COMITÉ CONSULTATIF DE PHOTOMÉTRIE ET RADIOMÉTRIE

SESSION DE 1977

ISBN 92-822-2050-8

COMITÉ INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES

COMITÉ CONSULTATIF

DE PHOTOMÉTRIE ET RADIOMÉTRIE

9e SESSION — 1977

(7-8 septembre)

BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES

Pavillon de Breteuil, F-92310 SÈVRES, France

Dépositaire : **OFFILIB, 48 rue Gay-Lussac, F-75005 Paris**

NOTICE HISTORIQUE

Les organes de la Convention du Mètre

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

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

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

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

— d'établir les étalons fondamentaux et les échelles des principales grandeurs physiques et de conserver les prototypes internationaux;

— d'effectuer la comparaison des étalons nationaux et internationaux;

— d'assurer la coordination des techniques de mesure correspondantes;

— d'effectuer et de coordonner les déterminations relatives aux constantes physiques 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 au moins une fois tous les six ans. Elle reçoit à chacune de ses sessions le Rapport du Comité International sur les travaux accomplis, et a pour mission :

— de discuter et de provoquer les mesures nécessaires pour assurer la propagation et le perfectionnement du Système International d'Unités (SI), forme moderne du Système Métrique;

— de sanctionner les résultats des nouvelles déterminations métrologiques fondamentales et d'adopter les diverses résolutions scientifiques de portée internationale;

— d'adopter les décisions importantes concernant l'organisation et le développement du Bureau International.

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

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

Une trentaine de physiciens ou techniciens travaillent dans les laboratoires du Bureau International; ils font des recherches métrologiques ainsi que des mesures dont les résultats sont consignés dans des certificats portant sur des étalons des grandeurs ci-dessus. Le budget annuel du Bureau International est de l'ordre de 5 000 000 de francs-or, soit environ 2 000 000 de dollars U.S.

---

[1] Au 31 décembre 1977, quarante-cinq États sont membres de cette Convention : Afrique du Sud, Allemagne (Rép. Fédérale d'), Allemande (Rép. Démocratique), Amérique (É.-U. d'), Argentine (Rép.), Australie, Autriche, Belgique, Brésil, Bulgarie, Cameroun, Canada, Chili, Chine (Rép. Pop. de), Corée (Rép. de), Danemark, Dominicaine (Rép.), Égypte, Espagne, Finlande, France, Hongrie, Inde, Indonésie, Iran, Irlande, Italie, Japon, Mexique, Norvège, Pakistan, Pays-Bas, Pologne, Portugal, Roumanie, Royaume-Uni, Suède, Suisse, Tchécoslovaquie, Thaïlande, Turquie, U.R.S.S., Uruguay, Venezuela, Yougoslavie.

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

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

1. Le *Comité Consultatif d'Électricité* (CCE), créé en 1927.

2. Le *Comité Consultatif de Photométrie et Radiométrie* (CCPR), nouveau nom donné en 1971 au *Comité Consultatif de Photométrie* (CCP) créé en 1933 (de 1930 à 1933 le Comité précédent (CCE) s'est occupé des questions de photométrie).

3. Le *Comité Consultatif de Thermométrie* (CCT), créé en 1937.

4. Le *Comité Consultatif pour la Définition du Mètre* (CCDM), créé en 1952.

5. Le *Comité Consultatif pour la Définition de la Seconde* (CCDS), créé en 1956

6. Le *Comité Consultatif pour les Étalons de Mesure des Rayonnements Ionisants* (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.

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

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

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

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

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

Comité International des Poids et Mesures

Secrétaire	*Vice-Président*	*Président*
J. de Boer	P. Honti	J. V. Dunworth

LISTE DES MEMBRES

DU

COMITÉ CONSULTATIF DE PHOTOMÉTRIE ET RADIOMÉTRIE

Président

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

Membres

Amt für Standardisierung, Messwesen und Warenprüfung [ASMW], *Berlin*.

Bureau National de Métrologie, *Paris :* Institut National de Métrologie [INM] du Conservatoire National des Arts et Métiers [CNAM].

Conseil National de Recherches [NRC], *Ottawa*.

Electrotechnical Laboratory [ETL], *Tokyo*.

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

National Bureau of Standards [NBS], *Washington*.

National Measurement Laboratory [NML], *Lindfield*, N.S.W. 2070 (Australie).

National Physical Laboratory [NPL], *Teddington* (Grande-Bretagne).

National Physical Research Laboratory [NPRL], *Pretoria*.

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

E. INGELSTAM, Statens Provningsanstalt, *Borås* (Suède).

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

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

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

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

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

ORDRE DU JOUR
de la 9e session

1. Définition des grandeurs comportant un facteur biologique et choix de leurs unités.
2. Application du point 1 à la photométrie ; valeur de K_m.
3. Document explicatif sur les unités et les grandeurs photométriques.
4. Radiométrie absolue.
5. Récepteurs $V(\lambda)$.
6. Lampes étalons : progrès réalisés.
7. Etat d'avancement des comparaisons en cours (étalons de luminance énergétique spectrale, cellules photovoltaïques au silicium, etc.).
8. Information sur les travaux réalisés sous l'égide de la Commission Internationale de l'Eclairage.
9. Autres travaux des Laboratoires nationaux.
10. Questions diverses.
11. Publication des documents.

RAPPORT

DU

COMITÉ CONSULTATIF DE PHOTOMÉTRIE ET RADIOMÉTRIE

(9e Session — 1977)

AU

COMITÉ INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES

par E.J. GILLHAM, Rapporteur

Résumé.- En vue d'éviter la profilération des unités ayant des noms spéciaux pour les grandeurs photobiologiques, le CCPR recommande de considérer, dans chaque cas, la fonction spectrale de pondération comme sans dimension et d'utiliser l'unité de la grandeur physique correspondante ; cependant, en raison des habitudes acquises et de l'utilisation très répandue de l'unité photométrique, le CCPR admet que celle-ci puisse faire exception à cette règle.

Le CCPR propose une nouvelle définition du lumen, de préférence à une nouvelle définition de la candela, pour tous les types de vision ; dans cette nouvelle définition le lumen serait rattaché directement au watt. Un document explicatif sur les unités et les grandeurs photométriques doit être préparé pour accompagner les recommandations concernant la nouvelle définition.

Le CCPR considère ensuite les progrès obtenus en radiométrie absolue, sur les filtres $V(\lambda)$ et sur les lampes étalons, ainsi que les travaux réalisés sous l'égide de la CIE.

Après une revue des travaux en cours ou en projet dans les laboratoires nationaux, le CCPR décide d'organiser une comparaison de mesures d'éclairement lumineux ; on fera circuler des photopiles au silicium corrigées suivant $V(\lambda)$ à l'aide de filtres.

Summary.- In order to avoid the proliferation of units having special names for photobiological quantities, CCPR recommends that the spectral weighting function be considered dimensionless and that the unit for the corresponding physical quantity be used. However, owing to deep-rooted habits and widespread usage, the CCPR admits that the unit for photometry may remain an exception.

CCPR proposes a new definition of the lumen for the different types of vision, in preference to a new definition of the candela. In this new definition the lumen would be related directly to the watt. An explanatory paper on the photometric quantities and their units is to be prepared and will be given with the recommendations regarding the new definition.

The progress in absolute radiometry on $V(\lambda)$ filters and on standard lamps is then reviewed by the CCPR together with work carried under the auspices of CIE.

After a review of the current or planned work of the national laboratories, CCPR decided to organize a comparison of illuminance measurements ; silicon photocells with $V(\lambda)$ filters will be circulated.

Le Comité Consultatif de Photométrie et Radiométrie (CCPR) s'est réuni pour sa neuvième session au Bureau International des Poids et Mesures, à Sèvres, où il a tenu quatre séances les mercredi 7 et jeudi 8 septembre 1977.

Etaient présents :

A. MARÉCHAL, membre du CIPM, président du CCPR.*

Les délégués des laboratoires membres :

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

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

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

Electrotechnical Laboratory [ETL], Tokyo (M. SUZUKI, M. NISHI).

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

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

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

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

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

Les membres nominativement désignés :

L. PLAZA (Madrid)

F. ROTTER (Wien).

---

* Mr Maréchal n'a pu assister qu'à la première et à la troisième séances ; les deux autres séances ont été présidées par Mr Terrien.

Le directeur du BIPM (J. TERRIEN).

Invités :

Istituto Elettrotecnico Nazionale Galileo Ferraris [IEN], Turin (P. SOARDO).
C. FRÖHLICH (Davos).
E. INGELSTAM (Stockholm).

Assistaient aussi à la session : P. GIACOMO, sous-directeur du BIPM , T.J. QUINN et J. BONHOURE (BIPM).

Absents : Institut de Métrologie D.I. Mendéléev [IMM], Leningrad ; J.M. OTERO (Madrid) et K. YOSHIÉ (Tokyo), membres nominativement désignés.

Le Président ouvre la séance ; Mr Gillham est désigné comme rapporteur, assisté de Mr Bonhoure comme secrétaire.

1. DÉFINITION DES UNITÉS ET DES GRANDEURS COMPORTANT UN FACTEUR BIOLOGIQUE

Le Président ouvre la discussion sur ce sujet ; les grandeurs de ce type peuvent ne pas être liées de façon linéaire à leur effet biologique ou ne pas satisfaire à la condition nécessaire d'additivité ; les inclure dans le SI risque de nuire à sa réputation dans le monde scientifique. Mr Terrien répond que le SI n'est pas destiné uniquement à des buts scientifiques mais qu'il doit aussi répondre aux besoins de l'industrie, du commerce et de la vie courante en général. Mr Rotter fait remarquer que les grandeurs photométriques sont définies d'une façon qui permet de les mesurer sans ambiguïté, par des moyens purement physiques, de telle sorte que la question de linéarité ne se pose pas.

Mr Terrien se réfère à la note sur ce sujet (Annexe P 2) qu'il a préparée pour le CCU et à la proposition qu'elle contient : ne pas attribuer d'unités spéciales aux grandeurs photométriques et aux autres grandeurs biologiques, mais les exprimer en watts ou à l'aide des autres unités physiques du SI. On objecte parfois que remplacer le lumen par le watt empêcherait de faire la distinction entre le flux lumineux et le flux énergétique ; il est courant, dans le SI, que la même unité soit utilisée pour des grandeurs différentes et même incommen-

surables ; il n'appartient donc pas à l'unité d'indiquer la nature de la grandeur en question. En revanche, le lumen et la candela sont si fortement établis comme unités photométriques que leur suppression entraînerait de nombreux inconvénients et ne saurait être envisagée qu'à long terme. Ce point de vue est soutenu par MM. Kessler, Blevin et Jones ; il est accepté, avec de légères réserves, par le reste du CCPR.

Mr Kessler suggère que les unités pour les grandeurs biologiques soient incluses dans le SI mais sous forme d'un groupe à part, afin de conserver la distinction entre elles et les unités pour les grandeurs physiques. MM. Kessler et Jones soulèvent le problème du maintien d'unités spéciales en dehors du SI en raison des habitudes acquises de longue date. Mr Terrien répond que l'on a longuement discuté au sein du CCU de la possibilité d'avoir un groupe d'unités biologiques dans le SI. Les unités spéciales, bien que souvent commodes pour les spécialistes, sont une source de confusion pour les non-spécialistes ; leur inclusion dans le SI compromettrait sa simplicité et son universalité.

En ce qui concerne la compétence du CCPR pour conseiller le CCU sur la question des unités biologiques en général, Mr Blevin précise que l'expérience acquise en photométrie constitue un guide précieux pour la mesure des autres grandeurs comportant un facteur de pondération biologique. Le CCPR devrait insister et recommander que les grandeurs biologiques autres que photométriques soient, chaque fois que cela est possible, exprimées en watts ou en toute autre unité physique appropriée, l'unité photométrique n'étant pas soumise à cette règle pour le moment en raison des habitudes acquises. Mr Blevin rédige un projet de recommandation dans ce sens, projet qui est accepté par le CCPR (*Recommandation* P 1 (1977), p. P 20).

2. REDÉFINITION DE L'UNITÉ PHOTOMÉTRIQUE PAR RAPPORT AU WATT

Mr Terrien se réfère à la décision prise lors de la huitième session (1975), selon laquelle le CCPR devrait maintenant se mettre d'accord sur une valeur de K_m, efficacité lumineuse spectrale maximale, et recommander au CIPM de redéfinir l'unité photométrique à partir de cette valeur. Certains documents de travail, en particulier celui de la PTB (Annexe P 5), laissent à penser qu'on n'est pas encore prêt pour cette décision.

Mr Bauer répond que des mesures récentes de K_m faites à la PTB donnent une valeur moyenne de 683,6 lm/W, en bon accord avec la valeur de 683 lm/W calculée à partir de la valeur actuellement admise pour la température de l'étalon primaire (2042 K). Cependant, la relation entre les différentes échelles nationales, aussi bien photométriques que radiométriques, reste entachée d'une incertitude considérable ; il serait prématuré de redéfinir l'unité photométrique tant que cette incertitude n'a pas été réduite grâce à de nouvelles comparaisons internationales. Mr Bauer n'est toutefois pas opposé à la promulgation d'une valeur de K_m acceptée sur le plan international.

Mr Terrien, citant le précédent de valeurs fixées pour la vitesse de la lumière et pour d'autres constantes physiques, pense que cela pourrait parfaitement aller de pair avec le maintien de la définition actuelle. MM. Hengstberger et Jones insistent sur les avantages d'une valeur convenue pour K_m, en attendant une nouvelle définition de l'unité photométrique.

La discussion s'engage sur l'opportunité d'une nouvelle définition de l'unité photométrique. Mr Jones fait remarquer que la réalisation de l'unité photométrique risque d'être moins reproductible avec la nouvelle définition qu'avec la définition actuellement en vigueur ; il se réfère à la différence d'environ 1,5 % entre les valeurs de K_m obtenues par des mesures sur des lampes étalons photométriques et celles obtenues, tant au NPL qu'à la PTB, par des mesures sur des corps noirs de températures connues. Mr Terrien souligne que la facilité ou la difficulté de réalisation n'est pas une considération primordiale pour la définition d'une unité.

Mr Blevin remarque que la redéfinition de l'unité photométrique ne nécessiterait pas un changement brutal des échelles photométriques nationales ; tout laboratoire national qui ne désirerait pas rendre effective la nouvelle définition immédiatement pourrait continuer, pendant un certain temps, à conserver son échelle photométrique comme par le passé en s'appuyant sur des groupes de lampes étalons. Mr Terrien fait aussi remarquer qu'avec la définition actuelle, il semble qu'il y ait peu d'espoir d'améliorer notablement l'exactitude de la réalisation, alors que la nouvelle définition élargit la gamme des méthodes dont on dispose pour sa réalisation et ouvre la voie au progrès.

Mr Terrien demande ensuite si, compte tenu des réserves qui ont été exprimées, les membres du CCPR sont prêts à confirmer

les décisions prises à la session de 1975 concernant la redéfinition de l'unité photométrique.

A l'unanimité, le CCPR confirme la Recommandation P 1 (1975) qui propose de redéfinir l'unité photométrique en adoptant une relation convenue entre le lumen et le watt, et la Recommandation P 3 (1975) qui propose de spécifier la fréquence, plutôt que la longueur d'onde, de la radiation monochromatique pour laquelle cette relation sera établie.

Mr Blevin ouvre la discussion sur la Recommandation P 2 (1975) qui propose le remplacement de la candela par le lumen comme unité de base du SI; il craint que cette recommandation ne compromette le changement plus fondamental proposé dans P 1 (1975). Si une redéfinition du lumen est rejetée, une redéfinition de la candela doit alors être mise en avant. Mr Terrien estime que le remplacement de l'une des unités de base du SI – à ne pas confondre avec le changement de sa définition – risque fort de ne pas être acceptable ; il pense lui aussi qu'il faut préparer une recommandation de rechange. MM. Kessler et Blevin suggèrent que la recommandation concernant la redéfinition de la candela soit rédigée de façon telle qu'il reste bien entendu qu'un éventuel passage au lumen est souhaitable.

Un groupe de travail, comprenant MM. Blevin, Kessler, Wyszecki et Giacomo, est chargé de préparer des projets de recommandations selon ces directives. Après accord sur la meilleure valeur de K_m (*voir* le point suivant) et après légère modification, les *Recommandations* de 1977 P 2, P 3, P 4 sont adoptées à l'unanimité (*voir* p. P 20).

3. VALEUR RECOMMANDÉE DE K_m

A la demande de Mr Terrien, les membres du CCPR indiquent leur préférence pour les valeurs suivantes de K_m :

NML : Les étalons actuels d'intensité lumineuse du NML sont fondés sur la valeur 682 lm/W. Toutefois, d'après de récentes mesures goniophotométriques, il semble que les étalons de flux du NML soient mal reliés aux étalons d'intensité et correspondent à la valeur de 686 lm/W, si bien qu'une valeur comprise entre 682 et 686 lm/W serait acceptable. Préférence : 682 lm/W.

PTB : On a récemment mesuré K_m au moyen de récepteurs absolus $V(\lambda)$ ainsi que par spectroradiométrie. L'échelle photo-

métrique est donc représentée par une nouvelle réalisation de la candela conforme à la définition actuelle.

On a utilisé deux types de récepteurs $V(\lambda)$: un récepteur absolu avec un filtre $V(\lambda)$ de transmission spectrale connue et un récepteur commercial $V(\lambda)$ dont on a mesuré la sensibilité spectrale (absolue).

Les résultats des mesures avec les différents récepteurs $V(\lambda)$ sont en bon accord, alors que la valeur de K_m obtenue par spectroradiométrie est plus petite, de 1,5 % environ.

Jusqu'à maintenant, on ignore d'où provient cette différence, mais l'ETL et le NPL ont observé des écarts semblables (Doc. CCPR/75-16), confirmés par Mr Suzuki et Mr Jones, bien que cela n'ait pas été mentionné dans le rapport de 1975 ; la valeur obtenue pour K_m avec les récepteurs $V(\lambda)$ est de 683,6 lm/W. Préférence : 683 lm/W.

NPL : Les mesures de K_m faites en 1963 et en 1964 en utilisant des thermopiles étalonnées et des étalons d'intensité à 2042 K et 2853 K ont donné une valeur moyenne de 686 lm/W en fonction de la candela réalisée au NPL ; ceci équivaut à une valeur de 682 lm/W en fonction de la réalisation moyenne internationale de la candela. Préférence : 683 lm/W.

NBS : On a déterminé K_m par des mesures spectroradiométriques fondées respectivement sur les étalons d'intensité ou de flux lumineux du NBS et sur les étalons d'éclairement énergétique spectral du NBS, eux-mêmes dérivés de l'échelle de température (à l'aide d'un corps noir). La valeur moyenne est de 684 lm/W. Préférence 684 lm/W.

ETL : Des mesures avec des radiomètres absolus ont donné la valeur moyenne de 683 lm/W en fonction de la réalisation moyenne internationale de la candela. Préférence : 683 lm/W.

NRC : La moyenne des valeurs obtenues avec quatre radiomètres absolus différents est de 675 lm/W en fonction de la candela réalisée au NRC ; cette dernière a été établie en appliquant les corrections recommandées par Sanders à l'étalon primaire. En fonction de la moyenne internationale, la valeur obtenue est 682 lm/W.

NPRL : Une récente série de mesures a donné la valeur moyenne de 681 lm/W, mais 683 lm/W serait acceptable. Préférence : 681 lm/W.

ASMW : La valeur de 683 lm/W est en bon accord avec nos mesures les plus récentes. Préférence : 683 lm/W.

Le CCPR prend aussi note de la valeur de K_m donnée par le NIM* (Annexe P 16). La mesure a été faite avec des radiomètres absolus, soit à disque, soit à cavité, sur des étalons d'intensité à 2859 K, en utilisant un filtre liquide $V(\lambda)$; elle a donné comme résultat 684 lm/W avec une incertitude estimée de ± 0,74 %. Les étalons d'intensité ont été établis de façon indépendante en réalisant l'étalon primaire ; leur rattachement aux autres échelles nationales n'est pas connu. Toutefois, le CCPR estime que la mesure semble avoir été effectuée avec beaucoup de soin et qu'il convient d'attribuer un certain poids au résultat obtenu.

Mr Terrien pense que la valeur de 683 lm/W est un compromis satisfaisant entre les diverses préférences. Cette valeur est finalement adoptée dans les recommandations du CCPR (*voir* p. P 21).

4. DÉFINITION DES GRANDEURS SCOTOPIQUES

La discussion porte ensuite sur les répercussions de la nouvelle définition de la candela et du lumen en ce qui concerne la mesure des grandeurs scotopiques. La nouvelle définition est conçue pour assurer la continuité de l'unité pour les grandeurs photopiques ; si l'on veut qu'elle s'applique aussi à l'unité pour les mesures scotopiques, comme c'est le cas de la définition actuelle, alors l'échelle de mesure scotopique changera d'environ 3 %. Mr Blevin considère qu'un tel changement est acceptable eu égard à l'avantage de n'avoir qu'une seule unité pour les mesures photopiques et scotopiques.

En revanche, Mr Jones estime que cela pourrait avoir des conséquences indésirables dans certaines des applications les plus délicates de la photométrie aux faibles niveaux de luminance. Mr Wyszecki est d'accord et suggère une définition séparée de l'unité scotopique, avec une valeur différente de K_m pour assurer la continuité avec l'unité actuelle.

Toutefois, on accepte finalement que la valeur de 683 lm/W s'applique indifféremment aux grandeurs photopiques, scotopiques

---

* National Institute of Metrology (Pékin).

et mésopiques ; cela est explicite dans les Recommandations P 2 (1977) et P 3 (1977), et implicite dans la Recommandation P 4 (1977).

5. DOCUMENT EXPLICATIF SUR LES UNITÉS ET LES GRANDEURS PHOTOMÉTRIQUES

Lors de sa session de 1975, le CCPR avait demandé la rédaction d'un document explicatif pour accompagner les recommandations concernant la redéfinition de l'unité photométrique ; ce document a été rédigé par Mr Wyszecki en collaboration avec MM. Kessler et Blevin ; il a été envoyé aux membres du CCPR en août 1976. Mr Wyszecki explique qu'il est conçu comme un exposé concis, plutôt qu'élémentaire, sur les grandeurs et les unités photométriques telles qu'elles apparaîtront à la lumière des nouvelles définitions. Les seuls commentaires sur ce document sont ceux rédigés par Mme Kartachevskaia (Annexe P 17) ; en l'absence d'autres commentaires, Mr Wyszecki conclut que le document reçoit l'approbation du CCPR. La mise en forme finale de ce document et sa publication doivent attendre les décisions du CIPM concernant la redéfinition de l'unité photométrique.

6. PROGRÈS EN RADIOMÉTRIE ABSOLUE

Les récents travaux faits dans ce domaine à la PTB ont été consacrés à la mise au point de radiomètres absolus à disque ou à cavité pour des mesures de rayonnement de lasers fonctionnant en continu ou par impulsion. Des mesures à des niveaux de puissance allant jusqu'à 1 kW sont possibles en utilisant des récepteurs à cavité conique et à parois spéculairement réfléchissantes. Une comparaison a été faite entre des radiomètres de ce type et ceux qui sont utilisés pour les mesures à faible puissance ; cette comparaison, effectuée à un niveau de puissance de 200 mW, a montré que les deux types de récepteurs sont en accord à 2 % près. Une comparaison internationale de mesures portant sur le rayonnement du laser à He-Ne, à 633 nm, a été organisée par l'ETL sous les auspices du CCE ; elle a montré que les quatre laboratoires participants, PTB, NPL, ETL et NBS, sont en accord à 1 % près.

Au PMO,* on a mis au point un certain nombre de radiomètres

* Physikalisch-Meteorologisches Observatorium (Davos).

absolus, essentiellement du type à cavité, comme étalons de mesure d'éclairement énergétique solaire. On s'est efforcé d'assurer une exactitude élevée, puisque c'est la seule façon efficace de s'assurer de la stabilité à long terme des mesures de rayonnements dont on a besoin dans les travaux météorologiques. Des mesures comparatives faites avec neuf de ces radiomètres concordent à 0,2 % près et on pense que l'échelle établie pour les mesures d'éclairement énergétique solaire a une incertitude inférieure à 0,3 %.

Au NPRL, les travaux ont été centrés sur la mise au point de radiomètres absolus du type bolométrique. L'instrument le plus récent comporte un récepteur constitué d'un disque en mica de 19 mm de diamètre, revêtu sur chaque face d'une résistance en double spirale formée d'une couche mince d'or déposée par évaporation sous vide ; l'une sert d'élément thermométrique, l'autre sert d'élément chauffant. Le récepteur est revêtu de noir 3M ou de noir d'or déposé par évaporation ; on utilise un réflecteur hémisphérique pour augmenter le facteur d'absorption. La résolution est d'environ 30 nW/cm^2 en fonctionnement dans l'air.

Des instruments de ce type constituent la base d'un système complet de mesure pour établir et conserver une échelle d'intensité lumineuse ainsi que pour les étalonnages. D'autres recherches actuellement en cours comprennent une étude de la correction d'échauffement des fils dans les radiomètres absolus et une étude plus générale de l'exactitude avec laquelle on peut déterminer les facteurs de correction. Une version du radiomètre absolu susceptible d'être commercialisée est en cours de réalisation.

Au NML, au cours des deux dernières années, il y a eu peu de travaux pour améliorer l'exactitude ultime en radiométrie absolue ; l'attention s'est portée sur l'utilisation des matériaux pyroélectriques pour les mesures absolues à des niveaux modérés d'exactitude. On a trouvé que ce qui convient le mieux à cet usage ce sont des films plastiques de fluorure de polyvinylidine ; on en a utilisé dans un radiomètre étudié en vue de l'usage courant au niveau d'exactitude de 1 à 2 %. Le radiomètre fonctionne avec un rayonnement modulé et la principale limitation de l'exactitude vient de la nature incertaine du flux de chaleur alternatif. On a par conséquent envisagé de le faire fonctionner sur le mode continu mais cela risque d'être exclu à cause d'effets d'hystérésis dans le matériau pyroélectrique.

Au NBS, on a poursuivi les travaux de mise au point et d'étude des radiomètres absolus fondés sur l'utilisation du sulfate de triglycine (TGS) comme matériau pyroélectrique. On a découvert que les indications de ces instruments peuvent présenter des variations discontinues atteignant jusqu'à 0,4 % ; les causes de ces variations sont inconnues mais elles peuvent être liées à des effets de l'humidité. Néanmoins,ces radiomètres sont des étalons de transfert utiles et on les a utilisés pour comparer les récepteurs étalons du NBS avec ceux de la PTB et du PMO. Les résultats de cette comparaison ont montré que ces trois laboratoires sont en accord à 0,9 % près.

Au NRC, des travaux sur les radiomètres absolus ont commencé il y a environ trois ans. On a maintenant construit quatre prototypes qui fonctionnent de façon satisfaisante. On a réussi à obtenir une sensibilité uniforme sur la surface du récepteur, mais on n'a pas encore trouvé une méthode satisfaisante pour déterminer la résistance thermique du revêtement noir 3M.
A cause de la sensibilité assez faible de ces instruments, on a effectué les mesures de K_m avec une lampe de 500 W au lieu des étalons d'intensité Wi40.

Mr Quinn décrit le radiomètre absolu, fonctionnant à la température de l'hélium liquide, dont la mise au point est en cours au NPL dans le but d'étudier l'échelle de température thermodynamique dans le domaine de 0 à 100 °C au moyen de mesures du rayonnement total. Bien que l'on n'ait besoin pour cela que de mesures relatives, il est devenu évident au stade du projet que l'on pouvait, sans grand effort supplémentaire, faire de ce radiomètre un instrument absolu et que cela serait la meilleure façon d'assurer l'exactitude des mesures relatives.

Ce radiomètre étant exposé au rayonnement d'un corps noir à 0 °C, la puissance reçue par le récepteur est d'environ 200 µW; la résistance thermique entre le récepteur et son piège thermique à 2 K est telle que l'élévation de température est d'environ 1 K. Comme on peut mesurer la température du récepteur à environ 1 µK près et comme la température du piège thermique est stable à environ 2 µK près, on peut s'attendre à ce que la précision de la mesure soit de l'ordre de quelques 10^{-6}. La faible capacité thermique du récepteur et sa faible déperdition superficielle de chaleur sont deux facteurs particulièrement favorables à l'exactitude qui résultent du fonctionnement à la température de l'hélium liquide.

Le radiomètre est achevé, il fonctionne de façon satisfai-

sante ; on est en train de monter la partie source (corps noir) et on espère obtenir en 1978 les résultats de la première étape du programme de mesure : une redétermination de la constante du rayonnement de Stefan-Boltzmann.

7. FILTRES $V(\lambda)$

Au sujet des différents verres que l'on a mis au point au NPRL pour ajuster la courbe de réponse des récepteurs sur $V(\lambda)$ ou sur les autres fonctions de pondération, Mr Hengstberger précise que l'exploitation de ces verres est retardée faute de moyens pour les travaux d'optique mais qu'il existe maintenant une possibilité de production commerciale. Mr Jones mentionne le filtre en verre à quatre composants mis au point au NPL pour corriger les cellules photoémissives ; ils permettent de reproduire la courbe $V(\lambda)$ avec une erreur moyenne inférieure à 1 % sur tout le spectre. Mr Geist signale qu'il existe à l'heure actuelle un certain nombre de matériaux plastiques qui pourraient servir à corriger les cellules au silicium.

Mr Sanders indique que la sensibilité des filtres $V(\lambda)$ aux variations de température a suscité quelques difficultés pendant les mesures de K_m faites au NRC. Mr Blevin dit que les filtres utilisés au NML, qui sont en verre industriel, ont un facteur de transmission global presque indépendant de la température, l'accroissement de la transmission spectrale dans une partie du spectre étant contrebalancé par une diminution ailleurs.

8. AMÉLIORATION DES LAMPES ÉTALONS

Mr Förste mentionne le type le plus récent de lampe Wi40/41 fabriqué par Osram. La première étape de l'évolution de cette lampe, par rapport à sa forme originelle, a consisté à enlever les crochets supports qui constituaient la cause principale d'instabilité. De fréquentes cassures du filament sont alors survenues, mais on a maintenant remédié à ce défaut en améliorant la façon de souder le filament aux arrivées de courant. La nouvelle lampe devrait donner toute satisfaction comme étalon d'intensité lumineuse pour les comparaisons internationales.

Au NPL, les travaux sur l'amélioration des lampes ont porté essentiellement sur les fluctuations de la puissance rayonnée par les lampes étalons remplies de gaz, fluctuations dues aux instabilités des courants de convection du gaz de remplissage.

L'utilisation d'une cheminée pour éliminer ces fluctuations, (*Voir* Rapport de 1975) est maintenant abandonnée ; on a en effet découvert que, dans une lampe à ampoule cylindrique munie de tubes latéraux de visée, telle que la lampe à ruban utilisée au NPL comme étalon de luminance énergétique spectrale, on peut obtenir le même résultat en faisant passer les supports du filament à travers le haut de l'ampoule et non à travers le bas. La base reste munie d'un culot, uniquement pour permettre de monter la lampe de façon normale.

La même méthode s'est avérée efficace avec la lampe à courant élevé décrite par Clarke. On a étudié la possibilité d'améliorer la vitesse de vieillissement des étalons de luminance énergétique en les remplissant de krypton ou de xénon plutôt que d'argon ; la durée de vie de la lampe est augmentée, mais il n'y a pas d'amélioration significative de la dérive, vraisemblablement parce que celle-ci est due essentiellement aux modifications de la surface du tungstène et non à l'évaporation.

9. TRAVAUX RÉALISÉS SOUS L'ÉGIDE DE LA CIE

Mr Sanders rend compte de l'état d'avancement de la comparaison internationale de mesures sur des cellules au silicium (sensibilité spectrale et linéarité) demandée par le TC-2.2 et organisée par le NRC. Les cellules au silicium, avec leurs amplificateurs, sont maintenant prêtes ; les dispositions détaillées pour la comparaison seront discutées à la prochaine session du TC-2.2 à Budapest (15-16 septembre 1977).

Le TC-1.2 a décidé de faire une nouvelle comparaison de lampes à vapeur de mercure à haute pression, comparaison qui est organisée par Mme Poppe (Hongrie).

Mr Jones dit que le document sur la spectroradiométrie préparé pour le TC-1.2 a encore été revu et approche maintenant de sa forme définitive. A l'origine ce devait être un guide des mesures sur les lampes fluorescentes, mais c'est devenu un exposé plus général des méthodes spectroradiométriques. Il a été envoyé à tous ceux que l'on savait être intéressés et l'on discutera à la réunion du TC-1.2 à Berlin (12-13 septembre 1977) de sa publication éventuelle par la CIE. Le projet de document de Mr Blevin sur les principes de la photométrie physique sera aussi examiné.

En réponse à une question de Mr Sanders sur la préparation du vocabulaire, Mr Bauer dit que les progrès sont lents,

car il est difficile de parvenir à un accord sur les termes et les définitions.

10. AUTRES TRAVAUX DE RECHERCHE DANS LES LABORATOIRES NATIONAUX

A l'ETL, on a établi des étalons d'éclairement énergétique spectral pour l'ultraviolet en utilisant le rayonnement synchrotron. Dans le domaine de l'ultraviolet à vide, on est en train d'établir des récepteurs étalons en s'inspirant de ce que Madden a mis au point au NBS. Un corps noir en carbure de silicium, mis au point pour des recherches sur l'émission spectrale infrarouge, fonctionne à une température d'environ 1000 °C ; la température est reproductible à 0,1 % près avec une alimentation électrique stabilisée.

A l'ASMW, il y a une demande croissante de l'industrie pour l'étalonnage des diodes électroluminescentes ; de meilleurs étalons sont absolument nécessaires pour effectuer ces étalonnages.

Au NBS, les recherches sur les récepteurs étalons ont comporté une étude de l'actinomètre d'usage courant au ferrioxalate de potassium. Dans l'ultraviolet, l'exactitude de cet instrument est assez bonne, mais on a trouvé de grosses erreurs dans le visible.

Dans le cadre de recherches sur des sources étalons, on a étalonné des lampes au deutérium pour les utiliser comme étalons d'éclairement énergétique spectral dans le domaine de longueur d'onde de 200-350 nm. On est en train de construire un équipement d'étalonnage transportable pour vérifier les mesures spectrales ; on a l'intention de le louer aux clients. Il comporte un spectroradiomètre relativement léger et une série de lampes étalonnées (lampes au tungstène, au deutérium et fluorescentes). On est aussi en train d'apporter des améliorations à la réalisation de l'échelle pyrométrique dans le but de réduire l'incertitude des étalons de rayonnement spectral à environ 0,3 % dans le visible et 1 % dans l'ultraviolet.

La dernière addition au manuel "d'auto-enseignement" du NBS sur la radiométrie est un chapitre sur les effets de polarisation en spectroradiométrie ; deux autres chapitres sont en préparation, l'un traitant de la largeur de bande passante des instruments et l'autre des problèmes spéciaux de spectroradiométrie dans l'ultraviolet.

Parlant des autres travaux de radiométrie au NBS, Mr Kessler cite les arcs à hydrogène et à argon mis au point par Wiese pour servir d'étalons de rayonnement dans l'ultraviolet et l'ultraviolet à vide. Les travaux sur les récepteurs étalons dans l'ultraviolet (Madden) comprennent l'utilisation de l'anneau de stockage du NBS pour les étalonnages, l'entretien d'une installation d'étalonnage de récepteurs et un contrat de la NASA pour un système d'étalonnage d'instruments. Celui-ci comprend la construction d'une grande chambre à vide permettant de faire tourner les instruments de façon à pouvoir étudier les effets de polarisation. Les travaux sur les mesures de puissance et d'énergie des lasers sont en bonne voie ; le NBS a pris part à la comparaison de mesures de puissance de lasers fonctionnant en continu organisée sous l'égide du CCE.

Au NPL, on a poursuivi les travaux de mise au point de l'arc à plasma d'argon stabilisé par effet de paroi comme étalon de rayonnement ultraviolet. L'arc fonctionne à une pression de 1,75 atmosphères et à des températures allant jusqu'à 14 000 K. Les mesures de température sont faites par observations spectroscopiques dans le visible ; en ajoutant des produits traceurs, tels que le carbone, on obtient des raies spectrales en milieu optiquement épais qui donnent, à différentes longueurs d'onde dans l'ultraviolet à vide, les luminances énergétiques calculables du corps noir. On a mesuré la luminance énergétique d'un certain nombre de ces raies dans le domaine de 165 nm à 200 nm, par comparaison à des lampes étalons au deutérium, elles-mêmes rattachées au rayonnement synchrotron ; il s'est avéré que les valeurs mesurées concordent avec les valeurs calculées à environ 2 % près.

Ces arcs, quand ils fonctionnent dans des conditions bien déterminées, sont très reproductibles ; on a l'intention de mettre au point un modèle de dimensions réduites pour contrôler à long terme les lampes étalons au deutérium et pour servir d'étalon de travail au-dessous de 165 nm, limite de longueur d'onde de la lampe au deutérium. On ne dispose plus du synchrotron de Daresbury pour les étalonnages primaires mais on s'est mis d'accord avec l'INM (Paris) sur un programme conjoint de recherches utilisant l'anneau de stockage de l'accélérateur d'Orsay, proche de Paris ; cela permettra de conserver les étalons existants et d'établir des étalons au-dessous de la limite actuelle de 165 nm.

En ce qui concerne les étalons photométriques, on prépare

actuellement le goniomètre du NPL pour mesurer à nouveau les étalons de flux à 2788 K, car on craint que leur valeur ne soit erronée. On a effectué une étude de l'influence de la fréquence du réseau de distribution sur le rendement des lampes fluorescentes et l'exactitude avec laquelle on peut spécifier et mesurer les conditions électriques de fonctionnement.

A la PTB, pour les travaux avec les étalons spectroradiométriques, on dispose maintenant d'un corps noir ayant un orifice de 1 cm de diamètre, qui fonctionne à des températures allant jusqu'à 3000 K. La révision, en 1971, de la température attribuée au corps noir à 2850 K a conduit à une modification de 20 à 30 K dans l'échelle de température de couleur de la PTB qui avait été établie en 1962-1963 et utilisée dans la comparaison internationale faite au BIPM en 1963-1964. En réponse à une remarque de Mr Blevin selon laquelle les mesures de température de couleur risquent bientôt d'être remplacées par des mesures de répartition spectrale, Mr Bauer dit qu'il existe encore beaucoup de demandes pour ces mesures de la part des industriels ; Mr Jones ajoute qu'au NPL l'échelle de température de couleur joue un rôle essentiel dans la conservation de l'échelle de répartition spectrale.

Toujours à la PTB, on a construit un nouveau goniophotomètre ; les récepteurs $V(\lambda)$ se déplacent sur une sphère de 5 m de diamètre autour de la source à étudier ; on peut ainsi déduire avec une grande exactitude le flux lumineux de n'importe quelle source à partir d'un étalon d'intensité. Etant donné les dimensions de l'instrument, on peut également mesurer des lampes tubulaires d'une longueur allant jusqu'à 2,5 m environ.

Les travaux se poursuivent à la PTB sur le synchrotron de 140 MeV et sur les arcs stabilisés. L'équipe de l'Institut de Berlin a mis au point une source à arc de petites dimensions et de manipulation très aisée. De plus, on a étalonné des lampes au deutérium par rapport au synchrotron DESY pour les utiliser comme étalons de transfert ; dans l'avenir, on pourra peut-être disposer, à Berlin, d'un anneau de stockage pour des travaux de ce type.

Au NML, on a consacré beaucoup d'efforts à concevoir et à faire réaliser de nouveaux équipements, tels que bancs optiques et tables antivibratoires, en prévision du prochain déménagement dans le nouveau laboratoire. On a mis en service un goniophotomètre semi-automatique de précision ; il est utilisé pour élucider le désaccord entre les échelles d'intensité et de flux

lumineux du NML. Un des travaux en cours est la mise au point d'un spectroradiomètre automatique contrôlé par ordinateur et destiné aux mesures de routine de rayonnement et de sensibilité spectraux. On utilise le spectromètre à transformée de Fourier à polarisation mis au point au NPL avec des détecteurs thermiques non sélectifs comme moyen indépendant pour établir des étalons de rayonnement spectral. L'exactitude obtenue est voisine de celle des méthodes habituelles. On applique aussi les méthodes de transformation de Fourier dans le domaine de l'infrarouge de 3 µm à 30 µm et dans le domaine submillimétrique de 50 µm à 2 mm.

L'INM met au point un radiomètre absolu dans lequel l'apport d'énergie électrique au récepteur s'effectue grâce à un faisceau d'électrons, de préférence à l'élément de chauffage habituel. On a fait avec succès des essais de ce nouveau principe avec des récepteurs de 1 mm et de 5 mm de diamètre, mais on n'a pas complètement résolu les problèmes liés à l'émission d'électrons secondaires.

L'INM possède maintenant des corps noirs pour les mesures pyrométriques aux points de l'or et du cuivre. Pour les travaux sur la luminance énergétique spectrale, on a mis au point un corps noir tubulaire en chromite de lanthane. Il est chauffé par passage direct du courant et peut fonctionner à des températures allant jusqu'à 1700 K. Avec un courant constant, la stabilité de la température est d'environ 0,2 K pendant la durée d'une mesure et d'environ 2 K d'une mesure à l'autre.

Au NPRL, on a commencé la construction d'un goniophotomètre et construit un spectrophotomètre automatique. On a aussi effectué des mesures de répartition spectrale énergétique de la lumière du jour au niveau de la mer, dans l'hémisphère sud (Durban) ; ces mesures ont été faites dans le domaine spectral 295-775 nm, sur une période d'une année environ. Le dépouillement des résultats est en cours.

Au NRC, des crédits importants destinés à l'automatisation de l'équipement ont permis de construire un spectroradiomètre automatique, à partir du monochromateur de McPherson de 1 m ; on projette aussi la construction d'un goniophotomètre. Pour répondre à l'intérêt soulevé actuellement par l'utilisation de l'énergie solaire, on a monté un appareillage automatisé pour mesurer la répartition spectrale du rayonnement du soleil et du ciel dans le domaine des longueurs d'onde de 295 nm à 3 µm.

Dans le domaine des recherches sur la vision, en collaboration avec le NBS, un programme est en cours pour étudier dans quelle mesure le système photométrique actuel est en accord avec ce que l'oeil perçoit. Des comparaisons visuelles de surfaces éclairées au moyen de différents types de lampes commerciales ont montré que, si les lampes diffèrent beaucoup en couleur, la corrélation entre la luminosité perçue et la luminance mesurée peut être très médiocre. De nouvelles mesures avec d'autres types de répartition spectrale sont actuellement en cours. On espère en fin de compte mettre au point un système photométrique mieux en accord avec la perception visuelle.

11. COMPARAISONS FUTURES D'ÉTALONS PHOTOMÉTRIQUES

On s'accorde pour dire qu'une comparaison internationale d'étalons d'intensité lumineuse à la température de couleur de 2853 K serait opportune, mais qu'il ne faut pas entreprendre au BIPM une comparaison à grande échelle tant que l'on n'a pas contrôlé la mise au point de la nouvelle génération de lampes étalons remplies de gaz. On considère comme une étape préliminaire fondamentale une comparaison pilote entre un petit nombre de laboratoires: elle constituera un banc d'essai réaliste de la robustesse des lampes et permettra de vérifier que la méthode de mesure choisie est satisfaisante.

Mr Bauer a déjà fortement recommandé d'effectuer des mesures comparatives de lampes et de récepteurs (Doc. CCPR/77-5, point 10) ; il précise que la PTB est prête à jouer le rôle de laboratoire pilote. Mr Geist rappelle la discussion qui s'est déroulée lors de la session de 1975. A l'époque on pensait que, pour comparer des échelles d'intensité lumineuse, une cellule au silicium et un filtre correcteur en verre constitueraient un instrument meilleur qu'une lampe étalon remplie de gaz. Le projet d'étudier cette possibilité au moyen d'une comparaison pilote préparée par le NML n'a pas été réalisé, en partie parce que l'attention s'est concentrée sur un autre aspect du fonctionnement des cellules au silicium, l'effet de l'irradiation dans l'ultraviolet. Toutefois, le NBS a maintenant construit des systèmes transportables de cellules au silicium, comportant l'électronique nécessaire pour le contrôle de la température et la lecture des résultats ; il a acquis une certaine expérience de leur emploi comme étalons de transfert à l'occasion de mesures faites récemment au NPL et à Davos.

On décide qu'une comparaison de récepteurs $V(\lambda)$ aura lieu entre un nombre restreint de laboratoires. Selon la suggestion de Mr Bauer, la PTB jouera le rôle de laboratoire pilote et on utilisera trois récepteurs commerciaux $V(\lambda)$ fabriqués par Lichtmesstechnik (Berlin).

On déterminera la sensibilité lumineuse de ces détecteurs pour une répartition spectrale correspondant à une température de couleur spécifiée ; on estime que 2800 K conviendra. Les laboratoires suivants expriment leur intention de prendre part à cette comparaison : BIPM, PTB, IEN, NPL, NBS, NPRL et NRC. Mr Kostkowski pense qu'étant donné le nombre de participants, il vaudrait mieux organiser deux comparaisons. Il suggère aussi que l'on fasse en même temps des essais sur la nouvelle lampe Wi/40 décrite par Mr Förste, en en faisant circuler une avec chaque récepteur $V(\lambda)$; cette suggestion est acceptée. La PTB fournira les récepteurs et Mr Bischoff prendra les dispositions nécessaires dès que possible.

12. QUESTIONS DIVERSES

— Au sujet de la comparaison des mesures de puissance de lasers organisée par le CCE (*CCE*, 14e session, 1975, p. E 11), Mr Bauer demande si les échanges d'informations sont suffisants entre ces deux Comités Consultatifs sur de telles questions d'intérêt commun. Mr Terrien suggère que toute comparaison future de ce genre soit organisée en liaison avec le CCPR et que ce point soit soulevé lors de la prochaine session du CCE.

— Le CCPR s'accorde pour trouver prématuré de fixer une date pour sa prochaine session.

*

Le Président félicite les membres du groupe de rédaction pour leur succès dans la préparation des nouvelles recommandations ; il remercie les autres membres du CCPR et clôt la session.

(14 novembre 1977)

RECOMMANDATIONS

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

Sur le nom des unités des grandeurs comportant un facteur biologique

RECOMMANDATION P 1 (1977) *

Le Comité Consultatif de Photométrie et Radiométrie,

considérant

- que l'on doit mesurer de nombreuses grandeurs mettant en jeu des rayonnements électromagnétiques et des facteurs biologiques,

- que le nombre des unités SI ayant des noms spéciaux ne doit pas être augmenté sans des raisons impératives,

recommande

- qu'avant d'admettre dans le SI un nouveau nom spécial pour une unité d'une grandeur mettant en jeu des rayonnements électromagnétiques et des facteurs biologiques, on étudie attentivement la possibilité de choisir une unité SI existante. Par exemple, pour une grandeur résultant de la pondération d'une répartition spectrale de puissance énergétique par une fonction spectrale photobiologique, la fonction de pondération pourrait être choisie sans dimension et en conséquence la grandeur serait exprimée en watts.

Valeur de l'efficacité lumineuse spectrale

RECOMMANDATION P 2 (1977) **

Le Comité Consultatif de Photométrie et Radiométrie,

considérant

- l'utilisation croissante des méthodes radiométriques pour mesurer des grandeurs photométriques,

- le besoin croissant d'assurer la compatibilité entre les mesures radiométriques et les mesures photométriques,

---

* Cette Recommandation a été transmise pour étude au Comité Consultatif des Unités, par le CIPM à sa 66e session (septembre 1977).

** Cette Recommandation a été approuvée par le CIPM à sa 66e session (septembre 1977).

- le désir des laboratoires nationaux d'assurer la continuité des valeurs des échelles photométriques,

- les valeurs de l'efficacité lumineuse spectrale considérées par les laboratoires nationaux comme assurant la meilleure continuité,

recommande *l'emploi de la valeur* 683 *lumens par watt pour l'efficacité lumineuse spectrale d'une radiation monochromatique de fréquence* 540,015 4 x 10^{12} *hertz, pour les visions photopique, mésopique et scotopique.*

Définition du lumen ou de la candela

RECOMMANDATION P 3 (1977) *

Le Comité Consultatif de Photométrie et Radiométrie,

considérant *à nouveau ses Recommandations* P 1 (1975), P 2 (1975) *et* P 3 (1975), *confirme ces Recommandations,*

- considérant *que l'adoption de la Recommandation* P 2 (1975) *rendra nécessaire d'introduire et de définir le lumen en tant qu'unité de base du SI en remplacement de la candela,*

- considérant *sa Recommandation* P 2 (1977),

- et considérant *qu'il est désirable d'avoir, comme précédemment, une seule définition de l'unité de base de la photométrie pour les visions photopique, mésopique et scotopique,*

recommande *que le lumen soit défini comme suit :*

Le lumen est le flux lumineux d'un rayonnement monochromatique dont le flux énergétique est 1/683 *watt et dont la fréquence est* 540,015 4 x 10^{12} *hertz.*

RECOMMANDATION P 4 (1977) *

Le Comité Consultatif de Photométrie et Radiométrie,

considérant

- le besoin urgent de relier les unités photométriques au watt,

- la difficulté éventuelle de remplacer à bref délai la candela par le lumen en tant qu'unité de base du SI pour la photométrie,

recommande *s'il est nécessaire, à titre transitoire, de conserver la candela en tant qu'unité de base, que la candela soit définie de la manière suivante, compatible avec la Recommandation* P 3 (1977) :

La candela est l'intensité lumineuse d'une source monochromatique qui émet un rayonnement de fréquence 540,015 4 x 10^{12} *hertz, dans une direction pour laquelle son intensité énergétique est* 1/683 *watt par stéradian.*

ANNEXE P 1

Documents de travail présentés à la 9e session du CCPR

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

Document
CCPR/

77-1 BIPM.- Sur les grandeurs comportant un facteur biologique, leurs définitions et leurs unités, par J. Terrien (Voir Annexe P 2).

77-2 NML (Australie).- Sur les grandeurs comportant un facteur biologique. Commentaires de W.R. Blevin (Voir Annexe P 3).

77-3 ASMW (Rép. Dém. Allemande).- Bemerkungen zur vorläufigen Tagesordnung der 9. Sitzung des CCPR.

77-4 NRC (Canada).- Sur les grandeurs comportant un facteur biologique. Commentaires de G. Wyszecki (Voir Annexe P 4).

77-5 PTB (Rép. Féd. d'Allemagne).- Bemerkungen gemäss der vorläufigen Tagesordnung für die 9. Sitzung des CCPR, von G. Bauer (Voir Annexe P 5, extrait).

Document
CCPR/

77-6 Radiométrie absolue. Remarques sur le point 4 de l'ordre du jour, par C. Fröhlich.

77-7 Référence radiométrique mondiale, par C. Fröhlich (Voir le résumé à l'Annexe P 18).

77-8 NPRL (Afrique du Sud).- Amélioration de la théorie concernant les corrections instrumentales pour radiomètres absolus, par F. Hengstberger (Voir le résumé à l'Annexe P 19).

• 77-9 ETL (Japon).- Comments on the quantities comprising biological factors and their units, by N. Ooba (Voir Annexe P 6).

77-10 NPRL (Afrique du Sud).- Commentaires à l'Ordre du jour, par F. Hengstberger.

77-11 NPRL (Afrique du Sud).- Sur les grandeurs comportant un facteur biologique. Comments by C.J. Kok and F. Hengstberger (Voir Annexe P 7).

77-12 NPRL (Afrique du Sud).- Note on a new experimental determination of the constant K_m, by F. Hengstberger.

77-13 NPRL (Afrique du Sud).- A new measuring system for realizing photometric and radiometric scales, by F. Hengstberger, E. Thain and R. Turner (Voir le résumé à l'Annexe P 22).

77-14 NPRL (Afrique du Sud).- The absolute radiometer at the National Physical Research Laboratory, by F. Hengstberger (Voir le résumé à l'Annexe P 20).

77-15 NPRL (Afrique du Sud).- La mesure des caractéristiques de sensibilité d'un radiomètre absolu : étude d'un cas concret, par F. Hengstberger (Voir Annexe P 21).

Document
CCPR/

77-16 ETL (Japon).- Valeur de l'efficacité lumineuse spectrale maximale, par Y. Inoue.

77-17 NML (Australie).- The value to be adopted for K_m in redefining the photometric units, by W.R. Blevin.

77-18 NPRL (Afrique du Sud).- Nouvelle détermination expérimentale de la constante K_m, par F. Hengstberger et C.J. Kok (Voir Annexe P 15).

77-19 INM (France).- Remarques sur les grandeurs photobiologiques. Commentaires de J. Bastie (Voir Annexe P 8).

77-20 ASMW (Rép. Dém. Allemande).- Sur les grandeurs comportant un facteur biologique. Kommentar von S. Nündel (Voir Annexe P 9).

77-21 Sur les grandeurs comportant un facteur biologique. Comments by W.D. Wright. Réponse de J. Terrien (Voir Annexe P 10).

77-22 NBS (États-Unis d'Amérique).- Sur les grandeurs comportant un facteur biologique. Commentaires de K.G. Kessler (Voir Annexe P 11).

77-23 NIM (Rép. Pop. de Chine).- An experimental determination of the value for K_m, the maximum spectral luminous efficacy of radiation (Voir Annexe P 16).

77-24 PTB (Rép. Féd. d'Allemagne).- Untersuchungen zur experimentellen Bestimmung von K_m, von G. Bauer.

77-25 IMM (URSS).- Commentaires à l'ordre du jour de la 9e session du CCPR (Voir Annexe P 17, extrait).

77-26 IMM (URSS).- Sur les grandeurs comportant un facteur biologique, leurs définitions et leurs unités. Commentaires de K.P. Chirokov et de V.E. Kartachevskaia (Voir Annexe P 12).

Document
CCPR/

77-27 BIPM.- Danger de prolifération des noms spéciaux d'unités SI. A quoi sert le nom d'une unité ?, par J. Terrien (Voir Annexe P 13).

77-28 NBS (États-Unis d'Amérique).- NBS preferred value for K_m, by H.J. Kostkowski.

77-29 Note aux membres du CCPR, par A. Maréchal (Voir Annexe P 14).

77-30 IEN (Italie).- Mesure sur l'étalon primaire photométrique (Voir Annexe P 23).

77-31 Principles governing photometry, by G. Wyszecki, W.R. Blevin, K.G. Kessler.

ANNEXE P 2

Sur les grandeurs comportant un facteur biologique, leurs définitions et leurs unités

par J. TERRIEN

Bureau International des Poids et Mesures

(Document CCPR/77-1)

1. INTRODUCTION

Le Comité Consultatif des Unités (CCU) a demandé au BIPM de préparer un rapport sur "les définitions des grandeurs où intervient un facteur biologique, définitions qui conditionnent toute discussion sur les unités propres à ces grandeurs".*

Un exemple bien connu de telles grandeurs est fourni par les grandeurs lumineuses (intensité, flux, éclairement, etc. lumineux) qui ont chacune une unité propre : candela (unité SI de base), lumen, lux, etc., selon les conventions en vigueur actuellement. Ces conventions sont-elles les meilleures, ou d'autres conventions seraient-elles préférables ? Telle est la question qui sera commentée dans ce qui suit.

D'abord une remarque préalable. Le choix des grandeurs, de leurs définitions et de leurs unités n'est pas imposé par l'expérience. Le critère est la commodité. Ce choix est conventionnel, et le choix le meilleur est celui qui est le plus commode.

Le SI a été adopté et il se répand universellement parce qu'il est commode, en particulier parce qu'il est simple. Une des raisons qui font la simplicité du SI est que chaque grandeur

* Les parties entre guillemets "...", sont extraites du rapport du CCU (5e session, 1976) au CIPM.

a une unité SI et une seule. Mieux encore, plusieurs grandeurs peuvent avoir la même unité SI, pourvu qu'elles soient dérivées des unités de base de la même façon ; par exemple, la seconde à la puissance - 1 est l'unité SI pour les grandeurs fréquence, activité (rayonnements ionisants), etc. ; le joule est l'unité pour les grandeurs chaleur, énergie chimique, énergie cinétique, énergie électrique, etc. En conséquence "La grandeur en question doit toujours être spécifiée, car l'unité ne suffit pas pour faire connaître la nature de la grandeur"*. Il est indispensable d'obéir à cette règle pour sauvegarder la simplicité du SI. Cette règle qui impose de toujours spécifier la grandeur n'est pas encore bien entrée en usage ; c'est ainsi par exemple que l'on peut trouver dans les textes officiels la mention de centrales de production d'énergie électrique de 50 $MW_{él}$; le CCU a explicitement condamné l'emploi de $W_{él}$, car l'expression correcte est : une puissance électrique de 50 MW. Lorsque la grandeur est spécifiée, ici une puissance électrique, il n'est plus besoin d'inventer une unité nouvelle du genre $W_{él}$, et l'unité SI, le watt, est suffisante. Dans la spécification de la grandeur, on est libre d'ajouter des détails explicatifs, autant que l'on juge utile ; par exemple qu'une température a été mesurée dans l'EIPT, ou avec tel thermomètre, étalonné ou non ; le résultat de la mesure sera exprimé simplement avec l'unité kelvin (ou degré Celsius).

2. DÉFINITIONS DU FLUX LUMINEUX

Si l'on spécifie la grandeur par son nom, il faut que ce nom ait une définition connue et admise par convention. C'est le cas par exemple du flux lumineux, symbole ϕ_v ; il est convenu internationalement que le flux lumineux est défini par la relation

$$\phi_v = K_m \int \frac{d\phi_e}{d\lambda} V(\lambda)\, d\lambda \qquad (1)$$

dans laquelle $\frac{d\phi_e}{d\lambda} d\lambda$ est le flux énergétique (unité SI le watt) correspondant aux radiations comprises entre λ et $\lambda + d\lambda$, et $V(\lambda)$ est l'efficacité lumineuse relative spectrale (pour la vision photopique) dont les valeurs en fonction de λ sont admises par convention internationale. $V(\lambda)$ est un rapport sans dimension. Cette relation suffit pour qu'un expérimentateur puisse mesurer le rapport des flux lumineux de deux rayonnements

(monochromatiques ou complexes). L'unité, le lumen, est fixée par une autre convention internationale, celle qui définit la candela, unité d'intensité lumineuse, au moyen d'un radiateur physiquement spécifié (le corps noir au point de congélation du platine), d'où le lumen qui est lm = cd.sr. La valeur de K_m est obtenue expérimentalement : par exemple, dans le cas du corps noir qui définit la candela, on peut produire un flux ϕ_v dont la valeur résulte de la définition de la candela ; on peut aussi connaître le flux énergétique $\phi_e(\lambda)$, et K_m est calculé d'après l'équation (1).

L'unité pourrait être définie par des conventions différentes ; par exemple, on adopterait une valeur conventionnelle de K_m, c'est-à-dire une valeur du flux lumineux d'un rayonnement monochromatique de longueur d'onde 555 nm et de puissance 1 W ; c'est une proposition envisagée par le CCPR, avec une valeur à choisir qui serait voisine de K_m = 680 lm/W.

Dans les deux cas, l'expérimentateur peut réaliser un flux lumineux dont la valeur est fixée par convention (avec un corps noir, ou avec un rayonnement λ = 555 nm), et mesurer le flux lumineux d'un rayonnement quelconque puisqu'il sait mesurer le rapport entre les flux de deux rayonnements, d'après la définition du flux lumineux.

Tout ce qui précède décrit la situation actuelle. Cette situation est-elle satisfaisante ? Non, elle n'est pas tout à fait satisfaisante. Je voudrais exposer deux inconvénients.

3. INCONVÉNIENTS DE LA DÉFINITION ACTUELLE

Premier inconvénient. Les grandeurs lumineuses sont définies à partir de grandeurs physiques (mesurables en watts) des rayonnements, par une sommation (ou intégration) de la puissance de leurs composantes monochromatiques, affectées chacune d'un facteur de pondération $K_m V(\lambda)$, choisi de façon que le résultat exprime une évaluation de l'action du rayonnement sur l'organe visuel humain.

Les rayonnements ont aussi une action sur d'autres organes, par exemple sur la peau (production d'érythème, action antirachitique, etc.), et bien d'autres actions sur des êtres vivants, humains, animaux ou végétaux. Pour chacune de ces actions, on peut convenir d'une fonction d'efficacité analogue à $K_m V(\lambda)$, et définir autant de nouvelles grandeurs. On serait alors amené à adopter autant de nouvelles unités SI de base analogues à la

candela. Le SI deviendrait trop compliqué, donc mauvais.

Deuxième inconvénient. L'ICRU fait autorité en matière de grandeurs et d'unités pour les rayonnements ionisants. Parmi les grandeurs qu'elle a considérées, deux ont entre elles des relations analogues aux relations entre le flux énergétique (ou puissance, unité SI le watt) et le flux lumineux (unité SI le lumen) : ce sont la *dose absorbée*, grandeur purement physique dont l'unité est le joule par kilogramme, et *l'équivalent de dose*, qui est défini à partir de la dose absorbée par multiplication par un facteur d'efficacité dont la valeur est une fonction conventionnelle de la nature du rayonnement et des conditions d'irradiation (Je simplifie volontairement ; que les spécialistes veuillent bien m'en excuser. Pour plus de détails, voir "Supplement to ICRU Report 19 ; Dose equivalent ; issued Sept. 1, 1973"). Or, selon l'opinion de l'ICRU, ces deux grandeurs doivent être considérées comme ayant la même dimension, parce que les facteurs d'efficacité sont, selon l'ICRU, sans dimension, c'est-à-dire de simples facteurs numériques. L'existence de cette opinion prouve que différents experts peuvent considérer que les facteurs d'efficacité biologique (tels que $K_m V(\lambda)$ ou les facteurs intervenant dans l'équivalent de dose) ont une dimension, ou sont sans dimension. Certes, les scientifiques ont le droit d'adopter les conventions qui leur paraissent commodes dans chaque domaine spécialisé, mais il serait souhaitable que ces conventions ne soient pas contradictoires d'un domaine à un autre.

4. AUTRES DÉFINITIONS

Dans le cas des grandeurs lumineuses, et des multiples autres grandeurs destinées à une évaluation de l'action des rayonnements (ultraviolets, visibles ou infrarouges) sur des organes d'êtres vivants autres que l'organe de la vision photopique humaine, je crois qu'il faut envisager de traiter $K_m V(\lambda)$, ou les fonctions de pondération analogues, comme des facteurs numériques sans dimension. On éviterait ainsi la prolifération des unités SI de base, dont chacune serait attribuée à l'une de ces grandeurs. En effet, toutes ces grandeurs auraient la même unité qui serait le watt ou une unité d'une autre grandeur purement physique dérivée de l'énergie. Si la grandeur à caractère biologique en cause est bien spécifiée et bien définie, il n'y a pas d'inconvénient à ce que son unité soit la même que celle d'autres grandeurs.

Supposons par exemple que la définition de la grandeur flux lumineux, donnée dans sa forme actuelle à une page précédente, soit remplacée par une définition analogue, mais avec la convention que $K_m V(\lambda)$ soit un facteur numérique sans dimension, avec K_m = 680, et $V(\lambda)$ sans changement par rapport aux valeurs présentement admises. On dirait alors que le flux lumineux photopique d'une lampe est par exemple 1000 watts ; la puissance électrique consommée par cette lampe pourrait être 90 watts. La convention adoptée dans cet exemple laisse inchangée la valeur numérique (1000 dans le cas présent), mais on dit ici 1000 watts, alors que les conventions en vigueur font dire 1000 lumens. (Cette égalité de valeur n'est qu'approchée, à cause de l'incertitude sur la mesure expérimentale de K_m en lumens par watt).

Un plan faisant face à cette lampe à une distance de 2 mètres recevrait un éclairement lumineux d'environ 20 lux, selon la nomenclature actuelle ; avec la convention de $K_m V(\lambda)$ sans dimension, on dirait que cet éclairement est 20 W/m^2. (En termes simplifiés, l'éclairement sur une surface est le flux reçu divisé par l'aire de cette surface).

Les unités actuelles candela, lumen, lux pourraient être abandonnées. On pourrait aussi les conserver temporairement comme des noms spéciaux des unités SI W/sr, W et W/m^2 utilisables seulement pour les grandeurs lumineuses et les valeurs numériques resteraient sans changement.

Une autre possibilité serait de changer plus radicalement la définition de la grandeur flux lumineux, et d'une façon qui pourrait sembler plus logique : on conviendrait de donner à K_m la valeur numérique 1 (au lieu de 680). Le flux lumineux s'exprimerait encore en watts, mais les valeurs numériques seraient 680 fois plus petites que dans l'expression en lumens. Ce changement des valeurs numériques serait gênant pour les personnes qui sont habituées à les utiliser. Mais d'autre part poser K_m = 1 aurait un avantage : par exemple, la lampe mentionnée précédemment consomme une puissance électrique de 90 W, son flux lumineux serait 1000/680 = 1,47 W ; il semble naturel que la valeur numérique du flux lumineux soit plus petite que la valeur numérique de la puissance, car l'énergie consommée par la lampe n'est convertie que partiellement en rayonnement utile pour la vision. Au contraire, avec K_m = 680, la valeur numérique du flux est supérieure à celle de la puissance, ce qui peut paraître choquant.

Le choix entre $K_m = 680$ et $K_m = 1$ est donc à discuter.

5. GRANDEURS LUMINEUSES SCOTOPIQUES

Dans ce qui précède, tout ce qui concerne les grandeurs lumineuses se rapporte aux grandeurs pour la vision photopique. Or, la CIE a défini aussi des grandeurs pour la vision scotopique, plus précisément pour l'oeil d'un sujet jeune complètement adapté à l'obscurité, avec une fonction $V'(\lambda)$ différente de $V(\lambda)$ et K'_m égal à environ 1746 lm/W. (Cette valeur numérique de K'_m est obtenue expérimentalement, avec les conventions actuelles qui attribuent au corps noir au point de congélation du platine une luminance - photopique ou scotopique - égale à 60 cd/cm^2 ; les valeurs mesurées de K'_m sont voisines de 1746 lm/W).

Si l'on adoptait $K_m = 680$ (sans dimension) pour la définition des grandeurs lumineuses photopiques, on pourrait adopter $K'_m = 1746$ (sans dimension) pour la définition des grandeurs scotopiques, afin de conserver les valeurs numériques actuelles des grandeurs scotopiques. On pourrait aussi adopter $K'_m = 1692$: cette valeur est celle qui résulterait d'une définition du flux lumineux, photopique ou scotopique, par la convention qu'un rayonnement monochromatique ($\lambda = 555$ nm dans l'air normal) de puissance 1/680 watt a un flux égal à 1, et que les autres rayonnements monochromatiques de même puissance ont un flux photopique proportionnel à $V(\lambda)$ et un flux scotopique proportionnel à $V'(\lambda)$.

On pourrait encore adopter $K'_m = 1$. Là encore, le choix est à discuter.

Dans l'état d'adaptation intermédiaire de l'oeil, c'est-à-dire en vision mésopique, la complexité du problème n'a pas encore permis de s'accorder sur une définition des grandeurs lumineuses.

6. CONCLUSION CONCERNANT LES GRANDEURS LUMINEUSES

Au vu de ces complications, ma conclusion provisoire serait en faveur de $K_m = K'_m = 1$, ce qui revient à supprimer K_m dans la définition du flux lumineux. En ce cas, le flux lumineux serait défini par

$$\phi_v = \int \frac{d\phi_e}{d\lambda} V(\lambda)\, d\lambda \quad \text{(photopique)}$$

$$\phi'_v = \int \frac{d\phi_e}{d\lambda} V'(\lambda)\, d\lambda \quad \text{(scotopique)}.$$

On verra plus loin que cette conclusion s'applique aussi aux autres grandeurs comportant un facteur biologique.

7. AUTRES GRANDEURS PHOTOBIOLOGIQUES

En dehors des grandeurs lumineuses, on peut considérer d'autres grandeurs destinées à l'évaluation de divers effets photobiologiques du rayonnement. Par exemple, dans un document en préparation en République Fédérale d'Allemagne (Deutsche Normen, Vorlage November 1975, DIN 5031, Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik, Photobiologische Wirkungsfunktionen), on donne les courbes d'efficacité relative spectrale concernant dix effets du rayonnement, dont voici la liste (en langue allemande) :

Photosynthese
Chlorophyllsynthese
Photomorphogenese (Photochrome M 660 und M 730)
Phototropismus
Bakterientötung
UV-Erythem
direct Pigmentierung
Bilirubin-Dissoziation
Konjunktivitis
Photokeratitis.

Chacune de ces dix courbes, analogues aux courbes $V(\lambda)$ et $V'(\lambda)$, donne, en fonction de λ, l'efficacité relative par rapport à l'efficacité maximale ; l'ordonnée du maximum a donc la valeur 1.

D'après une étude du Dr B. Steck (Über photobiologische und psychophysische Gesichtpunkte für Beleuchtungsanlagen und Solarien, Dissertation D 83, 1975, Tabelle 9, p. 53), quelques unités sont en usage pour l'évaluation de l'effet N° 6 de la liste ci-dessus (UV-Erythem) :

- en URSS, l'unité 1 er correspond à l'action d'un rayonnement de puissance 1 W et de longueur d'onde 296,7 nm ; à cette longueur d'onde λ_m l'efficacité relative est maximale ;
- aux USA, l'unité 1 E-viton correspond à l'action d'un rayonnement de puissance 10^{-5} W et de longueur d'onde λ_m ;

- en RFA et en Scandinavie, l'unité 1 finsen correspond à l'action d'un rayonnement produisant un éclairement énergétique de 0,1 W/m^2, et de longueur d'onde λ_m.

Il ne semble pas que des unités particulières soient en usage pour les neuf autres effets.

8. DÉFINITION DES GRANDEURS PHOTOBIOLOGIQUES

Pour définir des grandeurs exprimant quantitativement chacun de ces dix effets du rayonnement, on peut opérer comme dans le cas des grandeurs lumineuses. C'est-à-dire que chaque grandeur G serait définie par l'intégrale, étendue aux longueurs d'onde efficaces, du produit de $d\phi_e/d\lambda$ par l'efficacité relative $f(\lambda)$ pour l'effet considéré

$$G = C \int_\lambda (d\phi_e/d\lambda)\ f(\lambda)\ d\lambda \qquad (2)$$

avec un facteur C conventionnel.

Ce facteur C joue le même rôle que le K_m des grandeurs lumineuses.

K_m, dans les conventions photométriques actuelles, a une dimension, et sa valeur est imposée par l'adoption de l'étalon qui sert à définir la candela. Pour les dix grandeurs considérées maintenant, il n'existe pas d'étalon. On est donc libre de choisir la convention la plus commode pour la valeur et la dimension de C. Le plus simple et le plus commode est de convenir que $C = 1$, sans dimension, ce qui équivaut à supprimer la lettre C dans la définition des grandeurs telles que G.

Il serait logique alors de supprimer aussi K_m dans la définition du flux lumineux.

Des conventions analogues seraient sans doute appropriées dans d'autres domaines : action des rayonnements ionisants, des vibrations sonores, des champs électromagnétiques en haute fréquence, etc. sur les organismes vivants.

9. CARACTÈRE PARTICULIER DES GRANDEURS PHOTOBIOLOGIQUES

On peut réfléchir sur le caractère particulier des grandeurs lumineuses, et des autres grandeurs analogues. Elles peuvent être définies de façon que leur mesure soit possible avec précision ; par exemple, la définition des grandeurs lumineuses et de leurs unités (soit par le corps noir comme

actuellement, soit par une valeur conventionnelle de K_m) permet des mesures précises, ou, si la précision est estimée médiocre, c'est à cause de difficultés expérimentales, non pas à cause d'une définition trop vague. En cela, les grandeurs lumineuses ne se distinguent pas des grandeurs purement physiques.

Ce qui distingue les grandeurs lumineuses des grandeurs purement physiques, c'est leur signification pratique, c'est-à-dire le degré d'utilité pratique de leur valeur quantitative pour l'évaluation d'un éclairage. Ces grandeurs ont été conçues afin qu'elles fournissent une évaluation quantitative de l'efficacité d'un éclairage pour l'accomplissement des tâches visuelles humaines, et afin que cette évaluation s'exprime par un seul nombre d'unités, quelles que soient la composition spectrale et la couleur du rayonnement qui éclaire. Si tous les organes visuels humains étaient identiques, et si un observateur pouvait sans hésitation juger de l'égalité des luminances de deux corps lumineux de couleur différentes, les grandeurs lumineuses auraient sans doute une signification assez précise : on serait certain par exemple qu'une installation d'éclairage fera voir les objets mieux éclairés qu'une autre, si les grandeurs lumineuses mesurées ont une valeur plus grande (de 5 % par exemple), quel que soit l'observateur, et quelles que soient les lampes même si elles produisent des rayonnements de couleur différente dans les deux installations. On sait bien que cela n'est pas le cas. La précision de la mesure des grandeurs lumineuses, en général, n'a qu'une signification pratique limitée, pour des raisons fondamentales.

De plus, le rapport de deux grandeurs photométriques est mesurable, mais sa valeur ne correspond à rien de vraiment mesurable dans la sensation d'un observateur visuel : on sait en effet que le jugement visuel d'égalité de luminance, surtout homochrome, est possible, mais l'évaluation visuelle d'un rapport de luminance est à peu près impossible.

J'en conclus que les grandeurs lumineuses possèdent un caractère d'arbitraire, et un caractère d'imprécision dans leur signification pratique, qui n'appartiennent pas aux grandeurs purement physiques. Une conclusion analogue est valable pour les autres grandeurs destinées à l'évaluation des effets du rayonnement sur la matière vivante.

D'autres effets (défauts d'additivité, action nulle au-dessous d'un seuil, etc.) imposent une certaine compétence dans l'utilisation pratique de ces grandeurs.

Le SI est conçu pour les grandeurs purement physiques ; seule, la candela s'y trouve pour une grandeur non purement physique, ce qui a suscité des critiques motivées sans doute par les caractères qui viennent d'être décrits.

Dans ces conditions, il me paraît sage d'éliminer la candela de la liste des unités de base du SI, de ne pas y introduire d'unités pour des grandeurs comportant un facteur biologique, et de définir ces grandeurs d'une façon telle que leurs unités soient celles qui s'appliquent à leur aspect purement physique.

(9 septembre 1976)

ANNEXE P 3

Sur les grandeurs comportant un facteur biologique

Commentaires de W. R. BLEVIN

National Measurement Laboratory (Australie)

(Traduction du Document CCPR/77-2)

Dans une circulaire adressée aux membres du CCPR vous avez sollicité des commentaires à propos du document que vous avez préparé sur les grandeurs comportant un facteur biologique, leurs définitions et leurs unités (Annexe P 2). J'ai retardé ma réponse jusqu'à maintenant afin de pouvoir réfléchir longuement à la question et en discuter avec un certain nombre de personnes.

En introduction vous indiquez que plusieurs grandeurs peuvent avoir la même unité SI ; ceci est fondamental pour la discussion. Vous donnez le joule et la seconde à la puissance moins un comme exemples d'une même unité qui est utilisée pour plusieurs grandeurs. Un autre excellent exemple existe en optique, avec le chemin d'un rayon lumineux. Dans ce cas, la *longueur du chemin optique*, $\int n ds$, et la *longueur du chemin réel*, $\int ds$, ont la même unité, le mètre. Réciproquement, parler d'un chemin de 0,1 m, par exemple, n'a pas de sens si l'on ne spécifie pas de quelle grandeur il s'agit. Je suis d'accord avec vous qu'il est à la fois possible et souhaitable de conserver la simplicité du SI en utilisant la même unité pour plusieurs grandeurs.

Dans le cas général des grandeurs comportant un facteur biologique, il est urgent que le CIPM fasse le nécessaire pour que ne se renouvelle pas la prolifération inutile d'unités qui

s'est déjà produite en photométrie. Comme vous l'indiquez au point 8 de votre document, la façon la plus commode d'y arriver est de considérer les facteurs de multiplication C, qui sont comparables à K_m et K'_m en photométrie, comme sans dimension et égaux à l'unité. J'appuie fortement cette façon de faire. Votre point 7 montre bien l'urgence de la situation en donnant la variété des unités que l'on propose pour l'effet d'érythème des rayonnements ultraviolets.

Dans le cas particulier de la photométrie, je partage votre point de vue que les unités spéciales, telles que le lumen et la candela, sont inutiles et qu'elles compliquent le SI. Ces unités photométriques spéciales font en fait double emploi depuis l'adoption de la fonction $V(\lambda)$ et en particulier depuis 1948 lorsque l'on a introduit explicitement l'expression $K_m \int \phi_\lambda V(\lambda) d\lambda$ dans la définition du flux lumineux. Hier encore, je lisais dans *Nature* (*265*, 1977, p. 388) le compte rendu d'un livre intitulé "Light-emitting diodes". Le critique écrivait que "la photométrie est une telle jungle de définitions, de concepts et d'unités que c'est un casse-tête permanent pour les ingénieurs ...". Ceci exprime exactement l'attitude que continuent d'avoir vis-à-vis de la photométrie la plupart des ingénieurs et des scientifiques qui ne sont pas des spécialistes dans ce domaine. Le CCPR et la CIE ne peuvent sans doute pas faire grand-chose pour simplifier encore les concepts et les grandeurs physiques utilisés en photométrie ; cependant, ce serait certainement une grande simplification que de revenir aux unités physiques courantes, telles que le watt et le watt par stéradian, au lieu des unités spéciales superflues qui sont utilisées à l'heure actuelle.

J'appuie donc la proposition selon laquelle K_m serait sans dimension ; on se passerait des unités photométriques traditionnelles. Je préférerais que la valeur numérique d'un K_m sans dimension soit l'unité plutôt que 680 environ. Cette modification ne simplifierait pas seulement le SI mais rendrait également inutile de faire la différence entre les deux grandeurs actuellement appelées efficacité lumineuse et efficacité lumineuse relative. L'efficacité lumineuse photopique d'une lampe serait l'unité dans l'hypothèse où toute l'énergie serait convertie en rayonnement de 555 nm de longueur d'onde, et serait inférieure à l'unité dans tous les autres cas. Une source hypothétique dont l'énergie est émise sous forme de lumière blanche, avec un spectre limité à l'intervalle de 380 à 780 nm et uniforme en énergie dans cet intervalle, aurait

une efficacité lumineuse d'environ 0,27. Cette expression me paraît plus simple et plus significative que l'expression correspondante avec les unités traditionnelles, à savoir que l'efficacité lumineuse d'une telle source est d'environ 180 lm/W.

De la même façon, pour la vision scotopique je considère que l'on doit avoir K'_m sans dimension et égal à l'unité.

L'abandon des unités photométriques traditionnelles en faveur du watt et des unités qui lui sont liées entraînerait des répercussions beaucoup plus grandes dans l'industrie et le commerce que la redéfinition des unités dont le CCPR a discuté en 1975. Ce changement ne devrait pas être mis en oeuvre trop rapidement et il est à peu près certain que pendant une période de transition il faudrait admettre en même temps les unités traditionnelles et les unités fondées sur le watt. Dans cette perspective, on pourrait considérer la redéfinition des unités photométriques dont on a discuté en 1975 comme une étape nécessaire vers un abandon éventuel des unités traditionnelles plutôt que comme une solution définitive en soi. Comment devrions-nous donc faire ? Je soumets à votre réflexion les suggestions suivantes :

1) Comme il a été prévu, le CCPR adopte en 1977 une valeur de K_m exprimée en lm/W et une valeur numérique de 680 environ.

2) Sur avis du CCPR et du CCU, le CIPM adopte de nouvelles définitions pour le lumen et la candela fondées sur la valeur ci-dessus de K_m, supprime les unités photométriques traditionnelles dans le SI, mais autorise leur emploi avec le SI pour une durée limitée (10 ans, par exemple).

3) Le CCPR et la CIE redéfinissent les grandeurs photométriques en considérant K_m et K'_m sans dimension et égaux à l'unité.

4) Il est conseillé à tous les pays d'adopter les nouvelles définitions des grandeurs et d'employer comme unités le watt et ses dérivés.

5) Après une période de transition, le CIPM supprime l'autorisation d'utiliser les unités photométriques traditionnelles avec le SI.

Enfin, je désire exprimer mon avis sur la discussion du point 9 de votre document. Pour moi les photométristes se sont trop occupés depuis plusieurs décennies de leurs *unités* spé-

ciales, et pas suffisamment d'améliorer la définition des *grandeurs* pour assurer une meilleure corrélation avec l'expérience visuelle. Par l'intermédiaire de son comité TC-1.4 (Vision), la CIE s'occupe maintenant très sérieusement du second de ces problèmes. Utiliser le watt mettrait certainement fin au premier problème.

(16 février 1977)

ANNEXE P 4

Sur les grandeurs comportant un facteur biologique

Commentaires de G. WYSZECKI

Conseil National de Recherches (Canada)

(Traduction du Document CCPR/77-4)

Les commentaires suivants font suite au document de J. Terrien (Annexe P 2), concernant en particulier la définition et la mesure des grandeurs comportant un facteur biologique.

Pour l'essentiel, je limiterai mes commentaires à la définition des grandeurs photométriques et de leurs unités. Ma compétence en biologie est trop restreinte pour me permettre de prendre part à une discussion approfondie des autres grandeurs, telles que celles qui sont liées à l'érythème provoqué par les radiations ultraviolettes, grandeurs qui comportent un facteur biologique. Toutefois, je suis d'accord avec J. Terrien : il existe plusieurs effets photobiologiques qui semblent être gouvernés par des principes semblables à ceux qui gouvernent la photométrie.

Si nous voulons discuter des grandeurs photométriques et de leurs unités, je pense qu'il est utile de rappeler d'abord le but originel de la photométrie.

But de la photométrie

"Les méthodes photométriques visent à mesurer la "lumière"; c'est-à-dire mesurer la caractéristique de toutes les perceptions ou sensations qui sont propres à l'organe de la vision et qui sont produites par l'intermédiaire de cet organe".

Cette formulation du but de la photométrie est tirée du document provisoire "Principles governing photometry" (Document CCPR/77-31) préparé par W.R. Blevin, K.G. Kessler et G. Wyszecki à la demande du CCPR (Septembre 1975) ; ce document sera discuté lors de la prochaine session du CCPR, en septembre 1977.

Les grandeurs et les unités photométriques doivent aussi tenir compte des caractéristiques purement physiques du flux énergétique qui stimule l'organe visuel et de la sensibilité spectrale de l'organe visuel. A l'évidence, la nature subjective du second de ces deux facteurs met les unités photométriques à part des autres unités SI.

Dans la pratique normale on utilise des méthodes purement physiques pour mesurer les grandeurs photométriques, mais ces mesures sont censées concorder étroitement avec l'expérience visuelle.

Un bon exemple est la grandeur photométrique luminance lumineuse (L_v) que l'on peut exprimer par l'équation

$$L_v = K_m \int_\lambda \frac{dL_e}{d\lambda} \; V(\lambda) \; d\lambda \qquad (1)$$

dans laquelle

$\left(\frac{dL_e}{d\lambda}\right)$ représente la densité spectrale de la luminance énergétique L_e mesurée en $W \cdot m^{-3} \cdot sr^{-1}$, définissant le "stimulus visuel" ;

$V(\lambda)$ est la fonction d'efficacité lumineuse relative spectrale pour la vision photopique et représente le mécanisme de réponse visuelle permettant de juger de la "luminosité" des stimuli visuels (La luminosité est définie comme l'attribut de la sensation visuelle selon lequel une surface paraît émettre plus ou moins de lumière (Vocabulaire de la CIE, 1970)) ;

K_m est une constante dont la valeur est approximativement 680 $lm \cdot W^{-1}$ et se rapporte à un flux énergétique de longueur d'onde λ = 555 nm lorsqu'il s'agit de la vision photopique $[V(\lambda)]$.

De l'équation (1) il découle qu'on mesure la luminance lumineuse en $lm \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$. (Si l'on utilise l'unité de base normale du SI, la candela, on mesure la luminance lumineuse en $cd \cdot m^{-2}$, car un lumen par stéradian est égal à une candela, unité d'intensité lumineuse).

La luminance lumineuse est supposée être en rapport étroit avec la perception de la luminosité, en ce sens que deux stimuli visuels de densités spectrales de luminance énergétique ($dL_e/d\lambda$) différentes seront perçus comme également brillants, si la mesure de leur luminance lumineuse respective est identique. Cette corrélation entre la luminance lumineuse et la luminosité (perçue) sera valable quelle que soit la différence de couleur qui peut être perçue entre les deux stimuli visuels. Ainsi, dans des conditions données d'observation, un stimulus perçu comme ayant une couleur rouge et mesuré avec un résultat de x $lm \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$ sera vu comme aussi lumineux qu'un autre stimulus perçu comme ayant une couleur blanche mais mesuré avec la même luminance lumineuse de x $lm \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$.

Depuis plusieurs décennies, les grandeurs photométriques, en particulier le flux lumineux, l'intensité lumineuse, l'éclairement lumineux et la luminance lumineuse, sont des paramètres clés pratiquement dans tous les domaines de la technique de l'éclairage, ainsi que dans la science de la vision humaine. Leurs unités respectives, le lumen pour le flux lumineux, la candela (ou $lm \cdot sr^{-1}$) pour l'intensité lumineuse, le lux (ou $lm \cdot m^{-2}$) pour l'éclairement lumineux et le nit (ou $lm \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$) pour la luminance lumineuse sont bien ancrés dans la littérature. Elles fournissent des mesures utiles pour la "quantité de lumière" perçue par un observateur et fournie par une lampe électrique, pour la "quantité de lumière" perçue comme tombant sur une surface donnée et pour la prévision de l'égalité de luminosité de deux stimuli visuels. Ce sont à l'évidence des mesures des réponses de l'organe visuel à l'énergie rayonnante. Dans ce sens, les grandeurs photométriques et leurs unités semblent atteindre le but originel de la photométrie exposé plus haut.

En parcourant les tâches ordinaires d'un certain nombre de Comités techniques de la Commission Internationale de l'Eclairage (CIE), il paraît évident que les mesures photométriques sont virtuellement toujours exécutées avec l'idée de fournir des estimations quantitatives de ce que sera la réponse visuelle (par exemple la luminosité) ou de ce que la réponse visuelle cherchée doit être dans des conditions données afin de satisfaire certaines normes de sécurité ou de fonctionnement. Il ne semble pas du tout qu'il soit nécessaire de modifier le but originel de la photométrie. Toutefois, il est tout à fait évident que nos méthodes photométriques courantes n'atteignent

pas toujours les buts originels de façon satisfaisante.

Critique de la méthode photométrique courante

On utilise l'équation (1) pour savoir si deux stimuli visuels représentés par $(dL_e/d\lambda)_1$ et $(dL_e/d\lambda)_2$ dont les valeurs diffèrent pour différentes longueurs d'onde λ, ont la même luminance lumineuse et par conséquent la même luminosité. On ne peut pas utiliser l'équation (1) pour prévoir la luminosité d'un stimulus donné $(dL_e/d\lambda)$ par rapport à un autre stimulus de luminance lumineuse et de luminosité différentes mais données. Notre méthode photométrique courante ne cherche pas à faire une telle prévision, mais ce devrait être une caractéristique nécessaire d'une méthode photométrique atteignant le but originel de la photométrie.

Cet écueil de l'équation (1) traduit la constatation expérimentale suivante : en augmentant ou en diminuant la luminance lumineuse d'un stimulus $(dL_e/d\lambda)$ par un facteur constant α, on n'obtient pas une augmentation ou une diminution par le même facteur de la luminosité du stimulus. Il s'avère que la relation entre la luminance lumineuse et la luminosité d'un stimulus donné n'est pas linéaire.

Selon l'équation (1), la luminance lumineuse de différents stimuli s'ajoute. Cependant, l'expérience montre que la luminosité de ces mêmes stimuli ne s'additionne en général pas. Ceci est en complète contradiction avec l'esprit de notre méthode photométrique courante, ainsi qu'avec le but originel de la photométrie. Par exemple, si le stimulus $(dL_e/d\lambda)_1$ perçu comme ayant une couleur rouge, a la même luminosité que le stimulus $(dL_e/d\lambda)_2$ perçu comme ayant une couleur verte, le mélange des deux stimuli perçu comme ayant une couleur jaune, ne donne pas la sensation d'être deux fois plus lumineux que chacun des deux stimuli composants.

Au cours des dernières années, diverses recherches ont été conduites sur la comparaison directe de luminosités hétérochromatiques ; toutes ont montré que les luminosités ne s'additionnent pas. Le NBS et le NRC poursuivent actuellement, ensemble, des recherches sur cet aspect de la photométrie. On espère qu'elles permettront d'améliorer la prévision des appréciations de luminosité hétérochromatique. Il semble que l'on peut déterminer la luminosité hétérochromatique grâce à une fonction non linéaire des composantes trichromatiques du stimulus visuel. Il reste à déterminer la forme exacte de la fonction nécessaire.

Le fait que l'équation (1), qui gouverne notre méthode photométrique, ne permet pas de faire des prévisions de luminosité suffisamment exactes et qu'elle devrait éventuellement être remplacée par une équation plus complète (non linéaire), laisse à penser que d'autres grandeurs comportant un facteur biologique, telles que l'érythème dû aux ultraviolets, peuvent également être mal définies par une équation semblable à l'équation (1).

Commentaires spécifiques à la proposition de J. Terrien

J. Terrien indique que le système photométrique habituel, dans lequel on peut considérer comme point clé la définition du flux lumineux et de son unité, le lumen, présente deux inconvénients :

1) *premier inconvénient :* le flux lumineux (ou puissance lumineuse) est défini par une sommation (ou intégration) des composantes monochromatiques du flux énergétique (mesuré en watts), chacune pondérée d'un facteur $K_m V(\lambda)$, choisi de telle façon que le résultat exprime une évaluation de l'action de l'énergie rayonnante sur l'organe visuel humain. L'équation qui définit le flux lumineux ϕ_v, est par conséquent

$$\phi_v = K_m \int_\lambda \frac{d\phi_e}{d\lambda} V(\lambda)\, d\lambda \qquad (2)$$

(cette équation est analogue à l'équation (1) donnée plus haut pour la définition de la luminance lumineuse).

L'énergie rayonnante agit également sur d'autres organes, par exemple, la peau (en produisant un érythème) ou d'autres organismes vivants (humains, animaux, végétaux). Pour chacune de ces "actions", on peut déterminer une "fonction d'efficacité" analogue à $K_m V(\lambda)$ et définir les grandeurs correspondantes. Selon J. Terrien, on serait alors amené à adopter de nouvelles unités de base SI correspondantes, analogues à la candela (ou au lumen, si celui-ci devait remplacer la candela). J. Terrien dit que le SI deviendrait alors trop compliqué et par conséquent mauvais.

2) *second inconvénient :* il est directement lié au premier mais constitue le fond du problème. En fait, il se centre sur la question de savoir si les "fonctions d'efficacité biologique", telles que $K_m V(\lambda)$ ou celles qui sont liées à l'"équivalent de dose" pour les rayonnements ionisants, ont une dimension ou non. J. Terrien pense que les scientifiques ont effec-

tivement le droit d'adopter les conventions qui leur paraissent raisonnables dans le domaine propre de leur activité. Toutefois, J. Terrien suggère qu'il semblerait souhaitable que ces conventions ne soient pas contradictoires d'un domaine d'activité à l'autre.

Les diverses grandeurs (G) qui comportent des facteurs d'efficacité biologique $f(\lambda)$ pourraient, d'après J. Terrien, être déterminées sur la base de l'équation de définition suivante :

$$G = C \int_{\lambda} \frac{d\phi_e}{d\lambda} \; f(\lambda) \; d\lambda \qquad (3)$$

où $\frac{d\phi_e}{d\lambda}$ est la densité spectrale de flux énergétique et C est un facteur conventionnel. Le facteur C joue le même rôle que K_m pour les grandeurs photométriques.

Dans les conventions photométriques courantes, K_m a une dimension ; sa valeur (≈ 680 $lm \cdot W^{-1}$) est déterminée par l'adoption de l'"étalon primaire photométrique" qui sert à définir la candela. Pour les autres grandeurs biologiques, au nombre d'une dizaine, il n'existe pas encore d'étalons primaires. Aussi est-on encore libre de choisir la convention la plus commode, tant pour la valeur que pour la dimension de C. Selon J. Terrien, le plus simple et le plus commode est de choisir $C = 1$ sans dimension, ce qui permet d'éliminer la lettre C de l'équation (3). J. Terrien conclut qu'il serait alors "logique" d'éliminer également K_m de la définition du flux lumineux.

Je suis d'accord avec J. Terrien que simplifier le SI est une tâche souhaitable et qu'on ne peut qu'encourager la révision périodique du SI dans cet esprit. Cependant, chaque fois qu'un système plus simple est proposé, il est essentiel de s'assurer que la simplification n'est effectivement qu'une simplification. On ne peut tolérer aucune simplification qui conduirait à une modification indésirable des concepts fondamentaux à la base des grandeurs concernées. On ne peut non plus permettre aucune simplification qui conduirait nettement à semer la confusion chez les utilisateurs de la version simplifiée.

Si l'on prend K_m égal à l'unité sans dimension, comme le propose J. Terrien, les mesures photométriques se feraient en watts et non en lumens. A l'évidence, ceci modifierait le concept de base de la photométrie et son but tel qu'il est indiqué précédemment. A mon avis, il ne semble pas "logique" de

mesurer "l'attribut de toutes les perceptions ou sensations qui sont particulières à l'organe de la vision et qui sont produites au moyen de cet organe" en watts, cette unité étant clairement identifiée comme unité de la grandeur purement physique puissance, dans ce cas le flux énergétique.

Mis à part le "coup mortel" que porterait aux bases de la photométrie l'adoption de $K_m = 1$ sans dimension, la confusion se répandrait parmi les utilisateurs des mesures photométriques. Pour être sûr de la grandeur à laquelle se rapporte le watt spécifié (puissance électrique, ou puissance lumineuse), il serait toujours nécessaire d'indiquer la grandeur. Autrement, certains utilisateurs pourraient faire la distinction entre W_{el} (watt électrique) et W_{lum} (watt lumineux), "simplification évidente" qui, je crois, serait considérée comme un "péché capital" par ceux qui veillent à notre SI.

J. Terrien discute le caractère particulier des grandeurs photobiologiques, et en particulier celui des grandeurs photométriques. Il conteste qu'on puisse définir ces grandeurs de façon que leur mesure soit possible avec précision. Par exemple, la définition du flux lumineux et de son unité, le lumen, permet des mesures précises. De la même façon, on peut mesurer la luminance lumineuse en $lm \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$.

J. Terrien indique que les grandeurs photométriques présentent un caractère arbitraire et un caractère imprécis du point de vue pratique ; ce n'est pas le cas pour les grandeurs purement physiques. Les autres effets (impossibilité de les additionner, etc.) exigent une certaine compétence dans l'utilisation pratique de ces grandeurs.

Je pense que l'on peut dire que la grande précision dont jouissent les méthodes photométriques courantes est assurée, en dehors des techniques améliorées de mesure par la normalisation du processus de réponse visuelle responsable des évaluations de la luminosité. La fonction $V(\lambda)$ représente ce processus de réponse visuelle. Effectivement, si nous devions continuer à nous fier à l'appréciation d'observateurs réels, la précision serait moins satisfaisante.

Toutefois, je ne pense pas que notre but en photométrie se limite à atteindre une précision élevée. Nous devons également tendre à une *exactitude* élevée. A l'heure actuelle, nous manquons d'exactitude car la fonction $V(\lambda)$ n'est qu'une représentation assez médiocre du processus de réponse visuelle responsable des évaluations de la luminosité.

Il est maintenant accepté de façon générale que les fonctions $(\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda) \equiv V(\lambda), \bar{z}(\lambda)$ jouent un rôle important dans notre évaluation de la luminosité. L'exactitude courante en photométrie est de plus altérée par le fait que les lois simples de proportionnalité et d'addition, que l'on admet dans l'équation (1) (ou (2) ou (3)), ne sont généralement pas valables. Les écarts à ces lois peuvent avoir des conséquences importantes. En fait, ces conséquences peuvent être suffisamment importantes pour se distinguer nettement de la dispersion, en vérité assez grande, des évaluations faites par différents observateurs.

Résumé et proposition

Les méthodes photométriques visent à mesurer la "lumière", c'est-à-dire l'attribut de toutes les perceptions ou sensations qui sont particulières à l'organe de la vision et qui sont produites par l'intermédiaire de cet organe.

Les grandeurs photométriques et leurs unités, telles qu'elles sont définies à l'heure actuelle, visent à fournir des mesures utilisables pour la "quantité de lumière" perçue par un observateur et fournie par une lampe électrique, pour la "quantité de lumière" perçue comme tombant sur une surface donnée, ou pour la prévision de l'égalité de luminosité de deux stimuli visuels. Elles visent à être des mesures des réponses de l'organe visuel à l'énergie rayonnante.

Rien n'indique que le but originel de la photométrie doive être modifié. Toutefois, il est absolument évident que nos méthodes photométriques actuelles n'atteignent pas toujours ce but originel de façon satisfaisante. On a besoin de méthodes améliorées pour mesurer la luminosité hétérochromatique.

Le SI a été conçu pour des grandeurs essentiellement physiques ; seule la candela comporte un concept qui n'est pas purement physique, ce qui expose aux critiques la présence de la candela dans le SI.

J. Terrien suggère qu'il serait sage d'éliminer la candela de la liste des unités de base du SI, laquelle ne devrait pas comprendre d'unités pour des grandeurs comportant un facteur biologique, et de définir ces grandeurs de telle façon que leurs unités respectives se rapportent à l'unité purement physique appropriée. Dans le cas de la photométrie, le facteur K_m (maintenant approximativement égal à 680 $lm \cdot W^{-1}$) deviendrait égal à l'unité, sans dimension. On mesurerait le flux lumineux en watts, au lieu de le mesurer en lumens.

Je suis d'accord avec J. Terrien que le SI serait effectivement "purifié" en éliminant la candela du groupe des sept unités de base et en limitant ainsi le SI aux seules unités de base qui se rapportent à des grandeurs purement physiques.

Toutefois, si l'on agissait ainsi, j'aimerais voir établir, en parallèle avec le SI, un autre système d'unités de base qui se rapporterait aux grandeurs comportant un facteur biologique. Le lumen, destiné à mesurer le flux lumineux, pourrait être la première unité de base d'un tel système parallèle. D'autres pourraient suivre.

Ceci aiderait, je pense, à ce que les bases de la photométrie continuent à intéresser les chercheurs qui travaillent sur des méthodes photométriques pour améliorer non seulement la précision des mesures photométriques mais également leur exactitude, c'est-à-dire donner un meilleur accord avec ce que voit effectivement l'oeil humain moyen.

Il serait préférable qu'un nouveau comité consultatif du CIPM soit chargé d'établir un tel système d'unités de base pour les grandeurs comportant un facteur biologique ; les membres de ce comité devraient avoir une expérience solide dans le domaine des mesures qui mettent en jeu des phénomènes biologiques. Ce nouveau comité consultatif travaillerait en coopération étroite avec le CCU et les autres Comités intéressés, tels que le CCPR, pour établir les définitions des grandeurs comportant un facteur biologique ainsi que les définitions des unités appropriées pour ces grandeurs.

(21 avril 1977)

ANNEXE P 5

Remarques sur des points de l'ordre du jour de la 9e session du CCPR

par G. BAUER

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

(Document CCPR/77-5)

1. *Définition des grandeurs qui comportent un facteur biologique et choix de leurs unités*

Les grandeurs G qui comportent un facteur biologique devraient, en général, être définies comme l'intégrale du produit de la densité spectrale de la grandeur énergétique $X_{e\lambda}$ et de l'efficacité relative spectrale $f(\lambda)$ pour l'effet considéré, sans facteur conventionnel

$$G = \int X_{e\lambda} f(\lambda)\ d\lambda .$$

L'unité serait la même que l'unité de la grandeur énergétique X_e considérée.

2. *Application du point 1 à la photométrie ; valeur de K_m*

Dans le cas particulier de la photométrie, il y a deux possibilités à envisager :

a) On agit de la même manière qu'avec les grandeurs comportant un facteur biologique. La grandeur lumineuse X_v est alors définie avec $f(\lambda) = V(\lambda)$ par :

$$X_v = \int X_{e\lambda} V(\lambda)\ d\lambda$$

b) On introduit un facteur K_m avec dimension, par exemple

K_m = 685 lm/W (spécifié), et on définit la grandeur lumineuse X_v :

$$X_v = K_m \int X_{e\lambda} V(\lambda) \, d\lambda .$$

Dans ce cas, on a des unités propres à la photométrie.

Ces deux possibilités ne sont applicables que si l'on choisit une définition radiométrique des unités photométriques.

De nombreux spécialistes allemands, de même que la PTB, sont d'avis qu'une définition radiométrique est prématurée, parce qu'on n'a pas encore assez d'expérience en ce qui concerne la précision des méthodes radiométriques. On doit rappeler ici le document CCPR/75-16, présenté lors de la session du CCPR à Londres en 1975, dont il n'a malheureusement pas été fait mention dans le rapport bien que la PTB l'ait signalé à l'attention. Les valeurs de K_m citées dans ce document sont très différentes ; on peut en conclure que les méthodes radiométriques ne sont pas aussi précises qu'on le suppose souvent. Des mesures faites à la PTB donnent des résultats comparables.

Si, après clarification de ces divergences, on doit choisir ultérieurement une méthode radiométrique, la préférence ira alors à la valeur $K_m = 1$.

Une troisième possibilité, $K_m \neq 1$ sans dimension, n'est pas considérée comme raisonnable.

Puisque plusieurs laboratoires désirent utiliser dès à présent la méthode radiométrique, il est nécessaire de fixer la valeur de K_m. La PTB propose de calculer K_m d'après les valeurs actuelles des constantes c_1 et c_2 de la loi de Planck et de la température T_{Pt} de congélation du platine ; on changera K_m si cela devient nécessaire par suite d'un changement de c_1, c_2 ou T_{Pt}. Peut-être serait-il utile de caractériser cette valeur par l'année considérée, par exemple $K_{m,77}$.

Pour la PTB, il est impossible de fixer, par définition, une valeur de K_m tant que la définition présente de la candela est encore valable. En ce qui concerne les grandeurs scotopiques, la situation est la même avec K'_m.

(25 avril 1977)

ANNEXE P 6

Commentaires sur les grandeurs comportant des facteurs biologiques et leurs unités

par N. OOBA

Electrotechnical Laboratory (Japon)

(Traduction du Document CCPR/77-9)

Dès octobre 1976, date à laquelle nous avons reçu le compte rendu de la réunion du CCU (juin 1976) et le document préparé par J. Terrien, le problème que posent ces documents a été examiné et discuté dans notre laboratoire par les chercheurs concernés, c'est-à-dire aussi bien par les spécialistes des unités et des étalons des diverses grandeurs que par les spécialistes des techniques de l'éclairage. Bien que nous ne soyons parvenus à aucune conclusion décisive à cause de l'importance du problème, j'estime devoir vous faire part de mon opinion actuelle qui est proche des points de vue de la majorité des personnes concernées.

Je tiens à m'associer aux recommandations adoptées par le CCPR en 1975 et aimerais qu'elles soient appliquées dans un avenir proche.

Je me demande s'il est raisonnable de considérer le SI comme un système d'unités de grandeurs purement physiques, qui dans leur ensemble ne parviennent pas à satisfaire tous les besoins pratiques. Je pense que le SI devrait être un système d'unités choisies, appropriées et éprouvées pour leur cohérence et leur commodité dans les nombreux domaines de la science, de la technique, de l'industrie et aussi de la vie courante.

Il est évident que la prolifération excessive des unités de base est un obstacle sérieux à l'expansion du SI. Toutefois, je pense qu'une prolifération de ce genre ne surviendra pas dans un proche avenir ; il semble en effet qu'il existe peu d'unités qui présentent les qualités nécessaires pour être ajoutées aux unités de base. Quelques unités sont utilisées seulement dans des domaines limités, par des spécialistes ; certaines ont encore des définitions ambiguës. S'il ne devait pas en être ainsi et si de nombreuses unités étaient susceptibles de devenir des unités de base après le remplacement de la candela par le lumen, la question devrait être laissée au CCU pour discussion d'un nouveau système d'unités.

La simplicité est sans doute importante pour un système d'unités, mais en fin de compte elle n'est pas toujours liée à la commodité. L'existence d'unités comme la mole, le radian et le steradian, par exemple, le montre bien ; si la simplicité primait sur toute autre considération, on pourrait remplacer chacune de ces unités par une autre ou la traiter simplement comme un nombre.

La proposition d'exprimer l'unité de flux lumineux et les autres unités photométriques à partir du watt serait indéniablement utile pour la simplicité d'expression ; mais il en résulterait une complexité et une confusion inutiles parce que le concept de flux lumineux n'est aucunement équivalent à celui de flux énergétique. Si l'on utilisait le watt comme unité de flux lumineux et d'autres grandeurs similaires, les physiciens devraient prendre bien garde de distinguer le watt purement physique des autres watts comportant des facteurs biologiques ; par exemple, l'expression 1 watt = 1 joule par seconde ne serait pas valable en général et dans les expressions du type c_1 = 3,741 5 ... x 10^{-16} W·m^2 il faudrait préciser la nature de W.

Dans le domaine de l'éclairage par exemple, une expression telle que "une lampe de 400 W pour 100 V" serait ambiguë, à moins d'indiquer si W représente la consommation électrique ou le flux lumineux. L'efficacité lumineuse d'une source serait représentée seulement par un nombre (par exemple, 1,47/90 = 0,016 ... comme l'indique J. Terrien dans son exposé), mais il faudrait comprendre que le numérateur et le dénominateur sont des grandeurs différentes dans leur concept ; autrement il en résulterait une confusion et on pourrait croire que 1,6 % de la puissance électrique est convertie en flux lumineux. La proposition de J. Terrien conduira vraisemblablement à la conclusion

qu'il ne s'agit pas d'une confusion, mais qu'il faut y voir la vraie signification de la nouvelle définition de l'unité de flux lumineux. Toutefois, je ne suis pas d'accord avec ce point de vue à cause de son caractère artificiel.

En ce qui concerne la valeur de l'efficacité lumineuse maximale d'un rayonnement, je suis en faveur de 683 lm/W. Cette valeur semble être la plus appropriée pour assurer la continuité de la grandeur du lumen, si l'on tient compte à la fois des résultats obtenus par les mesures radiométriques et de la valeur calculée à partir de T_{Pt} (voir tableau I du rapport de 1975*).

Je ne suis pas d'accord pour l'adoption de 1 comme valeur de K_m. On ne devrait permettre une importante modification des valeurs numériques que dans des circonstances exceptionnellement favorables telles qu'une modification révolutionnaire des systèmes d'éclairage ; autrement, la confusion qui en résulterait serait très grave et même dangereuse pour les applications pratiques de l'éclairage, en particulier pour l'éclairage routier et pour la signalisation. Il convient de noter que la vision transmet la majeure partie de nos informations et que l'éclairage joue un rôle important pour la rendre efficace.

(mai 1977)

---

* *Comité Consultatif de Photométrie et Radiométrie*, 8e session, 1975, p. P 5.

ANNEXE P 7

Sur les grandeurs comportant un facteur biologique

Commentaires de C. J. KOK et F. HENGSTBERGER

National Physical Research Laboratory (Afrique du Sud)

(Traduction du Document CCPR/77-11)

Dans l'ensemble, nous soutenons le principe suivant lequel il faut utiliser le minimum d'unités pour exprimer le plus grand nombre possible de grandeurs. Quand on le peut, il est aussi souhaitable de traiter de façon semblable les cas comparables.

Pour les grandeurs comportant un facteur biologique, il est important que le CIPM fasse tout ce qui est en son pouvoir pour éviter l'emploi d'unités et de grandeurs nombreuses, différentes et parfois embrouillées. L'idée selon laquelle on considère la constante C (qui est comparable à K_m et K'_m en photométrie) comme sans dimension et égale à 1 (Annexe P 2, point 8) semble la plus raisonnable et c'est celle que nous appuyons.

Nous sommes aussi d'accord sur le fait que les unités photométriques spéciales telles que le lumen et la candela ne sont pas vraiment des unités de base et que, avec d'autres unités semblables, elles conduisent souvent à des confusions. La décision prise par le CCPR en 1975 de faire des recherches pour relier les unités photométriques au watt, constitue par conséquent un pas dans la bonne direction.

Nous appuyons aussi la proposition de considérer éventuellement K_m et K'_m comme sans dimension et égaux à l'unité.

Toutefois, il ne faut pas précipiter les choses ; la redéfinition des unités photométriques dont il a été question en 1975 devrait, dans un premier temps, aboutir à un accord sur une valeur numérique de K_m (par exemple 680 ou 683). C'est une modification essentielle en elle-même et il ne faut pas tenter de modifier trop de choses dans un laps de temps trop court.

(mai 1977)

ANNEXE P 8

Remarques sur les grandeurs photobiologiques

Commentaires de J. BASTIE

Institut National de Métrologie du CNAM (France)

(Document CCPR/77-19)

DÉFINITION DES GRANDEURS PHOTOBIOLOGIQUES

Les grandeurs photobiologiques peuvent être considérées comme le résultat de l'action d'un rayonnement sur un organisme vivant. Le rayonnement est défini physiquement par une répartition spectrale de l'énergie qu'il transporte et la réaction de l'organisme vivant est caractérisée par l'absorption sélective de cette énergie. Il semble donc parfaitement admissible, dans le cas général, de définir une grandeur photobiologique, c'est-à-dire le résultat de l'interaction rayonnement-organisme vivant, par une relation de la forme

$$G = c \int_{\lambda} (d\Phi_e/d\lambda)\ f(\lambda)\ d\lambda,$$

où

c, est le coefficient dépendant des unités,

$d\Phi_e/d\lambda$, la répartition spectrale du rayonnement incident exprimé en unité énergétique,

$f(\lambda)$, la fonction d'absorption de l'organisme vivant donnée en valeur relative.

L'intégration est faite sur le domaine spectral utile du récepteur.

FONCTIONS PHOTOBIOLOGIQUES

Le problème qui se pose dans l'utilisation de cette formule est le choix de la définition de $f(\lambda)$. Pour que la grandeur G soit intéressante pour les utilisateurs, il faut qu'elle chiffre au mieux l'effet étudié sur l'organisme vivant. Malheureusement, ces derniers ne présentent pas de caractéristiques intrinsèques homogènes, et d'un organisme à un autre on peut noter des différences importantes. Il est donc logique de définir $f(\lambda)$ comme la moyenne d'un grand nombre d'observations ou de mesures.

En pratique, la courbe $f(\lambda)$ est obtenue à partir d'une ou plusieurs séries d'expériences faites à une époque déterminée avec des moyens donnés. La nature expérimentale de la courbe obtenue n'est que peu satisfaisante pour un usage métrologique et conduit à fixer par accord international une courbe théorique définissant un individu moyen. L'exactitude souhaitée dans l'utilisation de la formule est, elle aussi, fixée par accord entre les utilisateurs. Cette opération présente l'inconvénient soit de fixer au départ la fonction $f(\lambda)$ à des valeurs qui peuvent ne plus correspondre aux dernières études faites par les biologistes, soit de modifier la valeur de la grandeur G si $f(\lambda)$ est changée.

D'autre part, devant le caractère expérimental de la fonction $f(\lambda)$ on peut poser le problème du bien-fondé des études métrologiques dans ce domaine, alors que dans la pratique les écarts d'un individu à un autre sont importants.

DÉFINITION DES UNITÉS PHOTOBIOLOGIQUES

1. *Méthode traditionnelle*

Pour définir l'unité correspondant à la grandeur G précédemment décrite, on peut, se référant à ce qui a été fait avec succès dans le cadre de la photométrie, se fixer une répartition spectrale énergétique de référence pour $(d\Phi_e/d\lambda)$, par exemple une source étalon, et dire que dans ce cas G est égal à n fois l'unité photobiologique. Pour éclairer cette démarche, prenons le cas concret de la candela.

La définition actuelle, adoptée par la 13e Conférence Générale des Poids et Mesures en 1967, dit : "La candela est l'intensité lumineuse, dans la direction perpendiculaire, d'une surface de 1/600 000 mètre carré d'un corps noir à la tempé-

rature de congélation du platine sous la pression de 101 325 newtons par mètre carré". Cette définition revient donc bien à fixer une répartition spectrale énergétique de référence sous forme d'une source et à lui attribuer un certain nombre de fois l'unité considérée.

On peut également se demander quelles ont été les motivations qui ont conduit au choix d'une telle définition. Je pense que la réponse se trouve dans la remarque suivante faite par J. Terrien dans l'introduction de son rapport : "Le choix des grandeurs, de leurs définitions et de leurs unités, n'est pas imposé par l'expérience. Le critère est la commodité. Ce choix est conventionnel, et le choix le meilleur est celui qui est le plus commode". Lorsque les premières mesures de photométrie ont été effectuées, au début du siècle dernier, le seul instrument dont on disposait était l'oeil, appareil très sensible mais seulement capable d'apprécier avec précision des égalités de sensation. Pour raison de commodité, on a donc été conduit à définir une source étalon, source qui a subi de nombreuses variations au cours du temps, au gré des progrès de la technique, jusqu'à la définition actuelle. La source actuellement utilisée, le corps noir, permet de faire, grâce à la loi de Planck, la relation entre intensité lumineuse et intensité énergétique, et ainsi de calculer la valeur de c appelée K_m en photométrie. Les progrès faits récemment dans la mesure des rayonnements en grandeur énergétique peuvent remettre en question le choix de la source étalon comme étant le plus commode.

Si nous nous en tenons à la définition précédemment exposée et illustrée par le cas de la candela, les coefficients tels que c deviennent comme K_m une grandeur expérimentale qui relie par exemple le "flux photobiologique" au flux énergétique, ou encore "l'éclairement photobiologique" à l'éclairement énergétique. Si l'on suit la démarche historique, chaque grandeur photobiologique se verra donc attribuer une unité particulière et nous aurons une série de coefficients exprimant la correspondance "grandeur photobiologique" - grandeur énergétique, ces coefficients ayant une dimension. On est donc amené à introduire dans le SI autant d'unités de base nouvelles qu'on veut définir de grandeurs photobiologiques ; on complique ainsi inutilement le système. On peut donc, à juste titre, se demander s'il est indispensable de créer une unité nouvelle pour chaque grandeur photobiologique.

2. *Nouvelle méthode*

La mesure des rayonnements en grandeur énergétique peut se faire actuellement dans le domaine de longueur d'onde qui nous intéresse avec une exactitude satisfaisante pour la plupart des utilisations photobiologiques ; on en est même arrivé au point de se poser la question de savoir si la candela ne devrait pas être définie à partir des unités énergétiques (*Comité Consultatif de Photométrie et Radiométrie (CCPR)*, 8e session, 1975). Dans ces conditions, il est possible d'envisager de définir toutes les unités photobiologiques directement à partir des grandeurs énergétiques ; les unités photobiologiques deviendraient des unités dérivées des unités énergétiques et n'auraient plus besoin d'être considérées comme des unités de base.

La question est de savoir s'il est nécessaire de créer une *unité dérivée* particulière pour chaque grandeur photobiologique. Si l'on se réfère au projet de rapport du *Comité Consultatif des Unités (CCU)*, 5e session, 1976, cité par J. Terrien, "La grandeur en question doit toujours être spécifiée, car l'unité ne suffit pas pour faire connaître la nature de la grandeur". On peut envisager de n'utiliser qu'une seule unité pour toutes les grandeurs photobiologiques quelle que soit la fonction $f(\lambda)$, puisque cette dernière serait précisée dans la grandeur étudiée. Par exemple, le flux "photobiologique" aurait pour unité le watt et tous les coefficients tels que c seraient égaux à 1. Cette hypothèse semble intéressante puisqu'elle va dans le sens de la simplification du SI. Il serait donc souhaitable qu'elle fasse l'objet d'une discussion approfondie entre les intéressés.

Il est possible de considérer le problème d'une manière moins satisfaisante sur le plan des principes mais peut-être plus utile sur le plan pratique. En fixant tous les coefficients tels que c égaux à 1, on pourrait envisager de donner un nom particulier aux unités photobiologiques, ce nom étant unique quelle que soit la fonction $f(\lambda)$ considérée et ne servant simplement qu'à mettre en évidence le fait que cette unité s'applique à une grandeur définie pour un récepteur photobiologique considéré.

CAS PARTICULIER DES GRANDEURS ET DES UNITÉS PHOTOMÉTRIQUES

Les grandeurs et les unités photométriques sont du point de vue théorique des grandeurs et des unités photobiologiques

au même titre que les autres ; il serait logique qu'elles suivent les mêmes règles. Cependant, du point de vue pratique elles posent quelques problèmes liés à un usage beaucoup plus répandu et une définition plus ancienne que pour la plupart des autres grandeurs photobiologiques. La principale difficulté tient au fait qu'elles figurent comme unité de base du SI. Leur intégration dans le cadre des unités photobiologiques telles qu'elles viennent d'être décrites suppose donc deux opérations : d'une part, leur donner une nouvelle définition à partir des grandeurs énergétiques et, d'autre part, supprimer la candela des unités de base du SI pour en faire une unité dérivée.

Le projet de modification de la définition de la candela, unité de base du SI, tel qu'il est envisagé pour le moment doit prendre en considération les conditions généralement admises pour l'adoption d'une nouvelle définition d'une unité de base ; c'est-à-dire, d'une part, le gain en exactitude doit être significatif et justifier le changement de définition et, d'autre part, le maintien de la continuité dans les mesures doit être assuré. Il ne semble pas que les discussions de la 8e session du CCPR (1975) aient pu apporter une réponse décisive à ces deux conditions en faveur du changement. Les travaux récents dans ce domaine ne semblent pas avoir fait évoluer d'une manière sensible, dans un sens comme dans l'autre, les données du problème. Ce n'est donc pas dans cette direction qu'il faut chercher les raisons fondamentales d'un tel changement.

La suppression de la candela des unités de base pour en faire une unité dérivée permet d'envisager le problème sous un angle différent. En effet, il n'est plus nécessaire de savoir si la grandeur qui doit servir de référence est le flux, l'intensité ou l'éclairement, puisque toutes sont des grandeurs dérivées au même titre (voir *Recommandation P 2 (1975)*). Des deux conditions énoncées précédemment pour effectuer un changement de définition de l'unité de base, seule la seconde reste valable dans le cas d'une unité dérivée, c'est-à-dire assurer la continuité des mesures. En effet, l'augmentation d'exactitude n'est pas à prendre en considération puisque les raisons du changement sont essentiellement caractérisées par l'application de méthodes de pensée plus physiques dans la détermination métrologique des grandeurs photobiologiques en général.

CONCLUSION

Ma position actuelle, en attendant plus amples discussions et informations, en ce qui concerne les grandeurs photobiologiques est donc la suivante :

- définition uniforme pour toutes les grandeurs photobiologiques, y compris les grandeurs lumineuses, et de la forme

$$G = c \int_{\lambda} (d\Phi_e/d\lambda)\ f(\lambda)\ d\lambda,$$

- attribution de la valeur 1 (sans dimension) à toutes les quantités telles que c,

- suppression de la candela des unités de base pour en faire une unité dérivée du SI.

Ces propositions représentant un changement très important, principalement en ce qui concerne les grandeurs et les unités photométriques, il serait nécessaire de discuter à fond de l'opportunité d'un tel changement et surtout de ses modalités.

(20 mai 1977)

ANNEXE P 9

Sur les grandeurs comportant un facteur biologique

Commentaires de S. NÜNDEL

Amt für Standardisierung, Messwesen und Warenprüfung (Rép. Dém. Allemande)

(Traduction du Document CCPR/77-20)

Tout d'abord, nous remarquons que les différents effets biologiques auxquels J. Terrien se réfère (Annexe P 2) ne sont généralement pas des énergies ou des puissances et par conséquent ne peuvent pas être définis a priori par les unités joule ou watt.

Habituellement, pour mesurer des effets biologiques, il ne suffit pas de se servir de méthodes purement physiques. Celles-ci doivent être remplacées ou complétées par des méthodes spécifiques au domaine considéré (chimie, biologie ou médecine) qui tiennent compte des particularités du *récepteur biologique* du rayonnement. Tant qu'il est possible de mesurer et d'additionner les effets, les recherches sur le rapport entre le flux énergétique Φ_e et l'effet Φ s'appuient sur des expressions mathématiques telles que :

$$\Phi = K \int_\lambda \Phi_{e,\lambda} \, V(\lambda) \, d\lambda, \qquad (1)$$

$$\Phi_e = \int_\lambda \Phi_{e,\lambda} \, d\lambda,$$

où

$\Phi_{e,\lambda}$ est la densité spectrale de flux énergétique, et

$V(\lambda)$ l'efficacité lumineuse relative spectrale, sans dimension, fixée par accord international.

Du point de vue physique, la connaissance de $K\ V(\lambda)$ comme effet produit et de $\Phi_{e,\lambda}$ comme rayonnement causant l'effet est tout à fait suffisante et claire pour décrire la situation. Le problème de la meilleure définition d'une unité pour les effets biologiques se concentre donc sur la question de savoir quelle convention il faut adopter pour le facteur K dans (1). J. Terrien présente trois variantes. A notre avis, on peut en tirer les conclusions suivantes :

1. Le principe qui consiste à décrire un effet biologique causé par un rayonnement par une *puissance efficace* a notre faveur en général. Cette puissance efficace devrait être la puissance d'une lampe qui n'émet de rayonnement qu'au maximum de la *courbe d'efficacité* correspondante et qui fournit le même effet biologique que le rayonnement considéré. Pour une telle lampe *idéale*, le facteur d'efficacité serait égal à 1, donc la puissance émise serait égale à la puissance consommée.

2. Le principe formulé au point 1 d'une manière générale peut être appliqué aussi aux unités photométriques puisqu'il s'agit, ici encore, de grandeurs physiques évaluées biologiquement. Cependant, il faut tenir compte dans ce contexte des habitudes pratiques et de leur évolution historique. C'est pourquoi on peut aussi être d'accord pour conserver les unités photométriques existantes. Nous croyons que l'on pourrait envisager trois étapes, qui semblent logiques dans l'ordre suivant :

2.*1*. Les unités photométriques restent en vigueur ; l'une d'elles reste l'unité de base du SI. Ce n'est que la définition à partir du corps noir qui est remplacée par une autre, en adoptant une valeur fixée pour la constante K_m.

2.*2*. Les unités photométriques et leur définition par la constante K_m restent valables. Mais elles sont considérées maintenant comme des unités hors système pour le domaine spécial de la photométrie (ou du rayonnement optique), par exemple 1 lm = 1/680 W (ou en se servant d'un autre facteur de conversion convenu).

2.*3*. Les unités photométriques sont remplacées par les unités correspondantes du SI (W, etc.). Les grandeurs photométriques sont considérées dès lors comme des "grandeurs évaluées biologiquement" suivant le point 1. Les valeurs numériques sont modifiées en utilisant la fonction de conversion mentionnée sous 2.*2*

3. La variante N° 1 proposée par J. Terrien (conformément aux prescriptions adoptées jusqu'ici) aboutirait forcément pour les autres effets biologiques à de nouvelles définitions de grandeurs, ce qui irait à l'encontre de la simplicité envisagée du système d'unités.

4. La variante N° 2 proposée par J. Terrien (maintien des valeurs numériques, changement du nom de l'unité de mesure de lumen en watt, etc.) est rejetée parce que, dans ce cas, les valeurs numériques pour le facteur d'efficacité seraient supérieures à 1 ; ceci serait en contradiction évidente avec les pratiques physiques courantes et aboutirait à des difficultés de compréhension et à des erreurs.

5. Nous pensons qu'il appartient aux seuls spécialistes compétents de décider dans quelle mesure il est nécessaire, possible et opportun de définir les grandeurs comportant un facteur biologique. Pour la réalisation des unités de telles grandeurs nous proposons la répartition des tâches suivantes :

5.*1*. Les scientifiques de chaque domaine particulier établissent la courbe du *facteur d'efficacité*.

5.*2*. Le laboratoire national de métrologie fournit les possibilités de mesure de la répartition spectrale du rayonnement.

Il serait alors possible de calculer pour chaque courbe du *facteur d'efficacité*, la valeur correspondante de la grandeur.

ANNEXE

1. Il est exact que chaque grandeur (ou mieux : chaque espèce de grandeur) n'a qu'une seule unité. Mais il n'est pas exact qu'il y ait pour plusieurs espèces de grandeur la même unité. La notion d'*unité* est définie comme "une grandeur de même espèce choisie par convention". Deux unités ne peuvent donc pas être *égales* quand elles appartiennent à deux espèces de grandeur différentes. En revanche, elles peuvent avoir la même dénomination, c'est-à-dire porter un *nom égal*. Dans ce cas, elles ont aussi la même dimension dans le système de grandeurs formant la base du Système International d'Unités SI (exemple : l'unité newton-mètre pour le moment d'une force et le joule pour le travail).

2. Nous sommes d'accord que la distinction d'une grandeur doit s'effectuer d'abord par son nom ou son symbole et qu'il

faut éviter, pour distinguer ou caractériser la grandeur, d'ajouter un qualificatif au symbole de l'unité de mesure. L'expérience nous montre cependant qu'il est impossible de parvenir à une interdiction de cette pratique. Des indications comme 10 MPa (Ü)*, 220 V (Ws)*, 110 V (Gs)* et 100 m^3 (Nz)* sont inévitables pour les raisons les plus diverses, telles que manque de place à l'endroit voulu, facilité d'écrire, clarté des indications. Pour que l'avantage du SI présenté par J. Terrien, à savoir qu'il est commode, soit réel, il faudrait voir si l'on ne pourrait pas remplacer l'interdiction de la "distinction de la grandeur au moyen du symbole de l'unité" par des recommandations fixant les cas où de telles distinctions seraient admises, et comment elles devraient être réalisées, si possible d'une manière identique pour tous les domaines. La norme TGL 18 233 "Druck ; Kennzeichnung von Überdruck, Unterdruck und absolutem Druck" pourrait, par exemple, servir de référence. La réglementation pourrait s'étendre en passant par des distinctions comme dB (AI), dB (re 1 mW), etc. aux propositions telles que Gy (em) pour remplacer rem ou éventuellement aussi W (v) - "watt visuel" - pour remplacer lm, V (Ws), V (Gs) ou m^3 (Nz) ; mais il faudrait toujours tenir compte des restrictions telles qu'elles sont prévues dans la norme TGL 18 233, à savoir que de telles abréviations pour présenter les symboles des unités ne s'emploient que dans le cas où leur utilité ou leur opportunité peuvent être justifiées. (Voir aussi W. Reichardt, Einheiten mit Kennzeichen : *Elektrie*, *30*, 1976, pp. 483-488).

(27 juin 1977)

---

* Ü, surpression ; Ws, tension en courant alternatif ; Gs, tension en courant continu ; Nz, état normal.

ANNEXE P 10

Sur les grandeurs comportant un facteur biologique

Commentaires de W. D. WRIGHT. Réponse de J. TERRIEN

I.- Commentaires de W.D. Wright[*]

(Traduction du Document CCPR/77-21)

J'ai passé l'année scolaire 1976-77 à l'Université de Waterloo (Canada) et au cours de mon séjour j'ai rencontré G. Wyszecki (NRC) à plusieurs reprises ; j'ai été aussi en correspondance avec C.L. Sanders (NRC). L'un des sujets dont nous avons parlé a bien entendu été la question des étalons photométriques et de la terminologie ; on m'a récemment donné une copie du document dans lequel vous avancez l'idée d'exprimer le flux lumineux en watts (Annexe P 2).

En tant qu'ancien expert du CCPR, j'ai pensé pouvoir vous envoyer un bref commentaire sur cette suggestion, car je crains que cela ne crée beaucoup de confusion partout, hormis chez les photométristes très spécialisés. Je reconnais que la candela est indésirable dans la liste des unités de base du SI et je suis certain que la majorité des physiciens ont le sentiment qu'elle ne devrait pas y figurer. J'ai, par conséquent, un sentiment général de sympathie pour votre désir de régler cette situation, mais je pense que votre proposition ne peut être effectivement acceptée car le watt n'aurait plus une signification nette unique. Nous aurions, en effet, plusieurs types différents de watt et cela serait en

[*] Ancien expert du CCPR.

fin de compte désastreux pour la simplification que le SI devait réaliser. J'ai l'impression qu'il faut trouver une autre solution et je pense que l'idée qui, à ma connaissance, est sortie d'une réunion des représentants du NBS et du NRC en septembre 1976 est bonne. Si j'ai bien compris ce qui a été suggéré, la candela (ou le lumen) devrait être complètement éliminée des unités de base du SI et l'on devrait dresser une liste séparée des fonctions biologiques de base. La photométrie visuelle ne constituerait qu'une partie de cette liste, mais elle s'insèrerait logiquement parmi les autres phénomènes photobiologiques pour lesquels une mesure significative du rayonnement est nécessaire. Je pense vraiment qu'il faudrait étudier très sérieusement cette suggestion lors des discussions internationales sur ce sujet que vous ne manquerez pas d'avoir dans un proche avenir.

(2 juin 1977)

II.- Réponse de J. Terrien

(Document CCPR/77-21)

J'étais très heureux de recevoir de vos nouvelles par votre lettre du 2 juin 1977, et aussi de l'intérêt que vous portez à la réforme des unités radiométriques. Je voudrais commenter quelques parties de votre lettre.

"... je crains que cela ne crée beaucoup de confusion ...", comme cela se produit chaque fois que l'on veut changer les habitudes. Cependant, je suis surpris par le nombre des opinions reçues en faveur de ma proposition, qui pourrait donc peut-être, après un délai, être acceptée mieux que je n'espérais.

"... le watt n'aurait plus une signification nette unique". Le nom de l'unité ne doit pas servir à faire connaître la nature de la grandeur exprimée en cette unité. Dans le SI, chaque grandeur a une seule unité, mais une unité peut convenir à plusieurs grandeurs de nature différente. Exprimée en unités SI de base, la définition du joule est $J \equiv m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$; le joule est l'unité SI pour la chaleur, le travail, l'énergie électrique ou chimique ou quelconque, le couple, et toutes les grandeurs ayant la dimension $L^2\ M\ T^{-2}$. De même, le watt est destiné à servir comme unité des grandeurs ayant la même dimension que la puissance. C'est pourquoi le nombre des noms d'unités du SI est restreint, et cependant suffisant pour

toutes les grandeurs existantes ou imaginables en physique.

Si par convention on s'accorde à considérer que K_m est sans dimension, la dimension du flux lumineux devient la même que la dimension de la puissance, et son unité SI devient le watt.

Quant aux "fonctions biologiques de base" que vous évoquez, j'en ai déjà entendu parler ; c'est peut-être une idée intéressante, mais je n'ai pas encore pu savoir ce qu'elles représentaient, ni comment elles seraient utilisées pratiquement. Vous écrivez "si j'ai bien compris" : pour moi, pour l'instant, je ne comprends pas du tout. Peut-être cette autre solution, d'après la réunion de représentants du NBS et du NRC en septembre 1976, revient à créer, parallèlement au Système International d'Unités physiques, un autre Système d'unités des grandeurs photobiologiques, sans doute avec un nom spécial pour l'unité de chaque grandeur. Je n'aimerais pas une telle solution, parce qu'elle n'a pas le mérite de diminuer le nombre des mots à apprendre pour connaître le Système. L'une des qualités majeures du SI, tel qu'il est actuellement, est que ce système couvre toute la physique avec 7 noms d'unités de base, 2 noms d'unités supplémentaires, et, par égard aux usages et à la commodité des cas les plus courants, l'acceptation de 18 noms spéciaux d'unités dérivées (ce nombre de 18 est jugé trop élevé, et ne devrait pas être augmenté sans raison très sérieuse).

Je plaiderai donc en faveur de ma proposition, jusqu'à ce qu'une autre proposition me paraisse meilleure.

(8 août 1977)

ANNEXE P 11

Sur les grandeurs comportant un facteur biologique

Commentaires de K. G. KESSLER

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

(Traduction du Document CCPR/77-22)

En 1975, le CCPR avait recommandé que les unités photométriques soient définies à partir du lumen, lui-même dérivé des autres unités de base du SI, et de valeurs acceptées pour K_m et $V(\lambda)$, de préférence à la candela telle qu'elle est définie par le rayonnement d'un corps noir. On était aussi convenu qu'à sa session de 1977, le CCPR ferait une proposition au CIPM pour mettre en oeuvre cette recommandation.

Il est important de reconnaître que cette façon d'établir les unités photométriques fournirait une base cohérente et pratique pour conserver les unités photométriques. Lorsque la nouvelle définition sera acceptée, les techniques radiométriques actuellement connues permettront de réaliser directement les unités photométriques par des procédés variés, sans qu'il soit nécessaire d'avoir recours au corps noir au point de congélation du platine ni à un dispositif analogique représentant la fonction $V(\lambda)$. Le système proposé simplifiera beaucoup la réalisation absolue des unités photométriques avec un niveau d'exactitude aussi bon ou meilleur que celui que l'on peut obtenir actuellement.

Pour bénéficier dès que possible d'un système photométrique ainsi redéfini, nous devons nous donner comme objectif primordial la mise en oeuvre du nouveau système de mesure ;

nous devons aussi nous occuper des questions de nomenclature avec soin et réflexion, mais très rapidement, pour ne pas être déçus dans notre tentative en vue d'obtenir ces améliorations dans le système de mesure.

En ce qui concerne les points soulevés dans le document de J. Terrien (Annexe P 2), la question fondamentale à laquelle nous devons faire face quant à la spécification des unités photométriques est de savoir si K_m est ou n'est pas sans dimension. Nous pensons que l'on peut assurer des échanges d'informations claires et non ambiguës en photométrie, seulement si nous prenons soin de nous mettre d'accord sur un système de grandeurs et d'unités qui exprime aussi nettement que possible ce que nous avons l'intention de leur faire dire. Le *flux énergétique* est une mesure de puissance - grandeur purement physique mesurée en *watts*. Le *flux lumineux* est une grandeur qui cherche à représenter la sensation perçue par l'oeil humain. Dans l'idéal, les unités seraient des unités de *sensation*. Comme il n'existe pas de moyen de mesurer directement cette sensation, nous avons essayé de l'exprimer au moyen d'une fonction convenue, $V(\lambda)$, affectée de la constante K_m. Nous avons affaire ici, en flux lumineux, à une grandeur qui n'est pas la puissance, bien qu'elle soit obtenue au moyen d'une mesure de puissance.

Nous avons donc l'impression, puisque les grandeurs photométriques représentent une sensation et non une puissance, qu'il ne conviendrait pas et qu'il serait trompeur en pratique de mesurer l'une et l'autre en watts.

La grandeur de K_m, qui fixe l'échelle de $V(\lambda)$, est une question d'histoire et de commodité ; l'unité est généralement un choix de commodité. Toutefois, cela masque le caractère dimensionnel de K_m. Une valeur voisine de 680 lm/W est généralement acceptée maintenant et il est peu probable qu'elle change en pratique. Nous recommandons par conséquent de définir K_m comme égal à 680 lm/W ou tout nombre voisin de 680 sur lequel le CCPR pourra se mettre d'accord lors de sa réunion en 1977.

Dans le système photométrique proposé, les unités seraient reliées au SI au moyen de fonctions définies telles que $V(\lambda)$ ou $V'(\lambda)$. Afin de faciliter des échanges d'informations cohérents entre les laboratoires des différents pays, il est nécessaire que ces laboratoires appliquent les mêmes fonctions de pondération : il convient que le CIPM établisse des règles

uniformes pour les unités photométriques. Les Recommandations P 5 et P 6 (1975) du CCPR ont été rédigées dans ce but. Il convient que le BIPM consacre un chapitre du *Système International d'Unités* aux fonctions qui servent à obtenir les unités photométriques et avec lesquelles elles sont employées.

Il faut noter que le lumen, par exemple, n'a de sens que dans des situations qui font appel au concept de la perception visuelle. Ainsi, spécifier la sensibilité d'un tube photoélectrique dans l'ultraviolet ou l'infrarouge en ampères/lumen est incorrect et n'a pas de sens. De telles pratiques doivent être déconseillées par le CCPR.

En ce qui concerne les autres grandeurs comportant un facteur biologique, nous devons essayer de limiter le nombre des unités afin que ceux qui ne sont pas experts puissent comprendre nos communications sans avoir à se reporter à un dictionnaire spécialisé. Il existe cependant des cas où l'information risque de souffrir directement si la terminologie devient ambiguë. Dans le cas, par exemple, des unités pour la dose absorbée ou l'équivalent de dose, il semble que l'emploi du gray (J/kg) pour la dose absorbée et d'un nom spécial tel que le sievert ou le gem pour l'unité comportant un facteur biologique pour l'équivalent de dose diminuerait la confusion parmi les utilisateurs des rayonnements.

Nous recommandons que le SI soit conservé aussi simple que possible, qu'il satisfasse à l'impératif de faciliter les échanges d'informations non ambiguës. Nous suggérons que l'usage recommandé pour chaque grandeur comportant un facteur biologique soit déterminé après consultation des experts dans le domaine considéré ; nous pensons souhaitable que l'unité d'une grandeur employée pour décrire un effet comportant un facteur biologique soit la même que celle de la grandeur provoquant cet effet lorsqu'il n'en résulte aucune ambiguïté.

A ce stade, on pourrait discuter de la règle qui conduit à éviter de qualifier des unités. Les arguments qui ont fait rejeter les désignations *watts thermiques* et *watts électriques* ne sont peut-être pas valables pour des termes tels que *watts érythématiques*. Ce dernier terme appelle nettement une fonction de pondération ; encore ne forge-t-il pas une unité entièrement nouvelle.

(août 1977)

ANNEXE P 12

Sur les grandeurs comportant un facteur biologique, leurs définitions et leurs unités

Commentaires de K. P. CHIROKOV et V. E. KARTACHEVSKAIA

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

(Document CCPR/77-26)

1. J. Terrien, dans le document (Annexe P 2) envoyé aux membres du CCPR en septembre 1976, a examiné pour les grandeurs comportant un facteur biologique (c'est-à-dire pour les grandeurs destinées à l'évaluation des divers effets photobiologiques du rayonnement) la relation suivante :

$$G = C \int_{\lambda} (d\Phi_e/d\lambda)\ f(\lambda)\ d\lambda \qquad (1)$$

dans laquelle C est un facteur conventionnel, $d\Phi_e/d\lambda$, la densité spectrale de flux énergétique et $f(\lambda)$, l'efficacité relative pour l'effet considéré.

Etendant l'application de la formule (1) à toutes les grandeurs photobiologiques (flux lumineux, flux des rayonnements UV-érythème, bactéricide et autres), J. Terrien propose de choisir le facteur C égal à 1, sans dimension et d'établir de cette manière pour toutes les grandeurs considérées une seule et même relation :

$$G = \int_{\lambda} (d\Phi_e/d\lambda)\ f(\lambda)\ d\lambda \qquad (2)$$

Si le flux énergétique Φ_e est exprimé en watts et puisque l'efficacité relative est sans dimension, on pourra exprimer de même en watts les flux de toutes les espèces de rayonnements.

Ainsi, d'après J. Terrien, deux inconvénients seront éliminés : premièrement, on n'aura pas besoin d'introduire dans le SI une unité spéciale pour chaque grandeur caractérisant un effet biologique du rayonnement ; deuxièmement, la différence dans la manière de traiter des grandeurs analogues sera supprimée dans ce domaine et dans le domaine des rayonnements ionisants où le facteur correspondant est pris sans dimension (ce qui permet d'exprimer dans la même unité (J/kg) la dose absorbée et l'équivalent de dose).

J. Terrien a donné des exemples où l'on emploie la même unité pour des grandeurs différentes : le joule pour les diverses formes de l'énergie ; la seconde à la puissance - 1 pour différentes sortes de fréquence d'événements, y compris l'activité de sources de rayonnements ionisants. Il est suggéré d'employer le même principe pour toutes les grandeurs considérées.

Les propositions de J. Terrien sont très attrayantes. Mais si nous les examinons du point de vue de la théorie des liaisons entre grandeurs, nous verrons qu'elles mènent à des contradictions. Examinons s'il est possible d'adopter une seule et même relation pour toutes les grandeurs utilisées pour exprimer l'effet biologique du rayonnement (pour être bref, nous appellerons ces grandeurs des <u>grandeurs biologiques</u>).

En général, l'équation qui détermine une grandeur dérivée est la description mathématique de la liaison de cette grandeur avec d'autres déterminées auparavant, pour un phénomène physique idéal (c'est-à-dire délivré de tous les caractères qui le compliquent). En principe, on peut choisir arbitrairement le facteur qui entre dans cette équation. D'ordinaire, pour le modèle le plus simple (modèle de départ) on choisit le facteur sans dimension et égal à 1. De cette sorte, la dimension de la grandeur dérivée est définie (exemple : l'équation de l'aire d'un rectangle).

Si une équation lie des grandeurs déjà définies (ou bien des grandeurs qui sont considérées comme indépendantes l'une de l'autre) cette équation décrit alors une loi expérimentale, et pour déterminer son facteur il faut le mesurer ; ce facteur n'aura donc pas une valeur exacte. En outre, pour des raisons d'homogénéité dimensionnelle, ce facteur peut avoir une certaine dimension (exemple : la constante de gravitation dans la loi de gravitation universelle).

Les effets biologiques du rayonnement que nous voulons estimer quantitativement dépendent de la nature des phénomènes dans les corps biologiques, nature complexe et pas encore étudiée totalement. Par suite, nous ne savons pas encore déceler complètement les liaisons des grandeurs biologiques avec les grandeurs habituelles non biologiques, c'est-à-dire que nous ne savons pas introduire des grandeurs dérivées dans le sens complet de ce mot. Il faut attribuer à la deuxième catégorie mentionnée ci-dessus, les équations des liaisons de ces grandeurs dérivées avec les grandeurs physiques habituelles ; cela signifie que ces équations doivent renfermer un facteur dont la valeur dépend du caractère de la grandeur.

Dans l'état actuel des connaissances, nous ne pouvons estimer les phénomènes que d'après leur aspect énergétique ; il faudrait donc introduire des grandeurs représentant la part de l'énergie rayonnante qui est dépensée à la production de l'effet biologique correspondant. Cette condition remplie, on pourrait choisir le facteur C sans dimension. Mais l'introduction dans la relation (1) ou (2) de la fonction $f(\lambda)$ représentant la distribution spectrale d'un effet biologique, n'est pas suffisante pour déterminer la part de l'énergie transformée ; dans ce cas, il serait incorrect d'adopter $C = 1$. On peut mettre cela en évidence en considérant le cas du rayonnement monochromatique de longueur d'onde λ pour lequel $f(\lambda) = 1$ (cas du rayonnement qui produit un effet biologique maximal). Si C était pris égal à 1, la valeur de la grandeur biologique, en watts, serait égale à la valeur du flux énergétique Φ_e. Cependant, le flux de rayonnement ne peut pas se transformer entièrement en effet biologique ; ce n'est qu'une part de l'énergie rayonnante qui est utilisée pour produire cet effet. C'est pourquoi le postulat de la transformation "sans perte" serait contraire au principe de la conservation de l'énergie.

L'ensemble du facteur C et de la fonction $f(\lambda)$ pourrait jouer le rôle du *rendement* ; autrement dit, cet ensemble pourrait représenter la part de l'énergie rayonnante qui est dépensée pour produire l'effet biologique correspondant. Pour cela, il faudrait savoir quelles valeurs attribuer au facteur C pour chaque forme d'action biologique. Aussi longtemps que les valeurs du facteur C ne seront pas déterminées, il est défendu, à notre avis, d'éliminer les unités biologiques spécifiques (en particulier, le lumen, la candela et leurs dérivées).

2. Le remplacement proposé du lumen par le watt et l'adoption de K_m sans dimension signifient qu'on attribue aux grandeurs

lumineuses la même dimension qu'aux grandeurs énergétiques. Cependant, le manque de lien univoque et invariable entre les flux énergétique et lumineux montre assez clairement le caractère différent de ces deux grandeurs.

En dehors des considérations ci-dessus, on peut faire les commentaires suivants :

a) Pour les récepteurs physiques, employés d'ordinaire à mesurer les caractéristiques du rayonnement, on détermine la sensibilité comme mesure de leur réponse au rayonnement incident. Suivant le type de récepteur, cette caractéristique est en V/W, A/W, A/lm, etc., mais elle est toujours dimensionnelle et ne contient aucun facteur sans dimension. On emploie l'expression générale, de forme connue :

$$R = i_{ph} = \int_{\lambda} (d\Phi_e/d\lambda)\ S(\lambda)\ d\lambda \qquad (3)$$

Une telle relation résulte naturellement de notre savoir-faire pour mesurer directement la réponse du récepteur physique, courant photoélectrique, force thermoélectrique et autres grandeurs. Toutefois, si nous ne savions pas mesurer les grandeurs énumérées caractérisant la réponse du récepteur physique, nous pourrions considérer la grandeur R (dans la partie gauche de la relation) comme une caractéristique efficace du rayonnement pour ce récepteur de sensibilité $S(\lambda)$.

C'est de cette manière que l'on agit dans le cas des récepteurs biologiques. L'expression conventionnelle (1) ou (2) pour une grandeur efficace du rayonnement reflète le fait que la réponse de ces récepteurs n'est pas mesurée directement, bien que nous cherchions à évaluer le rayonnement conformément à la sensibilité du récepteur considéré.

En pratique, l'emploi de grandeurs efficaces dépend du degré d'importance de tel ou tel récepteur. Quand cette évaluation spécifique est indispensable, on les emploie, mais il est nécessaire de toujours se rappeler que les grandeurs R et Φ_e n'ont pas la même dimension.

b) Le but des mesures lumineuses est d'obtenir des résultats correspondant aux propriétés de l'organe de la vision. Ce problème est formulé assez précisément, en particulier dans le document CIE N° 18, "Principles of light measurements". On peut dire qu'à présent ce but n'est pas toujours ou pas complètement atteint, que les conventions de base pour les mesures lumineuses contemporaines ne sont pas suffisantes

pour que les résultats de ces mesures soient entièrement conformes à la perception visuelle et dans tous les cas. Mais cette conclusion ne change pas le but des mesures lumineuses. Au contraire, elle fait chercher les meilleures solutions au problème posé. L'importance de cette question, évidente quand il s'agit des mesures lumineuses par l'intermédiaire des unités lumineuses, sera inévitablement réduite à néant si, d'une façon formelle, la différence entre grandeurs lumineuses et énergétiques est abolie. Le sens même des concepts fondamentaux de la photométrie sera perdu. G. Wyszecki a exprimé d'une façon bien nette ses appréhensions devant de telles conséquences (p. P 41).

c) Il est impossible de partager l'opinion que le remplacement des unités lumineuses par les unités énergétiques puisse mener à une réelle simplification et à une meilleure compréhension. La nécessité de compléter toutes les évaluations numériques par les spécifications des grandeurs auxquelles ces évaluations se rapportent, exigera inévitablement beaucoup plus de temps et de place dans les expressions orales et écrites. Suivant la tendance naturelle à simplifier la façon de s'exprimer, on emploiera de temps en temps (on ne peut pas en douter) des unités illégales, le *watt électrique* et le *watt lumineux*.

Certains calculs se compliqueront à cause des confusions possibles, tandis que la séduction d'employer des expressions "modernes" - en watts pour toutes les grandeurs - nuira finalement à la solution des problèmes directs de l'éclairagisme et de l'éclairage.

L'évaluation simultanée en watts, tant de la puissance électrique consommée que du flux lumineux d'une source de lumière, mènera inévitablement à une notion fausse (au moins chez les non-spécialistes) sur le caractère réel et sur la corrélation quantitative au passage de l'énergie d'une forme à une autre.

d) Il faut examiner aussi les conséquences du changement de l'unité par un facteur 680.

La valeur 680 lm/W n'a d'autre sens que celui d'un témoignage du choix initial de l'unité à partir d'une bougie, choix qui a déterminé plus tard les dimensions de toutes les unités lumineuses. Cependant, le changement de cette dimension conventionnelle ne pourrait être justifié que dans le cas, par exemple, où la sensibilité absolue de l'oeil serait mesurée (et la valeur réelle du *rendement lumineux* pour un rayonnement monochromatique déterminée). En ce cas, les dimensions des unités

lumineuses pourraient être établies en conformité avec la nature des choses.

Mais le changement volontaire de la dimension de l'unité, dans le seul but de l'adapter superficiellement au système utilisé, ne peut pas être justifié et ne doit pas être admis. En tenant compte, tout d'abord, de considérations économiques, il est nécessaire de se rappeler du très grand nombre d'appareils de mesure et de documents qu'il serait nécessaire de remplacer. Il faut répéter que l'adaptation de l'unité au SI, faite seulement pour la pureté du principe, ne pourrait pas justifier la secousse économique et technique de toutes les modifications que ce changement exigerait.

3. Une des thèses développées par J. Terrien est la nécessité de garder la simplicité et la pureté du SI conçu pour les grandeurs physiques ; de plus, il est désirable de réduire autant que possible le nombre des unités employées. Cette thèse, dans sa rigueur extrême, provoque des objections.

On ne peut accepter comme un but la simplification du système d'unités qu'à un degré et à une condition tels que cette simplification n'appauvrisse pas le contenu du système et ne rétrécisse pas l'étendue et la diversité des problèmes étudiés.

Il ne faut pas oublier qu'en lui-même le système d'unités n'est qu'un outil conventionnel et auxiliaire. Le SI, comme tout système d'unités, doit servir à tous les problèmes et à tous les aspects des concepts et des rapports scientifiques, techniques, économiques et sociaux.

Le progrès de la science et de la technique mène inévitablement à la naissance de nouveaux problèmes, à la complication de leur contenu et de leurs conditions, à l'augmentation du nombre de grandeurs à mesurer, ces grandeurs étant de nature de plus en plus compliquée.

Le trait distinctif de la science d'aujourd'hui est, en particulier, l'extension des recherches dans le domaine de la nature vivante, où non seulement on cherche des moyens et des procédés pour servir, défendre ou exercer une influence envers les organismes vivants, mais encore on trouve et emprunte des solutions pratiques pour les divers problèmes scientifiques et techniques.

Dans ces conditions, d'une part, la nécessité d'introduire de temps en temps dans le SI certaines unités nouvelles semble

inévitable ; d'autre part, l'opposition des grandeurs comportant un facteur biologique aux grandeurs purement physiques ne doit avoir d'autre sens que celui d'indiquer le domaine des phénomènes et des procédés spécifiques, plus compliqué et moins étudié présentement que celui des phénomènes purement physiques. Cependant, le manque de connaissances n'est pas une raison d'égaliser les grandeurs biologiques aux grandeurs purement physiques, ou de considérer les premières comme secondaires.

J. Terrien est d'avis qu'en cas d'adoption de nouvelles unités SI de base selon les actions des rayonnements sur les êtres vivants, "le SI deviendrait trop compliqué, donc mauvais".

Bien sûr, le degré d'importance des unités des grandeurs et des différents phénomènes doit être examiné et évalué avant de prendre des décisions. Toutefois, le système d'unités est là pour faciliter les mesures ; les considérations conventionnelles et formelles ne doivent pas créer un obstacle supplémentaire à la solution de nouvelles questions.

N'ayant pas d'expérience particulière dans le domaine des grandeurs biologiques (excepté le domaine des grandeurs et des mesures lumineuses), nous ne discuterons pas ces questions et nous nous bornerons à une seule remarque. Le caractère et la complexité des effets biochimiques sont probablement différents dans les divers cas. Cette complexité croît, par exemple, à mesure que nous considérons les effets bactéricide, érythématique et visuel des rayonnements. Dans ces conditions, la présentation de la réponse d'un récepteur biologique sous la même forme pour tous les cas semble simpliste.

Il se peut que le rapport entre les effets biologiques et les caractéristiques énergétiques du rayonnement soit plus ou moins compliqué.

De ce point de vue, il est très important de garder une façon indépendante d'aborder le problème dans tous les cas de grandeurs biologiques, au moins durant le temps nécessaire à leur étude. Ensuite, les décisions peuvent être identiques ou non.

Conclusion

1. En résumé, nous croyons qu'il est nécessaire de garder pour les grandeurs et les unités lumineuses leurs dimensions,

valeurs et dénominations. Le caractère particulier de ces grandeurs, l'importance immense de l'organe de la vision pour chaque homme et pour la société humaine dans son ensemble, ainsi que l'existence ancienne du domaine de mesure considéré, sont des raisons suffisantes.

On pourrait envisager de revoir la question suivant la thèse formulée, mais pas avant l'obtention de nouvelles données expérimentales qui permettraient, par exemple, de déterminer quantitativement le rapport entre la puissance d'un rayonnement monochromatique et le bio-courant dans l'organe de la vision.

2. Considérant que l'apparition de nouveaux problèmes spécifiques liés aux mesures des grandeurs biologiques est un trait distinctif, propre au progrès général de la technique de mesure, nous estimons utile de recommander d'inclure l'examen de ces problèmes dans l'activité du CIPM.

La proposition faite par G. Wyszecki sur l'organisation d'un Comité Consultatif spécial pourrait être prise comme base de discussion. Compte tenu de la similitude et de l'interdépendance des problèmes à étudier, nous pensons qu'il serait peut-être plus rationnel d'étendre les travaux du CCPR en créant des groupes de travail distincts rassemblant les spécialistes nécessaires.

3. A première vue, il ne semble pas rationnel de partager le SI en branches différentes ou de créer parallèlement des systèmes d'unités de base pour les grandeurs physiques et pour les grandeurs comportant un facteur biologique.

Un seul SI doit pouvoir satisfaire tous les problèmes et tous les besoins que l'homme et que la société humaine rencontrent dans leur activité. Ce système doit contenir toutes les unités nécessaires pour la pratique.

(août 1977)

ANNEXE P 13

Danger de prolifération des noms spéciaux d'unités SI. A quoi sert le nom d'une unité?

par J. TERRIEN

Bureau International des Poids et Mesures

(Document CCPR/77-27)

Le SI doit être capable de satisfaire les besoins de la physique, de l'industrie, du commerce et de la vie courante, donc rester simple pour qu'il soit assimilable par tous les utilisateurs.

Pour connaître le SI, il suffit d'apprendre 7 (unités de base) + 2 (unités supplémentaires) + 18(noms spéciaux d'unités dérivées) = 27 mots, avec leur signification (avec en plus les préfixes). C'est là une simplicité qu'il faut maintenir pour que le SI soit un langage universel, connu et employé par tous.

A l'encontre, on reçoit fréquemment des demandes de créer de nouveaux noms spéciaux d'unités dérivées, qui seraient commodes dans une spécialité. Cette commodité pour un groupe restreint de spécialistes est compréhensible.

Mais ce qui me préoccupe, c'est que l'un des principaux arguments à l'appui de la demande est généralement la *nature de la grandeur* en cause ; exemples :

- Le pouvoir catalytique des enzymes se mesure par la quantité de matière transformée pendant un certain temps ; mais les spécialistes demandent que l'unité mole par seconde reçoive le nom spécial *katal* parce que "... they felt the need for a special name in applying this unit to catalytic

ability, a property of enzyme preparations rather than of the catalyzed reactions" (International Federation of Clinical Chemistry, submitted to IUPAC for request to CIPM).

-"The unit of the *barn*, despite of having the dimension of an area, does not represent an area but rather a likelihood (so-called cross-section) for the occurence of a nuclear reaction ..." (Nuclear Reaction Data Centers).

-"... because both the derived units for energy and torque, derived respectively from scalar and vector products of length and force, are both used by the general public, it is proposed to establish a *separate name for the torque unit* "meter-newton" (Engineers Joint Council Metric Commission, USA).

- En réponse à ma proposition de poser $K_m = 1$ en photométrie et de mesurer le flux lumineux en watts (Annexe P 2), les critiques suivantes ont été formulées :

"... your proposal is not really acceptable because the watt would no longer have a single, clear-cut meaning ... we would have several different kinds of watt ..." (Annexe P 10).

"... Es ist aber falsch, dass es für mehrere Grössenarten die gleiche Einheit gibt" (Mais il n'est pas juste qu'il y ait pour plusieurs espèces de grandeur la même unité) (Annexe P 9).

"... because the concept of luminous flux is by no means equal to that of radiant flux" (Annexe P 6).

"... it does not appear "logical" to measure the attribute of ... (visual perception) ... in terms of the watt which is clearly identified as the unit of the purely physical quantity power" (Annexe P 4).

On voit par ces exemples (et je pourrais en citer d'autres, par exemple l'équivalent de dose) que dans l'esprit de beaucoup de physiciens, si deux grandeurs sont de nature différente, elles doivent pour cette raison avoir des unités différentes (même si elles ont la même dimension dans un système dimensionnel parallèle au SI). Si l'on accepte ce principe, les noms d'unités deviendront aussi nombreux que les grandeurs, dont le nombre est quasi illimité.

Le CCU a exprimé clairement que "le nom de l'unité ne suffit pas pour faire connaître la grandeur". Mais il n'a pas exprimé clairement à quoi doit servir le nom de l'unité. Pour l'exprimer, je propose ce qui suit : le nom de l'unité sert seulement à compléter une déclaration telle que "une longueur de 2" ; il faut ajouter qu'il s'agit de 2 mètres, ou 2 micromètres, ou 2 inches, etc., que cette longueur soit une distance, une profondeur, la circonférence d'un cercle,

ou la hauteur d'un géant. De même, 20 MW peut être la puissance du courant électrique, ou la chaleur produite par seconde, dans le cas d'une usine thermique de production d'électricité : l'unité sert seulement à préciser qu'il s'agit de mégawatts, et non pas de milliwatts ou de chevaux-vapeur. C'est à cela, et à cela seulement, que doit servir le nom de l'unité : pourtant, je ne crois pas avoir vu cette affirmation exprimée explicitement dans aucune publication.

Donc, en toute rigueur, dans le SI, une seule unité doit servir pour toutes les grandeurs de même dimension, même si ces grandeurs sont de nature différente.

Des exceptions sont pourtant en vigueur :

"... le CIPM ne voit pas d'inconvénient à l'emploi de certains noms spéciaux afin de faciliter la distinction entre des grandeurs ayant la même dimension" (Hz plutôt que s^{-1}, Bq plutôt que s^{-1}, etc., brochure sur le SI, 3e édition, à la fin de II.2.1).

Ces exceptions sont justifiées par des arguments sérieux, mais étrangers au SI et devraient rester des exceptions. Malheureusement, elles perpétuent l'idée que chaque grandeur doit avoir sa propre unité, et que l'on peut demander à la CGPM un nom spécial pour chaque unité.

Comment se prémunir contre ce danger qui risque de faire dégénérer le SI par gigantisme ?

(16 août 1977)

ANNEXE P 14

Sur les grandeurs comportant un facteur biologique

Commentaires de A. MARÉCHAL

(Document CCPR/77-29)

Après lecture des divers documents préparant notre réunion de septembre 1977, mon opinion *personnelle* sur les problèmes qui doivent être débattus est la suivante :

1) On doit séparer très nettement les grandeurs physiques dont la définition est claire et les grandeurs comportant un facteur biologique dont la définition ne peut être très précise. Il apparaît en particulier que les non-linéarités (défauts d'additivité) qui accompagnent les grandeurs photométriques doivent les exclure des unités de base du SI. Avant de débattre des relations entre le lumen et le watt ne devrait-on pas :

- préciser les non-linéarités inhérentes aux phénomènes de perception visuelle ?
- définir ce que l'on entend par *unité* dans un phénomène non linéaire ?

2) Les unités photométriques intéressent de nombreux produits industriels et touchent le grand public ; il serait irréaliste de vouloir changer rapidement les unités actuellement en usage. En particulier, les raisons de l'utilisation du watt comme unité seraient mal perçues et il convient de ne pas opérer trop rapidement si l'on ne veut pas s'exposer à de nombreux malentendus et peut-être à des distorsions. C'est pourquoi je suggère :

a) de réserver le watt à l'usage des physiciens ou éventuellement à certains domaines biologiques où n'interviennent pas de non-linéarités. L'élargissement abusif de l'usage du watt me paraît dangereux pour le prestige des unités du SI.

b) de conserver les unités photométriques actuelles (lumen, candela) en les rattachant au watt à l'aide de l'ensemble des résultats récents de mesures ou de calculs théoriques (fondés sur la loi de Planck).

c) de choisir la valeur pour K_m qui paraîtra compatible au mieux avec l'ensemble des résultats

- de mesures expérimentales
- de déterminations théoriques (loi de Planck).

Il semble que l'on puisse actuellement choisir K_m = 682 ou 683 lumens par watt.

(1er septembre 1977)

ANNEXE P 15

Nouvelle détermination expérimentale de la constante K_m

par F. HENGSTBERGER et C. J. KOK

National Physical Research Laboratory (Afrique du Sud)

(Document CCPR/77-18)

Résumé.- Une valeur de l'efficacité lumineuse spectrale maximale (K_m) est déduite des données expérimentales obtenues avec le radiomètre absolu et un groupe de neuf lampes étalonnées au BIPM suivant la réalisation moyenne (1961) de la candela. Le filtre $V(\lambda)$ utilisé au cours de ces travaux a été étalonné avec le spectrophotomètre de référence du NBS et avec celui du NPRL. Compte tenu de la grande sensibilité du radiomètre absolu utilisé au NPRL, les mesures radiométriques ont été effectuées sans récepteurs auxiliaires.

Abstract.- A value for the maximum spectral luminous efficacy of radiation (K_m) is derived from experimental data obtained with the NPRL absolute radiometer and a group of 9 standard lamps calibrated at the BIPM in terms of the 1961 world mean candela. The $V(\lambda)$-filter used in this investigation was calibrated both with the reference spectrophotometer at the NBS and at the NPRL. Owing to the high detectivity of the NPRL absolute radiometer, the radiometric measurements were performed without employing auxiliary detectors.

INTRODUCTION

A propos des discussions actuelles au sujet des unités lumineuses [1,2], on a porté beaucoup d'intérêt à la valeur de la constante K_m qui joue un rôle central dans la nouvelle définition proposée. Elle relie la luminance L d'une source lumineuse à la luminance énergétique spectrale $L_{e,\lambda}$ évaluée en fonction de la réponse spectrale de l'oeil moyen [$V(\lambda)$] :

$$L = K_m \int L_{e,\lambda} \; V(\lambda) \; d\lambda \qquad (1)$$

Dans la définition actuelle de l'unité lumineuse, la luminance $L(\mathrm{Pt})$ du corps noir au point de congélation du platine est de 6×10^5 cd·m^{-2}. La luminance énergétique spectrale du corps noir à une température T est donnée par la loi de Planck ; nous pouvons en déduire la valeur théorique de K_m :

$$K_m = L(\mathrm{Pt}) \Big/ \left\{ \frac{c_1}{\pi n^2} \int \frac{\lambda^{-5} V(\lambda) d\lambda}{\exp[c_2/(n\lambda T(\mathrm{Pt}))]-1} \right\}. \qquad (2)$$

Les principales incertitudes dans la détermination de K_m résultent de l'incertitude sur le point de congélation du platine $T(\mathrm{Pt})$ ainsi que, dans une certaine mesure, des incertitudes sur c_1 et c_2.

Nous donnerons dans le tableau suivant quelques valeurs théoriques de K_m, calculées pour c_1 = 3,741 5 x 10^{-16} m^2.W et c_2 = 0,014 388 m·K à différentes températures $T(\mathrm{Pt})$.

TABLEAU I

$T(\mathrm{Pt})$	2041	2042	2043	2044	2045 K
K_m	687	683	679	675	671 lm/W

La plupart des résultats expérimentaux récents donnent 2041,05 K [3,4] et 2042,65 [5] pour la température $T(\mathrm{Pt})$; cependant la valeur recommandée par l'Echelle Internationale Pratique de Température de 1968 est 2045 K [6]. Dans l'édition modifiée de 1975, la température $T(\mathrm{Pt})$ est de 2042 K [7].

Une autre méthode employée pour obtenir des informations sur K_m nécessite l'emploi d'une combinaison de filtres et d'un récepteur simulant la réponse spectrale $V(\lambda)$. Si le récepteur utilisé est étalonné dans l'échelle radiométrique absolue, il mesurera le flux énergétique Φ_e transmis à travers un filtre idéal $V(\lambda)$ directement en watts. Φ_e peut être exprimé comme suit :

$$\Phi_e = \int \Phi_{e,\lambda} V(\lambda) d\lambda. \qquad (3)$$

Dans cette relation, $\Phi_{e,\lambda}$ représente le flux énergétique spectral à la longueur d'onde λ.

Si le flux incident mesuré Φ_e provient d'une source ponctuelle d'intensité lumineuse I située à une distance d du récepteur, le flux lumineux Φ reçu par un récepteur d'aire A est :

$$\Phi = I(A/d^2). \qquad (4)$$

Φ peut aussi être exprimé en fonction de $\Phi_{e,\lambda}$:

$$\Phi = K_m \int \Phi_{e,\lambda} V(\lambda) d\lambda = K_m \Phi_e \ . \tag{5}$$

K_m peut donc être calculé à partir de la mesure de Φ_e, d et A si l'on connaît l'intensité I :

$$K_m = (A/d^2)(I/\Phi_e). \tag{6}$$

Pratiquement, il n'est pas possible d'équiper le récepteur d'un filtre optique dont la réponse soit exactement $V(\lambda)$. La combinaison récepteur-filtre a une réponse spectrale $\bar{V}(\lambda)$. En ce cas, le flux énergétique mesuré est :

$$\bar{\Phi}_e = \int \Phi_{e,\lambda} \bar{V}(\lambda) d\lambda. \tag{7}$$

Cependant, $\bar{\Phi}_e$ pourra être converti en Φ_e utilisé dans les relations (3), (5) et (6) au moyen de la transformation

$$\Phi_e = \frac{\int \Phi_{e,\lambda} V(\lambda) d\lambda}{\int \Phi_{e,\lambda} \bar{V}(\lambda) d\lambda} \bar{\Phi}_e = c\bar{\Phi}_e. \tag{8}$$

Pour calculer c, il faut connaître la réponse réelle $\bar{V}(\lambda)$ et la répartition spectrale relative de la puissance $a\Phi_{e,\lambda}$ en plus des valeurs $V(\lambda)$ données. La substitution de la répartition spectrale absolue de la puissance $\Phi_{e,\lambda}$ dans (8) par la répartition spectrale relative $a\Phi_{e,\lambda}$ (a étant une constante arbitraire, qui s'élimine dans le quotient des deux intégrales) rend la tâche moins critique. Si le récepteur utilisé est un radiomètre absolu dont la réponse spectrale est constante, la réponse du récepteur imparfait peut être remplacée par la transmission τ_λ du filtre correcteur. La mesure de τ_λ ne présente aucune difficulté dans les limites d'exactitude requises du facteur de correction c.

Nous avons remarqué que la valeur de c dépendait de moins en moins de la répartition spectrale de puissance $\Phi_{e,\lambda}$, des erreurs dans les prévisions et des résultats de mesures de $a\Phi_{e,\lambda}$ quand la courbe τ_λ se rapproche de la forme idéale $V(\lambda)$.

Dans le cas limite où $\tau_\lambda/V(\lambda) = \tau_{max}$ (τ_{max} constant), le facteur de correction c est complètement indépendant de la répartition spectrale de la source et numériquement égal à l'inverse de la transmission maximale du filtre correcteur.

En combinant (6) et (8), K_m devient :

$$K_m = (A/d^2)(I/\Phi_e)\frac{\int a\Phi_{e,\lambda}\tau_\lambda d\lambda}{\int a\Phi_{e,\lambda}V(\lambda)d\lambda} . \qquad (9)$$

Au cours de la mesure de K_m par la méthode indiquée ci-dessus, l'unique rôle du radiomètre absolu est de mesurer le flux énergétique Φ_e transmis par le filtre correcteur de transmission spectrale connue τ_λ. L'aire de l'ouverture du radiomètre A, la distance d de la source ponctuelle à l'ouverture, l'intensité lumineuse I de la source ponctuelle dans la direction axiale de l'ouverture du radiomètre et sa répartition spectrale relative de puissance doivent être obtenues par d'autres moyens.

La mesure de Φ_e à l'aide du radiomètre absolu implique l'emploi de la méthode bien connue qui consiste à comparer la puissance reçue Φ_e avec une puissance électrique P. En admettant diverses imperfections dans le processus de substitution, Φ_e peut être déduit de la puissance électrique P qui correspond au même signal du récepteur [8], soit :

$$K\Phi_e = P\,\frac{1+\chi_e(P)}{1+\chi_r(P)-\rho_r(P)}\,\frac{1-\xi_e(P')-\eta_e(P')}{1-\xi_r(P')-\eta_r(P')} \qquad (10)$$

expression dans laquelle le terme multiplicateur de P comprend les divers facteurs de correction instrumentaux pour le radiomètre absolu particulier. K corrige les influences de l'environnement sur le flux de rayonnement dans son parcours entre la source et le récepteur. Nous y incluons les effets de diffraction des écrans, les réflexions sur les bords des ouvertures et les chanfreins, les réfractions, dispersions, etc.
La combinaison des relations (9) et (10) donne l'expression finale de K_m

$$K_m = (A/d^2)(I/P)K\,\frac{1+\chi_r(P)-\rho_r(P)}{1+\chi_e(P)}\,\frac{1-\xi_r(P')-\eta_r(P')}{1-\xi_e(P')-\eta_e(P')}\,\frac{\int a\Phi_{e,\lambda}\tau_\lambda d\lambda}{\int a\Phi_{e,\lambda}V(\lambda)d\lambda} . \qquad (11)$$

Quelquefois [9], un facteur supplémentaire est ajouté pour corriger la variation de distance introduite par l'insertion du filtre correcteur entre la source et le récepteur, l'indice de réfraction du filtre étant différent de celui de l'air. Dans cet article, ce facteur n'est pas traité séparément ; il est automatiquement pris en compte par la méthode spécifique de mesure de τ_λ. Ce point sera précisé dans la section traitant de l'étalonnage du filtre correcteur.

Finalement, on peut dire que chaque détermination expéri-

mentale de K_m décrite ci-dessus est une détermination indirecte du point de congélation du platine ou, réciproquement, que chaque détermination de la température de congélation du platine par pyrométrie (ou par d'autres méthodes) est une détermination indirecte de K_m suivant (2).

MÉTHODE EXPÉRIMENTALE UTILISÉE AU NPRL

Les résultats du NPRL sont obtenus à partir d'une série de mesures faites à l'aide du radiomètre absolu [10,11,12] du NPRL sur un groupe de neuf lampes étalonnées au BIPM d'après la valeur moyenne 1961 de la candela. Un premier lot de trois lampes étalons a été envoyé en 1974 au BIPM pour étalonnage, de même que six autres en 1976. Le second lot a été mesuré avec le radiomètre absolu avant et après étalonnage au BIPM. Pendant ce temps, le premier lot a été remesuré pour servir de groupe de référence non itinérant. Les deux lots ont été transportés à la main au BIPM, ainsi qu'au retour, pour s'assurer que toutes les précautions seraient prises. Toutes les lampes ont été étalonnées à une température de couleur de 2853 K (EIPT-68, révisée en 1975). L'intensité lumineuse I des neuf lampes confiées au BIPM est donnée au tableau II.

TABLEAU II

Etalonnage des lampes utilisées comme référence d'intensité lumineuse I

Groupe I (1974)

Lampe N°	242 D	242 I	243 E
Puissance électrique (W)	250	250	500
I(cd)	315,3	312,7	650,1

Groupe II (1976)

Lampe N°	242 M	243 H	243 L	119 B	119 H	119 N
Puissance électrique (W)	250	500	500	1000	1000	1000
I(cd)	317,5	657,2	641,2	1430	1414	1440

De toutes les lampes, seule la lampe 119 H a changé de valeur pendant les transports aller et retour. Ce changement est apparu sur l'intensité lumineuse évaluée par le BIPM comparée à l'étalonnage initial du NPRL, et sur la puissance rayonnée mesurée avec le radiomètre absolu avant et après l'étalonnage au BIPM. Nous en déduisons que le changement de valeur

s'est produit entre la première mesure effectuée au NPRL et l'étalonnage au BIPM. En conséquence, seule la valeur obtenue au NPRL après retour du BIPM a été utilisée dans le calcul de K_m pour cette lampe particulière. Dans tous les autres cas, la valeur moyenne de toutes les mesures a été utilisée dans les calculs.

La répartition spectrale relative de puissance $a\Phi_{e,\lambda}$ utilisée dans les calculs du facteur de correction est déduite de la température de couleur des lampes et de l'émissivité spectrale du tungstène (donnée par De Vos), suivant la méthode utilisée par Jones [13].

Le filtre correcteur employé dans cette étude est un filtre en verre à trois composants, d'un type décrit pour la première fois par Brown comme "Filtre 1" [9]. Il a été étalonné avec le spectrophotomètre de référence du NBS [14] en 1976. Les transmissions spectrales ainsi obtenues sont en accord avec celles fournies par le spectrophotomètre du NPRL.

En raison de la résolution supérieure de l'instrument du NBS (10^{-5} en unités de transmission), la principale contribution des valeurs du NBS (outre la confirmation de celles du NPRL) apparaît dans les régions où la transmission spectrale du filtre est faible. Dans ces régions, les valeurs du NBS ont été utilisées de préférence à celles du NPRL.

Après son retour du NBS, le filtre a été contrôlé périodiquement, à intervalles d'un mois environ ; nous avons alors observé une diminution de la transmission spectrale à un taux d'environ 0,1 % par mois. Une étude du taux de variation en fonction de la longueur d'onde a montré que les dépôts sur la surface, cause de cette variation, étaient spectralement neutres. Une fois le filtre nettoyé (alcool isopropylique, puis rinçage à l'eau distillée, suivant une méthode aimablement communiquée par le NBS), les transmissions retrouvèrent une valeur bien reproductible, sans changement notable sur une période d'un an pendant laquelle le filtre fut contrôlé.

Les mesures effectuées à l'aide du radiomètre absolu ont été faites soit avec le filtre nouvellement nettoyé, soit avec les derniers ensembles de valeurs spectrophotométriques utilisés dans le calcul de c.

Un fait important au sujet des valeurs spectrophotométriques obtenues au NPRL mérite d'être mentionné maintenant. Pour se placer dans des conditions de mesure de la transmission

aussi proches que possible de la situation réelle dans laquelle le filtre allait être utilisé, une copie exacte du système de mesure radiométrique a été réalisée. Les lampes utilisées dans ce système étant du même type que celles étalonnées au BIPM, les transmissions mesurées par cette méthode incluaient toutes les causes possibles de modification de la distance lampe-récepteur due au filtre. L'étalonnage du filtre $V(\lambda)$ ayant été effectué au NBS avec un faisceau de lumière parallèle, on devait utiliser les valeurs du NBS avec une correction d'effet de distance. L'étroit accord entre les valeurs du NBS et celles du NPRL (les premières étant corrigées pour l'effet de distance) a confirmé ce fait.

Les lampes ont été mesurées à une distance de 0,932 5 m de l'ouverture du récepteur, de surface 1,002 3 cm^2. A partir des mesures précédentes avec le radiomètre absolu, nous avons obtenu les facteurs de correction suivants :

$$\chi_e(P) = 0{,}001\ 4, \quad \chi_r(P) = 0{,}000\ 2, \quad \rho_r(P) = 0{,}006\ 3.$$

La valeur de l'expression

$$[1-\xi_e(P')-\eta_e(P')]/[1-\xi_r(P')-\eta_r(P')]$$

ne s'écarte de l'unité que de moins de 0,1 %. Les incertitudes associées à ce facteur étant du même ordre de grandeur, nous avons substitué la valeur 1 dans l'expression donnant K_m. Les effets de diffraction étant négligeables avec la géométrie des instruments utilisés, la seule contribution importante au facteur de correction K est la réflexion des rayonnements sur les chanfreins de l'écran de protection placé devant le radiomètre, dans l'enceinte du récepteur. L'ordre de grandeur de cet effet est de 0,1 %, d'où K = 1,001.

RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

La figure 1 indique la valeur moyenne de K_m obtenue pour chacune des neuf lampes. Ces valeurs résultent des mesures effectuées à l'aide du radiomètre absolu sur une période de six mois. La moyenne de ces neuf valeurs est de 681 lm/W avec un écart-type de ± 2 lm/W.

Si nous utilisons ces valeurs dans le calcul des intensités lumineuses des neuf lampes, les intensités énergétiques étant mesurées avec le radiomètre absolu du NPRL, le pourcen-

tage maximal de dispersion entre ces valeurs et celles du BIPM s'élève à ± 0,5 % avec un écart-type de ± 0,3 % environ. Toutefois, en dépit de cette dispersion due aux incertitudes dans les étalonnages du BIPM et du NPRL ainsi qu'aux instabilités des lampes, l'accord entre l'échelle des intensités lumineuses du BIPM et celle des intensités énergétiques du NPRL semble tout à fait satisfaisant.

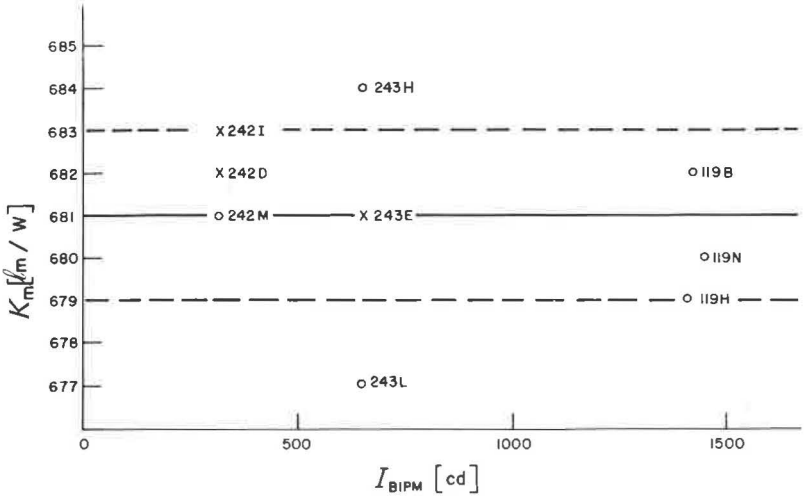

Fig. 1.- Valeurs de K_m calculées à partir des résultats de chaque lampe en fonction des intensités lumineuses assignées à ces lampes par le BIPM.

X premier groupe o deuxième groupe

CONCLUSION

La figure 2 représente les valeurs de K_m obtenues par des déterminations semblables dans d'autres laboratoires nationaux entre 1962 et 1977. Les valeurs théoriques calculées à partir de deux plus récentes déterminations de T(Pt), y sont jointes. Nous avons indiqué la relation entre K_m et T(Pt), ce qui permet une conversion facile des résultats obtenus sur une échelle ou sur l'autre. L'examen de la figure 2 montre une bonne concordance entre les valeurs théoriques et expérimentales de K_m, accord dû principalement aux déterminations récentes de T(Pt). La dispersion totale des résultats expérimentaux de K_m entre le NPL, le NML, l'ETL et le NPRL est de l'ordre de ± 0,5 %. Si cela peut être une indication de l'uniformité que l'on peut attendre d'une échelle internationale de lumière établie à partir d'une valeur définie de K_m, les résultats sont certainement encourageants.

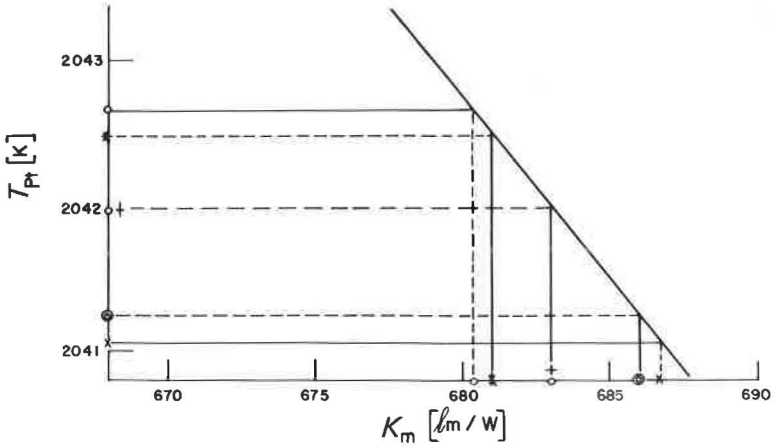

Fig. 2.- Résultats expérimentaux et théoriques récents pour K_m et T(Pt).

T(Pt)	○ Jones et Tapping (NML) [5]
	× Quinn et Chandler (NPL) [3]
K_m	⊗ Preston et Gillham (NPL) [15,16]
	+ Brown (NML) [9]
	ϕ Katsuyama et Kikuchi (ETL) [17]
	* Hengstberger et Kok (NPRL)

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier K. Rees, B.v.d. Waagen, D. Smuts et O. Weidema pour leur assistance, le NBS qui a effectué les mesures de transmission et dont la coopération a été très précieuse, ainsi que Mr Lesimple qui a traduit cet article.

(mai 1977)

BIBLIOGRAPHIE

1. BLEVIN (W.R.), STEINER (B.), *Metrologia, 11,* 1975, p. 97.
2. TERRIEN (J.), *Metrologia, 12,* 1976, p. 85.
3. QUINN (T.J.), CHANDLER (T.R.D.), Temperature, its measurement and control in science and industry, Inst. Soc. America, Pittsburg, 1972, *4*, p. 295.
4. BLEVIN (W.R.), *Metrologia, 8*, 1972, p. 146.
5. JONES (T.P.), TAPPING (J.), *Metrologia, 12,* 1976, p. 19.
6. Echelle Internationale Pratique de Température de 1968, *Comptes Rendus 13e CGPM*, 1967, et *Metrologia, 5,* 1969, p. 35.

7. Echelle Internationale Pratique de Température de 1968, édition amendée de 1975, *Comptes Rendus 15e CGPM*, 1975, et *Metrologia, 12*, 1976, p. 7.

8. HENGSTBERGER (F.), Ce volume, Annexe P 19, p. P 111, et *Metrologia, 13*, 1977, p. 69.

9. BROWN (W.J.), *Metrologia, 11*, 1975, p. 111.

10. HENGSTBERGER (F.), D. Sc. Thesis, Technische Universität, Wien, 1975.

11. HENGSTBERGER (F.), Ce volume, Annexe P 22, p. P 132.

12. HENGSTBERGER (F.), Ce volume, Annexe P 20, p. P 113.

13. JONES (O.C.), Tables of Spectral Power Distribution, NPL, 1970.

14. MIELENZ (K.D.), ECKERLE (K.L.), MADDEN (R.P.), READER (J.), *Appl. Opt.*, *12*, 1973, p. 1630.

15. PRESTON (J.S.), *Proc. Roy. Soc., A 272*, 1963, p. 133.

16. GILLHAM (E.J.), *Proc. Roy. Soc., A 278*, 1964, p. 137.

17. KATSUYAMA (H.), KIKUCHI (H.), *Metrologia, 11*, 1975, p. 165.

ANNEXE P 16

Détermination expérimentale de la valeur de K_m, efficacité lumineuse spectrale maximale de rayonnement

National Institute of Metrology (Rép. Pop. de Chine)

(Traduction du Document CCPR/77-23)

Résumé.- On a fait une détermination expérimentale de la valeur de K_m, efficacité lumineuse spectrale maximale de rayonnement. Les valeurs de l'éclairement lumineux sont obtenues directement, au moyen d'un photomètre photoélectrique de précision, à partir du groupe de lampes étalons de travail. Au cours de la mesure du facteur de transmission spectral du filtre $V(\lambda)$, on a reproduit la géométrie du faisceau pour se replacer dans les conditions de mesure de K_m. Mais surtout, on a mesuré directement l'éclairement énergétique au moyen d'un radiomètre absolu à cavité conique. On estime que la valeur résultante de K_m est de 684 lm/W avec une incertitude de ± 0,37 %.

Abstract.- An experimental determination has been made for the value of K_m, the maximum spectral luminous efficacy of radiation. Values of illuminance are calibrated directly by a precise photoelectric photometer in terms of the group of working-standard lamps. During the course of the spectral transmittance measurement of $V(\lambda)$-filter, the beam geometric condition of measurement for K_m was imitated. Above all, the irradiance is measured directly by a cone-cavity type absolute radiometer. The resultant value of K_m is estimated to be 684 lm/W with the uncertainty ± 0.37 %.

1. INTRODUCTION

Actuellement, la candela, unité d'intensité lumineuse, fait partie des unités de base du SI. Sa définition a été adoptée par la Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM) en 1948 ; elle a été modifiée en 1967 [1].

La grandeur de la candela est telle que l'intensité lumineuse d'un corps noir à la température de congélation du

platine, sous la pression de 101 325 newtons par mètre carré, soit de 60 candelas par centimètre carré. Toutefois, la réalisation expérimentale de la candela au moyen du corps noir au point du platine s'est revélée à l'usage fort difficile et malcommode : il subsiste des différences nettement trop grandes dans la grandeur des unités photométriques telles qu'elles sont conservées dans les différents laboratoires nationaux. De plus, la candela est définie actuellement par un rayonnement complexe dont la répartition spectrale relative d'énergie n'est pas encore connue avec une exactitude satisfaisante. En conséquence, pour un rayonnement monochromatique de longueur d'onde donnée, l'incertitude sur la relation entre mesures photométriques et mesures radiométriques est de l'ordre de 2 %. C'est un obstacle au développement de la radiométrie et de la spectroradiométrie. A la suite de la proposition faite par W.R. Blevin et B. Steiner en 1975, le CCPR a recommandé officiellement que l'unité de base de la photométrie soit redéfinie afin de donner une relation numérique exacte entre les unités photométriques et l'unité SI de puissance, le watt, et que la candela soit remplacée par le lumen comme unité de base [2,3].

En redéfinissant l'unité de base photométrique, il est important de déterminer la valeur de K_m expérimentalement afin d'assurer la continuité de la grandeur de l'unité photométrique.

Dans notre pays, cependant, on a réalisé l'unité de base photométrique actuelle, la candela, selon la définition de 1948 ; l'incertitude sur la candela telle qu'elle est conservée à 2045 K est de ± 0,35 %.

Tout en étudiant l'exactitude du radiomètre absolu que nous avons mis au point, nous avons déterminé de façon expérimentale la valeur de K_m ; on a utilisé directement un radiomètre du type compensé à cavité conique et on a effectué la détermination en fonction de la réalisation chinoise de la candela à 2045 K.

Nous donnons ci-après une brève description de ce travail.

2. PRINCIPE

Le principe de la détermination expérimentale de la valeur de K_m est indiqué à la figure 1. Le radiomètre absolu est placé à 900 mm de la source. Afin d'assurer une lecture stable, le radiomètre est enfermé dans un boîtier isolant thermique. De plus, pour éliminer tout rayonnement infrarouge, on a placé

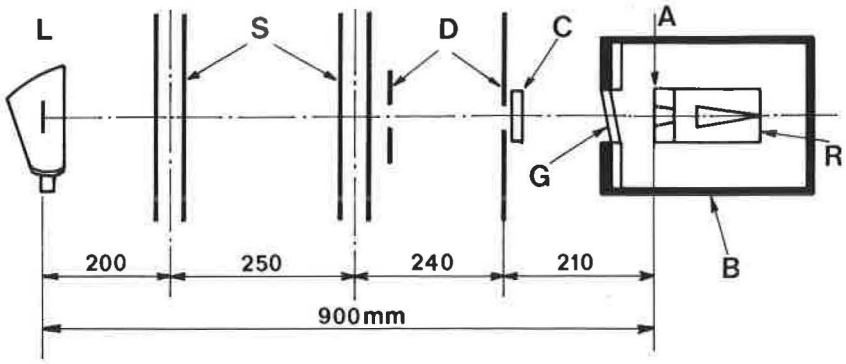

Fig. 1.- Schéma du montage utilisé pour la détermination expérimentale de K_m.

L, source lumineuse ; S, obturateur refroidi par circulation d'eau ; D, diaphragme de champ ; G, verre GRB 1 ; A, ouverture effective ; R, radiomètre absolu ; B, boîtier isolant ; C, cellule à filtre liquide.

un filtre en verre à l'entrée du boîtier ; ce filtre empêche aussi la convection de l'air et le rayonnement propre du radiomètre de perturber les mesures. Une cellule contenant un filtre liquide est placée à 210 mm de l'ouverture effective du radiomètre. Le filtre en verre et la cellule constituent un filtre V(λ) qui modifie la réponse spectrale du radiomètre pour reproduire approximativement la fonction $V(\lambda)$. Pour empêcher que le rayonnement indésirable du diaphragme d'ouverture se réfléchisse sur le filtre, et atteigne ensuite le radiomètre, le filtre est monté de telle façon que sa normale fasse un angle de 3° avec l'axe optique. La protection thermique ayant de l'importance pour effectuer avec exactitude les mesures d'éclairement énergétique, deux obturateurs refroidis par circulation d'eau sont placés entre la source et le radiomètre. L'éclairement lumineux E_v, que fournit la source L dans une position donnée, est représenté par l'équation suivante :

$$E_v = \frac{I}{d^2} = K_m \int_{380\ \mathrm{nm}}^{780\ \mathrm{nm}} E_{e,\lambda}\ V(\lambda)\ \mathrm{d}\lambda, \qquad (1)$$

dans laquelle I est l'intensité lumineuse de la source dans la direction considérée ; d est la distance entre la source et l'ouverture effective du radiomètre ; $V(\lambda)$ est l'efficacité

lumineuse relative spectrale pour l'observateur de référence photométrique ; K_m est l'efficacité lumineuse spectrale maximale ; $E_{e,\lambda}$ est l'éclairement énergétique spectral de l'ouverture effective ; l'intégration est faite sur tout le domaine visible.

Lorsqu'on le mesure au moyen du radiomètre absolu précédé du filtre V(λ), l'éclairement énergétique total est donné par :

$$E_e = \int_{380\ \mathrm{nm}}^{780\ \mathrm{nm}} \left(\frac{d}{d-\Delta}\right)^2 E_{e,\lambda}\ T(\lambda)\ \mathrm{d}\lambda \qquad (2)$$

où

$$T(\lambda) = T_{555}\ \tau(\lambda). \qquad (3)$$

$T(\lambda)$ est le facteur de transmission spectral et $\tau(\lambda)$ le facteur de transmission relatif spectral du filtre V(λ) ; T_{555} est le facteur de transmission du filtre V(λ) pour une longueur d'onde égale à 555 nm ; Δ est une petite correction de distance qui dépend de l'indice de réfraction et de l'épaisseur du filtre V(λ).

Des équations (1), (2) et (3), on peut tirer l'équation suivante :

$$K_m = T_{555}\ \frac{I}{(d-\Delta)^2}\ \frac{1}{\alpha E_e} = T_{555}\ \frac{E_v}{\alpha E_e}\ \left(\frac{d}{d-\Delta}\right)^2 \qquad (4)$$

avec :

$$\alpha = \frac{\int_{380}^{780} E_{e,\lambda}\ V(\lambda)\ \mathrm{d}\lambda}{\int_{380}^{780} E_{e,\lambda}\ \tau(\lambda)\ \mathrm{d}\lambda}$$

Pour calculer le facteur α, il faut connaître $E_{e,\lambda}$ sur tout le domaine visible, mais généralement on n'a besoin que de valeurs relatives approximatives lorsqu'il s'agit de sources incandescentes.

L'équation (4) est une équation de base de la détermination expérimentale de la valeur de K_m. A l'évidence, le travail important est essentiellement centré sur la mesure de E_v et E_e, ainsi que sur la préparation du filtre V(λ) et la mesure exacte de son facteur de transmission spectral.

3. MESURE DE L'ÉCLAIREMENT LUMINEUX

L'équation (4) montre que K_m peut être matérialisé à partir, soit d'une intensité lumineuse et d'une longueur, soit d'un éclairement lumineux. Nous avons choisi cette dernière façon de faire, afin de minimiser les erreurs sur la mesure de la distance et sur le réglage de la lampe.

Pour cette détermination, la source lumineuse doit être choisie parmi les lampes étalons d'intensité lumineuse (type BZ-6). Elle fonctionne normalement à la température de répartition de 2859 K. La lampe est à ampoule tronconique inclinée et à filament spiralé ; elle a des caractéristiques électriques et optiques excellentes en fonctionnement normal. Un écran de 40 x 45 mm est utilisé avec la lampe étalon afin de réduire l'effet de la lumière parasite. Au cours des essais de stabilité de la lampe, la reproductibilité de son émission lumineuse a été d'environ ± 0,05 % après stabilisation. Au cours des mesures, on a pu contrôler le courant avec une précision de ± 0,005 % et dans ce cas la stabilité de l'émission lumineuse a été d'environ ± 0,03 %.

L'éclairement lumineux que donne la lampe L dans le plan de l'ouverture effective du radiomètre est mesuré directement à l'aide d'un photomètre photoélectrique numérique de précision, par comparaison à un groupe de lampes étalons de travail à la température de répartition de 2859 K.

La distance utilisée pour la lampe étalon de travail est de 1,4 m ; elle permet de diminuer les erreurs provenant des mesures de distance comparativement à celles provenant de l'étalonnage de l'intensité lumineuse de la lampe L. On a corrigé la sensibilité spectrale du photomètre photoélectrique de précision pour la vision photopique et on a vérifié sa linéarité. Les défauts de linéarité sont ainsi inférieurs à ± 0,03 % et la précision de lecture est de ± 0,02 %. Finalement, l'erreur de transfert entre le groupe des lampes étalons de travail à 2859 K et l'éclairement lumineux dans le plan de l'ouverture effective du radiomètre est inférieure à ± 0,1 %.

On a déterminé l'intensité lumineuse du groupe de lampes étalons de travail à 2859 K par la méthode spectrophotométrique proposée par J. Terrien [4], à partir de l'intensité lumineuse du groupe des lampes étalons secondaires à 2045 K.

L'incertitude sur la valeur de l'intensité lumineuse d'un tel groupe de lampes obtenue par la méthode ci-dessus, à partir

4. FILTRE V(λ)

Le filtre V(λ) doit avoir une courbe de transmission voisine de la fonction $V(\lambda)$, un facteur de transmission élevé et un coefficient de température faible ; il doit surtout éliminer le rayonnement infrarouge. Le filtre V(λ) utilisé actuellement comporte un filtre en verre GRB 1 N° 2 pour éliminer le rayonnement infrarouge et une cellule à filtre liquide. La composition de la solution utilisée dans la cellule est la même que celle décrite par J.S. Preston [5]. On dispose de deux cellules à filtre liquide. Pour la cellule N° 1 les deux parois sont en verre optique K8 de 1,00 mm d'épaisseur, et pour la cellule N° 2 en verre GRB 1 de 0,75 mm d'épaisseur. L'épaisseur de la couche liquide est de 10,00 mm dans les deux cas. Nous avons vérifié le facteur de transmission spectral du filtre V(λ) au moyen d'un spectrophotomètre infrarouge ; nous sommes certains que la transmission est nulle dans l'infrarouge.

On a mesuré avec précision le facteur de transmission spectral du filtre V(λ) au moyen d'un monochromateur double. Le schéma du montage est indiqué à la figure 2.

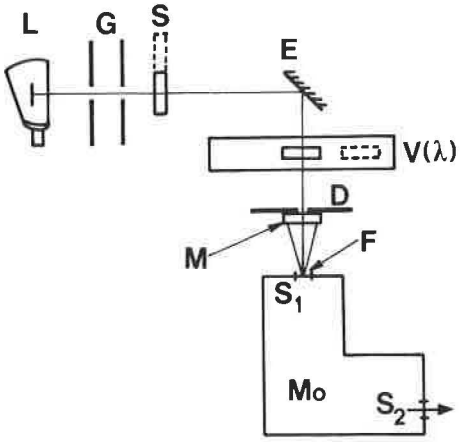

Fig. 2.- Schéma du montage utilisé pour la mesure du facteur de transmission spectral du filtre V(λ).

L, source ; G, écran ; S, obturateur ; E, miroir; V(λ), filtre V(λ) ; D, diaphragme d'ouverture ; M, verre diffusant ; F, lentille de champ ; Mo, monochromateur double ; S_1, fente d'entrée ; S_2, fente de sortie.

On place le porte-filtre entre la source et la fente d'entrée et on reproduit une disposition géométrique du faisceau identique à celle qui est utilisée pour la mesure de K_m.

On a effectué la mesure point par point, à intervalles de

de 10 nm, avec une largeur de bande spectrale de 0,6 nm dans le visible. On a soigneusement vérifié les effets qui peuvent perturber la mesure du facteur de transmission à 555 nm : largeur de bande spectrale, défaut de reproductibilité de la position et de l'obliquité du filtre, défaut de linéarité du photomultiplicateur et du système de lecture. De plus, on a calculé la correction de lumière parasite. Cette méthode de mesure du facteur de transmission est essentiellement fondée sur l'éclairement lumineux. Lorsque le filtre est placé sur le chemin optique ou en est enlevé, le rapport des courants mesurés à la sortie du photomultiplicateur n'est pas égal au "facteur de transmission vrai".

Afin d'obtenir le "facteur de transmission vrai", on doit tenir compte de la variation de la distance pour calculer l'éclairement lumineux lorsque l'on introduit le filtre dans le chemin optique. C'est un point important dans la mesure de K_m.

Si le chemin optique est le même que lors de la mesure de K_m, le rapport spectral mesuré $T'(\lambda)$ sera :

$$T'(\lambda) = \left(\frac{d}{d-\Delta}\right)^2 T(\lambda) = \left(\frac{d}{d-\Delta}\right)^2 T_{555}\, \tau(\lambda) = T'_{555}\, \tau(\lambda). \qquad (5)$$

D'après les équations (4) et (5), on a :

$$K_m = T'_{555}\, \frac{E_v}{\alpha E_e}. \qquad (6)$$

A l'évidence, une telle méthode de mesure permet de compenser l'erreur sur la mesure ou sur le calcul de Δ.

Afin de vérifier la validité de la méthode de mesure fondée sur l'éclairement lumineux, nous l'avons comparée avec la méthode fondée sur le flux lumineux en plaçant le filtre derrière la fente de sortie du monochromateur. Les résultats font apparaître un bon accord entre les deux méthodes lorsque l'on tient compte de la correction de distance. Afin de réduire l'effet d'échauffement sur le facteur de transmission du filtre $V(\lambda)$, nous avions au préalable mesuré les coefficients de température respectifs du filtre en verre GRB 1 N° 2, de la cellule N° 1 et de la cellule N° 2. Pendant la détermination de K_m, on mesure la température du filtre $V(\lambda)$ avec un thermocouple cuivre-constantan ; dès que la mesure de K_m est achevée, on commence la mesure de T'_{555}. On corrige le résultat selon la température. Pour T'_{555}, l'incertitude de la mesure est de ± 0,10 %.

La figure 3 permet de comparer les transmissions spectrales relatives des filtres V(λ) à la fonction *V(λ)*. Le facteur α du filtre V(λ) utilisé n'est pas sensible à une variation de la température de répartition. A 2859 K, une erreur de 10 K ne peut entraîner qu'une erreur de 0,016 % sur α ; l'incertitude totale sur α est de 0,05 %.

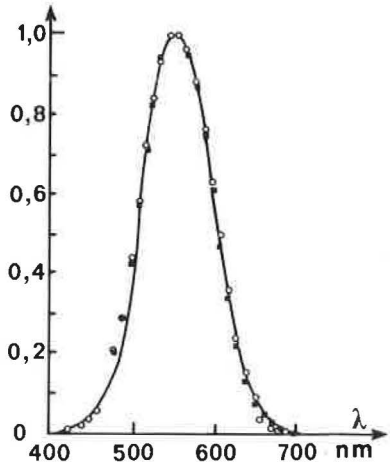

Fig. 3.- Transmissions spectrales relatives des filtres V(λ)

o : filtre A (GRB 1 N° 2 + cellule N° 1)
■ : filtre B (GRB 1 N° 2 + cellule N° 2)
— : fonction *V(λ)*

5. RADIOMÈTRES ABSOLUS ET MESURE DE L'ÉCLAIREMENT ÉNERGÉTIQUE

On a mis au point deux types de radiomètre absolu. Le premier est semblable au type disque de Gillham ; les surfaces réceptrices sont recouvertes de noir de fumée, avec un facteur d'absorption effectif de 0,984 et une réponse d'environ 300 mV/W. Le second est un radiomètre à cavité conique de 11,3° de demi-angle au sommet.

Un fil de manganine de 0,03 mm de diamètre, servant de résistance chauffante, forme un enroulement serré et uniforme sur la face interne de la cavité conique.

La résistance chauffante est revêtue d'abord de peinture noire, puis d'une mince couche de noir de pétrole. Les 80 thermocouples, disposés sur cinq couches en étoile, sont reliés à la face externe de la cavité conique ; la réponse est d'environ 240 mV/W. Les deux radiomètres absolus sont du type à compensa-

tion. Nous avons utilisé surtout le radiomètre à cavité conique pour mesurer la valeur de K_m.

Afin de s'assurer de l'exactitude du radiomètre absolu, on a fait une comparaison avec un corps noir à 1300 K et obtenu un accord à 0,2 % près. L'étude sur plusieurs années fait apparaître que l'incertitude du radiomètre absolu est de 0,25 %.

Lorsque le rayonnement de la source a traversé le filtre V(λ), l'éclairement énergétique est très faible, et par conséquent très difficile à mesurer. On mesure la différence de potentiel de sortie à l'aide d'un circuit amplificateur de compensation ; la sensibilité du récepteur est de 5×10^{-9} V et on lit la valeur de la différence de potentiel amplifiée sur un voltmètre numérique. Pendant la mesure, la différence de potentiel de sortie du radiomètre est d'environ 4 μV et, dans ce cas, on lit la valeur 4000 sur le voltmètre numérique. La dispersion d'une lecture est de 0,3 % et la précision de la valeur moyenne des mesures est de ± 0,1 %.

Le processus de mesure est le suivant :

(1) on étalonne la valeur de l'éclairement lumineux E_v dans le plan de l'ouverture effective du radiomètre ;

(2) on mesure plusieurs fois l'éclairement énergétique E_e, la réponse T'_{555} et le coefficient α du filtre V(λ) ;

(3) on étalonne à nouveau l'éclairement lumineux E_v.

De plus, on effectue la mesure avec le radiomètre du type disque pour lequel on connaît le facteur d'absorption. Les résultats sont comparés à ceux du radiomètre à cavité conique. Le tableau I donne les valeurs finales des grandeurs mesurées et de K_m.

6. ESTIMATION DE L'INCERTITUDE SUR LA VALEUR DE K_m

La valeur mesurée de K_m est de 684 lm/W avec une incertitude de ± 0,37 %. Le tableau II donne la liste des sources d'erreur et leur contribution à l'incertitude sur la valeur de K_m.

A l'heure actuelle, plusieurs laboratoires nationaux ont déterminé la valeur de K_m par radiométrie absolue ou à partir de la mesure de la température du point de congélation du platine [5-10]. Le résultat que nous avons obtenu est proche de la valeur calculée de K_m à 2042 K, température de congélation du platine.

TABLEAU I

Résultat des mesures

Type de radiomètre	E_v (lm/m²)	filtre V(λ) T'_{555}	filtre V(λ) α	filtre V(λ) N°	E_e (W/m²)	K_m (lm/W)
cavité conique	714,8	0,536 7	1,027 2	B	0,546 7	683,1
	714,9	0,537 4	1,027 2		0,547 4	683,2
	715,1	0,538 5	1,027 2		0,548 1	684,0
	715,2	0,537 4	1,027 2		0,547 0	684,0
cavité conique	717,25	0,572 2	1,006 0	A	0,596 1	684,4
	717,55	0,570 8	1,006 0		0,594 8	684 5
disque	715,4	0,537 3	1,027 2	B	0,546 2	685,1
	715,5	0,537 9	1,027 2		0,547 7	684,1
				Moyenne		684,0

TABLEAU II

Estimation des incertitudes sur la mesure de K_m

Source d'erreur	Incertitude qui en résulte sur K_m (%)
Eclairement lumineux	
candela à 2859 K	0,20
mesure de l'éclairement lumineux	0,10
Eclairement énergétique	
radiomètre absolu	0,25
mesure de l'éclairement énergétique	0,10
Filtre V(λ)	
valeur de T'_{555}	0,10
facteur α	0,05
Somme quadratique	0,37

Par conséquent, si l'on choisit 684 lm/W comme valeur de K_m pour redéfinir l'unité photométrique de base, il sera possible d'assurer la continuité de la grandeur de l'unité photométrique dans notre pays, et l'on pourra aussi faire face aux besoins de développement de la radiométrie et de la spectroradiométrie. Ces travaux de recherches constitueront, en même temps, une base solide pour la conservation et la réalisation des unités photométriques dans notre pays au moyen de la radiométrie absolue.

(24 juillet 1977)

BIBLIOGRAPHIE

1. *Comptes Rendus 9e CGPM*, 1948, p. 53.
2. BLEVIN (W.R.) et STEINER (B.), *Metrologia, 11*, 1975, p. 97.
3. TERRIEN (J.), *Metrologia, 12*, 1976, p. 85.
4. TERRIEN (J.), *Procès-Verbaux CIPM, 23-B*, 1952, p. 124.
5. PRESTON (J.S.), *Proc. Roy. Soc., A 272*, 1963, p. 133.
6. GILLHAM (E.J.), *Proc. Roy. Soc., A 278*, 1964, p. 137.
7. BROWN (W.J.), *Metrologia, 11*, 1975, p. 111.
8. KATSUYAMA (H.), KIKUCHI (H.), *Metrologia, 11*, 1975, p. 165.
9. QUINN (T.J.), CHANDLER (T.R.D.), *Metrologia, 7*, 1971, p. 132.
10. JONES (T.P.), TAPPING (P.J.), *Metrologia, 12*, 1976, p. 19.

ANNEXE P 17

Commentaires à l'ordre du jour de la 9e session du CCPR

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

(Document CCPR/77-25)

VALEUR DE K_m

Tout d'abord, il faut rappeler le point de vue que nous avons déjà soutenu, ainsi que d'autres laboratoires nationaux : l'adoption de la nouvelle définition de l'unité photométrique doit être précédée par la vérification expérimentale de la précision acquise par cette voie.

C'est pourquoi nous proposons à nouveau de procéder, dans le plus proche avenir (en 1978-1979 par exemple), à une comparaison suivant la nouvelle définition proposée de l'unité ; on jugera ainsi de sa reproductibilité.

Cette comparaison doit comprendre les mesures suivantes :

1. $P_\lambda = f(\lambda)$ – avec le calcul ultérieur de l'intensité lumineuse ;
2. $\int_\lambda P_\lambda \, \tau(\lambda) \, d\lambda$ – avec la définition de l'intensité lumineuse par l'intermédiaire des unités radiométriques ;
3. $\tau(\lambda) = f_1(\lambda)$ – pour le filtre du type $V(\lambda)$.

La décision sur l'utilité et la date du passage à la nouvelle définition ne peut être prise qu'après l'analyse des

résultats de la comparaison ; les résultats montreront la qualité réelle de ce type de mesures. Quelque attrayante que soit la nouvelle définition de l'unité proposée, les règles générales de la métrologie exigent une telle vérification. C'est d'ailleurs J. Terrien qui a exprimé ces considérations (*Comité Consultatif de Photométrie*, 8e session, 1975, p. 83).

Par ailleurs, nous sommes d'accord avec le remplacement de la candela par le lumen en tant qu'unité lumineuse de base, ce qui correspond à d'anciennes propositions de l'IMM qui ont été rejetées par les organisations internationales (en 1937-1939).

En ce qui concerne la valeur de K_m nécessaire dans certains calculs, nous sommes d'accord pour recommander la valeur calculée qui correspond aux valeurs déjà adoptées des constantes c_1, c_2 et de la température de congélation du platine (2042 ± 1)K, ainsi qu'à la définition en vigueur de la candela : (683 ± 4) lm/W.

DOCUMENT EXPLICATIF SUR LES UNITÉS ET LES GRANDEURS PHOTOMÉTRIQUES

L'introduction reflète assez précisément le but des mesures de lumière et la nature particulière des grandeurs lumineuses, en tenant compte à la fois des caractéristiques physiques du rayonnement et de la sensibilité spectrale de l'organe de la vision.

Les définitions des grandeurs lumineuses sont en général celles du Vocabulaire International de l'Eclairage, 3e édition, 1970, et ne suscitent pas d'objections.

Cependant, on ne peut pas approuver la forme de la définition des unités photométriques, en particulier la première phrase :

"In 1979, the CGPM made the unit of luminous flux, the lumen ..."

Compte tenu de la vérification expérimentale indiquée ci-dessus, nécessaire pour confirmer l'utilité et l'opportunité du passage à la nouvelle définition de l'unité, nous ne jugeons pas correct d'anticiper des décisions futures, même souhaitables. En outre, il est inadmissible d'employer le passé, en 1977, pour des décisions hypothétiques de 1979. Pour cette raison le chapitre doit être corrigé. Il doit contenir la défi-

nition de l'unité en vigueur et la formulation des nouvelles définitions proposées en tant que document de travail.

AUTRES TRAVAUX DE L'IMM

Le laboratoire travaille au perfectionnement de l'étalon primaire de la candela. Nous espérons que vers le fin de 1977 nous aurons des résultats améliorés concernant la reproductibilité de l'unité lumineuse dans des conditions plus proches qu'auparavant de sa définition théorique.

Ce même étalon primaire doit être aussi utilisé pour la mesure de la densité spectrale de luminance énergétique.

(août 1977)

ANNEXE P 18

Information sur l'état actuel de l'adoption de la Référence Radiométrique Mondiale (RRM)* par les organisations internationales

par C. FRÖHLICH

(Document CCPR/77-7, annexe)

La Commission des Instruments et Méthodes d'Observation (CIMO) de l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) a tenu sa 7e session du 1er au 15 août 1977 à Hambourg. Au cours de cette réunion, il a été décidé de recommander au Comité Exécutif et au Congrès, l'adoption de la RRM comme base de référence pour toutes les mesures radiométriques effectuées dans le domaine de la météorologie et de la physique de l'atmosphère. La nouvelle référence devra être utilisée dans les pays membres de l'OMM à partir du 1er janvier 1981, sous réserve de son adoption par le Congrès. L'accord de cette instance, cependant, est fort probable. Entre-temps, il est recommandé d'utiliser la nouvelle référence dès que possible. Jusqu'à la mise en vigueur définitive, tous les résultats devraient indiquer quelle référence a été utilisée.

En février 1977, la Commission du Rayonnement (CR) de l'Association Internationale de Météorologie et de Physique de l'Atmosphère (AIMPA) de l'Union Géodésique et Géophysique Internationale (UGGI) a été informée par correspondance de ce changement prévu par l'OMM. Bénéficiant de réactions uniquement positives, l'introduction de la RRM jouira d'un accord général de cette Commission

(29 août 1977)

*en anglais : World Radiometric Reference (WRR)

ANNEXE P 19

Amélioration de la théorie concernant les corrections instrumentales pour les radiomètres absolus*

par F. HENGSTBERGER

National Physical Research Laboratory (Afrique du Sud)

(Document CCPR/77-8)

Résumé

Dans cet article, nous présentons une théorie améliorée concernant les corrections instrumentales appliquées aux radiomètres absolus, à l'exception des effets des variations de sensibilité de la surface du récepteur. Après une brève revue du développement historique des facteurs de correction et, finalement, l'établissement d'une théorie formelle les concernant, nous en signalons quelques imperfections. En nous fondant sur un ensemble de définitions précises et sur le principe de conservation de l'énergie, nous élaborons une théorie révisée et proposons une méthode expérimentale possible de détermination des différents facteurs de correction. Cette nouvelle théorie tient aussi compte de l'influence des défauts de linéarité présents, dans une certaine mesure, dans les réponses de tous radiomètres absolus. Le rapport des sensibilités moyennes au chauffage par rayonnement et au chauffage électrique est exprimé en fonction de la perte de chaleur équivalente ou non. Nous identifions ces pertes en analysant le flux de chaleur unidimensionnel au moyen d'un modèle représentant un radiomètre absolu ; on obtient en même temps une

* *Metrologia, 13,* 1977, p. 69 (en anglais)

preuve formelle de l'équivalence des pertes de chaleur dans les fils de chauffage. Dans cette nouvelle théorie, tous les termes de correction sont des fonctions de la puissance appliquée et peuvent donc être déterminés en watts. Les possibilités et limites de cette théorie sont discutées en conclusion.

(Mai 1977)

ANNEXE P 20

Le radiomètre absolu du NPRL*

par F. HENGSTBERGER

National Physical Research Laboratory (Afrique du Sud)

(Document CCPR/77-14)

Résumé

Un système de mesure pour réaliser les échelles nationales de rayonnement lumineux et de rayonnement énergétique a été conçu et essayé pendant les six dernières années en Afrique du Sud. Son fonctionnement repose sur un récepteur étalonné (radiomètre absolu) travaillant sur le principe des bolomètres.

Cette étude est liée à la tendance internationale concernant l'étalon primaire de lumière dont la redéfinition semble imminente. Parmi les propriétés intéressantes du nouveau radiomètre absolu, on peut citer : pont en courant alternatif, utilisation d'une détection synchrone et possibilité de travail sous vide et à basses températures. Il peut détecter des niveaux d'éclairement énergétique d'environ 30 nW/cm^2 à température ambiante et dans l'air, avec une puissance dissipée dans les éléments sensibles, due au courant de pont, de 5 mW seulement. Les problèmes de dérive thermique sont évités sans avoir à recourir à la modulation du faisceau incident ; cet instrument est donc en fait très facile à utiliser.

* Research report 331 NPRL, 1977 (en anglais).

Les étalonnages peuvent être effectués aussi vite qu'avec les méthodes conventionnelles de comparaison de lampes. De cette façon, le NPRL a pu éliminer au moins deux séries hiérarchiques de lampes étalons de ses bancs d'étalonnage. Nous sommes maintenant en mesure de fournir, de manière courante, des étalons secondaires d'intensité lumineuse directement étalonnés avec le radiomètre absolu.

Cet article concerne seulement le nouveau radiomètre absolu, sa conception, son emploi et ses caractéristiques. Une description du système complet de mesure fonctionnant avec cet instrument est donnée dans un autre article (Annexe P 22).

(Mai 1977)

ANNEXE P 21

Mesure des caractéristiques de sensibilité d'un radiomètre absolu : étude d'un cas concret

par F. HENGSTBERGER

National Physical Research Laboratory (Afrique du Sud)

(Document CCPR/77-15)

Résumé.- Description d'une méthode expérimentale pour la mesure précise de la sensibilité d'un radiomètre absolu en fonction de la puissance appliquée. Présentation et analyse des résultats obtenus à l'aide de cette méthode. Discussion des raisons du défaut de linéarité de la réponse observée avec de tels instruments. Conséquences de ce phénomène concernant les procédés utilisés pour mesurer les facteurs de correction des radiomètres absolus.

Abstract.- An experimental method for the accurate measurement of the responsivity of an absolute radiometer as a function of the applied power is described. Results obtained with this method are presented and analysed. Reasons for the non-linearity of response observed with such instruments are discussed and reference is made to the implications of this phenomenon on the procedures used in the measurements of the instrumental correction factors of absolute radiometers.

INTRODUCTION

De même qu'un récepteur n'est jamais absolument non sélectif, sa réponse n'est jamais absolument linéaire. Pour certaines applications, on peut admettre qu'un récepteur particulier fournit une réponse linéaire ; pour d'autres applications, cependant, il faut tenir compte de la non-linéarité. La radiométrie absolue de précision est l'un des champs d'application où les moindres défauts de linéarité deviennent importants [1]. C'est dans ce domaine que l'on dispose de très bonnes possibilités pour étudier ces défauts de linéarité. Des résistances chauffantes électriques étant

incorporées dans les récepteurs radiométriques absolus, il est possible d'étudier de façon précise et indépendamment de la stabilité d'une source d'énergie rayonnante comment leur sensibilité et leur sensibilité différentielle dépendent de l'énergie.

Les résultats expérimentaux obtenus à l'aide d'un radiomètre absolu comportant un bolomètre métallique comme élément sensible sont indiqués ci-après ; des raisons sont données pour expliquer les caractéristiques des courbes de sensibilité obtenues.

Le signal des bolomètres utilisés comme récepteurs de rayonnement thermique [2,3,4] est dû à l'élévation de la température de l'élément sensible, elle-même provoquée par l'absorption du rayonnement incident. Le principe suivant lequel un bolomètre à résistance indique cette élévation de température repose sur le fait que la résistance électrique de l'élément sensible change en fonction de la température. Les bolomètres à résistance peuvent être divisés en deux groupes, suivant le type de leur élément résistant : les bolomètres métalliques d'une part et les bolomètres à semi-conducteurs d'autre part. Comme leur nom l'indique, l'élément résistant du premier groupe est métallique. La résistance R, en fonction de la température T, est donnée par la relation :

$$R = R_0 \ (1 + \alpha(T - T_0)), \qquad (1)$$

où R_0 est la résistance à la température T_0, α le coefficient de température de la résistance. (1) est une relation linéaire entre la variation de résistance $R-R_0$ et la variation de température $T-T_0$. On a une relation différente dans le cas des bolomètres à semi-conducteurs :

$$R = R_0 \ e^{A/T} \ , \qquad (2)$$

A étant une constante.

Les éléments résistants sont généralement intégrés dans un montage en pont, le rayonnement incident ayant pour effet de déséquilibrer ce pont.

Avant de considérer la sensibilité des bolomètres métalliques de façon plus détaillée, il est nécessaire de définir ce que nous appelons "sensibilité" dans le cadre de cette étude.

Lorsqu'un rayonnement énergétique de composition arbitraire, c'est-à-dire une énergie absorbée P, provoque un

signal Y à la sortie du récepteur, le quotient Y/P est la sensibilité S du récepteur [5] :

$$S = Y/P. \tag{3}$$

Un récepteur est linéaire lorsque Y est proportionnel à P, c'est-à-dire lorsque S est invariable. Un autre concept qui sera utilisé dans ce contexte est celui de la "sensibilité différentielle" S_D. On peut la définir [5] comme la pente de la courbe de sensibilité en un certain point :

$$S_D = dY/dP. \tag{4}$$

Il est nécessaire d'étendre cette notion de sensibilité dans le cas des récepteurs sélectifs. Cependant, comme nous nous limitons à un type de récepteur presque non sélectif sur une grande partie du domaine spectral, les deux concepts définis ci-dessus sont suffisants dans le cadre de cette étude.

Le bolomètre absolu.- Une description détaillée de l'instrument utilisé a déjà été publiée [6,7] ; nous résumerons donc simplement ses caractéristiques les plus importantes.

La figure 1 représente le boîtier du récepteur.

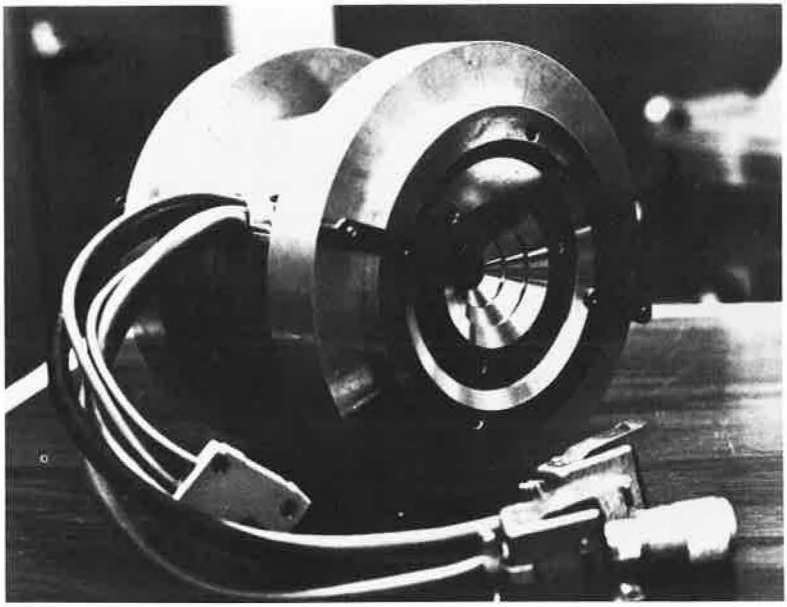

Fig. 1.- Radiomètre absolu.

Il contient deux radiomètres absolus complets, situés dos à dos. Une seule des deux ouvertures de précision du récepteur, délimitées par des plaques en invar, est visible sur la figure 1. La seconde, identique, se trouve sur la face opposée du boîtier. Des écrans de protection contre les rayonnements sont placés devant chaque ouverture afin de minimiser une éventuelle élévation de température côté source. A l'intérieur du boîtier en aluminium, derrière chacune des plaques en invar, se trouve une sphère réfléchissante. Un élément récepteur, représenté schématiquement à la figure 2, est suspendu par des fibres de verre au centre de chacune de ces sphères. L'épaisseur totale de cet élément récepteur est de 100 à 300 µm et son diamètre de 19 mm. L'aire des ouvertures du récepteur est de 1 cm^2. Le boîtier a une longueur de 112 mm et un diamètre de 150 mm. Les supports représentés à la figure 2 sont en mica et le conducteur thermique, qui sert aussi à rendre l'ensemble solidaire, est une résine époxy argentifère.

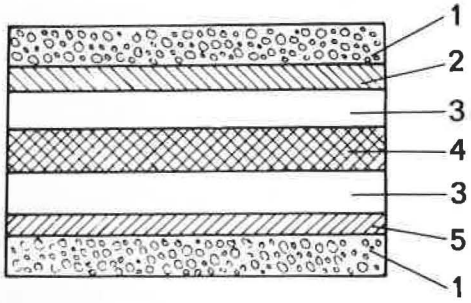

Fig. 2.- Structure d'un élément récepteur.

1, couche absorbante ; 2, élément chauffant ; 3, support ; 4, conducteur thermique ; 5, élément bolométrique.

Les éléments chauffants et les éléments bolométriques sont des bandes conductrices en forme de spirale bifilaire gravées dans des couches d'or évaporées sur les supports de mica [6,7]. Pour les couches absorbantes, on a utilisé comme peinture du "Noir velours 3 M" ou du noir d'or.

Les éléments récepteurs sont raccordés électriquement par des fils d'or de 15 µm d'épaisseur à des bornes qui se trouvent à l'intérieur du boîtier. Les deux éléments bolométriques d'un boîtier constituent les deux bras contigus d'un circuit en pont classique, type Wheatstone (fig. 3). Les autres bras du pont sont constitués par 3 rhéostats de référence qui se trouvent

à l'intérieur du boîtier avec les rhéostats d'arrêt du circuit de chauffage. Les circuits de pont et de chauffage peuvent être raccordés à des instruments placés à l'extérieur à l'aide des connecteurs visibles sur la figure 1. Les résistances chauffantes R_{H1} et R_{H2}, sont d'environ 200 Ω et les résistances des éléments bolométriques R_{X1} et R_{X2}, d'environ 28 Ω.

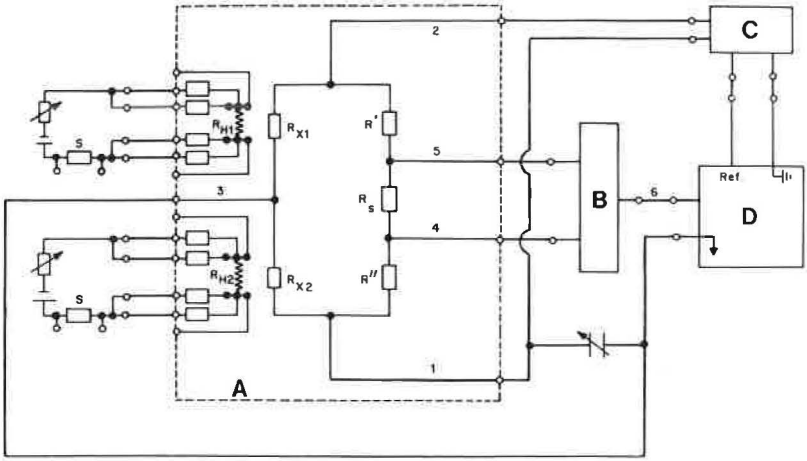

Fig. 3.- Diagramme de montage du radiomètre absolu.

A, module de détection ; B, transformateur proportionnel ; C, transformateur d'isolement ; D, amplificateur à détection synchrone.

Pour le modèle utilisé dans cette étude, les valeurs des résistances de référence R', R_S et R'' étaient respectivement de 5,6 kΩ, 1,50 Ω et 5,6 kΩ. Le circuit du pont est alimenté par la puissance de référence d'un amplificateur à détection synchrone raccordé aux bornes 1 et 2. L'amplificateur ayant une borne à la terre, un transformateur d'isolement a été placé avant le pont pour obtenir une alimentation de pont flottante. Avec cette technique, il est possible de raccorder une des sorties du pont à la borne de terre "haute qualité" de l'entrée de l'amplificateur. Un transformateur proportionnel à six décades est raccordé aux bornes 4 et 5 du pont ; sa puissance est contrôlée par la puissance d'entrée de l'amplificateur à détection synchrone. Les éléments du pont ont été choisis de telle façon qu'il soit possible d'équilibrer le pont en changeant le réglage du transformateur proportionnel pour toute puissance comprise entre 0 et 50 mW appliquée à l'un des éléments récepteurs. Sans puissance extérieure, à l'exception de l'énergie dissipée par le courant du pont dans les éléments bolométriques, le réglage du transformateur proportionnel est

voisin de 0,500 000. Sur un enregistreur connecté à la sortie de l'amplificateur à détection synchrone, la résolution - exprimée en fonction de la lecture sur le transformateur proportionnel - est d'environ un tiers d'unité de la sixième décade pour les récepteurs utilisés dans cette étude ; exprimée en fonction de la puissance, elle est d'environ 30 nW. Ces résultats ont été obtenus avec une fréquence de pont de 1 kHz et une largeur de bande équivalente de l'amplificateur à détection synchrone de 0,13 Hz.

Procédés expérimentaux pour mesurer les sensibilités.- Les mesures précises de la sensibilité S et de la sensibilité différentielle S_D en fonction de la puissance appliquée P exigent beaucoup de temps, l'environnement thermique immédiat d'un élement récepteur ayant une constante de temps beaucoup plus grande que celle de l'élément lui-même. La constante de temps des éléments récepteurs est d'environ 20 secondes ; mais lorsqu'on change le niveau énergétique dans l'un des éléments, il faut souvent attendre plusieurs heures pour que l'environnement thermique de ces éléments atteigne un état d'équilibre. Lorsqu'on utilise l'instrument, la dérive, relativement lente, qui résulte de ce phénomène n'est pas un obstacle. En pratique, on alterne le chauffage de l'élément récepteur par le rayonnement de la source inconnue et le chauffage électrique de cet élément par l'élément chauffant incorporé. Ces deux formes de chauffage sont suffisamment bien ajustées pour que la lente dérive de l'environnement thermique affecte les signaux correspondants exactement de la même manière. Par conséquent, ni la vitesse, ni la précision de comparaison ne sont affectées par cette dérive lente de l'environnement.

La dérive devient cependant importante si l'on essaye de mesurer les sensibilités. La question est alors : doit-on mesurer le signal Y lorsque la dérive à court terme résultant de la constante de temps du récepteur à cessé, ou bien lorsque la dérive à long terme a disparu ? La première méthode est évidemment plus rapide que la seconde. Des expériences préliminaires ont montré qu'il est très difficile de déterminer la fin de la dérive à court terme ; la dérive à long terme est alors encore relativement importante. Les moindres défauts de chronométrage pourraient produire une dispersion importante des résultats et masquer ainsi l'effet que l'on veut étudier. C'est probablement pour cette raison que de telles études n'ont été faites que très rarement. En raison de l'excellente stabilité continue de l'instrument, la deuxième méthode peut

être utilisée. Dans ce cas, la dérive instrumentale normale ne doit pas être importante, le taux et la direction de cette dérive devant rester constants pendant la durée de la mesure.

Une mesure typique de la sensibilité S commençait par l'enregistrement du signal du pont lorsque celui-ci était en équilibre depuis une heure au moins, afin de déterminer la direction de la dérive de l'instrument. La vitesse de l'enregistreur était réglée à 1 mm/min et la sensibilité de l'amplificateur à détection synchrone choisie de telle façon que la dérive sur toute la largeur du papier d'enregistrement (largeur 10 cm) corresponde à un changement d'environ 16 µW de la puissance appliquée au récepteur. En moyenne, la dérive totale pendant la période de mesure ne dépassait pas 10 µW. Ensuite, la sensibilité de l'amplificateur était abaissée et le récepteur était soumis à une puissance électrique connue. Après une période convenable (30 min, en général), le pont était à nouveau équilibré pour cette puissance, en changeant le réglage du transformateur proportionnel et en augmentant la sensibilité de l'amplificateur. Le nouveau signal d'équilibre était alors enregistré pendant une période d'une ou deux heures (le déroulement de l'enregistrement n'était jamais interrompu pendant ces mesures). Au cours de cette période, la dérive induite à long terme disparaissait, la direction et le taux initial de dérive instrumentale apparaissant à nouveau dans l'enregistrement. La sensibilité de l'amplificateur était alors réduite et la puissance électrique coupée. Après une demi-heure environ, le pont était rééquilibré comme précédemment et le signal d'équilibre enregistré pendant une ou deux heures. En les reliant, les tracés enregistrés avant et après chauffage électrique formaient généralement une ligne droite, parallèle au tracé enregistré lors du chauffage (fig. 4).

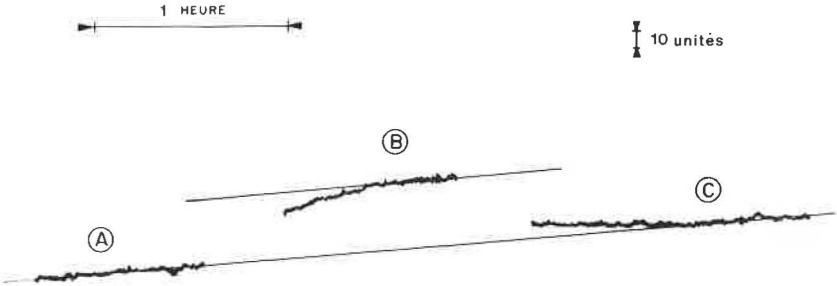

Fig. 4.- Enregistrement type (procédé de base).

Lectures sur le transformateur proportionnel : A, puissance de chauffage nulle, lecture I ; B, puissance de chauffage P, lecture II ; C, puissance de chauffage nulle, lecture I.

Les mesures qui ne se conformaient pas à cette règle (moins de 10 % du total) étaient répétées. Un enregistrement type est reproduit à la figure 4.

Le signal Y était la différence entre le réglage d'équilibre du transformateur proportionnel, avec et sans chauffage électrique du récepteur, après correction pour les quelques signaux non significatifs relevés lors de l'enregistrement. La sensibilité S était ainsi exprimée en divisions/µW, une division représentant une unité de la sixième décade du transformateur à prises multiples. En répétant ces mesures pour différents niveaux énergétiques, il a été possible de représenter graphiquement la sensibilité S en fonction de la puissance électrique de chauffage P.

Après cette expérience initiale on a developpé un procédé expérimental plus efficace. Les première et deuxième étapes étaient exactement les mêmes que celles décrites ci-dessus, mais avant de couper la puissance de chauffage, on enregistrait deux nouveaux signaux, l'un $P-\Delta P$ et l'autre $P+\Delta P$; des changements relativement peu importants du niveau de puissance étaient seulement nécessaires pour ces mesures additionnelles, et le temps de stabilisation des signaux correspondants était uniquement déterminé par la constante de temps à court terme. Les deux enregistrements supplémentaires nécessitaient chaque fois un nouveau réglage du transformateur proportionnel, ne prolongeant la mesure que d'une ou deux heures. En revanche, il devenait alors possible de calculer S pour trois niveaux différents de puissance, $P-\Delta P$, P, $P+\Delta P$ et de calculer la sensibilité différentielle S_D pour la puissance moyenne P en divisant la différence entre les signaux pour $P-\Delta P$ et $P+\Delta P$ par la différence de puissance $2\Delta P$. Comme mesure de vérification, on utilisait des séquences de chauffage, $P-\Delta P$, P, $P+\Delta P$ quelconques et des niveaux de courant quelconques pour des journées de mesure consécutives afin d'éviter des erreurs systématiques (fig. 5).

Résultats expérimentaux.- La figure 6a représente la sensibilité S et la sensibilité différentielle S_D du récepteur N° 1, avec la résistance de l'élément bolométrique R_{X1}, en fonction de la puissance de chauffage P. Deux groupes de courbes, correspondant à une dissipation de puissance dans l'élément bolométrique de 0,8 mW (W_1) et de 5,4 mW (W_2) montrent l'influence du courant dans l'élément bolométrique sur S et S_D. $S(P)$ et $S_D(P)$ pour l'élément opposé contenu dans le même boîtier (résistance de l'élément sensible R_{X2}) sont représentés à la figure 6b ;

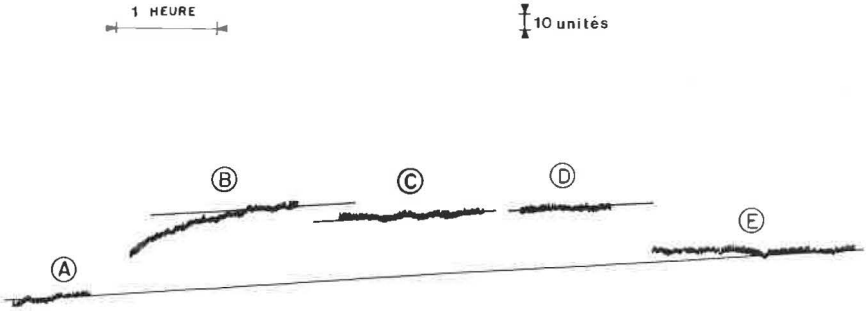

Fig. 5.- Enregistrement type (procédé amélioré).

Lectures sur le transformateur proportionnel : A, puissance de chauffage nulle, lecture I ; B, puissance de chauffage P, lecture II ; C, puissance de chauffage $P+\Delta P$, lecture III ; D, puissance de chauffage $P-\Delta P$, lecture IV ; E, puissance de chauffage nulle, lecture I.

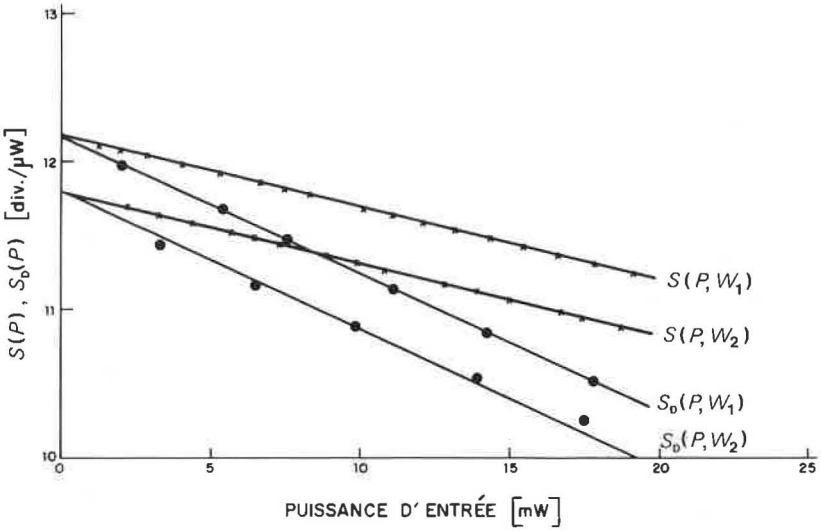

Fig. 6a.- Sensibilité et sensibilité différentielle du récepteur N° 1 mesurées pour deux puissances différentes dans l'élément bolométrique.

dans ce cas, la dissipation dans R_{X2} est 5,3 mW.

Le tableau I donne les valeurs extrapolées par la méthode des moindres carrés (et leur écart-type) à l'intersection de l'axe des ordonnées et de la courbe obtenue ; elles ont été calculées en se fondant sur l'hypothèse d'une loi linéaire selon les procédés statistiques généralement admis [8].

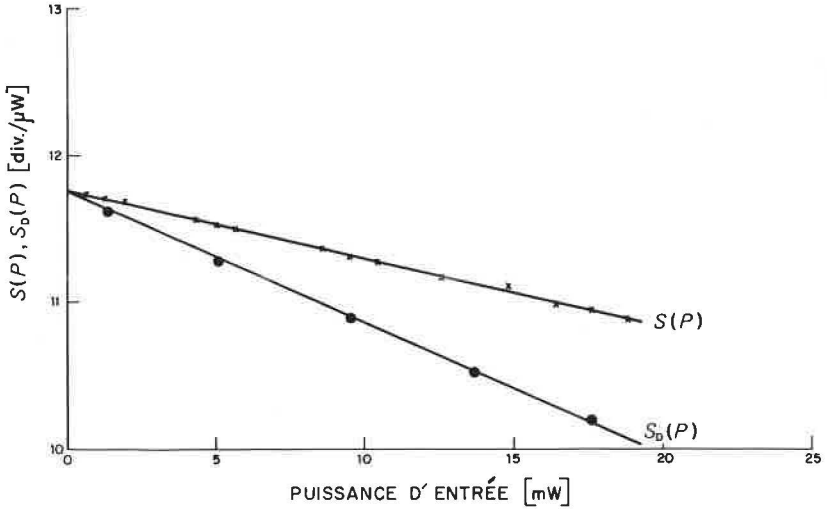

Fig. 6b.- Sensibilité et sensibilité différentielle du récepteur N° 2.

TABLEAU I

		Valeur extrapolée (div./µW)	Pente [(div./µW)/mW]
Récepteur N° 1 (puissance dans l'élément sensible 5,4 mW)	S	11,80 ± 0,01	- 0,049 0 ± 0,001 0
	S_D	11,71 ± 0,02	- 0,083 6 ± 0,002 1
Récepteur N° 2 (puissance 5,3 mW)	S	11,76 ± 0,005	- 0,046 8 ± 0,000 4
	S_D	11,73 ± 0,03	- 0,088 0 ± 0,002 5
Récepteur N° 1 (puissance 0,8 mW)	S	12,17 ± 0,01	- 0,048 5 ± 0,000 9
	S_D	12,16 ± 0,02	- 0,092 6 ± 0,002 2

Discussion des résultats.- Il ressort de la figure 6 que, pour chaque ensemble de mesure, S et S_D tendent vers la même valeur S_0 si la puissance de chauffage est nulle. Ceci est conforme aux définitions données par les équations (3) et (4) dont on peut déduire :

$$Y(P) = \int_0^P S_D(P)\, dP \tag{5}$$

$$S(P) = Y(P)/P = (1/P)\int_0^P S_D(P)\, dP \tag{6}$$

Considérant le théorème de la valeur moyenne d'une intégrale, on peut exprimer (5) et (6) de la façon suivante :

$$Y(P) = S_D(\overline{P})\ P, \tag{7}$$

$$S(P) = S_D(\overline{P}), \tag{8}$$

où $0 < \overline{P} < P$.

(8) montre que la sensibilité S à un niveau de puissance P est égale à la sensibilité différentielle S_D pour une puissance intermédiaire comprise entre 0 et P. Par conséquent, pour $P \to 0$, $S(P)$ doit tendre vers $S_D(P)$ et

$$S(0) = S_D(0) = S_0. \tag{9}$$

La pente des courbes de sensibilité différentielle est approximativement double de la pente des courbes de sensibilité correspondantes. Cette observation peut aussi être confirmée théoriquement.

La relation linéaire entre $S_D(P)$ et P, observée expérimentalement, peut être exprimée de la manière suivante :

$$S_D(P) = S_0 - c\ P\ . \tag{10}$$

La pente (constante) de la courbe de sensibilité différentielle est $-\ c$ et, d'après la relation (6),

$$S(P) = (1/P)\int_0^P (S_0 - c\ P)\ dP = S_0 - \frac{c}{2}\ P. \tag{11}$$

On voit ainsi que la pente de la courbe de sensibilité doit être la moitié de la pente de la courbe de sensibilité différentielle. La puissance étant apportée au récepteur par deux circuits, le circuit de chauffage et le circuit bolométrique, les sensibilités mesurées en fonction de la puissance de chauffage doivent aussi dépendre de la puissance dissipée dans l'élément bolométrique pendant les mesures. En supposant que ces deux puissances aient la même influence sur les caractéristiques de sensibilité, il est possible d'établir les relations suivantes pour deux puissances différentes W_1 et W_2 dans l'élément bolométrique :

$$S_D(P,W_1) = S_0 - c\,(P + W_1) = (S_0 - c\,W_1) - c\,P = S_{01} - c\,P$$
$$S_D(P,W_2) = S_0 - c\,(P + W_2) = (S_0 - c\,W_2) - c\,P = S_{02} - c\,P \qquad (12)$$

$$S(P,W_1) = \frac{1}{P}\int_0^P (S_{01} - c\,P)\,dP = S_{01} - \frac{c}{2}\,P$$
$$S(P,W_2) = \frac{1}{P}\int_0^P (S_{01} - c\,P)\,dP = S_{02} - \frac{c}{2}\,P \qquad (13)$$

$$S_{01} = S_0 - c\,W_1$$
$$S_{02} = S_0 - c\,W_2. \qquad (14)$$

Les relations (12) ont une forme analogue à (10), ce qui confirme l'expérience (fig. 6). (11) et (13) se déduisent respectivement de (10) et (12) à l'aide de la relation (6).

Suivant (12) et (13), les pentes des courbes de sensibilité devraient rester constantes lors d'un changement de puissance dans les éléments bolométriques. Celà est confirmé par les résultats représentés à la figure 6a. La translation des courbes, de S_{01} à S_{02}, prévue par (12) et (13), est aussi confirmée par la figure 6a. Selon les valeurs données dans le tableau I, le déplacement observé en S_0 est d'environ - 0,4 div./µW. Ce déplacement résultant d'un changement de puissance dans les éléments bolométriques de W_1 à W_2, nous pouvons donc écrire d'après (14)

$$S_{01} - S_{02} = c\,(W_1 - W_2). \qquad (15)$$

En prenant une valeur approximative de 0,09 (div./µW)/mW pour c (tableau I) et 4,6 mW pour $(W_1 - W_2)$, le déplacement prévu (environ - 0,4 div./µW) correspond bien au déplacement observé. Cela montre que l'estimation grossière - à savoir que la puissance de chauffage et celle des éléments bolométriques influencent les caractéristiques de la même manière - est acceptable en première approximation.

Facteurs responsables du défaut de linéarité des bolomètres métalliques.- En analysant la conversion de la puissance fournie au récepteur en un signal de sortie mesurable, on peut trouver diverses causes qui peuvent être responsables du défaut de linéarité observé. La figure 7 indique les différentes étapes du procédé de conversion.

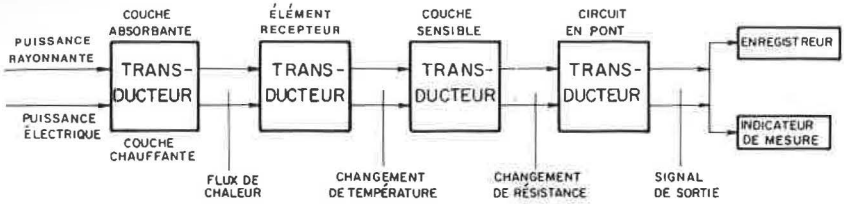

Fig. 7.- Diagramme schématique de la conversion d'une puissance d'entrée en un signal de sortie.

Au cours de la première étape, la puissance à l'entrée du radiomètre absolu peut correspondre soit à l'énergie rayonnante, soit à l'énergie électrique. Il est peu vraisemblable que la conversion de l'énergie électrique en chaleur dans l'élément spiralé de chauffage ne soit pas linéaire, mais il n'est pas évident qu'il en soit de même pour l'absorption d'énergie rayonnante. Dans ce dernier cas, la conversion se produit dans une couche absorbante dont le facteur d'absorption peut être fonction de la température. La présente étude ayant été limitée à un apport d'énergie électrique, nous ne pouvons pas mettre en évidence un tel défaut de linéarité d'après les courbes de sensibilité obtenues. La température des éléments récepteurs n'ayant pas changé de plus de quelques degrés pour les puissances utilisées dans les expériences (moins de 20 mW), il est peu probable qu'un tel effet ait modifié les courbes de sensibilité d'une manière significative.

La deuxième étape traduit la conversion de la chaleur absorbée en une élévation de la température de l'élément récepteur (fig. 7). Sans tenir compte du temps nécessaire pour que l'élément récepteur change complètement de température, cette conversion est déterminée par les conditions d'équilibre suivantes :

$$\begin{aligned} W &= a\,(T(W) - T_0) + b\,(T(W)^4 - T_0^4) \\ P + W &= a\,(T(P + W) - T_0) + b\,(T(P + W)^4 - T_0^4). \end{aligned} \qquad (16)$$

W est la puissance dans l'élément bolométrique qui détermine la température de travail $T(W)$ de l'élément récepteur ; P est la puissance appliquée, rayonnante ou électrique, qui augmente la température de l'élément bolométrique jusqu'à $T(P + W)$; T_0

est la température de l'environnement thermique du récepteur, tandis que a et b sont déterminés par le mécanisme de transfert de chaleur entre l'élément récepteur et son environnement thermique. Plus précisément, a est relatif au transfert de chaleur par conduction et b au transfert de chaleur par rayonnement. La relation (16) montre simplement qu'à l'équilibre la puissance totale fournie à l'élément récepteur est égale à la puissance perdue, suivant le principe de la conservation de l'énergie. La conversion de la chaleur absorbée en une élévation de température est décrite par la relation (16) ; elle est intrinsèquement non linéaire, la perte d'énergie par rayonnement introduisant un terme du quatrième degré. La relation (16) n'est cependant qu'une description assez grossière du procédé de conversion : elle ne comprend pas de terme séparé pour la perte de chaleur de l'élément récepteur par convection du gaz ambiant. Ce terme, inclus dans a, n'est pas rigoureusement proportionnel à $(T - T_0)$, comme le suppose la relation (16). Il a été démontré théoriquement et expérimentalement [9] que ce terme est proportionnel à $(T - T_0)^{5/4}$. De la même manière, il n'est pas nécessairement correct de supposer que l'environnement du détecteur ait une température constante T_0. Un phénomène décrit par le terme anglais "case-heating effect"* en radiométrie absolue [1,10] indique que de très petits écarts à cette hypothèse peuvent produire des effets mesurables. Les facteurs a et b devraient être considérés comme des fonctions de la puissance appliquée plutôt que comme des constantes. Puisque b inclut l'émissivité des surfaces réceptrices, les considérations déjà exposées au début de ce chapitre au sujet du facteur d'absorption de la couche absorbante, s'appliquent encore ici. Il est aussi évident que la température du gaz qui environne l'élément récepteur à l'intérieur de la cavité réceptrice dépend d'une façon assez importante de la température de cet élément. Etant donné que les pertes de chaleur par conduction et convection dépendent de la température du gaz, on peut s'attendre à ce que a soit fonction de la puissance appliquée. a et b dépendent donc tous les deux de la pression du gaz, de l'humidité, de la composition du gaz, etc. A ce sujet, quelques observations intéressantes ont été décrites par R.E. Bedford [11].

---

* *Note du BIPM.*- En français : effet d'échauffement du boîtier.

La situation est encore plus compliquée parce que la puissance dans l'élément bolométrique W dépend aussi de la puissance appliquée P, la résistance de la couche sensible étant fonction de la température du récepteur.

La troisième étape (fig. 7) consiste en la conversion des variations de température de l'élément récepteur en variations de résistance de la couche sensible. Bien que cette conversion soit généralement considérée comme linéaire dans un intervalle de température peu important, il est bien connu en thermométrie à résistance que la relation entre un changement de résistance ΔR et un changement de température ΔT peut être décrite plus précisément sous la forme d'un polynôme :

$$\Delta R = R_0(\alpha\Delta T + \beta\Delta T^2 + \ldots). \qquad (17)$$

Il est difficile d'estimer la part qui revient à cet effet dans les défauts de linéarité observés.

Dans la quatrième étape (fig. 7), le changement de résistance est finalement converti électroniquement en un signal affichable, c'est-à-dire en une tension à la sortie de l'amplificateur synchrone. Les résultats déjà mentionnés ont indiqué que ce signal n'était pas la tension de sortie, le signal de sortie qui correspond à un changement de résistance étant plutôt représenté par le nombre d'unités du transformateur proportionnel nécessaires pour rétablir l'équilibre du pont. Le niveau d'exactitude de l'instrument est d'environ 1×10^{-5} ; par conséquent, le transformateur proportionnel ne contribue pas de façon significative au manque de linéarité observé. Il existe, cependant, un léger défaut de linéarité dans la relation entre le changement de résistance dans l'un des éléments bolométriques (R_{xi}) et le nombre d'unités du transformateur proportionnel (Y) :

$$|Y| = \left\{ \frac{R_{xi} + \Delta R_{xi}}{R_{xi} + R_{xj} + \Delta R_{xi}} - \frac{R_{xi}}{R_{xi} + R_{xj}} \right\} \frac{R' + R_S + R''}{R'_S}. \qquad (18)$$

Les symboles utilisés dans (18) correspondent à ceux de la figure 3, R_{xi} étant l'élément récepteur auquel la puissance est appliquée (R_{x1} ou R_{x2} dans la figure 3) et R_{xj} l'autre élément (R_{x2} ou R_{x1}) qui sert de compensation. R'_S représente l'impédance de R_S en parallèle avec le transformateur proportionnel. La relation (18) ne devient donc linéaire entre Y et

R_{xi} que dans le cas où $R_{xi} << R_{xj}$, ce qui permet d'écrire :

$$|Y| = c\ \Delta R_{xi}. \tag{19}$$

Une autre cause de non-linéarité réside dans l'effet d'un changement de R_{xi} sur la valeur de R_{xj} et la rétroaction résultante sur la dissipation d'énergie dans R_{xi}. Cet effet, analysé en détail dans la théorie des bolomètres [12], est sensiblement réduit par le montage en pont (voir figure 3) si les résistances des deux éléments bolométriques ont approximativement la même valeur. Dans la présente étude, R_{x1} et R_{x2} présentent une différence d'à peu près 4 %.

Avec la précision de la méthode utilisée et la gamme de puissance considérée, les courbes de sensibilité mesurées sont des droites ; dans l'étude théorique des phénomènes correspondants, il est donc suffisant de tenir compte des termes du deuxième ordre. Puisque le terme $(T^4 - T_0{}^4)$ de (16) peut être exprimé de la façon suivante :

$$T^4 - T_0{}^4 = 4T_0{}^3(T-T_0) + 6T_0{}^2(T-T_0)^2 + 4T_0(T-T_0)^3 + (T-T_0)^4, \tag{20}$$

seuls les deux premiers termes du second membre sont significatifs. Si les mesures avaient eu lieu à des puissances plus élevées, par exemple 100 mW, une relation linéaire n'aurait peut-être pas été suffisante pour rendre compte avec une bonne approximation de la relation observée entre sensibilité et puissance. Dans ce cas, des termes d'ordre supérieur devraient être pris en considération.

CONCLUSION

On vient de montrer qu'il est assez difficile d'établir une théorie quantitative en partant du rapport entre la puissance d'entrée P et le signal observé Y sous la forme

$$Y = f(P). \tag{21}$$

Avec la relation (21), il serait possible de calculer $S(P)$ à l'aide de (3), $S_D(P)$ à l'aide de (4) et de comparer les sensibilités obtenues avec celles qui ont été mesurées. Des essais en vue de déduire la relation (21) des observations, dans le cas des récepteurs utilisés pour cette étude, ont donné des

résultats qui montrent une bonne concordance qualitative avec les valeurs mesurées. Ils n'ont, cependant, pas permis d'expliquer les différences entre les pentes des courbes de sensibilité de plusieurs modules de détection construits de la même manière ; cela indique qu'il pourrait y avoir d'autres variables qui n'ont pas encore été convenablement prises en compte. Pour cette raison, les facteurs connus responsables du défaut de linéarité ont été énumérés, mais aucun essai n'a été fait pour présenter une théorie quantitative complète des phénomènes observés.

L'objet principal de cette étude était d'établir un procédé de mesure pratique des caractéristiques de sensibilité d'un radiomètre absolu. A l'aide de la méthode expérimentale décrite ci-dessus, il est possible de prévoir les variations de sensibilité en fonction de la puissance avec une incertitude évaluée à quelques 10^{-3}. Cette étape est à la base d'un procédé rigoureux permettant de déterminer de façon précise les facteurs de correction instrumentaux des radiomètres absolus [1]. Les sensibilités utilisées dans ce cas pour calculer les facteurs de correction instrumentaux ne dépassent guère un pour cent du signal mesuré ; une incertitude de quelques 10^{-3} sur les sensibilités entraînerait donc une incertitude au plus égale à quelques 10^{-5} en ce qui concerne le facteur de correction, lors d'un étalonnage effectué avec le radiomètre absolu.

(mai 1977)

BIBLIOGRAPHIE

1. HENGSTBERGER (F.), *Metrologia, 13*, 1977, p. 69.
2. SMITH (R.A.), JONES (F.E.), CHASMAR (R.P.), The Detection and Measurement of Infrared Radiation, Claredon Press, Oxford, 1957.
3. VÄSKO (A.), Infrared Radiation, Iliffe Books Ltd, London, 1968.
4. CONN (G.K.T.), AVERY (D.G.), Infrared Methods, Academic Press, New York and London, 1960.
5. BAUER (G.), *Appl. Opt., 7*, 1968, p. 1017.
6. HENGSTBERGER (F.), D. Sc. Thesis, Technische Universität, Wien, 1975.
7. HENGSTBERGER (F.), *NPRL Research Report 331*, 1977.
8. NATRELLA (M.G.), *NBS Special Publication 300*, Vol. 1, 1969.
9. JACOB (M.), Heat transfer, Vol. 1, J. Wiley & Sons, New York, 1953.
10. GILLHAM (E.J.), *Proc. Roy. Soc., A 269*, 1963, p. 249.
11. BEDFORD (R.E.), *Can. J. Phys., 38*, 1960, p. 1256.
12. CHASMAR (R.P.), MITCHELL (W.H.), RENNIE (A.), *J. Opt. Soc. Am., 46*, 1956, p. 469.

ANNEXE P 22

Nouveau système de mesure pour réaliser les échelles photométrique et radiométrique*

par F. HENGSTBERGER, E. THAIN et R. TURNER

National Physical Research Laboratory (Afrique du Sud)

(Document CCPR/77-13)

Résumé

Il s'agit d'un projet comprenant la conception et la construction d'un système de mesure complet capable d'établir les bases des échelles nationales en Afrique du Sud dans les domaines de mesure de la lumière et du rayonnement optique.

La partie principale de ce système est le nouveau radiomètre absolu du NPRL (Annexe P 20). Pour répondre effectivement aux différents types d'études, le système de mesure comprend deux sous-systèmes indépendants, chacun conçu selon le même type de module de détection enfichable. Les porte-filtres, les modules de détection, les modules d'obturation et divers autres accessoires sont totalement interchangeables entre les deux sous-systèmes. L'un est conçu pour être utilisé avec le maximum de souplesse ; il est monté sur un banc d'optique. Le principe ayant conduit à la réalisation du second sous-système est le maximum d'exactitude ; il est donc équipé d'un montage anti-vibratoire et d'un système lui permettant d'utiliser des récepteurs à basse température et sous vide.

Après avoir terminé les deux premières étapes de ce projet, on a entrepris la réalisation d'échelles nationales

*Research Report 332 NPRL, 1977 (en anglais).

d'éclairement énergétique total, d'éclairement lumineux et d'intensité lumineuse, dérivées de ce système. Dans une prochaine étape, nous essayerons aussi d'utiliser ce système pour la réalisation d'un étalon d'éclairement énergétique spectral.

(mai 1977)

ANNEXE P 23

Mesure sur l'étalon primaire

Istituto Elettrotecnico Nazionale (Italie)

(Document CCPR/77-30)

On a effectué une série de mesures dans le nouveau laboratoire, en utilisant un dispositif dont l'axe optique est vertical, ce qui permet de simplifier le système optique.

La puissance fournie par le générateur haute fréquence est réglée au moyen de thyratrons pilotés par un circuit électronique.

D'après les résultats de seize paliers de congélation (fig. 1 et 2), la luminance moyenne du corps noir est de 60,19 cd/cm^2, avec un écart-type de 0,16 % ; la durée moyenne des paliers est de 5,9 min. Les résultats ont été calculés par un ordinateur directement relié à la sortie du récepteur. Aucune correction n'a été appliquée pour tenir compte des différentes causes d'erreurs.

Eléments utiles pour la détermination des erreurs :

Les pièces réfractaires sont en alumine pure (Degussit Al 23) ; leurs dimensions approximatives sont les suivantes:

- tube de visée :
  diamètre intérieur : 2 mm ;
  diamètre extérieur : 4 mm ;
  longueur totale : 45 mm ;

longueur utile de la cavité : 22 mm ;
longueur émergente au-dessus du platine : 5 mm ;

- couvercle :
  diamètre de l'ouverture : 1,6 mm ;
  épaisseur 2 mm.

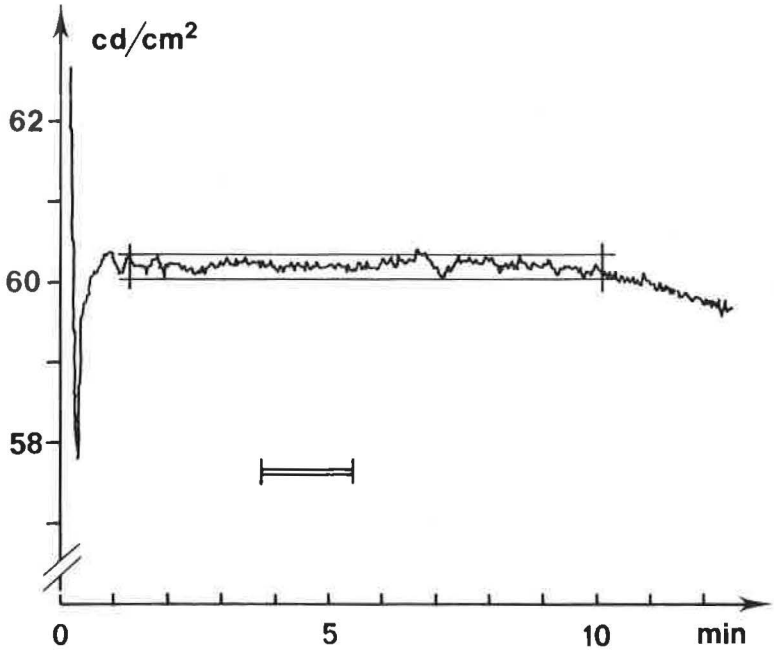

Fig. 1.- Palier de congélation CL6.DAT/7
$\bar{L}$ = 60,20 cd/cm^2 ; σ = 0,10 %.

Le platine n'a pas été examiné après usage ; toutefois, en raison du type de chauffage et de la pureté du réfractaire, on pense que la contamination éventuelle doit être négligeable.

Les caractéristiques du système optique sont les suivantes :

- diamètre moyen du diaphragme placé contre la lentille : 25 mm ;
- distance diaphragme - surface du récepteur : 4,5 m ;
- diamètre du récepteur : 15 mm.

La luminance mesurée est exprimée en "unité moyenne 1952", conservée par des lampes Toshiba ; quatre de ces lampes étalons secondaires ont été comparées aux étalons de référence du BIPM en 1975.

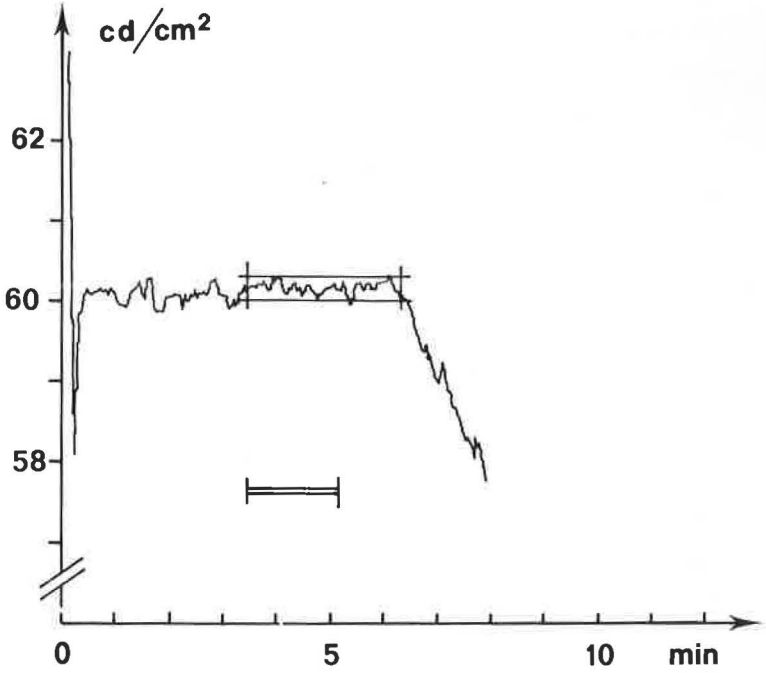

Fig. 2.- Palier de congélation CL3.DAT/2.
$\bar{L}$ = 60,16 cd/cm^2 ; σ = 0,12 %.

(Septembre 1977)

TABLE DES MATIÈRES

COMITÉ CONSULTATIF DE PHOTOMÉTRIE ET RADIOMÉTRIE
9e Session (1977)

Pages

Notice historique sur les organes de la Convention du Mètre v

Liste des membres vii

Ordre du jour x

Rapport au Comité International des Poids et Mesures, par E. J. Gillham ..... P 1

Définition des unités et des grandeurs comportant un facteur biologique (L'attribution de nouveaux noms spéciaux d'unités doit être évitée; adoption de la *Recommandation* P 1) 3

Définition de l'unité photométrique par rapport au watt (Considérations sur la valeur de l'efficacité lumineuse spectrale maximale, K_m, qui servirait à redéfinir l'unité photométrique; adoption de la *Recommandation* P 2. Discussion sur l'opportunité d'une nouvelle définition de l'unité photométrique et sur le remplacement éventuel de la candela par le lumen comme unité SI de base; confirmation des Recommandations P 1 (1975) et P 3 (1975); adoption des *Recommandations* P 3 et P 4) 4

Valeur de K_m recommandée (Valeurs préférées par divers laboratoires; adoption de la valeur 683 lm/W) 6

Définition des grandeurs scotopiques (En cas de nouvelle définition de l'unité photométrique, la valeur $K_m = 683$ lm/W s'appliquera indifféremment aux grandeurs photopiques, mésopiques et scotopiques)..... 8

Document explicatif sur les unités et les grandeurs photométriques (La rédaction de ce document est terminée; sa publication doit attendre les décisions concernant la redéfinition de l'unité photométrique) 9

Progrès en radiométrie absolue (Revue des travaux effectués dans divers laboratoires : PTB, PMO, NPRL, NML, NBS, NRC, NPL) 9

Filtres $V(\lambda)$ (Commentaires sur les réalisations dans quelques laboratoires) . 12

Amélioration des lampes étalons (Description de quelques améliorations apportées) 12

Travaux réalisés sous l'égide de la CIE (Comparaisons internationales de mesures sur des cellules au Si et de lampes à vapeur de mercure haute pression; documents sur la spectroradiométrie et les principes de la photométrie physique) 13

Autres travaux de recherche dans les laboratoires nationaux : ETL, ASMW, NBS, NPL, PTB, NML, INM, NPRL, NRC..... 14

Comparaisons futures d'étalons photométriques (Étalons d'intensité lumineuse à 2853 K; circulation de récepteurs $V(\lambda)$ et de lampes) 18

Questions diverses (Intérêt d'une liaison CCE-CCPR pour les comparaisons des mesures de puissance de lasers organisées par le CCE) 19

Recommandations présentées au Comité International des Poids et Mesures : *Recommandation* P 1 (1977) (Sur le nom des unités des grandeurs comportant un facteur biologique)..... 20

Recommandation P 2 (1977) (Valeur de l'efficacité lumineuse spectrale) ... 20

Recommandations P 3 (1977) et P 4 (1977) (Définition du lumen ou de la candela) 21

Annexes

P 1. *Documents de travail présentés à la 9e session du CCPR* 23

P 2. BIPM. — *Sur les grandeurs comportant un facteur biologique, leurs définitions et leurs unités*, par J. Terrien 27

P 3. NML (Australie). — *Sur les grandeurs comportant un facteur biologique. Commentaires de* W. R. Blevin 37

P 4. NRC (Canada). — *Sur les grandeurs comportant un facteur biologique. Commentaires de* G. Wyszecki..... 41

P 5. PTB (Rép. Féd. d'Allemagne). — *Remarques sur des points de l'ordre du jour de la 9e session du CCPR*, par G. Bauer 50

P 6. ETL (Japon). — *Commentaires sur les grandeurs comportant des facteurs biologiques et leurs unités*, par N. Ooba 52

P 7. NPRL (Afrique du Sud). — *Sur les grandeurs comportant un facteur biologique. Commentaires de* C. J. Kok et F. Hengstberger 55

P 8. INM (France). — *Remarques sur les grandeurs photobiologiques. Commentaires de* J. Bastie..... 57

P 9. ASMW (Rép. Dém. Allemande). — *Sur les grandeurs comportant un facteur biologique. Commentaires de* S. Nündel 63

P 10. *Sur les grandeurs comportant un facteur biologique. Commentaires de* W. D. Wright. *Réponse de* J. Terrien 67

P 11. NBS (États-Unis d'Amérique). — *Sur les grandeurs comportant un facteur biologique. Commentaires de* K. G. Kessler..... 70

P 12. IMM (U.R.S.S.). — *Sur les grandeurs comportant un facteur biologique, leurs définitions et leurs unités. Commentaires de* K. P. Chirokov et V. E. Kartachevskaia 73

P 13. BIPM. — *Danger de prolifération des noms spéciaux d'unités SI. A quoi sert le nom d'une unité?* par J. Terrien 81

P 14. *Sur les grandeurs comportant un facteur biologique. Commentaires de* A. Maréchal 84

P 15. NPRL (Afrique du Sud). — *Nouvelle détermination expérimentale de la constante* K_m, par F. Hengstberger et C. J. Kok..... 86

P 16. NIM (Rép. Pop. de Chine). — *Détermination expérimentale de la valeur de* K_m, *efficacité lumineuse spectrale maximale de rayonnement* 96

P 17. IMM (U.R.S.S.). — *Commentaires à l'ordre du jour de la 9e session du CCPR* 107

P 18. *Information sur l'état actuel de l'adoption de la Référence Radiométrique Mondiale (RRM) par les organisations internationales*, par C. Fröhlich 110

P 19. NPRL (Afrique du Sud). — *Amélioration de la théorie concernant les corrections instrumentales pour les radiomètres absolus*, par F. Hengstberger (Résumé) 111

P 20. NPRL (Afrique du Sud). — *Le radiomètre absolu du NPRL* par F. Hengstberger (Résumé) 113

P 21. NPRL (Afrique du Sud). — *Mesure des caractéristiques de sensibilité d'un radiomètre absolu : étude d'un cas concret*, par F. Hengstberger . 115

P 22. NPRL (Afrique du Sud). — *Nouveau système de mesure pour réaliser les échelles photométrique et radiométrique*, par F. Hengstberger, E. Thain et R. Turner (Résumé) 132

P 23. IEN (Italie). — *Mesure sur l'étalon primaire* 134

IMPRIMERIE DURAND
28600 LUISANT (FRANCE)

Dépôt légal, Imprimeur, 1978, n° 2966
ISBN 92-822-2050-8

ACHEVÉ D'IMPRIMER LE 1978-07-10

Imprimé en France