS	Janv. 1981	31	45	23	31	29
CSIRO	Mai 1981	35	50	23	40	29
NPL	Août 1981	40	50	23	40	31

d'accélération est comprise entre 23 g et 50 g, ce qui constitue un traitement très sévère pour une lampe à incandescence. Les emballages extérieurs ont donc dû subir des accélérations par impulsions plusieurs fois supérieures, compte tenu du fait que l'emballage, bien que rigide, avait une certaine élasticité.

Conditions d'étalonnage

Les lampes NPL/GEC différaient nettement par leur construction, leur géométrie, leur montage et leurs caractéristiques électriques, des lampes étalons secondaires utilisées par les participants. Il fallait un peu plus de soin pour monter les lampes que lors des précédentes comparaisons du CCPR; toutefois cela n'était pas essentiellement différent de ce qu'il faut faire dans les travaux quotidiens d'étalonnage pour l'industrie dans un laboratoire national, où l'on a affaire à des types différents de lampes à incandescence. Les lampes étaient positionnées et on les faisait fonctionner sous les intensités de courant indiquées par le NPL. Le fonctionnement à intensité de courant donnée élimine les conséquences photométriques de toute résistance de contact parasite. Par inadvertance, il avait été omis de donner des instructions précises pour resserrer, si nécessaire, les vis sur les bornes électriques du support de montage de chaque lampe sur le banc photométrique.

On avait donné aux participants une brève description de la technique utilisée au NPL pour aligner les lampes, ainsi que des instructions très simples sur les conditions d'alignement nécessaires. Toutefois, les participants étaient encouragés à choisir la méthode d'alignement et les conditions de mesure qui convenaient le mieux à leurs installations et à leur expérience, en ne perdant pas de vue que l'impératif le plus important était d'être capable de refaire fidèlement les mesures environ un an plus tard, sans oublier non plus que les déterminations du NPL étaient faites à 2,4 m. On ne peut dire dans quelle mesure l'utilisation de l'installation, des étalons de référence et de la technique lors de la seconde partie du circuit reproduisait vraiment celle de l'année précédente dans chaque laboratoire.

Accident de la circulation

Pendant le trajet entre l'aéroport de Dulles et le NBS, la camionnette qui transportait la lampe n° D11-76 fut si gravement endommagée dans une collision que même le tube interne en carton épais fut tordu, tandis que la boîte extérieure était écrasée. Le NPL a remplacé la lampe cassée par la lampe D14-76 dont les valeurs initiales de l'intensité lumineuse et de la différence de potentiel étaient identiques.

Résultats

A l'exception du NPL, chaque laboratoire a fourni les valeurs de l'intensité lumineuse et de la différence de potentiel obtenues pour chaque lampe lors de la première et de la seconde parties du circuit. Le NPL a fourni les valeurs obtenues au commencement, au milieu et à la fin du circuit, de telle sorte que deux demi-comparaisons complètes ont été réalisées. Le tableau 2 contient les valeurs de l'intensité lumineuse et le tableau 6 celles de la différence de potentiel. On n'avait pas demandé aux laboratoires de détails concernant le nombre de lectures du courant photométrique, le nombre d'alignements indépendants des lampes, les étalons de référence et l'installation, car on avait considéré qu'il s'agissait de questions propres aux laboratoires. Le BIPM a fourni des résultats séparés pour deux photomètres, mais comme une amélioration de la correction spectrale a été appliquée au photomètre n° 1 après que l'on eut rendu compte de la première partie du circuit, il a été décidé d'établir les différences seulement sur les résultats du photomètre n° 2; en revanche, on a tenu compte des résultats des deux photomètres pour les valeurs absolues lors de la seconde partie.

Les nombres figurant dans ce rapport font référence en général aux valeurs uniques attribuées par chaque laboratoire pour chaque lampe et dans chaque cas. Cependant, il y a des exceptions, à la seconde et à la troisième lignes de résultats du tableau 2 qui donnent, pour chaque lampe au NPL, l'écart-type et l'écart-type de la moyenne lors des quatre séries indépendantes de mesures faites après le vieillissement et le réglage en température de couleur initiaux. Ces résultats complémentaires donnent la composante aléatoire totale de l'incertitude de mesure des valeurs de l'intensité lumineuse dans l'« échelle » photométrique du laboratoire.

Comme la lampe D14-76 avait la même intensité et la même différence de potentiel initiales, on l'a considérée en fait comme la remplaçante exacte de la lampe D11-76 cassée aux États-Unis. Si l'on tient compte du fait qu'une partie de l'écart-type de la moyenne indiqué au tableau 2 est due à des différences en plus et en moins corrélées lors des quatre séries initiales de mesures faites au NPL, les véritables valeurs pour D14-76 étaient probablement celles de D11-76 à $\pm 0,1\%$ près.

Il ressort des valeurs qui figurent aux tableaux 2 et 6 qu'une lampe, D5-75, a fait preuve d'un rythme de vieillissement beaucoup plus grand que les autres. Un examen critique *a posteriori* a révélé un léger dépôt laiteux à l'intérieur de l'ampoule; son aspect était différent des autres. Nous pensons que cette lampe présente une fine fêlure de l'ampoule, peut-être au voisinage de la soudure entre le métal et le verre, bien que rien de tel ne soit apparent. C'est pourquoi nous n'avons pas tenu compte de cette lampe dans les valeurs moyennes utilisées pour contrôler les rapports et les différences relatives de lampe à lampe et, pour une même lampe, d'un moment à un autre; cependant, ces valeurs, absolues et relatives, sont tout

TABLEAU 2

Intensités lumineuses mesurées dans chaque laboratoire
(dans l'« unité » conservée au laboratoire)

Laboratoire	Date du Rapport	Lampe N°				Moyenne des trois bonnes lampes	Moyenne des quatre lampes	Pour 3 lampes $\frac{\sigma_{n-1}(\Delta)}{\sqrt{2}}$	Pour 3 lampes $\frac{\sigma_{n-1}(\Delta)}{\sqrt{2}}$
		D11-76	D14-76	(Entrée d'air) D5-75	D9-75				
NPL 1	Nov. 1978	463,0 (0,06 %)	463,0 (0,15 %)	454,0 (0,08 %)	454,4 (0,24 %)	466,9 (0,05 %)	459,6		
NPL σ_{n-1}		(0,03 %)	(0,08 %)	(0,04 %)	(0,12 %)	(0,03 %)			
NPL σ_{n-1}		457,4		450,6	450,9	462,5	455,4		
BIPM 1	* Déc. 1978								
INM 1	Janv. 1979	451,6		446,6	446,0	458,7	450,7		
NBS 1	Avril 1979	cassée	457,5	452,6	450,9	464,6	456,4		
CSIRO 1	+ Mai 1980	461,0		455,0	451,0	464,0	457,8		
NPL 2	Avril 1980	462,8		458,4	454,4	466,7	460,6	0,01 %	
ANPL (2-1)		-0,2		4,4	0,0	-0,2	1,0	0,1	
BIPM 2	Δ● Juil. 1980	459,1		455,2	450,2	461,6	456,5	0,9	0,21 %
ΔBIPM (2-1)		1,4		4,7	-0,9	-0,9	1,1	1,9	0,42 %
INM 2	Juil. 1980	455,3		450,9	444,4	458,5	452,3		
ΔINM (2-1)		3,7		4,3	-1,6	-0,2	1,6		
NBS 2	Janv. 1981	459,7		459,0	452,7	463,5	458,7	1,3	0,28 %
ANBS (2-1)		2,2		6,4	1,8	-1,1	2,3	0,8	0,18 %
CSIRO 2	Juil. 1981	462,0		458,5	454,0	465,0	459,9		
ΔCSIRO (2-1)		1,0		3,5	3,0	1,0	2,1		
NPL 3	Fév. 1982	463,6		461,9	456,0	465,7	461,8	0,9	0,20 %
ANPL (3-2)		0,8		3,5	1,6	-1,0	1,2		

* Écart-type de la moyenne.

* Valeurs obtenues avec le photomètre N° 2 seulement.

+ Les mesures au CSIRO ont bien été faites avant celles du NPL 2.

Δ Moyennes des valeurs obtenues avec les photomètres N° 1 et 2.

● Différences provenant des valeurs obtenues avec le photomètre N° 2 seulement.

de même indiquées dans les tableaux. La valeur moyenne de l'ensemble des quatre lampes et la valeur moyenne des trois « bonnes » lampes sont données pour comparaison aux tableaux 2, 3, 5, 6, 7 et 9.

Les intensités lumineuses moyennes, pour chaque lampe et pour chaque laboratoire, sont données au tableau 3. Les rapports des valeurs moyennes de l'intensité lumineuse dans l'« échelle » photométrique des laboratoires sont donnés au tableau 5, qui résume l'aspect chronologique du circuit et la situation des « unités » conservées par les laboratoires. De même, les différences de potentiel moyennes, pour chaque lampe et chaque laboratoire, sont données au tableau 7, et les rapports des différences de potentiel moyennes au tableau 9.

L'aspect le plus important de cette comparaison circulaire de lampes était l'évaluation de la reproductibilité des étalonnages. On a remarqué que des problèmes supplémentaires peuvent se poser quand on étalonne des lampes qui sont nettement différentes des étalons de référence. L'évaluation est compliquée par les différences réelles de lampe à lampe et, pour une même lampe, d'une fois à l'autre, cette dernière différence étant due simplement au vieillissement ou peut-être à une modification de structure indésirable. Les résultats les plus révélateurs dont il faut partir sont les valeurs de chaque lampe relatives à la moyenne du groupe des trois « bonnes » lampes à une date et pour un laboratoire donnés. Ils sont indiqués au tableau 4 pour l'intensité et au tableau 8 pour la différence de potentiel; ces valeurs relatives permettent de déduire la reproductibilité à un moment donné et suivant le vieillissement, mais indépendamment des différences réelles de lampe à lampe ou du vieillissement moyen qui s'est

TABLEAU 3

*Intensités lumineuses moyennes (en cd),
pour chaque lampe et chaque laboratoire*

Laboratoire	Lampe N°				Moyenne des trois bonnes lampes	Moyenne des quatre lampes
	D11-76 et D14-76	(Entrée) d'air D5-75	D9-75	D12-75		
NPL (1, 2, 3)	463,1	458,1	454,9	466,4	461,5	460,6
BIPM (1, 2) ⁺	458,0	452,4	450,1	461,7	456,6	455,6
INM (1, 2)	453,5	448,8	445,2	458,6	452,4	451,5
NBS (1, 2)	458,6	455,8	451,8	464,0	458,2	457,6
CSIRO (1, 2)	461,5	456,8	452,5	464,5	459,5	458,8

⁺ Moyenne internationale de 1961.

TABLEAU 4
Intensités lumineuses relatives

Laboratoire	Date du Rapport	Dans chaque cas, rapport à la moyenne des 3 lampes						Pour trois lampes		
		D11-76	D14-76	(Entrée d'air) D5-75	D9-75	D12-76	$\frac{\sigma_n(\Delta)}{\sqrt{2}}$	$\frac{\sigma_{n-1}(\Delta)}{\sqrt{2}}$	$\frac{\sigma_{n-1}(\Delta)}{\sqrt{2n}}$	
NPL 1	Nov. 78	1,003 4	1,003 4	0,984 0	0,984 8	1,011 8				
BIPM 1	Déc. 78	1,001 0		0,986 1	0,986 8	1,012 2				
INM 1	Jan. 79	0,998 9		0,987 8	0,986 5	1,014 6				
NBS 1	—	cassée	0,999 6	0,988 9	0,985 2	1,015 1				
CSIRO 1	+ Mai 80		1,005 1	0,992 0	0,983 3	1,011 6				
NPL 2	Avr. 80		1,003 3	0,993 7	0,985 0	1,011 7				
Δ NPL (2-1)			— 0,000 1	0,009 7	— 0,000 2	— 0,000 1	0,000 1	0,000 1	0,000 1	
BIPM 2	Juil. 80		1,004 4	0,996 7	0,985 1	1,010 5				
Δ BIPM (2-1)			0,003 4	0,010 6	— 0,001 7	— 0,001 7	0,001 7	0,002 1	0,001 2	
INM 2	Juil. 80		1,005 7	0,996 0	0,981 6	1,012 7				
Δ INM (2-1)			0,006 8	0,008 2	— 0,004 9	— 0,001 9	0,003 5	0,004 2	0,002 5	
NBS 2	—		1,002 3	1,000 8	0,987 1	1,010 6				
Δ NBS (2-1)			0,002 7	0,011 9	0,001 9	— 0,004 5	0,002 3	0,002 8	0,001 6	
CSIRO 2	Juil. 81		1,003 6	0,996 0	0,986 2	1,010 1				
Δ CSIRO (2-1)			— 0,001 5	0,004 0	0,002 9	— 0,001 5	0,002 5	0,001 8	0,001 1	
NPL 3	Fév. 82		1,004 0	1,000 3	0,987 5	1,008 5				
Δ NPL (3-2)			0,000 7	0,006 6	0,002 5	— 0,003 2	0,001 7	0,002 1	0,001 2	
Δ NPL *							0,001 2	0,001 3	0,000 8 \blacktriangle	

+ Les mesures au CSIRO ont bien été faites avant celles du NPL 2.
* Calculé directement à partir des 6 différences Δ NPL (2-1) et Δ NPL (3-2).
 \blacktriangle Valeur correspondante pour 3 différences : 0,001 1.

produit. On y parvient en prenant les différences Δ entre ces valeurs relatives pour les étalonnages successifs de chaque lampe, pour chaque laboratoire.

Les écarts-types des différences, $\sigma_n(\Delta)$ et $\sigma_{n-1}(\Delta)$, ont été divisés par $\sqrt{2}$ et sont donnés au tableau 4 comme notation de démérite; ils traduisent le manque de reproductibilité par étalonnage dû aux effets combinés de la variance inhérente à la lampe, de la variance expérimentale de la méthode utilisée par le laboratoire considéré et des différences dans les rythmes effectifs de vieillissement. Les valeurs de $\sigma_{n-1}(\Delta)/\sqrt{2n}$, également données au tableau 4, sont la meilleure estimation de la composante aléatoire de l'incertitude (au niveau de confiance de 68 %) pour la valeur de l'intensité lumineuse moyenne obtenue dans chaque laboratoire. C'est pourquoi ces valeurs de $\sigma_{n-1}(\Delta)/\sqrt{2n}$ sont aussi indiquées pour les résultats de l'intensité relative moyenne du tableau 5.

TABLEAU 5

Rapports des valeurs moyennes de l'intensité lumineuse

Laboratoire	Référence : NPL			Référence : BIPM			$\frac{\sigma_{n-1}(\Delta)}{\sqrt{2n}}$ pour 3 lampes
	Pour 4 lampes	Pour 3 lampes	Pour 3 lampes avec correction de vieillissement	Pour 4 lampes	Pour 3 lampes	Pour 3 lampes avec correction de vieillissement	
* BIPM	0,989 1	0,989 4	0,989 7	1,000 0	1,000 0	1,000 0	0,001 2
INM	0,980 2	0,980 3	0,980 4	0,991 0	0,990 8	0,990 6	0,002 5
NBS	0,993 5	0,992 8	0,992 7	1,004 4	1,003 5	1,003 0	0,001 6
CSIRO	0,996 1	0,995 7	0,995 4	1,007 0	1,006 4	1,005 8	0,001 1
NPL	1,000 0	1,000 0	1,000 0	1,011 0	1,010 7	1,010 4	0,000 8 *

* Calculé directement à partir des 6 différences $\Delta_{NPL(2-1)}$ et $\Delta_{NPL(3-2)}$, la valeur correspondante pour 3 différences étant $\pm 0,001$ l.

* Moyenne internationale de 1961.

Discussion des résultats

Les lampes étalons NPL/GEC à forte intensité de courant présentent un bruit (de l'ordre de $\pm 0,2$ % de pic à pic) sur l'intensité lumineuse causé par la turbulence du gaz de remplissage. On peut atténuer l'effet de ce bruit en utilisant, soit une grande constante de temps, soit une véritable méthode d'intégration de la mesure avec, par exemple, une période de 10 s. Ce problème et celui du contact électrique, pour une intensité de courant de 25,5 A et une résistance de 0,5 ohm seulement, font qu'il faut s'attendre à une reproductibilité moins bonne à un moment et dans un laboratoire

donnés, si l'on veut en revanche une robustesse plus grande que pour les étalons habituels.

Les valeurs de $\sigma_{n-1}(\Delta)/\sqrt{2}$ données au tableau 4 sont les meilleures estimations à partir des valeurs fournies de σ_{n-1} pour les étalonnages réels dans chaque laboratoire. (Cette estimation ne couvre pas les composantes autres qu'aléatoires de l'incertitude). Les valeurs obtenues sont : 0,01 %; 0,21 %; 0,42 %; 0,28 %; 0,18 % et 0,20 % après les étalonnages répétés au NPL, au BIPM, à l'INM, au NBS, au CSIRO et à nouveau au NPL; elles sont comparables à la valeur de σ_{n-1} de 0,2 % obtenue au NPL pour des étalonnages indépendants de lampes Wi 41 G. Le premier nombre de la liste est fortuitement bas, le troisième peut-être fortuitement élevé. Le σ_{n-1} moyen observé pour les cinq lampes et les quatre étalonnages indépendants initiaux faits au NPL était de 0,23 %, ce qui est compatible avec les valeurs de $\sigma_{n-1}(\Delta)/\sqrt{2}$ trouvées lors de la comparaison circulaire.

Il faut évaluer les différences de vieillissement observées lors de la comparaison en fonction du nombre d'heures pendant lesquelles chaque lampe a été allumée avant réétalonnage. Malheureusement on ne connaît pas ce nombre dans tous les cas. Comme les participants manquaient d'expérience avec ces lampes et qu'ils avaient été prévenus de l'existence de bruit éventuel ou de problèmes de circuits électriques, il est vraisemblable qu'ils ont fait fonctionner les lampes préalablement aux mesures de comparaison pour vérifier leurs alimentations, leurs résistances étalons, leurs circuits pour forte intensité de courant, etc., ainsi que le moyen d'éliminer les effets de turbulence du gaz.

L'effet de vieillissement moyen pour les trois bonnes lampes du tableau 2, pour les étalonnages dont ont rendu compte les différents laboratoires, correspondait à : — 0,02 %; + 0,13 %; + 0,22 %; + 0,35 % et + 0,11 % respectivement. La moyenne des différences de vieillissement moyennes était de + 0,6 cd, soit + 0,13 %. Ces résultats sont nettement meilleurs que ceux qui avaient été obtenus lors des précédentes comparaisons d'intensité lumineuse à 2 856 K organisées par le CCPR. C'est remarquable si l'on considère qu'ils ont été obtenus avec trois lampes seulement, après cinq expéditions par la poste, cinq contrôles des conditions de fonctionnement et d'équipement et cinq séries de mesures. Les comparaisons précédentes de lampes Wi 41 G portaient généralement sur huit lampes par participant autre que le BIPM, avec seulement deux transports dans des conditions particulières et deux séries de mesures susceptibles de provoquer des modifications. La modification globale observée au NPL après dix transports et utilisations s'élève à + 0,09 % suivant le tableau 2, avec une incertitude de $\pm 0,11\%$ (au niveau de confiance de 68 %) telle qu'elle est donnée par $\sigma_{n-1}(\Delta)/\sqrt{n}$.

Le léger accroissement de l'intensité lumineuse moyenne était associé à des accroissements de différences de potentiel, de résistance et de puissance consommée. L'accroissement moyen de différence de potentiel pour les différents laboratoires est indiqué au tableau 6 : 0,22 %; 0,13 %; 0,21 %;

Différences de potentiel (en V) mesurées aux bornes des lampes par chaque laboratoire, à intensité de courant spécifiée

Laboratoire	Date du rapport	Lampe N°			Moyenne des 3 bonnes lampes	Moyenne des 4 lampes	Pour 3 lampes $\frac{\sigma_{n-1}(\Delta)}{\sqrt{2}}$	Pour 3 lampes $\frac{\sigma_{n-1}(\Delta)}{\sqrt{2}}$
		D11-76	D14-76	(Entrée d'air) D5-75				
NPL 1	Nov. 78	12,544	12,543	12,460	12,584	12,553		
NPL σ_{n-1}		(0,02 %)	(0,13 %)	(0,07 %)				
NPL σ_m		(0,01 %)	(0,07 %)	(0,04 %)				
BIPM 1	Déc. 78	12,544		12,487	12,599	12,571		
INM 1	Janv. 79	12,542		12,493	12,597	12,571		
NBS 1	Avr. 79	Cassée	12,570	12,534	12,608	12,590		
CSIRO 1	* Mai 80		12,580	12,545	12,610	12,594		
NPL 2	Avr. 80		12,580	12,557	12,613	12,599		
ANPL (2-1)			0,037	0,097	0,028	0,045	0,012	0,10 %
BIPM 2	Juil. 80		12,589	12,572	12,615	12,604		
Δ BIPM (2-1)			0,045	0,085	0,016	0,033	0,019	0,15 %
INM 2	Juil. 80		12,601	12,581	12,624	12,613		
Δ INM (2-1)			0,059	0,088	0,027	0,042	0,021	0,17 %
NBS 2	Janv. 81		12,610	12,609	12,634	12,628		
Δ NBS (2-1)			0,040	0,075	0,026	0,038	0,009	0,07 %
CSIRO 2	Juil. 81		12,61	12,63	12,637	12,635		
Δ CSIRO (2-1)			0,030	0,085	0,027	0,041	0,004	0,03 %
NPL 3	Fév. 82		12,614	12,646	12,637	12,639		
Δ NPL (3-2)			0,034	0,089	0,025	0,041	0,007	0,06 %
Courant (A)		25,35	25,41	25,52	25,45	25,55		

* Écart-type de la moyenne.

* Les mesures au CSIRO ont bien été faites avant celles du NPL 2.

TABLEAU 7

*Différences de potentiel moyennes (en V),
pour chaque lampe et chaque laboratoire*

Laboratoire	D11-76 et D14-76	(Entrée d'air)	D9-75	D12-76	Moyenne des bonnes lampes	Moyenne des 4 lampes
		D5-75				
NPL (1,2,3)	12,579	12,554	12,499	12,756	12,611	12,597
BIPM (1,2)	12,567	12,530	12,499	12,756	12,607	12,588
INM (1,2)	12,572	12,537	12,495	12,765	12,611	12,592
NBS (1,2)	12,590	12,572	12,500	12,772	12,621	12,609
CSIRO (1,2)	12,595	12,588	12,500	12,775	12,623	12,614

TABLEAU 8

Différences de potentiel aux bornes des lampes

Laboratoire	Date du rapport	Rapport à la moyenne des trois lampes				
		D11-76	D14-76	(Entrée d'air) D5-75	D9-75	D12-76
NPL 1	Nov. 78	0,996 8	0,996 7	0,990 1	0,992 3	1,010 9
BIPM 1	Déc. 78	0,995 6		0,991 1	0,992 3	1,012 1
INM 1	Janv. 79	0,995 7		0,991 8	0,991 8	1,012 5
NBS 1	Cassée		0,997 0	0,994 1	0,990 8	1,012 2
CSIRO 1	* Mai 80		0,997 6	0,994 8	0,990 5	1,011 9
NPL 2	Avr. 80		0,997 4	0,995 6	0,990 8	1,011 8
Δ NPL (2-1)			0,000 7	0,005 5	-0,001 5	0,000 9
BIPM 2	Juil. 80		0,997 9	0,996 6	0,990 6	1,011 5
Δ BIPM (2-1)			0,002 3	0,005 5	-0,001 7	-0,000 6
INM 2	Juil. 80		0,998 2	0,996 6	0,989 8	1,012 0
Δ INM (2-1)			0,002 5	0,004 8	-0,002 0	-0,000 5
NBS 2			0,998 1	0,998 0	0,990 1	1,011 8
Δ NBS (2-1)			0,001 1	0,003 9	-0,000 7	-0,000 4
CSIRO 2	Juil. 81		0,997 9	0,999 5	0,990 0	1,012 1
Δ CSIRO (2-1)			0,000 3	0,004 7	-0,000 5	0,000 2
NPL 3	Fév. 82		0,998 2	1,000 7	0,990 1	1,011 8
Δ NPL (3-2)			0,000 8	0,005 1	-0,000 7	0,000 0

* Les mesures au CSIRO ont bien été faites avant celles du NPL 2.

0,21 %; 0,21 % et 0,20 %, l'accroissement moyen total étant 0,025 V, soit 0,19 %. Des contrôles effectués au NPL après le retour des lampes ont finalement montré qu'une partie des accroissements observés était simplement due au fait que les vis étaient moins serrées sur les bornes qu'à l'origine.

Les rapports des valeurs de l'intensité lumineuse donnés au tableau 5 pour la moyenne des trois bonnes lampes concordent remarquablement bien avec ceux indiqués pour la moyenne des quatre lampes, vraisemblablement parce que la lampe suspecte a vieilli plus rapidement mais de façon assez cohérente. Ces rapports sont en accord raisonnable

TABLEAU 9

Rapports des valeurs moyennes des différences de potentiel

Laboratoire	Référence : NPL			Référence : BIPM		
	Pour 4 lampes	Pour 3 lampes	Pour 3 lampes avec correction de vieillissement	Pour 4 lampes	Pour 3 lampes	Pour 3 lampes avec correction de vieillissement
BIPM	0,999 3	0,999 7	1,000 3	1,000 0	1,000 0	1,000 0
INM	0,999 6	1,000 0	1,000 2	1,000 3	1,000 3	0,999 9
NBS	1,001 0	1,000 8	1,000 6	1,001 7	1,001 1	1,000 3
CSIRO	1,001 3	1,001 0	1,000 4	1,002 1	1,001 3	1,000 1
NPL	1,000 0	1,000 0	1,000 0	1,000 7	1,000 3	0,999 7

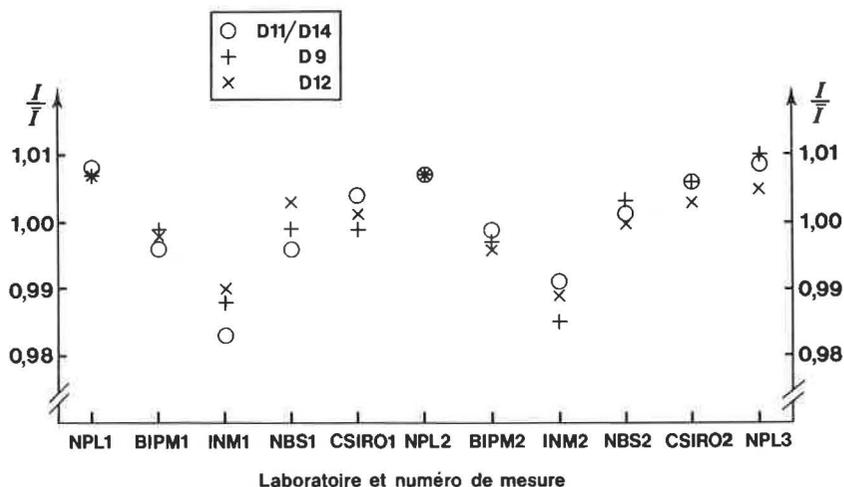


Fig. 1. — Rapports des valeurs de l'intensité lumineuse pour chaque lampe et dans chaque laboratoire, à la valeur moyenne des onze mesures effectuées sur la lampe considérée.

avec la moyenne de ceux des comparaisons de 1961 et de 1969 organisées par le CCPR, si l'on tient compte des problèmes de reproductibilité des lampes à ces occasions-là. Les différences internes, et la régularité avec laquelle elles se sont répétées, sont indiquées pour chacune des trois bonnes lampes à la figure 1. Ce schéma montre aussi la reproductibilité obtenue avec chaque lampe.

Les tableaux 5 et 9, qui résument pour chaque laboratoire les valeurs relatives des « unités » (candela et volt) comportent deux colonnes de valeurs qui ont été corrigées pour tenir compte de la dérive due au vieillissement, en s'appuyant sur les différences de vieillissement moyennes mentionnées ci-dessus; ce sont les meilleures estimations des grandeurs considérées. Il convient de remarquer qu'au contraire des autres laboratoires, le NBS n'a pas tenu compte du rayonnement de l'ampoule extérieur au masque placé sur la lampe. Les résultats du NBS risquent d'être trop bas d'un peu plus de 1 % que s'il avait été tenu compte de la totalité de la lampe avec masque.

Conclusions

La reproductibilité intrinsèque d'étalonnage obtenue avec les lampes NPL/GEC à forte intensité de courant est comparable à celle que l'on obtient avec les lampes Wi 41 G, mais les premières sont beaucoup plus robustes. Malgré une série de dix voyages par la poste dans un emballage ordinaire et dix séries d'essais et d'étalonnages, la variation moyenne totale de l'intensité lumineuse a été de $+ 0,09 \% \pm 0,11 \%$ seulement selon le NPL. Si l'on considère les variations observées après utilisation dans cinq laboratoires et cinq voyages par la poste, la variation moyenne trouvée par le BIPM, l'INM, le NBS, le CSIRO et le NPL a été de $+ 0,13 \%$ pour l'intensité lumineuse et $+ 0,20 \%$ pour la différence de potentiel, une partie de celle-ci étant tout simplement due au fait que l'on n'avait pas vérifié le serrage des vis sur les bornes. Les variations de l'intensité étaient nettement inférieures à celles que l'on a constatées lors des comparaisons de 1961 et de 1969 organisées par le CCPR, en dépit du traitement beaucoup plus long et beaucoup plus dur auquel ont été soumises les lampes pendant ces essais pratiques, traitement qui a comporté des accélérations allant jusqu'à 50 g. Les lampes NPL/GEC à forte intensité de courant constitueraient donc des étalons de transfert très appropriés pour la prochaine comparaison d'intensité lumineuse à 2 856 K organisée par le CCPR.

Bibliographie

1. BERRY, R. G. et CLARKE, F. J. J., Notes on a New Type of Photometric Standard of Luminous Intensity, NPL Leaflet, 1975.
2. CLARKE, F. J. J., Light sources for standards and applied photometry, *Proc. Soc. Photo-opt. Instrum. Engs.*, 146, 1978, pp. 76-80.

ANNEXE P 4

Comparaison internationale des « échelles » d'intensité lumineuse

par K. BISCHOFF et D. FÖRSTE

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (Rép. Féd. d'Allemagne)

(Traduction du Document CCPR/82-7)

Introduction

Lors de sa réunion en septembre 1977, le CCPR avait décidé d'effectuer une comparaison des « échelles » d'intensité lumineuse avec, comme étalons de transfert, des récepteurs $V(\lambda)$ et des lampes à incandescence. Huit laboratoires ont pris part à cette comparaison qui a commencé en octobre 1978 et s'est achevée en janvier 1981 :

Bureau International des Poids et Mesures (BIPM), Sèvres.

Conseil National de Recherches (NRC), Canada.

Bureau National de Métrologie : Institut National de Métrologie (INM) du
Conservatoire National des Arts et Métiers, France.

Istituto Elettrotecnico Nazionale Galileo Ferraris (IEN), Italie.

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

National Physical Laboratory (NPL), Royaume-Uni.

National Physical Research Laboratory (NPRL), Afrique du Sud.

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Rép. Féd. d'Allemagne.

La comparaison a été organisée de telle façon que les étalons de transfert (trois lampes et trois récepteurs) retournaient au laboratoire pilote (PTB) pour être réétalonnés après l'achèvement des mesures dans chaque laboratoire participant.

Étalons de transfert

On avait choisi et sélectionné, comme étalons de transfert de l'intensité lumineuse, des lampes Osram Wi 41G du type de celles qui sont livrées

depuis 1978 (filament sans crochets-supports maintenu suivant son axe horizontal de symétrie). Les lampes avaient été vieilles et leur stabilité contrôlée avant le début de la comparaison. Lorsqu'elles fonctionnent à intensité de courant constante, les lampes de ce type voient leur intensité lumineuse diminuer d'environ 0,01 % par heure de fonctionnement si, toutefois, la polarité de l'alimentation demeure inchangée (moins au plot central, suivant le choix du constructeur pour le vieillissement). Une douille spéciale avec prises de potentiel était fournie afin d'obtenir des informations sur la stabilité des lampes en mesurant la différence de potentiel. Pour les trois lampes expédiées aux participants, l'intensité du courant continu de 5,6400 A correspondait à une température de répartition de $(2\ 800 \pm 20)$ K, c'est-à-dire à la valeur convenue lors de la réunion du CCPR en 1977. Pour éviter qu'elles ne soient endommagées au cours des transports, les lampes étaient emballées dans une petite boîte assez lourde qui était placée dans une boîte plus grande et protégée par un rembourrage destiné à absorber les chocs.

Pour l'essentiel, les trois récepteurs $V(\lambda)$ utilisés étaient des cellules au silicium BPW 35 fabriquées par AEG-Telefunken, qui avaient été sélectionnées et pourvues de filtres en verre (du type totalement filtrant) par la Société Lichtmesstechnik à Berlin. Ces récepteurs étaient montés dans un étui en laiton avec un diaphragme de 8 mm de diamètre directement devant le filtre; la face éclairée de ce diaphragme servait de plan de référence pour calculer l'éclairement correspondant à l'intensité lumineuse connue d'une source étalon. On avait demandé à tous les participants d'effectuer les étalonnages de préférence à 23 °C et de mesurer le courant photoélectrique avec un instrument à basse impédance d'entrée. Comme on avait décidé de faire les étalonnages avec des sources ayant une température de répartition de 2 800 K, un désaccord entre la sensibilité spectrale relative $s(\lambda)/s(555\text{ nm})$ des récepteurs et $V(\lambda)$ était négligeable dans cette comparaison.

Résultats

Avant de considérer les valeurs d'étalonnage obtenues par tous les participants, il faut d'abord examiner celles du laboratoire pilote, puisqu'elles servent de référence aux premières. L'étalonnage des lampes à la PTB repose sur une réalisation de la candela faite en 1977; l'étalonnage des récepteurs a été fait en mesurant la sensibilité spectrale (à l'aide d'un récepteur à cavité et de récepteurs absolus) et en calculant la sensibilité pour $T_c = 2\ 800$ K et $K_m = 683$ lm/W. Les étalonnages principaux des récepteurs, au commencement et à la fin de la comparaison (en 1978 et en 1981 respectivement), ont conduit à une modification inférieure à 0,2 % en valeur relative du facteur de correction s'appliquant à la sensibilité photopique non-idéale des récepteurs; les étalonnages entre les mesures

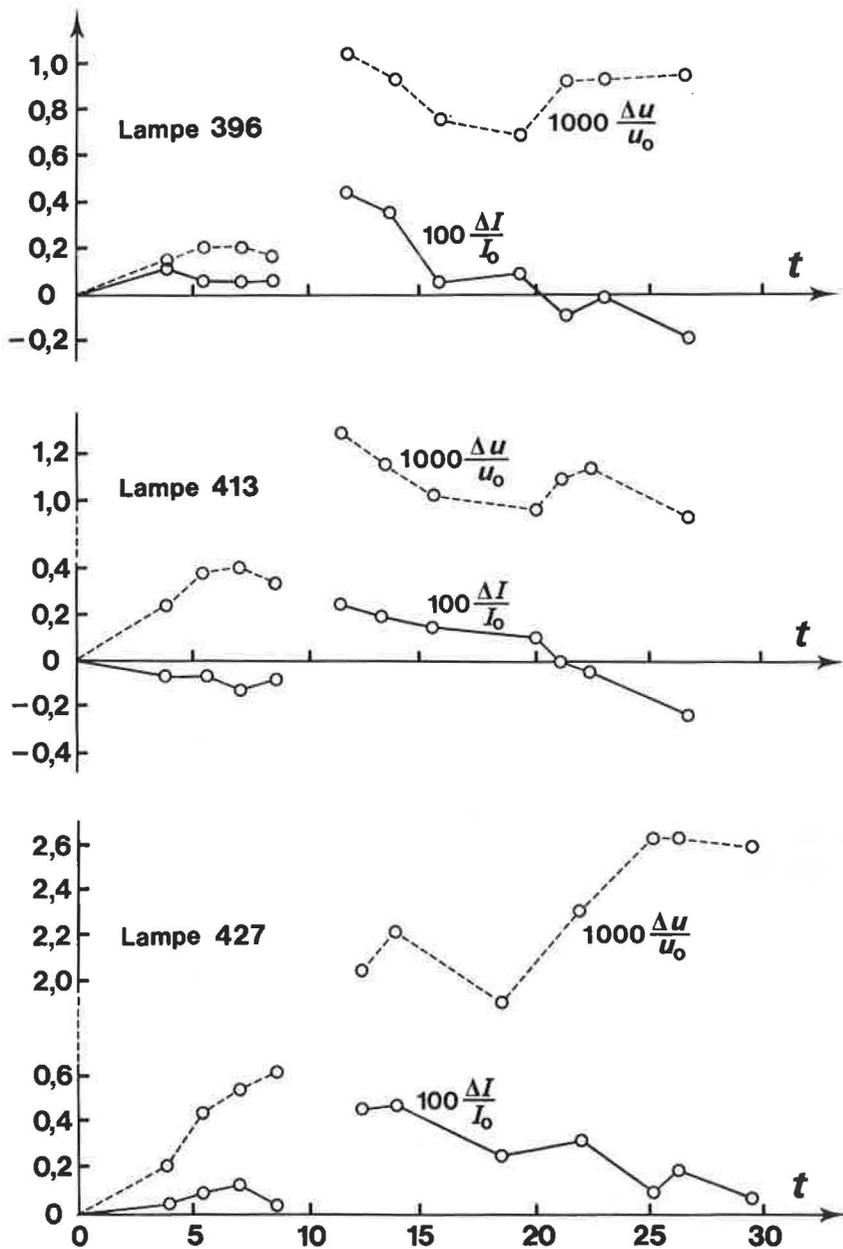


Fig. 1. — Variations relatives de l'intensité lumineuse I et de la différence de potentiel aux bornes des lampes u en fonction de la durée de fonctionnement t , en heures. (A $t \approx 10$, saut causé par un fonctionnement à polarité inversée).

effectuées par deux participants autres que la PTB étaient limités à une mesure de la sensibilité spectrale pour une seule longueur d'onde [λ (546 nm)].

Sur la figure 1, la variation relative de l'intensité lumineuse, ainsi que celle de la différence de potentiel aux bornes de la lampe à intensité de courant spécifiée, sont indiquées pour les trois lampes utilisées. La figure fait aussi apparaître le comportement de ces lampes après une période de fonctionnement à polarité inversée par erreur. Bien que les étalons de transfert aient dû être transportés très souvent, on ne peut attribuer à ces manipulations aucune modification des propriétés des lampes.

Le comportement des récepteurs $V(\lambda)$ n'a pas été aussi bon que celui des lampes. Peu de temps après le début de la comparaison, on a observé une diminution des sensibilités d'environ 0,5 % par an (voir figure 2). On suppose que cela est dû à une cristallisation du ciment utilisé pour coller les verres du filtre $V(\lambda)$.

TABLEAU 1

Valeurs de l'intensité lumineuse $I(x)$ en cd mesurées par le laboratoire participant x et rapports $R(x) = I(x)/I(\text{PTB})$

Laboratoire x	Lampe 396		Lampe 413		Lampe 427	
	$I(x)$	$R(x)$	$I(x)$	$R(x)$	$I(x)$	$R(x)$
PTB	238,0		239,9		235,3	
BIPM	238,4	1,001 5	240,1	1,001 3	235,8	1,001 9
PTB	238,1		239,7		235,4	
IEN	238,4	1,001 3	240,0	1,001 5	235,5	1,000 2
PTB	238,1		239,6		235,5	
NRC *	238,6	1,002 1	240,2	1,002 5	235,5	1,000 0
	239,7	1,002 9	240,9	1,001 7	236,8	1,002 1
PTB	239,0		240,5		236,3	
PTB **	238,1		240,2		235,9	
NBS	241,9	1,015 7	243,9	1,015 6	237,7	1,015 0
PTB	238,2		240,1		236,0	
NPRL	239,9	1,008 0	241,6	1,006 9	237,7	1,008 3
PTB	237,8		239,8		235,5	
NPL	239,5	1,006 7	241,2	1,005 8	237,2	1,006 6
PTB	238,0		239,8		235,8	
INM	234,6	0,986 8	236,1	0,985 6	232,4	0,986 4
PTB	237,5		239,3		235,4	

$$\bar{R} = \frac{3 + 21,060\ 8}{24} = 1,002\ 5$$

* Valeurs avant et après fonctionnement des lampes à polarité inversée.

** Après un vieillissement additionnel des lampes (4 à 6 heures).

TABLEAU 2

Valeurs de la sensibilité $s(x)$ en nA/lx mesurées
par le laboratoire participant x
et rapports $R(x) = s(x)/s(\text{PTB})$

Laboratoire x	Date	Récepteur 1		Récepteur 3		Récepteur 4	
		$s(x)$	$R(x)$	$s(x)$	$R(x)$	$s(x)$	$R(x)$
PTB	Oct. 78	12,80		12,90		12,71	
BIPM *	Déc. 78	(12,94)	—	(13,06)	—	(12,84)	—
PTB	Janv. 79	12,78		12,92		12,63	
IEN	Mai 79	12,86	1,005	12,96	1,004	12,70	1,005
PTB	Juin 79	12,82		12,90		12,64	
NRC	Juil. 79	12,81	1,004	12,89	1,001	12,61	0,999
PTB	Août 79	12,71		12,85		12,61	
NBS	Sept. 79	12,64	0,994	12,71	0,989	12,43	0,987
PTB	Oct. 79	12,72		12,84		12,58	
NPRL	Déc. 79	12,63	0,994	12,68	0,987	12,42	0,988
PTB	Fév. 80	12,70		12,86		12,55	
NPL **	Mai 80	12,74	1,002	12,80	0,996	12,58	1,003
PTB	Juin 80	12,72		12,85		12,53	
INM	Juil. 80	12,95	1,020	13,04	1,016	12,81	1,023
PTB	Août 80	12,68		12,81		12,52	
BIPM	Nov. 80	12,65	1,000	12,76	0,999	12,51	1,004
PTB	Janv. 81	12,63		12,73		12,41	

$$\bar{R} = \frac{3 + 21,020}{24} = 1,001$$

* Valeurs « BIPM, Déc. 78 » non utilisées (erreur sur la distance), voir « BIPM, Nov. 80 ».

** Valeurs corrigées pour les étalonnages faits à des températures inférieures à 23 °C :

$$\frac{1}{s} \cdot \frac{\Delta s}{\Delta T} = - 8 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}.$$

Les tableaux 1 et 2 donnent un résumé des résultats de la comparaison internationale. Les rapports $R(x)$ sont calculés en divisant les valeurs obtenues par le participant x par la moyenne des valeurs obtenues par le laboratoire pilote avant et après le voyage chez ce participant. Dans les tableaux 3 et 4, on donne, après multiplication par un facteur 100, les différences relatives entre les rapports $R(x)$ et la moyenne \bar{R} des 24 rapports.

Quand on compare les résultats, il faut tenir compte de l'incertitude relative de $\pm 0,2\%$ pour le réétalonnage de l'intensité lumineuse des lampes et des sensibilités des récepteurs.

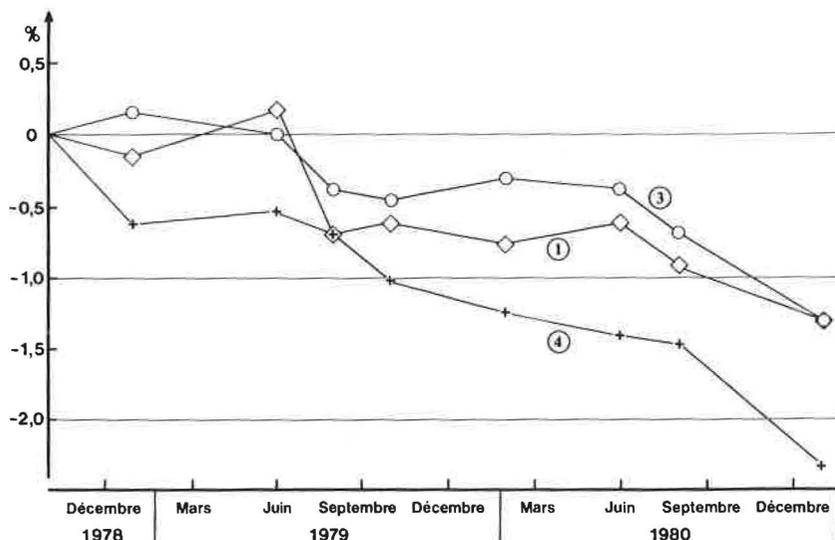


Fig. 2. — Variations relatives de la sensibilité des récepteurs n° 1, 3, 4 en fonction du temps.

Bien que, dans la plupart des laboratoires participants, l'« unité » d'intensité ou de sensibilité lumineuse soit encore fondée sur l'ancienne définition de la candela, alors que certains laboratoires ont établi leur « unité » à partir de récepteurs absolus, on ne peut pas classer les résultats d'après ce critère pour la présente comparaison.

TABLEAU 3

Différences relatives entre les valeurs de l'intensité lumineuse mesurées par le laboratoire participant x et la moyenne de toutes les valeurs

Laboratoire x	100 · [(R(x)/ \bar{R}) - 1]			
	Lampe 396	Lampe 413	Lampe 427	Moyenne
BIPM	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1
IEN	-0,1	-0,1	-0,2	-0,1
NRC	0,0	0,0	-0,1	-0,1
NBS	1,3	1,3	1,2	1,3
NPRL	0,5	0,4	0,6	0,5
NPL	0,4	0,3	0,4	0,4
INM	-1,6	-1,7	-1,6	-1,6
PTB	-0,3	-0,3	-0,3	-0,3

TABLEAU 4

*Différences relatives entre les valeurs
de la sensibilité mesurées
par le laboratoire participant x
et la moyenne de toutes les valeurs*

Laboratoire x	$100 \cdot [(R(x)/\bar{R}) - 1]$			
	Récepteur 1	Récepteur 3	Récepteur 4	Moyenne
BIPM	— 0,1	— 0,2	0,3	0,0
IEN	0,4	0,3	0,4	0,4
NRC	0,3	0,0	— 0,2	0,0
NBS	— 0,7	— 1,2	— 1,4	— 1,1
NPRL	— 0,7	— 1,4	— 1,3	— 1,1
NPL	0,1	— 0,5	0,2	— 0,1
INM	1,9	1,5	2,2	1,9
PTB	— 0,1	— 0,1	— 0,1	— 0,1

Conclusion

Ainsi qu'on peut le voir dans le tableau 3, les résultats de l'intensité lumineuse sont en assez bon accord pour un même laboratoire. De plus, les « unités » conservées dans les différents laboratoires sont en général en accord à $\pm 0,5\%$ près.

Il existe une dispersion inattendue des résultats des étalonnages des récepteurs (voir tableau 4) qui est peut-être en partie due à la dégradation des récepteurs. Mises à part les petites différences qui pourraient provenir partiellement des difficultés rencontrées pour mesurer les valeurs absolues de faibles courants avec des instruments à basse impédance, les valeurs moyennes figurant aux tableaux 3 et 4 concordent en général avec les informations déjà disponibles sur les valeurs des « unités » lumineuses utilisées par les laboratoires participants.

Si, lors de l'emballage, on se conforme à des règles matérielles simples pour protéger les lampes des chocs, même des lampes étalons à filament sans crochets-supports et à courant normal constituent des étalons de transfert étonnamment stables.

Mars 1982

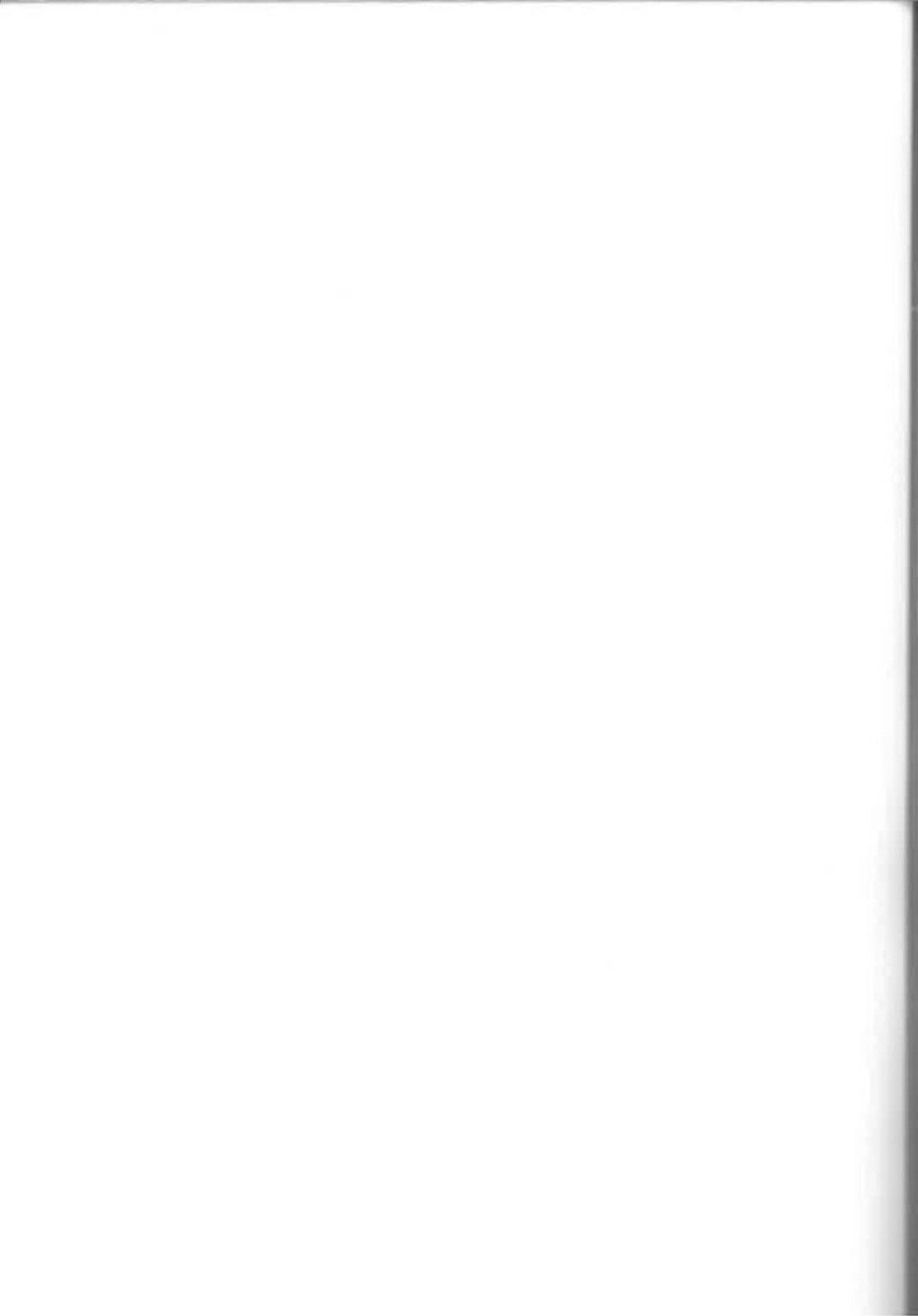


Notice for the reader of the English version

In order to make the reports of the various Comités Consultatifs more accessible to the many readers who are more familiar with the English language than with the French, the Comité International des Poids et Mesures has decided to publish an English version of these reports. The reader must however be aware that the official report is always the French one. The English version is published for convenience only. If any matter gives rise to controversy, or if an authoritative reference is needed, the French text must be used. This applies especially to the text of the recommendations submitted to the Comité International des Poids et Mesures.

Avertissement au lecteur de la version anglaise

Afin de rendre plus facile l'accès aux rapports des divers Comités Consultatifs pour de nombreux lecteurs qui sont plus familiers avec la langue anglaise qu'avec la langue française, le Comité International des Poids et Mesures a décidé de publier une version en anglais de ces rapports. Le lecteur doit cependant prendre garde au fait que le rapport officiel est toujours celui qui est rédigé en français. La version anglaise n'est publiée que pour faciliter la lecture. Si un point quelconque soulève une discussion, ou si une référence autorisée est nécessaire, c'est toujours le texte français qui doit être utilisé. Ceci s'applique particulièrement au texte des recommandations présentées au Comité International des Poids et Mesures.



HISTORICAL NOTE

Organs of the Convention du Mètre BIPM, CIPM, CGPM

The Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) was set up by the Convention du Mètre signed in Paris on 20 May 1875 by seventeen States during the final session of the Diplomatic Conference of the Metre. This Convention was amended in 1921.

BIPM has its headquarters near Paris, in the grounds (43 520 m²) of the Pavillon de Breteuil (Parc de Saint-Cloud) placed at its disposal by the French Government; its upkeep is financed jointly by the Member States of the Convention du Mètre.*

The task of BIPM is to ensure worldwide unification of physical measurements; it is responsible for:

- establishing the fundamental standards and scales for measurement of the principal physical quantities and maintaining the international prototypes;
- carrying out comparisons of national and international standards;
- ensuring the co-ordination of corresponding measuring techniques;
- carrying out and co-ordinating determinations relating to the fundamental physical constants that are involved in the above-mentioned activities.

BIPM operates under the exclusive supervision of the Comité International des Poids et Mesures (CIPM) which itself comes under the authority of the Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM).

The Conférence Générale consists of delegates from all the Member States of the Convention du Mètre and meets at present every four years. At each meeting it receives the Report of the Comité International on the work accomplished, and it is responsible for:

- discussing and instigating the arrangements required to ensure the propagation and improvement of the International System of Units (SI), which is the modern form of the metric system;
- confirming the results of new fundamental metrological determinations and the various scientific resolutions of international scope;
- adopting the important decisions concerning the organization and development of BIPM.

The Comité International consists of eighteen members each belonging to a different State; it meets at present every year. The officers of this committee issue an Annual Report on the administrative and financial position of BIPM to the Governments of the Member States of the Convention du Mètre.

The activities of BIPM, which in the beginning were limited to the measurements of length and mass and to metrological studies in relation to these quantities, have been extended to standards of measurement for electricity (1927), photometry (1937), and ionizing radiations (1960). To this end the original laboratories, built in 1876-1878, were enlarged in 1929 and two new buildings were constructed in 1963-1964 for the ionizing radiation laboratories. Some thirty physicists or technicians work in the laboratories of BIPM. They do metrological research, and also undertake measurement and certification of material standards of the above-mentioned quantities. BIPM's annual appropriation is of the order of 9 570 000 gold francs, approximately 17 400 000 French francs (in 1982).

* As of 31 December 1982 forty-six States were members of this Convention: Argentina (Rep. of), Australia, Austria, Belgium, Brazil, Bulgaria, Cameroon, Canada, Chile, China (People's Rep. of), Czechoslovakia, Denmark, Dominican Republic, Egypt, Finland, France, German Democratic Rep., Germany (Federal Rep. of), Hungary, India, Indonesia, Iran, Ireland, Italy, Japan, Korea (Rep. of), Korea (Dem. People's Rep.), Mexico, Netherlands, Norway, Pakistan, Poland, Portugal, Romania, Spain, South Africa, Sweden, Switzerland, Thailand, Turkey, U.S.S.R., United Kingdom, U.S.A., Uruguay, Venezuela, Yugoslavia.

In view of the extension of the work entrusted to BIPM, CIPM has set up since 1927, under the name of *Comités Consultatifs*, bodies designed to provide it with information on matters that it refers to them for study and advice. These *Comités Consultatifs*, which may form temporary or permanent « Working Groups » to study special subjects, are responsible for co-ordinating the international work carried out in their respective fields and proposing recommendations concerning the amendments to be made to the definitions and values of units. In order to ensure worldwide uniformity in units of measurement, the *Comité International* accordingly acts directly or submits proposals for sanction by the *Conférence Générale*.

The *Comités Consultatifs* have common regulations (*Procès-Verbaux CIPM*, 1963, 31, 97). Each *Comité Consultatif*, the chairman of which is normally a member of CIPM, is composed of delegates from the major metrology laboratories and specialized institutes, a list of which is drawn up by CIPM, as well as individual members also appointed by CIPM and one representative of BIPM. These committees hold their meetings at irregular intervals; at present there are eight of them in existence :

1. The *Comité Consultatif d'Électricité* (CCE), set up in 1927.
2. The *Comité Consultatif de Photométrie et Radiométrie* (CCPR), new name given in 1971 to the *Comité Consultatif de Photométrie* set up in 1933 (between 1930 and 1933 the preceding committee (CCE) dealt with matters concerning Photometry).
3. The *Comité Consultatif de Thermométrie* (CCT), set up in 1937.
4. The *Comité Consultatif pour la Définition du Mètre* (CCDM), set up in 1952.
5. The *Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde* (CCDS), set up in 1956.
6. The *Comité Consultatif pour les Étalons de Mesure des Rayonnements Ionisants* (CCEMRI), set up in 1958. In 1969 this committee established four sections : Section I (Measurement of X and γ rays, electrons); Section II (Measurement of radionuclides); Section III (Neutron measurements); Section IV (α -energy standards). In 1975 this last section was dissolved and Section II made responsible for its field of activity.
7. The *Comité Consultatif des Unités* (CCU), set up in 1964 (this committee replaced the « Commission for the System of Units » set up by the CIPM in 1954).
8. The *Comité Consultatif pour la Masse et les grandeurs apparentées* (CCM), set up in 1980.

The proceedings of the *Conférence Générale*, the *Comité International*, the *Comités Consultatifs*, and the *Bureau International* are published under the auspices of the latter in the following series :

- *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* (this collection for private distribution brings together articles published in scientific and technical journals and books, as well as certain work published in the form of duplicated reports).

From time to time BIPM publishes a report on the development of the Metric System throughout the world, entitled *Les récents progrès du Système Métrique*.

The collection of the *Travaux et Mémoires du Bureau International des Poids et Mesures* (22 volumes published between 1881 and 1966) ceased in 1966 by a decision of CIPM.

Since 1965 the international journal *Metrologia*, edited under the auspices of CIPM, has published articles on the more important work on scientific metrology carried out throughout the world, on the improvement in measuring methods and standards, on units, etc., as well as reports concerning the activities, decisions, and recommendations of the various bodies created under the *Convention du Mètre*.

AGENDA
for the 10th Meeting

1. Progress report on the CCPR explanatory document on photometric units and quantities (NRC).
2. Report on the trial circulation of NPL/GEC heavy-current standards of luminous intensity (NPL).
3. Report on the trial circulation of $V(\lambda)$ detectors and Osram Wi 41 G standards of luminous intensity (PTB).
4. Measurements of spectral radiance (NPL/NBS comparison).
5. Review of progress by national laboratories in implementing the new definition of the candela (Resolution 3, 16th CGPM, 1979).
 - 5.1. Standards of luminous intensity (or illuminance).
 - 5.2. Standards of luminous flux.
6. Planning of international comparisons to test the uniformity of the results of photometric measurements obtained with the new definition of the candela (Resolution 4, 16th CGPM, 1979).
 - 6.1. Comparisons of luminous intensity (or illuminance).
 - 6.2. Comparisons of luminous flux.
7. Review of progress by national and other laboratories in realizing first-level standards of basic radiometric quantities.
 - 7.1. Irradiance.
 - 7.2. Spectral concentration of irradiance.
 - 7.3. Spectral concentration of radiance.
 - 7.4. Other basic quantities.
8. Consideration of the scope of future CCPR activities, and of any need for additional international comparisons.
9. Consideration of long-term program for the BIPM in radiometry and photometry (CIPM/80-3).
10. Expression of experimental uncertainties in radiometry and photometry; consideration of CIPM Recommendation 1 (CI-1981).

11. Information on related work within the framework of the CIE (F. Rotter).
 12. Reports on other related researches.
 13. Diverse questions.
 14. Publication of documents.
-

REPORT
OF THE
COMITÉ CONSULTATIF
DE PHOTOMÉTRIE ET RADIOMÉTRIE
(10th Meeting — 1982)
TO THE
COMITÉ INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES

by O. C. JONES, Rapporteur

The Comité Consultatif de Photométrie et Radiométrie (CCPR) convoked its 10th meeting at the Bureau International des Poids et Mesures (BIPM), at Sèvres, where it held five sessions between Tuesday 28 and Thursday 30 September 1982.

Present at the 10th meeting of the CCPR :

W. R. BLEVIN, member of the CIPM, president of the CCPR.

Delegates from the member laboratories :

Bureau National de Métrologie, Paris: Institut National de Métrologie [INM] of the Conservatoire National des Arts et Métiers (J. BASTIE).

CSIRO, Division of Applied Physics [CSIRO], Lindfield (J. L. GARDNER).

Electrotechnical Laboratory [ETL], Ibaraki (N. OBA).

Institut National de Métrologie [NIM], Beijing (CHEN XIAJU).

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

National Bureau of Standards [NBS], Washington (K. D. MIELENZ, E. ZALEWSKI, D. McSPARRON).

National Physical Laboratory [NPL], Teddington (O. C. JONES, P. J. KEY).

National Physical Research Laboratory [NPRL], Pretoria (F. HENGSTBERGER).

National Research Council of Canada [NRC], Ottawa (G. WYSZECKI).

Office Fédéral de Métrologie [OFMET], Wabern (P. BLASER)/World Radiation Center [WRC], Davos (represented by P. BLASER).
Physikalisch-Technische Bundesanstalt [PTB], Braunschweig (D. HAHN, K. BISCHOFF, D. FÖRSTÉ).

The personally appointed members :

L. PLAZA (Madrid).
F. ROTTER (Wien).
J. SCHANDA (Budapest).
K. YOSHIÉ (Tokyo).

The Director of the BIPM (P. GIACOMO).

Invited :

A. CORRÓNS, Instituto de Optica Daza de Valdés [IOM], Spain.
R. D. LOZANO, [INTI], Instituto Nacional de Tecnología Industrial, Argentina.
J. ŽATKOVIČ, Československý Metrologický Ústav [CSMU], Czechoslovakia.

Also present :

J. TERRIEN, Director Emeritus; T. J. QUINN, Deputy Director and J. BONHOURS (BIPM).

Excused :

Amt für Standardisierung, Messwesen und Warenprüfung [ASMW], Berlin (H. LENK).
World Radiation Center [WRC], Davos (R. BRUSA).

Absent :

Institut de Métrologie D. I. Mendéléév [IMM], Leningrad.

The President opens the meeting; Mr Jones is designated as rapporteur.

1. Progress of the CCPR explanatory document on photometric units and quantities

Mr Wyszecki outlines the history and development of this document which is not intended to be a textbook on photometry, nor a duplication of the CIE documents which give much more detail. It is agreed that the document meets a well-defined need and that it should be published as an appendix to the Procès Verbaux of the present meeting (Appendix P 2) and also as a separate BIPM document; it will be published in *Metrologia* with abbreviated tables. A drafting group consisting of Mr. Wyszecki (convener), Mr. Mielenz, and Mr. Blevin is appointed to prepare the document for

publication. It is not necessary to circulate it again to members of the CCPR. Any further detailed suggestions for improvement should be submitted in writing to the drafting group.

2. Report on the NPL international circulation of heavy-current standard lamps for luminous intensity

Mr. Key states that the new lamps were developed jointly by the NPL and the General Electric Company (GEC). The objectives of the intercomparison were to prove the reproducibility of this type of lamp when sent by parcel post between different countries and to compare the luminous intensity values measured by different participants. The lamps proved to be very robust and were considered to be suitable for use in the next BIPM intercomparison of high-colour-temperature intensity standards. The relationship between intensity values assigned by participating laboratories was approximately as expected.

The report by Clarke and Berry on this intercomparison appears as Appendix P 3.

3. Report on the PTB trial intercomparison of $V(\lambda)$ -corrected detectors and Osram Wi 41 G lamps for luminous intensity

Mr. Bischoff points out that the report (Appendix P 4) is intended to assess the performance of lamps and detectors as transfer standards rather than as a comparison of intensity scales. The lamps performed very well and were robust enough to be sent by ordinary parcel post when properly packed. A reversal of polarity explained a minor discontinuity in the intensity-time characteristic for one participant. The results with detectors were somewhat less satisfactory, probably because the optical properties of the cement used in constructing the $V(\lambda)$ -filter had changed with time. It is hoped that replacement detectors received from the manufacturer will be more stable.

The President stresses that the filters, rather than the photodiodes themselves, caused the difficulty. He thanks both the PTB and the NPL for their efforts in organizing these intercomparisons and remarks that there are now two types of lamp that perform better than previously available lamps at this colour temperature.

4. Trial intercomparison of spectral radiance measurements between the NBS and the NPL

Mr. Key states that this work follows a 1975 proposal to investigate the use of an improved spectral radiance standard lamp developed by the NPL.

Of four lamps sent to the NBS in April 1982, two arrived safely and were measured by the NBS. These were received back at the NPL and, although measurements were not yet completed, were apparently undamaged. The results will be reported to the CCPR as soon as they are available.

5. Progress by national laboratories in realizing the new definition of the candela

Work programmes in accordance with Resolution 3 of the 16th meeting of the CGPM (1979) are discussed. The President reviews the situation revealed in the responses to a questionnaire circulated before this meeting. Mr. Bastie indicates that the INM is at present realizing the candela. Initial results suggest that the new unit will be smaller than the maintained unit by 1.5 %, a result which agrees with the conclusions of the recent NPL and PTB trial intercomparisons.

It appears likely that up to 16 national laboratories will have redetermined the candela according to the new definition before the next BIPM intercomparison takes place. Of these, a number, including the NBS and the INTI, plan to use both electrically-calibrated radiometers and self-calibrated silicon cell techniques.

Mr. Chen expects that the NIM candela unit will be altered by about 1 %. After some discussion of Document CCPR/82-8, the President notes the good work that has been done at the NIM, including the development of new gas-filled standard lamps. For the NPL, Mr. Jones says that the « as maintained » unit corresponds to a K_m value of 686 lumens per watt rather than the accepted value of 683 lumens per watt. Nevertheless, the NPL prefers to await the outcome of the next intercomparison and also the new NPL realizations by absolute radiometer techniques, before deciding whether a change in its maintained unit is necessary. Mr. Hengstberger points out that the NPRL realizes the candela continuously because all measurements are done using one of six absolute radiometers, rather than secondary standard lamps. Mr. Wyszecski says that the NRC uses absolute radiometers to calibrate silicon diodes which are then used with calibrated $V(\lambda)$ filters. A check is made on the response of the combined unit. Mr. Blaser will base his determination on an absolute radiometer supplied by Davos. The sensitivity of this is low and so a laser source will be used as an intermediate step in calibrating $V(\lambda)$ -corrected silicon cells. Mr. Plaza considers that the new IOM candela would be about 1 % smaller than the previously-used BIPM 1952 world mean value.

The President comments that some 13 laboratories are about to redetermine the candela. This is a clear indication of the stimulating result produced by the adoption of the new definition of the candela.

Mr. Oba presents Document CCPR/82-5. The ETL lumen for lamps of colour temperature 2 800 K is believed to be close to the SI unit. At

2 353 K, however, the previously maintained unit was 1.4 % larger than the new unit. Mr. Soardo presents Document CCPR/82-11 describing a goniophotometer with an uncertainty of 0.3 %. An annular prism reflector is used to avoid flux absorption by the lamp socket. In the future, the IEN proposes to use the goniophotometer together with intensity standards in order to maintain the flux unit. Mr. Hahn reports a similar approach by the PTB. Other laboratories express similar intentions.

6. Organization of future international comparisons of luminous intensity measurements

The President refers to Resolution 4 of the CGPM (1979) which stresses the necessity of establishing the uniformity of the results of photometric measurements based on the new definition of the candela. It appears that nine of the 13 laboratories responding to the questionnaire expressed a wish to have both flux and intensity intercomparisons. He stresses that there are two purposes of such intercomparisons, as discussed in question 9 of Document CCPR/82-1. The first « scientific » purpose is to ensure the closest approach of practical realizations of the candela to the SI definition. The second purpose is to establish for « commercial » reasons the relationship between the units maintained by the different laboratories for dissemination. He suggests that national laboratories should report two sets of values for lamps used in intercomparisons. The first should be based on the best absolute determination carried out by the laboratory and the second should quote values based on « as-maintained » units. For some laboratories, the first and second sets of values would be the same.

Mr. Jones argues that there is danger of confusion in reporting in this way. The activities should be separated. Laboratories should always report values in terms of their « as-maintained » units which are known with least uncertainty. Results of recent absolute determinations should be reported either by publication in the literature or by separate communication to the BIPM of the correction factor required. Mr. Hahn remarks that, ideally, scientific values should agree with the as-maintained values, but this is not always convenient in practice. Mr. Wyszeccki is only interested in scientific values. Others stress the importance to industry of a knowledge of the relationship between as-maintained values of different countries.

Mr. Giacomo believes that the BIPM should place emphasis on long-term control and that, consequently, only those laboratories that have made absolute measurements should participate in the intercomparisons. Other laboratories should participate in a separate exercise : he wishes to avoid mixing the two activities together. The President says that the BIPM should disseminate the « best scientific values available ». Mr. Terrien suggests that the BIPM may be able to adjust the values of the lamps which

conserve the 1952 world mean value following the next intercomparison, assuming that it is successful.

Mr. Quinn points out the analogy between the present discussion and those which took place in the Comité Consultatif de Thermométrie before the IPTS was invented. Two different topics are being confused. The President responds that only a few of the major national laboratories have based their maintained photometric units on the means of previous international comparisons and Mr. Hahn argues that an international practical photometric scale does not yet exist : more work is required first. Mr. Förste thinks that if the BIPM does not establish differences between the as-maintained units, then other organizations will undertake to do this work.

In summing up, the President says that only laboratories that have realized the candela according to the new definition may participate in the next intercomparison, and that the emphasis should be on establishing the best scientific value of the SI unit. He puts forward a compromise proposal in which each laboratory that has realized the candela should report :

- a) lamp values based on its own best scientific realization of the unit,
- b) values based on its « as-maintained » or nationally disseminated unit,
- c) values based on other relevant work, e.g. blackbody source determinations.

The use to which these data are to be put will be decided only when the results of the intercomparison are known. A Working Group is to be set up to establish the necessary detailed arrangements. This proposal was passed without dissent.

It is also agreed that the BIPM should continue to serve as the organizing laboratory for international comparisons of luminous intensity and flux.

The President draws attention to questions 12 and 13 in Document CCPR/82-1. The responses suggest that the first choice of transfer standard device is a set of gas-filled standard lamps. The second choice is a $V(\lambda)$ detector. Three types of lamp are proposed : NPL/GEC, Osram Wi 41 G, Japanese quartz halogen lamps. Another possibility is to use both lamps and detectors. After some discussion, a narrow majority favours using lamps alone for the next intercomparison.

The next consideration is whether only one type of lamp should be used for the high-colour-temperature intensity comparison. Mr. Jones considers that the use of two types, 4 lamps of each, would be preferable in view of previous unfortunate experience. Mr. Key adds that batch-to-batch variations in manufacture may occur with any lamp that is produced in small quantities. Some laboratories indicate a reluctance to purchase new lamps in addition to those that they already possess. Although a saving in effort might be possible if a round-robin type of comparison were adopted, it is decided that the previous style of intercomparison should be retained.

Mr. Bonhoure says that the BIPM could deal with two types of lamp and suggests one batch of six or two batches of three or, preferably, four each, would be suitable. Mr. Schanda wishes at least three of the participating laboratories to use both types of lamp. In fact, five laboratories indicate willingness to do so (CSIRO, NBS, NPL, INM, NPRL).

Mr. Gardner says that quartz halogen lamps had been found to be satisfactory at CSIRO and were approximately 1/6 of the cost of the NPL/GEC or Osram lamps. Mr. Oba says that it would probably be necessary to select lamps in order to provide intensity standards with adequate uniformity of field : possibly only 10 % of the quartz halogen lamps would be suitable. It was concluded that only Osram and NPL/GEC lamps would be used. NPL will undertake to supply NPL/GEC lamps that have been checked to ensure satisfactory performance to any countries wishing to use them. The President invites potential customers to inform NPL and PTB of the numbers of lamps likely to be required. (Figures given are : Osram lamps : 58, NPL/GEC lamps : 50, GEC (flux) lamps : 21.) He also proposes a time scale for the comparison, which should be completed by mid-1985.

It is agreed that a colour temperature of $2\ 800\text{ K} \pm 30\text{ K}$ shall be adopted. The lamps will be operated at a fixed distance of 2.5 m, under constant current conditions and with fixed polarity. A minimum ageing period is to be recommended, although participants are responsible for ensuring the stability of the lamps that they send to BIPM. Recommended alignment techniques and minimum warm-up times will also be provided. The reported results shall be luminous intensity values for the lamps. The dimensions of the detector and its angular response characteristic are also to be reported. A Working Group consisting of representatives of the BIPM, NPL and PTB is appointed to plan the intercomparison in greater detail, and to sort out any problems arising during its execution. The BIPM member is to be the convener.

7. Future international comparisons of luminous flux measurements

It is agreed that only laboratories that have realized the lumen starting from the present definition of the candela shall be allowed to participate in the next flux intercomparison. Other interested parties may send lamps to the BIPM later. Both « scientific » and « as-maintained » values should be reported, as agreed, for the luminous intensity calibration. The lamps to be used are the high-colour-temperature, gas-filled, GEC flux standards, the power rating probably being 200 W, but to be confirmed. Nominal colour temperature is 2 750 K but the possibility of operating these at 2 800 K is to be considered. Details of a suitable socket are to be specified and participants must indicate any deviation from this specification.

The flux intercomparison may proceed simultaneously with the

intensity intercomparison. However, separate reports shall be issued by the BIPM so that the results of the intensity comparison may be known without the necessity of awaiting the completion of the flux comparison. Groups of six lamps are to be used by each country. In this intercomparison, the BIPM is to be assisted by the same Working Group appointed for the luminous intensity intercomparison.

8. Progress in establishing primary standards for radiometric quantities

Mr. Key refers to Document CCPR/82-10. A low-temperature electrically-calibrated radiometer has been compared with silicon diode detectors from the NBS, of which the absolute quantum efficiency has been determined. Agreement to within $\pm 0.2\%$ was achieved. The NPL is now constructing a smaller, simpler and more convenient version of this radiometer. Mr. Quinn reviews the development of the NPL absolute radiometer. It has been used to determine the Stefan-Boltzmann constant, yielding a value that agrees with the calculated one to within $\pm 10^{-4}$. Its large size results from the use of a blackbody radiator operating at 273 K : most of the power is emitted at long wavelengths. The President comments that his determination of the Stefan-Boltzmann constant at the gold point also agreed with the calculated value, but there may be problems at still higher temperatures.

Most participants have reported progress in Document CCPR/82-4, but some additional points are made. Mr. Bastie is continuing the development of an electron-beam absolute radiometer. Mr. Oba refers to the use of synchrotron radiation from a storage ring as a standard source. The ETL has also developed a silicon carbide radiator as a high temperature source. Mr. Zalewski draws attention to measurement of the solar constant from space-borne instruments by the California Institute of Technology. An accuracy of $\pm 0.1\%$ is sought and observations will continue over a complete solar cycle of 11 years. Mr. Chen mentions the development of a room-temperature blackbody standard source. Mr. Hengstberger has automated the NPRL absolute radiometer and is developing techniques for measurements of pulsed laser energy.

The NRC has produced a series of electrically-calibrated absolute radiometers requiring only one correction to give 0.1% uncertainty. Comparisons with self-calibrated silicon detectors agreed to $\pm 0.1\%$. Work proceeds on determination of absolute spectral irradiance by using calibrated silicon diodes with laser lines. Mr. Blaser has been using an absolute radiometer supplied by the World Radiation Center, Davos.

The PTB 3 000 K blackbody source has been improved to remove water vapour absorption. A comparison of the relative spectral power distributions of synchrotron and argon-arc radiation has been completed. The BESSY

storage ring provides 800 MeV electrons at a current of 100 mA. Specular-cone absolute detectors for high-power laser measurements provide an uncertainty of $\pm 0.2\%$. Irradiances up to 1 W/cm^2 for solar voltaic cell calibrations are available.

Mr. Jones enquires whether anything is known about the long-term stability of absolute radiometers over a period of, say, 10 years. The replies indicate that gold-black coatings may be unreliable, but that 3-M absorbing paint that has been baked and allowed to stabilize for some months may maintain its reflectance constant to a few tenths of a percent. Mr. Hengstberger says that the use of a BeO target in place of the usual mica substrate gives a great improvement in spacial uniformity of response across an absolute radiometer's absorbing surface.

9. Self-calibrated silicon photodiodes

Mr. Zalewski considers that a knowledge of the detailed physics of silicon and other semiconductor photodiodes should now enable the quantum efficiency in the visible spectrum to be established to a few parts in 10^4 . Further work is required to improve accuracy in the ultraviolet region and to check the performance of types of semiconductor other than silicon. Spectral reflectance may be predicted simply from a measurement of oxide thickness. Mr. Corróns says such techniques are easier to use than, and almost as accurate as, pyroelectric absolute radiometers. Mr. Hahn states that the PTB is studying the use of germanium detectors in the infrared and gallium arsenide detectors in the ultraviolet. Mr. Schanda wants more sensitive devices that do not require laser irradiance levels. Mr. Zalewski describes how forming four UDT* detectors into a light trap avoids the necessity of making a correction for reflected radiation. The quantum efficiency of this device is $0.999 \pm .002$ from 407 to 676 nm.

10. Synchrotron radiation

Mr. Bastie has used the ACO** synchrotron source to calibrate deuterium lamps and argon arcs. The relative spectral power distribution is well known but the absolute value of the radiation is deduced from the number of electrons with an uncertainty of $\pm 10\%$. A calibrated silicon photodiode with a filter at 680 nm is used to provide an absolute reference. Agreement with the usual INM scale is found from 200 to 350 nm. Mr. Oba reports that a limited series of measurements has been carried out over the past eight years, but the results have a rather high uncertainty.

* United Detector Technology,

** Anneau de collision d'Orsay.

Now the ETL has an electron storage ring and a more ambitious programme is starting.

Mr. Mielenz says that a filtered silicon diode has been compared with radiation from the NBS storage ring, in which the current is determined by a counting technique. Irradiance at 600 nm was in agreement to $\pm 1\%$ with the existing NBS scale. The interference filter was unstable. Mr. Key refers to the NPL experience over the past 10 years and recent collaboration with the INM and the ACO. A small water-stabilized argon arc is used as a working standard which, when constructed to specification, produces a spectral power distribution which is reproducible with an uncertainty of $\pm 1\%$ from 170 to 350 nm. Collaboration is also in progress with the PTB (Berlin) and BESSY*. The President suggests that the NPL argon-arc standards should be measured using absolute thermal detectors. Mr. Bischoff reports on VUV intercomparisons. The PTB (Berlin) will compare blackbody sources with BESSY, so as to check the Schwinger equation. The current will be determined absolutely by counting electrons.

11. Spectral radiance and irradiance standards

Mr. Gardner says that the CSIRO 1975 scale in the visible region will be supplemented by a higher-temperature blackbody to provide radiance and irradiance standards in the UV.

Mr. McSparron says the NBS capability covers the following ranges. For radiance: deuterium lamps from 200 to 350 nm and quartz halogen lamps from 250 to 600 nm (later to be extended to 2 μm). Spectral-radiance standard lamps are available from 225 to 2 500 nm (later to be extended to 14 μm).

Mr. Key uses deuterium lamps routinely to provide spectral radiance and irradiance standards to 200 nm. An improved quartz halogen lamp with good field uniformity is also under development as a transfer standard. For spectral radiance, a new inverted design of tungsten-ribbon lamp has been found to be relatively noise-free.

Mr. Wyszecski says that the NRC has a new spectroradiometer operating between 185 and 5 000 nm, with full automation. Silicon diodes are calibrated spectrally using absolute radiometers and laser lines. A penthouse observatory has instrumentation for total and spectral solar radiation measurements. A Fourier transform spectrometer for infrared measurements between 500 and 100 000 nm is in operation. Mr. Plaza says that the 1979 IOM spectral irradiance scale for the visible region has now been extended to cover the UV and IR, with full automation.

Mr. Wyszecski enquires over what wavelength range does the interest of

* Berliner Elektronenspeicherring-Gesellschaft für Synchrotronstrahlung m.b.H.

the CCPR extend. The President thinks this depends upon the expertise available within the CCPR: decisions are taken depending upon the usefulness of any proposed activity. Mr. Jones thinks that measurements might extend to 40 μm in support of energy conservation programmes. The NPL is developing suitable reflectance standards. Mr. Giacomo points out that the Comité Consultatif d'Électricité (CCE) is responsible for laser power measurement and that there is also an RF Working Group of the CCE with interests in the GHz region. Mr. Hengstberger believes that it is important to check consistency between the power scales used by infrared radiometrists and microwave radiometrists.

A Working Group consisting of representatives of the NRC (convener), NPL and NBS is appointed to advise the CCPR whether it should extend its activity into the far-infrared region of the spectrum.

12. Future activities of the CCPR and requirements for additional intercomparisons

The President enquires if there is a need for an intercomparison of spectral radiance measurements. Six laboratories prefer to defer such activity until after the two photometric comparisons are completed. Seven laboratories have an interest in further radiometric intercomparisons. The NPL and NBS are at present engaged in a limited intercomparison to establish the performance of the new NPL lamp. Mr. Key asks who would be interested in a spectral intercomparison in one or two years' time. The CSIRO and NBS indicate interest. Mr. Lozano prefers to await improvements in silicon detector measurements. Mr. Hahn points out that the PTB is moving equipment and will not be ready within two years.

Mr. Zalewski discusses the possible circulation of unfiltered silicon diodes to be measured at one wavelength (633 nm). The absolute spectral responsivity is the quantity to be measured. The NBS could circulate devices in 1984. There is also some CIE interest in this topic, although the CIE is more interested in relative spectral measurements. Mr. Schanda says that such measurements made in industry cannot yet give tristimulus values to $\pm .001$. Some twelve laboratories express a willingness to participate in 1984. Mr. Key considers that a measurement at two wavelengths, including one in the green region, would be worth the extra effort. Mr. Hahn considers that there is sufficient activity planned for the present. This is agreed.

A spectroradiometric working group is appointed for the silicon cell intercomparison and the spectral radiance intercomparison, led by the NBS and with representatives from the NRC and the NPRL plus Mr. Schanda as members.

The President asks whether the PTB wishes future $V(\lambda)$ -corrected detector comparisons to be planned. Mr. Hahn thinks further examination

of the devices is necessary first. Spectrophotometric measurement of $V(\lambda)$ filters should also be included but this is too much work. It is agreed to postpone this activity.

13. Long-term programme for the BIPM in radiometry and photometry

Mr. Quinn draws attention to Document CIPM/80-3. There are no plans to increase the present staffing level in these fields : CCPR advice is sought. The President wishes to discuss specific items only, but he feels that the BIPM facilities should be maintained. Mr. Wyszecski points out that, below a certain minimum level of activity, work becomes non-viable. If the BIPM discontinues this activity, the NRC would be prepared to accept other laboratories as conveners of international comparisons. Mr. Jones asks how the present BIPM photometric work-load is composed. Mr. Bonhoure reports that 90 % of the effort is on routine calibrations undertaken for outside laboratories. Thirty or forty lamps per year are calibrated, on average, for four different countries. Ten countries rely on the BIPM for their traceability to the SI base unit. Additional effort is required to undertake international comparisons. Mr. Schanda wonders why more countries do not rely on the BIPM traceability. Certainly this BIPM service is essential to some countries.

Mr. Jones believes that changes in photometric and radiometric techniques mean that the BIPM expertise should be updated to meet future requirements, for example, in spectroradiometry, self-calibrating detectors, etc. Mr. Mielenz agrees : he suggests the addition of a junior physicist to the staff. Mr. Rotter says Austria depends on the BIPM and wishes to see a modern capability there. Others argue that the main task of the BIPM is to organize international comparisons. The national laboratories have had to reduce research effort in recent years in favour of routine activities and the same trend should be reflected in the BIPM. In view of the importance of photometric measurements to society, compared with other activities, there may be a need to redistribute BIPM resources. Mr. Schanda draws a different conclusion. BIPM activities should reduce the need for work in national laboratories. Economies could result by leaving the BIPM to disseminate standards and by national laboratories agreeing to share research fields. The BIPM does not need to realize units, merely to compare different countries' units. Mr. Soardo agrees. He emphasizes the importance of the BIPM in influencing governments on metrology matters. BIPM activity in this field should continue.

Mr. Lozano points to the future increase in importance of detectors as transfer standards. It may be necessary to replace lamps by detectors in the future and this is a significant change. In the future, too, it may be necessary for the BIPM to maintain infrared standards relevant to solar energy work. Mr. Hengstberger says that radiometry is a difficult field in

which to obtain good accuracy and the present effort allocated at the BIPM appears inadequate. Mr. Plaza also believes the BIPM should have a good capability in the field and suggests an additional physicist.

Mr. Giacomo asks the CCPR to foresee the best way for the BIPM to maintain its units over the next ten years. In general, the BIPM waits until techniques have been fully developed by national laboratories before adopting them. What new developments are expected? Which is the most fruitful field in which development should occur? Mr. Zalewski thinks that spectral irradiance, spectral transmission and spectral response measurements will be important in the future and that intercomparisons will be required. Mr. Hengstberger and Mr. Wyszecski agree. It is considered that a shift of effort from other areas of BIPM activity may be implied.

The President stresses that the CIPM welcomes guidance on what the BIPM should be doing in this field. Both large and small national laboratories want informed advice from the BIPM to continue. There must, therefore, be a minimum of one adaptable scientist at the BIPM in this field and some kind of research activity on which he is occupied. He agrees that the present effort is below the critical threshold. Mr. Quinn outlines the importance of some research in ensuring that the quality of work is maintained. This is BIPM policy, but the problem is to select appropriate areas. Mr. Hahn remarks that if the BIPM cannot expand, effort can only be transferred. This may only shift the problem from one field to another. Mr. Jones wonders whether suggestions to abandon the candela as an SI base unit, together with the low effort at the BIPM, indicate a lack of enthusiasm for this field in the CIPM. Mr. Terrien reassures him: the status of the candela does not affect the need for calibrations. Mr. Giacomo believes that the CIPM and the CGPM will see the need to continue providing photometric and radiometric services. The difficulty is to estimate the correct balance. Increases in effort must be justified.

The President proposes to make a Recommendation to the CIPM and appoints a working group to draft it (MM. Jones, Hengstberger, Mielenz, and Quinn). This is done and both English and French versions of Recommendation P 1 (1982) are prepared and agreed.

14. Activities of the International Commission on Illumination (CIE)

Mr. Rotter reports that TC 1.2 (Photometry and Radiometry) and TC 2.2 (Detectors) met the 23 and 24 of September in Berlin. Documents about to be published include the revision of CIE 18 «The Basis of Physical Photometry» and a new document on «Spectroradiometry of Light Sources». Preliminary results of an intercomparison of high-pressure mercury-vapour lamp flux measurements show agreement to within $\pm 2\%$. A comparison of measurements on light-emitting diodes (LED's)

has just started. Eight more documents are planned. Close collaboration with the CCPR will be maintained.

Mr. Schanda asks whether the CCPR should be concerned with properties of materials or whether this should be left to the CIE. Mr. Blevin says that CCPR is mainly concerned with units rather than with dimensionless quantities, but standards for diffuse reflectance have been discussed in the past. Mr. Quinn says this is a difficult question. In general, the BIPM tries to assist national laboratories wherever possible, but involvement with certified reference materials has been avoided in the past. Mr. Mielenz comments that the CIE is no further advanced in respect of work on infrared materials than is the CCPR.

Mr. Terrien draws attention to work on the revision of the 4th edition of the CIE Vocabulary which is near completion. New quantities, such as spherical and cylindrical exposure, are to be included, and a new class of photon quantities is introduced. When biological quantities are defined in the future the equivalent factor to K_m is to be dimensionless and preferably equal to unity. This follows CCPR Recommendation P 1 (1977) which was later endorsed by the CIPM.

15. Other research

Mr. Žatkovič presents Documents CCPR/82-20 and 21 relating to distribution-temperature calculations. The optimum choice of the two wavelengths used in this method is discussed.

Mr. Wyszecki says that the CCPR has previously discussed the fundamental basis of photometry. He wishes to draw attention to fresh evidence of the inadequate correlation between luminance and brightness. Discrepancies of up to 400 % may arise when dealing with measurements of LED's, visual displays, etc. among modern developments in electro-optics. The NRC is examining the relevance of photometry to modern needs. An improved model of the visual mechanism should include both \bar{x} and \bar{z} functions as well as well as $V(\lambda)$. This is foreshadowed by the previous adoption of all three colour-matching functions by the CIPM. This problem is urgent for engineers in industry. The CIE vision committee will propose a scheme in one year's time that will enable a more correct conversion from luminance measurements to the brightness information that is required. A full solution will take 10-15 years. Mr. Hahn reports that the PTB is also studying such problems. Mr. Schanda says that difficulty arises with white sources such as three-band fluorescent tubes. The present colorimetric system based on \bar{x} , \bar{y} , \bar{z} is not adequate and needs alteration.

Mr. Terrien says the problem of establishing a scale of brightness for human beings is not solved; the CIE Technical Committee is still working on it. The quantities that we are trying to measure now are artificial, but they are at least simple and accepted by everyone, although they do not

satisfy all requirements. The CIE Document n° 1, « Light as a True Visual Quantity: Principles of Measurement », provides helpful comments. Mr. Wyszecki remarks that there are two philosophies: he personally believes that light can be measured, but others think the opposite. Mr. Lozano draws attention to CIE Document n° 18 which provides acceptable definitions. Since light concerns human beings, no general solutions are likely to appear. We must deal with specific problems as they arise. The President says that the CCPR is concerned with precise and accurate objective measurements. The CIE is now forming a model of a different quantity which may relate to brightness better than luminance does. When this is established, and, if it is susceptible to objective measurement, the CCPR should attempt to develop techniques to facilitate its use in precise metrology. Mr. Wyszecki does not foresee any major change. The basic measurement method will remain spectroradiometric. Subsequently, mathematical procedures more complex than multiplication by $V(\lambda)$ and integration may be introduced. The new quantity will probably be obtained by a non-linear combination of three such integrals. Mr. Terrien believes the problem may be more complex for other biological actinic effects. For example, for those for which the additivity law is obeyed less closely than is the case for vision.

Mr. Förste refers to the previous mention of very large discrepancies. What is the spread between observers? Mr. Wyszecki says that the effect is not just an increase in scatter; there is a systematic shift away from results obtained using only $V(\lambda)$. Mr. Plaza points out that the CIE observer has been very useful for over 50 years. Perhaps it is time to replace it by a better one. The President sums up by saying that the CCPR is very interested in CIE pioneering work, but this is not yet ready for exploitation by the CCPR.

16. Statement of experimental uncertainties

Mr. Giacomo presents Document CCPR/82-12, referring also to a clear exposition given in a BIPM paper* to the « Second International Conference on Precision Measurement and Fundamental Constants » in 1981 and to the WECC **/PTB draft code of practice. He does not agree in detail with the latter, but finds it generally acceptable. The main conclusion is the need to abandon classification into systematic and random uncertainties. « Systematic uncertainty » is not a valid concept and is to be dropped in the future. Then all uncertainties may be treated mathematically using the same techniques that have been developed for use with random uncertainties. Hence, we can continue to use standard

* J. W. MÜLLER, The Assignment of Uncertainties to the Results of Experimental Measurements.

** Proposal for a WECC (Western Europe Calibration Cooperation) Code of Practice for the Calculation of Uncertainties in the Field of Electrical Measurements.

deviations, etc. The very vague concept of « uncertainty limits » is replaced by a more meaningful parameter. The « confidence interval » is obtained from the combined standard deviation by multiplication by a suitable factor so as to obtain a prediction of the probability that a result will fall inside the quoted interval. It is, of course, still essential to give a complete list of all component uncertainties. The CIPM did not immediately endorse the INC-1 Recommendation, but recommended a trial period of use in BIPM intercomparisons before making a decision. The President says that the CCPR should quote 1-sigma uncertainty in the future and combine uncertainty components quadratically. He asked whether it is agreed to adopt this method. Mr. Wyszecski says it is a commendable initiative, but he asks how it is proposed to determine the values of previously termed « systematic uncertainties » which must now be « estimated by any other means ». How is this to be done ? Unless this is clear, does it matter how they are combined ? Mr. Giacomo replies that « guesstimating », or estimating uncertainties on the basis of previous experience in difficult situations, may still be done as previously. The change is in the method of combining these estimates. Mr. Mielenz says that the NBS would face a problem in applying this new method. The manner in which uncertainties are stated on NBS reports is closely controlled, according to recommendations of a group of NBS statisticians. The President asks that participants in the next international comparisons do their best to conform with the new proposals on statement of uncertainty.

17. Publication of documents

Mr. Quinn says that, in order to speed up publication of the Procès-Verbaux and to reduce secretarial/editorial effort, future Consultative Committee reports may include only a small number of working documents. Papers of transient importance, or those that are intended to be published elsewhere, should not be included. A list of all working documents for the meeting will appear in the Procès-Verbaux and copies may be obtained subsequently on application to the BIPM.

Mr. Schanda requests that a brief report of the meeting be made available for publication in the CIE Journal. Mr. Giacomo says this is in order. It is also permissible for any member to publish in appropriate journals so as to make the work of the CCPR known to a wide public. As Director of the BIPM, Mr. Giacomo submits a report to *Metrologia*.

*
* *

The President thanks all for their active participation and closes the meeting.

18 October 1982

Recommendation
of the Comité Consultatif de Photométrie et Radiométrie
submitted
to the Comité International des Poids et Mesures

Development of photometry and radiometry at BIPM

RECOMMENDATION P 1 (1982)

The Comité Consultatif de Photométrie et Radiométrie,
considering

— that there have been recent changes in the pattern of demand for photometric and radiometric measurements, arising especially from the world-wide growth in importance of electro-optical industries,

— that the Bureau International des Poids et Mesures has played and should continue to play a key role in providing traceable standards in support of such measurements, by conducting international comparisons and supplying calibrated standards and advisory services,

— that the accuracies currently required by industry in these fields often approach the best capability of national laboratories,

— that fundamental changes are taking place in the radiometric techniques used to provide traceable standards, for example, the use of absolutely calibrated detectors of various types and the adoption of spectroradiometric methods in addition to broad-band methods,

— that the new definition of the candela has stimulated practical realizations of this unit in many countries, to the extent that sixteen nations have asked to participate in the next BIPM intercomparison,

— that, in addition, BIPM intercomparisons of spectroradiometric standards are planned,

— that the groups of standard lamps now used to preserve the photometric units at the BIPM and to transfer the units between laboratories are likely to be supplemented by standard detectors,

— that the current level of staffing at the BIPM for photometry and radiometry (0.2 physicist + 0.5 technician), although just sufficient to meet present calibration demands, is inadequate to meet its existing commitment to international comparison work, and that it falls short of the level required to regenerate in-house capability and to provide future continuity of expertise,

— that the present level of staffing appears in any case to be disproportionately small in relation to the commercial importance of the industries served and the needs of national laboratories,

— that the BIPM staff includes senior scientists, possessing extensive experience in relevant fields, who could provide excellent leadership for increased activity in photometry and radiometry,

recommends

— that, as a matter of urgency, additional effort should be deployed on photometry and radiometry,

— that, in particular, at least one additional physicist should be assigned to this area of work in order to strengthen intercomparison, calibration, advisory services and development work; suitable projects include :

— studies of the mutual consistency of different methods of realizing photometric and radiometric units;

— investigation of spectroradiometric techniques and methods of standardization;

— use of semiconductor detectors having predictable quantum efficiencies, and of electrically-calibrated thermal detectors.

APPENDIX P 1

Working documents submitted to the CCPR at its 10th Meeting

(see the list of documents on page P 21)

APPENDIX P 2

Principles governing photometry

(Document CCPR/82-9)

Foreword

The purpose of this document is to bring together the definitions and the tables * of numerical values already adopted (or recommended) and published, by the Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM), by the Comité International des Poids et Mesures (CIPM), or by the International Commission on Illumination (CIE).

The document was prepared by a Working Group comprising :

G. WYSZECKI (National Research Council of Canada), President;
W. R. BLEVIN (CSIRO, Australia);
K. G. KESSLER and K. D. MIELENZ (National Bureau of Standards,
USA).

It was approved at the 10th meeting (September 28-30, 1982) of the Comité Consultatif de Photométrie et Radiométrie (CCPR), the body established to advise the CIPM on these questions.

* For these tables, see pp. 27-41.

Preamble

Photometric procedures aim at measuring « light »; that is, measuring the universal and essential attribute of all perceptions or sensations which are peculiar to the human visual system and which are produced through the agency of that system. Thus photometric quantities must take into account both the purely physical characteristics of the radiant power stimulating the visual system and the spectral responsivity of the latter. The subjective nature of the second of these two factors sets photometric quantities apart from purely physical quantities.

The purpose of this note is to define the most important of the photometric quantities as well as their units, and to explain briefly the conventions relating them with the purely physical quantity, radiant power, and its unit, the watt. These definitions and conventions aim at enabling photometric measurements to be made by purely physical methods but to yield results that correlate adequately with visual experience.

If electromagnetic radiation is of sufficient power and of wavelengths within the range 360 to 830 nm (approximately), it stimulates the visual organ. The retinal receptor elements involved may be principally the cones (photopic vision, eye adapted to higher levels of luminance), the rods (scotopic vision, eye adapted to lower levels of luminance), or a combination of the cones and rods (mesopic vision, intermediate between photopic and scotopic vision).

1. Photometric quantities

The most important photometric quantities [1] are :

luminous flux,
luminous intensity,
luminance,
illuminance.

Luminous flux is the most convenient quantity in photometry to define first because it has the simplest relationship with radiant power. It may be defined as follows :

Luminous flux (ϕ_v) is the quantity derived from radiant flux (ϕ_e) (radiant power) by evaluating the radiation according to its action upon the CIE standard photometric observer.

The convention of deriving ϕ_v is given in part 4 of this document.

The other three quantities may be defined in terms of luminous flux and appropriate geometric quantities.

The *luminous intensity* (I_v) (of a source in a given direction) is the quotient of the luminous flux ($d\phi_v$) leaving the source and propagated in the element of solid angle ($d\Omega$) containing the given direction, by the element of solid angle.

$$I_v = \frac{d\phi_v}{d\Omega}$$

The *luminance* (L_v) (in a given direction, at a given point of a real or imaginary surface) is defined by the formula

$$L_v = \frac{d^2\phi_v}{d\Omega \cdot dA \cos \theta}$$

where $d\phi_v$ is the luminous flux transmitted by an elementary beam passing through the given point and propagating in the solid angle $d\Omega$ containing the given direction; dA is the area of a section of that beam containing the given point; θ is the angle between the normal to that section and the direction of the beam.

The *illuminance* (E_v) (at a point of a surface) is the quotient of the luminous flux ($d\phi_v$) incident on an element of the surface containing the point, by the area (dA) of that element.

$$E_v = \frac{d\phi_v}{dA}$$

2. Photometric units

The SI photometric base unit is the *candela* (cd), the unit of luminous intensity. The definition of the candela is as follows [2]:

The candela is the luminous intensity, in a given direction, of a source that emits monochromatic radiation of frequency 540×10^{12} hertz and that has a radiant intensity in that direction of (1/683) watt per steradian.

The above definition of the candela applies to photopic, scotopic and mesopic vision.

The frequency 540×10^{12} Hz corresponds to a wavelength of 555.016 nm in standard air [3].

The SI units of the three other photometric quantities, luminous flux, luminance, and illuminance, defined in part I of this document, can be derived from the SI photometric base unit, the candela, and the units of the geometric quantities, area and solid angle.

The SI unit of luminous flux is candela times steradian (cd . sr), which is usually referred to as the *lumen* (lm).

The SI unit of luminance is *candela per square metre* (cd . m⁻²), or (lm . sr⁻¹ . m⁻²).

The SI unit of illuminance is candela times steradian per square metre ($\text{cd} \cdot \text{sr} \cdot \text{m}^{-2}$), or ($\text{lm} \cdot \text{m}^{-2}$). This unit is often referred to as the *lux* (lx).

3. Basic weighting functions

The responsivity of the visual system to radiant power of different wavelengths is complex and not yet fully understood. However, for certain conditions of stimulation, a number of functions of wavelength have been determined experimentally which provide useful representations of the relative spectral responsivity of the visual system. These functions serve as weighting functions of the spectral radiant power stimulating the visual system.

3.1. Spectral luminous efficiency functions

The spectral luminous efficiency of radiant power of wavelength λ is the ratio of the radiant power at λ_m (or λ'_m for scotopic vision) to that at λ such that both radiant powers produce equally intense luminous sensations under specified conditions of stimulation and of observation, λ_m (or λ'_m) being chosen so that the maximum value of this ratio is equal to unity.

For photopic vision the spectral luminous efficiency function is denoted by $V(\lambda)$; its values are given in Table 1. Note, λ_m is at 555 nm for $V(\lambda)$ [4].

For scotopic vision the spectral luminous efficiency function is denoted by $V'(\lambda)$; its values are given in Table 2. Note, λ'_m is at 507 nm for $V'(\lambda)$ [4].

For mesopic vision there is at present no agreed method of spectral weighting, but this problem is currently being investigated by the CIE [5].

3.2. CIE 1931 color-matching functions

The CIE 1931 color-matching functions define the color-matching properties of an average observer with normal color vision viewing fields of angular subtense between 1° and 4° (0.017 and 0.07 rad). The color-matching functions are the tristimulus values of the spectral radiant powers of constant magnitude and of wavelengths within the visible spectrum (360 to 830 nm). They are denoted by $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ and their values are given in Table 3 [6].

Note, the $\bar{y}(\lambda)$ function is identical to the $V(\lambda)$ function given in Table 1.

4. Basic equations relating photometric and colorimetric quantities to radiant flux

4.1. Luminous flux

For photopic vision :

$$\phi_v = K_m \int_{\lambda} \phi_{e,\lambda} V(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

with

ϕ_v : luminous flux in lumens
 $\phi_{e,\lambda} = \frac{d\phi_e}{d\lambda}$: spectral concentration of radiant flux (radiant power) in watts per metre

$V(\lambda)$: spectral luminous efficiency function for photopic vision

$$K_m = 683 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1} [V(\lambda_m)/V(555.016 \text{ nm})] = 683 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1} \text{ (approx.)}$$

For scotopic vision :

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

with

ϕ'_v : luminous flux in lumens
 $\phi_{e,\lambda} = \frac{d\phi_e}{d\lambda}$: spectral concentration of radiant flux (radiant power) in watts per metre

$V'(\lambda)$: spectral luminous efficiency function for scotopic vision

$$K'_m = 683 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1} [V'(\lambda'_m)/V'(555.016 \text{ nm})] = 1\,700 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1} \text{ (approx.)}$$

4.2. Tristimulus values and chromaticity coordinates

Tristimulus values :

$$\begin{aligned} X &= k \int_{\lambda} \phi_{e,\lambda} \bar{x}(\lambda) d\lambda \\ Y &= k \int_{\lambda} \phi_{e,\lambda} \bar{y}(\lambda) d\lambda \\ Z &= k \int_{\lambda} \phi_{e,\lambda} \bar{z}(\lambda) d\lambda \end{aligned} \quad (3)$$

with

X, Y, Z : tristimulus values
 $\phi_{e,\lambda} = \frac{d\phi_e}{d\lambda}$: spectral concentration of radiant flux (radiant power)

$\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$: CIE 1931 color-matching functions
 k : normalizing factor rendering the X, Y, Z tristimulus values dimensionless; for example, if

$$k = 100 / \int_{\lambda} \phi_{e,\lambda} \bar{y}(\lambda) d\lambda$$

the tristimulus values are given in percent, making Y always equal to 100.

Chromaticity coordinates :

The chromaticity coordinates define the chromaticity of a visual stimulus given by its relative spectral distribution of radiant flux. The chromaticity can be represented as a point in the CIE 1931 (x, y) chromaticity diagram.

$$x = \frac{X}{X + Y + Z}$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z}$$
(4)

with

x, y : chromaticity coordinates
 X, Y, Z : tristimulus values.

Note : In the special case of $X = \bar{x}(\lambda), Y = \bar{y}(\lambda), Z = \bar{z}(\lambda)$, the chromaticity coordinates are denoted by $x(\lambda), y(\lambda)$. They define the chromaticity of monochromatic visual stimuli of wavelength λ (see Table 3).

5. General notes

a) The integrations required in equations (1), (2), (3), and (5) are, in practice, replaced by summations $\left(\sum_{\lambda}\right)$ over the visible spectrum whose boundaries and wavelength intervals are those given in Tables 1,2 or 3. When it is necessary to evaluate the weighting functions at wavelengths intermediate to those given in the Tables, linear interpolation should be used.

b) The photometric quantity luminance (L_v) may be expressed by an equation similar to equation (1) but involving the radiometric quantity

spectral concentration of radiance, $L_{c,\lambda}$, instead of radiant flux :

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

Luminance is intended to correlate with the perception of brightness and does so in scotopic vision, and in photopic vision for lights having the same color.

c) It has been established experimentally that lights having identical luminances or luminous intensities but different colors, that is, different values for the chromaticity coordinates, are in general not perceived as equally bright. The brightness differences depend on the colors involved.

At present there is no agreed quantity that is more satisfactory than luminance or luminous intensity for predicting the relative brightnesses of heterochromatic lights. However, progress is being made and a quantity that may eventually serve the purpose will, most likely, involve the chromaticities as well as the luminances of the lights compared.

6. References

- [1] CIE (International Commission on Illumination), *International Lighting Vocabulary* (3rd edition), Publication CIE No. 17 (E-1.1) 1970, Bureau Central de la CIE, 52, boulevard Malesherbes, 75008 Paris, France. The 4th edition of the *International Lighting Vocabulary* is in preparation and expected to be published in 1984.
- [2] CGPM (Conférence Générale des Poids et Mesures), *Comptes Rendus des Séances de la 16^e Conférence Générale des Poids et Mesures*, Paris 1979, p. 100, Bureau International des Poids et Mesures, F-92310 Sèvres, France.
- [3] Edlén, B., The refractive index of air, *Metrologia*, **2**, 1966, pp. 71-80.
- [4] CIE (International Commission on Illumination), *Principles of Light measurements*, Publication CIE No. 18 (E-1.2) 1970, Bureau Central de la CIE. A new edition of this document, entitled : *The Basis of Physical Photometry*, has been prepared and its publication is expected in 1983.
- [5] CIE (International Commission on Illumination), *Light as a True Visual Quantity : Principles of Measurement*, Publication CIE No. 41 (TC-1.4) 1978, Bureau Central de la CIE.
- [6] CIE (International Commission on Illumination), *Colorimetry, Official Recommendations of the International Commission on Illumination*, Publication CIE No. 15 (E-1.3.1) 1971, Bureau Central de la CIE. A new edition of this document is in preparation and expected to be published in 1984.

APPENDIX P 3

International circulation of heavy-current luminous intensity standards

by R. G. BERRY and F. J. J. CLARKE
National Physical Laboratory (United Kingdom)

(see page P 45) *

APPENDIX P 4

International intercomparison of luminous scales

by K. BISCHOFF and D. FÖRSTE
Physikalisch-Technische Bundesanstalt (Fed. Rep. of Germany)

(see page P 59) *

* Copies of the English version can be obtained from the BIPM.



TABLE DES MATIÈRES

COMITÉ CONSULTATIF DE PHOTOMÉTRIE
ET RADIOMÉTRIE

10^e Session (1982)

	Pages
Notice historique sur les organes de la Convention du Mètre	v
Liste des membres	vii
Ordre du jour	ix
Rapport au Comité International des Poids et Mesures, par O. C. Jones	P 1
Document explicatif sur les grandeurs et unités photométriques.	2
Comparaison internationale de lampes étalons d'intensité lumineuse à forte intensité de courant (NPL).	3
Comparaison internationale d'intensité lumineuse avec des récepteurs corrigés $V(\lambda)$ et des lampes étalons (PTB).	3
Comparaison internationale de mesures de luminance énergétique spectrale (NPL et NBS).	4
Réalisation de la nouvelle définition de la candela par les laboratoires nationaux	4
Futures comparaisons internationales de mesures d'intensité lumineuse.	5
Futures comparaisons internationales de mesures de flux lumineux	8
Établissement d'étalons primaires pour les grandeurs radiométriques	8
Photodiodes au silicium autoétalonnées	10
Rayonnement synchrotron	10
Étalons de luminance énergétique spectrale et d'éclairement énergétique spectral	11
Activités futures du CCPR et nécessité d'autres comparaisons internationales.	12
Programme à long terme du BIPM en radiométrie et en photométrie	13
Activités de la Commission Internationale de l'Éclairage	15
Autres travaux de recherche	15
Expression des incertitudes expérimentales	17
Publication des documents	18

Recommandation P 1 (1982) présentée au Comité International des Poids et Mesures (Développement de la photométrie et de la radiométrie au BIPM)	19
Annexes	
P 1. Documents de travail présentés à la 10 ^e session du CCPR	21
P 2. Principes régissant la photométrie	23
P 3. NPL (Royaume-Uni). — Comparaison internationale d'étalons d'intensité lumineuse à forte intensité de courant, par R. G. Berry et F. J. J. Clarke	45
P 4. PTB (Rép. Féd. d'Allemagne). — Comparaison internationale des échelles d'intensité lumineuse, par K. Bischoff et D. Förste	59
Notice for the reader of the English version. Avertissement au lecteur de la version anglaise	67
Historical Note	69
Agenda	71
Report to the Comité International des Poids et Mesures, by O. C. Jones	73
Progress of the CCPR explanatory document on photometric units and quantities	74
Report on the NPL international circulation of heavy-current standard lamps for luminous intensity	75
Report on the PTB trial intercomparison of $V(\lambda)$ -corrected detectors and Osram Wi 41 G lamps for luminous intensity.	75
Trial intercomparison of spectral radiance measurements between the NBS and the NPL	75
Progress by national laboratories in realizing the new definition of the candela	76
Organization of future international comparisons of luminous intensity measurements.	77
Future international comparisons of luminous flux measurements.	79
Progress in establishing primary standards for radiometric quantities	80
Self-calibrated silicon photodiodes	81
Synchrotron radiation	81
Spectral radiance and irradiance standards	82
Future activities of the CCPR and requirements for additional intercomparisons	83
Long-term programme for the BIPM in radiometry and photometry	84
Activities of the International Commission on Illumination	85
Other research	86
Statement of experimental uncertainties	87
Publication of documents	88
Recommendation P 1 (1982) submitted to the Comité International des Poids et Mesures (Development of photometry and radiometry at BIPM)	89

Appendices

- P 1 : Working documents submitted to the CCPR at its 10th meeting (*see* page P 21).
- P 2 : Principles governing photometry 92
- P 3 : International circulation of heavy-current luminous intensity standards, by R. G. Berry and F. J. J. Clarke (*see* page P 45).
- P 4 : International intercomparison of luminous scales by K. Bischoff and D. Förste (*see* page P 59).
-

IMPRIMERIE DURAND
28600 LUISANT (FRANCE)

Dépôt légal, Imprimeur, 1983, n° 4527
ISBN 92-822-2081-8

ACHEVÉ D'IMPRIMER : DÉCEMBRE 1983

Imprimé en France