

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC**

60306-4

Première édition
First edition
1971-01

Mesures des dispositifs photosensibles

**Quatrième partie:
Méthodes de mesure des photomultiplicateurs**

Measurement of photosensitive devices

**Part 4:
Methods of measurement for photomultipliers**



Numéro de référence
Reference number
CEI/IEC 60306-4: 1971

Numéros des publications

Depuis le 1^{er} janvier 1997, les publications de la CEI sont numérotées à partir de 60000.

Publications consolidées

Les versions consolidées de certaines publications de la CEI incorporant les amendements sont disponibles. Par exemple, les numéros d'édition 1.0, 1.1 et 1.2 indiquent respectivement la publication de base, la publication de base incorporant l'amendement 1, et la publication de base incorporant les amendements 1 et 2.

Validité de la présente publication

Le contenu technique des publications de la CEI est constamment revu par la CEI afin qu'il reflète l'état actuel de la technique.

Des renseignements relatifs à la date de reconfirmation de la publication sont disponibles dans le Catalogue de la CEI.

Les renseignements relatifs à des questions à l'étude et des travaux en cours entrepris par le comité technique qui a établi cette publication, ainsi que la liste des publications établies, se trouvent dans les documents ci-dessous:

- «Site web» de la CEI*
- **Catalogue des publications de la CEI**
Publié annuellement et mis à jour régulièrement
(Catalogue en ligne)*
- **Bulletin de la CEI**
Disponible à la fois au «site web» de la CEI* et comme périodique imprimé

Terminologie, symboles graphiques et littéraux

En ce qui concerne la terminologie générale, le lecteur se reportera à la CEI 60050: *Vocabulaire Electrotechnique International* (VEI).

Pour les symboles graphiques, les symboles littéraux et les signes d'usage général approuvés par la CEI, le lecteur consultera la CEI 60027: *Symboles littéraux à utiliser en électrotechnique*, la CEI 60417: *Symboles graphiques utilisables sur le matériel. Index, relevé et compilation des feuilles individuelles*, et la CEI 60617: *Symboles graphiques pour schémas*.

* Voir adresse «site web» sur la page de titre.

Numbering

As from 1 January 1997 all IEC publications are issued with a designation in the 60000 series.

Consolidated publications

Consolidated versions of some IEC publications including amendments are available. For example, edition numbers 1.0, 1.1 and 1.2 refer, respectively, to the base publication, the base publication incorporating amendment 1 and the base publication incorporating amendments 1 and 2.

Validity of this publication

The technical content of IEC publications is kept under constant review by the IEC, thus ensuring that the content reflects current technology.

Information relating to the date of the reconfirmation of the publication is available in the IEC catalogue.

Information on the subjects under consideration and work in progress undertaken by the technical committee which has prepared this publication, as well as the list of publications issued, is to be found at the following IEC sources:

- **IEC web site***
- **Catalogue of IEC publications**
Published yearly with regular updates
(On-line catalogue)*
- **IEC Bulletin**
Available both at the IEC web site* and as a printed periodical

Terminology, graphical and letter symbols

For general terminology, readers are referred to IEC 60050: *International Electrotechnical Vocabulary* (IEV).

For graphical symbols, and letter symbols and signs approved by the IEC for general use, readers are referred to publications IEC 60027: *Letter symbols to be used in electrical technology*, IEC 60417: *Graphical symbols for use on equipment. Index, survey and compilation of the single sheets* and IEC 60617: *Graphical symbols for diagrams*.

* See web site address on title page.

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC**

60306-4

Première édition
First edition
1971-01

Mesures des dispositifs photosensibles

**Quatrième partie:
Méthodes de mesure des photomultiplicateurs**

Measurement of photosensitive devices

**Part 4:
Methods of measurement for photomultipliers**

© IEC 1971 Droits de reproduction réservés — Copyright - all rights reserved

Aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie et les microfilms, sans l'accord écrit de l'éditeur.

No part of this publication may be reproduced or utilized in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying and microfilm, without permission in writing from the publisher.

International Electrotechnical Commission
Telefax: +41 22 919 0300

3, rue de Varembé Geneva, Switzerland
e-mail: inmail@iec.ch IEC web site <http://www.iec.ch>



Commission Electrotechnique Internationale
International Electrotechnical Commission
Международная Электротехническая Комиссия

CODE PRIX
PRICE CODE

Q

Pour prix, voir catalogue en vigueur
For price, see current catalogue

SOMMAIRE

	Pages
PRÉAMBULE	4
PRÉFACE	4
Articles	
1. Domaine d'application	6
2. Définitions	6
3. Méthodes de mesure	6
3.1 Sensibilité lumineuse de cathode	6
3.2 Sensibilité lumineuse anodique	8
3.3 Uniformité de la sensibilité lumineuse anodique sur la surface active de cathode	10
3.4 Caractéristique de sensibilité spectrale	10
3.5 Sensibilité énergétique monochromatique de cathode	12
3.6 Sensibilité énergétique monochromatique anodique	12
3.7 Amplification en courant	12
3.8 Caractéristiques de sensibilité anodique	14
3.9 Caractéristiques dynamiques	16
3.10 Courant d'obscurité	22
3.11 Bruit	24
3.12 Limitations du courant de sortie de crête	26
3.13 Dimensions et position de la zone photosensible	28
3.14 Précautions	28

CONTENTS

	Page
FOREWORD	5
PREFACE	5
Clause	
1. Scope	7
2. Definitions	7
3. Measuring methods	7
3.1 Cathode luminous sensitivity	7
3.2 Anode luminous sensitivity	9
3.3 Uniformity of anode luminous sensitivity over the active cathode area	11
3.4 Spectral sensitivity characteristic	11
3.5 Cathode spectral sensitivity	13
3.6 Anode spectral sensitivity	13
3.7 Current amplification	13
3.8 Anode sensitivity characteristics	15
3.9 Dynamic characteristics	17
3.10 Dark current	23
3.11 Noise	25
3.12 Peak output current limitations	27
3.13 Dimensions and location of the photosensitive area	29
3.14 Precautions	29

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60306-4:1971

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

MESURES DES DISPOSITIFS PHOTSENSIBLES

Quatrième partie: Méthodes de mesure des photomultiplicateurs

PRÉAMBULE

- 1) Les décisions ou accords officiels de la C E I en ce qui concerne les questions techniques, préparés par des Comités d'Etudes où sont représentés tous les Comités nationaux s'intéressant à ces questions, expriment dans la plus grande mesure possible un accord international sur les sujets examinés.
- 2) Ces décisions constituent des recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux.
- 3) Dans le but d'encourager cette unification internationale, la C E I exprime le vœu que tous les Comités nationaux ne possédant pas encore de règles nationales, lorsqu'ils préparent ces règles, prennent comme base fondamentale de ces règles les recommandations de la C E I dans la mesure où les conditions nationales le permettent.
- 4) On reconnaît qu'il est désirable que l'accord international sur ces questions soit suivi d'un effort pour harmoniser les règles nationales de normalisation avec ces recommandations dans la mesure où les conditions nationales le permettent. Les Comités nationaux s'engagent à user de leur influence dans ce but.

PRÉFACE

La présente recommandation a été établie par le Comité d'Etudes N° 39 de la C E I: Tubes électroniques.

Elle fait partie d'une série de publications traitant des mesures des dispositifs photosensibles. Le Catalogue des publications de la C E I donne tous renseignements sur les autres parties de cette série. Elle doit être utilisée conjointement avec la Première partie: Recommandations fondamentales, éditée comme Publication 306-1 de la C E I.

Des projets furent discutés lors des réunions tenues à New Haven en 1967 et à Londres en 1968. A la suite de cette dernière réunion, un projet révisé fut soumis à l'approbation des Comités nationaux suivant la Règle des Six Mois en juin 1969. Les commentaires reçus furent soumis à l'approbation des Comités nationaux suivant la Procédure des Deux Mois en juillet 1970.

Les pays suivants se sont prononcés explicitement en faveur de la publication de cette quatrième partie:

Allemagne	Japon
Australie	Pays-Bas
Belgique	Pologne
Canada	Royaume-Uni
Danemark	Suède
Etats-Unis d'Amérique	Suisse
Finlande	Tchécoslovaquie
France	Turquie
Israël	Union des Républiques
Italie	Socialistes Soviétiques

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

MEASUREMENT OF PHOTSENSITIVE DEVICES

Part 4: Methods of measurement for photomultipliers

FOREWORD

- 1) The formal decisions or agreements of the IEC on technical matters, prepared by Technical Committees on which all the National Committees having a special interest therein are represented, express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the subjects dealt with.
- 2) They have the form of recommendations for international use and they are accepted by the National Committees in that sense.
- 3) In order to promote this international unification, the IEC expresses the wish that all National Committees having as yet no national rules, when preparing such rules, should use the IEC recommendations as the fundamental basis for these rules in so far as national conditions will permit.
- 4) The desirability is recognized of extending international agreement on these matters through an endeavour to harmonize national standardization rules with these recommendations in so far as national conditions will permit. The National Committees pledge their influence towards that end.

PREFACE

This Recommendation has been prepared by IEC Technical Committee No. 39, Electronic Tubes.

It forms one of a series dealing with the measurement of photosensitive devices. Reference should be made to the current Catalogue of IEC Publications for information on the other parts of the series. Part 1, Basic Recommendations, with which this Publication must be used, is issued as IEC Publication 306-1.

Drafts were discussed at the meetings held in New Haven in 1967 and in London in 1968. As a result of this latter meeting, a revised draft was submitted to the National Committees for approval under the Six Months' Rule in June 1969. Comments received were submitted to National Committees for approval under the Two Months' Procedure in July 1970.

The following countries voted explicitly in favour of publication of Part 4:

Australia	Japan
Belgium	Netherlands
Canada	Poland
Czechoslovakia	Sweden
Denmark	Switzerland
Finland	Turkey
France	Union of Soviet
Germany	Socialist Republics
Israel	United Kingdom
Italy	United States of America

MESURES DES DISPOSITIFS PHOTSENSIBLES

Quatrième partie: Méthodes de mesure des photomultiplicateurs

1. Domaine d'application

La présente recommandation traite des méthodes de mesure concernant les photomultiplicateurs à dynodes discrètes.

2. Définitions

2.1 Photomultiplicateur

Dispositif photosensible à vide comprenant une cathode photo-émissive et un ou plusieurs étages multiplicateurs d'électrons utilisant des électrodes à émission secondaire (dynodes) situées entre la cathode et l'anode

Note. — Dans certains cas, les dynodes discrètes sont remplacées par un multiplicateur d'électrons de structure continue, généralement tubulaire.

2.2 Temps de transit du signal

Intervalle de temps entre l'arrivée d'une impulsion lumineuse de Dirac d'amplitude donnée sur la fenêtre d'entrée du dispositif et l'instant où l'impulsion de sortie atteint une valeur définie.

2.3 Fluctuation du temps de transit

Variation de l'instant d'arrivée d'un point défini des impulsions de courant de sortie, lorsqu'on applique à la photocathode des impulsions lumineuses de Dirac, chacune d'elles ne donnant pas naissance à plus d'un photoélectron.

2.4 Durée de réponse impulsionnelle

Durée s'écoulant entre les points à demi-amplitude de l'impulsion de courant de sortie lorsque la photocathode reçoit une impulsion lumineuse de Dirac donnant naissance à un grand nombre de photoélectrons.

2.5 Rendement de collection

Rapport entre (1) le nombre d'électrons qui atteignent utilement la première dynode et (2) le nombre d'électrons émis par la photocathode.

3. Méthodes de mesure

3.1 Sensibilité lumineuse de cathode

Pour mesurer la sensibilité lumineuse de cathode, on utilise couramment un flux lumineux, dans la plage de 10^{-5} lm à 10^{-2} lm, fourni par une lampe-étalon.

La valeur du flux lumineux utilisé ne doit pas être trop élevée, pour que les pertes résistives dans la couche de photocathode n'introduisent pas d'erreurs de mesure, ni trop faible, pour que les courants dans la résistance de fuite ne rendent pas difficile une mesure précise du courant provoqué par la photoémission de la photocathode.

MEASUREMENT OF PHOTSENSITIVE DEVICES

Part 4: Methods of measurement for photomultipliers

1. Scope

This Recommendation deals with measuring methods for photomultipliers with discrete dynodes.

2. Definitions

2.1 *Photomultiplier*

A photosensitive vacuum device comprising a photo-emissive cathode and one or more stages of electron multiplication using secondary emission electrodes (dynodes) between cathode and anode.

Note. — In some cases, discrete dynodes are replaced by an electron multiplier of continuous structure, which is, in general, tubular.

2.2 *Signal transit time*

The time interval between the arrival of a delta light pulse of a stated amplitude at the entrance window of the device and the time at which the output pulse reaches a stated value.

2.3 *Transit time jitter*

The variation in the times of occurrence of a stated point on the output current pulses arising from the application, to the photocathode, of delta light pulses, each giving rise to not more than a single photoelectron.

2.4 *Response pulse duration*

The time duration between the half-amplitude points of the output current pulse when the photocathode receives a delta light pulse giving rise to a large number of photoelectrons.

2.5 *Collection efficiency*

The ratio of (1) the number of useful electrons reaching the first dynode and (2) the number of electrons emitted by the photocathode.

3. Measuring methods

3.1 *Cathode luminous sensitivity*

For measuring cathode luminous sensitivity, a luminous flux in the range 10^{-5} lm to 10^{-2} lm from a standard lamp is commonly used.

The value of luminous flux used must not be so large that resistance losses in the photocathode layer introduce measurement errors, or so small that leakage resistance currents make it difficult to measure accurately the current due to photo-emission from the photocathode.

Le circuit employé pour mesurer la sensibilité lumineuse de cathode est indiqué à la figure 1, page 32, où au moins les deux premières dynodes doivent fonctionner à des tensions normales, afin que le champ électrique ne soit pas perturbé.

Lorsque cet effet est faible, on peut brancher le tube en diode. R est conventionnellement une résistance d'environ $1\text{ M}\Omega$ dont le but est de limiter le courant si le tube en mesure est défectueux (par exemple s'il contient du gaz ou est en court-circuit).

L'appareil de mesure de courant A mesure le courant de photoémission.

Les courants mesurés étant faibles, on doit prendre des précautions pour éviter les courants de fuite, par exemple, en reliant le blindage de l'appareil de mesure à la masse, et en mettant à la masse le côté de la photocathode. La tension utilisée doit être suffisante pour obtenir la saturation, c'est-à-dire, en général, comprise entre 100 V et 400 V , et on peut vérifier qu'il y a saturation en augmentant la tension de 100% , ce qui ne devrait donner qu'une faible augmentation dans le courant.

En général, la relation entre le flux lumineux et le courant pour de faibles niveaux lumineux étant linéaire, une mesure à une seule valeur de flux lumineux incident sera suffisante.

Un défaut de saturation pour des niveaux de flux lumineux supérieurs peut indiquer des pertes résistives dans la couche de photocathode et donnera un écart par rapport à la linéarité.

3.2 Sensibilité lumineuse anodique

Pour cette mesure, le photomultiplicateur est branché comme indiqué à la figure 2, page 32, avec une source de tension et une série de résistances formant un diviseur de tension branché à chaque dynode et à l'anode. Le courant anodique doit avoir une valeur inférieure à la valeur maximale spécifiée par le fabricant.

Pour les mesures de sensibilité lumineuse d'un photomultiplicateur, on utilise couramment un flux lumineux dans la plage de 10^{-10} lm à 10^{-6} lm . Il peut être nécessaire d'utiliser des filtres neutres pour réduire le flux à ces valeurs basses. Il est très souhaitable d'utiliser un filtre ayant une transmission uniforme dans tout le spectre visible et les régions du proche infrarouge.

La caractéristique de transmission des filtres n'étant généralement pas suffisamment uniforme dans cette plage, un étalonnage séparé du filtre est nécessaire pour des tubes dont les caractéristiques de sensibilité spectrales sont très différentes.

On peut aussi réduire l'intensité en augmentant la distance entre la lampe et le photomultiplicateur, ou en utilisant une lampe d'intensité inférieure et ayant la même répartition spectrale.

Un autre moyen de réduire le niveau lumineux de façon sensiblement égale pour les longueurs d'ondes visibles consiste à insérer un écran diffusant non coloré et étalonné entre la source et l'ouverture dans les systèmes indiqués aux figures 1 et 2. Cet écran est de préférence une plaque de verre profondément dépolie des deux côtés, mais peut être aussi un verre opale. La réduction maximale se produira lorsque l'écran sera placé approximativement à mi-distance entre la source lumineuse et l'ouverture A .

Un autre moyen permettant de réduire le niveau lumineux de façon suffisamment uniforme sur les portions du spectre incluant le proche ultraviolet, le visible et le proche infrarouge est d'utiliser des miroirs convexes à surface frontale métallisée à l'aluminium ou des surfaces réfléchissantes diffusantes, par exemple, des écrans de MgO ou BaSO_4 .

On doit mesurer la réponse à plusieurs niveaux connus de flux pour confirmer la linéarité.

The circuit employed for measuring cathode luminous sensitivity is shown in Figure 1, page 32, where at least the first two dynodes should be operated at normal voltages so that the electric field is not disturbed.

Where this effect is small, the tube may be connected as a diode. R is conventionally a resistance of approximately 1 M Ω whose function is to limit the current drawn if the tube being measured is defective (e.g. gassy or short-circuited).

The current meter A measures the photo-emissive current.

The measured currents being low, precautions should be taken to avoid leakage currents, for example, by connecting the shielding of the measuring instrument to ground and earthing the photocathode side. The voltage used should be sufficient to ensure saturation, generally 100 V to 400 V and saturation may be checked by increasing the voltage by 100%, which should cause little increase in current.

In general, since the relation between luminous flux and current at low light levels is linear, a measurement at one value of incident luminous flux will be adequate.

Lack of saturation at higher flux levels may be an indication of resistive losses in the photocathode layer and will result in a departure from linearity.

3.2 *Anode luminous sensitivity*

For this measurement, the photomultiplier is connected as in Figure 2, page 32, with a voltage source and a series of resistors in a voltage divider connected to each dynode and the anode. The anode current should have a value below the maximum value specified by the manufacturer.

For measurements of luminous sensitivity of a photomultiplier, a luminous flux in the range of 10^{-10} lm to 10^{-6} lm is commonly used. It may be necessary to use neutral-density filters to reduce the flux to these low values. A filter with a uniform transmittance throughout the visible and near infra-red regions is most desirable.

Since filter transmittance is generally not adequately uniform throughout this range, separate filter calibration is needed for tubes differing widely in their spectral sensitivity characteristics.

It is also possible to reduce the intensity by increasing the distance between the lamp and the photomultiplier or by using a lamp with lower intensity and the same spectral distribution.

Another means of reducing light level fairly equally at visible wavelengths is to insert a calibrated colourless diffusing screen between the source and the aperture in the systems illustrated by Figures 1 and 2. This screen is preferably a glass plate thoroughly grit-blasted on both sides, but may also be an opal glass. Maximum reduction will occur when the screen is placed approximately half-way between the light source and aperture A .

A further means of reducing the light level fairly equally over the near ultra-violet, visible and near infra-red portions of the spectrum is to use convex front-surface evaporated aluminium mirrors or diffuse reflecting surfaces, e.g. screens of MgO or BaSO₄.

Response at several known flux levels should be measured to confirm linearity.

Lorsque le gain du photomultiplicateur est indépendant de la longueur d'onde de la lumière incidente sur la photocathode et que le rendement de collection de la première dynode est indépendant de cette longueur d'onde, la sensibilité lumineuse anodique s_a peut être obtenue à partir de la sensibilité de cathode s_k et du gain G :

$$s_a = G s_k \quad (\text{A/lm})$$

s_k étant connu, il est alors suffisant de mesurer G pour une radiation pratiquement monochromatique.

Précaution. — La plupart des photomultiplicateurs ayant neuf étages ou plus, et la multiplication d'électrons étant fonction de la tension aux bornes de chaque étage, le courant de sortie est approximativement une fonction en puissance n de la tension d'alimentation, si l'on appelle n le nombre d'étages. Il faut prendre soin de contrôler et de mesurer la tension totale avec précision et de maintenir dans des tolérances étroites les rapports des valeurs des résistances dans la chaîne du diviseur de tension.

Les mesures de sensibilité lumineuse anodique sont généralement effectuées pour plusieurs valeurs de la tension appliquée.

3.3 Uniformité de la sensibilité lumineuse anodique sur la surface active de cathode

Dans tout phototube, la sensibilité lumineuse anodique sur la surface active de cathode (mesurée conformément à la figure 2, page 32) ne sera pas complètement uniforme à cause de la non-uniformité de la sensibilité intrinsèque de cathode (mesurée conformément à la figure 1, page 32) et d'autres effets tels que des variations dans le rendement de collection sur la surface de cathode.

L'uniformité peut être exprimée comme l'écart, en centièmes par rapport à la sensibilité médiane, ou comme le rapport des valeurs minimale à maximale, ou par une carte de la cathode indiquant les lignes d'égale sensibilité.

On peut mesurer l'uniformité de sensibilité en balayant systématiquement la surface de cathode à l'aide d'un petit spot lumineux de flux constant, de composition spectrale connue et de dimensions indiquées, tout en mesurant le courant du tube (fonctionnant dans des conditions indiquées). La méthode de balayage peut être manuelle, électromécanique ou électronique.

Pour une inspection qualitative rapide, un système d'analyse à deux dimensions à spot lumineux peut être utilisé et la sortie électrique du tube peut être examinée sur un tube à rayons cathodiques. Les variations de sensibilité sur la zone de cathode balayée peuvent être observées sous forme d'une tache dans l'image obtenue.

Pour obtenir des résultats quantitatifs avec ce système, la sortie provenant d'un balayage à ligne unique sur la photocathode peut être examinée sur un oscilloscope étaloné.

La non-uniformité de la sensibilité lumineuse anodique dépend aussi des non-uniformités des sensibilités spectrales, tant absolue que relative.

3.4 Caractéristique de sensibilité spectrale

La sensibilité de la photocathode à une lumière incidente monochromatique, à diverses longueurs d'ondes, est mesurée à l'aide de l'appareil décrit au paragraphe 7.2.5 de la Publication 306-1 de la CEI. Si les sensibilités énergétiques monochromatiques résultantes sont rapportées à la sensibilité pour une certaine longueur d'onde, on obtient la sensibilité énergétique monochromatique relative.

Ces valeurs peuvent être normalisées, la réponse de crête étant prise comme unité. Une courbe type est indiquée à la figure 1 de la Publication 306-1 de la CEI.

Le circuit électrique est le même que celui de la figure 1. Les courants de photocathode considérés sont souvent si faibles que l'appareil de mesure de courant doit être un galvanomètre de forte sensibilité ou un appareil de mesure couplé à un amplificateur.

Si la lumière n'est pas découpée, on doit utiliser un amplificateur de courant continu, mais il est en général préférable d'utiliser une lumière découpée et un amplificateur de courant alternatif.

When the gain of the photomultiplier is independent of the wavelength of the light incident upon the photocathode, and the collection efficiency of the first dynode is independent of this wavelength, the anode luminous sensitivity s_a can be obtained from the cathode sensitivity s_k and the gain G :

$$s_a = G s_k \quad (\text{A/lm})$$

s_k being known, it is then sufficient to measure G for a practically monochromatic radiation.

Caution. — Because most photomultipliers have nine or more stages, and because electron multiplication is a function of the voltage across each stage, the output current is approximately an n -power function of the supply voltage, where n is the number of stages. Care should be taken to control and measure the total voltage accurately and maintain within close tolerances the ratios of the values of the resistors in the voltage divider chain.

Anode luminous sensitivity measurements are usually taken at several values of applied voltage.

3.3 *Uniformity of anode luminous sensitivity over the active cathode area*

In any phototube, the anode luminous sensitivity over the active cathode area (measured according to Figure 2, page 32), will not be absolutely uniform because of non-uniformity of the intrinsic cathode sensitivity (measured according to Figure 1, page 32) and other effects such as variation in electron collection efficiency over the cathode area.

The uniformity may be expressed as percentage variation from the median sensitivity, or as the minimum-to-maximum ratio, or by a map of the cathode showing equal-sensitivity contour lines.

The uniformity of sensitivity may be measured by systematically scanning the cathode area with a small spot of light of constant flux, of known spectral composition and stated dimensions while measuring the current from the tube (operated under stated conditions). The method of scanning may be manual, electromechanical or electronic.

For rapid qualitative inspection, a two-dimensional flying-spot scanning system may be utilized, and the electrical output of the tube presented on a cathode-ray tube. Variation in sensitivity over scanned cathode area may be observed as a shading in the presented picture.

For taking quantitative data with this system, the output from a single-line sweep across the photocathode may be presented on a calibrated oscilloscope.

The non-uniformity of anode luminous sensitivity also depends on non-uniformities of absolute, as well as of relative spectral sensitivity.

3.4 *Spectral sensitivity characteristic*

The sensitivity of the photocathode to incident monochromatic light of different wavelengths is measured using apparatus described in Sub-clause 7.2.5 of IEC Publication 306-1. If the resulting absolute spectral sensitivities are referred to the sensitivity at a certain wavelength, the relative spectral sensitivity is obtained.

These values may be normalized, with the peak response taken as unity. A typical curve is described in Figure 1 of IEC Publication 306-1.

The electrical circuit is the same as that shown in Figure 1. The photocathode currents involved are frequently so small that the current meter must be a galvanometer of high sensitivity or a meter coupled to an amplifier.

If the light is not chopped, a d.c. amplifier must be used, but chopped light and an a.c. amplifier are generally preferable.

3.5 Sensibilité énergétique monochromatique de cathode

On peut la mesurer directement (en général à la longueur d'onde pour laquelle la sensibilité est la plus élevée) à l'aide du circuit de la figure 1, page 32, en remplaçant la lampe étalonnée par une source de rayonnement monochromatique. La sensibilité énergétique monochromatique de cathode est le quotient de (1) le courant photoélectrique par (2) la valeur du flux énergétique monochromatique incident.

3.6 Sensibilité énergétique monochromatique anodique

On peut la mesurer directement (en général à la longueur d'onde pour laquelle la sensibilité est la plus élevée) à l'aide du circuit de la figure 2, page 32, en remplaçant la lampe étalonnée par une source de rayonnement monochromatique. La sensibilité énergétique monochromatique anodique est le quotient de (1) le courant anodique par (2) la valeur du flux énergétique monochromatique incident.

3.7 Amplification en courant

L'amplification en courant (G) est le rapport de (1) le courant anodique de signal (I_a) à (2) le courant cathodique de signal (I_k) pour des tensions d'électrodes indiquées:

$$G = \frac{I_a}{I_k}$$

Pour des valeurs élevées, il est difficile d'effectuer cette mesure en une fois car le courant cathodique de signal doit être rendu extrêmement faible, afin que le courant anodique ne dépasse pas le maximum indiqué. L'amplification peut être mesurée par étapes en utilisant l'une des trois méthodes ci-après, basées sur les hypothèses suivantes:

- Les courants de photocathode, de dynode et d'anode sont directement proportionnels au flux lumineux incident.
- L'amplification est constante, quelles que puissent être la valeur du flux lumineux et sa longueur d'onde.

3.7.1 Méthode 1

Le courant anodique de signal I_a est mesuré pour des tensions indiquées à une valeur de flux lumineux suffisamment faible pour que la valeur du courant anodique soit à l'intérieur de la région linéaire et que les effets de fatigue soient évités.

On augmente alors le flux lumineux, sans changer sa répartition spectrale, d'un facteur connu A et le courant cathodique I'_k est mesuré, en n'appliquant la tension normale qu'aux premiers étages du tube photomultiplicateur afin de ne pas endommager le tube. L'amplification globale G est le rapport de (1) le courant anodique de signal primitif I_a à (2) le courant cathodique de signal final I'_k , multiplié par le facteur A par lequel le flux lumineux a été augmenté:

$$G = \frac{I_a}{I'_k} A$$

La variation de flux lumineux peut être obtenue en utilisant une lumière monochromatique de façon à connaître avec plus de précision l'atténuation des filtres «neutres» utilisés.

Note. — Les courants de fuite ne doivent pas être inclus.

3.5 Cathode spectral sensitivity

This may be measured directly (usually at the wavelength for which the sensitivity is the greatest) using the circuit shown in Figure 1, page 32, and replacing the calibrated lamp with a source of monochromatic radiation. The cathode spectral sensitivity is the quotient of (1) the photocurrent by (2) the value of the incident monochromatic radiant flux.

3.6 Anode spectral sensitivity

This may be measured directly (usually at the wavelength for which the sensitivity is the greatest) using the circuit shown in Figure 2, page 32, and replacing the calibrated lamp with a source of monochromatic radiation. The anode spectral sensitivity is the quotient of (1) the anode current by (2) the value of the incident monochromatic radiant flux.

3.7 Current amplification

The current amplification (G) is the ratio of (1) the anode signal current (I_a) to (2) the cathode signal current (I_k) at stated electrode voltages:

$$G = \frac{I_a}{I_k}$$

For large values it is difficult to make this measurement in one step because the cathode signal current has to be made extremely low, in order that the anode current will not exceed the stated maximum. The amplification can be measured in steps by one of the three following methods, based on the following assumptions:

- The photocathode, dynode and anode currents are directly proportional to the incident luminous flux.
- The amplification is constant, whatever the value of the luminous flux and its wavelength may be.

3.7.1 Method 1

The anode signal current I_a is measured for stated voltages at a sufficiently low luminous flux that the value of the anode current is within the linear region and fatigue effects are avoided.

The luminous flux is then increased, without changing its spectral distribution, by a known factor A and the cathode current I'_k is measured; only the first stages of the photomultiplier tube having normal voltage applied in order not to damage the tube. The over-all amplification G is the ratio of (1) the original anode signal current I_a to (2) the final cathode signal current I'_k , multiplied by the factor A by which the luminous flux has been increased:

$$G = \frac{I_a}{I'_k} A$$

The change of luminous flux may be accomplished by using a monochromatic light in order to know more precisely the attenuation of “neutral” filters used.

Note. — Leakage currents should not be included.

3.7.2 Méthode 2

Le flux incident est choisi suffisamment faible pour que le courant anodique I_a puisse être mesuré aux tensions indiquées. Ensuite, le courant de dynode I_{sn} est mesuré dans le premier étage pour lequel sa mesure est facile.

Les étages finaux sont débranchés afin d'éviter des surcharges et on augmente le flux jusqu'à ce que le courant de dynode I_{sn} ait augmenté d'un facteur connu B . Si le courant cathodique de signal I'_k est encore trop faible pour être mesuré, on répète le même processus (facteurs $B_1, B_2, \dots, B_n$). L'amplification globale G est finalement déterminée comme le rapport de (1) le courant anodique de signal primitif I_a à (2) le courant cathodique de signal final I'_k , multiplié par le facteur B ou les facteurs $B, B_1, B_2, \dots, B_n$:

$$G = \frac{I_a}{I'_k} \times B \times B_1 \times B_2 \dots \times B_n$$

Précaution. — Au moins deux dynodes après celle dont le courant est mesuré doivent être alimentées sous leur tension normale.

Note. — Les courants de fuite ne doivent pas être inclus.

3.7.3 Méthode 3

Le rayonnement incident et une tension globale réduite sont choisis de façon telle que le courant cathodique I_{k1} soit juste suffisamment élevé pour être mesurable. Le courant anodique I_{a1} est mesuré et est, bien entendu, supérieur au courant cathodique par un certain facteur (par exemple 1 000). On réduit alors le rayonnement par un facteur convenable et la valeur résultante, plus basse, du courant anodique I_{a2} est notée.

La tension globale est alors augmentée jusqu'à sa valeur normale tout en maintenant le flux incident constant, et la valeur résultante du courant anodique I_{a3} est à nouveau notée. L'amplification globale G est le rapport de (1) la première valeur de courant anodique I_{a1} à (2) la deuxième valeur de courant anodique I_{a2} , multiplié par le rapport de (3) la troisième valeur de courant anodique I_{a3} à (4) la première valeur de courant cathodique I_{k1} , c'est-à-dire:

$$G = \frac{I_{a1}}{I_{a2}} \times \frac{I_{a3}}{I_{k1}}$$

Si nécessaire, la mesure peut être effectuée en plusieurs étapes.

Précaution. — Le courant cathodique et le courant anodique doivent être proportionnels, sinon la mesure est fautive.

Note. — Les courants de fuite ne doivent pas être inclus.

3.8 Caractéristiques de sensibilité anodique

3.8.1 Caractéristique de courant entre l'anode et la dernière dynode

Le courant anodique est mesuré en fonction de la tension entre l'anode et la dernière dynode, les autres tensions du tube étant maintenues à une valeur indiquée.

La caractéristique est fondamentalement semblable à celle d'un phototube diode à vide; toutefois, à cause de l'amplification de courant dans les étages précédents, le courant anodique est en général suffisamment fort pour que, à des tensions courantes, la charge d'espace puisse causer une relation non linéaire entre le flux et le courant anodique. En conséquence, on doit tracer une famille de courbes du courant en fonction de la tension pour divers niveaux constants de flux.

3.7.2 Method 2

The incident flux is chosen so low that the anode current I_a can be measured at the stated voltages. Next, the dynode current I_{sn} is measured in the lowest stage where it can be conveniently measured.

The final stages are disconnected to avoid overloading and the flux is increased until the dynode current I_{sn} has increased by a known factor B . If the cathode signal current I'_k is still too low to be measured, the same procedure is repeated (factors $B_1, B_2, \dots, B_n$). The over-all amplification G is finally determined as the ratio of (1) the original anode signal current I_a to (2) the final cathode signal current I'_k multiplied by the factor B or the factors $B, B_1, B_2, \dots, B_n$:

$$G = \frac{I_a}{I'_k} \times B \times B_1 \times B_2 \dots \times B_n$$

Caution. — At least two dynodes, beyond the one for which the current is being measured, must have normal voltage applied.

Note. — Leakage currents should not be included.

3.7.3 Method 3

The incident radiation and a reduced over-all voltage are chosen so that the cathode current I_{k1} is just large enough to be measured. The anode current I_{a1} is measured and is of course higher than the cathode current by some factor (e.g. 1 000). The radiation is then decreased by a suitable factor and the resulting lower value of anode current I_{a2} is noted.

The over-all voltage is now increased to its normal value, whilst keeping the incident flux constant, and the resulting value of anode current I_{a3} is again noted. The over-all amplification G is the ratio of (1) the first value of anode current I_{a1} to (2) the second value of anode current I_{a2} multiplied by the ratio of (3) the third value of anode current I_{a3} to (4) the first value of cathode current I_{k1} , i.e.:

$$G = \frac{I_{a1}}{I_{a2}} \times \frac{I_{a3}}{I_{k1}}$$

If necessary, measurement may be carried out in several steps.

Caution. — Cathode current and anode current must be proportional to each other, otherwise the measurement is not valid.

Note. — Leakage currents should not be included.

3.8 Anode sensitivity characteristics

3.8.1 Anode to last dynode current characteristic

The anode current is measured as a function of the voltage between the anode and the last dynode while the other voltages on the tube are kept at a stated value.

The characteristic is basically similar to that of a diode vacuum-phototube; however, as a result of the current amplification in the preceding stages, the anode current is frequently so large that, at conventional voltages, space charge may cause a non-linear relationship between flux and anode current. Therefore, a family of curves of current versus voltage at various constant flux levels should be obtained.

3.8.2 *Caractéristiques globales d'amplification et de sensibilité*

Ces caractéristiques sont mesurées avec un rapport déterminé de tensions d'électrodes en appliquant une tension globale variable au diviseur qui fournit les tensions à chacune des électrodes. L'amplification en courant et la sensibilité anodique (lumineuse ou énergétique) suivent en général une loi en puissance n de la tension (voir paragraphe 3.2, précaution). Il est donc pratique de représenter graphiquement la variation du logarithme de ces quantités en fonction de la tension globale appliquée.

3.9 *Caractéristiques dynamiques*

3.9.1 *Considérations générales sur l'appareillage et les méthodes de mesure*

Selon les applications pour lesquelles les photomultiplicateurs sont étudiés, il faut mesurer diverses caractéristiques dynamiques. Ce sont :

- la durée de réponse impulsionnelle (et/ou le temps de montée de l'impulsion de courant de sortie);
- le temps de transit;
- les variations de temps de transit selon la position de l'éclairement;
- la fluctuation du temps de transit.

Le signal lumineux peut être aisément représenté soit par une fonction de Dirac, soit par une fonction échelon, ayant respectivement une durée ou un temps de montée négligeable par rapport à la caractéristique à mesurer. Si on utilise une fonction échelon ou une autre fonction d'entrée, la réponse doit être ramenée à celle correspondant à une fonction de Dirac; par exemple, si on utilise une fonction échelon, l'impulsion de sortie est différenciée, et l'impulsion résultante est l'impulsion équivalente de sortie pour une impulsion de Dirac à l'entrée.

On doit éviter la saturation par charge d'espace, ou par d'autres sources de non-linéarité.

Les répartitions spectrale, spatiale et temporelle de la lumière incidente sur la photocathode doivent être indiquées.

Les circuits habituels doivent procurer un découplage satisfaisant des dynodes.

La tension totale de fonctionnement et la répartition de tension doivent être indiquées.

Des générateurs d'impulsions lumineuses convenables sont :

- un découpeur mécanique d'impulsions lumineuses;
- un dispositif donnant une décharge par étincelle dans l'hydrogène;
- une capsule-interrupteur à mercure donnant une décharge par étincelle*;
- une cellule de Kerr et une source lumineuse;
- des sources lumineuses à semiconducteur.

Le détecteur nécessaire pour déterminer la forme et l'instant d'arrivée des impulsions de sortie est généralement un oscilloscope qui doit avoir une bande passante et une sensibilité suffisantes pour éviter les distorsions en temps et en amplitude de l'impulsion de sortie. Toutefois, dans plusieurs mesures, des dispositifs optiques spéciaux et des circuits de coïncidence de temps sont nécessaires.

* *Précaution.* — La capsule en verre d'un interrupteur à mercure est remplie de gaz à haute pression et doit être manipulée avec beaucoup de précautions pour éviter des blessures par explosion. Cependant, c'est une source lumineuse très utile car elle donne des impulsions ayant un temps de montée court et une impulsion électrique synchronisée avec précision.

3.8.2 *Over-all amplification and sensitivity characteristics*

These characteristics are measured with a stated ratio of electrode voltages by applying a variable over-all voltage to the divider supplying the voltages of the individual electrodes. Current amplification and anode (luminous or radiant) sensitivity usually follow an n -power function of voltage (see Sub-clause 3.2, Caution). It is convenient, therefore, to plot the variation of the logarithm of these quantities versus over-all applied voltage.

3.9 *Dynamic characteristics*

3.9.1 *General considerations applicable to equipment and methods of measurement*

Depending on the applications for which photomultipliers are designed, different dynamic characteristics need to be measured. These are:

- response pulse duration (and/or rise time of the output current pulse);
- transit time;
- variation in transit time with position of illumination;
- transit time jitter.

The light signal may conveniently be represented by either a delta function or a step function, having respectively a duration or a rise time negligible compared with the characteristic to be measured. If a step function or another input function is used, the response should be corrected to that corresponding to a delta function; e.g. if a step function is used, the output pulse is differentiated and the resulting pulse is the equivalent output pulse for a delta input pulse.

Space charge saturation or other sources of non-linearity must be avoided.

The spectral, spatial and temporal distributions of the light incident on the photocathode must be stated.

The usual circuitry must provide adequate decoupling of dynodes.

The total working voltage and the voltage distribution must be stated.

Suitable light-pulse generators are:

- a mechanical light pulser;
- a device giving a spark discharge in hydrogen;
- a mercury switch capsule giving a spark discharge*;
- a Kerr cell and a light source;
- semiconductor light sources.

The detector necessary to determine the shape and instant of occurrence of the output pulses is usually an oscilloscope which must have sufficient bandwidth and sensitivity to prevent time and amplitude distortion of the output pulse. In several measurements, however, special viewing devices and time coincidence circuits are necessary.

* *Caution.* — The glass capsule of a mercury switch is filled with gas at high pressure and should be handled with great care to avoid injury from explosion. However, this is a very useful light source because it provides a pulse having a short rise time and an accurately synchronized electrical pulse.

3.9.2 Durée de réponse impulsionnelle

Lorsque la photocathode reçoit une impulsion lumineuse de Dirac d'amplitude suffisamment grande pour donner une impulsion de courant de sortie statistiquement stable, l'intervalle de temps entre les points à demi-amplitude de cette impulsion de courant de sortie, vus sur un oscilloscope, dépend :

- du phénomène de charge de la capacité anodique par le groupe d'électrons, puis de décharge de cette capacité dans la résistance de charge ;
- des variations du temps de transit en fonction de la position de l'éclairement, et des fluctuations du temps de transit.

Il faut remarquer que, même si l'impulsion d'entrée était une fonction de Dirac idéale, l'impulsion de sortie aurait une durée non négligeable.

Le temps de transit dépendant de la position de l'aire éclairée de la photocathode, la durée de réponse impulsionnelle est maximale lorsque toute la photocathode est éclairée; toutefois, on peut désirer faire la mesure en éclairant une zone circulaire de dimensions données centrée sur la photocathode.

Le temps de montée de l'impulsion de courant de sortie résultant d'une impulsion lumineuse de Dirac à l'entrée est parfois une caractéristique importante, et peut être obtenu avec plus de précision que la durée de réponse impulsionnelle, par des mesures simples; ceci provient de ce que le temps de descente de l'impulsion de sortie dépend de façon très sensible de la caractéristique relativement longue de temps d'extinction de la source lumineuse, aussi bien que de la caractéristique de déclin du tube. Aucune source ne pouvant fournir des impulsions lumineuses de Dirac parfaites, il faudra en pratique que le générateur d'impulsions lumineuses soit tel que la durée t_1 entre les points à demi-amplitude sur le signal lumineux soit faible par rapport à la durée de réponse impulsionnelle t mesurée (en général $t_1 \leq 1$ ns); l'intensité lumineuse doit être suffisante pour permettre de connaître la forme exacte du signal lumineux au moyen d'une cellule photoélectrique rapide à vide ayant des électrodes planes parallèles.

Soit t_2 la durée entre les points à demi-amplitude de l'impulsion de courant de sortie vue sur l'oscilloscope. Les formes d'impulsion ne s'écartant pas beaucoup de fonctions de Gauss, la durée de réponse impulsionnelle est donnée par :

$$t = \sqrt{t_2^2 - t_1^2}$$

Toutefois, si l'on désire une précision supérieure, il est possible d'opérer différemment. Les formes F_1 de l'impulsion lumineuse et F_2 de l'impulsion de courant de sortie étant connues, il est théoriquement possible d'obtenir à partir de celles-ci la forme de la fonction de transfert F_T du photomultiplicateur.

Ceci conduisant à des calculs très compliqués, on préférera, en pratique, combiner la fonction F_1 et une fonction supposée F'_T . La fonction résultante $F'_2 = F'_T * F_1$ doit être approximativement égale à la fonction F_2 correspondant à l'impulsion de sortie, et la fonction de transfert F_T est ainsi obtenue par approximations successives.

3.9.3 Temps de transit

Un dispositif convenable de mesure du temps de transit est indiqué à la figure 3, page 33. La longueur de la ligne de retard est choisie telle que la différence de temps, entre l'impulsion de marquage électrique provenant du générateur d'impulsions lumineuses et un point défini de l'impulsion de courant de sortie, puisse être déterminée à l'oscilloscope. Si l'impulsion lumineuse d'entrée et l'impulsion de marquage sont toutes deux des fonctions de Dirac, le retard est mesuré à partir de la crête de l'impulsion de marquage jusqu'à la crête de l'impulsion de sortie. Si l'impulsion lumineuse est une fonction échelon, le retard équivalent pour une impulsion d'entrée de Dirac sera obtenu en mesurant à partir de la crête de l'impulsion de marquage jusqu'au point de pente maximale sur l'impulsion de sortie.

3.9.2 Response pulse duration

When the photocathode receives a delta function light pulse of sufficiently large amplitude to give a statistically stable output current pulse, the time interval between the half-amplitude points of this output current pulse, as seen on an oscilloscope, depends on:

- the phenomenon of charging the anode capacitance by the group of electrons, then of discharging it through the load resistor;
- variations in transit time with position of illumination, and transit time jitter.

It should be noted that, even if the input were an ideal delta function, the output pulse would have a non-negligible duration.

Because transit time depends on the position of the illuminated area of the photocathode, the response pulse duration is maximum when the entire photocathode is illuminated; however, it may be desired to make the measurement with the illumination on a circular area of stated size centred on the photocathode.

The rise time of the output current pulse resulting from a delta function light input is sometimes an important characteristic and may be obtained more accurately than the response pulse duration with simple measurements; this is because the decay time of the output pulse depends very significantly on the comparatively long decay characteristic of the light source, as well as on the decay characteristic of the tube. As no source can supply perfect delta function light pulses, in practice the light pulse generator shall be such that the time duration t_1 between the half-amplitude points of the light signal is small with respect to the response pulse duration t to be measured (in general $t_1 \leq 1$ ns); the light intensity should be sufficient to allow the exact shape of the light signal to be distinguished by means of a fast vacuum-photocell having plane parallel electrodes.

Let t_2 be the time duration between the half-amplitude points of the output current pulse as seen on the oscilloscope. As the pulse shapes do not differ very much from Gaussian functions, the response pulse duration is obtained as:

$$t = \sqrt{t_2^2 - t_1^2}$$

However, when a greater precision is required, a different method may be used. The shapes F_1 of the light pulse and F_2 of the output current pulse being known, it is theoretically possible to derive from these the shape of the transfer function F_T of the photomultiplier.

This leading to very difficult calculations, it will be preferred, in practice, to combine function F_1 and supposed function F_T' . The resulting function $F_2' = F_T' * F_1$ should be approximately equal to function F_2 corresponding to the output pulse, and the transfer function F_T is thus obtained through successive approximations.

3.9.3 Transit time

A suitable arrangement for measuring transit time is shown in Figure 3, page 33. The length of the delay cable is chosen so that the time difference, between the electrical marker pulse from the light pulser and a stated point on the output current pulse, can be determined on the oscilloscope. If the light input and the marker pulse are both delta functions, the time delay is measured from the peak of the marker pulse to the peak of the output pulse. If the light input is a step function, the equivalent time delay for a delta input function may be obtained by measuring from the peak of the marker pulse to the point of maximum slope of the output pulse.

Soit:

t_o = l'intervalle de temps entre l'impulsion de marquage et l'impulsion de sortie

t_d = le temps de transit électrique de la ligne de retard

t_a = le temps de transit électrique du câble A

t_L = le temps requis pour que l'impulsion lumineuse aille de la source lumineuse au photomultiplicateur

Le temps de transit du tube t_t est alors:

$$t_t = t_o + t_d - (t_L + t_a)$$

Comme le temps de transit est inversement proportionnel à la racine carrée de la tension appliquée, et est aussi fonction de la position de la zone éclairée sur la cathode, les tensions de fonctionnement et la manière d'appliquer l'éclairement doivent être indiquées.

3.9.4 Variation du temps de transit en fonction de la position d'éclairement

Les variations de temps de transit à partir de diverses positions de la zone éclairée sur la photocathode peuvent être l'une des causes qui contribuent à une grande durée de réponse impulsionnelle et, en conséquence, sont une caractéristique utile pour prédire la durée de réponse impulsionnelle. En effectuant cette mesure, le diaphragme réglable (voir figure 3, page 33) doit être fermé jusqu'au point où le diamètre du spot illuminé est d'environ 5% du diamètre de la photocathode. Lorsqu'on déplace cette petite zone illuminée sur la photocathode, on observe une variation de temps de transit.

La variation de temps de transit par rapport à la position de référence, qui est en général le centre de la photocathode, est mesurée à la fois en fonction du rayon et de l'angle. Toutes les tensions d'électrodes doivent être indiquées.

3.9.5 Fluctuation du temps de transit

La mesure de la fluctuation du temps de transit peut se faire à l'aide de l'installation de la figure 4, page 34, qui donne un schéma fonctionnel très simplifié. Les impulsions lumineuses de Dirac, fournies par la source décrite aux paragraphes 3.9.1 et 3.9.2, et dans les mêmes conditions, doivent être suffisamment atténuées avant d'atteindre la photocathode pour que, à chaque éclair lumineux, il ne soit pas émis plus d'un photoélectron par la photocathode.

Par l'intermédiaire d'un convertisseur temps-amplitude, on enregistre sur un analyseur multicanal les intervalles de temps entre un point déterminé de l'impulsion anodique correspondant à cet électron unique et un signal synchrone du signal lumineux. Pourvu que le temps d'enregistrement soit suffisant pour pouvoir négliger les erreurs statistiques, la forme de l'impulsion obtenue sur l'écran de l'analyseur est celle de l'impulsion lumineuse entachée des erreurs introduites par la fluctuation du temps de transit.

Soit:

F_1 = la fonction correspondant à l'impulsion lumineuse

t_1 = la durée entre ses points à demi-amplitude

F_3 = la fonction correspondant à l'impulsion vue sur l'écran de l'analyseur

t_3 = la durée entre ses points à demi-amplitude

F = la fonction qui représente la fluctuation du temps de transit

t = la durée entre ses points à demi-amplitude

Let:

t_o = time interval between the marker pulse and the output pulse

t_d = electrical transit time of the delay cable

t_a = electrical transit time of cable A

t_L = time required for the light pulse to travel from the light source to the photomultiplier

Then the transit time of the tube t_t is:

$$t_t = t_o + t_d - (t_L + t_a)$$

Since transit time varies inversely as the square root of the applied voltage, and is also a function of the position of the illuminated cathode area, the operating voltages and manner of applying illumination must be stated.

3.9.4 *Variation in transit time with position of illumination*

Variation in transit time from different positions of the illuminated area of the photocathode may be one contributing cause to a large pulse response duration and is, consequently, a useful characteristic for predicting pulse response duration. In making this measurement, the adjustable aperture (see figure 3, page 33) should be closed to the point where the diameter of the illuminated spot is about 5% of the diameter of the photocathode. When this small area of illumination is shifted over the photocathode, a variation in transit time is observed.

The variation in transit time from that at the reference position, which is usually the centre of the photocathode, is measured as a function of both radius and azimuth. All electrode voltages should be stated.

3.9.5 *Transit time jitter*

The measurement of transit time jitter may be made by means of the equipment of Figure 4, page 34, which gives a very simplified block diagram. The delta function light pulses, provided by the source described in Sub-clauses 3.9.1 and 3.9.2, and under the same conditions, shall be so attenuated, before reaching the photocathode, that, for each light pulse, the photocathode emits no more than one single electron.

Through a time-to-amplitude convertor, the time intervals between a stated point of the anode pulse corresponding to that single electron and a signal synchronous with the light signal, are recorded on a multichannel analyzer. Provided the recording time is sufficiently long that statistical errors can be neglected, the shape of the pulse obtained on the screen of the analyzer is that of the light pulse modified by the errors introduced by transit time jitter.

Let:

F_1 = function corresponding to the light pulse

t_1 = duration between its half-amplitude points

F_3 = function corresponding to the pulse on the screen of the analyzer

t_3 = duration between its half-amplitude points

F = function that represents transit time jitter

t = duration between its half-amplitude points

Les formes d'impulsion ne s'écartant pas beaucoup de fonctions de Gauss, la fluctuation du temps de transit peut être représentée par:

$$t = \sqrt{t_3^2 - t_1^2}$$

Toutefois, si une précision supérieure est requise, il est possible d'obtenir la fonction F à partir des fonctions F_3 et F_1 de façon semblable à celle expliquée au paragraphe 3.9.2.

3.10 Courant d'obscurité

Sauf spécification contraire, les conditions de mesure suivantes sont applicables à toutes les mesures de courant d'obscurité.

- a) Au cours des mesures, le tube doit être placé dans une enceinte étanche à la lumière, comme décrite au paragraphe 7.1 de la Publication 306-1 de la CEI. Pour certains tubes, l'exposition à la lumière au cours de l'heure ou d'un temps plus long précédant immédiatement la mesure peut provoquer un courant d'obscurité plus élevé que pour les tubes qui n'ont pas été exposés.
- b) Le circuit électronique est le même que celui de la figure 1 ou 2, page 32.
- c) Il faut prendre soin de maintenir les tensions d'électrodes et la température ambiante aux valeurs indiquées, car elles affectent le courant d'obscurité des photomultiplicateurs.
- d) Les fuites du support doivent être soustraites du courant d'obscurité d'électrode pour obtenir le courant d'obscurité net.
Ces fuites varient avec la température ambiante, l'humidité et la tension.

3.10.1 Courant anodique d'obscurité

Le courant anodique d'obscurité est mesuré aux tensions d'électrodes indiquées, ou aux tensions d'électrodes requises pour donner une sensibilité lumineuse indiquée.

Des causes possibles de courant anodique d'obscurité sont les fuites électriques (du tube, non du support), l'émission thermoélectronique, l'émission par effet de champ, l'ionisation du gaz résiduel et la fluorescence du tube. Pour de faibles tensions de fonctionnement, les composantes principales sont, en général, les fuites électriques ou l'émission thermoélectronique, ou les deux.

L'émission thermoélectronique et l'ionisation du gaz résiduel peuvent être reconnues parce qu'elles dépendent de la température. Pour des valeurs élevées de tensions appliquées et de l'amplification en courant correspondante, les autres composantes du courant d'obscurité peuvent devenir une part importante du courant d'obscurité total.

3.10.2 Entrée équivalant au courant anodique d'obscurité

L'entrée équivalant au courant anodique d'obscurité, en lumens, peut être déterminée en mesurant le courant anodique d'obscurité et la sensibilité lumineuse anodique à des tensions d'électrodes indiquées, ou à des tensions d'électrodes qui procurent une sensibilité lumineuse anodique indiquée, et en utilisant l'équation suivante:

$$\text{entrée équivalant au courant anodique d'obscurité (lumens)} = \frac{\text{courant anodique d'obscurité (ampères)}}{\text{sensibilité lumineuse anodique (ampères/lumen)}}$$

L'entrée équivalant au courant anodique d'obscurité, en watts, (à une longueur d'onde particulière) peut être obtenue de manière semblable à l'aide de l'équation suivante:

$$\text{entrée équivalant au courant anodique d'obscurité (watts)} = \frac{\text{courant anodique d'obscurité (ampères)}}{\text{sensibilité énergétique anodique (ampères/watt)}}$$

As the pulse shapes do not differ very much from Gaussian functions, the transit time jitter may be represented by:

$$t = \sqrt{t_3^2 - t_1^2}$$

However, when greater precision is required, it is possible to derive function F from functions F_3 and F_1 in a manner similar to that explained in Sub-clause 3.9.2.

3.10 Dark current

The following measurement conditions are applicable to all dark current measurements, unless otherwise stated.

- a) During measurements, the tube should be placed in a light-proof enclosure, as described in clause 7.1 of IEC Publication 306-1. For some tubes, exposure to light within an hour or more immediately preceding the measurement may result in a higher dark current than for unexposed tubes.
- b) The electronic circuitry is the same as that shown in Figure 1 or 2, page 32.
- c) Electrode voltages and ambient temperature should be carefully controlled at stated values because they affect the dark current of photomultipliers.
- d) Socket leakage should be subtracted from electrode dark current to obtain the net dark current.

This leakage varies with changes in ambient temperature, humidity and voltage.

3.10.1 Anode dark current

Anode dark current is measured at stated electrode voltages, or at electrode voltages required to provide a stated luminous sensitivity.

Possible causes of anode dark current are electrical leakage (tube, not socket), thermionic emission, field emission, residual gas ionization and tube fluorescence. At low operating voltages, its major components are normally electrical leakage or thermionic emission or both.

Thermionic emission and residual gas ionization can be recognized by their temperature dependence. At high values of applied voltage and the corresponding current amplification, the other dark current components may become an appreciable part of the total dark current.

3.10.2 Equivalent anode dark current input

The equivalent anode dark current input, in lumens, may be determined by measuring the anode dark current and anode luminous sensitivity at stated electrode voltages, or at electrode voltages providing a stated anode luminous sensitivity and making use of the following equation:

$$\text{equivalent anode dark current input (lumens)} = \frac{\text{anode dark current (amperes)}}{\text{anode luminous sensitivity (amperes/lumen)}}$$

The equivalent anode dark current input, in watts, (at a particular wavelength) may be obtained in a similar manner using the following equation:

$$\text{equivalent anode dark current input (watts)} = \frac{\text{anode dark current (amperes)}}{\text{anode radiant sensitivity (amperes/watt)}}$$

3.10.3 Caractéristique de l'entrée équivalant au courant anodique d'obscurité en fonction de la sensibilité

Cette caractéristique peut être représentée par une courbe liant les valeurs de l'entrée équivalant au courant anodique d'obscurité (lumens) aux valeurs de la sensibilité lumineuse anodique (ampères/lumen) ou bien l'entrée équivalant au courant anodique d'obscurité (watts, à une longueur d'onde spécifiée) aux valeurs de la sensibilité énergétique anodique (ampères/watt, à une longueur d'onde spécifiée).

3.10.4 Caractéristique du courant d'obscurité en fonction de la température

Lorsqu'elle est nécessaire, une courbe représentant le courant anodique d'obscurité, ou l'entrée équivalant au courant anodique d'obscurité, en fonction de la température d'équilibre, couvre normalement la gamme allant de -65°C jusqu'à la température maximale du tube.

Avec certaines cathodes, des mesures erratiques peuvent provenir d'une résistance de cathode excessive lorsque le tube fonctionne à basse température.

Cette courbe dépend du type de tube et, de plus, varie pour des tubes d'un même type.

3.10.5 Courant d'obscurité d'électrode dans un photomultiplicateur

Des valeurs élevées de courants d'obscurité d'électrodes, autres que le courant anodique d'obscurité, peuvent produire un effet de charge important, en particulier lorsque le courant dans le diviseur de potentiel est faible, et, en conséquence, affecter la répartition de tension entre les électrodes.

Pour mesurer le courant d'obscurité d'une électrode, les tensions indiquées doivent être appliquées à toutes les électrodes et le courant doit être lu sur un appareil de mesure inséré dans la connexion de l'électrode indiquée.

3.11 Bruit

Les rapports signal à bruit peuvent être mesurés avec le circuit de la figure 5, page 34, en utilisant un filtre ayant une largeur de bande équivalente de bruit définie.

Un instrument de mesure donnant directement les valeurs efficaces est utilisé.

Les rapports signal à bruit sont mesurés dans des conditions spécifiées: on doit indiquer les tensions d'électrodes, le flux incident, la zone éclairée, la température ambiante, la largeur de bande de l'amplificateur, la charge anodique et les capacités parasites. Une lampe-étalon doit être utilisée.

3.11.1 Rapport signal à «bruit dans le signal»

Le rapport signal à «bruit dans le signal» dépend des variations statistiques du courant d'électrons quittant la photocathode, du rendement de collection des électrons sur la première dynode, des variations statistiques dans la multiplication d'électrons dans les premières dynodes, et de la bande de fréquences.

Le rapport signal à «bruit dans le signal» est:

$$\text{Rapport signal à «bruit dans le signal»} = \frac{\text{courant de sortie dû au signal}}{\text{courant de sortie de bruit dans le signal (valeur efficace)}}$$

3.11.2 Rapport du signal au bruit du courant d'obscurité

Dans les conditions de fonctionnement indiquées, le courant de sortie dû au signal est mesuré par le galvanomètre, le tube étant éclairé. En coupant l'éclairement, on mesure la valeur efficace du bruit en sortie dans le courant d'obscurité. Le rapport du signal au bruit du courant d'obscurité est:

$$\frac{\text{courant de sortie dû au signal}}{\text{courant de sortie de bruit du courant d'obscurité (valeur efficace)}}$$

3.10.3 *Equivalent anode dark current input sensitivity characteristic*

This characteristic can be shown as a curve relating the values of the equivalent anode dark current input (lumens) to values of anode luminous sensitivity (amperes/lumen) or equivalent anode dark current input (watts, at a specified wavelength) to values of anode radiant sensitivity (amperes/watt, at a specified wavelength).

3.10.4 *Temperature characteristic of dark current*

In cases where it is of interest, a graph of anode dark current or equivalent anode dark current input as a function of equilibrium temperature normally covers the range of -65°C to the maximum rated tube temperature.

With certain cathodes, erratic measurements may result from excessive cathode resistance when the tube is operated at low temperature.

This curve depends on the type of tube and, moreover, varies among tubes of the same type.

3.10.5 *Electrode dark current in a photomultiplier*

High values of electrode dark current, other than anode dark current, may produce a serious loading effect, especially when the current in the potential divider is low and, thereby affects the voltage distribution to the electrodes.

To measure the dark current of an electrode, the stated voltages should be applied to all electrodes and the current should be read on a meter inserted in the stated electrode lead.

3.11 *Noise*

Signal to noise ratios may be measured with the circuit shown in Figure 5, page 34, with a filter having defined equivalent noise bandwidth.

A true r.m.s. reading instrument is used.

Signal to noise ratios are measured under specified conditions; electrode voltages, incident flux, illuminated area, ambient temperature, amplifier bandwidth, anode load and stray capacitance should be stated. A standard lamp should be used.

3.11.1 *Signal to "noise in the signal" ratio (SNR)*

The signal to "noise in the signal" ratio is dependent on the statistical variation of the electron current leaving the photocathode, on the efficiency of electron collection at the first dynode, on the statistical variation of electron multiplication at the first few dynodes and on the frequency band.

The signal to "noise in the signal" ratio is:

$$\text{SNR} = \frac{\text{signal output current}}{\text{r.m.s. noise in the signal output current}}$$

3.11.2 *Signal to dark current noise ratio*

Under the stated operating conditions, the signal output current is measured by the galvanometer with the light on. With the light off, the r.m.s. dark current noise output is measured. The signal to dark current noise ratio is:

$$\frac{\text{signal output current}}{\text{r.m.s. dark current noise output}}$$

3.11.3 Entrée équivalent au bruit du courant d'obscurité

L'entrée équivalent au bruit du courant d'obscurité, pour une largeur de bande unité est donnée par:

$$\frac{F}{\sqrt{B}} \times \frac{n}{S} \quad (\text{lm/Hz}^{1/2})$$

où:

F = flux lumineux, en lumens, utilisé pour mesurer le rapport du signal au bruit du courant d'obscurité

B = bande passante du filtre, en hertz

$\frac{S}{n}$ = rapport du signal au bruit du courant d'obscurité

3.12 Limitations du courant de sortie de crête

Le courant de sortie d'un photomultiplicateur peut être limité par deux effets:

- a) charge d'espace;
- b) résistivité élevée de la photocathode.

En général, il est vraisemblable que le premier effet se produira dans les derniers étages du photomultiplicateur, où les courants peuvent être relativement élevés, tandis que le deuxième effet n'apparaît que pour des photocathodes semi-transparentes.

La saturation par charge d'espace dans un photomultiplicateur peut se distinguer de la saturation provenant d'une cathode à résistivité élevée en mesurant le courant de sortie avec des tensions augmentées entre quelques-unes des premières dynodes afin d'accroître l'amplification de courant. Le courant de sortie sera augmenté si la saturation provient de la résistivité de cathode, mais ne changera pas si la saturation provient de la charge d'espace dans l'une des dernières dynodes.

Une dérive ou une dépendance en fonction de la température du courant de saturation de sortie indique une résistivité élevée de cathode. L'impédance statique et dynamique de l'alimentation des dynodes doit être aussi faible que possible.

3.12.1 Courant de sortie limité par charge d'espace

La charge d'espace peut provoquer une limitation du courant de sortie qui, au-dessus d'un certain niveau d'éclairement, s'écarte de la linéarité et augmente relativement moins vite. Dans le cas extrême de saturation totale par charge d'espace, le courant anodique reste constant lorsque l'éclairement augmente.

L'écart par rapport à la linéarité commençant de façon très lente, on ne peut donner une valeur exacte du courant de sortie de crête permettant un fonctionnement linéaire que si l'on définit l'écart toléré par rapport à la linéarité. Pour la plupart des utilisations, un écart de 5% est une valeur raisonnable.

Le courant de sortie est mesuré tandis qu'on fait varier l'éclairement de quantités connues; on y parvient au mieux en utilisant des filtres neutres étalonnés, ou en modifiant la distance entre la source lumineuse et la photocathode et en appliquant la loi de l'inverse du carré de la distance. La mesure peut être effectuée en courant continu avec des éclaircissements constants, jusqu'aux valeurs de courant pour lesquelles la dissipation d'électrode dépasse les valeurs de sécurité.

Pour des valeurs de courant plus élevées, on utilise une lumière pulsée et l'on mesure les valeurs de crête du flux lumineux incident et du courant de sortie.

3.11.3 Equivalent dark current noise input

The equivalent dark current noise input for unit bandwidth is given by:

$$\frac{F}{\sqrt{B}} \times \frac{n}{S} \cdot (\text{lm/Hz}^{1/2})$$

where:

F = luminous flux, in lumens, used in measuring the signal to dark current noise ratio

B = bandwidth of filter, in hertz

$\frac{S}{n}$ = signal to dark current noise ratio

3.12 Peak output current limitations

The output current of a photomultiplier can be limited by two effects:

- a) space charge;
- b) high resistivity of the photocathode.

In general, the first effect is likely to occur in the last stages of a photomultiplier where the currents may be relatively high, while the second effect is found only in semi-transparent photocathodes.

Space-charge saturation in a photomultiplier can be distinguished from saturation caused by a high-resistivity cathode by measuring the output current with increased voltage between some of the early dynodes to increase the current amplification. The output current will be increased if the saturation is caused by cathode resistivity, but it will not be affected if the saturation is due to space charge in one of the last few dynodes.

Drift or temperature dependence of the saturation output current indicates high cathode resistivity. The static and dynamic impedance of the supply to the dynodes should be as low as possible.

3.12.1 Space-charge-limited output current

Space charge may cause a limitation in output current which, above a certain level of illumination, departs from linearity and increases relatively less. In the extreme of complete space-charge saturation, the anode current remains constant with increasing illumination.

As the deviation from linearity starts very gradually, an exact value for the permissible peak output current for linear operation can only be stated if the permissible deviation from linearity is defined. For most purposes, a deviation of 5% is a reasonable value.

The output current is measured while the illumination is varied by known amounts; this is best done by the use of calibrated neutral filters, or by changing the distance between the light source and the photocathode and applying the inverse-square law. The measurement may be made by d.c. methods with steady illuminations, up to values of current at which electrode dissipation exceeds safe values.

For higher values of current, pulsed light is used and peak values of incident light flux and output current are measured.

On utilise couramment un oscilloscope cathodique comme indicateur de courant; il faut vérifier que la forme de l'impulsion de courant de sortie ne s'est pas modifiée, car très souvent on peut constater une variation du temps de croissance avant que le courant de crête ne change.

Une méthode simple ne nécessitant aucun étalonnage photométrique est de comparer à l'aide d'un oscilloscope X Y les impulsions anodiques délivrées par deux photomultiplicateurs excités par une source lumineuse commune, selon le schéma de la figure 6, page 35. L'un des photomultiplicateurs, éclairé par le flux atténué, doit être suffisamment rapide pour ne pas déformer les impulsions, même à bas niveau. Tout écart de linéarité dans le photomultiplicateur en mesure se traduit par une déviation par rapport à la droite obtenue quand les impulsions des deux photomultiplicateurs sont parfaitement proportionnelles. Le niveau de sortie pour lequel l'écart par rapport à la droite a une valeur déterminée, par exemple 5%, définit la limite de linéarité.

Des sources lumineuses convenables sont les tubes à rayons cathodiques avec des écrans à très faible persistance, tels que P15 ou P16, utilisés en impulsions, des lampes à décharge dans le gaz ou des lampes à incandescence avec des obturateurs mécaniques.

Toutes les tensions d'électrodes doivent être soigneusement réglées aux valeurs indiquées.

3.12.2 *Courant de sortie de crête limité par une résistivité élevée de cathode*

Le courant de cathode limite pour des cathodes semi-transparentes est déterminé par le type de cathode utilisé. Une résistivité élevée de cathode peut donner un courant anodique qui augmente non-linéairement en fonction de l'éclairement.

L'essai de linéarité est le même que celui décrit au paragraphe 3.12.1. Si un phototube avec cathode semi-transparente doit être utilisé à basse température (par exemple, azote liquide), l'essai de linéarité doit être effectué à cette température car, en général, la résistivité augmente lorsque la température décroît.

La température et les tensions d'électrodes doivent être réglées avec précaution aux valeurs indiquées.

3.13 *Dimensions et position de la zone photosensible*

On doit indiquer les dimensions de la photocathode ou la position et les dimensions de la fenêtre de l'enveloppe à travers laquelle la cathode est éclairée.

3.14 *Précautions*

3.14.1 *Fatigue*

Dans les conditions normales de fonctionnement, certains phototubes présentent une variation temporaire de sensibilité, appelée fatigue. La fatigue peut être exprimée en fonction des variations de sensibilité, en centièmes, dans des conditions de fonctionnement indiquées qui comprennent toutes les tensions d'électrodes, le flux énergétique total, le temps d'exposition au rayonnement et le courant de sortie. La sensibilité est mesurée au début et à la fin de la période d'irradiation selon l'une des méthodes spécifiées au paragraphe 3.1.

On obtient couramment une caractéristique de fatigue en mesurant la sensibilité relative en fonction du temps écoulé entre le début du fonctionnement et des instants indiqués.

3.14.2 *Champs*

Tous les photomultiplicateurs sont plus ou moins sensibles à la présence de champs magnétiques.

La perte de gain provient de la déviation des électrons de leur trajet normal entre les étages. Les tubes pour comptage par scintillation sont, en général, assez sensibles aux champs magnétiques à cause du trajet relativement long entre la cathode et la première dynode.