

BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES



COMITÉ CONSULTATIF
DE
PHOTOMÉTRIE ET RADIOMÉTRIE

Rapport de la 13^e session
Report of the 13th Meeting
1994

**COMITÉ CONSULTATIF
DE PHOTOMÉTRIE ET RADIOMÉTRIE**

SESSION DE 1994

MEETING IN 1994

BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES



COMITÉ CONSULTATIF
DE
PHOTOMÉTRIE ET RADIOMÉTRIE

Rapport de la 13^e session
Report of the 13th Meeting
1994

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

ISSN 0069-6447
ISBN 92-822-2137-7

LISTE DES SIGLES UTILISÉS DANS LE PRÉSENT VOLUME
LIST OF ACRONYMS USED IN THE PRESENT VOLUME

1. Sigles des laboratoires, commissions et conférences
Acronyms for laboratories, committees and conferences

APMP	Asia/Pacific Metrology Programme
BESSY	Berliner Elektronenspeicherring-Gesellschaft für Synchrotronstrahlung m.b.H.
BIPM	Bureau international des poids et mesures
CCPR	Comité consultatif de photométrie et radiométrie
CIE	Commission internationale de l'éclairage/International Commission on Illumination
CIPM	Comité international des poids et mesures
COOMET	Cooperation in Metrology among the Central European Countries
CORM	Council for Optical Radiation Measurements (É.-U. d'Amérique)
CSIR	Council for Scientific and Industrial Research, National Metrology Laboratory, Pretoria (Afrique du Sud)
CSIRO	CSIRO, Division of Applied Physics, Lindfield (Australie)
*CSMU	Československý Metrologický Ústav, Bratislava (Tchécoslovaquie), <i>voir</i> SMU
*DSIR	Department of Scientific and Industrial Research, Lower Hutt (Nouvelle-Zélande), <i>voir</i> MSL
ESA	Agence spatiale européenne/European Space Agency
ETL	Electrotechnical Laboratory, Tsukuba (Japon)
EUROMET	European Collaboration in Measurement Standards
GEC	General Electric Company (Royaume-Uni)
IEN	Istituto Elettrotecnico Nazionale Galileo Ferraris, Turin (Italie)
INM	Institut national de métrologie, Paris (France)

* Les laboratoires ou organisations marqués d'un astérisque soit n'existent plus soit figurent sous un autre sigle.

* Organizations marked with an asterisk either no longer exist or operate under a different acronym.

IOM	Instituto de Optica Daza de Valdés, Madrid (Espagne)
IRL	Industrial Research Limited, Measurement Standards Laboratory of New Zealand, Lower Hutt (Nouvelle-Zélande), <i>voir</i> MSL
KRISS	(ex KSRI) Korea Research Institute of Standards and Science, Taejon (Rép. de Corée)
*KSRI	Korea Standards Research Institute, Taejon (Rép. de Corée), <i>voir</i> KRISS
*MSL	(ex DSIR) Measurement Standards Laboratory of New Zealand, Lower Hutt (Nouvelle-Zélande), <i>voir</i> IRL
NASA	National Aeronautics and Space Administration
*NBS	National Bureau of Standards, Gaithersburg (É.-U. d'Amérique), <i>voir</i> NIST
NEWRAD	Conference on New Developments and Applications in Optical Radiometry
NIM	Institut national de métrologie, Beijing (Rép. pop. de Chine)
NIST	(ex NBS) National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg (É.-U. d'Amérique)
NORAMET	North and Central American Metrology Cooperation
NPL	National Physical Laboratory, Teddington (Royaume-Uni)
NRC	Conseil national de recherches du Canada/National Research Council of Canada, Ottawa (Canada)
OFMET	Office fédéral de métrologie, Wabern (Suisse)
OMH	Országos Mérésügyi Hivatal, Budapest (Hongrie)
PMOD	Physikalisch-Meteorologische Observatorium Davos, Davos (Suisse)
PTB	Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig et Berlin (Allemagne)
SANAS	South African National Accreditation System (Afrique du Sud)
SMU	(ex CSMU) Slovenský Metrologický Ústav/Slovak Institute of Metrology, Bratislava (Rép. slovaque)
VNIIOFI	Institut de recherche de Russie pour les mesures en optique physique/All-Russian Research Institute for Optophysical Measurements, Moscou (Féd. de Russie)
VTT	Valton Teknillinen Tutkimuskeskus, Espoo (Finlande)

2. Sigles des termes scientifiques

Acronyms for scientific terms

EIT-90/ITS-90	Échelle internationale de température de 1990/International Temperature Scale of 1990
FEL	Type de lampes fabriquées par la General Electric Co./Type of lamp supplied by General Electric Co. (É.-U. d'Amérique)

ITS-90	<i>voir</i> EIT-90
KDP	Diphosphate de potassium/Potassium diphosphate
QED	Récepteur quantique/Quantum efficiency detector
SI	Système international d'unités/International System of Units
WRR	Référence radiométrique mondiale/World Radiometric Reference

LE BIPM

ET 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*.

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), des rayonnements ionisants (1960), aux échelles de temps (1988) et à la quantité de matière (1993). Dans ce but, un agrandissement des premiers laboratoires construits en 1876-1878 a eu lieu en 1929 ; de nouveaux bâtiments ont été construits en 1963-1964 pour les laboratoires de la section des rayonnements ionisants, en 1984 pour le travail sur les lasers et en 1988 a été inauguré un bâtiment pour la bibliothèque et des bureaux.

* Au 31 décembre 1994, quarante-huit États sont membres de cette Convention : Afrique du Sud, Allemagne, Amérique (É.-U. d'), Argentine (Rép. d'), 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, Nouvelle-Zélande, Pakistan, Pays-Bas, Pologne, Portugal, Roumanie, Royaume-Uni, Russie (Féd. de), Singapour, Slovaque (Rép.), Suède, Suisse, Tchèque (Rép.), Thaïlande, Turquie, Uruguay, Venezuela.

Une quarantaine de physiciens ou de 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.

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*, 1963, 31, 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 neuf :

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.
9. Le Comité consultatif pour la quantité de matière (CCQM), créé en 1993.

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*.

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 par décision du Comité international, de même que le *Recueil de travaux du Bureau international des poids et mesures* (11 volumes publiés de 1966 à 1988).

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

Comité international des poids et mesures

Secrétaire
J. KOVALEVSKY

Président
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 de la Division of Applied Physics, CSIRO, Lindfield.

Membres

BUREAU NATIONAL DE MÉTROLOGIE, Paris : Institut national de métrologie
[INM] du Conservatoire national des arts et métiers, Paris.

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

CSIR, National Metrology Laboratory [CSIR], Pretoria.

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

ELECTROTECHNICAL LABORATORY [ETL], Tsukuba.

INDUSTRIAL RESEARCH LIMITED [IRL], Measurement Standards Laboratory
of New Zealand, Lower Hutt.

INSTITUT DE RECHERCHE DE RUSSIE POUR LES MESURES EN OPTIQUE PHYSIQUE
[VNIIOFI], Moscou.

INSTITUT NATIONAL DE MÉTROLOGIE [NIM], Beijing.

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

ISTITUTO ELETTROTECNICO NAZIONALE GALILEO FERRARIS [IEN], Turin.

KOREA RESEARCH INSTITUTE OF STANDARDS AND SCIENCE [KRISS], Taejon.

NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY [NIST], Gaithersburg.

NATIONAL PHYSICAL LABORATORY [NPL], Teddington.

OFFICE FÉDÉRAL DE MÉTROLOGIE [OFMET], Wabern.

ORSZÁGOS MÉRÉSUGYI HIVATAL [OMH], Budapest.

PHYSIKALISCH-TECHNISCHE BUNDESANSTALT [PTB], Braunschweig et Berlin.

SLOVENSKÝ METROLOGICKÝ ÚSTAV [SMU], Bratislava.

Le directeur du Bureau international des poids et mesures [BIPM], Sèvres.

ORDRE DU JOUR
de la 13^e session

1. Discussion du rapport final de la comparaison internationale d'étalons d'éclairement énergétique spectral.
 2. Discussion du rapport final de la comparaison internationale de mesures de puissance rayonnante à trois longueurs d'onde dans l'infrarouge.
 3. Revue des progrès réalisés dans les laboratoires nationaux depuis la 12^e session (discussion des réponses au questionnaire).
 4. Rapport du Groupe de travail sur la radiométrie spectrale pour l'ultraviolet dans l'air.
 5. Rapport du Groupe de travail sur les récepteurs corrigés $V(\lambda)$.
 6. Rapport du Groupe de travail sur les lampes étalons.
 7. Rapport sur la comparaison internationale de mesures de la sensibilité spectrale des photodiodes au silicium.
 8. Programme de travail du BIPM en radiométrie et en photométrie.
 9. Futures comparaisons internationales.
 10. *a)* Liens avec les groupes régionaux de laboratoires de métrologie ;
b) Activités de la CIE.
 11. Questions diverses.
 12. Publication des documents.
-

RAPPORT
DU COMITÉ CONSULTATIF
DE PHOTOMÉTRIE ET RADIOMÉTRIE
(13^e session — 1994)
AU
COMITÉ INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES
par J. L. GARDNER, rapporteur

Le Comité consultatif de photométrie et radiométrie (CCPR) s'est réuni pour sa 13^e session au Bureau international des poids et mesures (BIPM), à Sèvres, où il a tenu cinq séances, le mercredi 14, le jeudi 15 et le vendredi 16 septembre 1994.

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, Paris (J. BASTIE).

Conseil national de recherches du Canada [NRC], Ottawa (L. P. BOIVIN, A. A. GAERTNER).

CSIR, National Metrology Laboratory [CSIR], Pretoria (F. DENNER).

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

Electrotechnical Laboratory [ETL], Tsukuba (H. ONUKI).

Industrial Research Limited [IRL], Measurement Standards Laboratory of New Zealand, Lower Hutt (A. BITTAR).

Institut national de métrologie [NIM], Beijing (LI ZAI-QING).

Institut de recherche de Russie pour les mesures en optique physique [VNIIOFI], Moscou (S. ANEVSKY, V. SAPRITSKI).

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

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

Korea Research Institute of Standards and Science [KRISS], Taejon
(IN WON LEE).

National Institute of Standards and Technology [NIST], Gaithersburg
(A. C. PARR, R. D. SAUNDERS).

National Physical Laboratory [NPL], Teddington (D. H. NETTLETON).

Office fédéral de métrologie [OFMET], Wabern (R. THALMANN).

Országos Mérésügyi Hivatal [OMH], Budapest (G. DEZSI).

Physikalisch-Technische Bundesanstalt [PTB], Braunschweig et
Berlin (J. METZDORF, B. WENDE).

Slovenský Metrologický Ústav [SMU], Bratislava (P. NEMECEK).

Le directeur du Bureau international des poids et mesures [BIPM]
(T. J. QUINN).

Assistaient aussi aux réunions : P. GIACOMO (directeur honoraire du
BIPM) ; R. KÖHLER, R. GOEBEL, Mlle J. MONPROFIT (BIPM).

1. Ouverture de la session

Le président ouvre la session et accueille les membres, en particulier ceux qui assistent pour la première fois à une réunion du CCPR.

M. Gardner est nommé rapporteur.

2. Discussion du rapport final sur la comparaison internationale d'étalons d'éclairement énergétique spectral

M. Saunders rappelle que les mesures, commencées en 1986, ont été faites sur des lampes GEC et FEL. Dans l'ensemble les différences moyennes sont d'environ $\pm 0,5$ % pour le domaine spectral compris entre 400 nm et 800 nm, du même ordre que celles obtenues lors de la précédente comparaison internationale dont il a été rendu compte en 1976. On n'a pas remarqué de différences significatives entre les laboratoires dont l'échelle est fondée sur le corps noir et ceux qui la fondent sur d'autres méthodes. Des différences importantes ont encore été trouvées entre les laboratoires

pour les domaines spectraux qui se situent dans l'infrarouge et dans l'ultraviolet. Les résultats définitifs ont été publiés dans le *Journal of Research** du NIST.

M. Metzdorf signale que cette comparaison a été refaite entre la PTB et le NIST, avec un accord meilleur que celui qui avait été trouvé antérieurement. Ces nouveaux résultats feront l'objet d'une communication lors de la conférence NEWRAD qui doit se tenir la semaine suivante à Berlin. M. Parr constate qu'il est important d'améliorer les échelles dans les domaines de l'ultraviolet et de l'infrarouge, car on en a besoin pour des problèmes relatifs à l'économie et à l'environnement. M. Nettleton signale que les résultats obtenus pour la comparaison de luminance spectrale dans l'ultraviolet dans l'air, qui seront présentés ultérieurement au cours de cette session, font apparaître des différences entre les laboratoires par rapport à ceux de la présente comparaison d'éclairement énergétique spectral.

3. Discussion du rapport final sur la comparaison internationale de mesures de puissance rayonnante à trois longueurs d'onde dans l'infrarouge

M. Gardner présente les résultats de la comparaison internationale de mesures de puissance rayonnante, à laquelle ont pris part treize laboratoires et pour laquelle on a utilisé comme instruments de transfert des récepteurs au germanium. La comparaison définitive s'est limitée aux longueurs d'onde de 1300 nm et 1550 nm car l'intérêt pour 850 nm s'est beaucoup réduit et à cette longueur d'onde on obtient de meilleures mesures avec des récepteurs au silicium. Les laboratoires participants ont obtenu leur échelle de différentes manières, entre autres en se référant à des radiomètres cryogéniques, à des récepteurs au silicium auto-étalonnés, associés à des récepteurs non sélectifs pour faire l'extrapolation, au transfert à partir d'autres laboratoires primaires ou à des instruments que l'on trouve dans le commerce. Dans tous les cas sauf un, les valeurs de la sensibilité attribuées aux récepteurs par chaque laboratoire avaient une incertitude qui se situait dans les limites d'un écart-type par rapport à la moyenne de l'ensemble des laboratoires. Les résultats ont été publiés dans *Applied Optics*** et le BIPM a reçu un tableau complémentaire de tous les résultats de mesures communiqués par les laboratoires individuels.

M. Blevin fait remarquer que les différences que l'on constate pour la sensibilité des récepteurs à ces longueurs d'onde dans l'infrarouge sont

* WALKERS J. H., SAUNDERS R. D., JACKSON J. K., MIELENZ K. D., Results of a CCPR Intercomparison of Spectral Irradiance Measurements by National Laboratories, *J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol.*, 1991, **96**, 647-668.

** GARDNER J. L., GALLAWA R. L., STOCK K. D., NETTLETON D. H., International intercomparison of detector responsivity at 1300 and 1550 nm, *Appl. Opt.*, 1992, **31**, 7226-7231.

inférieures aux différences que l'on a pour la comparaison internationale d'éclairage spectral. À cela M. Nettleton répond qu'il est plus facile d'extrapoler les échelles des récepteurs. M. Metzdorf est du même avis : dans l'ensemble les étalonnages des récepteurs sont plus exacts que ceux des sources.

M. Parr ajoute que, bien qu'elle n'ait concerné que le laboratoire du NIST à Boulder, une comparaison directe avec le laboratoire du NIST à Gaithersburg a montré qu'il existait un accord étroit entre les échelles de sensibilité spectrale des deux laboratoires.

4. Revue des progrès réalisés dans les laboratoires nationaux depuis la 12^e session (discussion des réponses au questionnaire)

4.1 Rapports des laboratoires

Le président introduit la discussion en posant au représentant de chacun des laboratoires des questions précises en liaison avec la réponse écrite soumise par leur laboratoire d'origine.

Le CSIR a profité de la précédente comparaison internationale d'intensité lumineuse pour améliorer sa représentation de la candela, qui est fondée sur un radiomètre mis au point par ses soins. Des radiomètres semblables appartenant à l'IEN et à Taiwan donnent des résultats qui concordent à 1 % près.

Le CSIRO a mis au point des récepteurs à piège à quatre éléments en transmission, exacts comme récepteurs absolus aux longueurs d'onde du visible. Certains avaient prétendu que la cohérence partielle pouvait avoir un effet important dans les mesures d'éclairage énergétique spectral. À partir de la discussion des effets de diffraction, il a été démontré que ces allégations sont incorrectes. M. Parr annonce la parution prochaine dans le *Journal of Research* du NIST d'articles*** donnant un calcul complet, compte tenu de la cohérence partielle, relatif aux expériences qui avaient conduit à attribuer à celle-ci la responsabilité d'erreurs significatives. La conclusion est que cet effet n'est pas significatif et que les allégations en question sont erronées. M. Blevin constate que l'étude de la physique qui entre en jeu a apporté une solution satisfaisante à la question.

*** KLAUS D., MIELENZ K. D., "Wolf Shifts" and Their Physical Interpretation Under Laboratory Conditions, *J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol.*, 1993, **98**, 231-240.

FOLEY J. T., WANG M., A Theoretical Analysis of the Coherence-Induced Spectral Shift Experiments of Kandpal, Vaishya, and Joshi, *J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol.*, 1994, **99**, 267-280.

L'ETL mentionne avoir mis au point des lampes à deutérium pour des mesures d'éclairement énergétique spectral avec une stabilité améliorée, obtenue en utilisant du verre de fluorine pour les fenêtres.

L'INM a mis au point des radiomètres à large bande (50 nm à 70 nm de largeur de bande) à plusieurs longueurs d'onde dans le domaine du visible pour mesurer les valeurs absolues de l'éclairement énergétique spectral. C'est la mesure de l'ouverture qui constitue la limitation principale de l'exactitude. M. Blevin souligne l'excellent accord entre les résultats obtenus avec les radiomètres cryogéniques de l'INM et du VTT (Finlande).

Le KRISS rend compte de l'état d'avancement de la construction d'un anneau de stockage de 2 GeV et de 88 m de diamètre qui devrait être achevée en 1995.

Le NIST a bien progressé en rattachant toutes ses échelles au radiomètre cryogénique de grande exactitude. Les valeurs de luminance énergétique et d'éclairement énergétique spectral sont reliées au radiomètre cryogénique au moyen des mesures faites au point de l'or. Des récepteurs équipés de filtres et étalonnés en valeur absolue par rapport au radiomètre fourniront des échelles de flux lumineux et d'intensité lumineuse. Le NIST a l'intention de relier les mesures de courant du faisceau dans le synchrotron à un radiomètre cryogénique pour améliorer l'exactitude de cette source. M. Parr donne des indications sur l'avancement de l'étude de la conversion paramétrique avec abaissement de fréquence (*down-conversion*) pour relier l'efficacité quantique des récepteurs de photons dans l'ultraviolet à celle des récepteurs de photons dans le visible. M. Sapritsky ajoute qu'un programme semblable est en cours de réalisation à Moscou, où cette technique a pris naissance, et qu'il s'agit là d'une technique nouvelle importante pour la radiométrie. M. Parr rend hommage à l'aide reçue des laboratoires russes. L'exactitude finale n'a pas encore été évaluée mais on pense qu'elle sera de l'ordre de 1 %. M. Parr présente un rapport détaillé sur la conversion paramétrique avec abaissement de fréquence qui utilise un cristal de KDP avec une longueur d'onde de pompe de 351 nm. À titre d'exemple d'application de cette technique, il présente une carte de l'uniformité de la sensibilité d'un photomultiplicateur. En général l'absorption dans le cristal de KDP est négligeable, mais cela peut devenir faux lorsqu'on veut comparer des récepteurs dans l'infrarouge et dans le visible.

M. Nettleton demande où en sont les études de lampes au NIST. M. Saunders mentionne la mise au point de lampes à halogène à quartz, du type Osram Sylvania 1000 W FEL, réalisée avec l'aide du NIST et de l'US Council on Optical Radiation Measurements. On trouve ces lampes dans le commerce. Elles ont fait preuve d'une bonne stabilité lors des mesures faites au NIST et à la PTB. M. Metzdorf précise que plusieurs lampes ont fait l'objet d'essais dont la durée allait jusqu'à 4000 heures. Les meilleures lampes sont environ dix fois plus stables que les lampes de type FEL de General Electric, mais d'autres font un saut entre 200 heures

et 500 heures. La suite de cette discussion est reportée à la présentation du rapport du groupe de travail sur les lampes.

Pour M. Quinn, l'un des éléments clés du radiomètre cryogénique est le revêtement noir de la cavité; il demande si le NIST a pu obtenir quelque amélioration dans ce domaine. M. Parr est d'accord; les instruments nouveaux pour l'infrarouge dont la mise au point est en cours seront utilisés pour déterminer les qualités des matériaux dans l'infrarouge. M. Nettleton signale que le NPL a trouvé le noir Anritsu (disponible dans le commerce sur de petits échantillons plats) comme étant un matériau au nickel et au phosphore, mais que les échantillons ne sont pas reproductibles de façon fiable. Le NPL a passé un contrat avec une université du Royaume-Uni pour faire des recherches sur un procédé électrolytique pour obtenir ce matériau sur des surfaces courbes en vue des applications en radiométrie. M. Nettleton fait aussi remarquer que le CCPR tend à oublier l'importance de la spectrophotométrie qui pourrait fournir les nouveaux matériaux dont on a besoin pour améliorer les méthodes radiométriques. M. Blevin approuve et remercie les participants pour tous les échanges de vues qui ont suivi le rapport du NIST.

Le NPL donne un compte rendu sur la mise au point des récepteurs à InGaAs pour lesquels on peut calculer la sensibilité spectrale jusqu'à 1600 nm. Le bon comportement des premiers récepteurs mis au point dans le cadre d'un contrat n'a pas été reproduit dans les séries ultérieures. Des récepteurs présentant une sensibilité quantique uniforme entre 1000 nm et 1650 nm, avec un rendement quantique interne de 98 %, devraient toutefois pouvoir être fabriqués. Ils demanderaient un étalonnage absolu à une longueur d'onde d'où l'on pourrait déduire l'étalonnage sur tout le reste du domaine à partir d'un modèle théorique. Des récepteurs utilisant le même matériau sont en cours de mise au point avec une sensibilité allant jusqu'à 2,5 μm et des récepteurs au carbure de silicium sont en cours de mise au point pour le domaine de l'ultraviolet. M. Boivin demande ce qu'il en est de l'uniformité des récepteurs en InGaAs. M. Nettleton répond que le rendement quantique élevé implique une bonne uniformité. Ces récepteurs ont un revêtement anti-réflexion et on pense que leur fonctionnement final sera aussi bon que celui des photodiodes au silicium de Hamamatsu que l'on utilise dans le visible. M. Nettleton ajoute que l'on peut modifier la courbe de sensibilité du SiC et que l'on envisage des récepteurs au diamant pour des applications dans l'ultraviolet. Toutes ces recherches sont faites dans le cadre de contrats avec des sociétés commerciales. Répondant à une question sur la comparaison entre les radiomètres cryogéniques du NPL et les radiomètres du PMOD, M. Nettleton indique qu'on a trouvé un accord à 0,3 % près; les résultats seront publiés dans *Metrologia*.

Le NRC rend compte des progrès faits sur des étalonnages de récepteurs à l'aide d'un monochromateur en utilisant un radiomètre cryogénique. L'exactitude finale reste encore à déterminer, mais les mesures actuelles se situent au niveau de 0,1 % avec une puissance d'entrée de 15 μW . On

cherche à atteindre une exactitude de 0,05 % dans le domaine spectral s'étendant de 400 nm à 1000 nm. M. Wende signale que le rayonnement du synchrotron est utilisé à la PTB à Berlin à des niveaux de puissance voisins de 1 μ W avec un radiomètre cryogénique et un monochromateur. Des fenêtres en béryllium refroidies et des tubes de sortie refroidis à l'azote liquide sont nécessaires pour réduire le rayonnement infrarouge parasite; on obtient de façon courante une exactitude de 0,6 %.

Le MSL/IRL rend compte de la mise au point d'une échelle de sensibilité spectrale fondée sur une modélisation du rendement quantique interne du silicium pour le domaine compris entre 400 nm et 900 nm, vérifiée par comparaison avec un radiomètre à substitution électrique à la température ambiante. Au niveau de 0,1 %, les détails du modèle sont relativement sans importance. Afin d'étendre le domaine de l'échelle de sensibilité spectrale dans l'ultraviolet jusqu'à 250 nm, on a mis au point avec succès des pièges à transmission à quatre éléments indépendants de la polarisation et des pièges à réflexion à cinq éléments. Les deux types de récepteurs à piège présentent une bonne reproductibilité aux longueurs d'onde de l'ultraviolet, mais la connaissance de leurs caractéristiques absolues est limitée par l'incertitude sur la variation du rendement quantique interne. M. Gardner renvoie aux rapports sur les récents travaux effectués aux États-Unis pour stabiliser le comportement des photodiodes au silicium dans l'ultraviolet; M. Parr pense que les recherches du NIST mentionnées concernent des longueurs d'onde très courtes et utilisent le synchrotron du NIST.

L'OFMET n'a pas les moyens de mettre au point des étalons primaires; il transfère donc ses échelles grâce à la collaboration d'EUROMET. M. Blevin constate que l'organisation d'EUROMET est efficace dans ce domaine.

La PTB a entrepris des vérifications annuelles de ses échelles d'intensité lumineuse par rapport à un radiomètre cryogénique. Ce laboratoire va changer de méthode de mesure: la sensibilité spectrale du récepteur filtré pour $V(\lambda)$ sera mesurée de façon absolue par rapport au radiomètre cryogénique à toutes les longueurs d'onde, plutôt qu'en étalonnant la valeur absolue de la répartition spectrale relative mesurée par d'autres moyens. La PTB va fonder toutes ses échelles sur la radiométrie cryogénique, y compris celle des températures du corps noir qui est fondée habituellement sur la pyrométrie. On envisage de nouvelles conceptions de la cavité pour les radiomètres cryogéniques qui seront utilisés avec des rayonnements autres que ceux des lasers. M. Metzdorf montre le prototype d'un récepteur thermopile à couche mince. Celui-ci a une surface sensible de 7 mm de diamètre, il est uniforme à 1 % près sur 5 mm, avec un revêtement noir en argent ou en or. La sensibilité du récepteur de 3 k Ω est supérieure ou égale à 10 V/W, avec un temps de réponse de 1 seconde dans le vide ou de 0,5 seconde dans l'air. M. Metzdorf rend aussi compte des améliorations apportées au goniophotomètre de la PTB, qui est maintenant équipé de

moyens permettant d'étudier des sources colorées et de récepteurs de contrôle de la stabilité de la source de telle sorte que l'on peut mesurer plus rapidement qu'auparavant des lampes de types plus variés.

L'OMH donne des détails sur la façon dont ce laboratoire effectue ses mesures en photométrie et en spectroradiométrie, à partir de la radiométrie fondée sur des récepteurs au silicium.

L'IOM indique qu'un radiomètre cryogénique a été utilisé pour fournir un étalonnage absolu de son photomètre. Il a obtenu une exactitude de 0,3 % pour en déduire la candela.

L'IEN a mis au point une méthode synthétique pour fabriquer des filtres $V(\lambda)$ améliorés. Son goniophotomètre a été amélioré en ajoutant un deuxième récepteur pour mesurer la lumière parasite provenant des parois. L'IEN se préoccupe beaucoup des besoins métrologiques de l'industrie.

Le VNIIOFI donne des détails sur la mise au point de corps noirs à haute température, utilisant des anneaux en graphite pyrolytique. On en a fait fonctionner à 3200 K, sans fenêtre, pendant 40 heures. Les corps noirs ont une ouverture de 20 mm, avec une bonne uniformité sur l'ouverture. Les travaux en radiométrie cryogénique ont été interrompus par suite de restrictions en hélium liquide.

Le NIM mentionne que des sources à mini-arc, à argon, stabilisées par effet de paroi, mises au point pour la mesure de l'éclairement énergétique dans le domaine spectral de 200 nm à 400 nm, ont été comparées avec une source synchrotron; l'accord a été de 2 %. Une comparaison semblable d'une source à corps noir à 2300 K avec le synchrotron a donné un accord de seulement 5 % à 8 %.

Le BIPM s'est bien équipé pour étudier le comportement et effectuer l'étalonnage des photodiodes au silicium. Un radiomètre cryogénique a été acheté et une comparaison directe des radiomètres cryogéniques du BIPM et de l'INM est en cours.

4.2 Nécessité d'utiliser les unités SI pour toutes les mesures

La PTB rend compte de travaux visant à constituer une échelle mondiale photovoltaïque comme référence SI pour les cellules solaires, car l'accord est médiocre dans les milieux qui emploient les cellules solaires lorsqu'on utilise le soleil lui-même comme référence. M. Nettleton ajoute que l'efficacité des cellules solaires est importante sur le plan commercial et que des méthodes spécifiques et une échelle indépendante ont été établies pour cet usage. MM. Blevin et Metzdorf estiment qu'il serait préférable que les mesures soient reliées à la référence radiométrique mondiale (WRR) ou directement aux unités du SI. Les mesures de la PTB assurent un lien entre les cellules solaires et la référence radiométrique mondiale avec une exactitude d'environ 1 %. M. Parr indique que le NIST coordonne les mesures entre les groupes solaires américains au sol et sur satellites,

et que l'emploi des unités du SI assurerait l'universalité. M. Quinn insiste fortement sur le besoin d'exactitude, plutôt que d'uniformité; le rattachement au SI assurerait l'exactitude à long terme. M. Nettleton fait remarquer que l'Agence spatiale européenne (ESA) a besoin aussi de la liaison avec le SI; le CCPR devrait peut-être constituer un groupe de travail pour assurer les relations avec ce type d'agence. M. Wende mentionne que l'une des raisons de la réunion de Berlin sur les mesures effectuées dans l'espace était le besoin qu'ont les groupes de l'ESA et de la NASA de disposer de données solaires dans l'ultraviolet d'une grande exactitude; la PTB envisageait de relier ces mesures aux échelles de BESSY1.

Un petit groupe de travail est constitué pour rédiger un projet de recommandation à présenter par le CCPR au CIPM sur la nécessité d'exprimer les résultats des mesures en unités du SI dans tous les domaines concernés. M. Parr précise qu'il faudrait que cette recommandation soit portée à la connaissance des organismes gouvernementaux et privés qui sont concernés par les problèmes de l'environnement et les expériences dans l'espace. M. Gardner fait remarquer que dans bien des domaines touchant la santé, l'efficacité biologique spectrale n'est pas bien définie. M. Nettleton effectue une analogie avec la fonction $V(\lambda)$, pour laquelle l'efficacité spectrale est définie par un organisme spécialisé et le lien avec les unités du SI s'effectue à un point de référence. M. Bastie rappelle l'historique des efficacités photobiologiques spectrales. M. Blevin souligne la nécessité de se rapporter aux unités du SI conservées dans les laboratoires nationaux pour assurer une continuité à long terme et pouvoir comparer des résultats provenant d'origines différentes. M. Metzdorf aimerait que la recommandation mentionne spécifiquement les applications de l'énergie solaire, en raison de l'importance croissante de ce domaine du point de vue économique, mais le comité a le sentiment que cela sera inclus si l'on fait référence de façon plus générale aux problèmes liés à l'environnement.

5. Rapport du Groupe de travail sur la radiométrie spectrale pour l'ultraviolet dans l'air

5.1 Activités récentes du groupe de travail

M. Wende se réfère au rapport sur l'état d'avancement des travaux (CCPR/94-3). Ce rapport est un résumé détaillé des caractéristiques et des disponibilités actuelles des sources étalons et des récepteurs étalons pour le rayonnement dans le domaine spectral compris entre 200 nm et 400 nm. Pour des longueurs d'onde inférieures à 250 nm, l'exactitude des sources étalons est limitée par la faible émission des radiateurs thermiques, le manque d'arcs à plasma pour ce domaine, la médiocre stabilité des étalons de transfert, et la disponibilité restreinte des anneaux de stockage d'électrons. L'exactitude des récepteurs étalons est limitée

par leur médiocre stabilité et leur faible sensibilité associée à l'absence de sources intenses, au manque de récepteurs à semiconducteur dotés d'une sensibilité spectrale convenable, et à l'impossibilité d'interpoler la sensibilité des récepteurs sur des bases théoriques.

M. Nettleton rend compte d'une comparaison internationale pilote à la fois de luminance énergétique spectrale et d'éclairement énergétique spectral dans le domaine compris entre 200 nm et 400 nm. Le NIST, le NPL, la PTB (Braunschweig) (éclairement énergétique seulement), la PTB (Berlin) (luminance énergétique seulement) y ont pris part ; le VNIIOFI y prendra part bien qu'il n'ait pas encore reçu les lampes. Un type de lampe à filament de tungstène (éclairement énergétique seulement) et trois types différents de lampes à deutérium ont circulé. La stabilité des lampes à filament de tungstène est d'environ 0,5 % sur tout le domaine spectral. Les mesures du NIST donnent une différence d'environ 3 % par rapport à celles du NPL à 350 nm, dans la direction opposée, et la PTB (Braunschweig) environ 3 %. Ces différences sont supérieures à celles que l'on a constatées pour la comparaison d'éclairement énergétique spectral de 1990, mais elles sont inférieures aux incertitudes-types. Les lampes à deutérium manifestent un vieillissement et ont une moins bonne reproductibilité que les lampes à filament de tungstène ; la dispersion du rapport des mesures d'éclairement énergétique spectral entre les laboratoires est inférieure à ± 5 %, toujours inférieure aux incertitudes-types. La stabilité de la luminance énergétique relative spectrale des lampes à deutérium est de l'ordre de ± 2 %, meilleure que celle des lampes d'éclairement énergétique spectral. Les lampes Heraeus ont un meilleur fonctionnement que les lampes Cathodeon ou Hamamatsu. Les variations de la valeur absolue entre les laboratoires sont de l'ordre de 5 %, toujours dans les limites des incertitudes-types. M. Nettleton conclut que les échelles du NIST, du NPL et de la PTB concordent à l'intérieur de leurs limites respectives d'incertitude. Il note aussi qu'il faut un certain nombre de lampes à deutérium pour obtenir une luminance énergétique spectrale relative constante pour la moyenne d'un groupe, car ces lampes présentent individuellement aussi bien des augmentations que des diminutions de leur luminance énergétique spectrale à 250 nm pour des résultats ramenés à 350 nm. Il confirme que les lampes à deutérium utilisées étaient du type 30 W, les mêmes que celles qui sont mentionnées dans le document CCPR/94-3.

5.2 Discussion du rapport

M. Blevin demande si les échelles comparées étaient dérivées de façon indépendante. Les échelles relatives spectrales du NPL pour la luminance énergétique et l'éclairement énergétique sont obtenues à partir de lampes à deutérium. L'éclairement énergétique absolu est relié au radiomètre cryogénique par l'intermédiaire de la candela. La luminance énergétique absolue est actuellement reliée à l'échelle de température. M. Metzdorf

fait remarquer que l'échelle d'éclairement énergétique spectral de la PTB (Braunschweig) est dérivée à partir d'un corps noir; l'échelle de luminance énergétique spectrale de la PTB (Berlin) est dérivée à partir du synchrotron BESSY. M. Parr dit que la luminance énergétique et l'éclairement énergétique au NIST sont dérivés à partir d'un corps noir au point de l'or, lui-même relié à un radiomètre cryogénique. L'éclairement énergétique relatif spectral au-dessous de 250 nm est obtenu à partir d'une lampe à arc à hydrogène.

M. Nettleton indique que les incertitudes citées combinent les incertitudes de l'échelle et de la comparaison. M. Parr ajoute que le NIST est préoccupé par l'exactitude des mesures aux longueurs d'onde de l'ultraviolet, en particulier pour les applications spatiales. La comparaison va donner de l'impulsion à des recherches ultérieures en vue d'améliorer l'exactitude des mesures. M. Metzdorf dit que des recherches sont aussi en cours à la PTB pour améliorer les mesures dans l'ultraviolet. M. Wende ajoute que l'exactitude de la comparaison est davantage limitée par le transfert que par l'exactitude des étalons absolus. M. Sapritsky estime qu'améliorer l'exactitude aux longueurs d'onde de l'ultraviolet constitue un important domaine de collaboration. Il donne des détails sur les améliorations apportées aux corps noirs du VNIIOFI pour constituer des sources de grande surface à température élevée avec une bonne uniformité. Pour cela on utilise des dispositifs avec des tubes en graphite et des anneaux en graphite pyrolytique prévus pour fonctionner à 3200 K.

5.3 Autres techniques

M. Onuki présente des données concernant diverses sources dans l'ultraviolet. L'ETL a récemment utilisé le rayonnement d'un onduleur pour faire des mesures. Ce rayonnement est environ mille fois plus intense que celui d'une source à déviation magnétique; il fournit une puissance suffisante pour faire fonctionner un radiomètre à substitution électrique, cryogénique ou à température ambiante. Le rayonnement de l'onduleur est difficile à calculer avec exactitude, et il faut effectuer un étalonnage absolu avec un radiomètre. M. Wende donne des indications sur la mise au point à la PTB d'une source onduleur. On envisage d'obtenir des niveaux de puissance de 10 mW dans l'ouverture d'un radiomètre cryogénique aux longueurs d'onde de l'ultraviolet, avec une largeur de bande d'environ 1 %. M. Onuki indique que la largeur de bande pour la source onduleur prototype de l'ETL est de 25 %, mais on espère atteindre 7 % en poursuivant le travail. M. Boivin fait remarquer qu'une source de ce type est seulement quasi-monochromatique et que le manque de pureté spectrale limitera l'exactitude lors des étalonnages de transfert. M. Parr note que la luminance énergétique spectrale d'une source onduleur est approximativement 10^8 fois plus grande que ce dont on a besoin dans la plupart des applications. M. Onuki répond que l'onduleur

n'est pas la source qui convient pour les utilisations à faible niveau ; il est plus approprié de l'utiliser comme source pour étalonner des récepteurs de transfert. M. Metzdorf signale qu'avec une source onduleur il faut considérer d'autres problèmes comme la linéarité, la polarisation, le champ de vision, la durée des impulsions et la cadence d'utilisation.

M. Nettleton ajoute que le NPL utilise des rayonnements laser pour avoir des niveaux de puissance élevés dans l'ultraviolet. Les radiomètres à filtre sont étalonnés avec un laser accordable et un radiomètre cryogénique, en cherchant à atteindre une exactitude de 0,1 %. Le large domaine dynamique des photodiodes au silicium est alors utilisé pour passer aux niveaux de puissance inférieurs dont on a besoin dans la plupart des applications. M. Wende indique que la source anneau de stockage fournit aussi un large domaine dynamique de flux, car on peut faire varier le courant dans l'anneau depuis plusieurs milliampères jusqu'à ne laisser qu'un seul électron en circulation. M. Blevin demande quelle est l'exactitude des calculs pour la source onduleur. M. Wende répond que, pour obtenir une exactitude de 1 %, on doit connaître le champ magnétique à 0,5 % près. M. Onuki montre des résultats obtenus à l'ETL, pour lesquels l'accord entre les mesures et les calculs est médiocre. M. Bittar demande quel est l'effet d'une source aussi brillante sur la stabilité des matériaux et M. Onuki répond que les problèmes de matériaux, en particulier pour les fenêtres, ne sont pas encore résolus.

M. Blevin demande à M. Nettleton des explications complémentaires sur le travail fait au NPL sur la modélisation de la sensibilité des photodiodes. Celui-ci répond que la modélisation est une extension des travaux antérieurs effectués par M. Geist pour les photodiodes au silicium. Cela comprend la mesure de la structure des photodiodes comme par exemple les diodes Hamamatsu couramment utilisées. Il est peu probable que l'on atteigne une exactitude de 0,1 % pour la sensibilité. Pour les récepteurs dans l'ultraviolet, dont le pic est situé à environ 350 nm, le NPL s'intéresse aux matériaux tels que le diamant, mais cela tend à être onéreux pour des surfaces de 1 cm² comme celles dont on a besoin.

5.4 Activités futures en radiométrie dans l'ultraviolet

Le président souligne que l'accroissement de l'intérêt pour les mesures dans l'ultraviolet montre l'importance du groupe de travail sur la radiométrie spectrale pour l'ultraviolet dans l'air et que celui-ci doit poursuivre son action. L'échange de vues porte sur les recommandations de ce groupe de travail (CCPR/94-3, page 14). M. Wende rappelle qu'il faut s'intéresser aux progrès faits à la fois sur les sources et sur les récepteurs. Il faut améliorer les sources corps noir à haute température ; une incertitude de 0,6 K à 2800 K est nécessaire pour avoir une incertitude de 0,5 % sur une luminance énergétique spectrale à 250 nm. Les recherches sur les anneaux de stockage, calculables à 0,2 % près, doivent être centrées sur

l'amélioration du transfert des étalonnages. Les sources que l'on utilise comme étalons de transfert pourraient être améliorées en leur ajoutant des récepteurs de contrôle. On devrait pouvoir étudier et améliorer les récepteurs en utilisant des sources à haute puissance et des radiomètres cryogéniques, avec l'objectif d'étalonner la sensibilité des photodiodes avec une exactitude de 0,1 %. On a besoin de radiomètres à filtre pour les longueurs d'onde de l'ultraviolet. La modélisation fondée sur la physique de l'état solide pourrait améliorer l'interpolation de la sensibilité des photodiodes. Il faut mettre au point de meilleurs récepteurs de transfert, ayant une bonne stabilité et une bonne réjection de la lumière visible. Il faut effectuer aussi des comparaisons pour unifier les différentes méthodes fondées sur les radiateurs à corps noir, les anneaux de stockage et les radiomètres cryogéniques.

Le président remercie M. Wende et son groupe de travail pour leur action. Il note que les intérêts sont divers et que tous les laboratoires ne sont pas en mesure de s'intéresser à tous les domaines. Le comité approuve les recommandations concernant les travaux futurs et demande au groupe de travail de poursuivre son action comme précédemment, sous la direction de M. Wende. M. Blevin rappelle que ce sont les laboratoires qui sont membres du groupe de travail, étant bien entendu que les personnalités qui ont de l'expérience seront cooptées si besoin est pour effectuer le travail. M. Quinn suggère qu'un rapport provisoire soit soumis d'ici deux ans; M. Wende répond qu'il est prévu de faire un rapport dès que la comparaison pilote de luminance énergétique spectrale et d'éclairement énergétique spectral sera terminée. M. Nettleton estime que, puisque le CSIRO est en train d'achever la reconstitution de ses échelles de luminance énergétique spectrale et d'éclairement énergétique spectral, ce laboratoire devrait participer à cette comparaison pilote; le soin d'organiser cela est laissé au groupe de travail.

M. Blevin remercie les membres du CCPR pour le caractère très ouvert des échanges de vues sur ce point de l'ordre du jour.

6. Rapport du Groupe de travail sur les récepteurs corrigés $V(\lambda)$

6.1 Comparaison de photométrie utilisant des récepteurs corrigés $V(\lambda)$

M. Blevin commence par rappeler la décision prise lors de la précédente session du CCPR d'entreprendre une comparaison internationale de photométrie en utilisant des photomètres corrigés pour $V(\lambda)$, afin de comparer les valeurs de l'éclairement lumineux indépendamment de la méthode utilisée par chaque laboratoire pour établir son échelle d'intensité lumineuse. M. Dezsi présente le projet de document du groupe de travail (CCPR/94-7). Il indique que le principal problème est le choix du récepteur,

car beaucoup de laboratoires préféreraient utiliser leurs propres photomètres plutôt que d'en acheter de nouveaux, bien que l'on envisage des difficultés pour normaliser la monture et l'alimentation. Des contrôles bilatéraux entre laboratoires ont montré une bonne stabilité, et il semble qu'il ne soit pas nécessaire de faire une comparaison pilote. M. Blevin estime que le prix des efforts mis dans la comparaison dépasserait celui de l'acquisition de nouveaux photomètres. Il déplore que l'effort consacré par le laboratoire chargé de la coordination soit sous-estimé et il souhaite qu'on fasse tout pour éviter des différences dues à l'emploi de récepteurs différents. M. Quinn demande si ce que l'on compare ce sont des unités ou des grandeurs; il est convenu que c'est la sensibilité lumineuse, mesurée soit en A/lx soit en V/lx si les amplificateurs sont inclus, qui fait l'objet de la comparaison.

6.2 Discussion

M. Sapritsky indique que l'on dispose maintenant de filtres $V(\lambda)$ liquides qui sont de bonne qualité et qui ont donné de bons résultats lors de comparaisons. M. Gardner fait part d'informations qui tendent à prouver que la grandeur f'_1 que l'on utilise pour exprimer la conformité à $V(\lambda)$ ne constitue pas un bon indicateur pour cette comparaison; ce qui est le plus important c'est la sensibilité aux variations de la température de répartition (CCPR/94-4). M. Nettleton suggère d'utiliser plus d'une température de répartition pour avoir une possibilité d'expliquer les différences qui pourraient survenir au cours de la comparaison. Il est aussi suggéré de définir une monture commune. Le laboratoire pilote n'aurait alors besoin de connaître que la distance du décalage entre la monture et le plan de mesure, puisque l'alignement de l'axe optique du faisceau est relativement simple.

Un échange de vues se déroule ensuite sur l'organisation de la comparaison car cela jouera sur la charge de travail du laboratoire pilote et partant sur le choix des photomètres. L'accord général se fait en faveur d'une comparaison internationale complète en étoile, commençant et se terminant au laboratoire central; toutefois M. Köhler fait remarquer que lors des comparaisons précédentes qui ont suivi cette méthode il a fallu recourir à des plans d'exécution flexibles. M. Blevin réplique que toute comparaison comprenant un nombre de laboratoires important, comme cela risque d'être le cas, doit avoir un schéma simple pour le laboratoire pilote, et que la charge de travail pour tenir compte des distances ou d'autres paramètres doit être supportée par les laboratoires participants. Il fait remarquer que le coût des photomètres concernés est inférieur à ce qui est courant pour les lampes utilisées dans les comparaisons. Un petit groupe de travail est formé pour arrêter les derniers détails qui seront discutés ultérieurement en séance plénière lors de la discussion sur les futures comparaisons internationales.

7. Rapport du Groupe de travail sur les lampes étalons

M. Blevin rappelle au comité que le groupe de travail sur les lampes étalons a été constitué pour tenter de remédier à la difficulté de se procurer les lampes spéciales que l'on utilise en photométrie et en radiométrie. M. Köhler présente un bref rapport sur l'état des recherches de ce groupe de travail (CCPR/94-5). Trois lampes d'intensité lumineuse de fabrication russe ont fait l'objet d'essais; deux ont cassé en cours de vieillissement. Trois lampes d'intensité lumineuse du NIM ont aussi fait l'objet d'essais; leur qualité a été jugée comparable à celle des lampes NPL/GEC et Osram utilisées lors de la dernière comparaison.

M. Saunders fait remarquer qu'aux États-Unis d'Amérique on utilise de plus en plus des lampes à halogène en quartz comme étalons à la fois d'intensité lumineuse et d'éclairement énergétique spectral; ce type de lampe fonctionne bien au-dessus de 2856 K, la température de répartition de l'illuminant A normalisé de la CIE. La stabilité de ces lampes était comparable à celle des lampes étalons d'intensité lumineuse. M. Metzdorf mentionne qu'à la PTB on mesure aussi les grandeurs lumineuses pour les lampes à halogène en quartz. Il indique aussi que la société Osram accroît ses efforts pour développer la production de ses lampes de la gamme Wi, destinées à des usages scientifiques, en raison de la poussée pour adopter des critères de qualité dans la production courante des lampes.

M. Metzdorf présente les résultats des essais de vieillissement pour le nouveau type de lampe Osram Sylvania FEL mis au point aux États-Unis d'Amérique (CCPR/94-5). Les sauts que l'on constate aux alentours de 400 heures correspondent à une déformation du filament qui est évidente à l'examen visuel. Sur sept lampes mesurées, trois ont présenté un tel saut. La stabilité de la lampe dépend aussi du courant. La meilleure stabilité est obtenue pour un courant spécifique, et par conséquent pour une température de répartition particulière pour chaque lampe. Jusqu'ici, aucune vérification de la stabilité en présence de vibrations n'a été faite.

M. Nettleton indique qu'au Royaume-Uni la société Polaron a repris la production de lampes du laboratoire de recherche de GEC Hirst. Elle continue à mettre au point des lampes étalons d'intensité lumineuse de grande qualité, avec de bons résultats conformes à la loi de l'inverse carré, ainsi que des lampes étalons de flux lumineux dont l'uniformité spatiale est excellente. Le NPL a aussi passé un contrat avec la société Hannovia (Royaume-Uni) pour la production de lampes pour l'ultraviolet. M. Saunders signale que des sources dans l'ultraviolet excitées par micro-ondes et délivrant une grande intensité avec une bonne stabilité sont mises au point au NIST. M. Onuki rapporte que les fabricants japonais ne produisent pas de lampes destinées spécifiquement à servir d'étalons, mais qu'il existe des lampes de bonne qualité de fabrication chinoise.

8. Rapport sur la comparaison internationale de mesures de sensibilité spectrale de photodiodes au silicium

8.1 Rapport sur la comparaison

M. Köhler présente des détails du rapport écrit sur la comparaison internationale de mesures de sensibilité spectrale de photodiodes au silicium (CCPR/94-2 et -2a). Quatorze laboratoires ont participé au premier tour et quatre autres au second tour d'une comparaison de sensibilité spectrale de récepteurs à silicium, en utilisant à la fois des diodes simples et des pièges. La résistance de shunt, la linéarité, le coefficient de température et l'uniformité de la sensibilité ont été mesurées pour tous les récepteurs. Les incertitudes sur la comparaison des échelles étaient inférieures, environ d'un facteur dix, aux incertitudes absolues qui sont données de façon courante pour définir les échelles dans les laboratoires nationaux. On a trouvé que l'exposition à l'ultraviolet affectait la stabilité des photodiodes pour les courtes longueurs d'onde. Aux longueurs d'onde de l'ultraviolet, on a atteint une stabilité d'environ $\pm 0,15$ %, ce qui est à comparer à environ 0,05 % aux longueurs d'onde du visible. Les récepteurs à pièges ont présenté moins de variations entre les laboratoires que les diodes simples. Environ 60 % des résultats des laboratoires comparés à l'échelle du BIPM concordent à l'intérieur de leurs incertitudes-types.

À la suite des observations faites au cours de la comparaison, on a étudié l'effet de l'exposition à l'ultraviolet sur la sensibilité des photodiodes aux courtes longueurs d'onde. Une brève exposition à l'ultraviolet avant les mesures réduisait la vitesse du vieillissement. Les récepteurs à piège ont présenté moins de dérive aux courtes longueurs d'onde que les photodiodes à élément unique parce qu'ils avaient été traités par une exposition à l'ultraviolet avant les premières mesures.

M. Köhler fait remarquer que l'échelle du BIPM, qui a été établie récemment, est voisine de la moyenne des laboratoires participants. Il est vraisemblable que la différence que l'on remarque au voisinage de 1000 nm est due à une forte non-uniformité, elle-même due au faible coefficient d'absorption du silicium à cette longueur d'onde. On a pu constater quelques effets systématiques dans les échelles de différents laboratoires : des sauts de faible amplitude à des longueurs d'onde correspondant à un changement de réseau, montrant une petite erreur systématique due à de la lumière diffusée, ou des sauts lorsque les laboratoires changeaient de méthode de référence. Une conclusion claire de cette comparaison, c'est que la stabilité des récepteurs est suffisante pour que l'on détecte de vraies différences dans les échelles nationales.

8.2 Discussion

Le président fait des commentaires sur la stabilité clairement démontrée des instruments qui ont circulé. On a constaté un excellent accord entre certains laboratoires, en particulier aux longueurs d'onde du visible. Des laboratoires nouvellement venus aux travaux en radiométrie ont eu de bons résultats, à côté de laboratoires dont l'expérience est plus ancienne et qui ont investi dans le passé des efforts considérables dans ce domaine. Cette comparaison a permis à certains laboratoires d'identifier clairement les raisons des désaccords observés, et par conséquent d'améliorer leurs mesures. M. Blevin estime que ce résultat est satisfaisant et que le rôle du laboratoire pilote y a été pour beaucoup.

M. Nettleton félicite le BIPM pour le détail et la qualité de ses travaux. Le fait d'utiliser deux types de récepteurs, diodes simples et ensembles de diodes montées en piège, a d'évidence facilité l'identification des problèmes. Le NPL a rapproché les résultats de cette comparaison de ceux de la précédente comparaison d'intensité lumineuse afin d'identifier les différences communes aux deux échelles (actuelle et précédente) d'un même laboratoire. Il présente au comité un tableau, mais il apparaît qu'on ne peut en tirer aucune conclusion évidente car plusieurs laboratoires ont utilisé des méthodes différentes pour obtenir ces deux différentes échelles.

M. Boivin demande des détails supplémentaires sur les changements constatés dans les récepteurs. M. Köhler répond que des modifications nettes de la sensibilité ont été constatées après exposition à l'ultraviolet. Des indications détaillées seront présentées à la conférence NEWRAD. Il ne s'agit pas d'un effet superficiel dû au facteur de réflexion. Un rayonnement à courte longueur d'onde (248 nm) pourrait être utilisé pour vieillir les diodes, et une saturation de l'effet de vieillissement a été observée. Les pièges utilisés dans la comparaison ont été exposés au rayonnement ultraviolet, puis laissés de côté pendant deux semaines avant de reprendre les mesures.

Pour M. Köhler, la raison principale de la différence de comportement entre les récepteurs à piège et les diodes simples provient de la réflexion réduite des pièges. Les photodiodes Hamamatsu S 1337 utilisées ont un facteur de réflexion d'environ 35 %. M. Gardner parle des effets de réflexion lorsqu'on compare des diodes S 1337, avec une mince couche d'oxyde, à des photodiodes UV 100 pour lesquelles l'épaisseur d'oxyde est d'environ 300 nm. De faibles décalages angulaires entre ces deux types de récepteurs peuvent conduire pour les longueurs d'onde courtes à des erreurs d'environ 1 % sur la sensibilité, qui dépendent fortement de la longueur d'onde. M. Boivin précise que les photodiodes avec des fenêtres fournies par le fabricant, comme celles qui ont été utilisées dans la comparaison, semblent moins uniformes dans les domaines du bleu et de l'ultraviolet que les photodiodes dépourvues de fenêtre du type S 1337. M. Köhler répond

que le BIPM a fait la même observation et suggère que cela peut être dû à des réflexions entre la fenêtre et la surface de la diode. M. Köhler ajoute que l'accroissement de la dispersion entre laboratoires de la sensibilité mesurée au voisinage de 1 μm pourrait être lié à la non-uniformité sur la surface du récepteur parce que le silicium devient transparent.

M. Li remarque qu'un fort désaccord de 4 % sur la valeur absolue pour les résultats du NIM était dû à des effets de cohérence dans la fenêtre; le NIM a utilisé une source laser pour transférer la valeur absolue. Des mesures ultérieures avec un monochromateur comme source ont confirmé cette cause d'erreur. Des mesures avec piège à 633 nm ont montré un accord de 0,3 % avec le résultat du BIPM, après correction d'une faute typographique dans les résultats (CCPR/94-9).

Le président oriente la discussion vers les problèmes de stabilité des récepteurs et les différences entre les différentes échelles constatés dans cette comparaison. M. Köhler indique que la reproductibilité des mesures au BIPM était de l'ordre de 0,1 %. L'exposition à l'ultraviolet affecte la stabilité de façon différente aux différentes longueurs d'onde, mais la stabilité aux longueurs d'onde de l'ultraviolet est encore de l'ordre de 0,1 %. La stabilité des récepteurs est considérée comme la source d'erreur la plus faible dans la comparaison aux courtes longueurs d'onde. Les possibilités de mesure du BIPM sont la deuxième grande source d'incertitude, mais la plus forte contribution vient de l'établissement de l'échelle elle-même dans les différents laboratoires. M. Nettleton constate que les résultats de la plupart des laboratoires concordent dans les limites de leurs incertitudes-types et que par conséquent ils connaissent la source d'incertitude.

M. Blevin estime qu'un nouveau questionnaire est nécessaire, pour que chaque laboratoire national décrive en détail comment il a établi son échelle de sensibilité spectrale dans le domaine compris entre 200 nm et 400 nm. Les laboratoires pourraient aussi donner des indications sur toutes les modifications qu'ils ont apportées à leur échelle de sensibilité spectrale à la suite de cette comparaison. M. Köhler est d'accord pour préparer un questionnaire approprié.

9. Programme de travail du BIPM en photométrie et en radiométrie pour les années à venir

Le président invite le directeur à présenter ses commentaires sur le programme de travail du BIPM en photométrie et radiométrie pour les années à venir. M. Quinn rappelle que le rôle du BIPM, dans son principe, est de comparer les réalisations des unités SI telles qu'elles sont effectuées par les différents laboratoires nationaux, et d'assurer des étalonnages fondés sur les résultats de ces comparaisons, au bénéfice des pays qui ne disposent pas de réalisations indépendantes. Les travaux que le BIPM pourrait entreprendre dans l'un ou l'autre domaine sont limités

par la nécessité de disposer d'un personnel suffisant. La collaboration et l'aide apportées par le personnel des laboratoires nationaux au BIPM sont bienvenues. Au cours des quatre années qui viennent de s'écouler le BIPM a beaucoup investi dans la radiométrie. Pour ce qui est du personnel, dans l'ensemble il y a eu des réductions au cours de cette même période, et bien qu'une amélioration en effectif puisse être envisagée, il est nécessaire de poursuivre les travaux dans les domaines déjà mis en œuvre.

M. Wende suggère que le radiomètre cryogénique du BIPM pourrait servir à établir une échelle du corps noir à haute température. Les recherches actuelles montrent qu'il existe des différences entre l'échelle thermodynamique et l'EIT-90. Une étroite coopération entre le CCPR et le CCT est nécessaire. M. Metzdorf estime que ce travail est déjà effectif dans les laboratoires nationaux et que l'effort que cela implique est peut-être trop grand pour que le BIPM s'y engage. M. Sapritsky pense que c'est un des domaines possibles de collaboration, et M. Wende propose que le corps noir pourrait venir d'un des laboratoires nationaux pour être mesuré avec le radiomètre du BIPM. M. Blevin est d'avis que le BIPM serait le plus apte à travailler sur un aspect de cette question. M. Nettleton suggère que ce pourrait être l'effet de diffraction aux ouvertures. M. Quinn souligne que le CCT a déjà proposé d'utiliser le radiomètre cryogénique pour la mesure des températures thermodynamiques, et que le BIPM travaille sur les problèmes de diffraction.

M. Nettleton estime que cela vaudrait la peine de poursuivre les recherches liées aux problèmes soulevés pour les mesures dans l'ultraviolet. Le BIPM pourrait se mettre en relation avec les laboratoires nationaux pour accéder à des équipements nouveaux. La qualité des lampes à tungstène utilisées dans la comparaison pilote de luminance énergétique spectrale dans l'ultraviolet et d'éclairement énergétique spectral s'est avérée étonnamment bonne, comparée à ce qu'il en est pour les autres comparaisons de lampes. Cela peut être l'indice que l'on a des difficultés à comprendre le fonctionnement des lampes, et il pourrait être utile de faire des recherches dans ce domaine.

M. Parr ajoute que le NIST travaille sur la diffraction, en liaison avec les besoins des utilisateurs dans l'infrarouge. Il précise que le domaine compris entre 200 nm et 400 nm est très important. La mise au point de récepteurs uniformes et stables pour ce domaine est très délicate. Il indique aussi qu'il est nécessaire de repérer les laboratoires qui disposent de l'exactitude élevée qu'offrent les radiomètres cryogéniques ; neuf laboratoires possèdent ou posséderont prochainement des radiomètres de ce type.

M. Metzdorf pense qu'il est nécessaire de mettre au point des étalons de transfert stables pour les mesures dans l'ultraviolet. Il est probablement nécessaire que d'autres progrès soient faits dans les laboratoires nationaux avant que le BIPM ne s'implique dans ce domaine.

10. Futures comparaisons internationales

Le comité passe en revue les sujets de comparaison que l'on peut envisager. La température de répartition fait l'objet d'une brève discussion, mais ce sujet n'est pas considéré comme suffisamment important car il dérive de la répartition spectrale de puissance. Les mesures de couleur sont aussi suggérées, mais ce sujet relève davantage du domaine industriel. Les autres sujets font l'objet d'une discussion détaillée.

10.1 Sensibilité lumineuse en utilisant des photomètres corrigés $V(\lambda)$

M. Köhler indique que le groupe de travail sur les récepteurs corrigés $V(\lambda)$ a finalement recommandé que cette comparaison de sensibilité soit du type en étoile; chaque laboratoire fournirait deux photomètres, le BIPM, servant de laboratoire pilote, contrôlerait la stabilité de chaque photomètre en effectuant des mesures avant et après chaque laboratoire. Une liste spécifique de photomètres que l'on trouve dans le commerce sera préparée. Le BIPM et le CSIRO sont disposés à prêter des photomètres pour la comparaison aux laboratoires qui ne pourraient s'en procurer. D'autres laboratoires sont invités à en faire autant.

Un domaine d'éclairage lumineux sera spécifié pour les mesures, avec un second domaine en option. Une température de répartition de 2856 K, correspondant à l'Illuminant A normalisé de la CIE, sera spécifiée, avec une deuxième température, probablement voisine de 3100 K, en option. La préférence est donnée à des têtes de photomètre sans amplificateur, avec contrôle de température alimenté en courant continu, sans correction de cosinus et avec filtrage complet, mais cela sera déterminé selon ce que l'on trouvera. Les participants seront informés de la liste définitive des photomètres qu'il conviendra d'utiliser.

M. Blevin précise que le but de la comparaison n'est pas de trouver le meilleur photomètre, mais de comparer les valeurs de la sensibilité lumineuse déterminées par les laboratoires. Il appartient aux laboratoires de donner les caractéristiques des photomètres s'ils le souhaitent. La petite liste des types de photomètres disponibles réduira le travail du laboratoire pilote. M. Köhler indique que le BIPM a l'intention de se procurer des échantillons de chaque type de photomètre pour vérifier leur comportement comme étalons de transfert.

10.2 Comparaisons de lampes

M. Blevin rappelle que la comparaison de photomètres qui est envisagée conduira à déterminer si, pour les comparaisons, les récepteurs constituent des instruments voyageurs plus stables que les lampes utilisées antérieurement; toutefois il estime qu'il serait utile, au point où l'on en

est, de faire une autre comparaison à l'aide de lampes, à la fois pour l'intensité et pour le flux. M. Metzdorf propose que la PTB serve de laboratoire pilote, avec M. Sauter comme organisateur, puisque le BIPM ne peut pas assurer la charge de toutes les comparaisons internationales qui sont prévues. M. Nettleton propose l'aide du NPL comme second pôle, si le nombre des laboratoires participants est élevé.

M. Nettleton suggère que la comparaison soit effectuée à une température de répartition de 2856 K pour la relier à la comparaison des photomètres. M. Gaertner préfère que l'on en reste à 2800 K, température qui avait été utilisée lors de la précédente comparaison d'intensité lumineuse car le NRC a fondé ses échelles photométriques sur cette température. Un certain nombre de laboratoires souhaiteraient utiliser les mêmes lampes que lors de la précédente comparaison internationale. Il est convenu que le choix des lampes sera laissé au groupe de travail, en tenant compte de l'historique de la question et des récents progrès faits sur les lampes aussi bien chez Osram que chez Polaron. M. Metzdorf signale aussi la mise au point d'une nouvelle lampe Osram qui peut convenir à la fois pour l'intensité et pour le flux.

Le NIST et le NPL aimeraient que cette comparaison se déroule d'ici trois ou quatre ans car ces deux laboratoires sont en train d'améliorer leurs échelles de flux. M. Blevin répond qu'il y a toujours des laboratoires qui sont en train d'améliorer leurs échelles, et que l'annonce d'une comparaison peut agir comme aiguillon. Il est important de planifier les échéances de la comparaison internationale et de s'y tenir afin que les résultats soient obtenus comme prévu.

M. Metzdorf demande si seuls les laboratoires qui possèdent un goniophotomètre doivent y prendre part. M. Parr émet des réserves car la communauté des utilisateurs pourrait en conclure que les mesures avec sphère sont moins bonnes. Il est convenu que la comparaison doit comporter des mesures avec sphère et avec goniophotomètre, mais que les résultats seront analysés séparément. Le but principal est de comparer les flux lumineux, non les méthodes. M. Blevin fait remarquer que, alors que pour les industriels l'objectif de la comparaison internationale de flux serait de comparer les étalons des laboratoires nationaux *tels qu'ils sont conservés*, il faut essayer aussi d'évaluer dans quelle mesure ces étalons représentent bien le lumen tel qu'il est défini dans le SI.

10.3 Radiomètres cryogéniques

Le président signale que des comparaisons bilatérales directes de radiomètres cryogéniques ont déjà commencé, mais que cette pratique ne peut pas encore être généralisée. M. Saunders estime que le fonctionnement des récepteurs à pièges au cours de la comparaison de sensibilité spectrale s'est avéré convenable pour les utiliser comme étalons de transfert afin de comparer des radiomètres cryogéniques. M. Gardner croit que,

pour les mesures sur les lasers, c'est la qualité du faisceau, et tout particulièrement la diffusion autour du faisceau principal, qui risque de limiter l'exactitude d'une comparaison, plutôt que l'exactitude absolue du radiomètre cryogénique. M. Köhler fait remarquer qu'une quinzaine de récepteurs à piège sont disponibles à la suite de la dernière comparaison, mais M. Boivin est préoccupé par le fait que l'ouverture du faisceau accepté par ces pièges est trop petite. Un accord général se fait pour que la comparaison utilise des récepteurs à piège comme instruments de transfert, et que l'on s'en tienne à des mesures aux longueurs d'onde des lasers. Quelques laboratoires qui ne possèdent pas de radiomètre cryogénique seraient intéressés à participer à cette comparaison. M. Parr estime que le radiomètre cryogénique constitue un seuil pour la radiométrie de grande exactitude, et que tout l'effort doit se concentrer sur cette nouvelle technique. Des mesures qui ne seraient pas fondées sur les radiomètres cryogéniques pourraient être entreprises dans un second temps, mais la première comparaison internationale doit être limitée.

M. Blevin demande ce qu'il en est des tout derniers types de récepteurs à piège. M. Gardner répond que certains sont sensibles à la polarisation du faisceau lumineux, mais une simple mesure du facteur de transmission avec une sphère fournit un facteur de correction et permet ainsi d'étudier les erreurs systématiques qui résultent de l'utilisation du piège.

Pour M. Quinn, le BIPM est prêt à coordonner cette comparaison, car elle constitue la suite des travaux précédents. Il est convenu que les récepteurs à piège, aussi bien du type courant que du type à transmission, plus récent, doivent circuler comme instruments de transfert pour comparaison aux longueurs d'onde des lasers. La comparaison directe de radiomètres cryogéniques sur une base bilatérale est également encouragée. M. Quinn estime qu'il faut que le groupe de travail étudie le fonctionnement des récepteurs à piège et les méthodes d'utilisation en vue d'atteindre une exactitude de 1×10^{-4} . D'après M. Nettleton, l'expérience du NPL donne une exactitude de 2×10^{-4} . M. Gardner souligne la différence entre exactitude et reproductibilité. M. Köhler est d'accord et précise que l'expérience du BIPM a fait la preuve de mesures hautement reproductibles dans le même laboratoire, dans des conditions reproductibles, mais des variations plus grandes entre conditions différentes et laboratoires différents. M. Blevin rappelle que cette comparaison internationale doit constituer un test pour les radiomètres cryogéniques, et non pas pour les propriétés des récepteurs à piège.

10.4 Ouvertures

M. Saunders estime que la mesure de l'aire des ouvertures risque de devenir la prochaine difficulté à surmonter pour l'exactitude en radiométrie, en particulier lorsqu'on utilise des diamètres de 4 mm ou inférieurs. M. Boivin reconnaît que cela est important, mais une étude a été faite

au niveau européen il y a environ huit ans et ce travail n'incombe peut-être pas au CCPR. M. Blevin indique que la motivation concernant la mesure des ouvertures est venue directement des besoins des utilisateurs en radiométrie. On a rencontré aussi des problèmes avec l'étude des sols à partir de satellites. M. Quinn rappelle des essais antérieurs non couronnés de succès pour utiliser des rayonnements alpha afin de mesurer les ouvertures avec une exactitude élevée. Une conclusion antérieure était que pour atteindre une exactitude de 1×10^{-4} il fallait un diamètre minimal de 10 mm. Le comité a manifesté un intérêt suffisant pour que soient au moins effectuées des comparaisons bilatérales de mesures de l'aire des ouvertures.

10.5 Luminance énergétique spectrale de lampes à ruban

M. Sapritsky indique que ces lampes sont importantes en Russie, pour le domaine spectral compris entre 250 nm et 2500 nm. Le VNIIOFI et le NIST ont effectué une comparaison bilatérale, avec un accord de 1 %. La PTB (Berlin) a déjà exprimé son intérêt pour cette comparaison. Le VNIIOFI pourrait coordonner les mesures si une telle comparaison suscitait suffisamment d'intérêt.

10.6 Création et composition des groupes de travail

Le président attire l'attention sur la nécessité d'établir la priorité des domaines d'intérêt. Pour toute nouvelle recherche il convient de prévoir des mesures à effectuer au plus tard en 1996 pour avoir un rapport final en 1998. Il est demandé aux laboratoires d'indiquer pour chaque sujet qui les intéresse, s'il s'agit pour eux d'une activité vraiment prioritaire ou s'ils aimeraient y prendre part mais avec une priorité moindre. Les résultats du tour de table donnent : pour l'intensité lumineuse 11 (haute priorité) et 4 (moindre priorité), flux lumineux 10 et 6, sensibilité lumineuse 14 et 1, radiomètres cryogéniques 13 et 0, ouvertures 5 et 1, et luminance énergétique spectrale 2 et 3. Le président estime que toutes ces comparaisons doivent être faites, mais qu'il est peut-être préférable que la luminance énergétique spectrale reste une affaire bilatérale entre le VNIIOFI et la PTB. M. Sapritsky est d'accord pour inviter d'autres laboratoires à participer si cette coopération se réalise.

Les groupes de travail suivants sont créés :

— Sensibilité lumineuse : BIPM (responsable : R. Köhler), CSIRO, NPL, OMH et PTB (Braunschweig);

— Lampes (intensité et flux) : PTB (Braunschweig) (responsable : J. Metzdorf), BIPM, NIST, NPL;

— Radiomètres cryogéniques : BIPM (responsable : R. Köhler), CSIRO, NIST, NPL, NRC;

— Ouvertures : NIST (responsable : R. D. Saunders), NPL, PTB (Braunschweig).

On considère comme achevé le travail des précédents groupes sur l'éclairage énergétique spectral, la sensibilité aux longueurs d'onde utilisées en communication par fibres optiques, les récepteurs corrigés $V(\lambda)$, les lampes étalons et la sensibilité spectrale. Le président remercie les membres de ces groupes pour leur contribution.

Le travail du groupe de travail sur la radiométrie spectrale pour l'ultraviolet dans l'air va continuer avec comme participants : la PTB (Berlin) (responsable : B. Wende), l'ETL, le NIST, le NPL, la PTB (Braunschweig) et le VNIIOFI.

Le président rappelle aux responsables des groupes de travail qu'il leur est possible de coopter des spécialistes lorsque cela paraît profitable. Il indique aussi que certaines comparaisons internationales peuvent concerner des laboratoires qui ne sont pas représentés au CCPR quand ces laboratoires sont reconnus pour leur expérience et ont réalisé des échelles de façon indépendante.

11. Liens avec les groupes régionaux de métrologie

Le président invite les participants à donner au comité des informations sur les activités en cours à l'intérieur des différents groupes régionaux de métrologie.

M. Soardo parle d'EUROMET qui a été très actif pour fournir la traçabilité à de nombreux laboratoires, en particulier au niveau de l'industrie. Des comparaisons de lampes, comme celles à mercure ou à sodium à haute pression qui ne sont pas normalement de la compétence du CCPR, ont été entreprises au cours des dernières années, ainsi que des recherches sur les matériaux de référence pour les facteurs de réflexion et les mesures relatives aux luminaires. M. Nettleton remarque que la communauté européenne fournit des fonds pour la collaboration en métrologie. Des radiomètres cryogéniques ont été comparés avec des récepteurs quantiques à piège. La traçabilité de l'étalonnage des instruments de mesure de puissance dans des fibres optiques est assurée et une comparaison internationale est prévue.

M. Blevin annonce le transfert de la responsabilité de l'Asia/Pacific Metrology Programme (APMP) du KRISS au CSIRO. Des comparaisons en métrologie générale sont envisagées. La métrologie se développe rapidement dans cette région. On considère comme importante la publication des résultats des comparaisons internationales pour assurer la reconnaissance de la qualité des travaux effectués dans ces pays en voie de développement. Des comparaisons de lampes ont été entreprises dans

le passé. M. Bittar signale qu'on envisage de faire une comparaison de la sensibilité spectrale de récepteurs.

M. Parr dit que NORAMET (É.-U. d'Amérique/Canada/Mexique) s'occupe de mettre au point des systèmes d'accréditation de laboratoires et d'établir des accords d'équivalence entre laboratoires nationaux.

M. Sapritsky présente la situation actuelle en Europe de l'Est, qui n'est pas claire. De plus en plus les nouveaux États mettent sur pied leur propre métrologie et leurs liaisons. Une organisation appelée COOMET a été constituée.

M. Denner signale le système d'accréditation SANAS, qui a été établi à l'intérieur de l'Afrique du Sud.

M. Quinn évoque les liens qui s'établissent pour la métrologie entre l'Amérique du Sud et l'Espagne. Il fait remarquer que les résultats des comparaisons entre laboratoires nationaux organisées par des groupes comme le CCPR et publiés en résumé dans *Metrologia* ou toute autre publication extérieure peuvent servir de base pour des déclarations d'équivalence. Le président souligne que l'APMP comporte vingt pays rassemblant 50 % de la population mondiale. Le BIPM ne peut accueillir tous les pays dans ses comités consultatifs. Les quelques laboratoires de chaque groupe régional qui sont membres des comités consultatifs ont un rôle important à jouer en assurant la traçabilité pour les groupes régionaux.

12. Activités de la CIE

M. Bittar donne la liste des travaux en cours dans la Division 2 de la CIE sur la température de répartition, sur les nouvelles définitions des Illuminants A et D65 qui ne dépendent pas de l'échelle de température, sur les nouveaux documents décrivant les normes relatives à $V(\lambda)$ et $V'(\lambda)$ et sur les qualités des colorimètres. M. Blevin fait remarquer que les travaux en colorimétrie sont davantage du ressort de la CIE que du CCPR. M. Nettleton ajoute qu'au sein de la Division 1 de la CIE un groupe travaille sur une nouvelle fonction d'efficacité pour la photométrie mésopique.

13. Questions diverses

Il est convenu que la prochaine session du CCPR se tiendra aux environs du mois de septembre 1998.

Le directeur du BIPM signale qu'à cette époque-là M. Blevin sera à la retraite, et que la présente session est donc la dernière à laquelle il participe en tant que président. Il remercie M. Blevin pour son action au sein du CCPR en tant que membre depuis 1962 et en tant que président

depuis 1982. Cette période a été marquée par l'adoption d'une nouvelle définition de la candela, ce qui a entraîné un accroissement de l'activité et de l'exactitude en photométrie et en radiométrie. Au nom du BIPM et du CCPR, il souhaite à M. Blevin une longue et heureuse retraite.

14. Publication des documents

Le directeur du BIPM indique que pour cette session on suivra la pratique normale qui consiste à publier un rapport et à rassembler en un volume les documents de travail qui ne sont pas publiés par ailleurs. Des exemplaires de ce volume seront envoyés aux membres du CCPR, et quelques-uns seront conservés au BIPM pour, à l'avenir, servir de référence et faire face à d'éventuelles demandes.

Le président remercie tous ceux qui ont participé à cette session pour leur bonne volonté qui a permis d'atteindre des compromis et d'assurer une coopération efficace. La variété des comparaisons internationales qui vont être entreprises dénote un vif intérêt et montre que l'on est dans une période de progrès pour le comité. Jetant un regard sur les années passées, il prévoit que les comparaisons directes d'intensité lumineuse pourront être abandonnées à l'avenir mais seront remplacées par des comparaisons à l'aide de récepteurs servant d'étalons de transfert.

Le président déclare close la session.

Novembre 1994

**Recommandation
du Comité consultatif de photométrie et radiométrie
présentée
au Comité international des poids et mesures**

Nécessité d'utiliser les unités du SI pour exprimer les mesures des paramètres clés dans les recherches sur les ressources terrestres, l'environnement et les études connexes

RECOMMANDATION P 1 (1994)

Le Comité consultatif de photométrie et radiométrie (CCPR),

considérant que

— les effets des activités industrielles et commerciales sur la biosphère et leurs conséquences sur la santé et le bien-être humains font l'objet d'importantes études dans le monde entier,

— les gouvernements sont de plus en plus conduits à prendre des décisions réglementant ces activités, avec des répercussions économiques et politiques majeures,

— de nombreuses preuves scientifiques importantes sur lesquelles s'appuient ces décisions sont liées à la mesure de petites variations à long terme de certains paramètres clés, variations qui s'étendent parfois sur plusieurs décennies,

— d'importants programmes nouveaux, en particulier les grands programmes spatiaux tels que la *Mission to Planet Earth* et le *Solar Terrestrial Programme*, représentent de lourds investissements économiques, dont les conséquences sur la politique des gouvernements dépendent étroitement de l'exactitude et de la cohérence des mesures,

— dans l'étude des problèmes liés à l'environnement, à la santé et à l'exploitation des ressources terrestres, certaines mesures critiques ont été traditionnellement exprimées en utilisant des unités locales fondées sur des instruments et des méthodes spécifiques, et non pas les unités du SI, lesquelles sont bien définies et adoptées au niveau international,

— depuis de nombreuses années l'expérience montre que les mesures qui ne sont pas reliées directement au SI ne sont ni fiables à long terme, ni comparables aux mesures semblables faites ailleurs ni adaptées à la mise en évidence de relations avec les mesures faites dans d'autres domaines scientifiques,

recommande que les organisations chargées des études sur les ressources terrestres, l'environnement et les problèmes connexes fassent le nécessaire pour que les mesures effectuées dans le cadre de leurs programmes soient exprimées en unités bien définies du SI afin d'en assurer la fiabilité à long terme, la cohérence mondiale et le rattachement aux autres domaines scientifiques et techniques grâce au système de mesures mondial établi et conservé dans le cadre de la Convention du Mètre.

ANNEXE P 1

**Documents de travail
présentés à la 13^e session du CCPR**

Ces documents de travail peuvent être obtenus dans leur langue originale sur demande adressée au BIPM.

Document
CCPR/

- 94-1 Preliminary questionnaire, 1 p.
(R) Answers received to the questionnaire, 76 p.
 - 94-2 BIPM. — Report on the international comparison of spectral responsivity of silicon detectors, by R. Köhler, R. Goebel and R. Pello, July 1994, 71 p.
 - a) Annex to the report on the international comparison of spectral responsivity of silicon detectors, by R. Köhler, R. Goebel and R. Pello, July 1994, 23 p.
 - 94-3 Report of the Working Group on Air-Ultraviolet Spectral Radiometry to the Comité Consultatif de Photométrie et Radiométrie, Part I: Present State of Spectral Radiometry in the Air UV and Recommendations for Future Work, September 1992, 19 p.
 - 94-4 CSIRO (Australie). — Photometer sensitivity vs colour temperature (revised), July 1994, 3 p.
 - 94-5 Report to the CCPR of the Working Group on Standard Lamps, by J. Bonhoure, September 1994, 4 p.
 - 94-6 BIPM. — Discussion of future working programme in radiometry/photometry at the BIPM, 1 p.
 - 94-7 Recommendation of the Working Group on $V(\lambda)$ -corrected Detector, 3rd draft, August 1994, 2 p.
 - 94-8 PTB (Allemagne). — Working Group on $V(\lambda)$ -corrected Detector – Comments to the items in the draft (Dezsi) dated 07-27-1994, Recommendations, 2 p.
 - 94-9 NIM (Rép. pop. de Chine). — The interpretation about international comparison for spectral response of silicon diode, by Li Zaiqing, 1 p.
-

TABLE DES MATIÈRES
TABLE OF CONTENTS

COMITÉ CONSULTATIF
DE PHOTOMÉTRIE ET RADIOMÉTRIE

13^e session (1994)
13th Meeting (1994)

	Pages
Liste des sigles utilisés dans le présent volume	V
List of acronyms used in the present volume	V
Le BIPM et la Convention du Mètre.....	IX
Liste des membres du Comité consultatif de photométrie et radiométrie	XI
Ordre du jour	XIV
Rapport au Comité international des poids et mesures, par J. L. Gardner	P 1
1. Ouverture de la session	P 2
2. Discussion du rapport final sur la comparaison internationale d'étalons d'éclairement énergétique spectral	P 2
3. Discussion du rapport final sur la comparaison internationale de mesures de puissance rayonnante à trois longueurs d'onde dans l'infrarouge	P 3
4. Revue des progrès réalisés dans les laboratoires nationaux depuis la 12 ^e session (discussion des réponses au questionnaire)	P 4
4.1 Rapports des laboratoires	P 4
4.2 Nécessité d'utiliser les unités SI pour toutes les mesures	P 8
5. Rapport du Groupe de travail sur la radiométrie spectrale pour l'ultraviolet dans l'air	P 9
5.1 Activités récentes du groupe de travail	P 9
5.2 Discussion du rapport	P 10
5.3 Autres techniques	P 11
5.4 Activités futures en radiométrie dans l'ultraviolet	P 12

6. Rapport du Groupe de travail sur les récepteurs corrigés $V(\lambda)$	P 13
6.1 Comparaison de photométrie utilisant des récepteurs corrigés $V(\lambda)$.	P 13
6.2 Discussion	P 14
7. Rapport du Groupe de travail sur les lampes étalons	P 15
8. Rapport sur la comparaison internationale de mesures de sensibilité spectrale de photodiodes au silicium	P 16
8.1 Rapport sur la comparaison	P 16
8.2 Discussion	P 17
9. Programme de travail du BIPM en photométrie et en radiométrie pour les années à venir	P 18
10. Futures comparaisons internationales	P 20
10.1 Sensibilité lumineuse en utilisant des photomètres corrigés $V(\lambda)$...	P 20
10.2 Comparaisons de lampes	P 20
10.3 Radiomètres cryogéniques	P 21
10.4 Ouvertures	P 22
10.5 Luminance énergétique spectrale de lampes à ruban	P 23
10.6 Création et composition des groupes de travail	P 23
11. Liens avec les groupes régionaux de métrologie	P 24
12. Activités de la CIE	P 25
13. Questions diverses	P 25
14. Publication des documents	P 26

Recommandation présentée au Comité international des poids et mesures

P 1 (1994) : Nécessité d'utiliser les unités du SI pour exprimer les mesures des paramètres clés dans les recherches sur les ressources terrestres, l'environnement et les études connexes	P 27
--	------

Annexe

P 1. Documents de travail présentés à la 13 ^e session du CCPR	P 29
--	------

English text of the report

Note on the use of the English text. Note sur l'utilisation du texte anglais	P 31
The BIPM and the Convention du Mètre	P 33
Members of the Comité Consultatif de Photométrie et Radiométrie	P 35
Agenda	P 38

Report to the Comité International des Poids et Mesures, by J. L. Gardner.....

1. Opening of the meeting	P 40
2. Discussion of the final report on the international comparison of standards of spectral irradiance	P 40

3. Discussion of the final report on the international comparison of radiant power measurements at three infrared wavelengths	P 41
4. Review of progress by the national laboratories, since the 12th meeting (discussion of the answers to the questionnaire)	P 42
4.1 Reports from the laboratories	P 42
4.2 Need to use SI units in all measurements	P 45
5. Report of the working group on air-ultraviolet spectral radiometry	P 46
5.1 Recent activities of the group	P 46
5.2 Discussion of the report	P 47
5.3 Alternative techniques	P 48
5.4 Future activities in ultraviolet radiometry	P 49
6. Report of the working group on $V(\lambda)$ corrected detectors	P 49
6.1 Photometric comparison using $V(\lambda)$ corrected detectors	P 49
6.2 Discussion	P 50
7. Report of the working group on standard lamps	P 50
8. Report on the international comparison of spectral responsivity measurements on silicon photodiodes	P 51
8.1 Report on the comparison	P 51
8.2 Discussion	P 52
9. Future radiometric and photometric work at the BIPM	P 54
10. Future international comparisons	P 55
10.1 Luminous responsivity using $V(\lambda)$ corrected photometers	P 55
10.2 Lamp comparisons	P 55
10.3 Cryogenic radiometers	P 56
10.4 Apertures	P 57
10.5 Spectral radiance of strip lamps	P 57
10.6 Participation and formation of working groups	P 58
11. Links with regional metrology groups	P 58
12. CIE activities	P 59
13. Other business	P 60
14. Publication of documents	P 60

Recommendation submitted to the Comité international des poids et mesures

P 1 (1994): The need to use SI units in the measurement of key parameters for studies of Earth resources, the environment and related issues	P 61
--	------

Appendix

P 1. Working documents submitted to the CCPR at its 13th meeting (see page P 29)	P 63
--	------

IMPRIMERIE GAUTHIER-VILLARS

PARIS 18^e

Dépôt légal : Imprimeur, 1995, n° 4214

ISBN 92-822-2137-7

ISSN 0069-6447

ACHEVÉ D'IMPRIMER : JUIN 1995

Imprimé en France