COMITÉ CONSULTATIF DE PHOTOMÉTRIE ET RADIOMÉTRIE

SESSION DE 1986

BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES

COMITÉ CONSULTATIF DE PHOTOMÉTRIE ET RADIOMÉTRIE

Rapport de la 11e session
1986

Édité par le BIPM, Pavillon de Breteuil, F-92312 Sèvres Cedex, France

ISBN 92-822-2099-0

NOTICE SUR LES ORGANES DE LA CONVENTION DU MÈTRE

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 1986, quarante-sept 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, Israël, 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 quarantaine de physiciens ou techniciens travaillent dans les laboratoires du Bureau International. Ils y font principalement des recherches métrologiques, des comparaisons internationales des réalisations des unités et des vérifications d'étalons dans les domaines mentionnés ci-dessus. Ces travaux font l'objet d'un rapport annuel détaillé qui est publié avec les procès-verbaux des séances du Comité International. La dotation annuelle du Bureau International est de l'ordre de 14 327 000 francs-or (en 1986), soit environ 26 000 000 de 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 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 (*BIPM Proc.-Verb. Com. Int. Poids et Mesures*, **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 aussi des monographies sur des sujets métrologiques particuliers et, sous le titre « *Le Système International d'Unités (SI)* », une brochure remise à jour périodiquement qui rassemble toutes les décisions et recommandations concernant les unités.

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	*Président*
J. DE BOER	D. KIND

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.

CONSEIL NATIONAL DE RECHERCHES DU CANADA [NRC], Ottawa.

CSIRO, Division of Applied Physics [CSIRO], Lindfield.

ELECTROTECHNICAL LABORATORY [ETL], Ibaraki.

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

INSTITUT NATIONAL DE MÉTROLOGIE [NIM], Beijing.

INSTITUTO DE OPTICA DAZA DE VALDÉS [IOM], Madrid.

ISTITUTO ELETTROTECNICO NAZIONALE GALILEO FERRARIS [IEN], Turin.

NATIONAL BUREAU OF STANDARDS [NBS], Gaithersburg.

NATIONAL PHYSICAL LABORATORY [NPL], Teddington.

NATIONAL PHYSICAL RESEARCH LABORATORY [NPRL], Pretoria.

OFFICE FÉDÉRAL DE MÉTROLOGIE [OFMET], Wabern/WORLD RADIATION CENTER, Davos.

PHYSIKALISCH-TECHNISCHE BUNDESANSTALT [PTB], Braunschweig.

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 11e session

1. Rapport sur la comparaison internationale de lampes étalons d'intensité et de flux lumineux (BIPM).
2. Rapport sur la comparaison NPL/NBS des échelles de luminance énergétique spectrale.
3. Rapport sur l'état d'avancement de la comparaison internationale des mesures de flux énergétique en rayonnement monochromatique (NBS).
4. Revue des progrès réalisés depuis la 10e session, par les laboratoires nationaux ou non, dans l'établissement des étalons de premier ordre concernant
   (*a*) les grandeurs radiométriques,
   (*b*) les grandeurs spectroradiométriques.
5. Revue des progrès réalisés depuis la 10e session, par les laboratoires nationaux, dans l'établissement des étalons de premier ordre concernant
   (*a*) l'intensité lumineuse,
   (*b*) le flux lumineux.
6. Revue des autres travaux de recherche effectués dans les laboratoires nationaux, y compris ceux concernant les mesures radiométriques liées à la technologie des fibres optiques.
7. Informations sur les travaux effectués dans le cadre de la CIE (F. Rotter).
8. Examen des activités futures du CCPR et du besoin éventuel de comparaisons internationales supplémentaires.
9. Proposition de parrainage par le CCPR, conjointement avec les responsables de la météorologie et de l'espace, d'un symposium sur la radiométrie.
10. Étude d'un programme de travail approprié pour le BIPM en radiométrie et en photométrie.
11. Questions diverses.
12. Publication des documents.

RAPPORT
DU
COMITÉ CONSULTATIF
DE PHOTOMÉTRIE ET RADIOMÉTRIE
(11e session — 1986)
AU
COMITÉ INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES

par P.J. KEY, rapporteur

Le Comité Consultatif de Photométrie et Radiométrie (CCPR) s'est réuni pour sa onzième session au Bureau International des Poids et Mesures (BIPM), à Sèvres, où il a tenu six séances entre le mardi 30 septembre et le jeudi 2 octobre 1986.

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 (L.P. BOIVIN).

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

Electrotechnical Laboratory [ETL], Ibaraki (M. NISHI).

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

Instituto de Optica Daza de Valdès [IOM], Madrid (A. CORRÓNS).

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

National Bureau of Standards [NBS], Gaithersburg (K.D. MIELENZ, J.H. WALKER).

National Physical Laboratory [NPL], Teddington (P.J. KEY, J.R. MOORE).

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

Office Fédéral de Métrologie [OFMET], Wabern (P. BLASER).
Physikalisch-Technische Bundesanstalt [PTB], Braunschweig (K. BISCHOFF, D. FÖRSTE, K. MÖSTL).

Les membres nominativement désignés :

F. ROTTER (Wien).
J. SCHANDA (Budapest).

Le directeur du BIPM (P. GIACOMO).

Invité :

Instituto Nacional de Tecnología Industrial [INTI], San Martin (R.D. LOZANO).

Assistaient aussi à la session :

T.J. QUINN, sous-directeur et J. BONHOURE (BIPM).

Excusés :

Amt für Standardisierung, Messwesen und Warenprüfung [ASMW], Berlin.
World Radiation Center [WRC], Davos Dorf (C. FRÖHLICH).
K. YOSHIÉ, Tokyo.

Absent :

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

Le président ouvre la séance et accueille les membres du Comité Consultatif de Photométrie et Radiométrie (CCPR), en particulier ceux qui assistent pour la première fois au CCPR. Il rappelle la disparition du Professeur Hahn (PTB) et celle de G. Wyszecki (NRC), président de la Commission Internationale de l'Éclairage (CIE), survenues depuis la dernière session du CCPR.

Mr. Key est nommé rapporteur.

1. Rapport sur la comparaison internationale de lampes étalons d'intensité et de flux lumineux

1.1. Présentation des résultats

Mr Bonhoure présente les résultats des comparaisons (Annexe P 2). Des groupes de lampes de référence ont été établis par le BIPM, à raison d'un groupe par type de lampe employé ; ces groupes de référence ont été utilisés pour comparer les lampes étalons des laboratoires nationaux. Chaque groupe de référence du BIPM a été comparé au groupe de lampes correspondant établi par le BIPM pour la comparaison

de 1969, de façon à relier les récentes réalisations des laboratoires nationaux aux unités actuellement conservées et disséminées par le BIPM : la moyenne internationale de 1961 pour l'intensité lumineuse et la moyenne internationale de 1952 pour le flux lumineux.

Se référant au tableau XVI, qui donne le rapport entre la réalisation moyenne de l'unité d'intensité lumineuse pour chaque laboratoire et l'unité conservée au BIPM, Mr Bonhoure remarque que la dispersion des résultats semble similaire à celle obtenue en 1969 avec l'ancienne définition. Toutefois, pour les laboratoires qui ont envoyé à la fois des lampes Osram et des lampes NPL/GEC, les différences entre les résultats des deux types de lampes mesurées par le BIPM se répartissent en deux groupes distincts. Pour le CSIRO, l'INM, le NBS et le NRC les différences [Osram — NPL/GEC] sont de l'ordre de — 0,21 % à — 0,40 %, et pour l'ETL, le NIM, le NPL et le NPRL de + 0,03 % à + 0,17 %.

Mr Bonhoure considère ensuite le tableau XVII, qui montre les résultats de la comparaison de flux lumineux. De nouveau, la dispersion des résultats des onze laboratoires participants ne présente pas d'amélioration significative par rapport à la comparaison de 1969.

Mr Key demande si les résultats provisoires de l'ASMW ont été confirmés. Mr Bonhoure répond que non.

1.2. Résultats de la comparaison d'intensité lumineuse

Mr Blevin ouvre la discussion sur les résultats de la comparaison d'intensité lumineuse et rappelle les différences observées entre les deux groupes de lampes, différences qui divisent les huit laboratoires en deux groupes égaux. Mr Bonhoure décrit l'organisation des mesures au BIPM et on convient qu'il n'y a aucun risque d'erreur de ce côté-là. Mr Blevin se félicite de la stabilité des deux types de lampes et fait remarquer que, même si les différences entre les types de lampes dans les laboratoires nationaux sont gênantes, elles n'affectent cependant pas le résultat final ; il n'y a pas, en effet, de différence significative entre le rapport moyen général pour l'un des types de lampes et celui pour l'autre type.

Mr Bonhoure remarque que les diamètres des diaphragmes placés devant les photomètres ou les distances de mesure utilisées étaient différents d'un laboratoire à l'autre ; cependant, il n'y a aucune corrélation avec les effets constatés. Mr Bastie indique qu'il a observé un changement, de l'ordre de 0,4 % entre 18 °C et 21,5 °C, dans le rapport des intensités lumineuses des deux types de lampes en fonction de la température du laboratoire ; le photomètre n'était pas thermostaté. MM. Bonhoure et Key relatent des expériences similaires avec des photomètres thermostatés qui n'ont engendré aucun effet. On demande à Mr Bastie de faire circuler ses résultats, via le BIPM.

Mr Quinn demande si les effets de convection du gaz, qui produisent des caractéristiques d'émission bi-stables pour certains types de lampes, pourraient être en cause ; en fait, de tels effets n'ont jamais été constatés sur ces lampes.

Deux autres différences possibles dans les méthodes de mesure utilisées par les laboratoires sont ensuite examinées : elles concernent les dispositifs pour piéger la lumière en arrière de la lampe à comparer et les écrans entre la lampe et le photomètre, en particulier pour les lampes NPL/GEC. On arrive à la conclusion que tous les laboratoires ont utilisé pratiquement les mêmes dispositifs.

Mr Schanda suggère qu'une comparaison bilatérale avec un laboratoire de chaque groupe pourrait résoudre ce problème. Le NPL et l'INM acceptent d'entreprendre une telle comparaison qui entraînera d'autres mesures au BIPM. Mr Moore est d'accord pour l'organiser et la superviser ; il espère que le travail sera terminé en mai 1987. Les résultats seront transmis aux laboratoires, via le BIPM.

1.3. Résultats de la comparaison de flux lumineux

Mr Blevin oriente alors la discussion sur les résultats de la comparaison de flux lumineux et Mr Nishi soulève le problème des corrections d'absorption dans la sphère du BIPM. Mr Blevin rappelle la lettre de Mr Bonhoure aux laboratoires participants et dit qu'on a malheureusement admis que l'effet serait le même pour toutes les lampes. Or, des tests ultérieurs ont montré que l'absorption variait de façon inattendue, de quelques millièmes, d'une lampe à l'autre. Elle a été mesurée pour les lampes de quatre laboratoires (IEN, INM, NPL, ASMW — pour un type de lampe différent). Toutefois, dans l'ensemble, l'influence sur les résultats est faible.

Mr Blevin fait remarquer qu'un goniophotomètre automatique aurait évité ce problème mais aurait compliqué la tâche du BIPM. Les lampes effectivement utilisées au cours de la comparaison ont été étalonnées par goniophotométrie dans sept laboratoires et dans une sphère intégrante dans trois laboratoires.

1.4. Conséquences des comparaisons

Mr Blevin ouvre la discussion sur les conséquences des comparaisons et fait trois propositions. Il rappelle que la Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM), en redéfinissant la candela, a demandé au Comité International des Poids et Mesures (CIPM) d'organiser des comparaisons internationales. Il pense donc qu'il conviendrait que le CCPR, par l'intermédiaire du CIPM, soumette un rapport à la CGPM, en 1987, sur les résultats de cette comparaison et leur signification pour la photométrie.

Un des points importants est l'uniformité des résultats de 1985, comparativement à ceux de 1969. Le CCPR devrait aussi conseiller le BIPM sur les unités à conserver et à disséminer dans l'avenir, car celles qui le sont actuellement ne sont pas en accord avec les résultats de la comparaison : en particulier, les unités représentatives du lumen et de la candela ne sont pas cohérentes. Enfin, parce que les unités maintenues dans certains laboratoires nationaux diffèrent de façon significative de leurs nouvelles réalisations et de la moyenne des résultats de la comparaison, le CCPR devrait encourager les laboratoires à modifier ces unités pour les faire correspondre à leur meilleure valeur scientifique ou, éventuellement, à la moyenne internationale.

1.4.1. Rapport à la CGPM

Mr Blevin présente une étude statistique sur la dispersion des réalisations nationales de la candela et du lumen lors des comparaisons de 1985 et de 1969 (Annexe P2, appendice A). Il est intéressant de noter que, pour l'intensité lumineuse, il y a peu de différence entre les résultats de 1985 à 2 800 K et ceux de 1969 pour les lampes à vide à 2 045 K, mais qu'une amélioration est observée par rapport aux résultats de 1969 pour les lampes qui fonctionnaient alors à 2 859 K. La discussion est limitée aux statistiques établies en ne tenant compte que des laboratoires dont les résultats ont été confirmés. Pour le flux lumineux, on constate une amélioration par rapport aux résultats de 1969 mais, de manière surprenante, la dispersion est un peu moins grande que pour l'intensité lumineuse.

Mr Förste trouve cela assez étonnant, compte tenu du fait que l'instrumentation et les méthodes employées pour le transfert de l'intensité au flux lumineux diffèrent suivant les laboratoires et qu'il en découle inévitablement une incertitude plus grande dans les mesures de flux lumineux. Mr Lozano note que plusieurs méthodes ont été utilisées pour réaliser les étalons d'intensité lumineuse, alors que seule la méthode goniophotométrique a été employée pour passer au flux lumineux. Mr Boivin estime que, même si la dispersion n'est pas diminuée, les techniques pour réaliser la candela à partir des principes de base sont maintenant beaucoup plus simples et qu'ainsi des redéterminations de l'unité peuvent être réalisées beaucoup plus fréquemment. Mr Hengstberger signale que, bien que plusieurs laboratoires aient en principe la même échelle radiométrique parce qu'ils utilisent des instruments similaires, leurs échelles photométriques diffèrent de façon significative. Il est donc nécessaire d'étudier le processus de transfert des échelles radiométriques aux échelles photométriques. Mr Hengstberger pense aussi que les caractéristiques du filtre $V(\lambda)$ peuvent poser problème.

Mr Blevin résume la discussion, notant que le nombre croissant des techniques actuellement utilisées à la place du corps noir au point de congélation du platine donne un meilleur niveau de confiance dans le

résultat moyen, qu'un plus grand nombre de laboratoires se trouvent concernés et ont la satisfaction d'avoir leur propre réalisation de l'unité, que l'écart-type de la moyenne des résultats est certainement inférieur à celui de 1969 et qu'une base sûre a été établie pour poursuivre l'amélioration des résultats. De l'avis général, ces informations doivent être portées à la connaissance de la CGPM.

1.4.2. Unités conservées au BIPM

Le président ouvre la discussion sur les unités conservées au BIPM (Annexe P2, appendice A). Le tableau 2 montre que la valeur moyenne internationale du quotient de chaque réalisation nationale du lumen par celle de la candela (réalisation de 1985) est de 1,6 % supérieure au rapport correspondant du lumen et de la candela conservés au BIPM. Le tableau 1 montre que la candela du BIPM est d'environ 1 % supérieure à celle du SI et que le lumen du BIPM est d'environ 0,7 % inférieur à celui du SI, en supposant que les moyennes des réalisations nationales de 1985 représentent les unités du SI.

Mr Mielenz demande si ces valeurs sont les seules à prendre en compte pour recommander le changement des unités du BIPM. Mr Blevin, ainsi que Mr Key, estiment qu'il faut ignorer tout travail antérieur. Mr Soardo pense que le BIPM doit obligatoirement changer ses unités et Mr Blevin considère que l'écart-type de la moyenne des résultats (environ 0,2 %) donne le niveau probable de répétabilité pour toute comparaison future.

Mr Giacomo, faisant référence à des discussions du Comité Consultatif d'Électricité (CCE) sur le moment optimal pour effectuer un changement de cette nature, suggère que le changement n'est pas justifié si les différences sont de l'ordre de l'écart-type des résultats. En revanche, il est probable que des difficultés importantes surgiront pour une différence de l'ordre de dix écarts-types. Une différence de trois écarts-types semble raisonnable pour justifier un changement.

Mr Rotter se réfère au besoin de stabilité à long terme pour le commerce international, comme c'est le cas par exemple avec l'EIPT. Mr Blevin, soutenu par Mr Hengstberger, rappelle que la goniophotométrie a été beaucoup développée au cours des dix dernières années et suggère que les premiers résultats obtenus étaient probablement incorrects ; puisque, de toute évidence, les unités actuelles du BIPM sont incohérentes, il serait impardonnable de persister dans l'erreur. Mr Soardo signale que, pour les étalonnages industriels, un niveau de confiance de 95 % est courant. Appliquées aux récentes comparaisons, les barres d'erreur recouvriraient probablement la moyenne internationale pour la plupart des laboratoires. Une recommandation devrait être faite pour demander au BIPM de changer les unités qu'il conserve et dissémine.

1.4.3. Unités conservées dans les laboratoires nationaux

Le président sollicite, alors, des commentaires sur trois propositions concernant l'ajustement des unités des laboratoires nationaux : (1) ne faire aucun changement, (2) ajuster les valeurs sur la moyenne internationale, ou (3) ajuster les unités conservées sur la meilleure réalisation scientifique. Mr Mielenz est en faveur de la troisième proposition : puisque les laboratoires nationaux ont la possibilité de réaliser les unités suivant les définitions du SI, ils devraient être autorisés à faire les ajustements nécessaires. Tout le monde est d'accord sur ce point. Mr Schanda suggère que les laboratoires vérifient périodiquement leurs valeurs et fassent connaître le lien entre les unités qu'ils conservent et la moyenne internationale.

Mr Quinn compare cette approche à celle du CCE qui recommande, afin d'obtenir un accord aussi large que possible sur les mesures électriques, que les unités réalisées à partir des définitions du SI de l'ohm et du volt soient ajustées sur la moyenne internationale dans les prochaines années. Mr Blevin estime que, si les positions relatives des laboratoires devaient se conserver pendant une période de quatre à huit ans, il pourrait être justifié de pousser à un ajustement international. Mr Hengstberger suggère que les laboratoires nationaux mentionnent sur leurs certificats d'étalonnage le lien entre leurs unités et celles du BIPM. Mr Soardo signale la situation des services d'étalonnage des pays européens qui appartiennent au Western European Calibration Club (WECC) : tout laboratoire peut maintenir ses propres réalisations des unités pour servir de base de dissémination.

Pour conclure, Mr Blevin estime que l'on devrait recommander aux laboratoires nationaux d'aligner les unités qu'ils conservent sur leurs propres réalisations conformes au SI et d'informer le BIPM et le CCPR de leurs meilleures estimations des différences avec les unités du BIPM. De plus, il est décidé que tous les résultats nationaux des comparaisons confirmés avant le 31 octobre 1986 seraient inclus, sans pondération, dans la détermination des nouvelles unités moyennes internationales.

1.4.4. Recommandations

Ensuite, les recommandations à rédiger sont passées en revue : 1) recommandation concernant les résultats de la comparaison et les progrès réalisés à porter à la connaissance de la CGPM, 2) recommandation concernant les unités qui doivent être conservées et disséminées à l'avenir par le BIPM, 3) recommandation sur l'ajustement des unités conservées par les laboratoires nationaux. Un comité *ad hoc* (MM. Bischoff, Blevin, Giacomo, Hengstberger) est constitué pour rédiger les Recommandations P1, P2 et P3 (1986), qui sont ensuite adoptées.

Mr Blevin exprime ses remerciements au BIPM et à Mr Bonhoure pour leurs efforts durant la préparation et la conduite de la comparaison, ainsi qu'aux laboratoires nationaux pour leur coopération et leur respect du plan de travail.

2. Rapport sur la comparaison NPL/NBS des échelles de luminance énergétique spectrale

Mr Moore rappelle que ce travail fait suite à une proposition de 1979 ; il s'agit d'évaluer une lampe étalon de transfert de luminance énergétique spectrale, améliorée et mise au point au NPL. Du fait des dommages subis par deux lampes au cours du transport, deux lampes seulement ont été finalement utilisées pour la comparaison (Annexe P3).

La reproductibilité des lampes, qui n'apparaît pas dans le rapport, est supérieure à 0,5 %, mais des différences significatives entre les échelles du NPL et du NBS ont été mises en évidence. Mr Mielenz pense aussi que les lampes semblent convenir comme étalons de transfert, mais le fait que les désaccords soient supérieurs aux incertitudes l'inquiète. Mr Blevin constate que toutes les lampes photométriques se sont révélées stables lors du transport. Mr Moore remarque que les lampes à ruban sont particulièrement sensibles aux chocs.

Il ne semble pas, pour le moment, qu'il y ait lieu de poursuivre les mesures, mais Mr Blevin suggère que ces résultats pourraient être utiles lors de comparaisons spectrales futures.

3. Sensibilité spectrale absolue : rapport sur la comparaison des étalons nationaux

Mr Mielenz rend compte de la comparaison (Annexe P4). Deux types de photodiodes au silicium ont circulé dans les laboratoires nationaux afin de mesurer la sensibilité spectrale à 633 nm et à 488 nm. Le niveau d'accord d'ensemble est encourageant. En excluant les résultats s'écartant de plus de trois écarts-types de la moyenne, la dispersion des résultats est de ± 0,2 % à 633 nm et de ± 0,3 % à 488 nm. La stabilité des photodiodes est bonne (0,1 à 0,2 %) sauf dans deux cas. Le travail doit se poursuivre avec la participation de laboratoires industriels, sous les auspices de la Commission Internationale de l'Éclairage (CIE).

Mr Boivin fait remarquer que les mesures à 488 nm ne semblent avoir été faites au NBS qu'après celles effectuées dans le laboratoire participant, parfois plusieurs mois après ; il n'y a donc pas eu de mesures initiales faites au laboratoire pilote, comme c'est le cas habituellement dans les comparaisons internationales, pour connaître les

changements éventuels des étalons de transfert. Mr Mielenz confirme et pense que cela peut avoir engendré des problèmes de stabilité supplémentaires. Mr Blevin pense aussi que la comparaison à 633 nm est plus satisfaisante que la comparaison à 488 nm pour cette raison.

Mr Möstl suggère que les résultats peuvent dépendre du niveau d'éclairement et qu'il est nécessaire de connaître la répartition spatiale de l'éclairement énergétique. À la PTB, on a observé des écarts d'environ 0,4 % entre la technique d'auto-étalonnage et celle des radiomètres absolus à substitution électrique ; Mr Möstl demande si, dans d'autres laboratoires, on a aussi observé de tels écarts. MM. Gardner, Key et Boivin ont tous constaté un bon accord, bien que l'éclairement énergétique maximal acceptable dépende du dispositif employé.

Mr Möstl demande si, dans le cas des récepteurs instables, on en connaît la raison. Mr Blevin constate qu'il est nécessaire de rassembler plus d'informations sur la stabilité des récepteurs. Mr Mielenz pense que le défaut de contrôle de la qualité durant la fabrication peut induire des problèmes de stabilité. Mr Key estime qu'il est nécessaire de suivre un récepteur pendant un ou deux ans pour être sûr de sélectionner un dispositif stable.

Mr Key demande s'il est possible d'effectuer des mesures complémentaires dans le cadre de cette comparaison, en particulier pour les participants qui disposaient de récepteurs instables. Mr Mielenz pense qu'il faut maintenant conclure cette phase de la comparaison. Les résultats de travaux ultérieurs des laboratoires nationaux pourront être relatés dans la littérature ; des comparaisons avec des laboratoires industriels pourront être entreprises sous les auspices de la CIE.

Mr Blevin considère que ce travail constitue une base solide pour des progrès ultérieurs en radiométrie au sein du CCPR ; il suggère que le BIPM en devienne le pivot dans le futur et acquière la compétence nécessaire pour mener une comparaison internationale, à défaut d'être actif dans le domaine de la radiométrie absolue. Il remercie Mr Zalewski et ses collègues du NBS pour leur travail.

4. Progrès réalisés par les laboratoires nationaux dans l'établissement des étalons primaires pour les grandeurs radiométriques et spectroradiométriques

La plupart des laboratoires ont fait part de progrès dans leur réponse au questionnaire CCPR/86-1. On insiste sur certains points particuliers lors de la discussion :

Le NRC a mis au point de nouveaux radiomètres absolus à film mince particulièrement bien adaptés à l'automatisation des mesures, ainsi qu'un dispositif d'étalonnage automatique en sensibilité spectrale destiné à des applications industrielles.

Mr Gardner rend compte d'un accord de l'ordre de 0,1 % entre des photodiodes au silicium auto-étalonnées (de type UDT* UV100) et un radiomètre à substitution électrique, entre 488 nm et 633 nm (Document CCPR/86-6). Une nouvelle série de bolomètres au noir d'or améliorés a été fabriquée pour servir d'étalons de sensibilité spectrale relative.

L'ETL a appliqué la technique d'auto-étalonnage à deux types de photodiodes au silicium Hamamatsu qui n'avaient pas été évalués jusqu'à maintenant par cette méthode (Document CCPR/86-9). Des différences significatives ont été mises en évidence (environ 0,8 %).

Mr Bastie a étudié le vieillissement de radiomètres à substitution électrique. Il a constaté que le facteur de réflexion de leur revêtement au noir d'or variait de 0,5 % en trois ans et qu'il fallait donc le vérifier régulièrement. La réflexion, très diffusante à l'origine, devient de plus en plus spéculaire en vieillissant. D'autres participants ont fait des expériences similaires, bien que les revêtements à haute densité semblent plus stables mais aient un facteur de réflexion dans l'infrarouge plus important.

L'IEN a étudié les effets d'échauffement des conducteurs sur son radiomètre absolu et travaille sur des méthodes mathématiques destinées à augmenter le rapport signal/bruit.

Mr Corróns signale l'application de la technique d'auto-étalonnage aux photodiodes au silicium dans le domaine spectral de 400 à 900 nm et le travail effectué pour étendre les échelles spectroradiométriques dans l'infrarouge à l'aide de radiomètres à substitution électrique.

Mr Mielenz souligne les progrès réalisés dans le domaine de la radiométrie avec filtre (comparaison d'étalons fondés sur des sources corps noir, le rayonnement synchrotron et les photodiodes au silicium ; établissement d'échelles d'éclairement énergétique spectral) ; il parle aussi des nouveaux étalons de sensibilité spectrale fondés sur des photodiodes au silicium et des améliorations dans les réalisations des échelles de luminance énergétique spectrale et d'éclairement énergétique spectral.

Le NIM a mis au point de nouveaux étalons à source corps noir (au voisinage de la température ambiante et à 3 000 K) ainsi que des lampes à deutérium comme étalons de travail dans l'ultraviolet.

Mr Key décrit un nouveau radiomètre absolu refroidi à l'hélium. Il a été conçu spécialement pour fonctionner avec des sources laser afin de déterminer la sensibilité de récepteurs à semiconducteurs comme étalons secondaires. Il a été utilisé pour évaluer la technique d'auto-étalonnage (avec des récepteurs du type UDT QED 200) et on a constaté un accord de l'ordre de 0,1 % entre 406 et 676 nm.

Mr Hengstberger a amélioré les radiomètres absolus du NPRL en les thermostatant à ± 1 mK et en utilisant des ponts à courant alternatif

---

* United Detector Technology

pour accroître leur sensibilité. Des comparaisons avec des récepteurs QED 200 ont montré un accord avec une incertitude de mesure de l'ordre de 0,3 % entre 400 et 700 nm.

Mr Quinn remarque que de nouvelles améliorations de la détectivité du radiomètre du type NPL sont maintenant possibles, grâce aux techniques SQUID qui permettent de repousser les limites imposées par le thermomètre à résistance de germanium. Mr Key ajoute que la constante de temps du radiomètre sera améliorée par l'utilisation d'un chauffage à film mince et peut-être aussi d'une cavité plus petite.

Mr Hengstberger propose de placer le radiomètre du NPRL sous vide afin d'en améliorer la résolution jusqu'à 10 nW.

Mr Blaser signale les progrès réalisés sur le radiomètre absolu au World Radiation Center, Davos (Document CCPR/86-3).

À la PTB, on a obtenu une meilleure précision en radiométrie absolue en automatisant les étalonnages électriques ; l'exactitude des étalonnages en sensibilité spectrale est aussi meilleure.

Mr Schanda signale l'application de la technique d'auto-étalonnage à l'établissement d'échelles radiométriques et photométriques.

Mr Lozano cite une étude en cours pour comparer les mérites de la technique d'auto-étalonnage au radiomètre absolu.

Mr Mielenz pense que l'exactitude de mesure de l'aire d'un diaphragme est un facteur limitatif en radiométrie. Mr Hengstberger signale une comparaison entre quatre laboratoires : Canada, Royaume-Uni, Afrique du Sud et Belgique. Il indique qu'en raison de l'effet d'épaisseur, l'aire effective n'est pas toujours égale à l'aire géométrique. En revanche, les diaphragmes minces utilisés pour éviter cet effet peuvent être endommagés par les techniques mécaniques de mesure.

5. Progrès réalisés par les laboratoires nationaux dans l'établissement d'étalons primaires d'intensité lumineuse et de flux lumineux

Les réponses au questionnaire CCPR/86-1 montrent des réalisations nouvelles ou améliorées de la candela dans la plupart des laboratoires. Presque toutes les réalisations reposent sur des radiomètres absolus à substitution électrique. Toutefois, le NBS a utilisé la radiométrie avec filtre, mais aussi des photodiodes au silicium auto-étalonnées. La PTB considère ses lampes à vide Toshiba à 2 042 K comme les plus stables et les utilise pour réaliser la candela.

La goniophotométrie a été utilisée par tous les laboratoires qui réalisent des étalons de flux lumineux. De nouveaux goniophotomètres ont été mis au point à l'INM et à l'IOM. MM. Chen et Mielenz ont travaillé sur des lampes au sodium à haute pression comme étalons de flux. MM. Mielenz et Moore décrivent un travail en cours pour établir des étalons de flux total spectral (incandescents ou à décharge).

Mr Nishi signale les mesures goniométriques effectuées à l'ETL sur la répartition de la température de couleur des étalons de flux lumineux, en vue de leur utilisation comme étalons de flux total spectral. Des études de faisabilité ont été menées au NBS sur l'obtention d'étalons de flux, en caractérisant la reponse de la sphère intégrante et en l'étalonnant par référence à un étalon d'intensité lumineuse ou à un laser.

6. Aùtres travaux effectués dans les laboratoires nationaux, études relatives à la technologie des fibres optiques

À l'ETL, au NPL, à la PTB et au NBS, on a effectué de nouvelles expériences sur le rayonnement synchrotron issu des anneaux de stockage ; des comparaisons avec d'autres étalons radiométriques montrent un accord à 0,1 % en termes absolus dans le visible.

Des études approfondies sur les propriétés de récepteurs au silicium, au germanium et sur d'autres récepteurs à semiconducteurs ont été faites dans nombre de laboratoires. On a porté une attention particulière à la linéarité, à l'uniformité de la réponse spatiale et à la stabilité. Mr Möstl signale les effets supralinéaires dans la région bleu-ultraviolet avec les photodiodes au silicium. Au NBS, on a étendu l'étude de la technique d'auto-étalonnage aux photorécepteurs InGaAs/InP pour le proche infrarouge et à de nouveaux types de photodiodes au silicium pour l'ultraviolet.

Mr Mielenz signale aussi un moindre intérêt porté par le NBS aux études théoriques au profit de l'application des nouvelles technologies comme, par exemple, les méthodes d'interférométrie hétérodyne en spectrophotométrie.

Mr Bischoff mentionne le développement à la PTB des techniques d'étalonnage pour les récepteurs solaires photovoltaïques et Mr Förste signale la mesure du flux lumineux et de la répartition spatiale des diodes électroluminescentes et d'autres petites sources par goniophotométrie automatisée.

On aborde ensuite les dispositions prises par les différents laboratoires nationaux pour effectuer les mesures nécessaires dans le domaine des fibres optiques. Dans la plupart des laboratoires, les mesures de flux énergétique sont sous la responsabilité des spécialistes de la radiométrie, tels qu'ils sont représentés par les membres du CCPR. Au CSIRO, au NIM, au NPL, au NPRL et à la PTB, des étalons ont été mis au point pour la mesure du flux énergétique aux longueurs d'onde utilisées dans les systèmes de communication optique (850, 1 300 et 1 550 nm). Des installations d'étalonnage de radiomètres et de calorimètres ou des récepteurs étalons secondaires sont déjà disponibles dans certains

laboratoires. À l'ETL et au NBS, ce travail est entrepris par les spécialistes chargés des mesures de puissance laser. La responsabilité pour d'autres étalons concernant les fibres optiques incombe à des groupes particuliers dans la plupart des laboratoires.

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

Mr Rotter indique que la division 2 (mesures physiques) s'est réunie à Paris, en juin 1985, sous la présidence de Mr Grum ; après le décès de ce dernier, en décembre 1985, Mr Mielenz est devenu directeur de la division. Des réunions se sont tenues, en juin 1986, à Vienne et, en septembre 1986, à Paris. La division 2 comprend 24 comités techniques (qui sont, à proprement parler, des groupes de travail à durée de vie limitée chargés de mener à bien des tâches spécifiques). Un résumé des activités et des progrès de chaque groupe de travail est présenté.

La CIE a récemment publié les documents CIE N° 64 [Determination of the spectral responsivity of optical radiation detectors] et N° 65 [Electrically calibrated thermal detectors of optical radiation (absolute radiometers)].

Mr Rotter annonce qu'il donnera sa démission du CCPR et de la CIE à la fin de 1986. Mr Blevin le remercie pour son travail de liaison entre la CIE et le CCPR. Il est alors proposé que Mr Mielenz, qui accepte, prenne en charge ces responsabilités après le départ de Mr Rotter. Il lui est demandé de présenter le travail du CCPR à la prochaine session de la CIE.

8. Activités futures du CCPR et comparaisons internationales

8.1. Intensité lumineuse et flux lumineux

Le besoin d'autres comparaisons internationales d'intensité lumineuse et de flux lumineux est discuté. Mr Blevin fait remarquer l'effort considérable que demandent de telles comparaisons. Il pense qu'il serait plus utile que le BIPM devienne compétent dans le domaine des mesures radiométriques, ce qui ne permet pas d'entreprendre en même temps de grandes comparaisons photométriques. Mr Mielenz estime que l'orientation vers des comparaisons spectroradiométriques pourrait inclure les résultats photométriques. On est d'accord pour dire qu'aucun travail complémentaire n'est nécessaire pendant les quatre années à venir. La situation sera rediscutée et de nouvelles comparaisons pourront être prévues si nécessaire lors de la prochaine session du CCPR.

8.2. Luminance énergétique spectrale et éclairement énergétique spectral

Mr Mielenz demande si l'on doit encore s'intéresser aux comparaisons de luminance énergétique spectrale, au vu des résultats peu concluants de la comparaison d'essai entre le NPL et le NBS. Bien que six laboratoires aient les moyens de réaliser une telle comparaison (ETL, INM, NBS, NIM, NPL, PTB), il semble que l'on s'intéresse plus aux comparaisons d'éclairement énergétique spectral. La proposition de Mr Mielenz d'effectuer une comparaison dans le domaine des longueurs d'onde de 250 nm à 2 500 nm, en utilisant des lampes à filament de tungstène, rencontre un large consensus. Dix laboratoires sont intéressés par cette comparaison (CSIRO, ETL, INM, IOM, NBS, NIM, NPL, NPRL, NRC, PTB). Le NBS pourrait agir comme laboratoire pilote.

Mr Moore fait part d'un nouvel étalon d'éclairement énergétique spectral (lampe à halogène), mis au point par le NPL et la GEC *, qui conviendrait à cette comparaison. Le NPL pourrait prendre en charge le vieillissement et la sélection des lampes qui seraient achetées par les participants. Il est aussi suggéré que chaque laboratoire mesure et soumette trois lampes au NBS qui pilotera la comparaison ; les lampes seraient ensuite retournées aux laboratoires nationaux pour y être mesurées à nouveau.

Ces propositions sont acceptées. Mr Blevin suggère qu'un groupe de travail restreint (CSIRO, NBS, NPL) prépare des propositions détaillées pour cette comparaison et les fasse circuler pour recueillir les commentaires des participants. Le groupe de travail aura aussi à mettre au point un plan de travail avec des échéances précises, afin d'être sûr que la comparaison soit terminée au moins six mois avant la prochaine session du CCPR. Il est important de tenir le BIPM et le président du CCPR totalement informés de tous les aspects de cette comparaison. Les invitations à participer à la comparaison doivent passer par le BIPM.

8.3. Récepteurs $V(\lambda)$

Mr Schanda fait une proposition : constatant que la qualité de la correction $V(\lambda)$ et la stabilité des photomètres courants peuvent être des facteurs limitatifs en photométrie, il estime que le BIPM, sous les auspices du CCPR, devrait organiser et coordonner un projet de fabrication et d'évaluation d'un certain nombre de récepteurs au silicium corrigés $V(\lambda)$.

---

* General Electric Company

La PTB considère que cela demande trop de travail et fait remarquer qu'elle participe déjà à une étude sur la stabilité des récepteurs, sous les auspices de la Commission Économique Européenne (CEE), avec l'IEN, l'INM et le NPL. Mr Key dit que le filtre $V(\lambda)$ conçu par le NPL est très stable et il pense qu'il serait plus utile d'étudier une série de récepteurs et de filtres de divers types ou de conceptions différentes.

MM. Hengstberger et Mielenz sont en principe intéressés, mais on pense que le projet dans son ensemble est trop ambitieux et n'est pas du ressort du CCPR. Le NBS, le NPRL et l'IOM décident de participer à ce projet à titre individuel.

8.4. Fibres optiques

Mr Blevin donne la liste des comparaisons futures (document CCE/86-47) prévues par le Groupe de travail pour les grandeurs aux radiofréquences du Comité Consultatif d'Électricité (CCE). Ces comparaisons comprennent des mesures de puissance aux longueurs d'onde utilisées dans les systèmes de communication optique (850, 1 300 et 1 550 nm) ; elles sont proposées par le NBS (Boulder) et l'ETL (Section radioélectronique).

L'idée du CCPR n'est pas d'effectuer des mesures sur fibre. Le CSIRO, l'INM, le NIM, le NPL, le NPRL, la PTB et éventuellement le NBS (Gaithersburg) sont très intéressés par cette proposition de participation par l'intermédiaire du CCPR. Certains membres considèrent que le CCPR devrait prendre la responsabilité de cette comparaison. On suggère qu'en raison du grand intérêt manifesté au sein du CCPR et du fait que sept laboratoires membres du CCPR désirent participer à la comparaison, un groupe de travail commun CCPR-CCE soit créé pour préparer cette comparaison. Mr Blevin accepte d'en discuter le principe et les modalités avec le président du CCE. Le NPL est prêt à représenter les opinions et les intérêts du CCPR si un tel groupe de travail est créé.

Mr Möstl dit qu'une comparaison directe de photodiodes au germanium de grande surface constituerait la meilleure base pour cette comparaison. On est d'accord pour estimer qu'une comparaison directe du flux énergétique est nécessaire au stade actuel ; les problèmes de raccordement doivent être exclus. Mr Blevin note que des organismes autres que des laboratoires nationaux peuvent participer à cette comparaison.

Mr Giacomo signale qu'il faudra s'assurer que tous les laboratoires intéressés soient au courant de cette activité. Il n'est pas nécessaire que les participants soient membres des comités consultatifs. Mr Quinn pense qu'il faut prendre en considération le problème du partage des responsabilités entre le CCE et le CCPR, par exemple un partage suivant la valeur de la longueur d'onde. Cette question peut aussi se poser pour d'autres aspects des étalons de mesure des fibres optiques.

9. Parrainage par le CCPR d'un symposium sur la radiométrie absolue

Mr Quinn fait un rapport sur la réunion « Advances in Absolute Radiometry » qui a eu lieu à Boston, États-Unis d'Amérique, en juin 1985. Cette réunion rassemblait des personnes intéressées par la radiométrie absolue provenant de plusieurs disciplines : mesure du rayonnement optique, physique spatiale, physique solaire, météorologie. Une autre réunion similaire est prévue, probablement en 1988, et l'idée a été émise que le CCPR pourrait peut-être la parrainer. Mr Key propose que le NPL se prépare à accueillir cette réunion.

On estime que la réunion de Boston a été un succès et l'on souhaite une deuxième réunion similaire ; cependant, on considère que l'objet de cette réunion dépasse les intérêts du CCPR. Il semble aussi qu'il n'existe pas de précédent d'un parrainage par un comité consultatif et que l'on ne sache pas trop à quoi le CCPR s'engage réellement. On décide donc que le CCPR ne parrainera pas officiellement la réunion prévue, mais plusieurs membres du CCPR soutiennent à titre individuel la proposition du NPL d'agir indépendamment.

10. Programme de travail futur du BIPM en radiométrie et en photométrie

Mr Blevin estime nécessaire que le BIPM développe sa compétence dans le domaine des mesures radiométriques et établisse des étalons radiométriques secondaires stables, fondés sur les étalons d'un certain nombre de laboratoires nationaux ; ainsi une large activité pourrait se développer dans le domaine des comparaisons internationales. Mr Mielenz considère qu'une installation spectroradiométrique serait plus importante, mais elle est plus difficile à établir.

Une étroite majorité des membres pense que la radiométrie fondée sur les lasers et les moyens de réaliser une comparaison internationale devraient être la première priorité, suivie par le développement de la spectroradiométrie dès qu'on le pourra.

Mr Quinn ne pense pas que la mesure de l'aire d'un diaphragme soit réalisable, l'équipement nécessaire à ce travail n'existant pas au BIPM.

11. Questions diverses

Mr Giacomo rappelle aux membres du CCPR le document du BIPM sur l'organisation des comparaisons internationales. L'importance de tenir le BIPM informé des comparaisons à échelle réduite ou officieuses est aussi soulignée.

Mr Blevin indique que le nombre des membres et la composition du comité consultatif doivent être revus de temps en temps. Il considère que le nombre actuel est un maximum pour une action efficace ; la qualité requise pour appartenir au comité est la compétence technique.

12. Publication des documents

Mr Giacomo dit que l'on devrait éviter, en général, de publier les documents de travail, car leur intérêt dépasse rarement un ou deux ans après leur rédaction. Il est aussi nécessaire de savoir si ces documents ont déjà été publiés ailleurs ou s'il est prévu qu'ils le soient.

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

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

Développement des méthodes radiométriques pour la photométrie

Recommandation P 1 (1986)

Le Comité Consultatif de Photométrie et Radiométrie,

considérant

— que la 16e Conférence Générale des Poids et Mesures (1979), lorsqu'elle a promulgué une nouvelle définition de la candela, a demandé au Comité International des Poids et Mesures d'organiser des comparaisons des réalisations des unités photométriques effectuées par les laboratoires nationaux suivant la nouvelle définition,

— que la même Conférence a invité les laboratoires nationaux à accroître leurs efforts en vue de réaliser la candela suivant la nouvelle définition et d'améliorer les méthodes utilisées pour les étalonnages photométriques et les comparaisons internationales,

— que la quantité et la variété des besoins des industries fortement technologiques, en matière de mesures radiométriques et photométriques, vont en croissant,

recommande

— que le Comité International des Poids et Mesures fasse savoir à la Conférence Générale des Poids et Mesures :

a) que les comparaisons internationales demandées ont été effectuées et ont déjà confirmé les avantages de la nouvelle définition,

b) qu'à la suite de ces comparaisons le Comité Consultatif de Photométrie et Radiométrie a recommandé au Bureau International des Poids et Mesures et aux laboratoires nationaux qui ne l'ont pas déjà fait d'ajuster la valeur attribuée à leurs étalons photométriques,

c) que, depuis la promulgation de la nouvelle définition de la candela, en 1979, un effort accru a été consacré à la réalisation des unités photométriques et, bien que l'uniformité des résultats obtenus par les laboratoires n'ait augmenté que modestement, le nombre des laboratoires qui ont entrepris de telles réalisations et la variété des techniques mises en œuvre dans ce but ont largement augmenté,

d) que les progrès constants des techniques radiométriques devraient conduire à une amélioration de l'uniformité et de l'exactitude des mesures photométriques,

— que les laboratoires nationaux poursuivent leurs efforts pour mettre au point des méthodes radiométriques et photométriques de haute exactitude.

Étalons photométriques du Bureau International des Poids et Mesures

Recommandation P 2 (1986)

Le Comité Consultatif de Photométrie et Radiométrie,

considérant

— que la valeur attribuée aux étalons d'intensité lumineuse ou de flux lumineux conservés par le Bureau International des Poids et Mesures doit à la fois assurer l'uniformité mondiale des mesures et être en accord avec la nouvelle définition de la candela de 1979,

— que la moyenne des résultats de la comparaison internationale de 1985 des réalisations nationales constitue la meilleure valeur de référence représentative de la candela ou du lumen,

— que la valeur attribuée depuis 1961 aux étalons d'intensité lumineuse conservés par le Bureau International des Poids et Mesures est inférieure d'environ 1 % à celle qui correspondrait à la réalisation moyenne de la candela résultant de la comparaison de 1985,

— que la valeur attribuée depuis 1952 aux étalons de flux lumineux conservés par le Bureau International des Poids et Mesures est supérieure d'environ 0,7 % à celle qui correspondrait à la réalisation moyenne du lumen résultant de la comparaison de 1985,

recommande

— que la valeur attribuée aux étalons conservés par le Bureau International des Poids et Mesures comme représentation de la candela ou du lumen soit ajustée, avec effet au 1er janvier 1987, pour conserver et disséminer le résultat moyen de la comparaison de 1985 des réalisations de la candela et du lumen,

— que la valeur de ces ajustements soit publiée.

Étalons photométriques des laboratoires nationaux

Recommandation P 3 (1986)

Le Comité Consultatif de Photométrie et Radiométrie,

considérant

— que la valeur attribuée aux étalons d'intensité lumineuse ou de flux lumineux conservés par les laboratoires nationaux doit à la fois assurer l'uniformité mondiale des mesures et être conforme à la définition de la candela ou du lumen,

— qu'il serait prématuré de demander à ces laboratoires d'ajuster la valeur des étalons en question pour les mettre en accord avec une valeur moyenne fondée sur les résultats d'une seule comparaison internationale,

— que, cependant, un progrès appréciable serait réalisé si les laboratoires nationaux ajustaient la valeur attribuée à leurs étalons pour la mettre en accord avec la réalisation de la candela ou du lumen qu'ils ont effectuée au cours de la comparaison de 1985,

recommande

— que, pour le 1er juillet 1987, les laboratoires nationaux procèdent à l'ajustement nécessaire de la valeur attribuée aux étalons qu'ils utilisent pour la conservation et la dissémination de la candela ou du lumen, pour la mettre en accord avec la définition de l'unité correspondante,

— que, pour la même date, ces laboratoires communiquent au BIPM la valeur des ajustements effectués et celle des écarts estimés entre la valeur ajustée et la valeur moyenne résultant de la comparaison de 1985,

— que ces valeurs soient publiées par le Bureau International des Poids et Mesures.

ANNEXE P 1

Documents de travail présentés à la 11e 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/

86-1 BIPM. — Questionnaire préparatoire.

86-1 *bis* BIPM. — Réponses au questionnaire préparatoire.

86-2 BIPM. — Rapport provisoire sur la sixième comparaison des étalons nationaux d'intensité et de flux lumineux, par J. Bonhoure (*voir* Annexe P 2).

86-3 PMO/WRC (Suisse). — Abstract of « PMO6 Absolute Radiometers and their Experimental Characterization », by R.W. Brusa and C. Fröhlich.

86-4 IEN (Italie). — Nombre des points de mesure pour l'étalonnage goniophotométrique d'une lampe en flux lumineux, par C. Gentile, M.L. Rastello, G. Rossi, P. Soardo.

86-5 NBS (États-Unis d'Amérique). — Report on the preliminary round of the comparison of the national standards of absolute spectral responsivity, by E.F. Zalewski (*voir* Annexe P 4).

86-6 CSIRO (Australie). — Silicon radiometry compared to the Australian radiometric scale, by J.L. Gardner and W. J. Brown.

86-7 NPL (Royaume-Uni). — An intercomparison of spectral radiance scales between the NPL and the NBS, by J.R. Moore (*voir* Annexe P 3).

86-8 CSIRO (Australie). — A note on the results of the sixth comparison of national standards of luminous intensity and flux (1985), by W.R. Blevin (*voir* Annexe P 2).

86-9 ETL (Japon). — Measurement of Absolute Responsivity of Silicon Photodiode, by I. Saito.

86-10 NBS (États-Unis d'Amérique). — Addendum to the report on the preliminary round of the comparison of the national standards of absolute spectral responsivity (Sept. 1986), by E.F. Zalewski (*voir* Annexe P 4).

ANNEXE P 2

Rapport sur la sixième comparaison des étalons nationaux d'intensité et de flux lumineux (1985)

par J. BONHOURE
Bureau International des Poids et Mesures

(Document CCPR/86-2 révisé)

La sixième comparaison des étalons nationaux d'intensité et de flux lumineux a été effectuée au BIPM d'avril à novembre 1985. Elle portait sur des étalons établis à partir de la nouvelle définition de la candela (1979).

Les quinze laboratoires nationaux suivants ont participé à la comparaison :

ASMW :	Amt für Standardisierung, Messwesen und Warenprüfung, Rép. Dém. Allemande
CSIRO :	CSIRO, Division of Applied Physics, Australie
ETL :	Electrotechnical Laboratory, Japon
IEN :	Istituto Elettrotecnico Nazionale Galileo Ferraris, Italie
INM :	Institut National de Métrologie, France
INTI :	Instituto Nacional de Tecnología Industrial, Rép. Argentine
IOM :	Instituto de Optica, Espagne
NBS :	National Bureau of Standards, États-Unis d'Amérique
NIM :	Institut National de Métrologie, Rép. Pop. de Chine
NPL :	National Physical Laboratory, Royaume-Uni
NPRL :	National Physical Research Laboratory, Afrique du Sud
NRC :	Conseil National de Recherches, Canada
OFMET :	Office Fédéral de Métrologie, Suisse
PTB :	Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Rép. Féd. d'Allemagne
VNIIOFI :	Institut de Recherche pour les Mesures Optiques et Physiques, U.R.S.S.

Ces laboratoires se conformaient à la Résolution 4 (première partie) adoptée par la 16e CGPM en 1979 :

« La 16e CGPM charge le CIPM d'organiser des comparaisons internationales afin que soit contrôlée l'uniformité des résultats des mesures photométriques obtenus avec la nouvelle définition de la candela ».

I. — Spécifications et procédés de mesure

Chaque laboratoire national devait envoyer au BIPM des lampes à incandescence de types spécifiés :

pour l'intensité lumineuse, soit six lampes Osram Wi 41G, soit six lampes NPL/GEC, soit quatre lampes Osram Wi 41G et quatre lampes NPL/GEC ;

pour le flux lumineux, six lampes GEC.

Toutes les mesures effectuées au BIPM ont été faites en respectant les spécifications élaborées lors de la dixième session du CCPR en 1982 et rappelées ci-dessous :

Lampes Osram Wi 41 G (intensité lumineuse)

— Température de couleur : 2800 K ± 30 K.

— Alimentation électrique : courant continu ; polarité négative au plot central du culot de la lampe ; alimentation spécifiée par l'intensité du courant traversant la lampe.

— Vieillissement : au moins 30 heures à 31 volts (courant continu, même polarité que ci-dessus).

— Position : culot en bas, la partie noircie de l'ampoule face au récepteur.

— Douille-support : Edison E 27 à 4 bornes.

— Mise en place : le plan du filament doit être normal à l'axe optique (horizontal) défini par le centre du récepteur et le centre de la fenêtre de l'ampoule. Vu du récepteur, l'axe de la lampe doit être vertical.

— Distance Lampe-Récepteur : 2,5 mètres (valeur recommandée).

— Le récepteur ne doit recevoir de lumière que de la fenêtre de la lampe.

— Temps de préallumage : au moins 12 minutes.

Lampes NPL/GEC (intensité lumineuse)

— Température de couleur : 2800 K ± 30 K.

— Alimentation électrique : courant continu ; polarité négative au plot central du culot de la lampe ; alimentation spécifiée par l'intensité du courant traversant la lampe.

— Vieillissement : 50 heures à 3000 K ou 250 heures à 2800 K (courant alternatif).

— Position : culot en bas, la fenêtre comportant une glace verticale (munie de l'écran décrit par le NPL) face au récepteur.

— Douille-support : à fournir avec les lampes, sauf dans le cas de la douille du type NPL/GEC disponible au BIPM.

— Mise en place : le plan de la fenêtre doit être normal à l'axe optique (horizontal) défini par le centre du récepteur et le centre de la fenêtre de la lampe. Vu du récepteur, l'axe de la lampe doit être vertical.

— Distance Lampe-Récepteur : 2,5 mètres (valeur recommandée).

— Le récepteur ne doit recevoir de lumière que de la fenêtre du masque placé sur la lampe (il est souhaitable que chaque lampe possède son propre masque).

— Temps de préallumage : au moins 15 minutes.

Lampes GEC (flux lumineux)

— Température de couleur : 2800 K ± 30 K (Pour diminuer les effets du vieillissement, les participants peuvent choisir la limite inférieure du domaine).

— Alimentation électrique : courant continu ; polarité négative au plot central du culot de la lampe ; alimentation spécifiée par l'intensité du courant traversant la lampe.

— Vieillissement : au moins 24 heures à la température de couleur choisie (courant alternatif).

— Position : culot en haut.

— Douille-support : Edison E 27 à 4 bornes.

— Temps de préallumage : 7 minutes.

a) *Intensité lumineuse.* — Les étalons d'intensité lumineuse ont été comparés au moyen d'un photomètre à réponse linéaire, comprenant une cellule au silicium thermostatée de 30 mm de diamètre, précédée d'un filtre $V(\lambda)$ de type mosaïque.

b) *Flux lumineux.* — Les étalons de flux lumineux ont été comparés dans une sphère lumenmètre de 1,5 m de diamètre, dont le revêtement intérieur blanc diffusant (oxyde de zinc) a un facteur de réflexion spectral de l'ordre de 0,90 pour toutes les longueurs d'onde supérieures à 0,5 µm. La sphère est dépourvue de fenêtre diffusante ; on utilise un système optique comportant un miroir sphérique intérieur à la sphère pour observer la luminance d'un élément de la paroi. Un chauffage de la sphère pendant plusieurs heures, au moyen d'une lampe placée en son centre et de même puissance que les étalons à comparer, précédait chaque série de mesures afin de stabiliser les caractéristiques du revêtement diffusant.

Les étalons de flux ont été comparés au moyen d'un photomètre à réponse linéaire, comprenant une cellule à vide à cathode trialcaline et des verres colorés fournissant une bonne sensibilité $V(\lambda)$.

c) *Corrections.* — Les laboratoires nationaux étant tenus d'envoyer au BIPM des étalons réglés à ± 30 K en température de répartition et les photomètres étant correctement corrigés, la température des étalons n'a pas été contrôlée ; aucune correction n'a donc été appliquée.

Tous les étalons de flux étant du même type, il a paru inutile de déterminer l'absorption due à la présence d'une lampe dans la sphère. Or, on s'est aperçu, après le départ de plusieurs groupes de lampes, qu'il existait des différences entre les lampes, non seulement entre celles de fabrication ancienne et celles de fabrication récente, mais aussi entre les différentes lampes de fabrication récente. L'absorption due aux étalons du NPL, de l'INM, de l'IEN et de l'ASMW a pu être déterminée par comparaison aux étalons de référence du BIPM de fabrication récente :

0,00 %	NPL (fabrication récente)
+ 0,05	IEN (fabrication récente)
+ 0,20	INM (fabrication récente)
+ 0,20	NPL, INM, BIPM (fabrication ancienne)
− 0,20	ASMW (lampes Narva).

Pour les autres laboratoires, dont les lampes sont toutes de fabrication récente mais pour lesquelles l'absorption n'a pas pu être déterminée, on a adopté la valeur 0,00 %.

II. — Organisation des mesures

Pour chacun des trois types de lampes, on a utilisé le même schéma d'organisation des mesures :

— On a constitué un « Groupe de référence BIPM 1985 » de six lampes du même type que celles des laboratoires nationaux.

— On a effectué quatre séries de mesures avec les lampes Osram, quatre séries de mesures avec les lampes NPL/GEC et six séries de mesures avec les étalons de flux. Chaque série comprenait une ou deux lampes de chaque laboratoire national et les six lampes du « Groupe de référence BIPM 1985 » régulièrement intercalées ; la place attribuée aux lampes d'un même laboratoire national variait d'une série à l'autre pour apporter aux mesures le plus de symétrie possible.

Cette façon de procéder n'était possible qu'avec des lampes ayant toutes la même douille support. Or, certains étalons ne respectaient pas les spécifications élaborées par le CCPR en 1982 (pour les lampes NPL/GEC, les spécifications étaient peut-être ambiguës). On a donc modifié le montage de ces étalons (lampes NPL/GEC de l'INM et toutes les lampes du NPRL) dont on a dessoudé les conducteurs d'alimentation électrique au niveau du culot ; les lampes étant alimentées par le courant, le risque pris semblait minime.

— À la fin des quatre (ou six) séries de mesures décrites ci-dessus, on a effectué quatre (ou six) autres séries absolument identiques.

— Une série de mesures étant faite d'un aller et d'un retour, chaque étalon national a donc été allumé quatre fois, soit au total :

60 min environ pour une lampe Osram
72 min environ pour une lampe NPL/GEC
40 min environ pour une lampe de flux.

— La valeur du « Groupe de référence BIPM 1985 », qui a fonctionné quatre fois plus (Osram et NPL/GEC) ou six fois plus (flux) que les étalons nationaux, a été contrôlée au début et à la fin des mesures par comparaison au « Groupe de référence BIPM 1969 ». Son évolution a été de :

+ 0,02 %	Groupe Osram
+ 0,28	Groupe NPL/GEC
− 0,09	Groupe de flux.

Pour l'étalonnage des lampes des laboratoires nationaux, on a, dans chaque cas, utilisé la valeur moyenne :

246,98 cd Groupe Osram
357,63 cd Groupe NPL/GEC
2 485,3 lm Groupe de flux.

On rappelle que les unités utilisées au BIPM sont :

• pour l'intensité lumineuse, *depuis 1961 :* celle qui résulte de la moyenne des réalisations nationales obtenue lors de la comparaison internationale de 1961 ;

• pour le flux lumineux, *depuis 1952 :* celle qui résulte de la moyenne des réalisations nationales obtenue lors de la comparaison internationale de 1952.

— Enfin, lors de la mesure d'une lampe, on a effectué cinq lectures (photométriques et électriques) à intervalles d'une minute, la troisième lecture correspondant au temps de préallumage spécifié. Une lecture photométrique est la moyenne de trente valeurs discrètes acquises en dix-huit secondes, précédée et suivie d'une lecture du courant d'obscurité de la cellule (moyenne de quinze valeurs acquises en neuf secondes).

III. — Résultats des mesures

Les tableaux I à XV rassemblent les résultats des mesures photométriques et électriques faites sur les différents groupes de lampes envoyés au BIPM.

Les lignes (1), (2) et (3) donnent, pour chaque lampe, le rapport :

$$\frac{\text{valeur (cd ou lm) au BIPM}}{\text{valeur (cd ou lm) au laboratoire d'origine}}.$$

Ce rapport représente la grandeur des réalisations nationales de la candela ou du lumen en prenant pour référence les « unités » conservées au BIPM ; cette référence a peu d'intérêt en soi. Cependant, cette forme de présentation des résultats, par des nombres voisins de l'unité, permet immédiatement :

- d'évaluer l'évolution d'une même lampe d'une série à l'autre,
- de comparer le comportement des différentes lampes d'un même groupe,
- et, pour les laboratoires qui ont envoyé au BIPM deux groupes d'étalons d'intensité lumineuse, de contrôler l'accord entre les deux groupes.

Les lignes (4), (5) et (6) concernent les caractéristiques électriques des lampes et donnent le rapport :

$$100\left[\frac{\text{valeur (V) au BIPM}}{\text{valeur (V) au laboratoire d'origine}} - 1\right];$$

la ligne (4) correspond aux mesures photométriques de la ligne (1) et la ligne (5) à celles de la ligne (2).

Ce rapport, sans être essentiel, permet de déceler des anomalies éventuelles dans l'utilisation des lampes.

Les tableaux XVI et XVII rassemblent les résultats globaux obtenus avec les étalons d'intensité lumineuse et avec les étalons de flux lumineux.

La colonne (7) indique l'écart (%) de chaque résultat photométrique par rapport à la moyenne. Chaque valeur de cette colonne montre la grandeur de la réalisation nationale de la candela ou du lumen par rapport à la réalisation moyenne. L'ASMW n'a pas confirmé ses résultats et ne participe donc pas au calcul de la moyenne (voir aussi Fig. 1 et Fig. 2).

La colonne (8) indique, pour les étalons d'intensité lumineuse et seulement pour les laboratoires qui ont envoyé au BIPM deux groupes d'étalons différents, l'écart (%) entre le groupe Osram et le groupe NPL/GEC.

La colonne (9) concerne le passage candela-lumen ; elle donne, pour chaque laboratoire, le rapport :

$$\frac{\text{valeur (tableau XVII, colonne 2)}}{\text{valeur (tableau XVI, colonne 4)}}.$$

IV. — Bilan des incertitudes au BIPM

Il faut tenir compte du caractère particulier des mesures faites au BIPM : toutes les lampes à comparer sont identiques, y compris celles qui constituent le groupe de référence du BIPM ; de plus, la valeur attribuée à ce groupe peut être considérée comme arbitraire. En conséquence, toute erreur à caractère autre qu'aléatoire se trouve éliminée (on néglige pour l'instant les résultats de la colonne 8).

On a établi la liste ci-dessous des sources d'incertitudes (exprimées sous la forme d'un écart-type) valables pour la mesure d'une lampe d'intensité lumineuse :

alimentation électrique de la lampe	0,02 %
distance de la lampe au récepteur	0,02
orientation de la lampe	0,02
réponse du récepteur	0,01
instabilité de la lampe (répétabilité)	0,05
somme quadratique	0,06

Dans le cas d'une lampe de flux, la distance au récepteur et l'orientation disparaissent ; ces sources d'incertitude sont remplacées par l'uniformité de la peinture de la sphère et l'absorption due à la lampe, de valeurs équivalentes.

Un écart-type vaut donc :

- 0,025 % pour le groupe de référence de six lampes du BIPM ;
- 0,067 % pour *une* mesure d'une lampe nationale à partir du groupe de référence ;
- 0,047 % pour les valeurs des lignes 1 et 2, à l'exception des valeurs moyennes ;
- 0,033 % pour les valeurs de la ligne 3, à l'exception des valeurs moyennes ;
- 0,017 % pour les valeurs moyennes de la ligne 3 (cas de quatre lampes) ;
- 0,014 % pour les valeurs moyennes de la ligne 3 (cas de six lampes).

Dans le cas des étalons d'intensité lumineuse, la comparaison de lampes de types différents introduit une incertitude supplémentaire (écart-type : 0,033 %) pour les valeurs de la colonne 8 du tableau XVI : l'écart-type vaut 0,041 %.

En ce qui concerne la colonne 7 des tableaux XVI et XVII, l'écart-type vaut :

- 0,012 % pour les laboratoires qui ont envoyé au BIPM quatre lampes Osram et quatre lampes NPL/GEC d'intensité lumineuse ;
- 0,022 % pour ceux qui ont envoyé six lampes Osram ou six lampes NPL/GEC d'intensité lumineuse ;
- 0,014 % pour les laboratoires qui ont envoyé au BIPM six lampes de flux lumineux.

Comme on pouvait le prévoir, ces valeurs sont faibles devant celles estimées par les laboratoires nationaux et qui prennent en compte la réalisation des unités (Fig. 1 et Fig. 2 ; *voir* aussi Appendice B).

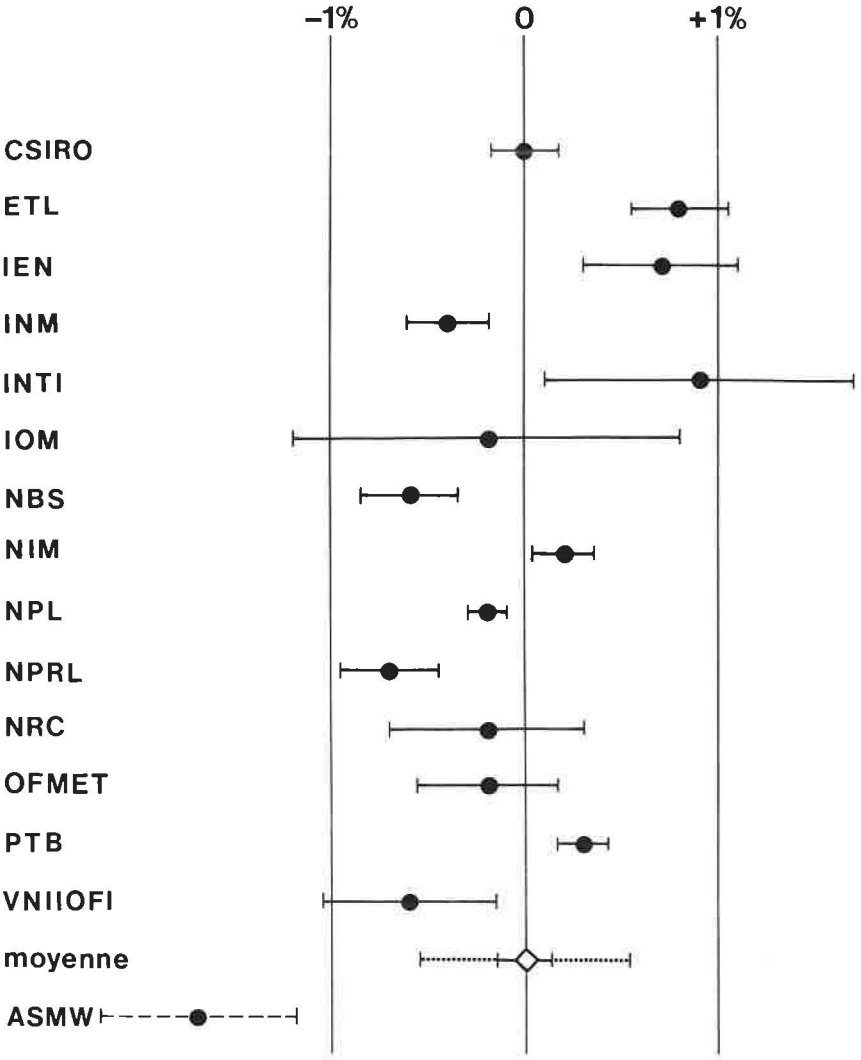

Fig. 1. — Grandeur des réalisations nationales de la candela.

Position de chaque laboratoire par rapport à la moyenne de 14 laboratoires (sauf ASMW).

Pour chaque réalisation, on a indiqué la valeur de l'écart-type fournie par le laboratoire. Pour la moyenne, on a fait apparaître les valeurs de l'écart-type calculées pour une détermination et pour la moyenne des 14 déterminations.

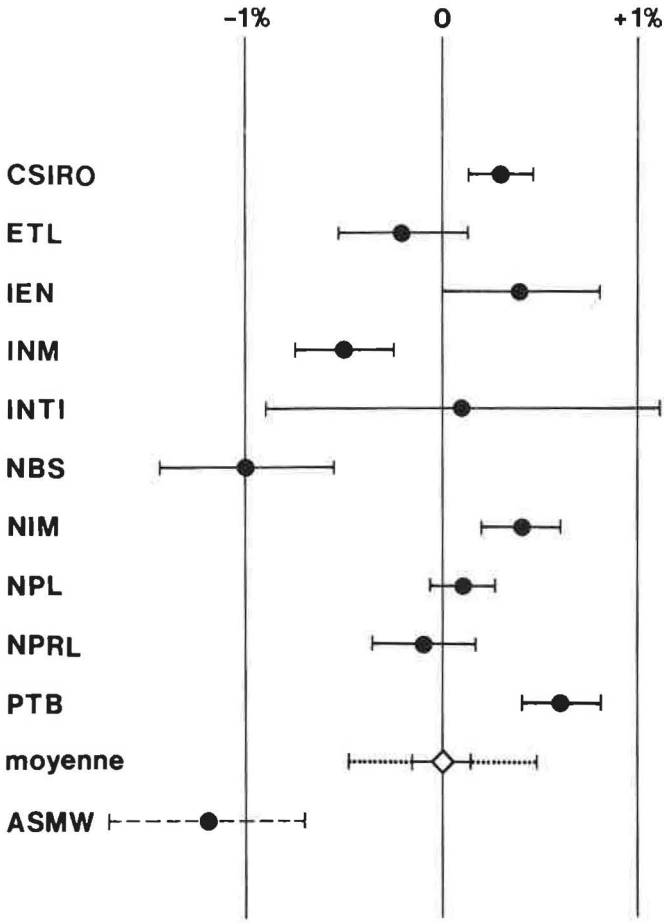

Fig. 2. — Grandeur des réalisations nationales du lumen.

Position de chaque laboratoire par rapport à la moyenne de 10 laboratoires (sauf ASMW).

Pour chaque réalisation, on a indiqué la valeur de l'écart-type fournie par le laboratoire. Pour la moyenne, on a fait apparaître les valeurs de l'écart-type calculées pour une détermination et pour la moyenne des 10 déterminations.

V. — Conclusions

L'examen des tableaux XVI et XVII permet de faire les observations suivantes :

Étalons d'intensité lumineuse. — La colonne (8) montre que les laboratoires qui ont utilisé des lampes Osram et des lampes NPL/GEC se répartissent en deux groupes : CSIRO, INM, NBS, NRC d'une part, ETL, NIM, NPL, NPRL d'autre part, avec un écart significatif de 0,4 % (Fig. 3). Cela signifie que le rapport des valeurs de l'intensité lumineuse d'une lampe Osram et d'une lampe NPL/GEC n'est pas apprécié de la même façon par tous les laboratoires.

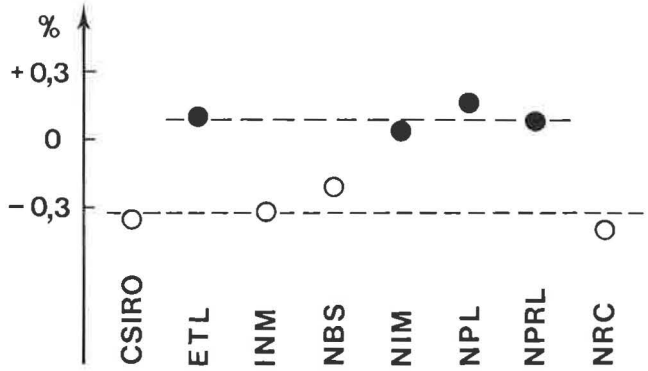

Fig. 3. — Étalons d'intensité lumineuse.
Appréciation du rapport des intensités lumineuses d'une lampe Osram et d'une lampe NPL/GEC : répartition des laboratoires en deux groupes.

Les conditions de mesure (distance lampe-récepteur, diamètre d'ouverture du récepteur, emploi d'écrans, etc.) dans les laboratoires nationaux et au BIPM, de même que le mode d'organisation des mesures au BIPM, ne semblent pas en cause.

L'origine de ce phénomène devra être recherchée par des mesures ultérieures.

Passage candela-lumen. — La colonne (9) montre comment les laboratoires nationaux ont réalisé le passage de la candela au lumen. Chaque valeur prise individuellement ne présente pas d'intérêt puisqu'elle fait intervenir les unités de référence du BIPM (candela et lumen) qui ne sont pas rattachées l'une à l'autre ; en revanche, la comparaison des différentes valeurs de la colonne (9) entre elles est intéressante.

On observe que six laboratoires sont en bon accord : CSIRO, NIM, NPL, NPRL, PTB, ASMW, tandis que les cinq autres se dispersent (Fig. 4). Ce résultat est d'autant plus surprenant que les problèmes liés à la réalisation de la candela et en particulier à l'utilisation du filtre $V(\lambda)$ n'interviennent pas ; il ne s'agit que d'un problème géométrique.

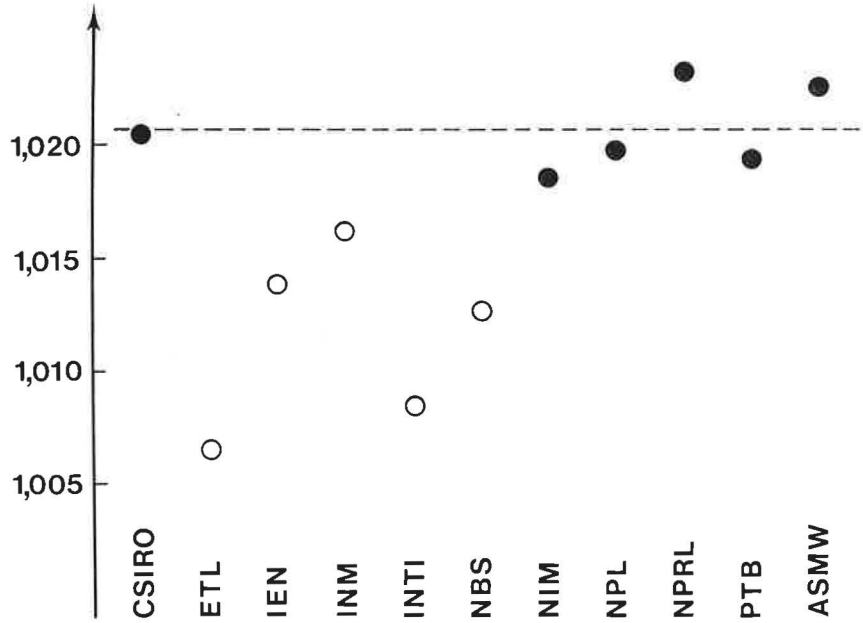

Fig. 4. — Passage candela-lumen.
Seule compte la position relative des laboratoires : six sont en bon accord.

Réalisations nationales de la candela et du lumen. — De prime abord, la dispersion des résultats pour la candela et le lumen semble équivalente à ce qu'elle était lors de la 5e comparaison internationale (1969). Toutefois, une analyse statistique des résultats (Appendice A) indique un certain progrès.

On observe encore en 1985, comme en 1969, une dispersion un peu plus grande pour la candela que pour le lumen. Ce résultat n'est peut-être pas fortuit et pourrait s'expliquer par certaines erreurs (sur la distance lampe-récepteur, par exemple) dans la détermination de la candela qui se trouveraient compensées par des erreurs similaires lors du passage candela-lumen.

Unités conservées au BIPM. — Les unités conservées au BIPM — depuis 1961 pour la candela et depuis 1952 pour le lumen — correspondent à l'ancienne définition de la candela et sont issues de comparaisons internationales comportant un nombre réduit de laboratoires (7 et 5 respectivement).

En revanche, les unités moyennes qui résultent de la présente comparaison sont l'expression effective de la nouvelle définition de la candela et ont été obtenues avec un nombre double de laboratoires (14 et 10). De plus, les méthodes employées par les laboratoires nationaux utilisent des techniques plus diversifiées que précédemment et les erreurs habituelles dues aux effets systématiques sont moins probables. Les nouvelles unités moyennes ont donc toutes les chances d'être plus exactes que celles qui sont actuellement utilisées au BIPM, dont elles diffèrent par − 1,0 % et + 0,7 %.

16 juin 1986
révisé le 11 mars 1987

TABLEAU I

Amt für Standardisierung, Messwesen und Warenprüfung (ASMW)

Rép. Dém. Allemande

Étalons d'intensité lumineuse *

(Lampes Osram)

	3671	3871	3872	3873	3874	3875	moyenne
(1) 1re série	0,9705	0,9717	0,9768	0,9678	0,9733	0,9749	0,9725
(2) 2e série	28	35	65	89	26	51	32
(3) moyenne	0,9716	0,9726	0,9766	0,9684	0,9730	0,9750	0,9729
(4) 1re série	+ 0,06	+ 0,03	+ 0,06	+ 0,04	+ 0,04	+ 0,03	+ 0,04
(5) 2e série	+ 07	+ 04	+ 06	+ 04	+ 04	+ 03	+ 05
(6) moyenne	+ 0,06	+ 0,04	+ 0,06	+ 0,04	+ 0,04	+ 0,03	+ 0,04

Étalons de flux lumineux *

(Lampes Narva)

	83-2	83-3	83-21	83-26	83-31	83-34	moyenne
(1) 1re série	0,9950	0,9930	0,9945	0,9943	0,9990	0,9953	0,9952
(2) 2e série	52	19	39	40	84	52	48
(3) moyenne	0,9951	0,9924	0,9942	0,9942	0,9987	0,9952	0,9950
(4) 1re série	+ 0,07	+ 0,05	+ 0,06	+ 0,05	+ 0,11	+ 0,07	+ 0,07
(5) 2e série	+ 05	+ 04	+ 05	+ 04	+ 08	+ 05	+ 05
(6) moyenne	+ 0,06	+ 0,04	+ 0,06	+ 0,04	+ 0,10	+ 0,06	+ 0,06

* On a tenu compte de la correction provisoire de 3 % à appliquer aux valeurs fournies par l'ASMW.

TABLEAU II

CSIRO

Australie

Étalons d'intensité lumineuse

	(Lampes Osram)					(Lampes NPL/GEC)				
	839	859	863	880	moyenne	A 474	A 479	A 480	A 483	moyenne
(1) 1re série	0,9951	0,9903	0,9906	0,9930	0,9922	0,9862	0,9899	0,9891	0,9897	0,9887
(2) 2e série	19	886	29	36	18	72	87	87	87	83
(3) moyenne	0,9935	0,9894	0,9918	0,9933	0,9920	0,9867	0,9893	0,9889	0,9892	0,9885
(4) 1re série	0,00	+ 0,01	+ 0,01	− 0,01	0,00	− 0,05	+ 0,13	+ 0,31	+ 0,13	+ 0,13
(5) 2e série	+ 01	+ 01	+ 01	− 01	00	− 19	+ 07	+ 06	+ 19	+ 03
(6) moyenne	0,00	+ 0,01	+ 0,01	− 0,01	0,00	− 0,12	+ 0,10	+ 0,18	+ 0,16	+ 0,08

Étalons de flux lumineux

	459	464	465	478	481	486	moyenne
(1) 1re série	1,0108	1,0099	1,0101	1,0096	1,0108	1,0094	1,0101
(2) 2e série	08	106	08	101	19	109	08
(3) moyenne	1,0108	1,0102	1,0104	1,0098	1,0114	1,0102	1,0105
(4) 1re série	+ 0,01	+ 0,03	+ 0,03	0,00	− 0,01	+ 0,01	+ 0,01
(5) 2e série	00	+ 02	+ 05	+ 01	+ 02	+ 02	+ 02
(6) moyenne	0,00	+ 0,02	+ 0,04	0,00	0,00	+ 0,02	+ 0,02

TABLEAU III

Electrotechnical Laboratory (ETL)

Japon

Étalons d'intensité lumineuse

	(Lampes Osram)						(Lampes NPL/GEC)			
	37	40	51	52	moyenne	1	2	4	5	moyenne
(1) 1re série.....	0,9976	0,9968	0,9976	0,9980	0,9975		0,9983	0,9986	0,9992	0,9987
(2) 2e série.....	95	72	61	81	77		77	89	90	85
(3) moyenne.....	0,9986	0,9970	0,9968	0,9980	0,9976	éliminé	0,9980	0,9988	0,9991	0,9986
(4) 1re série.....	− 0,02	0,00	+ 0,01	0,00	0,00		+ 0,03	+ 0,02	− 0,02	+ 0,01
(5) 2e série.....	− 01	00	+ 01	00	00		00	00	+ 03	+ 01
(6) moyenne.....	− 0,02	0,00	+ 0,01	0,00	0,00		+ 0,02	+ 0,01	0,00	+ 0,01

Étalons de flux lumineux

	472	476	485	490	491	493	moyenne
(1) 1re série.....	1,0040	1,0037	1,0034	1,0056	1,0037	1,0048	1,0042
(2) 2e série.....	47	47	46	58	38	58	49
(3) moyenne.....	1,0044	1,0042	1,0040	1,0057	1,0038	1,0053	1,0046
(4) 1re série.....	0,00	0,00	0,00	0,00	− 0,03	− 0,01	− 0,01
(5) 2e série.....	00	+ 01	00	+ 02	− 03	+ 02	00
(6) moyenne.....	0,00	0,00	0,00	+ 0,01	− 0,03	0,00	0,00

TABLEAU IV

Istituto Elettrotecnico Nazionale Galileo Ferraris (IEN)

Italie

Étalons d'intensité lumineuse

(Lampes Osram)

	139	159	184	199	692	702	moyenne
(1) 1re série	0,9984	0,9957	0,9984	0,9961	0,9968	0,9966	0,9970
(2) 2e série	94	44	78	53	69	68	68
(3) moyenne	0,9989	0,9950	0,9981	0,9957	0,9968	0,9967	0,9969
(4) 1re série	+ 0,02	+ 0,02	+ 0,02	+ 0,01	+ 0,04	+ 0,02	+ 0,02
(5) 2e série	+ 03	+ 02	+ 02	+ 02	+ 04	+ 02	+ 02
(6) moyenne	+ 0,02	+ 0,02	+ 0,02	+ 0,02	+ 0,04	+ 0,02	+ 0,02

Étalons de flux lumineux

	452	453	455	467	469	474	moyenne
(1) 1re série	1,0101	1,0102	1,0106	1,0100	1,0113	1,0110	1,0105
(2) 2e série	17	14	08	04	13	10	11
(3) moyenne	1,0109	1,0108	1,0107	1,0102	1,0113	1,0110	1,0108
(4) 1re série	+ 0,01	+ 0,01	0,00	+ 0,02	0,00	0,00	+ 0,01
(5) 2e série	+ 01	+ 01	00	+ 03	00	00	+ 01
(6) moyenne	+ 0,01	+ 0,01	0,00	+ 0,02	0,00	0,00	+ 0,01

TABLEAU V

Institut National de Métrologie (INM)

France

Étalons d'intensité lumineuse

	(Lampes Osram)					(Lampes NPL/GEC)				
	926	927	936	963	moyenne	A 430	A 431	A 434	A 447	moyenne
(1) 1re série	0,9854	0,9861	0,9898	0,9877	0,9872	0,9844	0,9872	0,9841	0,9844	0,9850
(2) 2e série	66	67	922	80	84	39	56	38	38	43
(3) moyenne	0,9860	0,9864	0,9910	0,9878	0,9878	0,9842	0,9864	0,9840	0,9841	0,9846
(4) 1re série	0,00	0,00	− 0,09	+ 0,03	− 0,02	+ 0,12	+ 0,08	+ 0,14	+ 0,07	+ 0,10
(5) 2e série	+ 01	− 01	− 09	+ 03	− 02	+ 12	+ 06	+ 09	+ 08	+ 09
(6) moyenne	0,00	0,00	− 0,09	+ 0,03	− 0,02	+ 0,12	+ 0,07	+ 0,12	+ 0,08	+ 0,10

Étalons de flux lumineux

	185	421	423	425	428	429	moyenne
(1) 1re série	1,0008	0,9997	1,0021	1,0040	1,0028	1,0013	1,0018
(2) 2e série	19	1,0007	29	47	37	13	25
(3) moyenne	1,0014	1,0002	1,0025	1,0044	1,0032	1,0013	1,0022
(4) 1re série	− 0,06	+ 0,01	+ 0,03	+ 0,04	+ 0,04	− 0,04	0,00
(5) 2e série	− 05	+ 01	+ 03	+ 05	+ 05	+ 01	+ 02
(6) moyenne	− 0,06	+ 0,01	+ 0,03	+ 0,04	+ 0,04	− 0,02	+ 0,01

TABLEAU VI

Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI)

Argentine

Étalons d'intensité lumineuse

(Lampes NPL/GEC)

	A 436	A 458	A 462	moyenne
(1) 1re série	0,9995	1,0026	0,9949	0,9990
(2) 2e série	1,0011	33	48	97
(3) moyenne	1,0003	1,0030	0,9948	0,9994
(4) 1re série	+ 0,02	+ 0,08	+ 0,11	+ 0,07
(5) 2e série	+ 06	+ 05	+ 23	+ 11
(6) moyenne	+ 0,04	+ 0,06	+ 0,17	+ 0,09

Étalons de flux lumineux

	432	434	437	440	447	448	moyenne
(1) 1re série	1,0073	1,0074	1,0080	1,0074	1,0081	1,0064	1,0074
(2) 2e série	86	83	98	73	83	71	82
(3) moyenne	1,0080	1,0078	1,0089	1,0074	1,0082	1,0068	1,0078
(4) 1re série	− 0,02	− 0,02	0,00	− 0,04	− 0,02	− 0,06	− 0,03
(5) 2e série	− 02	− 02	− 01	− 03	− 02	− 04	− 02
(6) moyenne	− 0,02	− 0,02	0,00	− 0,04	− 0,02	− 0,05	− 0,02

TABLEAU VII

Instituto de Optica (IOM)

Espagne

Étalons d'intensité lumineuse

(Lampes NPL/GEC)

	A 454	A 455	A 456	A 459	moyenne
(1) 1re série	0,9900	0,9871	0,9901	0,9853	0,9881
(2) 2e série	887	87	894	50	80
(3) moyenne	0,9894	0,9879	0,9898	0,9852	0,9880
(4) 1re série	+ 0,13	+ 0,27	+ 0,17	+ 0,32	+ 0,22
(5) 2e série	+ 19	+ 37	+ 11	+ 37	+ 26
(6) moyenne	+ 0,16	+ 0,32	+ 0,14	+ 0,34	+ 0,24

TABLEAU VIII

National Bureau of Standards (NBS)

États-Unis d'Amérique

Étalons d'intensité lumineuse

	(Lampes Osram)					(Lampes NPL/GEC)				
	10456	10457	10458	10460	moyenne	10450	10451	10453	10455	moyenne
(1) 1re série	0,9871	0,9837	0,9882	0,9836	0,9856	0,9828	0,9830	0,9839	0,9852	0,9837
(2) 2e série	76	38	63	36	53	22	26	33	46	32
(3) moyenne	0,9874	0,9838	0,9872	0,9836	0,9855	0,9825	0,9828	0,9836	0,9849	0,9834
(4) 1re série	0,00	+ 0,01	+ 0,01	+ 0,01	+ 0,01	− 0,34	− 0,35	− 0,31	− 0,33	− 0,33
(5) 2e série	+ 01	+ 01	+ 01	+ 01	+ 01	− 30	− 37	− 34	− 34	− 34
(6) moyenne	0,00	+ 0,01	+ 0,01	+ 0,01	+ 0,01	− 0,32	− 0,36	− 0,32	− 0,34	− 0,34

Étalons de flux lumineux

	10461	10462	10463	10464	10465	10466	moyenne
(1) 1re série	0,9964	0,9964	0,9951	0,9971	0,9975	0,9967	0,9965
(2) 2e série	73	70	62	74	75	64	70
(3) moyenne	0,9968	0,9967	0,9956	0,9972	0,9975	0,9966	0,9968
(4) 1re série	− 0,07	− 0,04	− 0,01	− 0,01	− 0,02	− 0,02	− 0,03
(5) 2e série	− 05	− 02	− 01	− 01	− 01	− 02	− 02
(6) moyenne	− 0,06	− 0,03	− 0,01	− 0,01	− 0,02	− 0,02	− 0,02

TABLEAU IX

Institut National de Métrologie (NIM)

Rép. Pop. de Chine

Étalons d'intensité lumineuse

	(Lampes Osram)		(lampes chinoises)			(Lampes NPL/GEC)				
	23	30	032	200	moyenne	A 179	A 197	A 252	A 253	moyenne
(1) 1re série	0,9902	0,9922	0,9931	0,9923	0,9920	0,9922	0,9903	0,9927	0,9927	0,9920
(2) 2e série	19	29	28	30	26	42	33	26	25	32
(3) moyenne	0,9910	0,9926	0,9930	0,9926	0,9923	0,9932	0,9918	0,9926	0,9926	0,9926
(4) 1re série	− 0,03	− 0,02	− 0,01	+ 0,04	0,00	− 0,01	+ 0,05	+ 0,03	0,00	+ 0,02
(5) 2e série	− 03	− 01	− 05	− 03	− 03	00	− 01	− 06	+ 03	− 01
(6) moyenne	− 0,03	− 0,02	− 0,03	0,00	− 0,02	0,00	+ 0,02	− 0,02	+ 0,02	0,00

Étalons de flux lumineux

	458	461	462	466	483	492	moyenne
(1) 1re série	1,0089	1,0121	1,0077	1,0121	1,0120	1,0110	1,0106
(2) 2e série	103	20	87	23	22	13	0111
(3) moyenne	1,0096	1,0120	1,0082	1,0122	1,0121	1,0112	1,0109
(4) 1re série	+ 0,03	+ 0,02	+ 0,05	+ 0,01	+ 0,01	+ 0,03	+ 0,02
(5) 2e série	+ 03	+ 02	+ 04	+ 02	00	+ 03	+ 02
(6) moyenne	+ 0,03	+ 0,02	+ 0,04	+ 0,02	0,00	+ 0,03	+ 0,02

TABLEAU X

National Physical Laboratory (NPL)

Royaume-Uni

Étalons d'intensité lumineuse

	(Lampes Osram)					(Lampes NPL/GEC)				
	6 EL	6 EM	6 EN	6 EP	moyenne	A 532	A 535	A 536	A 539	moyenne
(1) 1re série.....	0,9866	0,9878	0,9873	0,9863	0,9870		0,9880	0,9893	0,9894	0,9889
(2) 2e série.....	94	77	66	63	75		95	96	80	90
(3) moyenne.....	0,9880	0,9878	0,9870	0,9863	0,9873	éliminé	0,9888	0,9894	0,9887	0,9890
(4) 1re série.....	− 0,01	0,00	− 0,01	− 0,01	− 0,01		+ 0,01	− 0,15	− 0,12	− 0,09
(5) 2e série.....	+ 01	00	− 01	00	00		− 02	− 10	− 07	− 06
(6) moyenne.....	0,00	0,00	− 0,01	0,00	0,00		0,00	− 0,12	− 0,10	− 0,08

Étalons de flux lumineux

	287B	287C	287D	273A	273D	273G	moyenne
(1) 1re série.....	1,0085	1,0083	1,0079	1,0058	1,0063	1,0083	1,0075
(2) 2e série.....	91	91	89	63	67	85	81
(3) moyenne.....	1,0088	1,0087	1,0084	1,0060	1,0065	1,0084	1,0078
(4) 1re série.....	0,00	+ 0,05	− 0,01	0,00	0,00	0,00	+ 0,01
(5) 2e série.....	+ 01	+ 04	00	+ 01	00	00	+ 01
(6) moyenne.....	0,00	+ 0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	+ 0,01

TABLEAU XI

National Physical Research Laboratory (NPRL)

Afrique du Sud

Étalons d'intensité lumineuse

	(Lampes Osram)					(Lampes NPL/GEC)				
	NSI 7	NSI 8	NSI 9	NSI 10	moyenne	NSI 1	NSI 2	NSI 5	NSI 6	moyenne
(1) 1re série	0,9832	0,9826	0,9822	0,9828	0,9827	0,9784	0,9846	0,9862	0,9846	0,9834
(2) 2e série	37	37	17	37	32	855	39	31	45	42
(3) moyenne	0,9834	0,9832	0,9820	0,9832	0,9830	0,9820	0,9842	0,9846	0,9846	0,9838
(4) 1re série	− 0,09	− 0,06	− 0,02	− 0,03	− 0,05	+ 0,01	+ 0,13	− 0,18	− 0,05	− 0,02
(5) 2e série	− 08	− 05	− 01	− 03	− 04	+ 06	+ 08	− 25	+ 06	− 01
(6) moyenne	− 0,08	− 0,06	− 0,02	− 0,03	− 0,05	+ 0,04	+ 0,10	− 0,22	0,00	− 0,02

Étalons de flux lumineux

	NSF 1	NSF 2	NSF 3	NSF 4	NSF 5	NSF 6	moyenne
(1) 1re série	1,0076	1,0054	1,0036	1,0052	1,0069	1,0063	1,0058
(2) 2e série	86	68	46	67	68	62	66
(3) moyenne	1,0081	1,0061	1,0041	1,0060	1,0068	1,0062	1,0062
(4) 1re série	+ 0,03	+ 0,01	+ 0,02	+ 0,02	− 0,01	0,00	+ 0,01
(5) 2e série	+ 03	+ 03	+ 03	+ 02	− 01	00	+ 02
(6) moyenne	+ 0,03	+ 0,02	+ 0,02	+ 0,02	− 0,01	0,00	+ 0,01

TABLEAU XII

Conseil National de Recherches (NRC)

Canada

Étalons d'intensité lumineuse

	(Lampes Osram)					(Lampes NPL/GEC)				
	021	023	026	030	moyenne	A 249	A 433	A 439	A 449	moyenne
(1) 1re série	0,9912	0,9913	0,9898	0,9890	0,9903	0,9864	0,9870	0,9860	0,9858	0,9863
(2) 2e série	26	08	93	89	04	72	68	73	46	65
(3) moyenne	0,9919	0,9910	0,9896	0,9890	0,9904	0,9868	0,9869	0,9866	0,9852	0,9864
(4) 1re série	+ 0,02	+ 0,03	+ 0,01	+ 0,01	+ 0,02	− 0,04	+ 0,04	+ 0,02	+ 0,01	+ 0,01
(5) 2e série	+ 03	+ 04	+ 03	+ 01	+ 03	00	+ 05	00	+ 03	+ 02
(6) moyenne	+ 0,02	+ 0,04	+ 0,02	+ 0,01	+ 0,02	− 0,02	+ 0,04	+ 0,01	+ 0,02	+ 0,01

TABLEAU XIII

Office Fédéral de Métrologie (OFMET)

Suisse

Étalons d'intensité lumineuse

(Lampes Osram)

	626	684	701	749	moyenne
(1) 1re série	0,9878	0,9875	0,9884		0,9879
(2) 2e série	93	81	78	éliminé	84
(3) moyenne	0,9886	0,9878	0,9881		0,9881
(4) 1re série	+ 0,03	+ 0,01	+ 0,13		+ 0,06
(5) 2e série	+ 04	+ 01	+ 14		+ 06
(6) moyenne	+ 0,04	+ 0,01	+ 0,14		+ 0,06

TABLEAU XIV

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB)

Rép. Féd. d'Allemagne

Étalons d'intensité lumineuse

(Lampes Osram)

	3849	416	726	759	791	793	moyenne
(1) 1re série	0,9918	0,9941	0,9940	0,9933	0,9926	0,9935	0,9932
(2) 2e série	41	42	40	27	25	31	34
(3) moyenne	0,9930	0,9942	0,9940	0,9930	0,9926	0,9933	0,9933
(4) 1re série	+ 0,01	+ 0,03	+ 0,03	+ 0,03	+ 0,02	+ 0,03	+ 0,02
(5) 2e série	+ 02	+ 02	+ 04	+ 03	+ 03	+ 03	+ 03
(6) moyenne	+ 0,02	+ 0,02	+ 0,04	+ 0,03	+ 0,02	+ 0,03	+ 0,03

Étalons de flux lumineux

	422	426	427	430	438	443	moyenne
(1) 1re série	1,0128	1,0124	1,0116	1,0112	1,0129	1,0129	1,0123
(2) 2e série	40	30	22	16	30	34	29
(3) moyenne	1,0134	1,0127	1,0119	1,0114	1,0130	1,0132	1,0126
(4) 1re série	+ 0,04	+ 0,01	0,00	0,00	0,00	− 0,01	+ 0,01
(5) 2e série	+ 05	+ 01	00	+ 03	00	00	+ 02
(6) moyenne	+ 0,04	+ 0,01	0,00	+ 0,02	0,00	0,00	+ 0,01

TABLEAU XV

Institut de Recherche pour les Mesures Optiques et Physiques (VNIIOFI)

U.R.S.S.

Étalons d'intensité lumineuse

(Lampes NPL/GEC)

	A 466	A 473	A 477	A 484	A 503	A 512	moyenne
(1) 1re série	1,0019	0,9854	0,9810	0,9743	0,9813	0,9818	0,9843
(2) 2e série	0,9995	49	02	34	11	13	34
(3) moyenne	1,0007	0,9852	0,9806	0,9738	0,9812	0,9816	0,9838
(4) 1re série	+ 0,04	− 0,06	− 0,01	− 0,16	− 0,10	− 0,09	− 0,06
(5) 2e série	+ 05	− 09	+ 02	− 20	+ 10	− 09	− 04
(6) moyenne	+ 0,04	− 0,08	0,00	− 0,18	0,00	− 0,09	− 0,05

TABLEAU XVI

Étalons d'intensité lumineuse

Résumé

Laboratoire	Intensité lumineuse					Différence de potentiel	
	Osram	NPL/GEC	moyenne	(7)	(8)	Osram	NPL/GEC
CSIRO	0,9920	0,9885	0,9902	0,0	− 0,35	0,00	+ 0,08
ETL	0,9976	0,9986	0,9981	+ 0,8	+ 0,10	0,00	+ 0,01
IEN	0,9969		0,9969	+ 0,7		+ 0,02	
INM	0,9878	0,9846	0,9862	− 0,4	− 0,32	− 0,02	+ 0,10
INTI		0,9994	0,9994	+ 0,9			+ 0,09
IOM		0,9880	0,9880	− 0,2			+ 0,24
NBS	0,9855	0,9834	0,9844	− 0,6	− 0,21	+ 0,01	− 0,34
NIM	0,9923	0,9926	0,9924	+ 0,2	+ 0,03	− 0,02	0,00
NPL	0,9873	0,9890	0,9882	− 0,2	+ 0,17	0,00	− 0,08
NPRL	0,9830	0,9838	0,9834	− 0,7	+ 0,08	− 0,05	− 0,02
NRC	0,9904	0,9864	0,9884	− 0,2	− 0,40	+ 0,02	+ 0,01
OFMET	0,9881		0,9881	− 0,2		+ 0,06	
PTB	0,9933		0,9933	+ 0,3		+ 0,03	
VNIIOFI		0,9838	0,9838	− 0,6			− 0,05
moyenne			0,9901				
ASMW	0,9729		0,9729	− 1,7		+ 0,04	

Ce laboratoire n'a pas confirmé ses valeurs ; il n'est donc pas pris en compte pour le calcul de la moyenne.

TABLEAU XVII

Étalons de flux lumineux

Résumé

Laboratoire	Flux lumineux	(7)	Différence de potentiel
CSIRO	1,0105	+ 0,3	+ 0,02
ETL	1,0046	− 0,2	0,00
IEN	1,0108	+ 0,4	+ 0,01
INM	1,0022	− 0,5	+ 0,01
INTI	1,0078	+ 0,1	− 0,02
NBS	0,9968	− 1,0	− 0,02
NIM	1,0109	+ 0,4	+ 0,02
NPL	1,0078	+ 0,1	+ 0,01
NPRL	1,0062	− 0,1	+ 0,01
PTB	1,0126	+ 0,6	+ 0,01
moyenne	1,0070		
ASMW	0,9950	− 1,2	+ 0,06

Ce laboratoire n'a pas confirmé ses valeurs ; il n'est donc pas pris en compte pour le calcul de la moyenne.

Passage candela-lumen

Laboratoire	(9)
CSIRO	1,0205
ETL	1,0065
IEN	1,0139
INM	1,0162
INTI	1,0084
NBS	1,0126
NIM	1,0186
NPL	1,0198
NPRL	1,0232
PTB	1,0194
ASMW	1,0227

Appendice A

Note sur les résultats de la sixième comparaison des étalons nationaux d'intensité et de flux lumineux (1985)

par W.R. Blevin

(Traduction du document CCPR/86-8 révisé)

Le tableau 1 présente une analyse des différentes réalisations nationales des unités d'intensité et de flux lumineux en fonction des résultats de la cinquième comparaison (1969) et de la sixième comparaison (1985).

Les valeurs de 1969 sont extraites des tableaux 9 à 11, pp. 117-119, du rapport du CCP, 7e session, 1971 : ces valeurs proviennent des colonnes 3 ou 5, le choix se portant sur la colonne qui donne les réalisations nationales les plus récentes des unités. On n'a pas tenu compte des valeurs se référant au résultat moyen des comparaisons internationales antérieures.

Les valeurs des réalisations nationales de 1985 ont été extraites du tableau XVI, colonne 4, et du tableau XVII, colonne 2, du rapport.

On peut tirer les conclusions suivantes de cette analyse :

(1) La dispersion des réalisations nationales de la candela à 2 800 K de 1985 (nouvelle définition) est analogue à celle des réalisations de la candela à 2 045 K de 1969 (ancienne définition) et plus faible que celle des réalisations nationales de la candela à 2 859 K de 1969 (ancienne définition).

(2) L'écart-type de la candela moyenne internationale à 2 800 K de 1985 est plus faible que celui de la candela moyenne internationale à 2 045 K ou à 2 859 K de 1969, en grande partie en raison du plus grand nombre de laboratoires participants.

(3) La dispersion des réalisations nationales du lumen à 2 800 K de 1985 et l'écart-type du lumen moyen international de 1985 sont plus faibles que les valeurs correspondantes à 2 793 K de 1969.

(4) La dispersion des réalisations nationales du lumen de 1985 est un peu plus faible que celle des réalisations nationales de la candela de 1985.

TABLEAU 1

Comparaisons internationales de 1969 et de 1985
Dispersion des réalisations nationales de la candela et du lumen

	Intensité lumineuse					Flux lumineux		
	2 045 K 1969	2 859 K 1969	2 800 K 1985	2 800 K 1985	2 800 K 1985	2 793 K 1969	2 800 K 1985	2 800 K 1985
Nombre de laboratoires nationaux, n .	8	7	15	14 *	10 **	8	11	10 *
Unité moyenne 1985 (par rapport à l'unité conservée au BIPM).....			98,89 %	99,01 %	99,12 %		100,59 %	100,70 %
Écart moyen par rapport à l'unité moyenne $\overline{\lvert x - \bar{x} \rvert}$.....	0,58 %	0,79 %	0,49 %	0,43 %	0,48 %	0,51 %	0,46 %	0,37 %
Écart-type d'une réalisation nationale, $\sigma(x)$	0,70 %	1,03 %	0,67 %	0,53 %	0,57 %	0,64 %	0,58 %	0,48 %
Écart-type de la moyenne internationale, $\sigma(\bar{x})$	0,25 %	0,39 %	0,17 %	0,14 %	0,18 %	0,23 %	0,18 %	0,15 %

$$\overline{\lvert x - \bar{x} \rvert} = \frac{\Sigma \lvert x - \bar{x} \rvert}{n}; \quad \sigma(x) = \sqrt{\frac{\Sigma (x - \bar{x})^2}{(n-1)}}; \quad \sigma(\bar{x}) = \sqrt{\frac{\Sigma (x - \bar{x})^2}{n(n-1)}}$$

* Les résultats provisoires de l'ASMW ont été omis.
** Les mêmes 10 laboratoires que pour la comparaison de flux lumineux.

Le tableau 2 donne le quotient entre la valeur pour le lumen (tableau XVII, colonne 2) et celle pour la candela (tableau XVI, colonne 4), pour ceux des laboratoires nationaux qui ont participé aux deux comparaisons d'intensité et de flux lumineux de 1985, avec une analyse statistique élémentaire de ces résultats. La valeur moyenne internationale de ce quotient est supérieure d'environ 1,6 % à la valeur correspondante du quotient entre le lumen et la candela conservés au BIPM.

TABLEAU 2

Quotient des réalisations du lumen et de la candela 1985 de chaque laboratoire national

Ce quotient est exprimé en fonction du lumen moyen 1952 (conservé au BIPM par le groupe de référence 1969) et de la candela moyenne 1961 (conservée au BIPM par le groupe de référence 1969).

Laboratoire	Quotient (%)
ASMW	102,27
CSIRO	102,05
ETL	100,65
IEN	101,39
INM	101,62
INTI	100,84
NBS	101,26
NIM	101,86
NPL	101,98
NPRL	102,32
PTB	101,94

Nombre de laboratoires nationaux	11	10 *
Quotient moyen	101,65 %	101,59 %
Écart moyen par rapport au quotient moyen	0,46 %	0,44 %
Écart-type d'un quotient national	0,56 %	0,55 %
Écart-type du quotient moyen	0,17 %	0,17 %

* Les résultats provisoires de l'ASMW ont été omis.

Si l'on suppose que les moyennes des réalisations nationales de 1985 correspondent à la candela et au lumen du SI, on peut déduire du tableau 1 que la candela conservée au BIPM est supérieure d'environ 1 % à celle du SI et que le lumen conservé au BIPM est inférieur d'environ 0,6-0,7 % au lumen du SI.

Appendice B

Informations fournies par les laboratoires nationaux sur la réalisation des unités et le bilan des incertitudes *

Amt für Standardisierung, Messwesen und Warenprüfung

1. *Intensité lumineuse ; réalisation de la candela*

1.1. Actuellement la réalisation de la candela repose, légalement, sur la définition de 1948 et la comparaison internationale de 1969.

— Les mesures ont été réalisées sur un banc photométrique en transférant l'unité d'intensité lumineuse d'un groupe national de lampes étalons au groupe voyageur, au moyen d'un récepteur photoélectrique.

— Type de récepteur : cellule Osram au silicium, très bien adaptée $V(\lambda)$, de diamètre 60 mm.

1.2. Les mesures ont aussi été réalisées au moyen d'un radiomètre à substitution électrique, de type conique, associé à un filtre $V(\lambda)$, dans le but de déterminer l'intensité lumineuse des lampes du groupe voyageur suivant la nouvelle définition de la candela. Le filtre utilisé était composé de trois lames de verre de qualité optique. Les problèmes concernant le montage et la mesure de la transmission du filtre sont des problèmes très délicats.

Une méthode de substitution a été appliquée, ce qui signifie que l'intensité lumineuse de sources de forte puissance (1 000 W) a d'abord été déterminée directement au moyen du radiomètre à substitution électrique puis, dans une deuxième étape, sur le banc photométrique, transférée aux lampes étalons en utilisant le récepteur $V(\lambda)$ déjà décrit ci-dessus. Sur la base de $K_m = 683$ lm/W, des résultats préliminaires ont été obtenus pour l'intensité lumineuse des lampes ; ils sont systématiquement supérieurs de 3 % en moyenne aux résultats obtenus suivant l'ancienne définition, avec une exactitude de 0,5 %.

---

* Par souci d'uniformité dans la présentation des incertitudes, le BIPM a ramené toutes les valeurs au niveau de 1 écart-type.

2. *Flux lumineux*

Les mesures ont été réalisées au moyen d'un goniophotomètre. Le récepteur, une cellule Osram au silicium de diamètre 60 mm, très bien adaptée $V(\lambda)$, était placé à une distance de 2,20 m du centre de la lampe. Afin d'effectuer une première série de mesures, on déplaçait le récepteur circulairement, à des angles successifs de 15°, dans un plan contenant l'axe longitudinal de la lampe. On faisait ensuite tourner la lampe de 15° autour de son axe longitudinal pour effectuer une seconde série de mesures, et ainsi de suite jusqu'à ce qu'on ait obtenu la totalité de la répartition d'intensité lumineuse, à partir de laquelle était calculé le flux lumineux.

Le groupe national de lampes étalons d'intensité lumineuse a été utilisé pour l'étalonnage du goniophotomètre.

L'écart maximal de la valeur moyenne du flux lumineux était de 0,4 %.

CSIRO — Division of Applied Physics

1. *Intensité lumineuse*

L'échelle d'intensité lumineuse a été réalisée au moyen d'un radiomètre à substitution électrique et d'un filtre corrigé $V(\lambda)$.

L'incertitude sur l'intensité lumineuse se compose des éléments suivants :

	Incertitudes estimées (en %) (1 écart-type)
Mesure de la puissance rayonnée	0,1
Transmission du filtre	0,1
Mesure de la distance	0,01
Mesure du courant de la lampe	0,02
Température de répartition à 2 800 K	0,02
Dérive de la lampe	0,1
Précision de chaque mesure (avec les variations dues à l'orientation de la lampe)	0,04
Somme quadratique	0,18

2. *Flux lumineux*

Une lampe étalonnée en intensité lumineuse à une distance d'un mètre a été utilisée pour transférer l'échelle d'intensité lumineuse à une cellule au silicium corrigée $V(\lambda)$ montée dans un goniophotomètre ayant une distance de travail d'un mètre. L'unité de flux lumineux a été réalisée par sommation à tout l'espace.

L'incertitude sur le flux lumineux se compose des éléments suivants :

Incertitudes estimées (en %)
(1 écart-type)

Exactitude de l'échelle d'intensité lumineuse	0,15
Transfert de l'échelle d'intensité lumineuse	0,03
Procédure d'intégration du flux lumineux	0,02
Incertitude due aux erreurs de distance	0,03
Précision de chaque mesure de flux	0,03
Dérive de la lampe	0,03
Température de répartition à 2 800 K	0,01
Mesure du courant de la lampe	0,02
Somme quadratique	0,17

Electrotechnical Laboratory

1. *Réalisation de la candela*

Au début des années 1970, l'ETL a effectué un travail expérimental en vue de déterminer l'efficacité lumineuse spectrale maximale d'un rayonnement. La valeur obtenue pour K_m est de 683 lm/W avec une incertitude de 0,3 % ([1]). Bien que ce travail ait précédé la redéfinition de la candela en 1979, nous considérons que cette réalisation de la candela est conforme à la nouvelle définition.

Du point de vue de la réalisation de la candela, on peut décrire l'expérience comme suit :

(1) Une thermopile a été étalonnée dans l'échelle radiométrique absolue au moyen de radiomètres absolus. On utilisait une lampe fonctionnant à la température de répartition d'environ 2 700 K dont le rayonnement était filtré par une cellule d'eau.

(2) La thermopile équipée d'un filtre $V(\lambda)$ recevait le rayonnement d'une lampe fonctionnant à la température de répartition de 2 853 K. L'intensité lumineuse de la lampe était évaluée à partir de la réponse de la thermopile, du facteur de transmission spectral du filtre, de l'efficacité lumineuse relative spectrale, $V(\lambda)$, de l'observateur de référence photométrique et de l'efficacité lumineuse spectrale maximale du rayonnement, K_m.

([1]) H. Katsuyama et H. Kikuchi. *Metrologia*, **11**, 1975, pp. 165-168.

2. *Étalonnage des lampes étalons d'intensité lumineuse*

L'étalonnage a été effectué par comparaison directe avec deux des trois lampes étalons secondaires.

Incertitudes estimées (en %)
(1 écart-type)

	lampes NPL/GEC	lampes Osram
Réalisation de la candela		
Radiomètre absolu	0,16	0,16
Thermopile	0,13	0,13
Filtre $V(\lambda)$	0,08	0,08
Reproductibilité des lampes étalons de l'ETL	0,06	0,06
Étalonnage des lampes pour la comparaison		
Différence de température de répartition	0,01	0,01
Reproductibilité des mesures	0,09	0,05
Somme quadratique	0,25	0,24

3. *Réalisation du lumen*

Au début des années 1980, l'ETL a construit un goniophotomètre et le lumen a été dérivé de la candela obtenue suivant la nouvelle définition ([2]), au moyen de lampes ayant 2 788 K pour température de répartition.

4. *Étalonnage des lampes étalons de flux lumineux*

Deux lampes étalons de l'ETL ont été utilisées comme référence et le lumen a été transféré aux six lampes envoyées au BIPM par comparaison dans une sphère intégrante de 1,5 m de diamètre.

Incertitudes estimées (en %)
(1 écart-type)

Réalisation de la candela	0,23
Passage à la candela à 2 788 K	0,02
Passage de la candela au lumen	
Champ magnétique environnant	0,06
Méthode d'intégration numérique	0,05
Linéarité du récepteur	0,03
Reproductibilité des mesures	0,20
Étalonnage des lampes pour la comparaison	
Différence d'absorption	0,02
Reproductibilité des mesures	0,05
Somme quadratique	0,33

([2]) H. Katsuyama et H. Kikuchi, *Bull. Electrotechnical Laboratory*, **47**, 1983 p. 1119 (en japonais).

Istituto Elettrotecnico Nazionale

1. *Étalons d'intensité lumineuse (Osram Wi 41 G)*

L'intensité lumineuse des lampes a été mesurée avec une photopile au silicium, étalonnée par rapport à un radiomètre absolu [1] équipé d'un filtre simulant la fonction $V(\lambda)$. La photopile était aussi corrigée $V(\lambda)$. La distance lampe-récepteur était de 2,7 m environ, le diamètre du récepteur de 3 cm.

	Incertitudes estimées (en %) (1 écart-type)
Radiomètre absolu	
non équivalence entre flux énergétique et puissance électrique (après correction)	0,25
mesure de la puissance électrique	0,04
aire de l'ouverture	0,02
Filtre $V(\lambda)$	
mesure du facteur de transmission	0,25
approximation de la transmission du filtre à $V(\lambda)$ (après correction)	0,01
Photomètre	
mesure du courant photoélectrique	0,02
coefficients de température des composants électroniques	0,01
mise en place du récepteur dans le plan de l'ouverture du radiomètre	0,04
Lampe	
instabilité de l'alimentation ($0{,}1 . 10^{-3}$)	0,07
mesure du courant électrique ($0{,}2 . 10^{-3}$)	0,14
Distance lampe-récepteur ($0{,}4 . 10^{-3}$)	0,08
Somme quadratique	0,4

2. *Étalons de flux lumineux (GEC 200 W)*

Le flux lumineux des lampes a été défini à l'aide d'un goniophotomètre, par intégration de l'éclairement lumineux mesuré sur une surface sphérique (diamètre 5,6 m). L'éclairement a été relevé à chaque degré de latitude, le long des méridiens, l'intervalle entre deux méridiens contigus étant de 5 degrés. Le récepteur était une photopile au silicium (diamètre 3 cm), corrigée $V(\lambda)$, étalonnée par rapport au radiomètre absolu.

---

[1] F. Hengstberger : CSIR Research Report 331 (CSIR, Pretoria, 1977).

Incertitudes estimées (en %)
(1 écart-type)

Goniophotomètre	
rayon de la sphère ($0{,}15 . 10^{-3}$)	0,03
perte de lumière due à la suspension de la lampe (après correction)	0,01
lumière parasite (après correction)	0,03
Photomètre (étalonné par rapport au radiomètre absolu) ; trois premiers points du tableau précédent	0,36
Lampe	
instabilité de l'alimentation ($0{,}1 . 10^{-3}$)	0,07
mesure du courant électrique ($0{,}2 . 10^{-3}$)	0,14
Somme quadratique	0,4

Institut National de Métrologie (France)

1. *Réalisation de la candela*

L'unité d'intensité lumineuse a été réalisée en utilisant deux radiomètres à substitution électrique associés à deux filtres $V(\lambda)$ de type différent. Un groupe de 9 lampes a été étalonné à l'aide de ces dispositifs, la distance optique du filament de la lampe à la surface du récepteur étant de l'ordre de 50 cm. Le diamètre du récepteur était de 8 mm.

Ces 9 lampes ont été ensuite comparées, à l'aide d'un photomètre photoélectrique équipé d'un récepteur au silicium (diamètre 60 mm) corrigé $V(\lambda)$ par une mosaïque, et à une distance de 3 m, à un groupe de 6 lampes Osram ayant participé à la comparaison internationale de 1969, afin de déterminer l'écart entre la nouvelle réalisation de la candela et l'ancienne valeur conservée.

L'intensité lumineuse des lampes Osram et GEC envoyées au BIPM pour la comparaison de 1985 a été déterminée par comparaison, à l'aide du même photomètre que précédemment, au groupe de 6 lampes Osram cité ci-dessus, aussi bien pour les mesures « aller » que pour les mesures « retour ».

Incertitudes estimées (en %)
(1 écart-type)

Mesure de l'éclairement	
mesure de puissance	0,05
facteur de réflexion	0,10
conduction thermique	0,07
uniformité de la réponse	0,05
échauffement du diaphragme	0,01
modulateur	0,01
échauffement des fils	0,01
préamplificateur	0,01
diamètre du diaphragme	0,02
Mesure de distance	0,04
Orientation de la lampe	0,02
Courbe $V(\lambda)$	0,02
Répétabilité des mesures	0,14
Somme quadratique	0,21

2. *Réalisation du lumen*

En partant de l'unité d'intensité lumineuse réalisée précédemment, la détermination du lumen a été faite à l'aide d'un goniophotomètre équipé d'un récepteur au silicium (diamètre 60 mm) corrigé $V(\lambda)$ par une mosaïque et thermostaté. La distance source-récepteur était de 3,5 m.

Les lampes GEC étalons de flux lumineux adressées au BIPM ont été directement mesurées au goniophotomètre aussi bien pour les mesures « aller » que pour les mesures « retour ». Le récepteur était étalonné à l'aide de trois lampes GEC étalons d'intensité lumineuse, étalonnées directement par rapport au radiomètre absolu.

Incertitudes estimées (en %)
(1 écart-type)

Réalisation de la candela	0,21
Étalonnage du récepteur	0,10
Positionnement angulaire	0,01
Répétabilité des mesures	0,05
Somme quadratique	0,24

Instituto Nacional de Tecnología Industrial

1. *Intensité lumineuse*

La mesure de l'intensité lumineuse a été réalisée à l'aide d'un radiomètre absolu de type bolométrique. La mesure de la puissance rayonnée était obtenue par comparaison de l'élévation de température produite par l'absorption du flux énergétique à celle produite par la dissipation d'une puissance électrique. Les mesures ont été faites de façon manuelle ou automatique. Dans le second cas, la technique de préchauffage était utilisée : après ouverture de l'obturateur, le niveau de puissance électrique était réduit jusqu'à ce que le signal de sortie soit le même que celui obtenu avec l'obturateur fermé.

La surface sensible du récepteur était définie par une ouverture circulaire de 11,28 mm de diamètre et une superficie de 1 cm^2.

La sensibilité spectrale du récepteur était corrigée pour être conforme à la courbe $V(\lambda)$, en utilisant un filtre composé de quatre éléments de facteur de transmission $\tau(\lambda = 555 \text{ nm}) = 0{,}658$; le facteur de correction α du récepteur avait pour valeur :

$$\alpha = \tau(555) \frac{\int V(\lambda)\, E(\lambda)\, d\lambda}{\int \tau(\lambda)\, E(\lambda)\, d\lambda} = 1{,}0074$$

où $E(\lambda)$ est la répartition spectrale énergétique relative du corps noir à 2 854 K.

L'incertitude totale de la mesure de l'intensité lumineuse est estimée à moins de 0,8 % (1 écart-type).

2. *Flux lumineux*

Pour la mesure du flux lumineux on a utilisé un goniophotomètre du type spiral. Dans ce type d'instrument, la source lumineuse tourne autour de son axe vertical alors que le récepteur tourne autour d'un axe horizontal passant par la source. La combinaison des deux mouvements donne un effet semblable à celui d'une hélice sphérique décrite par le récepteur autour de la source. Dans les mesures qui ont été effectuées, le pas de cette hélice sphérique était de 5 degrés. Le signal analogique provenant du récepteur était converti en impulsions additionnées dans un compteur. Un deuxième compteur comptabilisait les impulsions provenant d'une horloge. Après étalonnage de ce système

à l'aide d'une alimentation très stable, il était possible de mesurer la valeur moyenne de l'éclairement lumineux à un intervalle de 0,1 degré du récepteur ; le flux total était calculé suivant :

$$\varphi = \frac{2\pi^2}{1\,800} R^2 \sum_{1}^{1\,800} \bar{E}_i \sin \theta_i,$$

où R est la distance entre la lampe et le récepteur (2 m) et $\bar{E}_i$ la valeur moyenne de l'éclairement lumineux à l'angle θ_i. La mesure était faite en dirigeant le récepteur vers le haut, puis vers le bas. Elle durait 24 minutes.

Le récepteur était une cellule photoélectrique au silicium, de 30 mm de diamètre, thermostatée, munie d'un filtre, étalonnée à l'aide d'étalons d'intensité lumineuse.

L'incertitude totale des mesures de flux lumineux est estimée à moins de 1,0 % (1 écart-type).

Instituto de Optica

1. *Réalisation de la candela*

À l'Instituto de Optica, la candela a été réalisée à partir de l'échelle spectroradiométrique absolue. Cette échelle a été obtenue à l'aide d'un radiomètre pyroélectrique étalonné électriquement (*voir* Absolute spectroradiometric and photometric scales based on an electrically calibrated pyroelectric radiometer, *Applied Optics,* **7**, 1981, pp. 1174-1177).

2. *Estimation des incertitudes*

L'incertitude estimée de l'échelle spectroradiométrique absolue de l'Instituto de Optica est de 1,5 %. La valeur calculée de l'intensité lumineuse pour les lampes étalons a le même niveau d'incertitude.

La précision des mesures comprend la répétabilité de l'intensité lumineuse de la lampe, y compris le réalignement et la répétabilité du signal du récepteur. La contribution totale de ces instabilités à l'incertitude de la mesure d'intensité lumineuse est de 0,5 %.

Toutefois, la valeur de l'incertitude à considérer pour la comparaison internationale est 1 % (1 écart-type).

National Bureau of Standards

1. *Intensité lumineuse*

L'échelle d'intensité lumineuse du NBS est fondée sur l'échelle d'éclairement énergétique spectral du NBS. La réalisation de cette dernière a pour point de départ le corps noir au point de l'or et l'Échelle internationale pratique de température (EIPT-68). Cette échelle de température est utilisée pour mesurer la température d'un corps noir à température variable, qui donne l'échelle de luminance énergétique spectrale du NBS, laquelle sert de base à l'échelle d'éclairement énergétique spectral du NBS.

L'échelle d'éclairement énergétique spectral est conservée par un groupe de quatre lampes étalons de travail en quartz à halogène de 1 000 W. Le groupe de travail primaire d'intensité lumineuse du NBS a été étalonné et comparé longueur d'onde par longueur d'onde à celui des quatre étalons de travail d'éclairement énergétique spectral. Les résultats ont été exprimés en unités photométriques en utilisant la valeur de 683 lumens/watt pour K_m.

Les lampes envoyées au BIPM ont été comparées directement au groupe de travail primaire d'intensité lumineuse du NBS sur un banc photométrique à l'aide d'un récepteur corrigé pour la vision photopique. Les mesures ont été effectuées à des distances de la source au récepteur de 2,0 m (lampes Osram), 2,5 m (lampes GEC) et 3,25 m (étalons de travail du NBS). Ces distances correspondent à une égalité approximative de l'éclairement lumineux au niveau du récepteur. Des mesures de contrôle ont été réalisées à d'autres distances afin de vérifier l'application de la loi de l'inverse carré des distances. Un écran a été ajouté aux lampes GEC pour s'assurer que seule la lumière venant directement du filament à travers la fenêtre atteignait le récepteur.

Incertitudes estimées (en %)
(1 écart-type)

Échelle de luminance énergétique spectrale du NBS	0,22
Transfert luminance énergétique/éclairement énergétique	0,06
Étalonnage des lampes d'intensité lumineuse	0,08
Étalonnage des lampes envoyées au BIPM	0,07
Somme quadratique	0,25

2. *Flux lumineux*

L'échelle de flux lumineux du NBS est aussi fondée sur l'échelle d'éclairement énergétique spectral du NBS. Des mesures de répartition relative spectrale ont été réalisées sur un groupe de lampes de 300 W, à ampoule opale, avec un spectroradiomètre muni d'un filtre, à une distance de 1,5 m. Ces mesures de répartition spectrale, pondérées

suivant $V(\lambda)$, ont servi à déterminer le rapport du flux total au flux dans une direction de référence. L'éclairement énergétique spectral produit par le groupe de référence de flux lumineux dans la direction de référence a été déterminé par comparaison directe avec les quatre lampes qui représentent l'échelle d'éclairement énergétique spectral du NBS. Une pondération photopique des valeurs spectrales, avec la valeur 683 lumens/watt pour K_m, a permis d'établir l'échelle de flux lumineux du NBS.

L'échelle de flux lumineux du NBS a été transférée aux lampes envoyées au BIPM par comparaison directe au groupe de référence du NBS, dans une sphère photométrique de 2 m de diamètre recouverte intérieurement de sulfate de baryum pur. Les valeurs ont été corrigées pour tenir compte de la différence d'absorption des deux types de lampes ; en revanche, en raison de leur similarité, il n'a pas été nécessaire d'appliquer de corrections ni pour les différences spectrales ni pour la non-linéarité du récepteur.

Incertitudes estimées (en %)
(1 écart-type)

Étalonnage en éclairement énergétique spectral des lampes de flux lumineux	0,23
Mesures de répartition	0,10
Différences géométriques dans les répartitions de flux	0,33
Emploi de la sphère photométrique	0,07
Somme quadratique	0,43

Institut National de Métrologie, Rép Pop. Chine

1. *Intensité lumineuse*

Le NIM a établi son nouvel étalon photométrique primaire conformément à la nouvelle définition de la candela, en 1982. La réalisation de la candela est fondée sur un groupe de sept radiomètres à cavité conique étalonnés par substitution électrique. La variation de l'éclairement énergétique mesuré est inférieure à 0,1 % d'un radiomètre à l'autre. Trois très bons filtres $V(\lambda)$ ont été constitués avec des verres optiques colorés et leurs facteurs de transmission spectrale ont été mesurés à l'aide d'un monochromateur double. Les lampes à gaz et à filament de tungstène de grande stabilité BDQ8 et BDQ7 ont été spécialement mises au point comme étalons secondaires d'intensité lumineuse. Lorsque le NIM a de nouveau réalisé la candela en 1983 avec des radiomètres, la variation moyenne de l'intensité lumineuse des lampes étalons secondaires était de 0,05 %.

Huit lampes d'intensité lumineuse à 2 825 K (deux lampes Osram, quatre lampes NPL/GEC et deux lampes BDQ7) destinées à la comparaison internationale ont été étalonnées par rapport à neuf lampes étalons secondaires à 2 856 K, à l'aide d'un photomètre constitué d'une cellule au silicium et d'un filtre $V(\lambda)$; le diamètre de la surface réceptrice était de 10 mm.

Incertitudes estimées (en %)
(1 écart-type)

Réalisation de la candela	0,12
Mesure de la distance entre la lampe et le récepteur	0,03
Mesure de l'éclairement lumineux	0,04
Filtre $V(\lambda)$	0,03
Orientation de la lampe	0,04
Mesure du courant	0,03
Lumière parasite	0,04
Répétabilité de la mesure	0,05
Somme quadratique	0,16

2. *Passage de la candela au lumen*

Quatre lampes étalons d'intensité lumineuse à 2 788 K ont été étalonnées à l'aide des étalons secondaires d'intensité lumineuse à 2 856 K. Les étalons d'intensité lumineuse à 2 788 K ont été utilisés pour étalonner le photomètre du goniophotomètre. La répartition lumineuse des lampes de flux lumineux a été mesurée avec le goniophotomètre ; le flux lumineux total a été calculé automatiquement. Le récepteur utilisé dans le goniophotomètre était une photodiode au silicium. La distance entre la lampe et le récepteur était d'environ 1,9 m. Les mesures ont été effectuées pour 50 angles de Russel dans le plan vertical et de 10° en 10° autour de la lampe.

Incertitudes estimées (en %)
(1 écart-type)

Unité moyenne de six lampes de flux lumineux (répétabilité des mesures au goniophotomètre)	0,07
Candela reproduite par quatre lampes étalons d'intensité lumineuse	0,17
Mesure de la distance entre la lampe étalon et le récepteur	0,02
Mesure du rayon de rotation	0,02
Non-linéarité du photomètre	0,02
Imperfection de la correction $V(\lambda)$	0,03
Montage de la lampe en cours de mesure	0,03
Asymétrie des trajets optiques	0,03
Lumière parasite	0,02
Courant d'alimentation	0,04
Erreur due à la méthode employée	0,04
Somme quadratique	0,20

National Physical Laboratory

1. *Réalisation de la candela*

1. La réalisation de la candela est fondée sur l'utilisation de deux photomètres à photodiode au silicium avec des filtres de correction $V(\lambda)$ à quatre éléments en verre ; les photomètres ont été étalonnés en sensibilité absolue par rapport au radiomètre cryogénique du NPL et en sensibilité relative dans l'échelle de sensibilité spectrale du NPL.

2. Les photomètres ont été utilisés avec des ouvertures de 10 mm, 12 mm et 14 mm de diamètre pour mesurer l'éclairement lumineux à environ 2,4 m de distance des deux groupes de lampes à filament de tungstène qui ont été envoyés au BIPM. Dans le calcul des valeurs de l'intensité lumineuse, des corrections ont été appliquées pour l'effet de raccourcissement dû à l'épaisseur de la fenêtre de la lampe, pour les effets de dispersion et de diffraction et pour l'écart entre $V(\lambda)$ et la sensibilité spectrale du photomètre.

3. Les lampes ont aussi été étalonnées dans l'échelle d'intensité lumineuse « conservée » par le NPL.

4. Les contributions à l'incertitude des valeurs d'intensité lumineuse « scientifiques » des lampes envoyées au BIPM sont :

	Incertitudes estimées (en %) (1 écart-type)
Sensibilité absolue du photomètre	0,06
Sensibilité relative spectrale du photomètre	0,05
Mesure de l'angle solide	0,03
Reproductibilité de la lampe, réglage du courant, etc.	0,04
Somme quadratique	0,10

5. La réalisation de la candela est décrite intégralement dans « A radiometric realization of the candela », par Teresa M. Goodman et P. J. Key, NPL Report QU 75, février 1986.

2. *Réalisation du lumen*

1. L'échelle de flux lumineux a été réalisée à partir de l'échelle d'intensité lumineuse à l'aide d'un goniophotomètre en 1968 et de nouveau en 1980, avec des résultats très proches. Elle est conservée au moyen de lampes étalons de flux lumineux à gaz de 500 W.

2. Le goniophotomètre a été étalonné à l'aide d'étalons d'intensité lumineuse dont les valeurs sont fondées sur l'échelle d'intensité lumineuse « conservée » au NPL (la nouvelle réalisation n'était pas faite à cette

époque). Les valeurs assignées aux lampes de flux lumineux ont été corrigées ultérieurement pour tenir compte de la différence entre les échelles d'intensité lumineuse « conservée » et « scientifique ».

3. Le rapport entre les échelles de flux et d'intensité lumineux établi à l'aide d'un goniophotomètre diffère de celui qui avait été déterminé et disséminé précédemment par le NPL, mais ce changement n'a pas été introduit dans l'échelle disséminée. Ainsi donc la différence entre les valeurs « conservées » et les valeurs « scientifiques » n'est pas la même pour l'échelle de flux lumineux et pour celle d'intensité lumineuse.

4. Les lampes étalons de flux lumineux de 200 W envoyées au BIPM ont été étalonnées par rapport aux lampes étalons de référence de flux lumineux dans une sphère d'intégration de 4,6 m de diamètre. La sphère a été recouverte d'une peinture au sulfate de baryum de facteur de réflexion de ~ 82 % ; elle a été équipée d'une cellule photoélectrique de type photoémissif avec un filtre correcteur en verre $V(\lambda)$ et une fenêtre diffusante. Les mesures ont été corrigées pour tenir compte des différences de répartition spatiale et d'absorption entre les deux types de lampes.

5. Les contributions à l'incertitude des valeurs de flux lumineux « scientifiques » des lampes envoyées au BIPM sont :

	Incertitudes estimées (en %) (1 écart-type)
Réalisation de la candela	0,10
Passage de la candela au lumen au moyen du goniophotomètre	0,10
Comparaison des étalons de transfert et de référence	0,08
Somme quadratique	0,16

6. La réalisation au moyen du goniophotomètre est décrite dans « A new determination of the lumen », par O. C. Jones et R. G. Berry, *Metrologia*, **6**, 1970, pp. 81-89.

National Physical Research Laboratory

Les étalons d'intensité lumineuse ont été mesurés avec un radiomètre absolu muni d'un filtre $V(\lambda)$. L'aire de l'ouverture du radiomètre était de 1 cm^2. Des corrections ont été appliquées pour remédier aux imperfections de l'instrument, à l'écart entre le facteur de transmission spectral du filtre et la courbe $V(\lambda)$ et à l'effet de raccourcissement de la distance entre le récepteur et la source par le filtre $V(\lambda)$.

Les étalons de flux lumineux ont été mesurés avec un goniophotomètre par intégration spatiale de la répartition de l'éclairement lumineux autour des lampes. Le récepteur du goniophotomètre était étalonné en éclairement lumineux au moyen d'étalons d'intensité lumineuse mesurés à l'aide du radiomètre absolu.

1. *Intensité lumineuse*

Incertitudes estimées (en %)
(1 écart-type)

Aire de l'ouverture du radiomètre absolu	0,02
Effet d'échauffement des conducteurs	0,002
Effet d'échauffement du boîtier	0,05
Non-équivalence de la substitution	0,1
Facteur de réflexion	0,05
Mesure de la puissance électrique	0,01
Diffraction	0,03
Lumière parasite	0,02
Écart-type de la moyenne des lectures du radiomètre absolu, au niveau de puissance produit par les lampes	0,2
Distance lampe-radiomètre	0,02
Orientation de la lampe	0,02
Réglage du courant d'alimentation de la lampe	0,03
Correction du facteur de transmission du filtre	0,1
Correction du trajet optique due au filtre	0,01
Somme arithmétique	0,66
Somme quadratique	0,26

2. *Flux lumineux*

Incertitudes estimées (en %)
(1 écart-type)

Étalon d'intensité lumineuse : somme quadratique	0,26
Étalon d'intensité lumineuse : somme arithmétique	(0,66)
Distance du photomètre à l'étalon d'intensité lumineuse	0,0033
Orientation de la lampe	0,033
Différence de température de couleur : étalon de flux - étalon d'intensité	0,005
Lumière parasite	0,016
Occultation par le support de la lampe	0,02
Dimension finie du saut d'angle	0,033
Vitesse de l'arbre du goniophotomètre	0,033
Traitement numérique des données	0,02
Linéarité du photomètre	0,05
Fatigue du photomètre	0,02
Coefficient de température du photomètre	0,01
Somme arithmétique	0,90
Somme quadratique	0,27

Conseil National de Recherches

Les lampes d'intensité lumineuse ont été étalonnées selon deux méthodes, toutes les deux fondées sur l'utilisation de radiomètres absolus.

1. *Méthode directe*

Le rayonnement de la lampe a été mesuré à l'aide de radiomètres à substitution électrique et de filtres $V(\lambda)$. Le radiomètre était placé dans une enceinte hermétiquement close, à environ 15 cm en arrière du filtre $V(\lambda)$ servant de fenêtre. La distance entre la lampe et le radiomètre était de 1 m ; l'utilisation d'une distance relativement courte est nécessaire pour obtenir un rapport signal/bruit satisfaisant. La grandeur du signal était d'environ 6 μW pour les lampes Osram et d'environ 10 μW pour les lampes NPL/GEC. Le filtre $V(\lambda)$ était du type décrit par W. J. Brown (*Metrologia*, **11**, 1975, pp. 111-115, combinaison #1).

Dans cette méthode, on n'a pas employé d'écrans entre la lampe et le filtre $V(\lambda)$. En conséquence, on n'a pas retenu les résultats des lampes NPL/GEC dont on a remarqué plus tard que certaines parties de l'ampoule envoyaient trop de lumière vers le récepteur.

On a utilisé trois radiomètres absolus différents et deux filtres $V(\lambda)$ distincts, effectuant au total six mesures indépendantes pour chaque lampe.

2. *Méthode indirecte*

La sensibilité spectrale de trois radiomètres secondaires, composés chacun d'une diode au silicium et d'un diffuseur, a été déterminée à l'aide de radiomètres absolus. Ces radiomètres secondaires ont été utilisés avec des filtres correcteurs $V(\lambda)$ pour mesurer les lampes placées à 1 m de l'ouverture.

Les trois radiomètres secondaires avaient différents types de diffuseurs ; chacun avait son propre filtre correcteur $V(\lambda)$ conçu spécialement pour lui. Deux séries de mesures ayant été faites sur chaque lampe avec trois récepteurs différents, on disposait de six valeurs distinctes pour chaque lampe. Dans cette méthode, deux écrans ont été placés entre la lampe et le récepteur.

Incertitudes estimées (en %)
(1 écart-type)

Méthode indirecte	
Étalonnage du radiomètre secondaire	0,25
Facteur de transmission du filtre	0,20
Répétabilité des mesures	0,15
Adaptation imparfaite du photomètre à la courbe $V(\lambda)$	0,15
Effets électriques	0,10
Somme quadratique	0,4
Méthode directe	
Mesure de l'éclairement énergétique total au moyen du radiomètre absolu	0,15
Facteur de transmission du filtre	0,20
Répétabilité des mesures	0,50
Adaptation imparfaite du photomètre à la courbe $V(\lambda)$	0,15
Effets électriques	0,05
Somme quadratique	0,6
Ensemble des deux méthodes	0,5

Office Fédéral de Métrologie

1. *Réalisation de la candela fondée sur le radiomètre PMO* *

La première réalisation de la candela à l'OFMET a été effectuée par étalonnage radiométrique absolu d'un luxmètre commercial. L'étalon primaire utilisé dans cet étalonnage était un radiomètre absolu à substitution électrique construit pour des mesures d'éclairement énergétique solaire précises. L'étalonnage se fait en deux étapes. D'abord, une cellule au silicium est étalonnée par rapport au radiomètre PMO avec un laser à colorant, à courant stabilisé, comme source de rayonnement. Ensuite, le luxmètre est étalonné de manière absolue par rapport à la cellule au silicium équipée d'une ouverture calibrée. Pour éviter les interférences du faisceau laser (cohérent) dans le filtre $V(\lambda)$, les deux récepteurs sont éclairés par un rayonnement non-cohérent dans l'espace obtenu en diffusant le faisceau laser à l'aide d'un diffuseur en quartz agissant comme source ponctuelle secondaire.

* Physikalisch-Meteorologisches Observatorium (Davos)

Les lampes Osram envoyées au BIPM ont été étalonnées avec le luxmètre.

Incertitudes estimées (en %)
(1 écart-type)

Radiomètre PMO	
non-équivalence	0,25
échauffement des conducteurs	0,006
pertes de la cavité	0,01
étalonnage électrique	0,1
Étalonnage de la cellule au silicium	
mesure	0,05
valeur de la longueur d'onde	0,036
réflexion sur le quartz	0,25
Étalonnage du luxmètre	
mesure	0,46
aire de l'ouverture	0,02
distance	0,16
valeur de la longueur d'onde	0,036
sensibilité relative	0,15
Étalonnage de la lampe	
distance	0,02
mesure	0,01
reproductibilité de l'intensité lumineuse de la lampe	0,15
Somme quadratique	0,65

2. *Réalisation de la candela fondée sur une cellule au silicium d'efficacité quantique calculable*

Après la 11e session du CCPR (1986), l'OFMET a effectué une seconde réalisation de la candela pour servir de test à la première. Une cellule au silicium du commerce (QED-100) a été équipée d'une ouverture calibrée et d'un filtre de transmission spectrale voisine de $V(\lambda)$. Sa sensibilité spectrale absolue a été obtenue à partir de l'efficacité quantique.

Les lampes étalons Osram ont été étalonnées directement à partir de la cellule au silicium auto-étalonnée.

Incertitudes estimées (en %)
(1 écart-type)

Incertitude de QED-100 spécifiée par la compagnie UDT *	0,20
Facteur de transmission du filtre	0,16
Longueur d'onde de mesure du filtre	0,21
Reproductibilité de l'intensité lumineuse de la lampe	0,15
Aire de l'ouverture	0,02
Mesure du courant photoélectrique	0,01
Distance de la lampe au récepteur	0,02
Mesure	0,01
Somme quadratique	0,365

3.. *Valeurs de cd(OFMET)*

La valeur provisoire relative de cd(OFMET) comparée à cd(BIPM) était de :

$$\frac{\text{cd(OFMET)}}{\text{cd(BIPM)}} = 1{,}0033.$$

Cette valeur résultait de la première réalisation effectuée avec le radiomètre PMO. À la suite de la mesure qui vient d'être faite de la correction de non-équivalence du radiomètre et d'une nouvelle évaluation du facteur de correction de la sensibilité relative spectrale du luxmètre, cette valeur doit être ramenée à :

$$\frac{\text{cd(OFMET,PMO)}}{\text{cd(BIPM)}} = 1{,}0008.$$

La seconde réalisation avec QED-100 donne des valeurs très différentes pour l'intensité lumineuse des lampes Osram participant à la comparaison internationale. La valeur relative évaluée à partir de ces mesures est :

$$\frac{\text{cd(OFMET,QED)}}{\text{cd(BIPM)}} = 0{,}9881.$$

Cette valeur relative doit être considérée comme étant la meilleure représentation de cd(OFMET).

* United Detector Company

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Les mesures sont fondées sur une nouvelle réalisation de la candela effectuée en novembre 1985 et en mars 1986.

« Réalisation » signifie que trois récepteurs corrigés $V(\lambda)$ ont été étalonnés suivant leur sensibilité spectrale comme « étalons de transfert ». Ensuite, la « candela » a été matérialisée en calculant l'intensité lumineuse des six lampes étalons selon l'expression suivante :

$$I = r^2 . i_{ph} . \frac{K_m}{s_0} . k(T_V),$$

où

r = distance entre le filament et le récepteur,
i_{ph} = courant photoélectrique,
K_m = 683 lm/W,
s_0 = sensibilité spectrale à la longueur d'onde λ_0 = 546 nm,

$$k(T_V) = \int_0^\infty V(\lambda)S(\lambda,T_V)\mathrm{d}\lambda \Big/ \int_0^\infty s_{rel}(\lambda)S(\lambda,T_V)\ \mathrm{d}\lambda,$$

T_V = température de répartition de la lampe,
$S(\lambda,T_V)$ = répartition spectrale relative de puissance (loi de Planck),
$s_{rel}(\lambda)$ = sensibilité spectrale relative du récepteur, $s_{rel}(\lambda_0) = 1$.

Incertitudes estimées (en %)
(1 écart-type)

Grandeurs électriques de la lampe	0,01
Grandeurs photométriques	
distance	0,01
courant photoélectrique	0,01
sensibilité spectrale absolue	0,13
sensibilité spectrale relative	0,03
Somme quadratique	
intensité lumineuse	0,13
flux lumineux (0,07 % à ajouter pour la méthode goniophotométrique)	0,20

Institut de Recherche pour les Mesures Optiques et Physiques

Conformément à la nouvelle définition de l'unité d'intensité lumineuse, la candela a été réalisée au moyen d'un photomètre primaire, comprenant un radiomètre à cavité non-sélective et un filtre liquide. Le facteur de transmission spectrale du filtre était proche de $V(\lambda)$. L'étalonnage du radiomètre était déterminé à partir du rayonnement d'un corps noir à haute température situé, ainsi que le radiomètre, dans une enceinte à vide.

Les facteurs de transmission spectrale du filtre liquide et de la fenêtre de l'enceinte à vide du photomètre primaire étaient mesurés à travers un alésage du photomètre prévu à cet effet.

La valeur de l'unité d'intensité lumineuse a été transférée du photomètre primaire à un photomètre-comparateur à l'aide d'une lampe de comparaison. Le photomètre-comparateur était composé de plusieurs photodiodes au silicium, dont la sensibilité spectrale a été corrigée individuellement avec des filtres liquides.

Les lampes d'intensité lumineuse de type NPL/GEC ont été étalonnées à l'aide du photomètre-comparateur.

Incertitudes estimées (en %)
(1 écart-type)

1. *Réalisation de la candela*

Signal du photomètre primaire	0,05
Distance corps noir-photomètre primaire	0,1
Facteur de transmission du filtre à 555 nm	0,1
Éclairement énergétique spectral du corps noir	0,35
Émissivité effective du corps noir	0,03
Aire de l'ouverture du corps noir	0,03
Pertes dues à la diffraction	0,03
Instabilité de l'étalonnage du photomètre primaire	0,01
Somme quadratique	0,4

2. *Étalonnage des lampes*

Photomètre primaire	0,4
Mesure de la distance	0,03
Correction du filtre du photomètre-comparateur $V(\lambda)$	0,01
Instabilité de l'étalonnage du photomètre-comparateur	0,02
Instabilité du comportement du photomètre-comparateur pour l'éclairement lumineux des lampes au cours de 4 séries d'étalonnage (comportant chacune 10 mesures) *	(pour certaines lampes) 0,5
Somme quadratique	0,45

* L'instabilité des lampes est importante.

ANNEXE P 3

Comparaison des échelles de luminance énergétique spectrale du National Physical Laboratory [NPL] (Royaume-Uni) et du National Bureau of Standards [NBS] (États-Unis d'Amérique)

par J. R. MOORE
National Physical Laboratory (Royaume-Uni)

(Traduction du document CCPR/86-7)

Lampes

Pour cette comparaison, on a utilisé des lampes à gaz à ruban de tungstène de conception nouvelle, actuellement commercialisées sous l'appellation « Type 25/G », mises au point au NPL et fabriquées par le laboratoire de recherche Hirst de la General Electric Company. Ces lampes ont une fenêtre plane en silice fondue, montée à l'extrémité d'un tube.

Avant l'étalonnage initial, chaque lampe a été vieillie pendant 100 heures à une température de luminance (662 nm) de 2 573 K, puis pendant deux périodes de 100 heures chacune à une température de luminance (662 nm) de 2 473 K au cours desquelles la dérive était mesurée. La dérive pendant la dernière période de vieillissement de 100 heures était inférieure à 0,015 K/h.

Au cours de la comparaison, chaque lampe a fonctionné pendant un total d'environ 50 heures à la température de luminance la plus basse, correspondant à une température de couleur d'environ 2 850 K.

Méthode employée pour la comparaison

La luminance énergétique spectrale d'une aire définie du ruban de chacune des deux lampes a été mesurée au NPL dans le domaine spectral 250-800 nm de 10 nm en 10 nm. Ces mesures ont été effectuées entre avril et juin 1982. Les lampes ont alors été expédiées par avion au NBS, où la luminance énergétique spectrale a été mesurée à des

intervalles de 10 nm dans le même domaine spectral. Les lampes ont ensuite été retournées au NPL, de nouveau par avion, et les mesures ont été répétées durant le mois de septembre 1982.

Des détecteurs de choc joints aux lampes ont montré qu'elles avaient supporté des chocs au voisinage de 25-30 *g* durant le transport, sans aucun dommage apparent. Ceux joints à deux autres lampes similaires envoyées par le NPL quelques semaines auparavant par une autre route aérienne (il avait été prévu à l'origine d'effectuer la comparaison avec un groupe de quatre lampes) ont enregistré des chocs de 45-50 *g* : à leur arrivée au NBS, les rubans des deux lampes s'étaient détachés de leurs supports mais les ampoules en verre étaient intactes.

Toutefois, les résultats présentés dans ce rapport ne couvrent que les mesures de deux lampes seulement.

Conditions de fonctionnement

Durant l'étalonnage, chaque lampe a été alimentée en courant continu, à polarité et courant spécifiés.

Les étalonnages concernent le rayonnement d'une aire spécifiée du ruban dans un angle solide spécifié. Au NPL, l'aire mesurée avait 0,3 mm de largeur et 0,8 mm de hauteur ; elle était centrée sur le point de l'axe du ruban face à l'index. L'angle solide avait un demi-angle d'environ 2,5 degrés et était centré sur l'axe de mesure horizontal. La lampe fonctionnait culot en bas, placée de telle manière que la surface plane de la fenêtre soit perpendiculaire à l'axe de mesure et que l'axe du ruban soit dans un plan vertical traversant l'axe de mesure.

Au NBS, les conditions de fonctionnement étaient pratiquement identiques à celles du NPL, à cela près qu'on utilisait pour les mesures une aire du ruban de 0,5 mm de largeur et de 0,8 mm de hauteur (au lieu de 0,3 mm de largeur et 0,8 mm de hauteur au NPL) ; la valeur de l'angle solide utilisé n'était pas indiquée dans le rapport du NBS*.

Uniformité du ruban

Le NPL a étudié la variation de la luminance énergétique spectrale à 400 nm et 660 nm suivant la longueur et la largeur du ruban, en prenant la luminance énergétique spectrale au centre pour référence. Des contrôles effectués au NBS à 654,6 nm ont montré un bon accord avec les mesures du NPL à 660 nm.

---

* Cette information se trouve dans un document plus ancien du NBS, intitulé « Lamp standards of spectral radiance, 1952 ».

L'angle solide utilisé au NBS était une pyramide rectangulaire dont la dimension la plus grande était verticale. La grandeur de l'angle solide était définie par les angles au sommet de la pyramide : 0,125 radian (7,16 degrés) dans le plan vertical et 0,0625 radian (3,58 degrés) dans le plan horizontal.

En utilisant les valeurs du NPL, des facteurs de correction ont été calculés pour tenir compte de la différence entre les deux aires utilisées. Ces valeurs étaient semblables pour les deux lampes. Elles ont montré que les résultats du NPL devraient être multipliés par un facteur 0,9990 à 400 nm et 0,9994 à 660 nm pour tenir compte du fait que l'aire de ruban utilisée au NBS était plus grande. Ces corrections peuvent être considérées comme négligeables en comparaison des incertitudes affectant les mesures et leurs différences.

Résultats de la comparaison

Les différences entre les valeurs de la luminance énergétique spectrale mesurées sur les lampes du NPL avant et après leur passage au NBS se sont révélées inférieures à 0,5 % à toutes les longueurs d'onde.

La figure 1 montre le rapport de la moyenne des deux séries de résultats du NPL à la série de résultats du NBS, pour chacune des deux lampes utilisées dans la comparaison ; les points représentent la meilleure estimation possible que l'on puisse obtenir de cette comparaison des différences actuelles entre les échelles de luminance énergétique spectrale conservées au NPL et au NBS.

Il faut noter que le rapport dont il s'agit est la valeur attribuée à la lampe par le NPL pour la luminance énergétique spectrale en $W\,m^{-3}\,sr^{-1}$ à chaque longueur d'onde, divisée par la valeur correspondante du NBS.

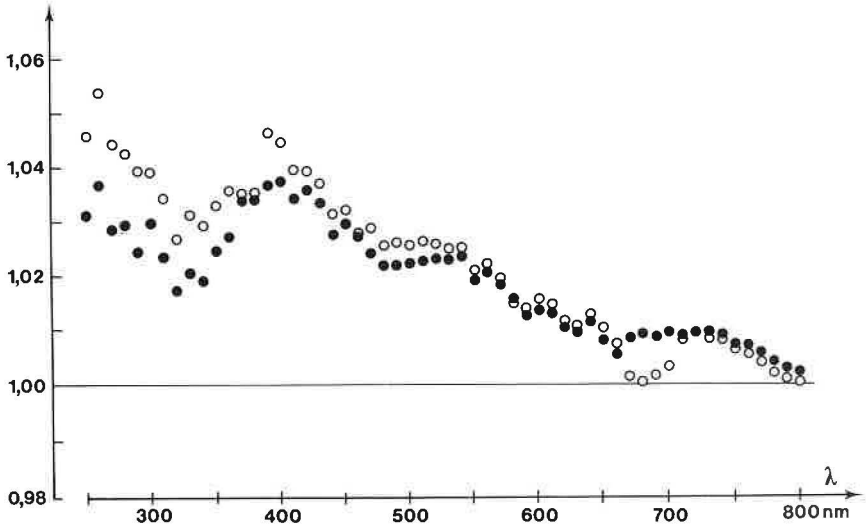

Fig. 1. — Rapport NPL/NBS des valeurs de la luminance énergétique spectrale pour la lampe 387 C (o) et pour la lampe 550 C (•).

Conclusions

Il ne fait aucun doute que la stabilité des lampes utilisées pour la comparaison est plus que suffisante pour montrer les différences entre les échelles conservées par les deux laboratoires. La perte de deux des quatre lampes destinées à l'origine à cette comparaison suggère, toutefois, qu'il existe des problèmes associés à la sécurité du transport des lampes expédiées par des transporteurs commerciaux.

Les résultats de cette comparaison montrent qu'il existe des différences significatives entre les échelles de luminance énergétique spectrale conservées au NPL et au NBS, en particulier dans l'ultraviolet.

ANNEXE P 4

Comparaison des étalons nationaux de sensibilité spectrale absolue

par Edward F. ZALEWSKI
National Bureau of Standards (États-Unis d'Amérique)

(Traduction du document définitif qui remplace les documents CCPR/86-5 et CCPR/86-10)

Introduction

Lors de la 10e session du CCPR, en septembre 1982, on a décidé d'effectuer une comparaison sur la capacité des laboratoires nationaux de métrologie à mesurer un flux énergétique monochromatique. Le National Bureau of Standards (NBS) a été choisi comme laboratoire pilote, assisté d'un groupe de travail comprenant le Conseil National de Recherches (NRC) [Canada], le National Physical Research Laboratory (NPRL) [Afrique du Sud] et J. Schanda [Hongrie].

On a proposé de faire circuler des photodiodes au silicium au lieu de sources de flux énergétique, du fait, pensait-on, de leur meilleure stabilité. Les laboratoires participants auraient à mesurer la sensibilité spectrale absolue à 633 nm, au centre de l'aire active des photodiodes. Pour les laboratoires nationaux, la comparaison de la sensibilité d'un récepteur devrait être équivalente à la comparaison d'un flux énergétique à la longueur d'onde principale dans le visible d'un laser à hélium-néon.

Après consultation des laboratoires participants, on a décidé d'étendre la comparaison à une autre longueur d'onde, dans la région bleue du spectre : la raie d'un laser à argon ionisé, à 488 nm.

Les résultats définitifs, à 633 nm, obtenus par onze laboratoires (y compris le NBS agissant comme laboratoire pilote) pour la mesure d'un flux énergétique, ont un écart-type (d'une seule mesure) de 0,34 %. À 488 nm, pour neuf laboratoires participants, l'écart-type est de 0,33 %.

En ce qui concerne la stabilité des photodiodes au silicium, on a remarqué, à 633 nm, des variations de quelques pourcents de la sensibilité de trois des seize photorécepteurs au cours du transport. La variation moyenne à 633 nm des treize autres récepteurs, qui apparaît dans les mesures retour au NBS, est de − 0,07 % avec un écart-type de 0,16 %.

Les laboratoires qui avaient reçu des récepteurs instables ont été invités à répéter leurs mesures sur une autre série de récepteurs. C'est au cours de cette série de nouvelles mesures que la stabilité dans le temps à 488 nm (avant transport) a été vérifiée sur dix des treize photodiodes « stables ». La variation moyenne à 488 nm est de 0,20 % avec un écart-type de 0,33 %. Ces variations de sensibilité sont des moyennes pour les deux types différents de photodiodes au silicium. Les différences systématiques qui ont été observées quant aux performances de chaque type de photodiode sont discutées dans ce rapport.

Dispositions expérimentales

Lors de la préparation de cette comparaison, on a décidé de faire circuler des radiomètres comprenant à la fois la photodiode et l'électronique d'émission du signal plutôt que les photodiodes au silicium seules ; on voulait éviter les complications qui pourraient se produire au cours de la comparaison du fait de l'utilisation de différentes techniques d'amplification et de possibles inexactitudes dans le calibrage du gain. L'ajustage du gain des radiomètres était possible en six points (avec une incertitude de 0,03 %) de 0,1 mA/V à 100 nA/V. L'incertitude absolue du gain était inférieure à 0,1 % dans le domaine de 0,1 mA/V à 100 nA/V. Aux deux réglages de gain les plus élevés, l'incertitude absolue atteignait 1 %.

La stabilité étant un problème important, on a décidé de faire circuler deux types différents de photodiodes au silicium : un type PN « normal » (EG & G [1], Modèle UV-444BQ) et un type NP utilisant la technologie de la jonction induite mise au point récemment (UDT [2], Modèle UV-100). Au moment où la comparaison a été planifiée, on savait déjà que, pour les photodiodes au silicium du type PN, le rendement de collection des porteurs minoritaires générés à l'interface oxyde-silicium pouvait être instable [3]. Puisque le rendement de collection des photodiodes au silicium à jonction induite n'est pas affecté par les variations à l'interface oxyde-silicium [4], on a décidé de faire aussi circuler des photodiodes de ce type. Il était vraiment nécessaire de faire circuler ces deux types de photodiodes, car la stabilité du nouveau type n'était pas prouvée.

Lors de la préparation de cette comparaison s'est également posé le problème de l'utilisation d'un diffuseur ou d'une fenêtre pour la protection de la surface de la photodiode. Les tentatives pour obtenir des diffuseurs stables et uniformes dans l'espace (0,1 % ou plus) se sont soldées par un échec, de même que les expériences portant sur des fenêtres antireflet. Les fenêtres ne se sont pas montrées satisfaisantes pour des mesures à 0,1 % en raison des interférences et des interréflexions.

Au cours de la première étape de la comparaison, les photorécepteurs n'étaient pas protégés hermétiquement des contaminations atmosphériques éventuelles ; ils étaient simplement recouverts d'une protection antipoussière lors du transport. Bien que toutes les photodiodes se soient montrées stables en laboratoire à 633 nm, trois ont varié de façon importante durant le transport.

Lors des étapes suivantes de la comparaison, on a tenté de protéger de façon plus adéquate les photodiodes au moyen d'une enveloppe de conception nouvelle qui protégeait hermétiquement le récepteur de l'atmosphère et scellait le radiomètre tout entier dans un sac plastique avec un produit dessicatif.

La sélection et le contrôle des photodiodes se sont terminés à la mi-1984, mais la construction et les contrôles définitifs des radiomètres n'ont été terminés qu'à la fin de 1985. La comparaison a eu lieu entre février et août 1986. Elle s'est déroulée en trois étapes. D'abord, on a mesuré la sensibilité spectrale absolue au NBS à 633 nm. En raison de difficultés rencontrées avec le laser à argon ionisé au NBS, il n'a pas été possible d'effectuer tout de suite les mesures à 488 nm. Lors de la deuxième étape, deux radiomètres, équipés chacun d'un des deux types de photodiodes, ont été envoyés à chaque laboratoire participant pour des mesures à 633 et 488 nm. Enfin, les radiomètres sont revenus au NBS pour y être de nouveau mesurés à 633 nm. C'est à ce moment que les mesures à 488 nm ont été faites au NBS.

L'analyse des mesures de sensibilité aller-retour au NBS à 633 nm a montré que deux des photodiodes de type UDT et une des photodiodes de type EG & G ont varié de quelques pourcents. Les laboratoires qui avaient reçu des photodiodes instables ont été invités à renouveler leurs mesures sur une nouvelle série de photodiodes qui s'étaient montrées stables durant le transport. Une autre série de mesures de sensibilité à 488 nm a été faite au NBS sur dix des photodiodes en novembre 1986 avant transport.

Il a été demandé aux laboratoires, outre la mesure de la sensibilité absolue des photodiodes, de fournir les principales caractéristiques du procédé de mesure utilisé. Les conditions expérimentales de chaque laboratoire participant à la comparaison sont résumées ci-dessous :

NRC : Conseil National de Recherches, Canada.
Base de référence absolue : radiomètre à substitution électrique ;
Incertitude par rapport au SI : 0,1 % ;
Écart-type : 0,2 % (633 nm), 0,15 % (488 nm) ;
Source de rayonnement : plusieurs raies du laser à krypton ionisé (et interpolation basée sur des mesures de la sensibilité spectrale relative), faisceau de 3 mm de diamètre, 0,3 à 0,8 mW ;
Température ambiante : 23 à 24 °C.

NPL : National Physical Laboratory, Royaume-Uni.
Base de référence absolue : radiomètre à substitution électrique cryogénique ;
Incertitude par rapport au SI : 0,005 % ;
Écart-type : 0,01 % ;
Source de rayonnement : laser à hélium-néon et à argon ionisé, faisceau de 4 mm de diamètre, 0,5 mW (633 nm), 1 mW (488 nm) ;
Température ambiante : 22 à 23 °C.

PTB : Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Rép. Féd. d'Allemagne.
Base de référence absolue : radiomètre à substitution électrique ;
Incertitude par rapport au SI : 0,1 % ;
Écart-type : 0,04 % ;
Source de rayonnement : laser à hélium-néon et à argon ionisé, faisceau de 5,3 mm de diamètre, 0,2 à 1,4 mW (633 nm), 0,3 à 3 mW (488 nm) ;
Température ambiante : 23 °C.

NIM : Institut National de Métrologie, Chengdu, Rép. Pop. de Chine.
Base de référence absolue : récepteur à rendement quantique prévisible ;
Incertitude par rapport au SI : 0,05 % (633 nm), 0,1 % (488 nm) ;
Écart-type : 0,06 % (633 nm), 0,15 % (488 nm) ;
Source de rayonnement : laser à hélium-néon et à argon ionisé, faisceau de 4 mm de diamètre, 1 mW ;
Température ambiante : 21 °C.

CSIRO : CSIRO, Division of Applied Physics, Australie.
Base de référence absolue : radiomètre à substitution électrique (ESR) et récepteur à rendement quantique prévisible (PQED);
Incertitude par rapport au SI : 0,05 % (ESR), 0,1 % (PQED, 633 nm), 0,2 % (PQED, 488 nm) ;
Écart-type : 0,09 % (ESR, 633 et 488 nm), 0,15 % (PQED, 633 nm), 0,2 % (PQED, 488 nm) ;
Source de rayonnement : laser à hélium-néon et à argon ionisé, faisceau de 6 mm de diamètre, 0,5 mW (633 nm), 1,4 mW (488 nm) ;
Température ambiante : 21,5 °C (633 nm), 20 °C (488 nm).

ASH : Research Institute of Technical Physics de l'Académie des Sciences de Hongrie.
Base de référence absolue : récepteur à rendement quantique prévisible ;
Incertitude par rapport au SI : non estimée ;
Écart-type : 0,1 % ;
Source de rayonnement : lampe à xénon et monochromateur, faisceau de 5 mm de diamètre, 1,5 µW ;
Température ambiante : 24 °C.

OMH : Office National des Mesures, Hongrie.
Base de référence absolue : récepteur à rendement quantique prévisible ;
Incertitude par rapport au SI : 0,25 % ;
Écart-type : 0,07 % ;
Source de rayonnement : lampe à tungstène et monochromateur, faisceau de 3,5 mm de diamètre, 40 nW (633 nm), 20 nW (488 nm) ;
Température ambiante : 24 °C.

ETL : Electrotechnical Laboratory, Japon.
Base de référence absolue : récepteur à rendement quantique prévisible ;
Incertitude par rapport au SI : 0,5 % ;
Écart-type : 0,04 % ;
Source de rayonnement : laser à hélium-néon, faisceau de 1 mm de diamètre, 40 µW ;
Température ambiante : 23 °C.

NPRL : National Physical Research Laboratory, Afrique du Sud.
Base de référence absolue : radiomètre à substitution électrique ;
Incertitude par rapport au SI : 0,2 % ;
Écart-type : 0,2 % (laser à 633 nm), 0,3 % (lampe et monochromateur) ;
Source de rayonnement : laser à hélium-néon, lampe à xénon et monochromateur, faisceau de 1 à 3 mm de diamètre, 2 mW (laser), 0,1 à 200 µW (monochromateur) ;
Température ambiante : 24 °C.

INM : Institut National de Métrologie, France.
Base de référence absolue : récepteur à rendement quantique prévisible ;
Incertitude par rapport au SI : 0,12 % ;
Écart-type : 0,05 % (633 nm), 0,1 % (488 nm) ;
Source de rayonnement : laser à hélium-néon, (sensibilité spectrale absolue à 488 nm déterminée à partir de la sensibilité spectrale relative et des résultats à 633 nm), faisceau de diamètre non communiqué, 0,07 mW (633 nm) ;
Température ambiante : 23 à 25 °C.

NBS : National Bureau of Standards, États-Unis d'Amérique (laboratoire pilote).
Base de référence absolue : récepteur à rendement quantique prévisible ;
Incertitude par rapport au SI : 0,1 % ;
Écart-type : 0,1 à 0,2 % (633 nm), 0,1 à 0,3 % (488 nm) ;
Source de rayonnement : laser à hélium-néon et à argon ionisé, faisceau de 4 mm de diamètre, 0,1 à 0,6 mW ;
Température ambiante : 23 à 25 °C.

Résultats

Le tableau I présente les résultats de la comparaison, à 488 nm et 633 nm. La sensibilité est donnée en A/W ; on a supposé que le réglage du gain de l'amplificateur était exact et qu'il était utilisé pour calculer le photocourant à partir de la tension de sortie du radiomètre.

Les radiomètres participant à la comparaison sont appelés PI-1 à PI-16. Les radiomètres PI-1 à PI-8 utilisent des photodiodes EG & G de type PN comme récepteur, les autres utilisent des photodiodes UDT de type NP. Les résultats de chaque laboratoire sont présentés avec les résultats correspondants du NBS et la date des mesures.

Le CSIRO a mesuré les radiomètres de la comparaison suivant deux techniques : radiomètre à substitution électrique et récepteur à rendement quantique prévisible. Le tableau donne les deux séries de résultats, mais seule la moyenne a été utilisée dans les divers graphiques et dans le calcul de l'accord des laboratoires par rapport à la moyenne.

Après avoir transmis ses résultats, l'ASH a découvert une erreur dans les mesures du facteur de réflexion de son récepteur à rendement quantique prévisible ; il a donc fourni des valeurs corrigées de ses résultats aux deux longueurs d'onde.

Avec un flux énergétique de 2 mW, le NPRL a trouvé une valeur de la sensibilité plus petite pour le radiomètre PI-7. Ce résultat apparaît dans le tableau, mais il n'en a été tenu compte ni dans les graphiques ni dans le calcul de l'accord des laboratoires par rapport à la moyenne.

Les figures 1 à 6 sont des graphiques des résultats du tableau 1.

Les figures 1 et 2 montrent la stabilité à 633 nm des photodiodes au silicium, de types PN et NP respectivement, avant et après transport. Un des récepteurs de type PN (figure 1) a subi une diminution de sensibilité d'environ 4 %. Les sept autres photodiodes de type PN ont montré un rapport moyen des mesures aller-retour de 1,000 1 avec, pour trois écarts-types de la moyenne, 0,13 %. Parmi les photodiodes au silicium de type NP (figure 2), deux ont montré une augmentation de 8 % à 9,5 % tandis que les autres avaient un rapport moyen aller-retour de 0,998 4 avec, pour trois écarts-types de la moyenne, 0,17 %.

La figure 3 présente les résultats de la comparaison pour les photodiodes de type PN, pour chaque laboratoire, avec la série de mesures du NBS réalisée après transport. Les résultats considérés sont les premiers soumis par les laboratoires, c'est-à-dire qu'il n'est pas tenu compte des mesures refaites par le NRC, le NPL et la PTB, ni des mesures corrigées de l'ASH. La figure 4 présente les résultats de la comparaison effectuée avec les photodiodes de type NP. Pour les photodiodes de type PN (figure 3), la moyenne du rapport laboratoire/NBS est de 0,999 6 avec un écart-type de 0,65 % pour la comparaison à

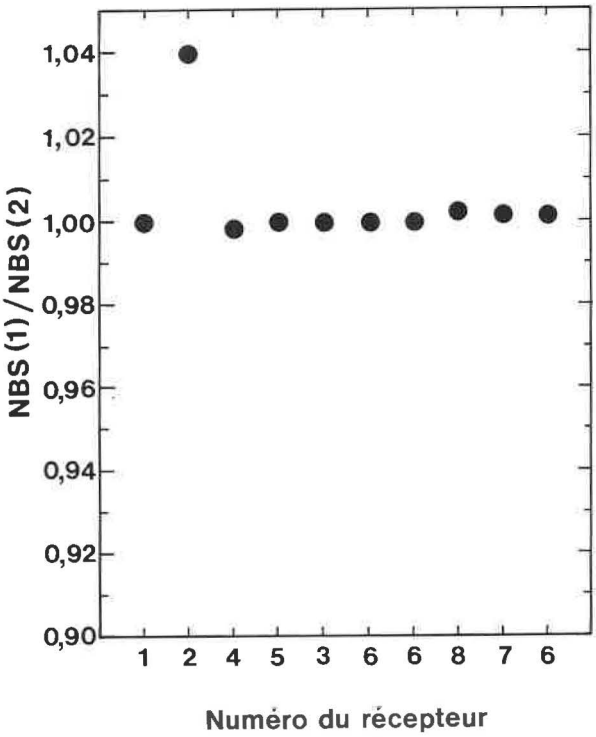

Fig. 1. — Changement de la sensibilité des photodiodes de type PN (EG&G) à 633 nm : avant de quitter le NBS et au retour.

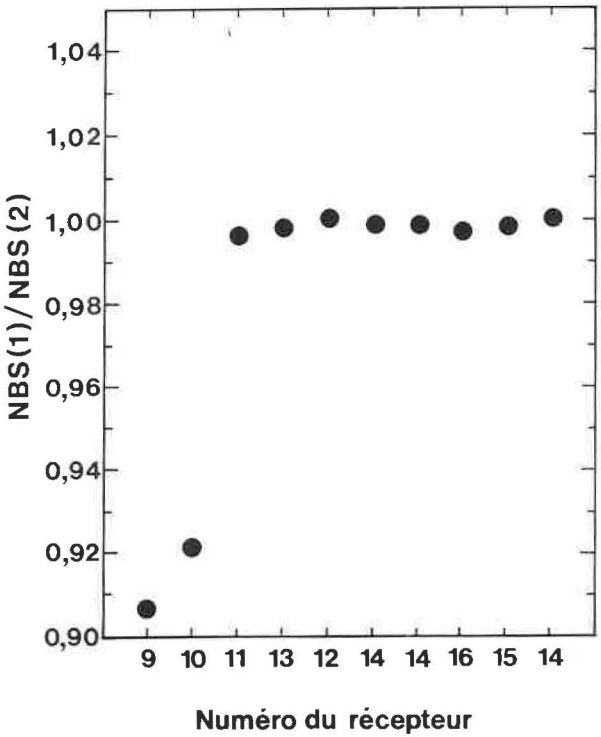

Fig. 2. — Changement de la sensibilité des photodiodes de type NP (UDT) à 633 nm : avant de quitter le NBS et au retour.

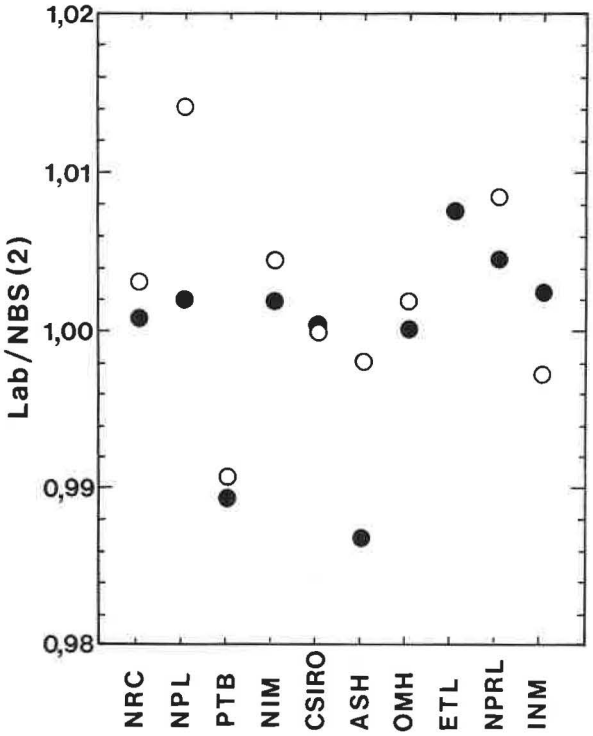

Fig. 3. — Comparaison initiale de la sensibilité des photodiodes de type PN (EG&G) à 488 nm (points noirs) et à 633 nm (cercles blancs).

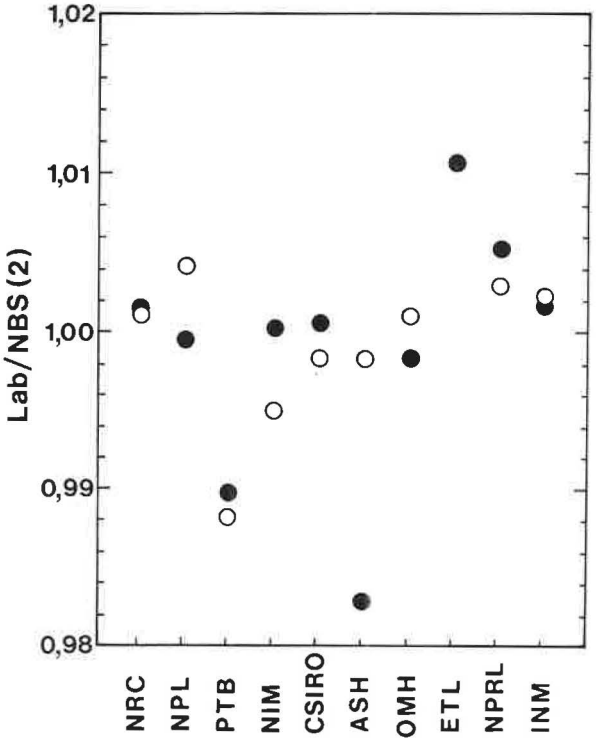

Fig. 4. — Comparaison initiale de la sensibilité des photodiodes de type NP (UDT) à 488 nm (cercles noirs) et à 633 nm (cercle blancs).

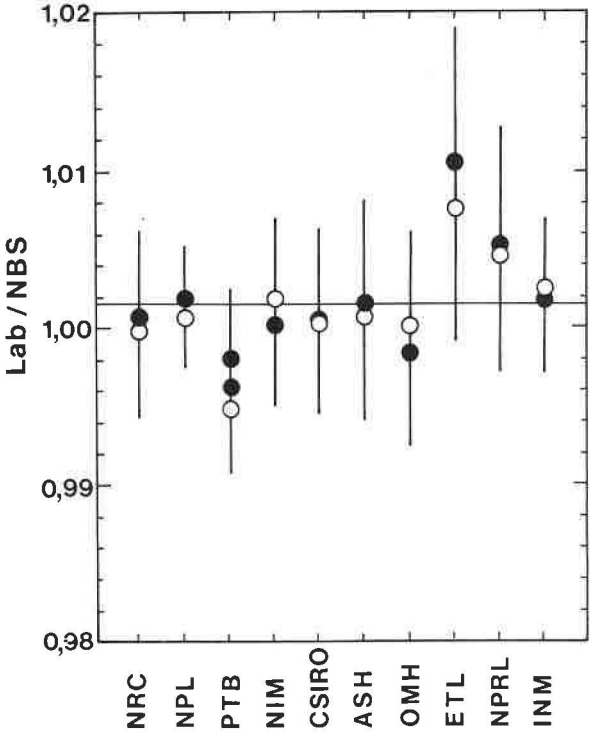

Fig. 5. — Comparaison des mesures de sensibilité absolue à 633 nm avec des photodiodes de type PN (cercles blancs) et des photodiodes de type NP (cercles noirs).

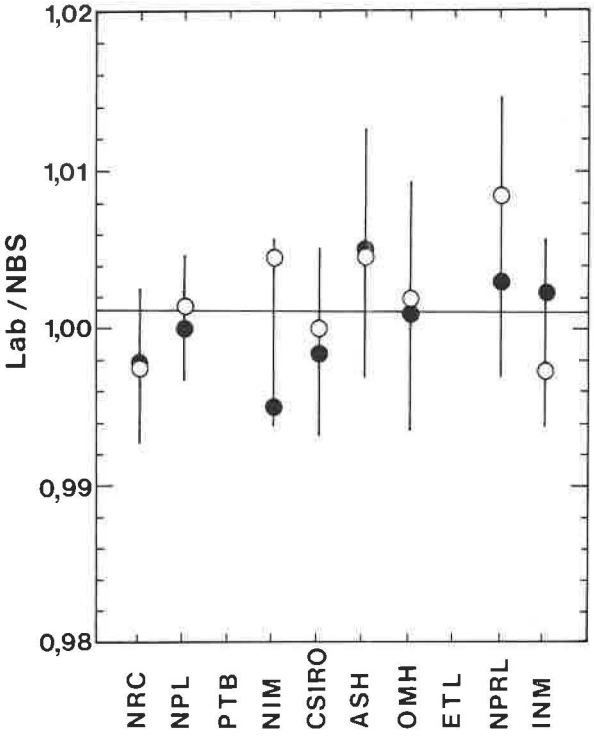

Fig. 6. — Comparaison des mesures de sensibilité absolue à 488 nm avec des photodiodes de type PN (cercles blancs) et des photodiodes de type NP (cercles noirs).

TABLEAU I

Résumé des mesures de sensibilité absolue

Laboratoire	Date	Sensibilité à 633 nm		Sensibilité à 488 nm	
		PI-1	PI-9	PI-1	PI-9
NBS	2/86	0,448 0	0,410 8		
NRC	3/86	0,448 5	0,453 9	0,260 8	0,258 0
NBS	4/86	0,448 1	0,453 2		
NBS	8/86			0,260 0	0,257 7
		PI-6	PI-16	PI-6	PI-16
NBS	5/86	0,449 1			
NBS	8/86		0,415 5	0,262 3	0,297 9
NBS	11/86			0,262 1	0,298 2
NRC	12/86	0,449 0	0,415 8	0,261 3	0,297 6
NBS	12/86			0,261 8	0,298 3
		PI-2	PI-10	PI-2	PI-10
NBS	2/86	0,459 1	0,411 9		
NPL	3/86	0,442 6	0,446 8	0,258 8	0,265 7
NBS	5/86	0,441 7	0,447 0		
NBS	8/86			0,252 2	0,264 6
		PI-7	PI-14	PI-7	PI-14
NBS	5/86		0,413 7		
NBS	8/86	0,455 7		0,283 8	0,299 1
NBS	11/86			0,282 3	0,299 4
NPL	12/86	0,456 0	0,414 5	0,282 7	0,299 4
		PI-4	PI-11	PI-4	PI-11
NBS	2/86	0,454 3	0,415 2		
PTB	4/86	0,450 3	0,412 5	0,277 1	0,293 3
NBS	5/86	0,455 2	0,416 8		
NBS	8/86			0,279 7	0,296 8
NBS	11/86			0,278 4	0,297 1
PTB	12/86	0,452 9	0,415 2		
		PI-8	PI-15	PI-8	PI-15
NBS	8/86	0,459 0	0,414 1	0,285 3	0,299 2
NBS	11/86			0,283 2	0,299 0
PTB	12/86	0,456 6	0,413 3		

Laboratoire	Date	Sensibilité à 633 nm		Sensibilité à 488 nm	
		PI-5	PI-13	PI-5	PI-13
NBS	2/86	0,460 8	0,411 2		
NIM	3/86	0,461 8	0,412 1	0,291 5	0,299 6
NBS	5/86	0,460 9	0,412 0		
NBS	8/86			0,290 2	0,301 1
		PI-3	PI-12	PI-3	PI-12
NBS	2/86	0,456 3	0,409 8		
CSIRO (PQED)	4/86	0,456 7	0,409 4	0,286 6	0,302 4
CSIRO (ESR)	5/86	0,456 7	0,409 4	0,286 3	0,302 1
NBS	5/86	0,456 5	0,409 6		
NBS	8/86			0,286 3	0,302 6
		PI-6	PI-14	PI-6	PI-14
NBS	2/86	0,448 9	0,413 1		
ASH	4/86	0,443 2	0,406 6	0,261 8	0,298 6
ASH Valeurs corrigées		0,449 4	0,412 3	0,263 5	0,300 6
NBS	5/86	0,449 1	0,413 7		
NBS	8/86			0,262 3	0,299 1
		PI-6	PI-14	PI-6	PI-14
NBS	2/86	0,448 9	0,413 1		
OMH	4/86	0,449 2	0,413 0	0,262 8	0,299 4
NBS	5/86	0,449 1	0,413 7		
NBS	8/86			0,262 3	0,299 1
		PI-8	PI-16		
NBS	2/86	0,459 8	0,414 3		
ETL	6/86	0,462 5	0,419 9		
NBS	8/86	0,459 0	0,415 5		
		PI-7	PI-15	PI-7	PI-15
NBS	2/86	0,456 3	0,413 4		
NPRL	7/86	0,457 8	0,416 3	0,286 2	0,300 1
		0,449 3	[à 1,95 mW]		
NBS	8/86	0,455 7	0,414 1	0,283 8	0,299 2
		PI-6	PI-14	PI-6	PI-14
NBS	5/86	0,449 1	0,413 7		
INM	7/86	0,449 7	0,414 4	0,261 6	0,299 8
NBS	8/86	0,448 6	0,413 7	0,262 3	0,299 1

633 nm ; à 488 nm, la moyenne est de 1,002 0 avec un écart-type de 0,68 %. Dans le cas des photodiodes de type NP (figure 4), la moyenne du rapport laboratoire/NBS à 633 nm est de 0,999 0 et l'écart-type de 0,77 % ; à 488 nm, la moyenne est de 0,999 1 et l'écart-type de 0,50 %.

Comme cela a été dit précédemment, les laboratoires qui ont d'abord reçu des photodiodes instables (NRC et NPL) ont été invités à renouveler leurs mesures sur une autre série de récepteurs. De plus, la PTB a aussi été conviée à remesurer ses récepteurs en raison d'éventuelles difficultés qui pourraient provenir, soit de rayonnements diffus, soit d'une trop grande densité du flux énergétique (comme c'est le cas pour les résultats du NPRL à 2 mW), soit d'une éventuelle instabilité du photorécepteur.

Les figures 5 et 6 montrent, respectivement à 633 nm et 488 nm, l'ensemble des résultats définitifs, c'est-à-dire y compris les valeurs finales du NRC, du NPL, de la PTB et de l'ASH. Les résultats de la comparaison sont présentés sous la forme du rapport laboratoire/NBS. Les barres d'erreur donnent l'incertitude composée estimée (somme quadratique) et la précision des mesures de chaque laboratoire par rapport au NBS. Les barres d'erreur sont calculées à partir du rapport moyen pour chaque laboratoire.

À partir de la figure 5, on peut calculer l'accord moyen international de la sensibilité absolue à 633 nm. Il est de 1,001 3 pour les onze laboratoires qui ont participé à la comparaison à cette longueur d'onde (y compris le NBS) avec un écart-type (d'une seule mesure) de 0,34 %. La PTB ayant soumis deux séries de résultats, chacune d'elles a été affectée d'un poids 0,5 dans le calcul de la moyenne.

Les résultats de la figure 6 montrent un accord moyen international pour la sensibilité absolue à 488 nm de 1,001 1, avec un écart-type de 0,33 %. Sauf pour le NIM, le NPRL et l'INM, les résultats des comparaisons à 633 nm et à 488 nm sont identiques pour les deux types de photodiodes dans la limite de précision de chaque laboratoire. La dispersion, plus grande pour le NIM, le NPRL et l'INM, pourrait être due à des instabilités des photodiodes de type PN comme nous l'avons dit précédemment [5, 7].

La stabilité dans le temps des photodiodes à 488 nm n'est pas indiquée. D'après les résultats du NBS figurant au tableau I, il est possible de calculer la variation moyenne observée sur cinq photodiodes de type PN et cinq photodiodes de type NP pour une période de trois mois. Pour les photodiodes de type PN, la sensibilité à 488 nm décroît en moyenne de 0,54 % avec une incertitude de 0,29 % pour trois écarts-types. Cela est en accord avec les observations de Stock et Heine [7]. Dans le cas des photodiodes de type NP, la sensibilité augmente en moyenne de 0,09 % avec une incertitude de 0,10 % pour trois écarts-types.

Les changements importants observés sur trois des photodiodes lors de la première étape de la comparaison vont dans le même sens que les instabilités décrites ci-dessus : on a observé une diminution pour les

photodiodes de type PN et une augmentation pour les photodiodes de type NP. Dans le premier cas, la diminution est due à une baisse du rendement de collection à l'interface dioxyde de silicium-silicium [5, 6]. L'augmentation de la sensibilité des photodiodes de type NP est plus probablement due à un changement du facteur de réflexion [8]. On est parvenu à cette conclusion par un examen visuel de la surface des deux photodiodes de type NP qui ont varié durant le transport. Ces deux récepteurs montrent une décoloration marquée dans la région centrale comme si quelque chose s'était déposé sur la surface par l'ouverture de 0,5 cm^2 servant de masque.

Conclusions

La principale conclusion de cette comparaison internationale est que l'écart-type de l'accord international des mesures absolues de flux énergétique monochromatique (ou sensibilité spectrale absolue) est de 0,34 % (pour une mesure) à 633 nm (onze laboratoires) et de 0,33 % à 488 nm (neuf laboratoires). Ces mesures ont été effectuées en utilisant deux types différents d'étalons absolus et à des niveaux de flux énergétique s'étendant sur cinq décades.

La deuxième conclusion est que les mesures de flux énergétique absolu effectuées avec des radiomètres à substitution électrique traditionnels et avec les nouveaux récepteurs à rendement quantique prévisible sont équivalentes, à la précision de la comparaison. Cinq laboratoires ont utilisé un radiomètre à substitution électrique et sept un récepteur à rendement quantique prévisible (un laboratoire a utilisé les deux techniques). On n'a pas observé de différence entre les deux groupes à aucune des longueurs d'onde.

La troisième conclusion est que les photodiodes au silicium conviennent bien comme étalons pour conserver les échelles photométriques et radiométriques et comme étalons de transfert pour disséminer ces échelles ou servir aux comparaisons futures. Le comportement de la majorité des récepteurs est très bon. Comme on pouvait s'y attendre, les photodiodes de type PN (EG&G) ont donné de meilleurs résultats à la longueur d'onde la plus longue (633 nm) et les photodiodes de type NP (UDT) à la longueur d'onde la plus courte (488 nm). Sur un temps très court, les modèles EG&G ont varié de moins de 0,1 % à 633 nm et les modèles UDT ont varié d'environ 0,1 % à 488 nm.

Bien que l'on ait observé de très importants changements de la sensibilité sur trois des seize photodiodes, ces changements ne sont pas corrélés avec l'accord qui a été obtenu entre les laboratoires au cours de la comparaison. Apparemment, les photodiodes ont subi les changements les plus importants en quittant le NBS et elles ont très peu varié lors du retour. Cela peut paraître improbable, mais ce n'est

pas impossible. Les changements qui ont été observés correspondent effectivement aux expériences d'autres observateurs. En conséquence, on peut donc s'attendre à ce que le travail en cours dans de nombreux laboratoires sur la physique des photodiodes au silicium conduise à un meilleur comportement de ces dispositifs.

Il est tentant d'essayer d'expliquer les changements de sensibilité des deux types différents de photodiodes. La photodiode de type PN qui a évolué a vu sa sensibilité diminuer, tandis que les photodiodes à jonction induite ont montré une augmentation de leur sensibilité. Ces changements sont cohérents avec ce que l'on peut attendre dans le cas où une charge statique apparaît sur la surface du récepteur au cours du transport ; peut-être est-ce dû à une condensation d'eau sur les photodiodes lors de leur transfert d'un environnement froid à un environnement chaud. Il est connu que le rendement quantique interne des photodiodes de type PN peut changer de façon irréversible du fait d'une charge électrique statique temporaire à la surface [6]. Généralement cela réduit le rendement quantique. Dans le cas des photodiodes de type NP, les expériences récentes de nettoyage des photodiodes au silicium ont montré que le facteur de réflexion de la photodiode change considérablement lorsque celle-ci est exposée à de la vapeur d'eau fraîchement condensée [8]. Peut-être la conclusion la plus importante que l'on peut tirer des changements observés est-elle que la surface des photodiodes doit être protégée des contaminations atmosphériques durant le transport.

Remerciements

L'auteur remercie Mr Douglas Thomas, Mme Barbara Belzer et Mr Warren Gladden (NBS) pour leur aide lors de la préparation de cette comparaison et lors de la mesure de la sensibilité des photodiodes.

Références

[1] EG&G Electro-Optics, 35 Congress St., Salem, MA 01970.

[2] United Detector Technology, 12525 Chadron Ave., Hawthorne, CA 90250.

[3] Zalewski, E. F. Recent developments in the techniques for the self-calibration of silicon photodiodes. *In* IMEKO Conference, Berlin, 1982.

[4] Geist, J., Liang, E. and Schaefer, A.R. Complete collection of minority carriers from the inversion layer in induced junction diodes. *J. Appl. Phys.*, **52**, 1981, pp. 4879-4881.

[5] Verdebout, J. and Booker, R. L. Degradation of native oxide passivated silicon photodiodes by repeated oxide bias. *J. Appl. Phys.*, **55**, 1984, pp. 406-412.

[6] KEY, P. J., FOX, N. P. and RASTELLO, M. L. Oxide-bias measurements in the silicon photodiode self-calibration technique. *Metrologia,* **21,** 1985, pp. 81-87.

[7] STOCK, K. D. and HEINE, R. On the aging of photovoltaic cells. *Optik,* **71,** 1985, p. 137.

[8] ZHANG, R. R., BELZER, B. J. and ZALEWSKI, E. F. Silicon photodiode reflectance stability and cleaning (résultats non publiés).

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 proposées au Comité International des Poids et Mesures.

NOTE
ON THE ORGANS OF
THE CONVENTION DU MÈTRE

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 m^2) 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 forty physicists or technicians are working in the BIPM laboratories. They are mainly conducting metrological research, international comparisons of realizations of units and the checking of standards used in the above-mentioned areas. An annual report published in Procès-Verbaux des séances du Comité International gives the details of the work in progress. BIPM's annual appropriation is of the order of 14 327 000 gold francs, approximately 26 000 000 French francs (in 1986).

* As of 31 December 1986 forty-seven 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, Israel, Italy, Japan, Korea (Dem. People's Rep.), Korea (Rep. of), 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 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 (*BIPM Proc.-Verb. Com. Int. Poids et Mesures*, **31**, 1963, p. 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).

The Bureau International also publishes monographs on special metrological subjects and, under the title « Le Système International d'Unités (SI) », a booklet, periodically up-dated, in which all the decisions and recommendations concerning units are collected.

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 11th Meeting

1. Report on international comparison of luminous intensity and luminous flux standards (BIPM).
2. Report on NPL/NBS comparison of spectral radiance scales.
3. Progress report on international comparison of measurements of monochromatic radiant power (NBS).
4. Review of progress since the 10th meeting, by national and other laboratories, in realizing first-level standards of :
   (*a*) broad-band radiometric quantities, and
   (*b*) spectral radiometric quantities.
5. Review of progress since the 10th meeting, by national laboratories, in realizing first-level standards of :
   (*a*) luminous intensity,
   (*b*) luminous flux.
6. Review of other related researches in the national laboratories, including radiometric work related to optical fibre technology.
7. Information on related work within the framework of the CIE (F. Rotter).
8. Consideration of the future working programme of the CCPR, including any need for additional international comparisons.
9. Proposal for CCPR sponsorship, in conjunction with meteorological and space scientists, of a symposium on radiometry.
10. Consideration of an appropriate laboratory programme for the BIPM in radiometry and photometry.
11. Diverse questions.
12. Publication of documents.

REPORT
OF THE
COMITÉ CONSULTATIF
DE PHOTOMÉTRIE ET RADIOMÉTRIE
(11th Meeting — 1986)
TO THE
COMITÉ INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES

by P. J. KEY, rapporteur

The Comité Consultatif de Photométrie et Radiométrie (CCPR) met for its 11th meeting at the BIPM, Sèvres, where six sessions were held between Tuesday 30 September and Thursday 2 October 1986.

The following were present :

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] du Conservatoire National des Arts et Métiers (J. BASTIE).

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

Electrotechnical Laboratory [ETL], Ibaraki (M. NISHI).

Instituto de Optica Daza de Valdés, Madrid (A. CORRÓNS).

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

National Bureau of Standards [NBS], Gaithersburg (K. D. MIELENZ, J. H. WALKER).

National Institute of Metrology [NIM], Beijing (CHEN Xiaju).

National Physical Laboratory [NPL], Teddington (P. J. KEY, J. R. MOORE).

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

National Research Council of Canada, [NRC], Ottawa (L. P. BOIVIN).

Office Fédéral de Métrologie [OFMET], Wabern (P. BLASER).
Physikalisch-Technische Bundesanstalt [PTB], Braunschweig (K. BISCHOFF, D. FÖRSTE, K. MÖSTL).

Members by appointment :

F. ROTTER (Wien).
J. SCHANDA (Budapest).

The Director of the BIPM (P. GIACOMO).

Invited guests :

Instituto Nacional de Tecnología Industrial [INTI], San Martin (R. D. LOZANO).

Also attending the meeting :

T. J. QUINN, Deputy Director and J. BONHOURE (BIPM).

Excused :

Amt für Standardisierung, Messwesen und Warenprüfung [ASMW], Berlin.
World Radiation Center [WRC], Davos Dorf (C. FRÖHLICH).
K. YOSHIE, Tokyo.

Absent :

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

The president opens the session and welcomes members, especially those attending for the first time. The sad loss since the last meeting of Prof. Hahn and CIE President G. Wyszecki is recalled.

Mr. Key is appointed as rapporteur.

1. Report on international comparisons of luminous intensity and luminous flux standards

1.1. Presentation of the results

Mr. Bonhoure presents the results of the comparisons (Appendix P2). Groups of reference lamps were established by the BIPM, one for each type of lamp used, against which standard lamps from national laboratories were compared. Each BIPM reference group was calibrated against groups of lamps established by the BIPM for the 1969 comparison

and, through these groups, links national laboratories' recent realizations to the units currently conserved and disseminated by the BIPM. These are the 1961 international mean for luminous intensity and the 1952 international mean for luminous flux.

Referring to Table XVI, in which the ratio of the mean luminous intensity unit for each laboratory to the BIPM unit is presented, Mr. Bonhoure remarks that the spread in results appears similar to that obtained with the old definition in 1969. However, for those laboratories that sent both Osram and NPL/GEC lamps, the differences in results between the two sets as measured at the BIPM fall into two distinct groups. For CSIRO, INM, NBS and NRC the differences [Osram-NPL/GEC] are in the range − 0,21 % to − 0,40 % and for ETL, NIM, NPL and NPRL from + 0,03 % to + 0,17 %.

Mr. Bonhoure then refers to Table XVII which presents the results of the luminous flux comparison. Again, the spread in results for the 11 participating laboratories is not significantly different from the 1969 comparison.

Mr. Key asks if the provisional results of the ASMW have been confirmed. Mr. Bonhoure answers « no ».

1.2. Results of the comparison of luminous intensity

Mr. Blevin opens the discussion on the results of the comparison of luminous intensity and refers to the differences in results between the two groups of lamps for the two groups of four laboratories.

Mr. Bonhoure describes the organization of measurements at the BIPM and it is agreed that there is no likelihood of error from this source at the BIPM. Mr. Blevin is very pleased with the stability of both types of lamp and points out that although the differences between the lamp types at individual laboratories is disturbing, it has not affected the final result as there is no significant difference between the overall mean ratio for each lamp type.

Mr. Bonhoure discusses the different photometer aperture diameters and measurement distances used in each laboratory but shows there is no correlation which can explain the effects. Mr. Bastie, however, reports an apparent change in the luminous intensity ratio between the two types of lamp as a function of laboratory temperature of 0,4 % between 18 °C and 21,5 °C. The photometer was not thermostated. MM. Bonhoure and Key report similar experiments with thermostated photometers which have shown no effect. Mr. Bastie is requested to circulate his results via the BIPM.

Mr. Quinn asks if gas-circulation effects, which have produced bi-stable output characteristics for some types of lamp, might be the cause but it is agreed that no such effects have ever been observed with these lamps.

Two other possible differences in measurement procedures among laboratories were reviewed, light-trapping arrangements behind the lamps and baffling between lamps and photometer, particularly for the NPL/GEC lamps. It was concluded that all laboratories used essentially the same arrangements.

Mr. Schanda suggests a bilateral comparison involving one laboratory from each group might resolve the problem. NPL and INM agreed to undertake such an intercomparison which will also involve further measurements at the BIPM. Mr. Moore agrees to act as convenor and hopes to complete the work by May 1987. Results will be circulated via the BIPM.

1.3. Results of the comparison of luminous flux

Mr. Blevin invites discussion of the luminous-flux results. Mr. Nishi refers to problems of variable self-absorption corrections. Mr. Blevin refers to Mr. Bonhoure's letter to participating laboratories and comments that it had unfortunately been assumed that the effect would be similar for all lamps. Later tests had shown that self-absorption in the BIPM sphere varied a surprising amount, a few tenths of one percent, and had been measured for lamps from four laboratories (IEN, INM, NPL, ASMW — different lamp type). Overall, the influence on the results was felt to be small.

Mr. Blevin comments that automated goniophotometry would avoid the problem but this would raise difficulties for the BIPM. Lamps actually used in the comparison were calibrated by goniophotometry in seven laboratories and using an integrating sphere in three laboratories.

1.4. Consequences of the comparisons

Mr. Blevin opens a discussion on the consequences of the comparisons and makes three proposals. Recalling that the CGPM, when redefining the candela, directed the CIPM to arrange intercomparisons, he considers that the CCPR should report back through the CIPM to the 1987 CGPM meeting on the results and their significance for photometry.

A major concern is the uniformity of the 1985 results compared with the 1969 exercise. Further, the CCPR should advise the BIPM on which units to conserve and disseminate in future, as those currently maintained are not in accord with the results of the comparison ; in particular, there is an inconsistency between lumen and candela units. Finally, because the « as maintained » units in some national laboratories differ significantly from their new realizations and the mean of this international comparison, the CCPR should encourage laboratories to change these units to their best scientific values or possibly to the international mean.

1.4.1. Report to the CGPM

Mr. Blevin presents statistics on the spread of national units in the 1985 and 1969 comparisons (Appendix P 2, Appendix A). Points of interest are that for luminous intensity there is little difference between the 1985 results at 2 800 K and the 1969 results for vacuum lamps at 2 045 K but some improvement over the 1969 results for lamps operating at 2 859 K. The discussion is confined to a consideration of statistics based on laboratories whose results have been confirmed. For luminous flux there is some improvement over the 1969 results but, surprisingly, the spread appears a little less than for luminous intensity.

Mr. Förste considers this rather surprising as instrumentation and procedures used to transfer from intensity to flux differ between laboratories and there is inevitably a larger uncertainty in luminous-flux measurements. Mr. Lozano notes that several methods have been used in realizing luminous-intensity standards but only goniophotometry to derive luminous flux. Mr. Boivin comments that even if the scatter is not reduced, techniques for realizing the candela from first principles are now much simpler, so that redeterminations of the unit can be carried out more frequently. Mr. Hengstberger points out that although several laboratories have in principle the same radiometric scale, through use of similar instrumentation, their photometric scales differ significantly. It is, therefore, necessary to look at the transfer process from radiometric to photometric scales and he suspects $V(\lambda)$ filter characterization may be a problem.

Mr. Blevin summarizes, noting that the wider range of techniques now used instead of the platinum-point black body gives greater confidence in the mean result, more laboratories are involved having

the satisfaction of realizing their own unit, the standard error of the mean of the results is certainly less than in 1969 and that a sound base for continuing improvement has been laid. It is agreed that this information should be brought to the attention of the CGPM.

1.4.2. Units maintained at the BIPM

The President opens the discussion on units maintained at the BIPM (Appendix P 2, Appendix A). Table 2 shows that the international mean value of the quotient of each national lumen to candela (1985 realization) is 1,6 % greater than the corresponding quotient for the lumen and candela maintained at the BIPM. Reference to Table 1 shows that the BIPM candela is about 1 % greater than the SI candela and the BIPM lumen is about 0,7 % smaller than the SI lumen, assuming that the means of the national 1985 realizations represent the SI units.

Mr. Mielenz asks if these are the only data to be considered in recommending changes to the BIPM units. Mr. Blevin, supported by Mr. Key, considers all earlier work should be disregarded. Mr. Soardo considers it mandatory for the BIPM to change and Mr. Blevin considers that the standard error of the mean of the results (~ 0,2 %) indicates the likely level of repeatability of any future comparison.

Mr. Giacomo, referring to the Comité Consultatif d'Électricité (CCE) discussions on the optimum time for change, suggests that change is not justified if discrepancies are similar to the standard deviation of the results. On the other hand there are likely to be significant difficulties if a discrepancy approaching ten standard deviations exists. A figure of three standard deviations difference seems reasonable to justify a change.

Mr. Rotter refers to the need for long-term stability for the purposes of international trade, as provided, for example, by the IPTS. Mr. Blevin comments that extensive goniophotometry has been undertaken during the last decade, suggests that earlier goniophotometer results were probably incorrect and that, as the BIPM units are now clearly inconsistent, it would be intolerable to persist with these obvious errors. Mr. Hengstberger agrees and Mr. Soardo points out that for industrial calibrations 95 % confidence limits are usual. Applied to the recent comparisons, the error bars for most laboratories would probably overlap the world mean. It is agreed that a proposal should be drafted recommending that the BIPM change its maintained and disseminated units.

1.4.3. Units maintained in the national laboratories

The President invites comments on three possible recommendations to national laboratories concerning alignment of their own units: (1) to make no change, (2) to adjust to agree with the world mean or (3) to adjust their « as maintained » units to agree with their best scientific realization. Mr. Mielenz supports (3); because national laboratories can realize the units in accordance with SI definitions, they should be allowed to adjust as necessary. There is general agreement over this. Mr. Schanda suggests that laboratories should periodically check their units and declare the link between their maintained units and the world mean.

Mr. Quinn compares this approach to that of the CCE where, in order to get world-wide agreement in electrical measurements, there are recommendations that the SI volt and ohm units should be aligned internationally within a few years. Mr. Blevin comments that if the relative positions of the laboratories remain unchanged in 4-8 years time it might be justifiable to press for international alignment. Mr. Hengstberger suggests that national laboratories might state on calibration certificates the link between their unit and that of the BIPM. Mr. Soardo refers to the situation in European calibration services and the WECC (Western European Calibration Club) where any laboratory can maintain its own units and realizations as a basis for dissemination.

Mr. Blevin concludes that national laboratories should be urged to align their « as maintained » units to their own SI realizations and should inform the BIPM and the CCPR of their best estimates of the differences between these and the BIPM units. It is agreed that all confirmed (before October 31st, 1986) results in the comparisons should be included, without any weighting, in determining the new international mean units.

1.4.4. Recommendations

The recommendations to be drafted are reviewed: (1) one concerning the comparison results and general progress, to be brought to the attention of the CGPM, (2) one on units to be maintained and disseminated in future by the BIPM and (3) one on the adjustment of the units maintained by national laboratories. A drafting committee is appointed to prepare formal recommendations (MM. Bischoff, Blevin, Giacomo, Hengstberger), after which Recommendations P 1, P 2 and P 3 (1986) are prepared and agreed upon.

Mr. Blevin concludes the discussion by expressing thanks to the BIPM and Mr. Bonhoure for their efforts in arranging and conducting the comparison and to the national laboratories for their cooperation in maintaining the timetable.

2. Report on the NPL-NBS comparison of spectral radiance measurement

Mr. Moore reports that the work follows a 1979 proposal to evaluate an improved spectral-radiance transfer-standard lamp developed by the NPL. Owing to damage sustained by two lamps in transit, only two were eventually used in the comparison (Appendix P 3).

Reproducibility of the lamps, not shown in the report, was better than 0,5 % but significant differences between the NPL and the NBS scales were revealed. Mr. Mielenz agrees that the lamps appear to be suitable as transfer standards but he is concerned that the discrepancies are greater than the uncertainties. Mr. Blevin comments that all the photometric lamps proved stable in transit. Mr. Moore remarks that ribbon-filament lamps are particularly susceptible to shock.

There is no immediate interest in further measurements but Mr. Blevin suggests that the results may be relevant to future spectral international comparisons.

3. Report on the comparison of national standards of absolute spectral responsivity

Mr. Mielenz reports on the measurements (Appendix P 4). Two types of silicon photodiode were circulated to national laboratories for measurement of spectral responsivity at 633 nm and also 488 nm. The overall level of agreement was encouraging. Excluding results that were more than three standard deviations from the mean, the spread was ± 0,2 % at 633 nm and ± 0,3 % at 488 nm. The stability of the photodiodes was good (0,1-0,2 %) except in two cases. The work is expected to continue with industrial participation, under the auspices of the CIE.

Mr. Boivin comments that measurements at 488 nm appear to have been done at the NBS only after those at the participating laboratory, in some cases several months after, and so there were no initial measurements at the pilot laboratory, as is customary in international

comparisons, to check on possible changes in the transfer standards. Mr. Mielenz agrees and accepts that there may have been additional stability problems in these cases. Mr. Blevin agrees that the comparison at 633 nm was more satisfactory than that at 488 nm for this reason.

Mr. Möstl suggests that the results may depend on irradiance levels and that specification of the spatial distribution of irradiance is necessary. The PTB has observed discrepancies ~ 0,4 % between the self-calibration technique and electrically-calibrated absolute radiometers and he asks if other laboratories have observed such differences. MM. Gardner, Key and Boivin all report good agreement although maximum permissible irradiance levels are known to be device-dependent.

Mr. Möstl asks if the reason for the changes in the unstable detectors is known. Mr. Blevin comments that more information on the stability of detectors is required. Mr. Mielenz believes that lack of quality control during manufacture may lead to stability problems. Mr. Key believes it is necessary to monitor a detector for one or even two years to ensure selection of stable devices.

He asks if further measurements are possible in this exercise, particularly for those participants who received unstable detectors. Mr. Mielenz feels it is right to conclude this phase of the comparison now. Results of further work involving national laboratories can be reported in the archival literature, and international comparisons involving industrial laboratories can be carried out through the CIE.

Mr. Blevin considers the work to be a sound basis for further developments in radiometry within the CCPR and suggests that the BIPM should become the centre for this work in future, developing a competence for comparison activity if not *ab initio* absolute radiometry. He thanks Mr. Zalewski and his colleagues at the NBS for their efforts in this work.

4. Progress by national laboratories in establishing primary standards for radiometric and spectroradiometric quantities

Progress has been reported by most participants in their answer to Questionnaire CCPR/86-1 ; particular points are emphasized during the discussion which follows.

The NRC has developed new thin-film absolute radiometers particularly suitable for measurement automation and also automated spectral-responsivity calibration facilities for industrial applications.

Mr. Gardner reports agreement at the 0,1 % level between self-calibrated silicon photodiodes (UDT* UV100 type) and an electrical-substitution radiometer, between 488 nm and 633 nm (Document CCPR/86-6). A new set of improved gold-black bolometers are being produced as standards of relative spectral responsivity. The ETL has applied the self-calibration technique to two types of Hamamatsu silicon photodiode not previously evaluated by this method (Document CCPR/86-9). Significant differences are revealed (~ 0,8 %).

Mr. Bastie reports studies on the ageing of electrically calibrated radiometers. The reflectance of their gold-black coatings has been observed to change by 0,5 % over 3 years and so should be remeasured regularly. This coating is initially very diffuse but becomes increasingly specular with age. Other participants report similar findings although high-density coatings seem to be more stable but have a higher infrared reflectance.

The IEN has studied lead-heating effects with its absolute radiometer and is working on mathematical techniques to enhance signal-to-noise ratios.

Mr. Corróns reports the application of the self-calibration technique to silicon photodiodes in the 400 to 900 nm spectral range and work to extend spectroradiometric scales into the infrared with electrically-calibrated pyroelectric radiometers.

Mr. Mielenz highlights developments in filter radiometry (comparison of standards based on black-body sources, synchrotron radiation and silicon-photodiode physics ; establishment of spectral irradiance scales), also new silicon-photodiode-based spectral responsivity standards and improvements in spectral radiance and irradiance scale realizations.

The NIM has developed new black-body source standards (near ambient temperatures and at 3 000 K) and established deuterium-lamp ultraviolet working standards.

Mr. Key describes a new helium-cooled absolute radiometer. This has been designated specifically for use with laser sources to determine the responsivity of solid-state detectors for use as secondary standards. It has been applied to the evaluation of the self-calibration technique (using UDT QED 200 type detectors) and an agreement within 0,1 % was found between 406 and 676 nm.

Mr. Hengstberger has made further improvements to NPRL absolute radiometers including thermostating to ± 1 mK, and using ac bridge

---

* United Detector Technology

techniques to improve sensivity. Comparisons against QED 200 detectors showed agreement within the 0,3 % measurement uncertainty between 400 and 700 nm.

Mr. Quinn comments that further improvement to the detectivity of the NPL type of radiometer are now possible using SQUID techniques to overcome limitations imposed by the Ge resistance thermometer. Mr. Key reported that the radiometer time constant will be improved by the use of a thin-film heater, and possibly a smaller cavity.

Mr. Hengstberger proposes to evacuate his radiometer to improve the resolution to 10 nW.

Mr. Blaser refers to absolute radiometer developments at the World Radiation Centre, Davos (Document CCPR/86-3).

The PTB has obtained improved precision in absolute radiometry by automation of electrical calibration and reports higher-accuracy spectral-responsivity calibrations.

Mr. Schanda reports application of the self-calibration technique to derive radiometric and photometric scales.

Mr. Lozano says work is in progress to evaluate the self-calibration technique against an absolute radiometer.

Mr. Mielenz feels that the accuracy of aperture measurement is a limiting factor in radiometry. Mr. Hengstberger reports a comparison of aperture measurement between four laboratories, in Canada, UK, South Africa and Belgium. He points out that because of the effect of lands the effective aperture area is not always the same as the geometric size. Thin apertures used to avoid this effect can be damaged by mechanical-measurement techniques.

5. Progress by national laboratories in establishing primary standards for luminous intensity and luminous flux

New or improved realizations of the candela are reported by most laboratories in answers to Questionnaire CCPR/86-1. Electrically-calibrated absolute radiometers are the basis of most realizations; the NBS, however, has used filter radiometry and self-calibrated silicon photodiodes. The PTB regards its Toshiba 2 042 K vacuum lamps as the most stable and these are used in its candela realization.

Goniophotometry has been used by all laboratories realizing luminous flux standards. New goniophotometers have been developed at INM and IOM. MM. Chen and Mielenz report work on high-pressure-sodium-lamp flux standards and MM. Mielenz and Moore describe work in progress to establish spectral total-flux standards (incandescent and discharge).

Mr. Nishi describes goniometric measurements at the ETL on the distribution of colour temperature of luminous-flux standards in connection with their application as spectral total-flux standards. Feasibility studies have been carried out at the NBS on the generation of flux standards by characterizing the throughput of an integrating sphere and calibrating by reference to a luminous-intensity standard or laser.

6. Review of other relevant work in national laboratories, particularly studies related to optical fibre technology

The ETL, NPL, PTB and NBS all report further experiments with storage-ring sources of synchrotron radiation. Comparisons against other radiometric standards are showing agreement in absolute terms as close as 0,1 % in the visible.

Extensive studies of the properties of silicon, germanium and other solid-state detectors have been made at a number of laboratories. Particular attention has been paid to linearity, spatial uniformity of response and stability. Mr. Möstl reports supralinear effects in the blue-UV region with silicon photodiodes. The NBS has extended its studies of the self-calibration technique to InGaAs/InP photodetectors for the near infrared and new types of silicon photodiode for the UV.

Mr. Mielenz also reports a shift of emphasis at the NBS away from theoretical aspects and towards the application of new technologies, for example heterodyne interferometric methods for spectrophotometry.

Mr. Bischoff refers to the development of calibration techniques for solar photovoltaic detectors at the PTB and Mr. Förste to the measurement of luminous flux and spatial distribution of LEDs and other small sources by automated goniophotometry.

Arrangements for undertaking measurements required in optical-fibre applications in the different national laboratories are described. In most laboratories, optical-power measurements are the responsibility of radiometry groups, as represented by the CCPR members. At CSIRO, NIM, NPL, NPRL and PTB, standards have been developed for the measurement of radiant power at wavelengths used in optical communication systems (850, 1 300 and 1 550 nm). Calibration facilities for optical power meters and/or secondary-standard detectors are already

available in some laboratories. At ETL and NBS, this work is undertaken by other groups concerned with laser power measurements. Responsibility for other optical-fibre standards lies in separate groups in most laboratories.

7. CIE activities

Mr. Rotter reports that Division 2 (Physical measurements) met in Paris in 1985 under Mr. Grum and that following the latter's death in December 1985, Mr. Mielenz took over as division director. Meetings have since been held in 1986 in Vienna (June 1986) and Paris (September 1986). Division 2 currently has 24 technical committees (strictly speaking, working groups with finite lifetimes established to achieve specific tasks). A brief résumé of each group's activities and progress is presented.

CIE documents recently published are no.s 64 [Determination of the spectral responsivity of optical radiation detectors] and 65 [Electrically calibrated thermal detectors of optical radiation (absolute radiometers)].

Mr. Rotter reports that he will retire from the CCPR and the CIE at the end of this year. Mr. Blevin thanks him for his liaison work between the CIE and the CCPR. It is proposed and agreed that Mr. Mielenz take over these responsibilities and he is asked to report CCPR work at the next session of the CIE.

8. Future CCPR activities and international comparisons

8.1. Luminous intensity and luminous flux

The requirements for future international comparisons of luminous intensity and luminous flux are discussed. Mr. Blevin remarks on the considerable effort required for the comparisons and feels that it would be more useful for the BIPM to develop competence in radiometric measurements, which is not consistent with undertaking major photometric comparisons at the same time. Mr. Mielenz comments that the trend towards interest in spectroradiometric comparisons could also include photometric results. It is agreed that no further work is needed for at least four years and that the situation can be reviewed and further comparisons planned as required at the next CCPR meeting.

8.2. Spectral radiance and spectral irradiance

Mr. Mielenz asks if there is any further interest in a spectral-radiance comparison, in view of the inconclusive results of the trial NPL-NBS exercise. Although six laboratories have a capability (ETL, INM, NBS, NIM, NPL, PTB) there is a greater interest in a spectral-irradiance comparison. A proposal by Mr. Mielenz for such a comparison covering the wavelength range 250 nm to 2 500 nm using tungsten lamps receives wide support. Ten laboratories are interested in participating (CSIRO, ETL, INM, IOM, NBS, NIM, NPL, NPRL, NRC, PTB). The NBS may be able to act as pilot laboratory.

Mr. Moore refers to a new tungsten-halogen spectral-irradiance standard developed by NPL and GEC which would be suitable for the comparison. The NPL could undertake ageing and selection of lamps to be purchased by participants. It is also suggested that each laboratory should measure and submit three lamps to the NBS who will conduct the comparison and return them to national laboratories for remeasurement.

All these proposals are approved and Mr. Blevin suggests a small working group (CSIRO, NBS, NPL) which will by correspondence prepare detailed proposals for the comparison, for circulation to participants and inviting their comments. The working group will also define time-scales to ensure that the exercise is completed at least six months before the next CCPR meeting. It is important to keep the BIPM and the CCPR President fully informed about all aspects of the comparison. Invitations to participate should go through the BIPM.

8.3. $V(\lambda)$ detectors

A proposal by Mr. Schanda is presented: stating that the quality of $V(\lambda)$ correction and the stability of current photometers may be the limiting factors in photometry, he thinks that the BIPM, under the auspices of the CCPR, ought to organize and coordinate a project to manufacture and evaluate a quantity of $V(\lambda)$-corrected silicon detectors.

The PTB delegates consider that too much work would be involved and add that they are already engaged in EEC-sponsored work on detector stability, together with IEN, INM and NPL. Mr. Key reports that the NPL design of $V(\lambda)$ filter is proving very stable and considers that it would be more useful to study a range of detector types and filter designs.

MM. Hengstberger and Mielenz are interested in the idea in principle but it is agreed that the scale of the proposal is excessive and inappropriate for CCPR sponsorship. The NBS, NPRL and IOM then resolve to participate in the proposed project individually.

8.4. Optical fibres

Mr. Blevin gives the list of future comparisons (Document CCE/86-47) planned by the CCE Working Group on radiofrequency quantities. These include measurements of power at wavelengths used in optical communication systems (850, 1300 and 1500 nm), proposed by the NBS (Boulder Laboratory) and the ETL (Radio Electronics Section).

The CCPR proposal does not envisage measurements « in fibre ». There is strong interest in participating through the CCPR from CSIRO, INM, NIM, NPL, NPRL and PTB and possibly NBS Gaithersburg. Some members consider that the responsibility for such work should lie with the CCPR. It is suggested that because of the strong general CCPR interest and because seven laboratories whose capabilities are represented through the CCPR would wish to participate, a joint CCPR-CCE working party should be established to plan the comparison. Mr. Blevin agrees to discuss this with the CCE President. The NPL is prepared to represent CCPR opinions and interests if such a joint working party is set up.

Mr. Möstl comments that a direct comparison of large-area germanium photodiodes would be the best basis for a comparison. There is general agreement that a straightforward comparison of radiant-power measurement is needed at this stage ; coupling problems should be excluded. Mr. Blevin notes that organizations that are not national standards laboratories may be involved in the exercise.

Mr. Giacomo comments on the problem of ensuring that all relevant laboratories are aware of the activity. It is not essential for participants to be members of consultative committees. Mr. Quinn notes that the general question of a dividing line between the CCE and the CCPR interests, for example on the basis of wavelength, may need consideration. This question may also arise for other aspects of optical-fibre measurement standards.

9. CCPR sponsorship of a symposium on absolute radiometry

Mr. Quinn reports on a meeting on « Advances in Absolute Radiometry » held in Boston, USA, in June 1985. The meeting brought together people interested in absolute radiometry from several disciplines : optical radiation measurement, space science, solar physics and meteorology. Another similar meeting, probably in 1988, is proposed and opinion sought on the possibility of CCPR sponsorship. Mr. Key says that the NPL would be prepared to host such a meeting.

Although the Boston meeting is judged to have been very successful and strong interest is expressed in a further similar meeting, it is felt that the scope is rather broader than CCPR interests. There also seems to be no precedent for consultative-committee sponsorship and no clear view on the nature of CCPR involvement. It is therefore agreed that the CCPR should not officially sponsor the proposed meeting but individual members strongly supported the NPL's proposal to proceed independently.

10. Future BIPM work programme in radiometry and photometry

Mr. Blevin considers it necessary for the BIPM to develop a capability for radiometric measurements and suggests that secondary, stable, radiometric standards should be set up based on the standards of a number of national laboratories. From this, a broad international comparison activity could develop. Mr. Mielenz suggests that a spectroradiometric realization would be more important but this is considered more difficult.

A narrow majority agrees that a laser-based-radiometry and international-comparison capability should be a first priority, to be followed by the development of spectroradiometric facilities as soon as resources permit.

Mr. Quinn did not consider a suggestion for work on aperture-area measurement to be feasible as important supporting measurement facilities are not available at the BIPM.

11. Other matters

Mr. Giacomo reminds members of the BIPM paper on the organization of international comparisons. The importance of keeping the BIPM informed of smaller-scale or informal comparison activity is also stressed.

Mr. Blevin informs members that the size and membership of the committee should be reviewed from time to time but considers the current size to be the maximum possible for efficient operation. The principal basis for membership is technical competence.

12. Publication of documents

Mr. Giacomo says that publication of working documents should, in general, be avoided, as they are frequently only of value for a year or two after production. It is also necessary to know if they have been published elsewhere or are likely to be independently published.

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

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

Development of radiometric methods for photometry

Recommendation P 1 (1986)

The Comité Consultatif de Photométrie et Radiométrie,

considering

— that the 16th Conférence Générale des Poids et Mesures (1979), when redefining the candela, directed the Comité International des Poids et Mesures to arrange intercomparisons of the realizations by the national laboratories of the photometric units in terms of the new definition,

— that the same Conférence invited the national laboratories to intensify their efforts to realize the candela according to its new definition and to improve the procedures for photometric calibrations and for international comparisons,

— that high technology industries are making new and increasing demands on radiometric and photometric measurements,

recommends

— that the Comité International des Poids et Mesures inform the Conférence Générale des Poids et Mesures

a) that the international comparisons requested have been conducted and have already confirmed the advantages of the new definition,

b) that, as a consequence, the Comité Consultatif de Photométrie et Radiométrie has recommended that the Bureau International des Poids et Mesures and those national laboratories which have not already done so, adjust the values attributed to their photometric standards accordingly,

c) that, since the 1979 redefinition of the candela, there has been an intensified effort in realizing the photometric units and, although the uniformity of the results of the national laboratories has as yet improved only slightly, there has been a great increase in the number of laboratories undertaking realizations and in the range of techniques employed for this purpose,

d) that the continuing development of improved radiometric techniques is expected to lead to greater uniformity and accuracy in photometric measurements,

— that the national laboratories continue their development of accurate radiometric and photometric methods.

Photometric standards of the Bureau International des Poids et Mesures

Recommendation P 2 (1986)

The Comité Consultatif de Photométrie et Radiométrie,

considering

— that the values attributed to the standards of luminous intensity and luminous flux maintained by the BIPM should both promote world-wide uniformity and be consistent with the 1979 redefinition of the candela,

— that the means of the results of the 1985 intercomparisons of the national realizations represent the most reliable reference values for the candela and the lumen,

— that the value of luminous intensity attributed to the standards maintained by the BIPM since 1961 is about 1 % smaller than that corresponding to the mean 1985 realization of the candela,

— that the value of luminous flux attributed to the standards maintained by the BIPM since 1952 is about 0,7 % greater than that corresponding to the mean 1985 realization of the lumen,

recommends

— that the values attributed to the standards maintained by the BIPM as representing the candela and the lumen be adjusted, with effect from 1st January 1987, so as to conserve and disseminate the mean result of the 1985 comparison of realizations of the candela and the lumen,

— that the magnitudes of these adjustments be published.

Photometric standards of the national laboratories

Recommendation P 3 (1986)

The Comité Consultatif de Photométrie et Radiométrie,

considering

— that the values attributed to the standards of luminous intensity and luminous flux maintained by national laboratories should both promote world-wide uniformity and be consistent with the definitions of the candela and the lumen,

— that it would be premature to request these laboratories to adjust the values of the standards in question to conform with mean values based on a single international comparison,

— that, nevertheless, useful progress would be achieved if the national laboratories were to adjust the values attributed to their standards to conform with their own realizations of the candela and the lumen for the 1985 comparisons,

recommends

— that, by 1st July 1987, national laboratories make any necessary adjustment to the values attributed to their standards used for representing and disseminating the candela and the lumen in order to make them consistent with the definitions of these units,

— that, by the same date, these laboratories inform the BIPM of the magnitudes of the adjustments made and of their best estimates of the differences between their adjusted values and the mean values of the 1985 comparisons,

— that the Bureau International des Poids et Mesures publish these data.

APPENDIX P 1

Working documents submitted to the CCPR at its 11th Meeting

(*see* the list of documents on page P 21)

APPENDIX P 2

Report on the sixth comparison of national standards of luminous intensity and of luminous flux
(1985)

by J. Bonhoure
Bureau International des Poids et Mesures

(Document CCPR/86-2 revised)

The sixth comparison of national standards of luminous intensity and of luminous flux was carried out at the BIPM between April and November 1985. It concerned standards established on the basis of the new definition of the candela (1979).

The following fifteen national laboratories participated in the comparison :

ASMW	: Amt für Standardisierung, Messwesen und Warenprüfung, German Dem. Rep.
CSIRO	: CSIRO, Division of Applied Physics, Australia
ETL	: Electrotechnical Laboratory, Japan
IEN	: Istituto Elettrotecnico Nazionale Galileo Ferraris, Italy
INM	: Institut National de Métrologie, France
INTI	: Instituto Nacional de Tecnología Industrial, Rep. Argentina
IOM	: Instituto de Optica, Spain
NBS	: National Bureau of Standards, U.S.A.
NIM	: National Institute of Metrology, People's Rep. China
NPL	: National Physical Laboratory, United Kingdom
NPRL	: National Physical Research Laboratory, South Africa
NRC	: National Research Council, Canada
OFMET	: Office Fédéral de Métrologie, Switzerland
PTB	: Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Fed. Rep. Germany
VNIIOFI	: Research Institute for Optical and Physical Measurements, U.S.S.R.

These laboratories were complying with the Resolution 4 (first part) adopted by the 16th CGPM in 1979 :

« The 16th CGPM directs the CIPM to organize international comparisons to check the uniformity of the results of photometric measurements obtained with the new definition of the candela ».

I. — Measurements specifications and procedures

Each national laboratory was required to send to the BIPM incandescent lamps of specified types :

for luminous intensity, either six Osram Wi 41 G lamps, or six NPL/GEC lamps, or four of each type.

for luminous flux, six GEC lamps.

All measurements performed at the BIPM have conformed to the specifications developed at the tenth meeting of the CCPR in 1982 and repeated below :

Osram lamps Wi 41 G (luminous intensity)

— Colour temperature : 2 800 K ± 30 K.
— Electrical supply : direct current ; negative polarity at the central contact of the lamp base ; power input specified by the current through the lamp.
— Ageing : at least 30 h at 31 V (dc current, same polarity as above).
— Orientation : lamp base down, blackened part of the bulb facing the detector.
— Lamp socket : Edison E 27 with 4 contacts.
— Positioning : the plane of the filament must be perpendicular to the (horizontal) optical axis defined by the centre of the detector and the centre of the lamp window. Viewed from the detector, the axis of the lamp must be vertical.
— Lamp-detector distance : 2,5 m (recommended value).
— The detector must receive light only from the lamp window.
— Warm-up time : at least 12 min.

NPL/GEC lamps (luminous intensity)

— Colour temperature : 2 800 K ± 30 K.

— Electrical supply : direct current ; negative polarity at the central contact of the lamp base ; power input specified by the current through the lamp.

— Ageing : 50 h at 3 000 K or 250 h at 2 800 K (ac current).

— Orientation : lamp base down, with the vertical window (fitted with the screen described by the NPL) facing the detector.

— Lamp socket : to be supplied with the lamps, except in the case of the NPL/GEC type of socket which is available at the BIPM.

— Positioning : The plane of the window must be perpendicular to the (horizontal) optical axis defined by the centre of the detector and the centre of the lamp window. Viewed from the detector, the axis of the lamp must be vertical.

— Lamp-detector distance : 2,5 m (recommended value).

— The detector must receive light only from the window in the mask placed over the lamp (it is desirable that each lamp possess its own mask).

— Warm-up time : at least 15 min.

GEC lamps (luminous flux)

— Colour temperature : 2 800 K ± 30 K (To minimize the effects of ageing, participants may choose the lower limit of the range).

— Electrical supply : direct current ; negative polarity at the central contact of the lamp base ; power input specified by the current in the lamp.

— Ageing : at least 24 h at the chosen colour temperature (ac current).

— Orientation : lamp base on top.

— Lamp socket : Edison E 27 with 4 contacts.

— Warm-up time : 7 min.

a) *Luminous intensity.* — The standards of luminous intensity were compared by means of a photometer having a linear response, comprising a thermostated silicon cell 30 mm in diameter, preceded by a $V(\lambda)$ filter of the mosaic type.

b) *Luminous flux.* — The standards of luminous flux were compared in an integrating sphere 1,5 m in diameter, whose interior white diffusing coating (zinc oxide) has a spectral reflectance of the order of 0,90 for all wavelengths greater than 0,5 μm. The sphere is without a diffusing window ; one employs an optical system comprising an internal spherical mirror for observing the luminance of a wall element. Each series of measurements was preceded by a warming of the sphere for several hours, by means of a lamp placed at its centre and of the same power as that of the standards to be compared, in order to stabilize the characteristics of the diffusing coating.

The flux standards were compared by means of a linear-response photometer, comprising a vacuum cell with a trialkaline cathode and coloured glasses closely duplicating the $V(\lambda)$ curve.

c) *Corrections.* — Since the standards sent to the BIPM by the national laboratories were required to have a common colour temperature specified to be within ± 30 K and the photometers were well corrected, the temperature of the standards was not checked and no colour correction factor was applied.

As all the flux standards were of the same type, it at first appeared to be unnecessary to measure the self-absorption due to the presence of a lamp inside the sphere. It was noticed later, after the departure of several groups of lamps, that differences existed between the lamps, not only between those of old and of recent manufacture, but also between different lamps of recent manufacture. The absorption of the standards of the NPL, the INM, the IEN and the ASMW could be determined by comparison with the BIPM reference standards of recent manufacture :

0,00 %	NPL (recent manufacture)
+ 0,05	IEN (recent manufacture)
+ 0,20	INM (recent manufacture)
+ 0,20	NPL, INM, BIPM (ancient manufacture)
— 0,20	ASMW (Narva lamps).

For the other laboratories, whose lamps are all of recent manufacture but the self-absorption of which could not be determined, the value 0,00 % was adopted.

II. — Organization of the measurements

In each of the three types of lamp, the same measurement plan was adopted :

— A « 1985 BIPM reference group » of six lamps of the same type as those submitted by the national laboratories was formed.

— Four series of measurements were carried out with the Osram lamps and the NPL/GEC lamps respectively, and six series with the flux standards. Each series comprised one or two lamps of each national laboratory, with the six lamps of the « 1985 BIPM reference group » regularly interspersed ; the places allocated to the lamps of any one national laboratory varied from one series to another to achieve the greatest possible symmetry in the measurements.

This procedure was only possible for lamps having the same socket. Now, certain standards were not in compliance with the specifications laid down by the CCPR in 1982 (for the NPL/GEC lamps the specifications were, perhaps, ambiguous). Therefore the mounting of the standards (NPL/GEC lamps of the INM and all NPRL lamps) was modified, by unsoldering the leads at the base ; as the power supplied to the lamp was monitored in terms of the current (i.e., not the voltage), it was thought that the risk was minimal.

— At the end of the first round of four (or six) series of measurements described above, a second round of four (or six) absolutely identical measurements was carried out.

— A series of measurements being conducted in « out and back » fashion, each national standard was therefore switched on four times, i.e. in total :

60 min approximately for an Osram lamp
72 min approximately for an NPL/GEC lamp
40 min approximately for a flux lamp.

— The value of the « 1985 BIPM reference group », which was operated four (Osram and NPL/GEC) or six (flux) times more often than the national standards, was checked at the beginning and at the end of the measurements by comparison with the « 1969 BIPM reference group ». The observed drifts were :

+ 0,02 % Osram group
+ 0,28 % NPL/GEC group
— 0,09 % flux group.

For the calibration of the national laboratories' lamps, one used, in each case, the mean value :

246,98 cd	Osram group
357,63 cd	NPL/GEC group
2485,3 lm	flux group.

It is recalled that the units employed at the BIPM are :

- for luminous intensity, *since 1961 :* that resulting from the mean of the national realizations obtained at the time of the 1961 international comparison ;
- for luminous flux, *since 1952 :* that resulting from the mean of the national realizations obtained at the time of the 1952 international comparison.

— Finally, when measuring a lamp, one carried out five readings (photometric and electric) at 1 min intervals, the third reading corresponding to the specified time of illumination. A photometric reading is the mean of thirty separate values acquired in 18 s, preceded and followed by a reading of the cell dark current (mean of 15 values obtained in 9 s).

III. — Measurement results

Tables I to XV* list the results of the photometric and electrical measurements made on the different groups of lamps sent to the BIPM.

Lines (1), (2) and (3) give, for each lamp, the ratio :

$$\frac{\text{BIPM value (cd or lm)}}{\text{value (cd or lm) of the laboratory of origin}}.$$

This ratio represents the magnitude of the national realizations of the candela or of the lumen, taking as reference the « units » maintained at the BIPM ; this reference has little interest in itself. However, this manner of presenting the results, by numbers close to unity, immediately allows us :

- to evaluate the evolution of any lamp from one series to another,
- to compare the behaviour of different lamps in the same group,
- and, for those laboratories which sent to the BIPM two groups of standards of luminous intensity, to check the agreement between the two groups.

---

* For the tables, see p. 36 and following

Lines (4), (5) and (6) concern the electrical characteristics of the lamps and give the ratio :

$$100 \left[\frac{\text{BIPM value (V)}}{\text{value (V) at the laboratory of origin}} - 1 \right];$$

line (4) corresponds to the photometric measurements of line (1) and line (5) to those of line (2).

This ratio, without being essential, allows one to detect possible anomalies in the use of the lamps.

Tables XVI and XVII present the global results obtained with the standards of luminous intensity and of luminous flux.

Column (7) indicates the deviation (%) of each photometric result from the mean. Each value in this column shows the size of the national realization of the candela or of the lumen in relation to the average realization. The ASMW has not confirmed its results and therefore is not included in the calculation of the mean (see also Fig. 1 and Fig. 2).

Column (8) shows, for the standards of luminous intensity and only for those laboratories which sent to the BIPM two groups of different standards, the divergence (%) between the Osram and the NPL/GEC groups.

Column (9) concerns derivation of the lumen from the candela ; it gives, for each laboratory, the ratio :

$$\frac{\text{value (Table XVII, column 2)}}{\text{value (Table XVI, column 4)}}.$$

IV. — Assessment of the BIPM uncertainties

It is necessary to take into account the special character of the measurements made at the BIPM : all of the lamps being compared are identical, including those which constitute the BIPM reference group ; in addition, the value assigned to this group may be considered as arbitrary. Consequently, any errors due to systematic effects in the photometric measurements are eliminated [except for the results of column (8)].

The list given below has been established for the sources of uncertainty (expressed in the form of 1 standard deviation) relevant to the measurement of a luminous-intensity lamp :

electrical power for the lamp	0,02 %
distance, lamp to detector	0,02
orientation of the lamp	0,02
detector response	0,01
lamp instability (repeatability)	0,05
root-mean-square	0,06

In the case of a flux lamp, the detector distance and the orientation disappear ; these sources of uncertainty are replaced by the uniformity of the sphere coating and the absorption due to the lamp, of equivalent values.

One standard deviation therefore amounts to :

- 0,025 % for the BIPM reference group of six lamps ;
- 0,067 % for a single measurement of a national lamp, based upon the reference group ;
- 0,047 % for the values of lines (1) and (2), with the exception of the mean values ;
- 0,033 % for the values of line (3), excepting the mean values ;
- 0,017 % for the mean values of line (3) [case of 4 lamps] ;
- 0,014 % for the mean values of line (3) [case of 6 lamps].

In the case of the standards of luminous intensity, comparison of lamps of different types introduces an additional uncertainty (standard deviation = 0,033 %) for the values of column (8) and of Table XVI : one standard deviation = 0,041 %.

Regarding column (7) of Tables XVI and XVII, one standard deviation is :

- 0,012 % for those laboratories which sent to the BIPM four Osram and four NPL/GEC luminous-intensity lamps ;
- 0,022 % for laboratories that sent six Osram or six NPL/GEC luminous-intensity lamps ;
- 0,014 % for laboratories that sent to the BIPM six luminous-flux lamps.

As was foreseen, these values are small in comparison with those estimated by the national laboratories and which take into account the realization of the units (Fig. 1 and Fig. 2 ; *see* also Appendix B).

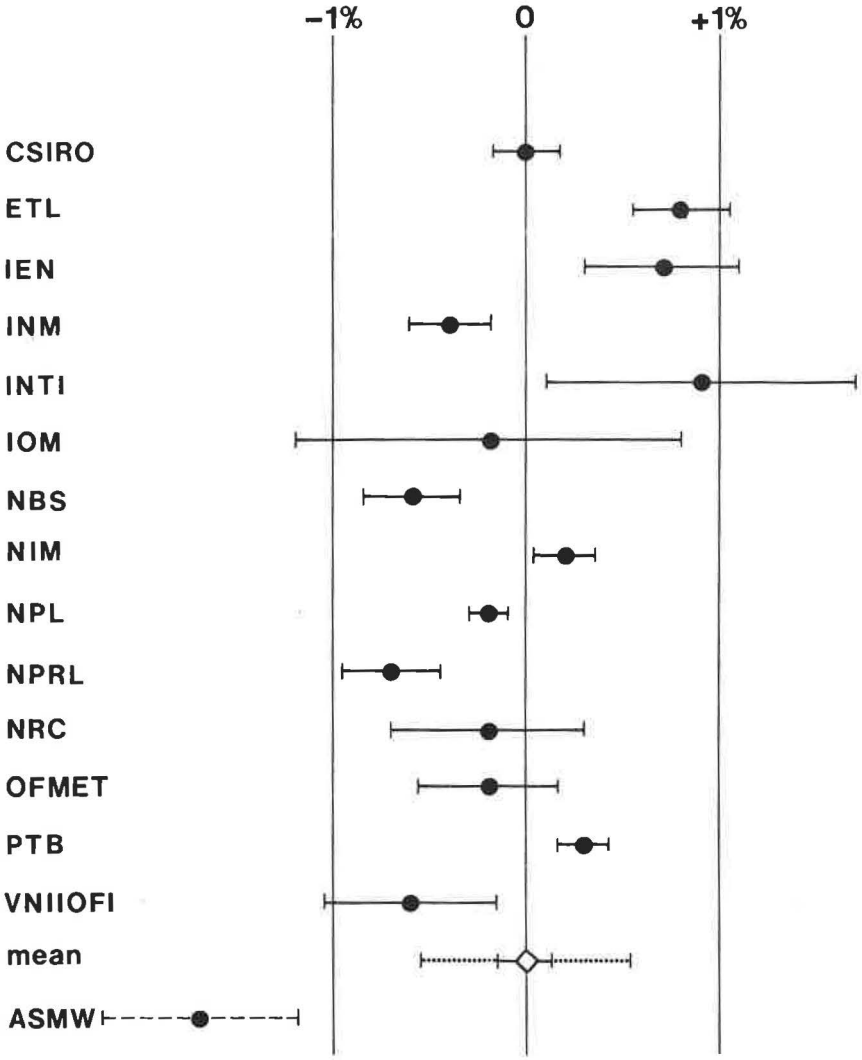

Fig. 1. — National realizations of the candela.

Position of each laboratory in relation to the mean of the 14 laboratories (except ASMW).

For each realization, the value of the standard deviation given by the laboratory is indicated and, for the mean, the values of the standard deviation calculated for a single determination and for the mean of the 14 determinations.

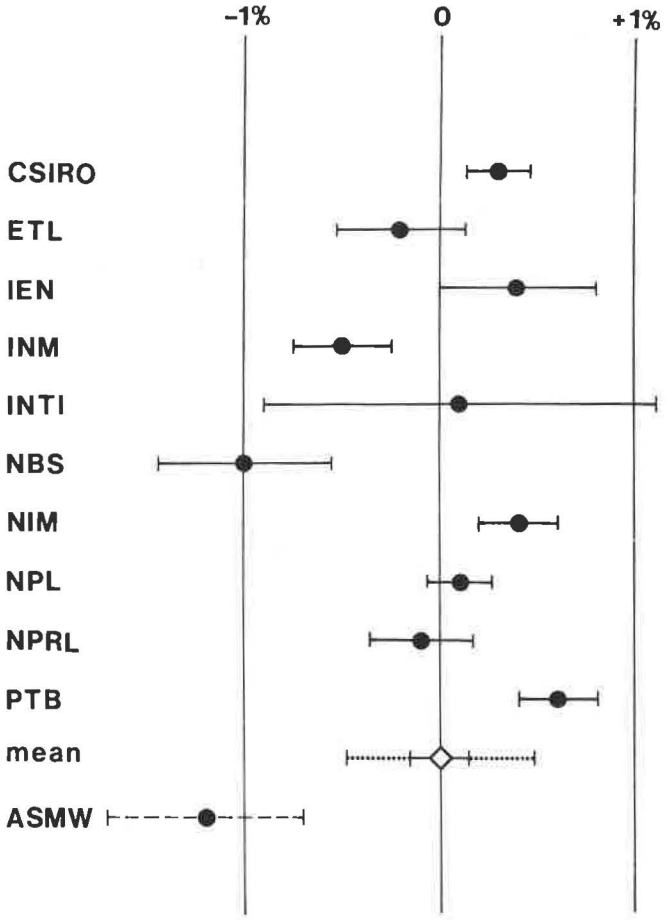

Fig. 2. — National realizations of the lumen.

Position of each laboratory in relation to the mean of 10 laboratories (except ASMW). For each realization, the value of the standard deviation given by the laboratory is indicated and, for the mean, the values of the standard deviation calculated for a single determination and for the mean of the 10 determinations.

V. — Conclusions

Examination of Tables XVI and XVII permits one to make the following observations (For the Tables refer to the French part on pages P 36) :

Standards of luminous intensity. — Column (8) shows that the laboratories which use the Osram and the NPL/GEC lamps separate into two groups with a significant discrepancy of 0,4 % between them : CSIRO, INM, NBS and NRC on the one hand, ETL, NIM, NPL and NPRL on the other (Fig. 3). This signifies that the ratio of luminous-intensity values for an Osram lamp and an NPL/GEC lamp is not assessed in the same way for all laboratories.

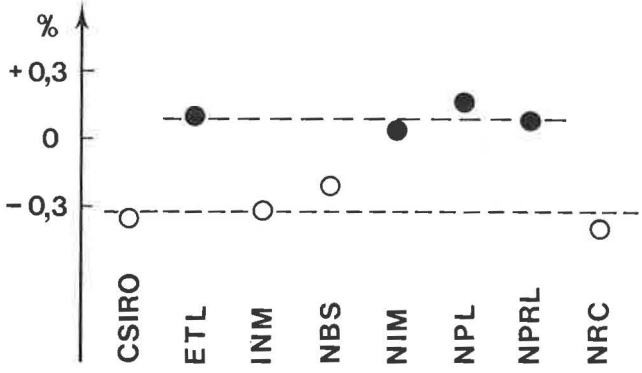

Fig. 3. — Standards of luminous intensity.

Estimation of systematic differences between luminous intensity measurements on Osram lamps and NPL/GEC lamps : the laboratories appear to form two distinct groups.

Neither the measurement conditions (lamp-detector distance, diameter of detector aperture, use of screens, etc.) in the national laboratories and at the BIPM, nor the manner of organizing the measurements at the BIPM, seem to be in question. This discrepancy is to be investigated further.

Derivation of lumen from candela. — Column (9) compares the results of the national laboratories in effecting the transition from candela to lumen. Each individual value is of no interest since it involves the reference units of the BIPM (candela and lumen) which are unrelated to each other ; in contrast, a comparison of the different values in column (9), one with another, is of interest.

It is seen that six laboratories are in good agreement : CSIRO, NIM, NPL, NPRL, PTB and ASMW, while the other five scatter (Fig. 4). This result is all the more surprising because problems linked with the realization of the candela and, in particular, with the use of a $V(\lambda)$ filter do not enter ; it is only a matter of a geometrical problem.

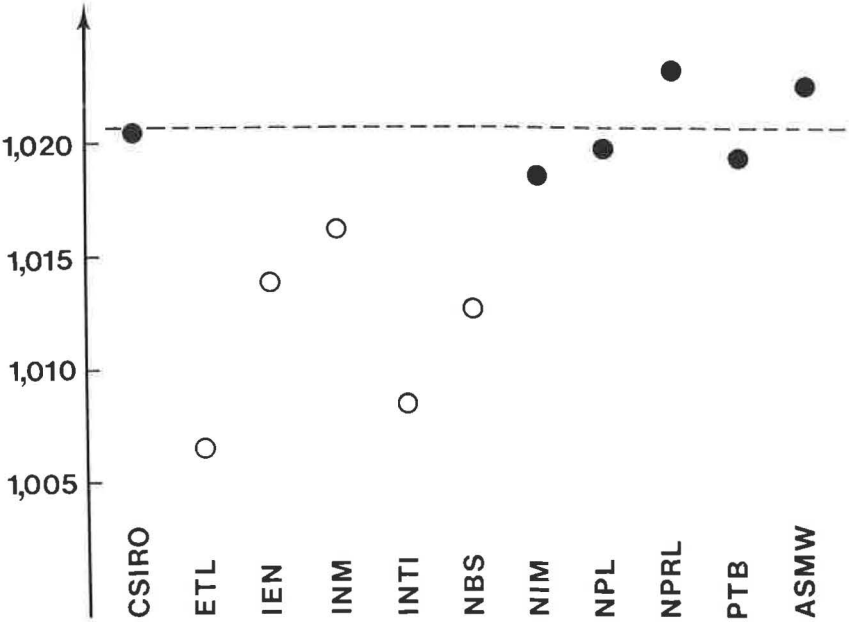

Fig. 4. — Derivation of the lumen from the candela.
Only the relative position of the laboratories is of interest : six are in good agreement.

National realizations of the candela and lumen. — At first glance, the scatter in the results for the candela and the lumen appear comparable to that which existed at the time of the 5th international comparison (1969). However, a statistical analysis of the results (Appendix A) indicates a degree of progress.

One still observes in 1985, as in 1969, a rather larger scatter for the candela than for the lumen. This unexpected result is perhaps not fortuitous and might be explained by compensation for certain errors (in the lamp-detector distance, for example) in the determination of the candela by repeating the errors when one passes from the candela to the lumen.

BIPM maintained units. — The units maintained at the BIPM — since 1961 for the candela and since 1952 for the lumen — correspond to the old definition of the candela and derive from international comparisons comprising a small number of laboratories (7 and 5 respectively).

On the other hand, the mean units which result from the present comparison are the effective expression of the new definition of the candela and have been obtained with twice the number of laboratories (14 and 10). Moreover, since the methods used by the national laboratories in their new realizations have differed more widely in technical detail, common systematic errors are less likely to have occurred. The new mean units have, therefore, every likelihood of being more accurate than those presently used at the BIPM, from which they differ by − 1,0 % and + 0,7 %.

June 16, 1986
revised March 11, 1987

APPENDIX A

A note on the results of sixth comparison of national standards of luminous intensity and flux (1985)

by W.R. BLEVIN

(Document CCPR/86-8 revised)

The attached Table 1 gives an elementary analysis of the spread of national realizations of the units of luminous intensity and flux according to the results of the fifth comparison (1969) and the sixth comparison (1985).

The 1969 values have been taken from Tables 9-11, pp. 117-119, in the Report of the CCP, 7th meeting, 1971 : these values have been taken from Column 3 or Column 5 according to which column represents the more recent national realization of the unit. Values referred to the mean result of earlier international comparisons have not been used.

The 1985 national values have been taken from Table XVI, Column 4 and Table XVII, Column 2 in the report.

The following conclusions may be drawn from this analysis.

(1) The spread of the 1985 national realizations of the candela at 2 800 K (new definition) is similar to the spread of the 1969 realizations at 2 045 K (old definition) and significantly smaller than the spread of the 1969 realizations at 2 859 K (old definition).

(2) Largely because of the greater number of participating laboratories in 1985, the standard deviation of the 1985 international mean candela at 2 800 K is smaller than that of the 1969 mean candela at 2 045 K or 2 859 K.

(3) The spread of the 1985 national lumens at 2 800 K and the standard deviation of the 1985 international mean lumen are smaller than the corresponding 1969 values at 2 793 K.

(4) The spread of the 1985 national lumens is a little smaller than the spread of the 1985 national candelas.

TABLE 1

Spread of national units of luminous intensity and luminous flux in 1969 and 1985 intercomparisons

	Luminous intensity					Luminous flux		
	2 045 K	2 859 K	2 800 K	2 800 K	2 800 K	2 793 K	2 800 K	2 800 K
	1969	1969	1985	1985	1985	1969	1985	1985
Number of national laboratories, n ...	8	7	15	14*	10**	8	11	10*
Mean 1985 unit (relative to unit conserved at BIPM)			98,89 %	99,01 %	99,12 %		100,59 %	100,70 %
Average deviation from mean unit, $\overline{\lvert x - \bar{x} \rvert}$	0,58 %	0,79 %	0,49 %	0,43 %	0,48 %	0,51 %	0,46 %	0,37 %
Standard deviation of national units, $\sigma(x)$	0,70 %	1,03 %	0,67 %	0,53 %	0,57 %	0,64 %	0,58 %	0,48 %
Standard deviation of international mean, $\sigma(\bar{x})$	0,25 %	0,39 %	0,17 %	0,14 %	0,18 %	0,23 %	0,18 %	0,15 %

$$\overline{\lvert x - \bar{x} \rvert} = \frac{\Sigma \lvert x - \bar{x} \rvert}{n}; \quad \sigma(x) = \sqrt{\frac{\Sigma (x - \bar{x})^2}{(n-1)}}; \quad \sigma(\bar{x}) = \sqrt{\frac{\Sigma (x - \bar{x})^2}{n(n-1)}}$$

* Provisional results of ASMW omitted.
** The same 10 laboratories as for luminous flux.

For those national laboratories participating in both the luminous flux and intensity intercomparisons of 1985, Table 2 lists the quotient of the lumen result (Table XVII, Column 2) by the candela result (Table XVI, Column 4). An elementary statistical analysis of the quotient values is also given. The international mean value for this quotient is about 1,6 % greater than the corresponding quotient value for the lumen and candela conserved at the BIPM.

TABLE 2

Quotient of each 1985 national lumen by each 1985 national candela

This quotient is expressed as a function of the 1952 mean lumen (as maintained by BIPM 1969 reference group of gas-filled lamps) and the 1961 mean candela (as maintained by BIPM 1969 reference group of gas-filled lamps).

Laboratory	Quotient (%)
ASMW	102,27
CSIRO	102,05
ETL	100,65
IEN	101,39
INM	101,62
INTI	100,84
NBS	101,26
NIM	101,86
NPL	101,98
NPRL	102,32
PTB	101,94

Number of national laboratories	11	10*
Mean quotient	101,65 %	101,59 %
Average deviation from mean quotient	0,46 %	0,44 %
Standard deviation of national quotients	0,56 %	0,55 %
Standard deviation of mean quotient	0,17 %	0,17 %

* Provisional results of ASMW omitted.

If it is assumed that the means of the national 1985 realizations correspond to the SI candela and lumen, it can be concluded from Table 1 that the BIPM candela is about 1,0 % greater than the SI candela, and that the BIPM lumen is about 0,6-0,7 % smaller than the SI lumen.

Appendix B

Information supplied by the national laboratories on the realization of units and the balance-sheet of uncertainties *

Amt für Standardisierung, Messwesen und Warenprüfung

1. *Luminous intensity ; realization of the candela*

1.1. At present the legal basis of the realization of the candela rests upon the definition of 1948 and the international comparison of 1969.

— The measurements were performed on a photometric bench by transfer of the unit of luminous intensity from the national set of standard lamps to the lamps being circulated, by means of a photodetector.

— Type of detector : Osram silicon cell, closely conforming to $V(\lambda)$, diameter 60 mm.

1.2. Measurements were also performed by means of an electrically self-calibrated detector of a conical type, which is combined with a $V(\lambda)$ filter, with the aim of determining the luminous intensity of the circulated lamps on the basis of the new definition of the candela. The filter used consisted of three laminae of optical-quality glass. The mounting and the measurement of the transmission of the filter are very difficult problems.

A method of substitution was applied, which means that the luminous intensity of high-power sources (1 000 W) was first determined directly by means of the electrically calibrated detector then, in a second step, transferred on the photometric bench to the standard lamps, using the $V(\lambda)$ detector already described above. On the basis of $K_m = 683$ lm/W, preliminary results for the luminous intensity of the lamps were obtained, being on an average systematically 3 % higher than the results obtained following the earlier definition, and having an accuracy of 0,5 %.

* For the sake of uniformity in the presentation of uncertainties, the BIPM estimated all the values at 1 standard deviation.

2. *Luminous flux*

These measurements were performed goniophotometrically with the detector, an Osram silicon cell of 60 mm diameter, with response closely conforming to $V(\lambda)$, placed at a distance of 2,2 m from the centre of a lamp. The detector was moved in 15° steps around the lamp in a plane containing its longitudinal axis, to yield one set of data. The lamp was then rotated by 15° around its longitudinal axis and a second set of measurements made, and so on until a complete spherical distribution of luminous intensity had been obtained. From this, one calculated the luminous flux.

The national set of standard lamps for luminous intensity was used for calibration of the goniophotometer.

The maximum deviation from the average value of the luminous flux was 0,4 %.

CSIRO — Division of Applied Physics

1. *Luminous intensity*

The luminous-intensity scale was realized as a radiometric power measurement using an electrical-substitution radiometer and a $V(\lambda)$-corrected filter.

The uncertainty in each quoted value of luminous intensity comprises the following components :

Estimated uncertainties (%)
(1 standard deviation)

Measurement of the radiometric power	0,1
Filter transmittance	0,1
Distance measurement	0,01
Lamp-current measurement	0,02
Setting of the distribution temperature to 2 800 K	0,02
Lamp drift	0,1
Precision of each measurement (including variation due to the lamp orientation)	0,04
Square-root of sum of squares	0,18

2. *Luminous flux*

A lamp calibrated for luminous intensity at a distance of 1 m was used to transfer the luminous-intensity scale to a $V(\lambda)$-corrected silicon photocell in a goniophotometer with a 1 m working distance. The unit of luminous flux was realized by spatial integration over all solid angles.

The uncertainty in each quoted value of luminous flux comprises the following components :

	Estimated uncertainties (%) (1 standard deviation)
Accuracy of the luminous-intensity scale	0,15
Transfer of the luminous-intensity scale	0,03
Procedure of luminous-flux integration	0,02
Uncertainty due to errors in distance	0,03
Precision of each flux measurement	0,03
Drift in the lamp output	0,03
Setting of the distribution temperature to 2 800 K	0,01
Lamp-current measurement	0,02
Square-root of sum of squares	0,17

Electrotechnical Laboratory

1. *Realization of the candela*

In the early 70s, the ETL carried out measurements to determine the maximum spectral luminous efficacy of radiation. The resultant value of K_m was 683 lm/W with an uncertainty of 0,3 %([1]). Although the work preceded the redefinition of the candela in 1979, we regard it as a realization of the candela which is consistent with the new definition.

From the viewpoint of a realization of the candela, one can redescribe the experiment as follows :

(1) A thermopile was calibrated on the absolute radiometric scale by means of absolute radiometers. In this procedure, radiation from a lamp operated at a distribution temperature of about 2 700 K and filtered by a water cell was used.

(2) The thermopile equipped with a $V(\lambda)$ filter received radiation from a lamp operated at a distribution temperature of 2 853 K. The luminous intensity of the lamp was evaluated from the response of the thermopile, the spectral transmittance of the $V(\lambda)$ filter, the spectral luminous efficiency, $V(\lambda)$, of the standard photometric observer and the maximum spectral luminous efficacy of radiation, K_m.

(1) H. Katsuyama and H. Kikuchi. *Metrologia*, **11**, 1975, pp. 165-168.

2. *Calibration of the luminous-intensity standard lamps*

The calibration was carried out by direct comparison with two of the three secondary standard lamps.

Estimated uncertainties (%)
(1 standard deviation)

	NPL/GEC lamps	Osram lamps
Realization of the candela		
Absolute radiometer	0,16	0,16
Thermopile	0,13	0,13
$V(\lambda)$ filter	0,08	0,08
Reproducibility of the ETL standard lamps	0,06	0,06
Calibration of the lamps for the comparison		
Difference of distribution temperature	0,01	0,01
Reproducibility of the measurement	0,09	0,05
Square-root of sum of squares	0,25	0,24

3. *Realization of the lumen*

In the early 80s the ETL constructed a goniophotometer and with it the lumen was derived from the candela obtained following the new definition ([2]), by means of lamps having the distribution temperature of 2 788 K.

4. *Calibration of the luminous-flux standard lamps*

Two ETL standard lamps were used as reference and the lumen was transferred to the six lamps sent to the BIPM by comparison measurements in an integrating sphere of 1,5 m inner diameter.

Estimated uncertainties (%)
(1 standard deviation)

Realization of the candela	0,23
Derivation of the candela at 2 788 K	0,02
Derivation of the lumen from the candela	
Magnetic field of the Earth and surroundings	0,06
Method of numerical integration	0,05
Linearity of the detector	0,03
Reproducibility of the measurement	0,20
Calibration of the lamps for the comparison	
Difference of absorption	0,02
Reproducibility of the measurement	0,05
Square-root of sum of squares	0,33

(2) H. Katsuyama and H. Kikuchi, *Bull. Electrotechnical Laboratory* **47**, 1983, p. 1119 (in Japanese).

Istituto Elettrotecnico Nazionale

1. *Standards of luminous intensity (Osram Wi 41 G)*

The luminous intensity of lamps has been measured with a silicon photopile, calibrated using an absolute radiometer [1], equipped with a $V(\lambda)$ filter. The photopile was also corrected in terms of $V(\lambda)$. The distance from lamp to detector was about 2,7 m, the diameter of the detector was 3 cm.

Estimated uncertainties (%)
(1 standard deviation)

Absolute radiometer	
non-equivalence of radiant flux and electric power (after correction)	0,25
measurement of electric power	0,04
area of aperture	0,02
$V(\lambda)$ filter	
measurement of transmission coefficient	0,25
approximation of the filter's transmission to $V(\lambda)$ (after correction)	0,01
Photometer	
measurement of photoelectric current	0,02
temperature coefficients of electronic components	0,01
positioning of detector in plane of radiometer opening	0,04
Lamp	
instability of the supply ($0{,}1 . 10^{-3}$)	0,07
measurement of electric current ($0{,}2 . 10^{-3}$)	0,14
Separation of lamp and detector ($0{,}4 . 10^{-3}$)	0,08
Square-root of sum of squares	0,4

2. *Standards of luminous flux (GEC 200 W)*

The luminous flux of lamps has been defined with the aid of a goniophotometer, by integration of the illuminance measured over a spherical surface (5,6 m in diameter). The illuminance was read on each degree of latitude along meridians separated by 5°. The receiver was a silicon photopile (3 cm in diameter), $V(\lambda)$-corrected, calibrated with respect to an absolute radiometer.

---

(1) F. Hengstberger : CSIR Research Report 331 (CSIR, Pretoria, 1977).

Estimated uncertainties (%)
(1 standard deviation)

Goniophotometer	
radius of the sphere ($0{,}15 . 10^{-3}$)	0,03
loss of light due to lamp support (after correction)	0,01
stray light (after correction)	0,03
Photometer (calibrated by comparison with the absolute radiometer); first 3 points of the preceding Table	0,36
Lamp	
instability of the supply ($0{,}1 . 10^{-3}$)	0,07
measurement of electric current ($0{,}2 . 10^{-3}$)	0,14
Square-root of sum of squares	0,4

Institut National de Métrologie

1. *Realization of the candela*

The unit of luminous intensity has been realized using two electrical-substitution radiometers associated with two $V(\lambda)$ filters of different type. A group of 9 lamps was calibrated with these apparatuses, the optical distance between lamp-filament and detector-surface being of the order of 50 cm. The diameter of the detector was 8 mm.

These 9 lamps were next compared, using a photoelectric photometer fitted with a silicon detector (60 mm diameter) $V(\lambda)$-corrected by a mosaic, at a distance of 3 m, with a group of 6 Osram lamps that had participated in the 1969 international comparison in order to determine the difference between the new realization of the candela and the earlier maintained value.

The luminous intensity of the Osram and GEC lamps sent to the BIPM for the 1985 comparison was determined by comparison by means of the same photometer as above with the above-mentioned group of 6 Osram lamps, both for the « before » and « after » measurements.

Estimated uncertainties (%)
(1 standard deviation)

Measurement of illuminance	
measurement of power	0,05
reflection coefficient	0,10
thermal conduction	0,07
uniformity of response	0,05
heating of the diaphragm	0,01
modulator	0,01
heating of the wires	0,01
preamplifier	0,01
diameter of the diaphragm	0,02
Measurement of distance	0,04
Orientation of the lamp	0,02
$V(\lambda)$ curve	0,02
Repeatability of the measurements	0,14
Square-root of sum of squares	0,21

2. *Realization of the lumen*

Starting from the unit of luminous intensity realized earlier, determination of the lumen was made with the aid of a goniophotometer equipped with a 60 mm diameter silicon detector, $V(\lambda)$-corrected by a mosaic and thermostated. The source-detector distance was 3,5 m.

The luminous-flux-standard GEC lamps sent to the BIPM were measured directly at the goniophotometer for both the « before » and « after » measurements. The detector was calibrated with the help of 3 GEC luminous-intensity-standard lamps, calibrated directly by means of the absolute radiometer.

Estimated uncertainties (%)
(1 standard deviation)

Realization of the candela	0,21
Calibration of the detector	0,10
Angular positioning	0,01
Repeatability of the measurements	0,05
Square-root of sum of squares	0,24

Instituto Nacional de Tecnología Industrial

1. *Luminous intensity*

The measurement of luminous intensity was carried out with an absolute radiometer of the bolometric type. The measurement of optical power was achieved by comparing the temperature rise produced by the absorption of radiant power with the one produced by dissipating an amount of electrical power. Both manually and automatically controlled measurements were made. In the second case the preheating technique was used : once the shutter was opened the electrical power level was reduced until the same output signal was obtained as in the shutter-closed position.

The sensitive area of the detector was defined by a circular aperture of 11,28 mm diameter, resulting in an area of 1 cm^2.

The spectral sensitivity of the detector surface was corrected to conform to the $V(\lambda)$ curve by using a 4-layer filter with a transmittance value $\tau(\lambda = 555\ \text{nm}) = 0{,}658$; the correction factor α of the detector was :

$$\alpha = \tau(555) \frac{\int V(\lambda)\, E(\lambda)\, d\lambda}{\int \tau(\lambda)\, E(\lambda)\, d\lambda} = 1{,}0074,$$

$E(\lambda)$ being the relative spectral energy distribution of a blackbody radiator operating at 2 854 K.

The total uncertainty in the measurement of luminous intensity is estimated to be less than 0,8 % (1 standard deviation).

2. *Luminous flux*

For the measurement of luminous flux a spiral goniophotometer was used. In this kind of instrument the luminous source turns around a vertical axis while the detector turns around a horizontal axis through the source. The combination of both movements gives an effect equivalent to that of a spherical helix described by the detector around the source. For the measurements performed, the pitch of this spherical helix was 5 degrees. The analogic signal coming from the detector is converted to pulses which are added by a pulse counter. A second counter adds the pulses coming from a clock. After calibrating this system with the

help of a very stable current supply it is possible to measure the mean value of illuminance for each interval of 0,1 degree of movement of the detector, and the total flux is calculated as :

$$\varphi = \frac{2\pi^2}{1\,800} R^2 \sum_{1}^{1\,800} \bar{E}_i \sin \theta_i,$$

where R is the lamp-to-detector distance (2 m) and $\bar{E}_i$ is the mean value of illuminance for the angle θ_i. The measurement is made as the detector proceeds first upwards then downwards, and lasts 24 minutes.

The detector is a 30 mm diameter, thermostated, partial filtering Si photocell, calibrated using luminous intensity standards.

The total uncertainty in the measurement of luminous flux is estimated to be less than 1,0 % (1 standard deviation).

Instituto de Optica

1. *Realization of the candela*

At the Instituto de Optica, the candela has been realized, starting from their Absolute Spectroradiometric Scale. This scale was obtained using an electrically calibrated pyroelectric radiometer (ECPR) (*see* Absolute spectroradiometric and photometric scales based on an electrically calibrated pyroelectric radiometer, *Applied Optics*, **7**, 1981, pp. 1174-1177).

2. *Estimation of the uncertainties*

The estimated uncertainty of the Instituto de Optica Absolute Spectroradiometric Scale is 1,5 %. The calculated value of the luminous intensity for the standard lamps has the same level of uncertainty.

The precision of measurements includes the repeatability of the output of the lamp including realignment and the repeatability of the detector output. The total contribution of these instabilities to the uncertainty of the luminous-intensity measurement is 0,5 %.

The value to be used for the international comparison is 1 % (1 standard deviation).

National Bureau of Standards

1. *Luminous intensity*

The NBS scale of luminous intensity is based on the NBS scale of spectral irradiance. Realization of the latter starts with a gold-point blackbody and a realization of the International Practical Temperature Scale (IPTS-68). This temperature scale is used to measure the temperature of a variable-temperature blackbody, which provides the NBS scale of spectral radiance. This spectral-radiance scale is the basis for the NBS scale of spectral irradiance.

The NBS scale of spectral irradiance is maintained in a group of four, 1 000 W, quartz-halogen-lamp working standards. The NBS prime working group for luminous intensity was calibrated spectrally against the four working standards of spectral irradiance. The resulting data were converted to photometric values using a K_m value of 683 lumens/watt.

The lamps submitted to the BIPM were compared directly with the NBS prime working group for luminous intensity on a photometric bench using a photopically corrected detector. Source-to-receiver distances of 2,0 m (Osram lamps), 2,5 m (GEC lamps), and 3,25 m (NBS working standards) were used. These distances produced an approximate equality of illuminances at the detector. Check measurements at other distances were performed to verify the applicability of the inverse-square law. The GEC lamps were baffled to insure that only light coming directly from the filament through the window reached the detector.

Estimated uncertainties (%)
(1 standard deviation)

NBS spectral radiance scale	0,22
Radiance to irradiance transfer	0,06
Calibration of luminous-intensity lamps	0,08
Calibration of lamps sent to the BIPM	0,07
Square-root of sum of squares	0,25

2. *Luminous flux*

The NBS scale of luminous flux is also based on the NBS scale of spectral irradiance. Relative spectral distribution measurements were performed on a group of 300 W, opal-bulbed lamps with a filter spectroradiometer at a distance of 1,5 m. These spectral distribution

measurements, $V(\lambda)$-weighted, determined the ratio of the total flux to the flux in a reference direction. The spectral irradiance produced by the luminous-flux reference group in the reference direction was determined by a direct comparison with the four lamps that represent the NBS scale of spectral irradiance. A photopic weighting of the spectral data using a K_m value of 683 lumens/watt established the NBS scale of luminous flux.

The NBS scale of luminous flux was transferred to the lamps submitted to the BIPM by direct comparison with the NBS reference group in a 2 m photometric integrating sphere. The sphere is coated with pure $BaSO_4$ and corrections were made for the differentes self-absorption of the two lamp types. Because of the similarity of the two lamp types, no corrections were made for spectral differences or detector non-linearity.

Estimated uncertainties (%)
(1 standard deviation)

Spectral irradiance calibration of luminous-flux lamps	0,23
Distribution measurements	0,10
Geometric differences in the flux distributions	0,33
Sphere transfer to the submitted lamps	0,07
Square-root of sum of squares	0,43

National Institute of Metrology

1. *Luminous intensity*

NIM established its new photometric primary standard according to the new definition of the candela in 1982. The realization of the candela is based on a group of seven electrically calibrated radiometers with conical cavity. The irradiance deviation for any one radiometer is less than 0,1 % from the mean. Three sets of high-quality $V(\lambda)$ filters were constructed using coloured optical glasses and their spectral transmittances were measured by a double monochromator. High-stability BDQ8 and BDQ7 gas-filled tungsten-filament lamps were specially developed as secondary standards for luminous intensity. In 1983 NIM again realized the candela by radiometers and found the mean variation of luminous intensity of the secondary standards lamps to be within 0,05 %.

Eight 2 825 K luminous-intensity lamps (two Osram lamps, four NPL/GEC lamps and two BDQ7 lamps) selected for international comparison were calibrated against nine 2 856 K secondary standard lamps using a photometer consisting of a silicon photo-element fitted with a $V(\lambda)$ filter, the diameter of the receiving surface being 10 mm.

Estimated uncertainties (%)
(1 standard deviation)

Realization of the candela	0,12
Measurement of the distance between lamp and detector	0,03
Measurement of the illuminance	0,04
$V(\lambda)$ filter	0,03
Orientation of the lamp	0,04
Measurement of the current	0,03
Stray light	0,04
Repeatability of the measurement	0,05
Square-root of sum of squares	0,16

2. *Derivation of the lumen from the candela*

Four 2 788 K luminous-intensity standard lamps were calibrated by the 2 856 K secondary standard of luminous intensity. The 2 788 K luminous-intensity standards were used to calibrate the photometer on the goniophotometer. The light distribution of the luminous-flux lamps was measured by a goniophotometer, and the total luminous flux was calculated automatically. The detector used in the goniophotometer is a silicon photodiode. The distance between test lamp and detector was about 1,9 m. The measurement was 50 Russel angles mode. After the detector rotates once in a vertical circle around a test lamp, the test lamp self-turns 10° around a vertical axis and then the measurement is repeated.

Estimated uncertainties (%)
(1 standard deviation)

Average unit of six luminous-flux lamps (repeatability of the measurements by the goniophometer)	0,07
Candela reproduced with four luminous-intensity standard lamps	0,17
Measurement of the distance between the standard lamp and the detector	0,02
Measurement of the radius of rotation	0,02
Non-linearity of the photometer	0,02
Imperfection of the $V(\lambda)$ correction	0,03
Mounting the test lamp	0,03
Asymmetry of optical paths	0,03
Stray light	0,02
Setting the current	0,04
Method error	0,04
Square-root of sum of squares	0,20

National Physical Laboratory

1. *Realization of the candela*

1. The realization was based on the use of two silicon photodiode photometers with four-element glass $V(\lambda)$-correction filters, which were calibrated for absolute responsivity against the NPL cryogenic radiometer and for relative responsivity against the NPL spectral responsivity scale.

2. The photometers were used with apertures of 10, 12 and 14 mm diameter to measure the illuminances at about 2,4 m distance of the two groups of tungsten-filament lamps which were submitted to the BIPM. In calculating luminous-intensity values, corrections were applied for the shortening effect of the lamp window, for scatter and diffraction effects and for departure of the photometer spectral responsivities from $V(\lambda)$.

3. The lamps were also calibrated against the NPL « as maintained » luminous-intensity scale.

4. Contributions to the uncertainty of the « scientific » luminous intensity values of the lamps submitted to BIPM arise from :

	Estimated uncertainties (%) (1 standard deviation)
Photometer absolute responsivity	0,06
Photometer relative spectral responsivity	0,05
Solid-angle measurement	0,03
Lamp reproducibility, current setting, etc.	0,04
Square-root of sum of squares	0,10

5. The realization is reported in full in « A radiometric realization of the candela », by Teresa M. Goodman and P. J. Key, NPL Report QU 75, February 1986.

2. *Realization of the lumen*

1. The luminous-flux scale was realized from the intensity scale using a goniophotometer in 1968 and again in 1980, with a negligible difference in the results, and is held by 500 W gas-filled flux-standard lamps.

2. The goniophotometer was calibrated using luminous-intensity standards with values based on the NPL « as maintained » luminous-intensity scale (the new realization had not been performed at that

time). The values assigned to the flux lamps were subsequently corrected for the difference between the « as maintained » and « scientific » luminous-intensity scales.

3. The relation between the flux and intensity scales established using the goniophotometer differed from that previously determined and disseminated by NPL but the change was not incorporated in the disseminated scale. Thus the difference between the « as maintained » and the « scientific » values is not the same for the flux as for the intensity scale.

4. The 200 W luminous-flux-standard lamps submitted to the BIPM were calibrated against the 500 W reference flux-standard lamps in a 4,6 m diameter integrating sphere. The sphere was painted with barium sulphate paint of reflectance ~ 82 % and was fitted with a photoemissive type photocell with a glass $V(\lambda)$-correction filter and diffusing window. The measurements were corrected for differences in spatial distribution and absorption between the two types of lamp.

5. Contributions to the uncertainty of the « scientific » luminous-flux values of the lamps submitted to the BIPM arise from :

	Estimated uncertainties (%) (1 standard deviation)
Uncertainty of candela realization	0,10
Goniophotometer transfer from candela to lumen	0,10
Comparison of transfer and reference standards	0,08
Square-root of sum of squares	0,16

6. The goniophotometer realization is reported in « A new determination of the lumen », by O. C. Jones and R. G. Berry, *Metrologia*, **6**, 1970, pp. 81-89.

National Physical Research Laboratory

The luminous-intensity standards were measured through a $V(\lambda)$ filter by means of an absolute radiometer. The area of the radiometer aperture was 1 cm^2. Corrections were applied for instrumental imperfections, the deviation of the filter transmittance from the $V(\lambda)$ curve and the effect of shortening the distance between detector and source by the $V(\lambda)$ filter.

The luminous flux standards were measured on a goniophotometer by spatially integrating the illuminance distribution around the lamps. The photometer head of the goniophotometer was calibrated for illuminance by means of luminous-intensity standards measured with the absolute radiometer.

1. *Luminous intensity*

	Estimated uncertainties (%) (1 standard deviation)
Aperture area of absolute radiometer	0,02
Lead-heating effect	0,002
Case-heating effect	0,05
Substitution non-equivalence	0,1
Reflection factor	0,05
Electrical-power measurement	0,01
Diffraction	0,03
Stray light	0,02
Standard deviation of mean of absolute radiometer readings for power level produced by lamps	0,2
Lamp/radiometer distance	0,02
Lamp orientation	0,02
Lamp-current setting	0,03
Filter-transmittance correction	0,1
Filter-pathlength correction	0,01
Sum of individual uncertainties	0,66
Square-root of sum of squares	0,26

2. *Luminous flux*

	Estimated uncertainties (%) (1 standard deviation)
Luminous-intensity standard	
square-root of sum of squares of individual uncertainties	0,26
sum of individual uncertainties	(0,66)
Distance of photometer from luminous-intensity standard	0,0033
Lamp orientation	0,033
Colour-temperature difference between flux standard and intensity standard	0,005
Stray light	0,016
Shielding by lamp holder	0,02
Finite size of step-angle	0,033
Shaft speed of goniophotometer	0,033
Numerical manipulation of data	0,02
Linearity of photometer	0,05
Fatigue of photometer	0,02
Temperature coefficient of photometer	0,01
Sum of individual uncertainties	0,90
Square-root of sum of squares	0,27

National Research Council

The luminous-intensity lamps were calibrated using two methods, both of which were based on the use of absolute radiometers.

1. *Direct method*

The output of the lamp was measured using electrically calibrated absolute radiometers and $V(\lambda)$ filters. The radiometer was placed in a hermetically sealed enclosure, approximately 15 cm behind the window, which was the $V(\lambda)$ filter. The distance between the lamp and the radiometer was set at 1 m; the use of a relatively short distance was required in order to have an adequate signal-to-noise ratio. The magnitude of the signal was about 6 μW for the Osram lamps and about 10 μW for the NPL/GEC lamps. The $V(\lambda)$ filter was of the type described by W. J. Brown (*Metrologia*, **11**, 1975, pp. 111-115, combination # 1).

There was no baffling used between the lamp and the $V(\lambda)$ filter for this method. As a result, we did not use the results of this method for the NPL/GEC lamps which were later found to scatter light excessively from parts of the lamp envelope into the detector.

We used three different absolute radiometers and two separate $V(\lambda)$ filters, giving us a total of six separate measurements for each lamp.

2. *Indirect method*

Three secondary radiometers, each incorporating a silicon diode and a diffuser, were calibrated spectrally using absolute radiometers. These secondary radiometers were used in conjunction with $V(\lambda)$-correcting filters to measure the lamps. The lamps were placed 1 m from the aperture.

The three secondary radiometers had different types of diffusers; each unit had its own uniquely designed $V(\lambda)$-correcting filter. Since two sets of measurements were taken for each lamp using three different detectors, we obtained six separate values for each lamp. There were two baffles placed between the lamp and the detector for this method.

Estimated uncertainties (%)
(1 standard deviation)

Indirect method

Secondary-radiometer calibration	0,25
Filter transmittance	0,20
Measurement repeatability	0,15
Imperfect matching of photometer to $V(\lambda)$ curve	0,15
Electrical effects	0,10
Square-root of sum of squares	0,4

Direct method

Measurement of total irradiance by absolute radiometer	0,15
Filter transmittance	0,20
Measurement repeatability	0,50
Imperfect matching of photometer to $V(\lambda)$ curve	0,15
Electrical effects	0,05
Square-root of sum of squares	0,6
General uncertainty for the two methods	0,5

Office Fédéral de Métrologie

1. *Candela realization based on PMO radiometer* *

The first realization of the candela in the OFMET was performed by an absolute radiometric calibration of a commercially available illuminance meter. The primary standard used in the calibration is an electrically calibrated absolute radiometer constructed for precise solar irradiance measurement. The calibration has to be performed in two steps. In a first step, a silicon photocell was calibrated against the PMO radiometer with a current-stabilized dye laser as radiation source. In a second step, the illuminance meter was absolutely calibrated against the silicon cell equipped with a calibrated aperture. To avoid interference effects on the $V(\lambda)$ filter from the coherent laser beam, the two detectors were illuminated with spatially incoherent radiation by diffusing the laser beam with help of a quartz diffuser acting as secondary point source.

* Physikalisch-Meteorologisches Observatorium (Davos)

For the intercomparison, the Osram standard lamps were calibrated against the calibrated illuminance meter.

Estimated uncertainties (%)
(1 standard deviation)

PMO radiometer	
non-equivalence	0,25
lead heating	0,006
cavity loss	0,01
electrical calibration	0,1
Silicon cell calibration	
measurement	0,05
wavelength uncertainty	0,036
reflection on quartz	0,25
Illuminance meter calibration	
measurement	0,46
aperture area	0,02
equal distance	0,16
wavelength uncertainty	0,036
relative responsivity	0,15
Lamp calibration	
distance	0,02
measurement	0,01
reproducibility of lamp luminous intensity	0,15
Square-root of sum of squares	0,65

2. *Candela realization based on silicon cell with calculable quantum efficiency*

After the 11th meeting of the CCPR (1986), a second realization was performed in the OFMET as a test of the first realization. A commercially available silicon absolute radiometer (QED-100) was equipped with a calibrated aperture and a filter with a spectral transmission approximating the function $V(\lambda)$. The absolute spectral responsivity was obtained from the quantum efficiency.

The Osram standard lamps were calibrated directly with the absolute illuminance meter.

Estimated uncertainties (%)
(1 standard deviation)

Uncertainty of QED-100 specified by UDT *	0,20
Integrated filter transmittance	0,16
Wavelength uncertainty of filter measurement	0,21
Reproducibility of luminous intensity of lamp	0,15
Aperture area	0,02
Photocurrent measurement	0,01
Distance of lamp to detector	0,02
Measurement	0,01
Square-root of sum of squares	0,365

3. *Values of cd(OFMET)*

The provisional relative value for the cd(OFMET) compared with the cd(BIPM) was :

$$\frac{\text{cd(OFMET)}}{\text{cd(BIPM)}} = 1{,}0033.$$

This value resulted from the first realization with the PMO radiometer. Because of the recently performed measurement of the non-equivalence correction of the radiometer and a new evaluation of the correction factor of the relative spectral responsivity of the illuminance meter this value must be corrected to :

$$\frac{\text{cd(OFMET, PMO)}}{\text{cd(BIPM)}} = 1{,}0008.$$

The second realization with QED-100 gives significantly different values for the luminous intensity of the Osram standard lamps participating in the intercomparison. From this measurement the evaluated relative value is :

$$\frac{\text{cd(OFMET, QED)}}{\text{cd(BIPM)}} = 0{,}9881.$$

This relative value must be considered as the best representation of the cd(OFMET).

* United Detector Company

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

The measurements are based on a new realization of the candela carried out in November 1985 and in March 1986.

« Realization » means that three $V(\lambda)$-corrected detectors were calibrated with respect to their spectral response as « transfer standards ». After that the « candela » has been materialized by calculating the luminous intensity of the six standard lamps according to the formula :

$$I = r^2 . i_{ph} . \frac{K_m}{s_0} . k(T_V),$$

where

r = distance between filament and detector,

i_{ph} = photocurrent,

K_m = 683 lm/W,

s_0 = spectral response at the wavelength λ_0 = 546 nm,

$k(T_V)$ = $\int_0^\infty V(\lambda)S(\lambda,T_V)\ d\lambda \Big/ \int_0^\infty s_{rel}(\lambda)S(\lambda,T_V)\ d\lambda$,

T_V = distribution temperature of the light of the incandescent lamp under test,

$S(\lambda,T_V)$ = relative spectral power distribution (Planckian law),

$s_{rel}(\lambda)$ = relative spectral response of the detector, $s_{rel}(\lambda_0) = 1$.

Estimated uncertainties (%)
(1 standard deviation)

Electrical quantities of the lamp	0,01
Photometric quantities	
distance	0,01
photocurrent	0,01
spectral response (absolute)	0,13
relative spectral response	0,03
Square-root of sum of squares	
luminous intensity	0,13
luminous flux (0,07 % for the goniophotometric method)	0,20

All-Union Research Institute for Optical and Physical Measurements

Conforming to the new definition of the luminous intensity unit, the candela is realized by means of a primary photometer, comprising a non-selective cavity radiometer and a liquid filter. The spectral transmission factor of the filter is close to the spectral luminous efficiency function $V(\lambda)$. The radiometer conversion ratio is determined by radiation from a special high-temperature blackbody which is located along with the radiometer in a vacuum chamber.

The spectral transmission factors of the liquid filter and of the vacuum chamber window of the primary photometer are measured in a special spectral photometer channel.

The value of the luminous-intensity unit is transferred from a primary photometer to a photometer-comparator with the help of a comparison lamp. The photometer-comparator is built up from a number of silicon photodiodes, the spectral sensitivity of which has been individually corrected through the utilization of the liquid filters.

The luminous-intensity lamps of the NPL/GEC type were calibrated by a photometer-comparator.

Estimated uncertainties (%)
(1 standard deviation)

1. *Realization of the candela*

Primary photometer signal	0,05
Distance measurement from blackbody to primary photometer	0,1
Filter transmittance at 555 nm	0,1
Spectral irradiance of the blackbody	0,35
Effective emissivity of the blackbody	0,03
Aperture area of the blackbody	0,03
Diffraction losses	0,03
Instability of calibration factor of the primary photometer	0,01
Square-root of sum of squares	0,4

2. *Calibration of the lamps*

Primary photometer	0,4
Distance measurement	0,03
Filter correction photometer-comparator $V(\lambda)$	0,01
Instability of the photometer-comparator calibration factor	0,02
Instability of the photometer-comparator reaction on the lamps, illuminance in four calibration series (ten measurements in each) *	(for some lamps 0,5)
Square-root of sum of squares	0,45

* Instability of lamps is considerable.

APPENDIX P 3

A comparison of spectral radiance scales between the National Physical Laboratory [NPL] (United Kingdom) and the National Bureau of Standards [NBS] (USA)

by J.R. MOORE
National Physical Laboratory (United Kingdom)

(Document CCPR/86-7)

The lamps

Gas-filled tungsten-ribbon lamps of a new design, now available commercially and designated as type 25/G, developed at the NPL and manufactured by the Hirst Research Laboratory of the General Electric Company, were used in the comparison. Each lamp was provided with a plane fused-silica window mounted on a single side tube.

Before initial calibration, each lamp was aged for 100 hours at a radiance temperature (662 nm) of 2 573 K, followed by two further periods of 100 hours each at a radiance temperature (662 nm) of 2 473 K over which the rate of drift was measured. The drift rates over the final 100 hour ageing period were less than 0,015 K per hour.

During the course of the comparison each lamp was run for a total of about 50 hours at the lower of these two temperatures, corresponding to a colour temperature of about 2 850 K.

Procedure for the comparison

The spectral radiance of a defined area of the filaments of each of the two lamps was measured at the NPL over the wavelength range 250-800 nm in 10 nm bands. This was done during the period April to June 1982. The lamps were then sent by air freight to the NBS where the spectral radiance was measured at 10 nm intervals over the same spectrum range. The lamps were returned to the NPL, again by air freight, and the measurements repeated there during September 1982.

Impact recorders packed with the lamps indicated that they had survived impacts in the region of 25-30 *g*, during shipment, without visible damage. Impact recorders packed with two other similar lamps sent from the NPL a few weeks earlier by a different route, (it was originally intended to base the comparison on a group of four lamps), recorded impacts of 45-50 *g*, but in this case it was found when they arrived at NBS that the ribbon filaments of both lamps had been snapped off from their supports. The glass envelopes of the lamps had survived the trip unbroken.

The results reported, therefore, cover measurements on two lamps only.

Conditions of operation

During calibration, each lamp was operated from a dc supply at a specified polarity and current.

The calibrations applied from a particular area of the lamp filament into a specific cone. At the NPL, the area measured was 0,3 mm wide and 0,8 mm high, located symmetrically about the point on the centre line of the ribbon opposite to the index pointer. The cone was of semi-angle approximately 2,5 degrees, centred about the horizontal measurement axis. The lamp was operated cap down, and was aligned so that the plane surface of the lamp window was perpendicular to the measurement axis and the centre line of the ribbon filament lay in a vertical plane passing through the axis.

At the NBS, the conditions of operation were substantially those used at the NPL, except that a target area of 0,5 mm wide by 0,8 mm high was used instead of the 0,3 mm wide by the 0,8 mm high measured at the NPL. The dimension of the solid angle over which measurements were made was not indicated in the NBS Report *.

Filament uniformity

The variation in the spectral radiance at 400 nm and at 660 nm, along and across the filament, relative to the spectral radiance at the central reference point was examined at the NPL. Scans made at the NBS of the spectral radiance at 654,6 nm, along and across the ribbon filament, showed good agreement with those made at the NPL at 660 nm.

---

* This information is available, however, from an earlier NBS document entitled « Lamp standards of spectral radiance, 1952 ».

The solid angle used at NBS was a rectangular pyramid whose longer dimension was vertical. The size of the solid angle is defined by the vertex angles at the apex of the pyramid. The vertex angles are 0,125 radian (7,16 degrees) in the vertical plane and 0,062 5 radian (3,58 degrees) in the horizontal plane.

Using the NPL values, correction factors were calculated for the effect of the difference between the two target areas. These were similar for the two lamps and showed that the NPL results should be multiplied by about 0,999 0 at 400 nm and 0,999 4 at 660 nm to compensate for the larger target area used at the NBS. These corrections can be regarded as insignificant in comparison with the uncertainties of the individual measurements and the differences between them.

Results of the comparison

The differences between the spectral radiance values measured on the lamps at the NPL before and after their measurement at the NBS were found to be less than 0,5 % at all wavelengths.

The plot below (Fig. 1) shows the ratio of the mean of the two sets of NPL results to those reported by the NBS for each of the two lamps used in the comparison and represents the best estimate obtainable from this comparison of the present differences between the spectral radiance scales maintained at the NPL and at the NBS.

Note that the quantity plotted is the value assigned to the lamp by the NPL for the spectral radiance in $W\,m^{-3}\,sr^{-1}$ at each wavelength, divided by the spectral radiance in the same units assigned to the lamp by the NBS.

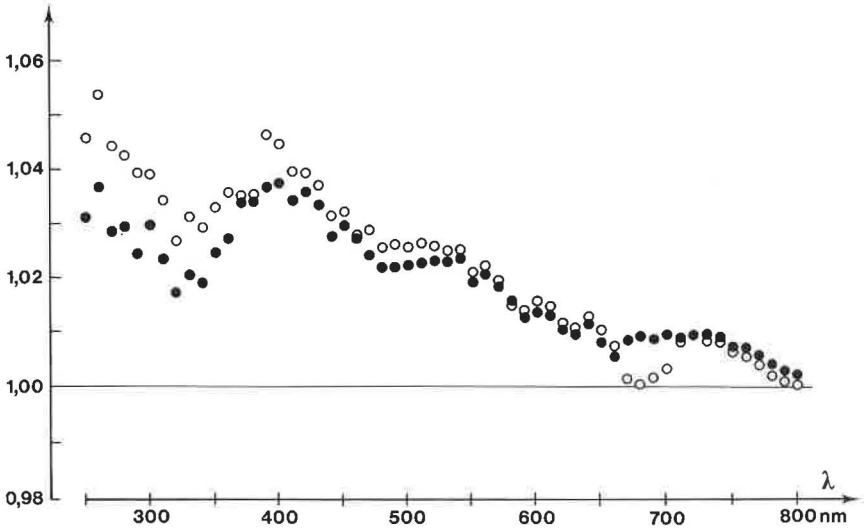

Fig. 1. — Ratio of the spectral radiance NPL/NBS for lamp 387 C (o) and for lamp 550 C (•).

Conclusions

There is no doubt that the stability of the lamps used for the comparison was more than adequate to show the differences between the scales held at the two laboratories. The loss of two out of the four lamps originally designated for the comparison suggests, however, that there are problems associated with the safe transport of lamps when shipped using commercial carriers.

The results of the comparison suggest that there are significant differences between the spectral radiance scales maintained at the NPL and at the NBS, especially in the ultraviolet region of the spectrum.

APPENDIX P 4

Comparison of the National Standards of Absolute Spectral Responsivity

by Edward F. Zalewski
National Bureau of Standards (U.S.A.)

(Final document replacing documents CCPR/86-5 and CCPR/86-10)

Introduction

At the 10th meeting of the CCPR in September 1982, it was decided that a comparison of the ability of various national standardizing laboratories to measure monochromatic radiant power should be undertaken. The National Bureau of Standards (NBS) was appointed as the lead laboratory along with the National Research Council (NRC) [Canada], the National Physical Research Laboratory (NPRL) [South Africa] and Mr. J. Schanda (Hungary) as members of the working group.

Rather than circulate sources of radiant power, it was proposed that the comparison method be to circulate silicon photodiodes that would, it was hoped, have greater stability. The participating laboratories would measure the absolute responsivity at 633 nm within the central portion of the photodiode's active area. A detector responsivity comparison would be equivalent to comparing each laboratory's capability of measuring radiant power at the principal visible wavelength of the helium-neon laser.

After soliciting the opinions of the participating laboratories, it was decided to extend the comparison to include another wavelength in the blue region of the spectrum : the argon-ion laser line at 488 nm.

The final results at 633 nm obtained by eleven laboratories (including NBS as the pilot laboratory) in the measurement of radiant power yielded a standard deviation (of a single measurement) of 0,34 %. At 488 nm the final results obtained from nine laboratories yielded a standard deviation of 0,33 %.

In regard to the silicon photodiode stability, at 633 nm it was found that changes of several percent in the responsivities of three of the sixteen photodetectors occurred during transport. The average change at 633 nm of the remaining thirteen detectors as indicated by their repeat measurements at NBS was − 0,07 % with a standard deviation of 0,16 %.

Those laboratories that had received the unstable detectors were invited to repeat their measurements on a different detector set. It was during this repeat round that the « shelf-life » stability at 488 nm (before transport) was checked on ten of the thirteen « stable » photodiodes. The average change at 488 nm was 0,20 % with a standard deviation of 0,33 %. These responsivity changes are the average for two different types of silicon photodiode. Systematic differences that were observed in the performance of each type are discussed in this report.

Experiment

In the process of preparing for the comparison it was decided to circulate radiometers that included both the photodiode and the signal-processing electronics, rather than simply silicon photodiodes alone. This was to preclude complications in the comparison arising from different amplification techniques and possible inaccuracies in gain calibrations. The gain settings of the radiometers were variable in six precise (0,03 % uncertainty) decade steps from 0,1 mA/V to 100 nA/V. The absolute uncertainty in the gain was less than 0,1 % in the 0,1 mA/V to 100 nA/V range. At the two higher gain settings the absolute uncertainty increased to 1 %.

Because stability was an important question, it was also decided that two different types of silicon photodiodes would be circulated : a « normal » PN type of silicon photodiode (EG & G Company [1], Model UV-444BQ) and an NP type incorporating the recently developed induced-junction technology (UDT Company [2], Model UV-100). At the time that this comparison was being planned it was already known that in the PN type of silicon photodiodes the collection efficiency for photogenerated minority carriers at the oxide-silicon interface could be unstable [3]. Since the collection efficiency in the induced-junction type of silicon photodiode is immune to changes at the oxide-silicon interface [4], it was decided that photodiodes of this type would also be circulated for the comparison. Circulating both types was deemed necessary because very little evidence concerning the stability of the new type of silicon photodiode existed.

Another consideration in the design of the comparison concerned the use of either a diffuser or a window to protect the photodiode surface. Attempts to produce stable and spatially uniform (0,1 % or better) diffusers met with no success. Experiments with antireflection-coated windows also met with no success. The windows were judged to be unsatisfactory for 0,1 % level measurements because of interference and interreflection effects.

In the first phase of the comparison, the photodetector was not protectively sealed from possible atmospheric contaminations, but was merely covered by a dust-cap during transport. Although they were all found to be stable at 633 nm under laboratory conditions, three photodiodes were found to change drastically during transport.

In subsequent rounds of the comparison an attempt was made to more adequately protect the photodiodes by a redesigned cap that sealed off the detector from the atmosphere and by packaging the entire radiometer in a sealed plastic bag containing a desiccant.

Selection and testing of the photodiodes was completed in mid-1984, but construction and final testing of the radiometers was not completed until the end of 1985. The comparison took place between February and August of 1986. It consisted of three steps. First, the absolute spectral responsivity was measured at NBS at 633 nm. Because of some difficulties with the argon-ion laser at NBS, it was not possible at this time to perform the measurements at that wavelength. In the second step, two radiometers, one of each type of photodiode, were sent to each participating laboratory for measurements at 633 and 488 nm. Finally, the radiometers were returned to NBS for remeasurement at 633 nm. It was at this stage that the 488 nm measurements were made at NBS.

The analysis of the NBS before-and-after 633 nm responsivity measurements indicated that two of the UDT photodiodes and one of the EG & G photodiodes had changed by several percent. The laboratories that had received unstable photodiodes were invited to repeat their measurements on a different set of photodiodes that had proved to be stable in transport. A repeat set of 488 nm responsivity measurements was made at NBS on ten of the photodiodes in November of 1986 prior to transport.

Besides being asked to measure the absolute response of the photodiodes, the laboratories were asked to describe some of the essential features of their measurement process. The experimental conditions at each participating laboratory during this comparison are summarized in the following list.

NRC : National Research Council, Canada.
Absolute base : electrical substitution radiometer ; uncertainty relative to SI : 0,1 % ; standard deviation of the comparison : 0,2 % (633 nm), 0,15 % (488 nm) ; radiation source : several krypton-ion laser lines (plus interpolation based on measurements of the relative spectral response), 3 mm diameter beam, 0,3 to 0,8 mW ; ambient temperature : 23 to 24 °C.

NPL: National Physical Laboratory, United Kingdom.
Absolute base: cryogenic electrical substitution radiometer; uncertainty relative to SI: 0,005 %; standard deviation of the comparison: 0,01 %; radiation source: HeNe and argon-ion laser, 4 mm diameter beam, 0,5 mW (633 nm), 1 mW (488 nm); ambient temperature: 22 to 23 °C.

PTB: Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Federal Republic of Germany.
Absolute base: electrical substitution radiometer; uncertainty relative to SI: 0,1 %; standard deviation of the comparison: 0,04 %; radiation source: HeNe and argon-ion laser, 5,3 mm diameter beam, 0,2 to 1,4 mW (633 nm), 0,3 to 3,0 mW (488 nm); ambient temperature: 23,0 °C.

NIM: National Institute of Metrology, Chengdu, People's Republic of China.
Absolute base: predictable quantum efficiency detector; uncertainty relative to SI: 0,05 % (633 nm), 0,1 % (488 nm); standard deviation of the comparison: 0,06 % (633 nm), 0,15 % (488 nm); radiation source: HeNe and argon-ion laser, 4 mm diameter beam, 1 mW; ambient temperature: 21 °C.

CSIRO: CSIRO, Division of Applied Physics, Australia.
Absolute base: electrical substitution radiometer (ESR) and predictable quantum efficiency detector (PQED); uncertainty relative to SI: 0,05 % (ESR), 0,1 % (PQED, 633 nm), 0,2 % (PQED, 488 nm); standard deviation of the comparison: 0,09 % (ESR, 633 & 488 nm), 0,15 % (PQED, 633 nm), 0,2 % (PQED, 488 nm); radiation source: HeNe and argon-ion laser, 6 mm diameter beam, 0,5 mW (633 nm), 1,4 mW (488 nm); ambient temperature: 21,5 °C (633 nm), 20 °C (488 nm).

ASH: Research Institute of Technical Physics of the Hungarian Academy of Sciences, Hungary.
Absolute base: predictable quantum efficiency detector; uncertainty relative to SI: not estimated; standard deviation of the comparison: 0,1 %; radiation source: xenon lamp plus monochromator, 5 mm diameter beam, 1,5 μW; ambient temperature: 24 °C.

OMH : National Office of Measures, Hungary.
Absolute base : predictable quantum efficiency detector ; uncertainty relative to SI : 0,25 % ; standard deviation of the comparison : 0,07 % ; radiation source : tungsten lamp plus monochromator, 3,5 mm diameter beam, 40 nW (633 nm), 20 nW (488 nm) ; ambient temperature : 24 °C.

ETL : Electrotechnical Laboratory, Japan.
Absolute base : predictable quantum efficiency detector ; uncertainty relative to SI : 0,5 % ; standard deviation of the comparison : 0,04 % ; radiation source : He-Ne laser, 1 mm diameter beam, 40 µW ; ambient temperature : 23 °C.

NPRL : National Physical Research Laboratory, South Africa.
Absolute base : electrical substitution radiometer ; uncertainty relative to SI : 0,2 % ; standard deviation of the comparison : 0,2 % (laser at 633 nm), 0,3 % (lamp/monochromator) ; radiation source : He-Ne laser and xenon lamp plus monochromator, 1 to 3 mm diameter beam, 2 mW (laser), 0,1 to 200 µW (monochromator) ; ambient temperature : 24 °C.

INM : Institut National de Métrologie, France.
Absolute base : predictable quantum efficiency detector ; uncertainty relative to SI : 0,12 % ; standard deviation of the comparison : 0,05 % (633 nm), 0,1 % (488 nm) ; radiation source : He-Ne laser, (absolute responsivity at 488 nm determined from relative spectral responsivity plus 633 nm result), beam diameter not given, 0,07 mW (633 nm) ; ambient temperature : 23 to 25 °C.

NBS : National Bureau of Standards, United States (Pilot laboratory).
Absolute base : predictable quantum efficiency detector ; uncertainty relative to SI : 0,1 % ; standard deviation of the comparison : 0,1 % to 0,2 % (633 nm), 0,1 % to 0,3 % (488 nm) ; radiation source : He-Ne and argon-ion laser, 4 mm diameter beam, 0,1 to 0,6 mW ; ambient temperature : 23 to 25 °C.

Results

A summary of the results of the comparison at both 488 nm and 633 nm is presented in Table I. The responsivity is presented in units of A/W. That is, the gain setting of the amplifier was assumed to be exactly correct and was used to calculate the photocurrent from the output voltage of the radiometer.

The comparison radiometers are labelled PI-1 through PI-16. Radiometers PI-1 through PI-8 have EG & G (PN-type) photodiodes as the detector element ; the remaining radiometers have UDT (NP-type) photodiodes. The results for each laboratory are presented with the appropriate NBS results and the date of the measurements.

The CSIRO measured the comparison radiometers using both its electrical-substitution-radiometer base and a predictable-quantum-efficiency-detector base. Both sets of results are included in the Table, but only the average was used in the various data plots and in calculations of the average interlaboratory agreement.

After it had submitted its data, the ASH discovered an error in the reflectance measurements for its predictable-quantum-efficiency-detector base. Thereupon, ASH submitted revised values for its results at both wavelengths.

At a radiant power level of 2 mW, the NPRL measured a reduced responsivity for radiometer PI-7. This result is included in the Table but was not used in any of the data plots or calculations of the interlaboratory agreement.

Figures 1 through 6 are various plots of the data in Table I. Figures 1 and 2 show the stability at 633 nm of, respectively, the PN and NP types of silicon photodiodes before and after transport. One of the PN-type detectors (Fig. 1) exhibited a decrease in responsivity of about 4 %. The remaining seven PN photodiodes exhibited an average ratio of before-to-after measurements of 1,000 1 with an uncertainty (3σ) of the mean of 0,13 %. Of the NP-type silicon photodiodes depicted in Fig. 2, two of them exhibited an increase of 8 % to 9,5 % while the remainder had an average before-to-after ratio of 0,998 4 with a 3σ uncertainty of the mean of 0,17 %.

Figure 3 is a summary for the PN type of photodiode of all the comparison data between each laboratory and the post-transport set of NBS measurements. The data for each laboratory are those of their first submission. That is, they do not include the repeat measurements of NRC, NPL and PTB, nor do they include the revised submission of the ASH. Figure 4 is the same summary for the comparison using NP-type photodiodes. For the PN-type photodiodes (Fig. 3) the average laboratory-to-NBS ratio is 0,999 6 with a standard deviation of 0,65 %

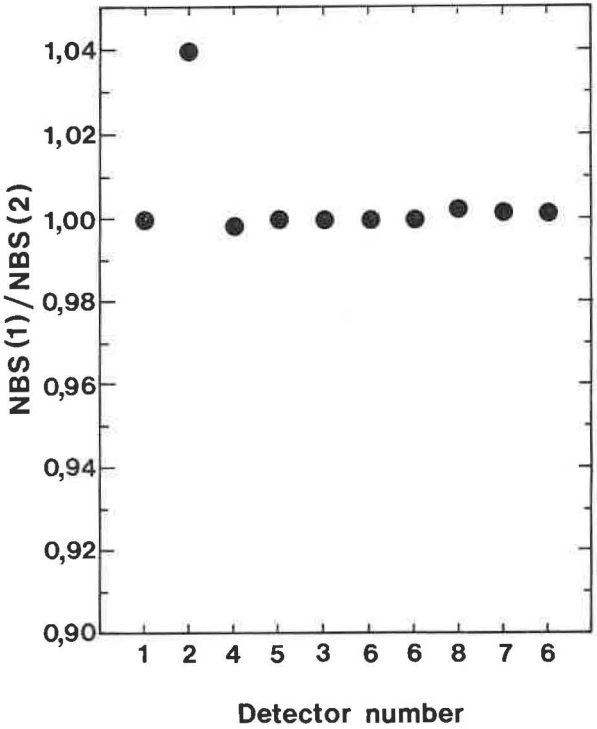

Fig. 1. — Change in the responsivity of the PN-type (EG & G) photodiodes at 633 nm prior to leaving NBS and upon return.

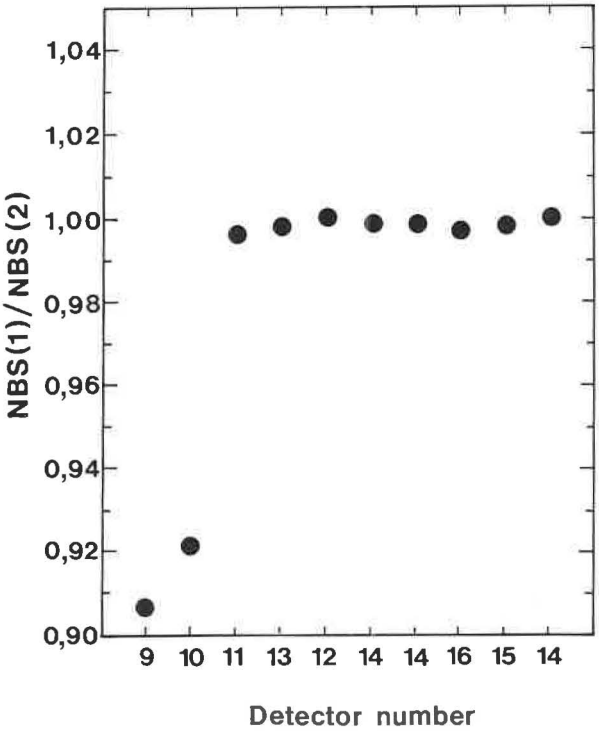

Fig. 2. — Change in the responsivity of the NP-type (UDT) photodiodes at 633 nm prior to leaving NBS and upon return.

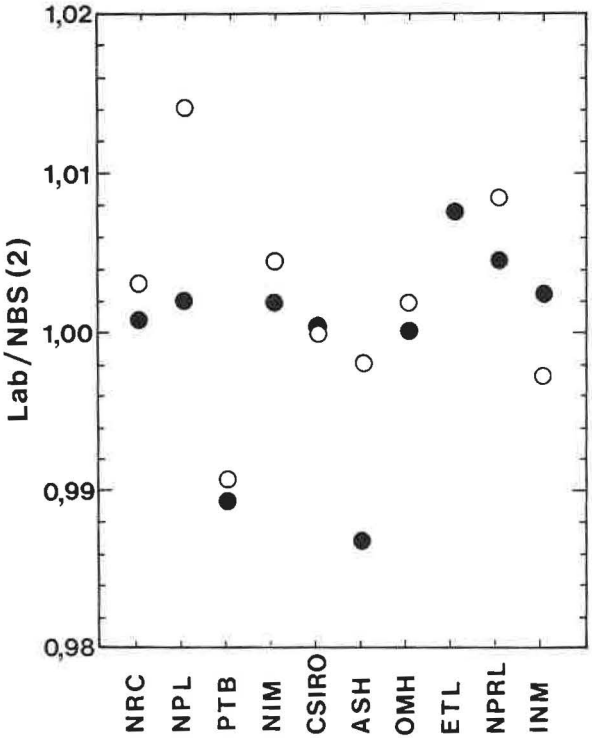

Fig. 3. — Initial comparison of PN-type (EG & G) photodiode responsivity at 488 nm (black dots) and at 633 nm (open circles).

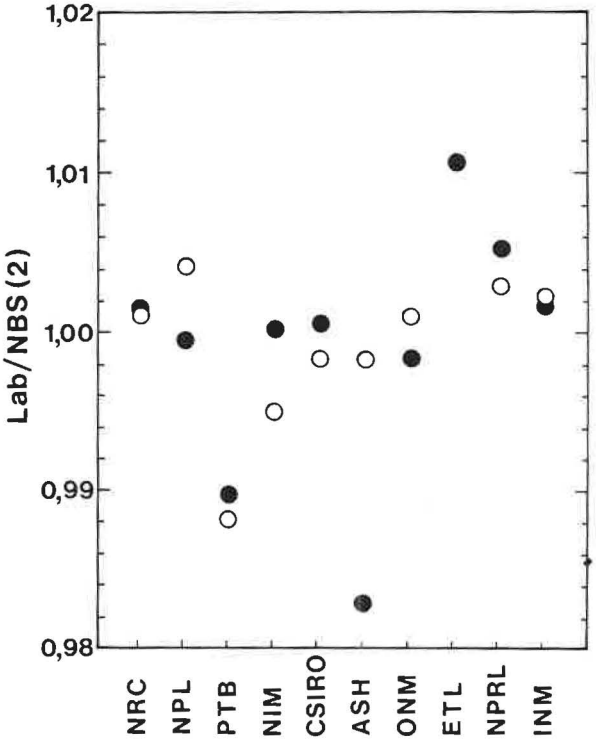

Fig. 4. — Initial comparison of NP-type (UDT) photodiode responsivity at 488 nm (black dots) and at 633 nm (open circles).

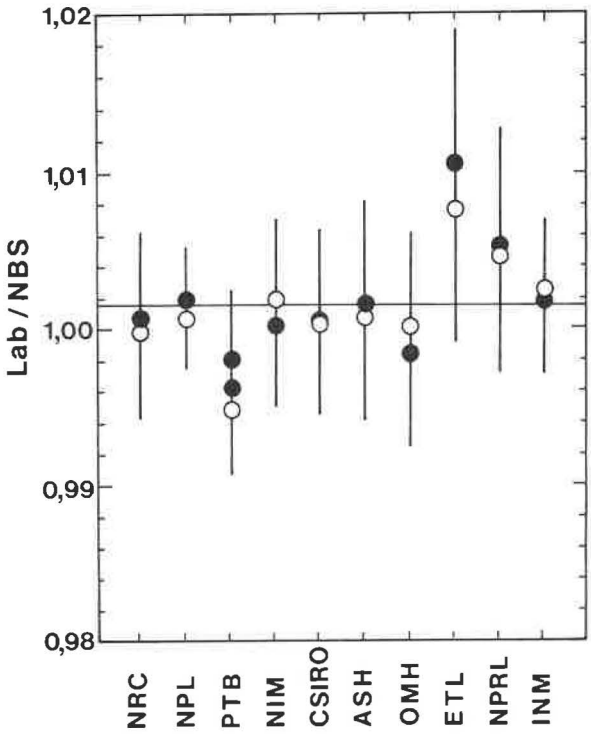

Fig. 5. — Comparison of 633 nm absolute responsivity measurement using PN-type photodiodes (open circles) and NP-type photodiodes (black dots).

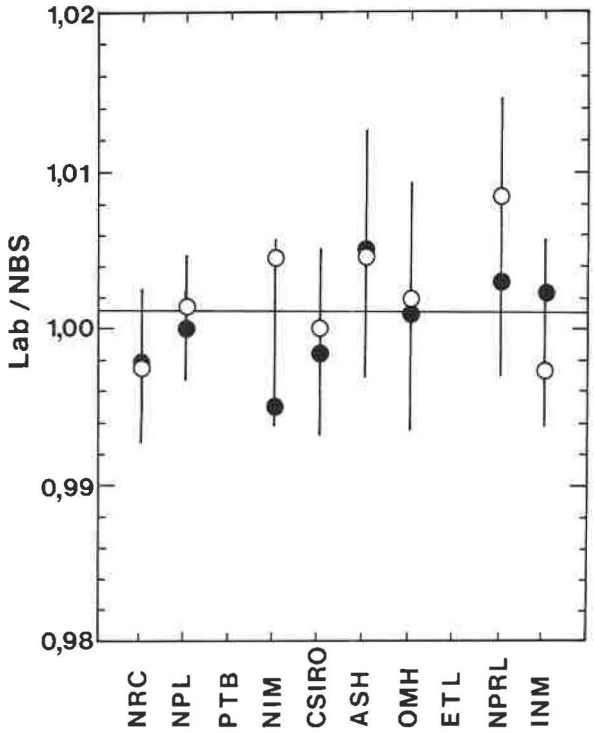

Fig. 6. — Comparison of 488 nm absolute responsivity measurements using PN-type photodiodes (open circles) and NP-type photodiodes (black dots).

TABLE I

Absolute responsivity measurement summary

Laboratory	Date	633 nm responsivity		488 nm responsivity	
		PI-1	PI-9	PI-1	PI-9
NBS	2/86	0,448 0	0,410 8		
NRC	3/86	0,448 5	0,453 9	0,260 8	0,258 0
NBS	4/86	0,448 1	0,453 2		
NBS	8/86			0,260 0	0,257 7
		PI-6	PI-16	PI-6	PI-16
NBS	5/86	0,449 1			
NBS	8/86		0,415 5	0,262 3	0,297 9
NBS	11/86			0,262 1	0,298 2
NRC	12/86	0,449 0	0,415 8	0,261 3	0,297 6
NBS	12/86			0,261 8	0,298 3
		PI-2	PI-10	PI-2	PI-10
NBS	2/86	0,459 1	0,411 9		
NPL	3/86	0,442 6	0,446 8	0,258 8	0,265 7
NBS	5/86	0,441 7	0,447 0		
NBS	8/86			0,252 2	0,264 6
		PI-7	PI-14	PI-7	PI-14
NBS	5/86		0,413 7		
NBS	8/86	0,455 7		0,283 8	0,299 1
NBS	11/86			0,282 3	0,299 4
NPL	12/86	0,456 0	0,414 5	0,282 7	0,299 4
		PI-4	PI-11	PI-4	PI-11
NBS	2/86	0,454 3	0,415 2		
PTB	4/86	0,450 3	0,412 5	0,277 1	0,293 3
NBS	5/86	0,455 2	0,416 8		
NBS	8/86			0,279 7	0,296 8
NBS	11/86			0,278 4	0,297 1
PTB	12/86	0,452 9	0,415 2		
		PI-8	PI-15	PI-8	PI-15
NBS	8/86	0,459 0	0,414 1	0,285 3	0,299 2
NBS	11/86			0,283 2	0,299 0
PTB	12/86	0,456 6	0,413 3		

Laboratory	Date	633 nm responsivity		488 nm responsivity	
		PI-5	PI-13	PI-5	PI-13
NBS	2/86	0,460 8	0,411 2		
NIM	3/86	0,461 8	0,412 1	0,291 5	0,299 6
NBS	5/86	0,460 9	0,412 0		
NBS	8/86			0,290 2	0,301 1
		PI-3	PI-12	PI-3	PI-12
NBS	2/86	0,456 3	0,409 8		
CSIRO (PQED)	4/86	0,456 7	0,409 4	0,286 6	0,302 4
CSIRO (ESR)	5/86	0,456 7	0,409 4	0,286 3	0,302 1
NBS	5/86	0,456 5	0,409 6		
NBS	8/86			0,286 3	0,302 6
		PI-6	PI-14	PI-6	PI-14
NBS	2/86	0,448 9	0,413 1		
ASH	4/86	0,443 2	0,406 6	0,261 8	0,298 6
ASH	[later submission]	0,449 4	0,412 3	0,263 5	0,300 6
NBS	5/86	0,449 1	0,413 7		
NBS	8/86			0,262 3	0,299 1
		PI-6	PI-14	PI-6	PI-14
NBS	2/86	0,448 9	0,413 1		
OMH	4/86	0,449 2	0,413 0	0,262 8	0,299 4
NBS	5/86	0,449 1	0,413 7		
NBS	8/86			0,262 3	0,299 1
		PI-8	PI-16		
NBS	2/86	0,459 8	0,414 3		
ETL	6/86	0,462 5	0,419 9		
NBS	8/86	0,459 0	0,415 5		
		PI-7	PI-15	PI-7	PI-15
NBS	2/86	0,456 3	0,413 4		
NPRL	7/86	0,457 8	0,416 3	0,286 2	0,300 1
		0,449 3	[at 1,95 mW]		
NBS	8/86	0,455 7	0,414 1	0,283 8	0,299 2
		PI-6	PI-14	PI-6	PI-14
NBS	5/86	0,449 1	0,413 7		
INM	7/86	0,449 7	0,414 4	0,261 6	0,299 8
NBS	8/86	0,448 6	0,413 7	0,262 3	0,299 1

for the 633 nm comparison. For the 488 nm comparison involving PN-type photodiodes the average was 1,002 0, standard deviation 0,68 %. In the case of the NP-type photodiodes (Fig. 4) the average laboratory-to-NBS ratio at 633 nm was 0,999 0 with standard deviation 0,77 % ; and at 488 nm, average 0,999 1, standard deviation 0,50 %.

As explained above, the laboratories that received the unstable photodiodes (the NRC and the NPL) were invited to repeat their measurements on a different set of detectors. In addition, the PTB was also invited to remeasure its detectors because of a possible problem with scattered radiation, too high a radiant power density (as in the 2 mW results from the NPRL) or possible photodetector instability.

Figures 5 and 6 show the results of all the final submissions for 633 nm and 488 nm, respectively. That is, these figures depict the final values obtained from NRC, NPL, PTB and ASH. The comparison (ratio of laboratory-to-NBS) for both the PN-type photodiodes (open circles) and the NP-type (black dots) is depicted in each figure. The error bars in each figure depict a combination (quadrature) of the estimated uncertainty and precision in each laboratory's measurement with that of NBS. The error bars are drawn from the mean value of the comparison ratio for each laboratory.

From Fig. 5 the World Mean Agreement of absolute responsivity at 633 nm can be calculated. For the eleven laboratories participating at this wavelength (including the NBS) the World Mean is 1,001 3 with a standard deviation (single measurement) of 0,34 %. Since two sets of data were submitted by the PTB, these were each assigned a weight of one-half in the calculation of the average.

The results depicted in Fig. 6 yield a World Mean Agreement of absolute responsivity at 488 nm of 1,001 1 with a standard deviation of 0,33 %. Except for NIM, NPRL and INM, the comparisons at 488 nm and 633 nm showed the same results for both types of photodiodes within the precision of each laboratory. The larger spread between photodiodes that is seen in Fig. 6 for these three laboratories may be due to instabilities in the PN type of photodiode as recently reported [5-7].

The « shelf-life » stability of the photodiodes at 488 nm is not depicted. From the NBS data in Table I, however, the average change observed in five PN-type and five NP-type photodiodes in a three-month period can be calculated. For the PN-type photodiode, the responsivity at 488 nm was found to decrease an average of 0,54 % with a 3σ uncertainty of 0,29 % in the mean. This is in agreement with the observations of Stock and Heine [7]. In the case of the NP-type photodiode, the responsivity was found to increase on the average 0,09 % with a 3σ uncertainty of 0,10 % in the mean.

The drastic changes that were observed in three of the photodiodes in the first round of the comparison are in the same direction as that of the instabilities described above. That is, for the PN type of

photodiode a decrease was observed while an increase was observed in the case of the NP type. In the first instance, the decrease is due to a decrease in the collection efficiency at the silicon-silicon dioxide interface [5, 6]. The increase in the responsivity of the NP type of photodiode is most likely due to a change in the reflectance [8]. This conclusion was borne out by a visual examination of the surface of the two NP-type photodiodes that changed in transport. Both of these detectors showed marked discoloration in the central region as if something was deposited on the surface through the 0,5 cm^2 aperture which acted as a mask.

Conclusions

The principal conclusion of this comparison is that the standard deviation of international agreement in the absolute measurement of monochromatic radiant power (or absolute spectral response) is 0,34 % for a single measurement at 633 nm (eleven laboratories) and 0,33 % at 488 nm (nine laboratories). These measurements were made using two different types of absolute standards and at radiant power levels spanning five decades.

The second conclusion to be drawn from this comparison is that absolute radiant power measurements made with traditional electrical substitution radiometers and the new predictable-quantum-efficiency detectors are equivalent within the precision of this comparison. Five laboratories reported using an ESR as their base and seven used the PQED (one reported results based on both standards). No significant difference between the two groups was observed at either wavelength.

The third conclusion is in regard to the suitability of silicon photodiodes as standards for maintaining photometric and radiometric scales and as transfer standards for disseminating these scales and for future comparisons. For the majority of the detectors their performance was quite good. As expected from the physics of each detector, the PN-type (EG & G) photodiode performed better at the longer wavelength and the NP type (UDT) performed better at the shorter wavelength. In a very limited time span, the EG & G devices showed changes of less than 0,1 % at 633 nm and the UDT devices showed changes of about 0,1 % at 488 nm.

Although there were very large changes observed in the responsivity of three of the sixteen photodiodes, the changes did not correlate with the interlaboratory agreement that was obtained during that round of the comparison. The photodiodes apparently changed the most upon leaving NBS, but very little upon the return trip. This may seem

unlikely, but it is not impossible. The changes that were observed do correspond to the experiences of other observers. Therefore, one may reasonably expect that ongoing work at many laboratories on the physics and detailed behavior of silicon photodiodes can be expected to lead to improved performance of these devices.

It is tempting to speculate on the possible explanation for the changes in the responsivity of the two different types of photodiodes. The one PN type of photodiode that changed exhibited a decrease in responsivity, while the induced-junction photodiodes showed increases in responsivity. These changes are consistent with what might be expected if a static charge developed on the detector surface sometime during shipping; perhaps as a result of the condensation of water on the photodiodes as they were moved from a cold to a warm environment. It is known that the internal quantum efficiency of the PN type of photodiode can change permanently as a result of a temporary static electrical charge on the surface [6]. The change is usually to reduce the quantum efficiency. In the case of the NP type of photodiode, recent silicon-photodiode cleaning experiments at NBS have shown that the reflectance of the photodiode changes considerably when exposed to freshly condensed water vapor [8]. Perhaps the most important conclusion to be drawn from these observed changes is that the surface of the photodiode must be protected from atmospheric contaminants during shipping.

Acknowledgements

The author wishes to thank the following NBS staff members for their assistance in the preparations for this comparison and in the measurement of the response of the photodiodes: Douglas Thomas, Barbara Belzer and Warren Gladden.

References

[1] EG&G Electro-Optics, 35 Congress St., Salem, MA 01970.

[2] United Detector Technology, 12525 Chadron Ave., Hawthorne, CA 90250.

[3] Zalewski, E. F. Recent developments in the techniques for the self-calibration of silicon photodiodes. *In* IMEKO Conference, Berlin, 1982.

[4] Geist, J., Liang, E. and Schaefer, A. R. Complete collection of minority carriers from the inversion layer in induced junction diodes. *J. Appl. Phys.*, **52**, 1981, pp. 4879-4881.

[5] Verdebout, J. and Booker, R. L. Degradation of native oxide passivated silicon photodiodes by repeated oxide bias. *J. Appl. Phys.*, **55**, 1984, pp. 406-412.

[6] KEY, P. J., FOX, N. P. and RASTELLO, M. L. Oxide-bias measurements in the silicon photodiode self-calibration technique. *Metrologia*, **21**, 1985, pp. 81-87.

[7] STOCK, K. D. and HEINE, R. On the aging of photovoltaic cells. *Optik*, **71**, 1985, p. 137.

[8] ZHANG, R. R., BELZER, B. J. and ZALEWSKI, E. F. Silicon photodiode reflectance stability and cleaning (unpublished results).

TABLE DES MATIÈRES

COMITÉ CONSULTATIF DE PHOTOMÉTRIE ET RADIOMÉTRIE

11e session (1986)

Pages

Notice sur les organes de la Convention du Mètre v

Liste des membres vii

Ordre du jour x

Rapport au Comité International des Poids et Mesures, par P. J. Key P1

Rapport sur la comparaison internationale de lampes étalons d'intensité et de flux lumineux (présentation des résultats, conséquences des comparaisons, rapport à la CGPM, unités conservées au BIPM et dans les laboratoires nationaux) 2

Rapport sur la comparaison NPL/NBS des échelles de luminance énergétique spectrale 8

Sensibilité spectrale absolue : rapport sur la comparaison des étalons nationaux. 8

Progrès réalisés par les laboratoires nationaux dans l'établissement des étalons primaires pour les grandeurs radiométriques et spectroradiométriques 9

Progrès réalisés dans l'établissement d'étalons primaires d'intensité lumineuse et de flux lumineux 11

Autres travaux effectués dans les laboratoires nationaux, études relatives à la technologie des fibres optiques 12

Activités de la Commission Internationale de l'Éclairage (CIE) 13

Activités futures du CCPR et comparaisons internationales (intensité lumineuse et flux lumineux, luminance énergétique spectrale et éclairement énergétique spectral, récepteurs $V(\lambda)$, fibres optiques) 13

Parrainage par le CCPR d'un symposium sur la radiométrie absolue 16

Programme de travail futur du BIPM en radiométrie et en photométrie 16

Questions diverses 17

Publication des documents 17

Recommandations présentées au Comité International des Poids et Mesures :

P1 (1986) : Développement des méthodes radiométriques pour la photométrie .. 18

P2 (1986) : Étalons photométriques du Bureau International des Poids et Mesures 19

Annexes

P 1. Documents de travail présentés à la 11e session du CCPR 21

P 2. BIPM. — Rapport sur la sixième comparaison des étalons nationaux d'intensité et de flux lumineux (1985), par J. Bonhoure..... 23

Appendice A. — Note sur les résultats de cette comparaison, par W. R. Blevin 53

Appendice B. — Informations fournies par les laboratoires nationaux sur la réalisation des unités et le bilan des incertitudes..... 56

P 3. NPL (Royaume-Uni). — Comparaison des échelles de luminance énergétique spectrale du NPL et du NBS, par J. R. Moore..... 77

P 4. NBS (États-Unis d'Amérique). — Comparaison des étalons nationaux de sensibilité spectrale absolue, par E. F. Zalewski 81

Notice for the reader of the English version. Avertissement au lecteur de la version anglaise 97

Note on the organs of the Convention du Mètre 99

Agenda..... 102

Report to the Comité International des Poids et Mesures, by P. J. Key..... 103

Report on international comparisons of luminous intensity and luminous flux standards (presentation of the results, consequences of the comparisons, report to the CGPM, units maintained at the BIPM and in the national laboratories)..... 104

Report on the NPL-NBS comparison of spectral radiance measurement 110

Report on the comparison of national standards of absolute spectral responsivity..... 110

Progress by national laboratories in establishing primary standards for radiometric and spectroradiometric quantities..... 111

Progress by national laboratories in establishing primary standards for luminous intensity and luminous flux..... 113

Review of other relevant work in national laboratories, particularly studies related to optical fibre technology..... 114

CIE activities 115

Future CCPR activities and international comparisons (luminous intensity and luminous flux, spectral radiance and spectral irradiance, $V(\lambda)$ detectors, optical fibres)..... 115

CCPR sponsorship of a symposium on absolute radiometry 118

Future BIPM work programme in radiometry and photometry 118

Other matters..... 119

Publication of documents 119

Recommendations submitted to the Comité International des Poids et Mesures :

P 1 (1986) : Development of radiometric methods for photometry 120

P 2 (1986) : Photometric standards of the Bureau International des Poids et Mesures 121

P 3 (1986) : Photometric standards of the national laboratories..... 122

Appendices

P 1. Working documents submitted to the CCPR at its 11th Meeting (*see* page P. 21) 123

P 2. BIPM. — Report on the sixth comparison of national standards of luminous intensity and of luminous flux (1985), by J. Bonhoure 124

Appendix A. — A note on the results of sixth comparison of national standards of luminous intensity and flux (1985), by W. R. Blevin 137

Appendix B. — Information supplied by the national laboratories on the realization of units and the balance-sheet of uncertainties 140

P 3. NPL (United Kingdom). — A comparison of spectral radiance scales between the NPL and the NBS, by J. R. Moore 161

P 4. NBS (U.S.A.). — Comparison of the national standards of absolute spectral responsivity, by E. F. Zalewski 165

IMPRIMERIE DURAND

28600 LUISANT (FRANCE)

Dépôt légal, Imprimeur, 1987, n° 5912
ISBN 92-822-2099-O

ACHEVÉ D'IMPRIMER OCTOBRE 1987

Imprimé en France