

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC**

60462

Première édition
First edition
1974-01

**Méthodes d'essais normalisées des tubes
photomultiplicateurs utilisés dans les
ensembles de comptage à scintillation**

**Standard test procedures for photomultiplier
tubes for scintillation counting**



Numéro de référence
Reference number
CEI/IEC 60462: 1974

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* (IEV).

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**

60462

Première édition
First edition
1974-01

**Méthodes d'essais normalisées des tubes
photomultiplicateurs utilisés dans les
ensembles de comptage à scintillation**

**Standard test procedures for photomultiplier
tubes for scintillation counting**

© IEC 1974 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

R

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

SOMMAIRE

	Pages
PRÉAMBULE	4
PRÉFACE	4
Articles	
1. Domaine d'application	6
2. Objet	6
3. Généralités	6
3.1 Détecteur à scintillation	6
3.2 Détecteur Čerenkov	6
4. Conditions d'essais des photomultiplicateurs	8
5. Caractéristiques du photomultiplicateur	8
5.1 Caractéristiques de l'amplitude de l'impulsion	8
5.2 Caractéristiques des impulsions parasites	18
5.3 Caractéristiques liées au temps et sources de lumière utilisables	20
FIGURES	30-37

CONTENTS

	Page
FOREWORD	5
PREFACE	5
Clause	
1. Scope	7
2. Object	7
3. General	7
3.1 Scintillation detector	7
3.2 Čerenkov detector	7
4. Test conditions for photomultipliers	9
5. Photomultiplier characteristics	9
5.1 Pulse amplitude characteristics	9
5.2 Spurious pulse characteristics	19
5.3 Pulse timing characteristics and applicable light sources	21
FIGURES	30-37

IEC NORM.COM: Click to view the full PDF of IEC 60462:1974

With 2AM

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

**MÉTHODES D'ESSAIS NORMALISÉES
DES TUBES PHOTOMULTIPLICATEURS UTILISÉS DANS LES ENSEMBLES
DE COMPTAGE À SCINTILLATION**

PRÉAMBULE

- 1) Les décisions ou accords officiels de la CEI 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 l'unification internationale, la CEI exprime le vœu que tous les Comités nationaux adoptent dans leurs règles nationales le texte de la recommandation de la CEI, dans la mesure où les conditions nationales le permettent. Toute divergence entre la recommandation de la CEI et la règle nationale correspondante doit, dans la mesure du possible, être indiquée en termes clairs dans cette dernière.

PRÉFACE

La présente recommandation a été établie par le Comité d'Etudes N° 45 de la CEI: Instrumentation nucléaire.

Un premier projet fut préparé lors de la réunion tenue à Bucarest en 1971, puis discuté lors de la réunion tenue à Londres en 1972. A la suite de cette dernière réunion, un projet, document 45(Bureau Central)71, fut soumis à l'approbation des Comités nationaux suivant la Règle des Six Mois en janvier 1973.

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

Afrique du Sud (République d')	Pays-Bas
Australie	Pologne
Belgique	Royaume-Uni
Danemark	Suède
Etats-Unis d'Amérique	Suisse
Finlande	Tchécoslovaquie
France	Turquie
Israël	Union des Républiques
Italie	Socialistes Soviétiques
Japon	Yougoslavie

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

**STANDARD TEST PROCEDURES
FOR PHOTOMULTIPLIER TUBES FOR SCINTILLATION COUNTING**

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 international unification, the IEC expresses the wish that all National Committees should adopt the text of the IEC recommendation for their national rules in so far as national conditions will permit. Any divergence between the IEC recommendations and the corresponding national rules should, as far as possible, be clearly indicated in the latter.

PREFACE

This recommendation has been prepared by IEC Technical Committee No. 45, Nuclear Instrumentation.

A first draft was prepared at the meeting held in Bucharest in 1971, then discussed at the meeting held in London in 1972. As a result of this latter meeting, a draft document 45(Central Office)71, was submitted to the National Committees for approval under the Six Months' Rule in January 1973.

The following countries voted explicitly in favour of publication:

Australia	Poland
Belgium	South Africa (Republic of)
Czechoslovakia	Sweden
Denmark	Switzerland
Finland	Turkey
France	Union of Soviet
Israel	Socialist Republics
Italy	United Kingdom
Netherlands	United States of America
Japan	Yugoslavia

MÉTHODES D'ESSAIS NORMALISÉES DES TUBES PHOTOMULTIPLICATEURS UTILISÉS DANS LES ENSEMBLES DE COMPTAGE À SCINTILLATION

1. Domaine d'application

La présente recommandation s'applique aux photomultiplicateurs utilisés avec les détecteurs à scintillation et les détecteurs Čerenkov.

2. Objet

Etablir des méthodes d'essais pour les tubes photomultiplicateurs utilisés avec les détecteurs à scintillation et les détecteurs Čerenkov.

Les photomultiplicateurs sont largement utilisés dans les comptages à scintillation et à détecteur Čerenkov, à la fois pour la détection et l'analyse des rayonnements ionisants et pour d'autres applications. Pour ces utilisations, certaines caractéristiques sont particulièrement importantes et nécessitent des essais supplémentaires à ceux qui sont effectués pour mesurer les caractéristiques générales des photomultiplicateurs. Ceci a rendu souhaitable l'établissement de méthodes d'essais normalisées, afin que les mesures de ces caractéristiques particulières puissent avoir la même signification pour tous les constructeurs et les utilisateurs.

Les essais décrits ci-dessous pour les photomultiplicateurs utilisés dans les détecteurs à scintillation sont des essais complémentaires à ceux décrits dans la Publication 306 de la CEI: Mesures des dispositifs photosensibles, qui traite des caractéristiques fondamentales et des prescriptions habituelles exigées des photomultiplicateurs.

La présente recommandation n'implique pas l'obligation d'effectuer tous les essais décrits pour chaque application, mais implique seulement que si de tels essais sont effectués sur des photomultiplicateurs utilisés avec détecteur à scintillation ou Čerenkov, ils devront être exécutés conformément aux méthodes décrites dans la présente recommandation.

3. Généralités

Le photomultiplicateur (PM) est un élément essentiel des détecteurs à scintillation et Čerenkov. Ses applications comportent des exigences spéciales en ce qui concerne les caractéristiques de l'amplitude de l'impulsion, les impulsions parasites et les caractéristiques liées au temps.

3.1 Détecteur à scintillation

Le détecteur à scintillation est un détecteur de rayonnements qui comporte trois éléments essentiels: un milieu scintillant qui réagit à un rayonnement ionisant par un éclair lumineux; un ou plusieurs photomultiplicateurs couplés optiquement au milieu scintillant, qui convertissent l'éclair lumineux en impulsion électrique amplifiée, et un appareillage électronique associé qui alimente le photomultiplicateur et traite le signal de sortie.

3.2 Détecteur Čerenkov

Le détecteur Čerenkov est un détecteur de rayonnements qui comprend trois parties principales: un milieu dans lequel l'effet Čerenkov produit de la lumière; un ou plusieurs photomultiplicateurs couplés optiquement au milieu Čerenkov, et l'appareillage électronique associé qui alimente le photomultiplicateur et traite le signal de sortie.

STANDARD TEST PROCEDURES FOR PHOTOMULTIPLIER TUBES FOR SCINTILLATION COUNTING

1. Scope

This recommendation applies to photomultipliers for scintillation and Čerenkov detectors.

2. Object

To establish test procedures for photomultipliers for scintillation and Čerenkov detectors.

Photomultipliers are extensively used in scintillation and Čerenkov counting, both in the detection and analysis of ionizing radiation and for other applications. For such uses, various characteristics are of particular importance and require tests additional to those conducted to measure the general characteristics of photomultipliers. This has made desirable the establishment of standard test procedures so that measurements of these specific characteristics may have the same significance to all manufacturers and users.

The tests herein described for photomultipliers to be used in scintillation detectors are supplementary to those tests described in IEC Publication 306, Measurement of Photosensitive Devices, which covers the basic characteristics commonly requiring specification for photomultipliers.

This recommendation is not intended to imply that all tests and procedures described herein are mandatory for every application, but only that such tests as are carried out on photomultipliers for scintillation and Čerenkov detectors should be performed in accordance with the procedures given in this recommendation.

3. General

The photomultiplier tube (PMT) is an essential component of scintillation and Čerenkov detectors. For such detectors there are special requirements with regard to pulse amplitude characteristics, spurious pulses and timing.

3.1 Scintillation detector

A scintillation detector is a radiation detector that consists of three major components: a scintillating medium that produces a flash of light when ionizing radiation interacts with it; one or more photomultipliers, optically coupled to the scintillating medium, which converts the light flash to an amplified electrical impulse, and associated electronic instrumentation which powers the photomultiplier and processes the output signal.

3.2 Čerenkov detector

The Čerenkov detector is a radiation detector which consists of three major parts: a medium in which light is produced by the Čerenkov effect; one or more photomultipliers, optically coupled to the Čerenkov medium, and the associated electronic instrumentation which powers the photomultiplier and processes the output signal.

4. Conditions d'essais des photomultiplicateurs

Les conditions d'essais des photomultiplicateurs sont données sous forme de conditions d'environnement qui doivent être remplies pour permettre d'effectuer des mesures précises des paramètres des photomultiplicateurs exposés dans les articles suivants.

Les alimentations devraient être stabilisées et, en particulier, les alimentations à haute tension devraient avoir des régulations de 0,01% ou mieux, et l'ondulation et le bruit ne devraient pas dépasser quelques millivolts.

L'enceinte d'essai ne doit pas présenter de fuites de lumière décelables. Ceci peut être vérifié pour des périodes d'une demi-heure de comptage des photons, sans et avec une forte lumière ambiante incidente sur l'enceinte.

Le PM devrait être stocké dans l'obscurité pendant plusieurs heures avant les mesures pour éviter les effets de phosphorescence. La propreté du verre du PM et des embases est essentielle pour empêcher les effets de bruit externe. Tout matériau à proximité de la photocathode devrait être au potentiel de la photocathode pour empêcher l'électroluminescence de l'enveloppe et la décomposition chimique du verre par accumulation de charges. Pour obtenir les meilleures conditions de reproductibilité des essais, il est recommandé de placer, si possible, un blindage, connecté au potentiel de la cathode, autour et au contact de l'enveloppe en verre du photomultiplicateur.

Le PM devrait être démagnétisé avant emploi et un écran magnétique devrait être utilisé. Noter que même le champ magnétique terrestre est suffisant pour influencer les mesures. La température du tube devrait de préférence être maintenue constante à $\pm 2^\circ\text{C}$ et se situer entre 19°C et 25°C . Ceci est important dans le cas où le diviseur de tension peut élever la température de l'enceinte d'essai.

Des précautions sont à prendre pour éviter les dérives ou les décalages du zéro dans les équipements électroniques, qui affecteraient la mesure de façon significative.

Pour empêcher les dérives dans les potentiels interdynodes résultant du courant du multiplicateur d'électrons, le courant de repos dû au diviseur de tension devrait être au moins 20 fois le courant continu de l'anode. En variante, les potentiels interdynodes des dynodes qui tirent le maximum de courant peuvent être stabilisés individuellement (comme avec des alimentations séparées).

Des condensateurs à conservation de charge peuvent être utilisés entre dynodes ou des dynodes à la terre si le rapport entre le courant maximal et le courant moyen d'anode est élevé et si les condensateurs peuvent maintenir les dynodes au potentiel voulu pendant la durée de l'impulsion.

Les méthodes de mise en forme des impulsions et les constantes de temps utilisées devraient être choisies pour assurer le fonctionnement optimal et devraient être indiquées.

5. Caractéristiques du photomultiplicateur

En plus des spécifications et des méthodes d'essais de la Publication 306 de la CEI, les spécifications et les essais supplémentaires ou complémentaires pour les photomultiplicateurs utilisés avec les détecteurs Čerenkov et à scintillation en rapport avec les caractéristiques fondamentales concernent:

1. Les caractéristiques de l'amplitude de l'impulsion;
2. Les caractéristiques des impulsions parasites;
3. Les caractéristiques liées au temps.

5.1 Caractéristiques de l'amplitude de l'impulsion

Les paragraphes suivants traitent des caractéristiques des impulsions des photomultiplicateurs utilisés en comptage. Il est supposé que tout le circuit électronique commençant à la sortie de l'anode du photomultiplicateur et comprenant l'analyseur d'amplitude est linéaire et que la droite représentant l'amplitude de l'impulsion de sortie en fonction de l'amplitude de l'impulsion d'entrée passe par l'origine.

5.1.1 Amplitude de l'impulsion

Pour un nombre donné N de photoélectrons émis par la photocathode, on observe à l'anode un nombre $G \times N$ d'électrons. Le facteur G est le gain du multiplicateur, qui dépend des différences de potentiel entre étages appliquées aux électrodes.

4. Test conditions for photomultipliers

Test conditions for photomultipliers are specified in terms of environmental conditions that must be met to enable accurate measurements to be made of the photomultiplier parameters discussed in the following clauses.

Power supplies should be stabilized and, in particular, high-voltage power supplies should have regulations of 0.01% or better, and ripple and noise should be not more than a few millivolts.

The test enclosure shall be free of detectable light leaks. This can be verified by half-hour photon counting periods, with and without bright ambient light incident on the enclosure.

The PMT should be stored in darkness for several hours prior to measurement to avoid phosphorescence effects. Cleanliness of the PMT glass and sockets is essential in preventing external noise effects. Any material near the photocathode should be at photocathode potential to prevent electro-luminescence of the envelope and electrolysis or charge accumulation of the glass. To obtain the best conditions for reproducibility of tests, it is recommended that, where feasible, a shield, connected to cathode potential, be placed around and in contact with the glass envelope of the photomultiplier.

The PMT should be degaussed before using, and a magnetic shield should be employed. Note that even the earth's magnetic field is of sufficient strength to influence measurements. Tube temperature should preferably be maintained constant at $\pm 2^\circ\text{C}$ within the limits 19°C to 25°C . This is important in instances where the voltage divider may raise the temperature of the test enclosure.

Caution should be exercised to avoid drifts or base line shifts in the electronic circuitry that significantly affect the measurements.

To prevent shifts in interdynode potentials resulting from the electron multiplier current, the quiescent current drawn by the resistive voltage divider should be at least 20 times the d.c. anode current. Alternatively, the interdynode potentials for the dynodes drawing the greatest current may be individually stabilized (as with separate power supplies).

Charge-storage capacitors may be effectively used across the dynodes or from the dynodes to ground when the ratio of the peak anode current to the average anode current is large and the capacitor can maintain the required dynode potentials for the duration of the pulse.

Pulse shaping methods and time constants suitable for optimum performance should be used and should be stated.

5. Photomultiplier characteristics

In addition to the specifications and test methods of IEC Publication 306, complementary or extended specifications and tests required for photomultipliers used with scintillation and Čerenkov detectors in connection with these basic characteristics are:

1. Pulse amplitude characteristics;
2. Spurious pulse characteristics;
3. Pulse timing characteristics.

5.1 Pulse amplitude characteristics

The following sub-clauses deal with pulse characteristics of photomultipliers used in counting applications. It is assumed that the entire electronic circuit, beginning with the anode output of the photomultiplier and including the pulse amplitude analyser, is linear and that channel numbers are with respect to the extrapolated pulse amplitude analyser zero.

5.1.1 Pulse amplitude

For a given number N of photoelectrons emitted from the photocathode, a number G times N electrons are observed at the anode. The factor G is the multiplier gain, which depends upon the interstage potential differences applied to the electrodes.

Quand le signal d'entrée est constitué par des paquets de photons suffisamment bien espacés dans le temps, le photomultiplicateur peut le résoudre en événements séparés et le signal de sortie est constitué par des impulsions de charge séparées. Ces impulsions peuvent être amplifiées par un préamplificateur suivi d'un amplificateur principal, et triées par un analyseur d'amplitude. Le terme « amplitude de l'impulsion » est habituellement utilisé pour désigner la charge associée à l'impulsion de sortie d'un PM.

L'amplitude de l'impulsion se mesure avec un préamplificateur et un analyseur d'amplitude. Les taux de comptage et les temps de résolution doivent être tels que l'empilement des impulsions soit suffisamment faible pour ne pas affecter d'une manière importante la précision des mesures. L'ensemble de mesure peut être étalonné en coulombs/canal avec un générateur d'impulsion de précision. La pente et le passage au zéro doivent être définis.

5.1.2 Linéarité de l'amplitude (voir figure 1, page 30)

La linéarité de l'amplitude dans les photomultiplicateurs est d'habitude excellente sur plusieurs ordres de grandeur. Les écarts de linéarité sont dus à deux effets :

1. L'effet de charge d'espace associé aux impulsions de courant élevé; et
2. Le fait que le circuit diviseur à résistance ne peut pas fournir suffisamment de courant pour maintenir les dynodes des photomultiplicateurs et les autres éléments à des potentiels de fonctionnement constant.

Si l'on suppose que l'effet 2 n'apporte pas de limitation (voir conditions d'essais, article 4), les procédures d'essais suivantes indiquent deux méthodes pour déterminer le courant « linéaire » de pic (charge) que l'on peut obtenir du photomultiplicateur (voir figure 1). La première méthode est appelée méthode à deux impulsions et nécessite une source de lumière pulsée et un filtre de densité neutre qui provoque environ 90% d'atténuation. La largeur de l'impulsion ne doit pas excéder 1 μ s et le cycle de fonctionnement ne doit pas dépasser 1%. Les impulsions de sortie sont présentées sur un oscilloscope (ou un analyseur d'amplitude) avec et sans le filtre, et le rapport des amplitudes est noté. Ensuite, l'intensité de la source lumineuse est augmentée. On note le rapport jusqu'à ce qu'il s'écarte de 10% de celui qui a été obtenu à basse intensité. Le courant (charge) du pic associé à la plus grande impulsion est appelé courant (charge) linéaire de pic à la tension de fonctionnement donnée. Noter que cette mesure permet la mesure du courant (charge) linéaire de pic en fonction de la tension du tube.

Une mesure plus simple, mais moins souhaitable, nécessite seulement la source de lumière pulsée et un oscilloscope ou un analyseur. La tension du tube est assez basse au début pour permettre un fonctionnement linéaire. On trace la courbe du logarithme du courant (charge) de pic en fonction du logarithme de la tension d'alimentation. Le courant (charge) de pic pour lequel la courbe s'écarte de 10% d'une ligne droite extrapolée est le courant (charge) linéaire de pic. (Cette mesure ne peut pas être effectuée si l'on emploie des diodes zener dans le diviseur de tension.) Cet essai ne s'applique qu'aux photomultiplicateurs dont le gain montre que la puissance dépend d'une manière simple de la tension appliquée (voir figure 1).

Une autre façon simple et pratique pour essayer la linéarité de tout le système (photomultiplicateur, scintillateur, amplificateur et analyseur d'amplitude) consiste à remarquer que le pic à haute énergie du ^{60}Co a une énergie presque exactement double de celle du pic du ^{137}Cs .

5.1.3 Résolution en amplitude

Pour une composition spectrale constante de la lumière incidente, un photomultiplicateur produit à la sortie une charge proportionnelle au nombre de photons incidents sur la photocathode. Du fait des fluctuations statistiques inhérentes à la conversion photons-photoélectrons et de la nature statistique du phénomène de l'émission secondaire, la charge du signal de sortie varie d'une impulsion à la suivante, même pour des nombres égaux de photons incidents. La distribution des amplitudes d'impulsion qui en résulte limite la résolution en photons du dispositif, et limite donc la résolution en énergie d'une combinaison scintillateur-photomultiplicateur. Pour ce motif, un facteur de mérite appelé « résolution en amplitude » est introduit pour caractériser l'aptitude du dispositif à faire la distinction entre deux amplitudes de signal d'entrée légèrement différentes.

La résolution en amplitude (RA) est le rapport LMH/P de la distribution en amplitude du pic considéré, où LMH est la largeur à mi-hauteur et P l'amplitude correspondant au maximum du pic, comme indiqué dans la figure 2, page 31. On donne habituellement RA en pour-cent. Plusieurs cas de mesures de RA utilisées pour caractériser les photomultiplicateurs sont décrits ci-après.

Il y a en général cinq mesures différentes de RA qui servent à définir la résolution photons-électrons des photomultiplicateurs et des combinaisons photomultiplicateur-scintillateurs. Ces mesures peuvent être utilisées séparément ou simultanément.

When the input signal consists of photon packets sufficiently well spaced in time, the photomultiplier can resolve them as separate events and the output signal consists of separate charge pulses. These pulses can be amplified with a preamplifier, followed by a main amplifier, and sorted with a pulse amplitude analyser. The terms “pulse amplitude” and “pulse height” are commonly used to designate the charge associated with a PMT output pulse.

Pulse amplitude is measured with a preamplifier and a pulse amplitude analyser. The counting rates and resolving times should be such that pulse pile-up is sufficiently low so as not to significantly affect the accuracy of the measurements. The measuring assembly can be calibrated in terms of coulombs/channel with a precision pulser. The slope and zero intercept shall be determined.

5.1.2 Pulse amplitude linearity (see Figure 1, page 30)

Pulse amplitude linearity in photomultipliers is normally excellent over several orders of magnitude. Deviations from linearity are usually due to two effects:

1. Space charge effects associated with high-current pulses; and
2. Resistive divider networks which cannot supply enough current to maintain the photomultiplier dynodes, and other elements, at constant operating potentials.

Assuming that item 2 is not the limitation (see test conditions, Clause 4), the following measurement procedures outline two methods of determining the peak “linear” current (charge) that can be obtained from a photomultiplier (see Figure 1). The first method is called the two-pulse technique, and requires a pulsed-light source and a neutral-density filter that provides about 90% attenuation. The pulse width should not exceed 1 μ s and the duty cycle should not exceed 1%. The output pulses are displayed on an oscilloscope (or pulse amplitude analyser) with and without the filter, and the ratio of the pulse amplitudes is noted. Next, the light source intensity is increased, while noting the ratio, until the ratio deviates from that obtained at the low intensity by 10%. The peak current (charge) associated with the larger pulse is termed peak linear current (charge) at the given operating voltage. Note that this measurement allows peak linear current (charge) measurement as a function of tube voltage.

A simpler, but less desirable, measurement requires only the pulsed-light source and an oscilloscope or pulse amplitude analyser. Tube voltage is initially low enough to ensure linear operation. A plot is made of the logarithm of the peak current (charge) versus the logarithm of the supply voltage. The peak current (charge) at which the curve deviates from an extrapolated straight line by 10% is the peak linear current (charge). (This measurement cannot be performed if zener diodes are employed in the voltage divider.) This test only applies to photomultipliers whose gain exhibits a simple power dependence on the applied voltage (see Figure 1).

Another simple and convenient test for the linearity of the entire system (photomultiplier, scintillator, amplifier and pulse amplitude analyser) may be made by noting that the ^{60}Co high-energy peak is almost exactly twice the energy of the ^{137}Cs peak.

5.1.3 Pulse amplitude resolution

A photomultiplier produces a charge output proportional to the number of photons incident on the photocathode for constant spectral composition of the incident light. Because of the statistical variations inherent in the conversion of photons to photoelectrons, together with the statistical nature of the secondary emission process, the output signal charge varies from one pulse to the next, even for equal numbers of incident photons. The resulting distribution in pulse amplitude limits the photon resolution of the device, and hence limits the energy resolution of a scintillator/photomultiplier combination. For this reason a figure of merit called “pulse amplitude resolution” is introduced to characterize the device’s ability to discriminate between two slightly different input signal amplitudes.

Pulse amplitude resolution (PAR) is the ratio FWHM/P of the pulse amplitude distribution of the peak of interest, where FWHM is the full-width at half-maximum and P is the pulse amplitude corresponding to the maximum of the peak as shown in Figure 2, page 31. It is customary to state PAR in units of per cent. The following discussion outlines several kinds of PAR measurements that are used to characterize photomultipliers.

In general there are five distinct PAR measurements that serve to define the photon-and-electron resolution of photomultipliers and photomultiplier/scintillator combinations. These resolutions may be used separately or together.

a) *RA au ^{137}Cs d'une combinaison scintillateur-tube photomultiplicateur*

Cette RA est principalement fonction du rendement de conversion de la photocathode, du rendement de collection et de l'homogénéité spatiale, tout comme la résolution du scintillateur.

La mesure de la résolution en amplitude au ^{137}Cs nécessite une source de ^{137}Cs , un scintillateur de NaI(Tl) dont le diamètre et la hauteur sont égaux au diamètre de la photocathode, un analyseur d'amplitude et le photomultiplicateur à essayer. Le photomultiplicateur (PM) est couplé optiquement au scintillateur, par exemple à l'aide de graisse au silicone ou d'huile visqueuse. Le boîtier du cristal doit être si possible au potentiel de la photocathode. La source est placée au contact de la fenêtre d'entrée du scintillateur.

Le PM devrait fonctionner à une tension telle qu'une réponse linéaire soit obtenue, c'est-à-dire que la sortie soit proportionnelle à l'intensité d'entrée (voir paragraphe 5.1.2). Une mauvaise polarisation d'anode, un gain excessif (et donc un courant d'anode excessif) ou des circuits diviseurs de tension mal adaptés peuvent produire une compression de la distribution des impulsions de sortie, fournissant une valeur de RA incorrecte (par défaut).

La combinaison PM-scintillateur devrait fonctionner pendant plusieurs heures pour l'obtention de la RA optimale.

Plusieurs heures peuvent être nécessaires pour que la phosphorescence du scintillateur et de la fenêtre du PM décroisse à un niveau suffisamment bas pour que des mesures précises soient possibles. Par conséquent, les photomultiplicateurs et les scintillateurs ne doivent pas être exposés à la lumière ambiante du laboratoire un certain temps avant les mesures.

L'enceinte d'essai doit être prévue de façon à éviter les champs électriques élevés au voisinage de la photocathode. Si le PM fonctionne avec photocathode à la terre (haute tension positive), les champs électriques externes à la photocathode ne sont pas très gênants. Si on emploie une haute tension négative, les champs électriques à proximité de la photocathode devraient être faibles. Cela peut se faire au moyen d'un écran électrostatique au potentiel de la photocathode. Autrement, un bruit excessif dans le signal de sortie, des effets d'électrolyse, suivis par une perte éventuelle de la photosensibilité, peuvent se développer. Comme pour les autres mesures de PM, un écran magnétique est nécessaire.

La distribution du ^{137}Cs doit apparaître sur un analyseur d'amplitude et être positionnée de telle sorte que la moitié supérieure du pic d'absorption totale couvre au moins huit canaux. Le taux de comptage total ne doit pas dépasser 1 000 coups par seconde et les constantes de temps d'intégration et de différentiation ne doivent pas dépasser 5 μs . Les canaux à l'intérieur de la LMH doivent contenir au moins 50 000 coups.

La valeur de RA en pour-cent s'obtient à partir de $RA = 100 (H - L)/PIC$ où H et L sont les numéros des canaux supérieur et inférieur correspondant aux points à mi-hauteur du spectre et PIC est le numéro du canal correspondant au pic de la distribution. Une interpolation linéaire doit être faite pour déterminer les valeurs de H et L. D'autres méthodes de définition du tracé peuvent être utilisées. La méthode employée doit être décrite.

Lorsque l'analyseur d'impulsion est utilisé avec un ordinateur, une méthode différente peut être employée pour déterminer la LMH en assimilant la partie supérieure du pic d'absorption totale à une distribution gaussienne. Bien que la distribution observée soit d'habitude légèrement biaisée et ne soit pas vraiment gaussienne, les valeurs de RA déterminées en supposant la distribution gaussienne sont en général en accord avec les valeurs de RA obtenues par la méthode précédente.

b) *RA pour une source de lumière (résolution intrinsèque du PM)*

Cette RA est obtenue avec une source de lumière convenable telle qu'une diode électroluminescente (DEL) calibrée pour fournir un signal équivalent à celui de la combinaison ^{137}Cs -Iodure de sodium (ou un nombre déterminé de photoélectrons par impulsion) — (voir figure 2, page 31). La RA pour une source de lumière est considérablement plus petite que la RA scintillateur-PM en raison de l'absence de contribution du scintillateur.

Pour une source de lumière, la résolution en amplitude devrait être indiquée en éclair équivalent au ^{137}Cs ; la source de lumière devrait être réglée en intensité d'éclair jusqu'à ce que la distribution en amplitude qui en résulte présente un pic situé dans le même canal que pour une combinaison cristal NaI(Tl) source ^{137}Cs . La source de lumière doit être placée de telle sorte qu'elle illumine la photocathode uniformément. La RA peut être calculée à partir de la méthode exposée précédemment (voir figure 2). Le temps d'intégration des circuits électroniques doit être très supérieur à la durée de l'éclair lumineux et à la constante de temps du scintillateur.

Cette mesure du RA peut être vérifiée indépendamment avec une autre source de lumière étalonnée et une bonne concordance devrait être obtenue. Ce genre de mesure indépendante n'est pas aussi probant lorsqu'on emploie des scintillateurs au NaI(Tl) à cause des variations de résolution entre les différents scintillateurs. La RA obtenue

a) ¹³⁷Cs PAR for a scintillator/photomultiplier-tube combination

This PAR is principally a function of the photocathode quantum efficiency, collection efficiency and spatial uniformity, as well as the resolution of the scintillator.

Measurement of ¹³⁷Cs pulse amplitude resolution requires a ¹³⁷Cs source, a NaI(Tl) scintillator of approximately the same diameter and height as the photocathode, a pulse amplitude analyser and the photomultiplier to be tested. The photomultiplier tube (PMT) is optically coupled to the scintillator—for example, with the aid of silicone grease or viscous oil. The crystal housing should be at photocathode potential. The source is placed in contact with the scintillator entrance window.

The PMT should be operated at a voltage such that linear response is obtained, i.e. output is proportional to input intensity (see Sub-clause 5.1.2). Improper anode bias, excessive gain (and thus excessive anode current) or improper voltage divider circuits may give rise to a compression of the output pulse distribution, yielding an incorrect (low) value of PAR.

The tube/scintillator combination should operate for several hours to obtain optimum PAR.

Phosphorescence of the scintillator and the PMT window may require several hours to decay to a low enough level to permit accurate measurements to be made. Therefore, photomultipliers and scintillators should not be exposed to ambient laboratory light for some time before measurements are made.

The test enclosure shall be designed to avoid high electric fields in the region of the photocathode. If the PMT is operated at photocathode ground (positive high voltage) there is little problem with external electric fields at the photocathode. If negative high voltage is used, electric fields near the photocathode should be low. This may be accomplished by an electrostatic shield at photocathode potential. Otherwise, excessive noise on the output signal, and electrolysis, followed by eventual loss of photosensitivity, may develop. As with other PMT measurements, a magnetic shield is required.

The ¹³⁷Cs distribution should be displayed on a pulse amplitude analyser and so positioned that the upper half of the full-energy peak distribution spans at least eight channels. The total counting rate should not exceed 1 000 counts per second and the integration and differentiation time constants should not exceed 5 μ s. At least, 50 000 counts must be contained within the channels comprising the FWHM.

The PAR in per cent is obtained from $PAR = 100 (H - L)/PEAK$ where H and L are the upper and lower channel numbers corresponding to the half-amplitude points of the distribution and PEAK is the channel number corresponding to the peak of the distribution. A linear interpolation should be made to determine the values of H and L. Alternatively, other curve-fitting techniques may be used. The method employed should be described.

In the case of a computer-controlled pulse amplitude analyser, a different method can be employed to determine the FWHM by assuming that the upper-part of the full energy peak approximates a Gaussian distribution. While the observed distribution is usually slightly skewed and not truly Gaussian, PAR values determined on the basis of a Gaussian distribution will, in general, agree with PAR values obtained from the former method.

b) Light emitting source PAR (intrinsic photomultiplier resolution)

This PAR is obtained with a suitable light emitting source such as a light emitting diode (LED), calibrated to provide a ¹³⁷Cs-sodium iodide-equivalent signal (or stated number of photoelectrons per pulse) (see Figure 2, page 31). The light emitting source PAR is considerably smaller than the scintillator/PMT PAR because the contribution of the scintillator is not present.

For a light emitting source, the pulse amplitude resolution should be stated in terms of a ¹³⁷Cs-equivalent flash; the light emitting source should be adjusted in flash intensity until the resulting pulse height distribution exhibits a peak in the same channel as a NaI(Tl) scintillator and ¹³⁷Cs source combination. The light emitting source shall be positioned such that it uniformly illuminates the photocathode. PAR may be calculated from the previously discussed method (see Figure 2). The integration time of the electronic circuits shall be much more than the duration of the light flash and the time constant of the scintillator.

This measurement of PAR may be independently verified with another calibrated light emitting source, and good agreement should be obtained. This type of independent measurement is not as straightforward when NaI(Tl) scintillators are used owing to variations in resolution between different scintillators. The PAR obtained with a

avec une source de lumière équivalente au ^{137}Cs peut être employée comme guide pour estimer la RA que l'on pourrait obtenir avec un scintillateur au NaI(Tl) . Cependant, étant donné que l'éclair de la source de lumière ne simule pas la distribution spatiale de la lumière obtenue avec un scintillateur au NaI(Tl) et ne tient pas compte de la résolution inhérente au scintillateur, cette méthode ne peut fournir qu'une limite approximative de la résolution au ^{137}Cs que l'on peut escompter.

c) *RA au ^{55}Fe d'une combinaison scintillateur/PM*

C'est la RA obtenue en utilisant une combinaison scintillateur/PM avec une source de ^{55}Fe . Elle dépend à la fois du scintillateur et du photomultiplicateur.

La résolution en amplitude pour une source de ^{55}Fe (rayons X de 5,9 keV), en employant un scintillateur au NaI(Tl) couplé au photomultiplicateur fournit, un facteur de mérite pour la résolution des événements de basse énergie. Les mesures sont conduites comme expliqué à propos de la RA au ^{137}Cs . L'effet de la résolution du scintillateur est plus important dans la mesure de RA au ^{55}Fe que dans la mesure du RA au ^{137}Cs . La source de ^{55}Fe est placée au contact de la fenêtre d'entrée du scintillateur.

La distribution pour le ^{55}Fe est déformée, et une distribution gaussienne ne décrit pas d'une façon adéquate la distribution observée. A cause de cela, les mesures de la résolution basées sur l'hypothèse d'une distribution gaussienne ne sont pas satisfaisantes.

d) *RA pour électrons uniques (RA-EU)*

La RA du spectre d'électrons uniques (RA-EU) n'a de sens que pour les photomultiplicateurs qui peuvent résoudre un pic d'électrons uniques. Une faible lumière continue sert de source d'électrons uniques pour la photocathode. (Noter qu'on ne mesure ainsi que la résolution de la partie multiplicateur d'électrons du photomultiplicateur.)

La résolution pour électrons uniques, ou RA-électrons uniques (RA-EU) est le rapport LMH/amplitude de la distribution en électrons uniques fournie par le photomultiplicateur. Il faut noter que cette mesure ne s'applique qu'aux photomultiplicateurs qui fournissent une distribution en électrons uniques avec un pic. (La plupart des photomultiplicateurs à persiennes sont incapables de résoudre des événements à électron unique même si leurs RA pour ^{55}Fe et ^{137}Cs peuvent être comparables à celle des multiplicateurs d'électrons du type à focalisation.)

Le pic d'électrons uniques est affiché sur l'analyseur multicanal pendant qu'une lumière « continue » illumine la photocathode. Les impulsions d'obscurité du tube peuvent en majorité avoir un électron unique pour origine, et peuvent être utilisées pour obtenir une distribution en électrons uniques; cependant une lumière « continue » est nécessaire pour vérifier la position du vrai pic d'électrons uniques sur l'écran de l'analyseur.

La RA pour électrons uniques peut être calculée à partir de:

$$\text{RA-EU (\%)} = 100 (H - L)/\text{PIC}$$

où H et L sont les numéros des canaux correspondant aux points à mi-hauteur et PIC est le numéro du canal correspondant au pic. On utilisera l'interpolation linéaire pour situer H et L.

Certains photomultiplicateurs sont capables de résoudre un pic d'électrons uniques, mais la distribution obtenue ne peut pas retomber à la moitié de l'amplitude du côté des énergies basses à cause du bruit. Dans ce cas, la grandeur L de la formule ci-dessus est indéfinie et le calcul de RA au moyen de la méthode ci-dessus est impossible. On peut indiquer un rapport largeur/amplitude pour une autre fraction de l'amplitude dans la distribution (par exemple 75%) mais il faudrait bien préciser que cette valeur n'est pas la RA, qui est définie par rapport à la LMH.

Les multiplicateurs d'électrons des photomultiplicateurs sont parfois utilisés en mode saturé dans les expériences de comptage. Des distributions en électrons uniques en mode saturé peuvent être caractérisées par un rapport LMH/amplitude, mais la valeur associée ne devrait pas être appelée RA, et on devrait préciser en indiquant cette valeur que la mesure s'applique à un fonctionnement non linéaire (saturé)

e) *Résolution pour électrons multiples (voir figure 3, page 32)*

La résolution pour électrons multiples est une mesure de l'aptitude de la partie multiplicateur d'électrons à résoudre des signaux d'entrée consistant en un ou deux électrons. Cette mesure ne s'applique qu'aux photomultiplicateurs pouvant résoudre des événements à un ou deux électrons. En variante à la mesure de la LMH du pic d'électrons, on peut mesurer le rapport pic-vallée V_1/P_1 .

La résolution pour électrons multiples (voir figure 3) est possible dans certains photomultiplicateurs. Un spectre d'électrons multiples peut être affiché sur l'analyseur d'impulsion à l'aide d'une source de lumière pulsée. La porte de l'analyseur d'impulsion ne doit être ouverte que lorsque l'impulsion de sortie du multiplicateur est attendue.

^{137}Cs -equivalent light emitting source may be used as a guide for estimating the PAR that could be obtained with a NaI(Tl) scintillator. However, since the light emitting source flash does not simulate the spatial distribution of light that is obtained with a NaI(Tl) scintillator and does not take into account the inherent scintillator resolution, this method can only provide an approximate limit to the ^{137}Cs resolution that can be expected.

c) ^{55}Fe PAR for a scintillator/PMT combination

This is the PAR obtained using a scintillator/PMT combination with a ^{55}Fe source, and depends on both the scintillator and the photomultiplier.

Pulse amplitude resolution for a ^{55}Fe (5.9 keV X-ray) source, using a NaI(Tl) scintillator coupled to the photomultiplier, provides a figure of merit for resolution of low-energy events. Measurements are made as outlined in the discussion on ^{137}Cs PAR. The effect of scintillator resolution is more pronounced in the ^{55}Fe PAR measurement than in the ^{137}Cs PAR measurement. The ^{55}Fe source is placed in contact with the scintillator entrance window.

The ^{55}Fe distribution is skewed, and a Gaussian distribution does not adequately describe the observed distribution. For this reason, resolution measurements based on assumptions of Gaussian distributions are not satisfactory.

d) Single-electron PAR (SEPAR)

The PAR of the single-electron spectrum (SEPAR) has significance only for those photomultipliers that can resolve a single electron peak. A weak d.c. light is used as the source of single-electrons for the photocathode. (Note that this measures only the resolution of the electron multiplier section of the photomultiplier.)

Single-electron resolution, or single-electron PAR (SEPAR), is the fractional FWHM of the single-electron distribution obtained from the photomultiplier. Note that this measurement applies only to those photomultipliers that exhibit a peaked single-electron distribution. (Most venetian blind photomultipliers are unable to resolve single-electron events even though their ^{55}Fe and ^{137}Cs PAR may be comparable to focused-type electron multipliers.)

The single-electron peak is displayed on the pulse amplitude analyser system while d.c. (continuous) light illuminates the photocathode. The tube dark pulses may be predominantly single-electron in origin, and may be used to obtain a single-electron distribution; however, the d.c. (continuous) light is required to verify the placement of the true single-electron peak on the analyser display.

Single-electron PAR may be calculated from:

$$\text{SEPAR} (\%) = 100 (H - L) / \text{PEAK}$$

where H and L are the channel numbers corresponding to the half-amplitude points and PEAK is the peak channel number. Linear interpolation should be used to locate H and L.

Some photomultipliers are able to resolve a single-electron peak, but the resulting distribution may not fall to one-half amplitude on the low energy side due to noise contributions. In such cases, the quantity L in the above formula is undefined and calculation of PAR by means of the above method is impossible. A statement of fractional width at some other amplitude in the distribution (75%, for instance) could be made, but it should be stressed that this figure is not PAR, which is defined in terms of the fractional FWHM.

Electron multiplier sections of photomultipliers are sometimes operated in a saturating mode in counting experiments. Single-electron distributions for saturated-mode operation may be characterized by a fractional FWHM, but the associated value should not be termed PAR, and a statement should accompany the value to indicate that the measurement applies to non-linear (saturated) operation.

e) Multiple-electron resolution (see Figure 3, page 32)

Multiple-electron resolution is a measure of the ability of the electron multiplier section of the device to resolve inputs consisting of either one or two electrons. The measurement applies only to those photomultipliers that can resolve one and two electron events. As an alternative to measuring the FWHM of the electron peak, the peak-to-valley ratio V_1/P_1 can be measured.

Multiple-electron resolution (see Figure 3) is possible in certain photomultipliers. A multiple-electron display on the pulse amplitude analyser can be obtained with a pulsed-light emitting source. The pulse amplitude analyser should be gated on only during the time interval during which the multiplier output pulse is expected.

On peut faire varier l'intensité des éclairs de la source de lumière pendant que l'on observe la formation du spectre sur l'écran de l'analyseur d'impulsion. Les pics correspondant à un seul, à deux, ou à davantage d'électrons peuvent être affichés avec n'importe quelle amplitude l'un par rapport à l'autre en faisant varier l'intensité de l'éclair de la source de lumière.

Une autre méthode de mesure de la RA du pic correspondant au second, troisième, $n^{\text{ième}}$ électron consiste à mesurer le rapport pic/vallée de deux pics contigus d'égale amplitude. On peut ainsi indiquer le rapport pic/vallée pour la vallée un à deux et pour la vallée deux à trois. Cette mesure est plus simple à faire que le calcul RA et elle caractérise d'une façon convenable la résolution pour électrons multiples.

5.1.4 Mesures de la stabilité de l'amplitude

Dans le comptage à scintillation, il est particulièrement important que le photomultiplicateur possède une très bonne stabilité en amplitude, surtout lorsqu'il s'agit de distinguer des pics d'absorption totale produits par des désintégrations nucléaires d'énergie très voisine. La stabilité de l'amplitude est caractérisée par les paramètres ci-dessous qui peuvent être utilisés séparément ou ensemble. Pour les essais 5.1.4 e) (dérive avec la température) et 5.1.4 e) (dérive avec le champ magnétique), des mesures du courant moyen conformes à la Publication 306 de la CEI peuvent être utilisées sous réserve que le fabricant prouve leur équivalence avec les mesures de l'amplitude décrites ci-dessous. Les précautions pour éviter les dérives ou les décalages du zéro dans les équipements électroniques (voir article 4) sont particulièrement importantes pour ces mesures.

a) Déviation moyenne de l'amplitude à taux de comptage constant

Pour mesurer l'amplitude, on utilise un analyseur d'impulsion, une source de ^{137}Cs et un scintillateur au NaI(Tl). On place la source de ^{137}Cs le long de l'axe principal du tube et du scintillateur de façon à obtenir un taux de comptage d'environ 1 000 coups par seconde. On laisse se stabiliser tout le système dans les conditions de fonctionnement entre une demi-heure et une heure avant d'enregistrer les lectures. Après cette période de stabilisation, les amplitudes (position du pic d'absorption totale) sont enregistrées toutes les heures pendant 16 h.

La déviation moyenne de l'amplitude en pour-cent est alors donnée par :

$$\text{déviation moyenne de l'amplitude de l'impulsion} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} |p - p_i|}{n} \cdot \frac{100}{p}$$

où p est l'amplitude moyenne sur n lectures, p_i l'amplitude à la lecture i , et n est le nombre total de lectures. Les valeurs de la déviation moyenne de l'amplitude pour des multiplicateurs à dynodes à haute stabilité sont généralement inférieures à 1% lorsqu'on les mesure dans les conditions spécifiées ci-dessus.

b) Déviation maximale de l'amplitude à taux de comptage constant

Des mesures de l'amplitude sont effectuées comme décrit ci-dessus pour la déviation moyenne de l'amplitude, mais les mesures sont relevées d'une façon continue sur une période de 24 h et la déviation maximale de l'amplitude en pour-cent est alors donnée par :

$$\text{déviation maximale de l'amplitude} = \frac{P_{\max} - P_{\min}}{P_{\max} + P_{\min}} \cdot 100$$

où $P_{\max}$ et $P_{\min}$ sont les amplitudes maximale et minimale, respectivement, enregistrées pendant la période d'essai de 24 h.

c) Taux de dérive de l'amplitude à taux de comptage constant

On effectue des mesures d'amplitude comme décrit ci-dessus pour la déviation moyenne de l'amplitude et on trace l'amplitude relative en fonction du temps. Cette courbe est alors différenciée pour obtenir la courbe du taux de dérive en fonction du temps.

d) Dérive de l'amplitude en fonction du taux de comptage

On utilise un analyseur d'amplitude, une source de ^{137}Cs et un scintillateur au NaI(Tl) pour mesurer l'amplitude. La source de ^{137}Cs est placée le long de l'axe principal du tube et du scintillateur de façon à obtenir environ 10 000 coups par seconde. On laisse se stabiliser tout le système dans les conditions de fonctionnement entre une demi-heure et une heure avant d'enregistrer les lectures. L'amplitude (position du pic d'absorption totale) est alors déterminée. On réduit alors le taux de comptage à environ 1 000 coups par seconde en augmentant la

The intensity of the light emitting source flashes can be varied while observing the distribution accumulating on the pulse amplitude analyser display. The single, double and other electron peaks may be built up to any relative height with respect to each other by varying the light emitting source flash intensity.

An alternative to measuring the PAR of the 2nd, 3rd, n th electron peak is to measure the peak-to-valley ratio of adjacent peaks of equal amplitudes. Thus the peak-to-valley ratio could be stated for the one-to-two valley and the two-to-three valley. This measurement is simpler to perform than a calculation of PAR and adequately characterizes multiple-electron resolution.

5.1.4 Pulse amplitude stability measurements

In scintillation counting it is particularly important that the photomultiplier has very good pulse amplitude stability, especially when total absorption peaks produced by nuclear disintegrations of nearly equal energy are being distinguished. The pulse amplitude stability is characterized by the parameters listed below, which may be used separately or together. In production tests for 5.1.4 e) (temperature shift) and 5.1.4 f) (magnetic field shift), average current measurements, as described in IEC Publication 306, may be used provided the manufacturer establishes their equivalence with the pulse amplitude measurements described below. The caution regarding drifts or base line shift in the electronic circuitry (see Clause 4) is particularly important for these measurements.

a) Mean pulse amplitude deviation at constant counting rate

A pulse amplitude analyser, a ^{137}Cs source and a NaI(Tl) scintillator are employed to measure the pulse amplitude. The ^{137}Cs source is located along the major axis of the tube and scintillator such that a counting rate of about 1 000 total counts per second is obtained. The entire system is allowed to stabilize under operating conditions for a period of one-half to one hour before readings are recorded. Following this period of stabilization, the pulse amplitude (position of the total absorption peak) is recorded at one-hour intervals for a period of 16 h.

The mean pulse amplitude deviation in per cent is then calculated as follows:

$$\text{mean pulse amplitude deviation} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} |p - p_i|}{n} \cdot \frac{100}{p}$$

where p is the mean pulse amplitude averaged over n readings, p_i is the pulse amplitude at the i th reading, and n is the total number of readings. Typical maximum mean pulse amplitude deviation values for photomultipliers with high-stability dynodes are usually less than 1% when measured under the conditions specified above.

b) Maximum pulse amplitude deviation at constant counting rate

Pulse amplitude measurements are made as described above for mean pulse amplitude deviation except that the measurements are taken continuously over a 24-hour period and the maximum pulse amplitude deviation in per cent is then calculated as follows:

$$\text{maximum pulse amplitude deviation} = \frac{P_{\max} - P_{\min}}{P_{\max} + P_{\min}} \cdot 100$$

where $P_{\max}$ and $P_{\min}$ are the maximum and minimum pulse amplitudes, respectively, recorded during the 24-hour test interval.

c) Pulse amplitude drift rate at constant counting rate

Pulse amplitude measurements are made as described above for mean pulse amplitude deviation and the relative pulse amplitude plotted as a function of time. This curve is then differentiated to produce a curve of drift rate versus time.

d) Pulse amplitude shift with counting rate

A pulse amplitude analyser, a ^{137}Cs source and a NaI(Tl) scintillator are employed to measure the pulse amplitude. The ^{137}Cs source is located along the major axis of the tube and scintillator such that a counting rate of about 10 000 total counts per second is obtained. The entire system is allowed to stabilize under operating conditions for a period of one-half to one hour before readings are recorded. The pulse amplitude (position of the total absorption peak) is then determined. The counting rate is then decreased to about 1 000 total counts per

distance source-scintillateur. L'amplitude est mesurée et comparée avec la mesure faite au taux de comptage de 10 000 coups par seconde. On exprime la dérive de l'amplitude en fonction du taux de comptage en indiquant le pourcentage de la dérive d'amplitude (plus ou moins) pour la variation des taux de comptage. Exemple: dérive d'amplitude de $-1,0\%$ (10 000 à 1 000 cps). Pour les photomultiplicateurs prévus pour avoir une bonne stabilité d'amplitude, on peut escompter une dérive d'amplitude inférieure à 1% lorsqu'on la mesure de cette façon. Il est particulièrement important dans cet essai d'éviter les dérives du zéro. Le gain du tube photomultiplicateur auquel les mesures seront faites devra être indiqué.

e) *Dérive de l'amplitude en fonction de la température*

On utilise un analyseur d'amplitude et une source de lumière maintenue à température constante, par exemple une diode électroluminescente ou une source radioactive avec scintillateur, pour mesurer l'amplitude des impulsions provenant du photomultiplicateur. L'essai est effectué à taux de comptage choisi entre 1 000 et 10 000 coups par seconde avec une amplitude d'impulsion au moins 10 fois plus grande que celle qui provient d'un électron unique. On laisse se stabiliser la température du photomultiplicateur à un certain nombre de valeurs différentes couvrant le domaine considéré, et les amplitudes correspondantes sont relevées. La dérive de l'amplitude est définie à partir de l'amplitude à 20°C . On l'exprimera en pourcentage d'après l'équation suivante et on fera la courbe en fonction de la température:

$$\text{dérive de l'amplitude (en \%)} = \frac{\text{amplitude à température } T - \text{amplitude à } 20^\circ\text{C}}{\text{amplitude à } 20^\circ\text{C}} \times 100$$

Il faut prendre soin d'éviter les effets d'empilement résultant d'une émission thermo-ionique excessive à température élevée.

f) *Dérive de l'amplitude en fonction du champ magnétique*

On utilise un analyseur d'amplitude et une source de lumière, par exemple une diode électroluminescente ou une source radioactive avec scintillateur, pour mesurer l'amplitude des impulsions provenant du photomultiplicateur situé dans un champ magnétique qu'on peut faire varier.

On donne à ce champ des valeurs appropriées pour l'application prévue, et les variations de l'amplitude sont relevées et exprimées en fonction de l'intensité du champ magnétique. Les essais doivent être effectués dans trois plans perpendiculaires entre eux.

5.2 *Caractéristiques des impulsions parasites*

Les PM présentent diverses caractéristiques d'impulsion parasite. Trois exemples importants sont les impulsions d'obscurité, les impulsions satellites et les scintillations prenant leur origine dans le tube. La température à laquelle les mesures suivantes seront faites devra être indiquée.

5.2.1 *Impulsions d'obscurité*

Les impulsions d'obscurité sont les impulsions que l'on observe à la sortie du photomultiplicateur lorsqu'il fonctionne dans l'obscurité totale et en l'absence de rayonnement ionisant externe. Les impulsions d'obscurité consistent essentiellement en événements à électron unique. Le taux des impulsions d'obscurité et leur distribution en amplitude dépendent du type du dispositif et de son histoire, c'est-à-dire du type de la photocathode et du temps écoulé depuis la dernière exposition à un rayonnement infrarouge ou de longueur d'onde plus courte.

5.2.2 *Impulsions satellites*

Les impulsions satellites sont des impulsions parasites de sortie corrélées en temps avec l'impulsion d'entrée. Les impulsions satellites sont généralement d'amplitude moindre que l'impulsion qui les provoque (signal) et elles se produisent à des intervalles presque constants après l'impulsion qui les provoque. L'importance des impulsions satellites dépend du type du dispositif et de son histoire.

5.2.3 *Scintillations prenant leur origine dans le tube*

Les scintillations prenant leur origine dans le tube sont des impulsions parasites causées par des éclairs lumineux prenant naissance dans la structure du PM, essentiellement dans l'optique d'entrée. Elles sont d'habitude produites par interaction entre des centres de luminescence à l'intérieur du verre et un rayonnement d'énergie suffisant pour produire une scintillation. Le rayonnement peut être dû à l'activité résiduelle du verre lui-même, ou à des sources extérieures, ou au rayonnement ionisant naturel. Les événements dus aux rayons cosmiques sont des exemples fréquents de scintillation provoquée par des effets externes. La lumière Čerenkov est une autre cause pour ces scintillations.

second by increasing the source to scintillator distance. The pulse amplitude is measured and compared with the measurement made at the counting rate of 10 000 total counts per second. The pulse amplitude shift with counting rate is expressed as the percentage pulse amplitude shift (plus or minus indicated) for the counting rate change. Example: pulse amplitude shift of — 1.0% (10 000 to 1 000 cps). Photomultipliers designed for good pulse amplitude stability may be expected to have a value of not greater than 1% pulse amplitude shift as measured in this manner. Avoidance of base line shifts in the electronic circuitry is particularly important for this test. The photomultiplier tube gain at which the measurements are made shall be stated.

e) Pulse amplitude shift with temperature

A pulse amplitude analyser and a light emitting source held at constant temperature such as a light emitting diode (LED) or a radioactive source with scintillator are employed to measure the pulse amplitude from the photomultiplier. A constant counting rate of between 1 000 and 10 000 counts per second is used, with the pulse amplitude at least 10 times greater than that resulting from a single electron. The temperature of the photomultiplier is permitted to stabilize at a number of different values covering the range of interest and the corresponding pulse amplitudes noted. The pulse amplitude shift is the variation from the pulse amplitude at 20 °C. It shall be expressed as a percentage in accordance with the following equation and plotted as a function of temperature:

$$\text{pulse amplitude shift (in \%)} = \frac{\text{pulse amplitude at temperature T} - \text{pulse amplitude at } 20^{\circ}\text{C}}{\text{pulse amplitude at } 20^{\circ}\text{C}} \times 100$$

Care must be taken to avoid pulse pile-up effects resulting from excessive thermionic emission at elevated temperatures.

f) Pulse amplitude shift with magnetic field

A pulse amplitude analyser and a light emitting source such as a light emitting diode (LED) or a radioactive source with scintillator are employed to measure the pulse amplitude from the photomultiplier located in a magnetic field that can be varied.

The magnetic field is varied, as appropriate to the application, and the corresponding variation in pulse amplitude noted and expressed as a function of magnetic field flux density. The tests shall be performed in three mutually perpendicular planes.

5.2 Spurious pulse characteristics

PMTs exhibit a number of spurious pulse characteristics. Three important examples are dark pulses, afterpulses and tube scintillation pulses. The temperature at which the following measurements are made shall be stated.

5.2.1 Dark pulses

Dark pulses are those pulses which are observed at the photomultiplier output when it is operated in total darkness and in the absence of external ionizing radiation. Dark pulses consist principally of single-electron events. The dark pulse rate and distribution in amplitude is dependent upon the device type and operating history, i.e. photocathode type and length of time since the last exposure to radiation of infrared or shorter wavelengths.

5.2.2 Afterpulses

Afterpulses are spurious output pulses that are time-correlated with the signal pulse. Afterpulses are generally of lesser amplitude than the initiating (signal) pulse, and occur at nearly constant intervals after the initiating pulse. The severity of afterpulsing depends upon the device type and the past operating history.

5.2.3 Tube scintillation pulses

Tube scintillation pulses are spurious pulses caused by light flashes that originate in the PMT structure, primarily in the faceplate. They are usually produced by an interaction between luminescent centres within the glass and radiation of sufficient energy to produce a scintillation. The radiation may be due to residual activity in the glass itself, or due to external sources or natural background radiation. Cosmic ray events are a common example of externally induced scintillation pulses. Čerenkov light is another source of these pulses.

5.2.4 Indice énergie-bruit

On fait fonctionner le photomultiplicateur avec sa haute tension normale dans une enceinte blindée étanche à la lumière, le scintillateur et toutes les sources de rayonnements étant enlevés. La température de l'ensemble devra être indiquée. La sortie du photomultiplicateur est raccordée par l'intermédiaire d'un amplificateur d'impulsions à un discriminateur « intégral » dont la sortie est branchée à une échelle de comptage ou à un autre dispositif de comptage. En variante, le discriminateur et l'échelle peuvent être remplacés par un analyseur d'amplitude multi-canal ou un autre appareil permettant d'intégrer les coups au-dessus d'une tension de seuil réglable.

Le seuil du discriminateur D_n est réglé de telle façon que le taux de comptage total dû au bruit au-dessus du seuil de discrimination soit égal à 50 coups par seconde. On fait alors fonctionner le photomultiplicateur avec un scintillateur au NaI(Tl) exposé à une source de rayonnements gamma d'énergie E_γ . Le réglage du discriminateur D_γ correspondant au pic d'absorption total est alors noté. L'indice énergie-bruit E_{ni} est exprimé par :

$$E_{ni} = \frac{D_n}{D_\gamma} \cdot E_\gamma$$

5.3 Caractéristiques liées au temps et sources de lumière utilisables

Ce paragraphe concerne les caractéristiques des impulsions des PM liées au temps et les sources d'impulsions lumineuses de Dirac utilisables. En général, il n'existe pas de source unique qui convienne à toutes les mesures de photomultiplicateurs liées au temps. Les sources de lumière pulsée ne doivent pas présenter une dispersion supérieure à 1% pour l'équivalent en NaI(Tl) de ^{137}Cs . Les sources utilisables sont étudiées ci-dessous dans l'ordre croissant de complexité et de prix.

a) Diodes électroluminescentes (DEL) (voir figure 4, page 33)

Des diodes électroluminescentes (DEL) conviennent comme sources d'impulsions lumineuses de Dirac. Les temps de montée types sont de l'ordre de 500 ps pour des éclairs lumineux correspondant à moins de 100 photons. Les temps de descente sont approximativement égaux aux temps de montée. Noter qu'on ne peut obtenir les temps de montée minimaux qu'avec une impulsion de courant en fonction delta. Le temps de montée associé à une fonction échelon est considérablement supérieur pour toutes les DEL.

L'émission de lumière peut être réglée depuis approximativement 1 photon par impulsion jusqu'à plus de 1×10^5 photons par impulsion. Cependant, le temps de montée commence à augmenter quand l'intensité dépasse quelques centaines de photons par impulsion.

Les générateurs d'impulsions pour DEL peuvent consister en générateurs d'impulsions à interrupteur de mercure comme dans la figure 4, ou en générateurs d'impulsions à transistors fonctionnant en avalanche, utilisant soit des condensateurs soit des lignes pour le stockage de l'énergie. Des taux de répétition de 400 Hz pour un générateur à interrupteur de mercure et de 10 kHz pour les générateurs d'impulsions à transistors fonctionnant en avalanche sont habituels. Un signal de déclenchement peut être prélevé sur l'un ou l'autre type de générateur pour marquer l'instant d'apparition d'un éclair lumineux.

b) Source de lumière à étincelles

La source d'étincelles à relais à contacts mouillés au mercure est utilisée depuis longtemps pour les mesures de photomultiplicateurs liées au temps. Le temps de montée est d'environ 500 ps et le temps de descente un peu supérieur car il est prolongé par une queue à allure exponentielle qui peut persister pendant quelques nanosecondes. Des impulsions multiples se produisent souvent environ 1 μs après l'impulsion primaire; généralement ces impulsions ne gênent pas les mesures. Un interrupteur à mercure et une ligne sont utilisés habituellement pour le générateur d'impulsions et des taux de 400 Hz sont habituels. Une ligne est utilisée habituellement pour la source de courant. Un signal de déclenchement peut être dérivé pour marquer l'instant d'apparition de l'éclair lumineux.

On peut faire varier l'émission de lumière depuis approximativement 1 photon par impulsion jusqu'à plus de 1×10^5 photons par impulsion. La distribution spectrale comprend l'ultraviolet, et l'étincelle apparaît bleuâtre à l'œil. La lumière est utile pour obtenir une photoémission des photocathodes aussi bien que des dynodes. La photoémission par excitation de source à étincelles peut être obtenue avec des dynodes au BeO et au GaP (Cs). Cependant, aux intensités élevées nécessaires pour ces mesures, le temps de montée de la source à étincelles peut augmenter jusqu'à dépasser 1 ns et le temps de descente peut dépasser 10 ns.

Des éclateurs à haute pression de performance équivalente peuvent également convenir.

5.2.4 Noise energy index

The photomultiplier is operated at normal high voltage in a shielded light-tight enclosure with the scintillation crystal and all radiation sources removed. The temperature of the assembly shall be stated. The photomultiplier output is routed via a pulse amplifier to an integral discriminator whose output is applied to a scaler or other counting device. Alternatively, the discriminator and scaler may be replaced by a multichannel pulse amplitude analyser or other equipment that permits integration of the counts above a selectable threshold voltage.

The discriminator threshold D_n is adjusted such that the integral noise counting rate above the discriminator threshold is 50 counts per second. The photomultiplier is then operated with a NaI(Tl) scintillation crystal that is exposed to a source of gamma rays of energy E_γ . The discriminator setting D_γ corresponding to the peak of the total absorption curve is then noted. The noise energy index E_{ni} is expressed as:

$$E_{ni} = \frac{D_n}{D_\gamma} \cdot E_\gamma$$

5.3 Pulse timing characteristics and applicable light sources

This sub-clause is concerned with measurement of photomultiplier pulse timing characteristics and applicable "delta-function" light sources. In general, no single source is suitable for all photomultiplier time measurements. Pulsed-light sources shall have a dispersion not greater than 1% for a ^{137}Cs equivalent of NaI(Tl). Applicable sources are discussed below in order of increasing complexity and cost.

a) Light emitting diodes (LED) (see Figure 4, page 33)

The light emitting diode (LED) is a convenient delta-function light source. Typical rise times are of the order of 500 ps for light flashes corresponding to less than 100 photons. The fall times are approximately equal to the rise times. Note that minimum rise times can only be obtained with a delta-function current pulse. The rise time associated with a step function is considerably greater for all LEDs.

The light output can be varied from approximately 1 photon per pulse to over 1×10^5 photons per pulse. However, rise time begins to increase when the intensity exceeds a few hundred photons per pulse.

Pulse generators for LEDs may consist of mercury-switch pulsers as shown in Figure 4, or avalanche transistor pulsers using either capacitors or charge lines for energy storage. Repetition rates of 400 Hz for a mercury-switch pulser and 10 kHz for avalanche transistor pulsers are typical. A trigger signal may be derived from either type of pulser to mark the occurrence of a light flash.

b) Spark light sources

The mercury wetted relay spark source has long been used for photomultiplier time measurements. The rise time is about 500 ps, and the fall time is somewhat greater, being lengthened by an exponential-like tail that may persist for a few nanoseconds. Multiple pulses are often generated approximately 1 μs after the primary pulse; these pulses usually do not interfere with measurements. A mercury switch with a charge line is commonly used for the pulse generator, and rates of 400 Hz are typical. A charge line is commonly used for the current source. A trigger signal may be derived to mark the occurrence of the light flash.

The light output can be varied from approximately 1 photon per pulse to over 1×10^5 photons per pulse. The spectral distribution includes the ultraviolet, and the spark appears bluish to the eye. The light is useful in obtaining photoemission from photocathodes as well as dynodes. Photoemission by spark source excitation can be obtained from BeO and GaP (Cs) dynodes. However, at the higher intensities needed for these measurements, the spark source rise time may increase to over 1 ns, and the fall time may exceed 10 ns.

High-pressure spark-gap devices of equivalent performance are also suitable.

c) *Source Čerenkov*

La source de lumière Čerenkov utilise des particules relativistes émises par une petite source de rayonnements nucléaires qui créent de la lumière Čerenkov dans un milieu à indice de réfraction élevé. Une source bêta telle que ^{90}Sr peut être utilisée avec une feuille plastique mince.

Le taux dépend de l'intensité de la source de rayonnement et les éclairs sont aléatoires dans le temps. On ne peut pas avoir de déclencheur électrique pour marquer l'instant d'apparition d'un éclair.

d) *Source de scintillations*

La source de scintillations est constituée par un scintillateur plastique rapide et une source de rayonnements nucléaires pour fournir un éclair lumineux d'un temps de descente supérieur à son temps de montée. Un temps de montée courant est 400 ps, un temps de descente courant est d'environ 1,5 ns avec une queue caractéristique longue de plusieurs nanosecondes.

Le temps d'éclair est déterminé par l'intensité de la source, et les éclairs apparaissent de façon aléatoire dans le temps. On ne peut pas avoir de déclencheur électrique pour marquer l'instant d'apparition d'un éclair de lumière.

e) *Laser en mode déclenché*

Le mode déclenché s'obtient en appliquant à l'onde continue du signal dans la cavité laser une perturbation de phase ou une intensité variant avec le temps. Lorsque la fréquence de la perturbation correspond à la fréquence de résonance $c/2L$ de la cavité, où c est la vitesse de la lumière et L la longueur de la cavité, les modes sont mis en phase et il en résulte des impulsions lumineuses intenses qui se produisent avec une fréquence $c/2L$.

Les lasers He-Ne (633 nm), Ar (588 nm et 514,5 nm) et Nd:YAG (1,06 μm) peuvent fonctionner en mode déclenché. Les largeurs d'impulsion sont de l'ordre de 1 ns pour le laser He-Ne et d'environ 250 ps pour le laser Ar, tandis que les largeurs d'impulsion du système Nd:YAG s'étendent d'environ 1 ps à 50 ps. Les plus faibles largeurs d'impulsion obtenues avec un système Nd:YAG rendent ce dispositif particulièrement utile pour les mesures de temps à grande vitesse sur les photomultiplicateurs rapides.

Les taux de répétition pour un système Nd:YAG sont habituellement dans le domaine de 75 MHz à 200 MHz. Même le taux de 75 MHz peut être trop rapide pour les mesures sur certains photomultiplicateurs. Des taux de répétition plus faibles peuvent être obtenus en employant des modulateurs électro-optiques rapides pour rejeter les impulsions indésirables. On peut avoir un déclencheur électrique disponible pour marquer l'instant d'apparition de chaque impulsion.

La fréquence du rayonnement de 1,06 μm peut être doublée en employant un cristal non linéaire pour obtenir des impulsions à 532 nm (vert). Ces impulsions de l'ordre de la picoseconde sont très intenses (10^8 photons par impulsion) et peuvent être employées pour provoquer des effets de photoémission sur des dynodes au GaP (Cs), de même que sur des photocathodes. Le laser à mode déclenché peut être utilisé pour balayer la surface d'une dynode dans le but de dresser la carte de la répartition spatiale de ses caractéristiques liées au temps.

5.3.1 *Mesures du temps de montée*

a) *Temps de montée du photomultiplicateur (TMP)*

C'est la moyenne des différences de temps entre les points à 10% et à 90% d'amplitude du signal de sortie pour une illumination totale de la cathode et une impulsion de Dirac à l'entrée. Le temps de montée du photomultiplicateur se mesure avec une source d'impulsions lumineuses de Dirac répétitives et un oscilloscope à échantillonnage.

Le signal de déclenchement de l'oscilloscope peut être prélevé sur l'impulsion de sortie du photomultiplicateur de telle sorte que des sources de lumière telles que celles des scintillateurs peuvent être employées.

Le temps de montée mesuré sur un oscillogramme doit être corrigé des temps de montée finis des composants individuels du système. Le temps de montée du photomultiplicateur se calcule habituellement à partir de la relation:

$$\text{TMP} = \sqrt{t(\text{observé})^2 - t(\text{source})^2 - t(\text{séparateur})^2 - t(\text{ligne})^2 - t(\text{écran})^2}$$

en supposant que les éléments se comportent en accord avec la loi de Gauss. Cette supposition n'est pas valable cependant pour le temps de montée de la ligne à retard, $t(\text{ligne})$, et pour le temps de montée de l'oscilloscope, $t(\text{écran})$. Si un séparateur de signaux réactifs est utilisé (tel qu'un séparateur à transformateur), il ne se comportera pas en accord avec la loi de Gauss.

c) Čerenkov source

The Čerenkov light source relies on energetic particles from a small nuclear radiation source creating Čerenkov light in a high index of refraction medium. A beta source such as ^{90}Sr may be used with a thin piece of plastic.

The rate is governed by the radiation source intensity, and the flashes are random in time. No electrical trigger is available to mark the occurrence of a flash.

d) Scintillator light source

The scintillator light source utilizes a fast plastic scintillator and a nuclear radiation source to provide a light flash with a fall time longer than its rise time. A typical rise time is 400 ps; a typical fall time is approximately 1.5 ns with a characteristic long tail of several nanoseconds.

The rate of flashing is determined by the source intensity, and the flashes are random in time. No electrical trigger is available to mark the occurrence of a light flash.

e) Mode-locked laser

Mode-locking is achieved by applying a time-varying intensity or phase perturbation to the continuous-wave light signal within a laser cavity. When the perturbing frequency matches the resonant frequency $c/2L$ of the cavity, where c is the velocity of light and L is the cavity length, the modes are brought into phase, resulting in intense light pulses occurring at a rate $c/2L$.

He-Ne (633 nm), Ar (588 nm and 514.5 nm) and Nd: YAG (1.06 μm) lasers may be mode-locked. Pulse widths for the He-Ne laser are of the order of 1 ns and pulse widths for the Ar laser are approximately 250 ps, while pulse widths for a Nd: YAG system range from about 1 ps to 50 ps. The shorter pulse widths obtainable from a Nd: YAG system make this system most useful for high-speed time measurements on fast photomultipliers.

Repetition rates for a Nd: YAG system are usually in the range of 75 MHz to 200 MHz. Even the 75 MHz rate may be too fast for measurements on some photomultipliers. Lower repetition rates can be obtained by using fast electro-optical modulators to gate off unwanted pulses. An electrical trigger signal is available to mark the occurrence of each pulse.

The 1.06 μm radiation can be doubled in frequency by employing a non-linear crystal to obtain pulses at 532 nm (green). These picosecond pulses may be very intense (10^8 photons per pulse) and may be used to obtain photoemission from GaP (Cs) dynodes, as well as from photocathodes. The mode-locked laser can be used to probe the surface of a dynode to map its spatial timing characteristics.

5.3.1 Rise time measurements

a) Photomultiplier rise time (PRT)

This is the mean time difference between the 10% and 90% amplitude points on the output waveform for full-cathode illumination and delta-function excitation. Photomultiplier rise time is measured with a repetitive delta-function light source and a sampling oscilloscope.

The trigger signal for the oscilloscope may be derived from the photomultiplier output pulse, so that light sources such as the scintillator light source may be employed.

The rise time as measured from an oscilloscope photograph shall be corrected for the finite rise times of the individual elements comprising the system. The photomultiplier rise time is usually calculated from the relation:

$$\text{PRT} = \sqrt{t(\text{observed})^2 - t(\text{source})^2 - t(\text{splitter})^2 - t(\text{line})^2 - t(\text{scope})^2}$$

under the assumption that the elements behave as Gaussian elements. This assumption is not valid, however, for the case of the delay line rise time, $t(\text{line})$, and the oscilloscope rise time, $t(\text{scope})$. If a reactive signal splitter is employed (such as a transformer-coupled splitter), it will not behave as Gaussian element.

A cause des incertitudes inhérentes à la correction des temps de montée finis des composants individuels, il vaut mieux choisir ces composants de telle sorte que leur temps de montée individuel ne soit pas supérieur au tiers du temps de montée du photomultiplicateur. Les temps de montée des composants de l'ensemble de mesure doivent être précisés. Exemple: Source de lumière DEL au GaAs-P d'un temps de montée inférieur à 600 ps, temps de montée de la ligne à retard de 100 ps mesuré au réflectomètre, temps de montée de l'oscilloscope à échantillonnage de 50 ps. Il faut utiliser un réflectomètre pour s'assurer que le système, y compris l'embase du photomultiplicateur, dégrade le moins possible le temps de montée. (Un réflectomètre est un dispositif caractérisant l'impédance d'une ligne de transmission en fonction de sa longueur en envoyant une impulsion dans le dispositif à étudier et en observant l'impulsion réfléchie.)

Lorsque l'on indique les résultats des mesures de temps de montée, tous les paramètres utiles du système doivent être enregistrés, c'est-à-dire le nombre de photoélectrons par impulsion, la tension d'alimentation, la configuration du pont d'alimentation, le gain du photomultiplicateur et le courant de sortie dans le pic.

Il faut indiquer la distribution spectrale de la source de lumière car les énergies des photoélectrons varient avec la longueur d'onde de l'excitation et des différences dans les énergies des photoélectrons peuvent conduire à des mesures différentes des paramètres liés au temps.

Le taux de montée du courant (ou de la charge) d'anode correspondant à la saturation, en milliampères (ou en coulombs) par nanoseconde, s'obtient en divisant l'intervalle d'amplitude de courant (ou de charge) entre les points à 10% et à 90%, par le temps de montée de l'impulsion entre ces points, la photocathode étant illuminée de façon à fournir des impulsions correspondant à la saturation.

b) Temps de montée de l'impulsion réfléchie

C'est le temps de montée mesuré en branchant un réflectomètre sur le connecteur de sortie de l'anode du photomultiplicateur. Le réflectomètre doit avoir un temps de montée court (un tiers au maximum) par rapport au temps de montée de l'impulsion réfléchie.

Si le dispositif ne comprend pas un connecteur de sortie coaxial, la liaison entre le câble coaxial et les bornes de sortie de l'anode du dispositif doit être établie en suivant les instructions du fabricant. Le temps de montée de l'impulsion réfléchie de l'embase associée doit aussi être indiqué.

c) Temps de montée à électrons uniques (TMEU) (voir figure 5, page 34)

C'est le temps de montée de l'impulsion d'anode due à des électrons uniques produits à la photocathode. La mesure du TMEU exige un photomultiplicateur de gain tel que les événements à électron unique puissent être vus sur un oscilloscope à échantillonnage.

Une source de lumière pulsée peut être atténuée suffisamment pour que le rendement moyen par impulsion soit très inférieur à 1 photoélectron. On peut aussi utiliser l'émission d'obscurité de la photocathode comme source d'électrons uniques. Si le courant d'obscurité est trop faible, une lumière « continue » peut être employée pour augmenter le taux d'émission d'électrons uniques comme dans la figure 5. L'emploi d'une lumière « continue » est nécessaire pour être certain que les impulsions de sortie sont bien dues à des électrons uniques. Lorsque l'on utilise le courant d'obscurité (ou une lumière « continue » atténuée) comme source d'électrons uniques, le signal de déclenchement de l'oscilloscope à échantillonnage doit être pris sur l'impulsion de sortie d'anode. Une sonde de prélèvement du signal peut être utilisée, pourvu que son temps de montée soit petit ($1/3$ au moins) par rapport au temps de montée de l'impulsion d'anode. Un diviseur à résistance convient et peut être réalisé de façon à produire un temps de montée inférieur à 100 ps. Des lignes à retard avec des prises de signal de déclenchement sont aussi utilisables.

Si la résolution en électrons uniques du dispositif mesuré est supérieure à environ 200%, on peut rencontrer des difficultés considérables dans le réglage du niveau du seuil de déclenchement de l'oscilloscope, et les mesures peuvent être erronées.

La description des instruments et des techniques utilisées doit accompagner les données relatives au TMEU.

5.3.2 Mesures du temps de descente

Les mesures du temps de descente sont exécutées suivant les méthodes décrites dans le paragraphe 5.3.1.

Le temps de descente du photomultiplicateur est l'intervalle de temps moyen entre les points à 90% et 10% de l'amplitude sur le front de descente de l'impulsion de sortie pour une illumination totale de la cathode et une impulsion lumineuse de Dirac à l'entrée. La source de lumière utilisée doit présenter un temps de descente inférieur au tiers du temps de descente du photomultiplicateur.

Because of the uncertainties involved in correcting for the finite rise times of the individual elements, it is best to choose these elements such that their individual rise times do not exceed $\frac{1}{3}$ that of the photomultiplier rise time. The rise times of the elements comprising the measurement system shall be stated. Example: GaAs-P LED light source with rise time less than 600 ps, signal delay line rise time of 100 ps as measured with a time-domain reflectometer, sampling oscilloscope rise time of 50 ps. A time-domain reflectometer should be employed to ensure that the system, including photomultiplier socket, exhibits minimum rise time degradation. (A time-domain reflectometer is a device that characterizes the impedance of a transmission line as a function of length by sending a pulse into the device being investigated and looking at the reflected pulse.)

In stating the rise time results, all relevant system parameters should be recorded, e.g. number of photoelectrons per pulse, supply voltage, bleeder configuration, photomultiplier gain and peak output current.

The spectral distribution of the light source shall be given since photoelectron energies vary with excitation wavelength and differences in photoelectron energies can produce different measured time parameters.

The saturated anode current (or charge) rise rate in milliamperes (or coulombs) per nanosecond is obtained as the difference in current (charge) amplitude between the 10% and 90% points divided by the pulse rise time between the 10% and 90% points, when the photocathode is so illuminated as to produce pulses of saturation amplitude.

b) Reflected pulse rise time

This is that rise time measured with a time-domain reflectometer connected to the photomultiplier anode output connector. The time-domain reflectometer should have a rise time that is short (at most one-third) compared with the reflected pulse rise time.

If the device does not employ a coaxial output connector then the transition section between the coaxial cable and the device anode output terminals should be fabricated according to the manufacturer's instructions. The reflected pulse rise time of the associated socket should also be stated.

c) Single-electron rise time (SERT) (see Figure 5, page 34)

This is that anode-pulse rise time associated with single electrons originating at the photocathode. Measurement of SERT requires a photomultiplier having an adequate gain so that the single-electron events may be viewed on a sampling oscilloscope.

A pulsed-light source may be attenuated so that the average yield per pulse is much less than 1 photoelectron. Photocathode dark emission may also be used as a source of single electrons. If the dark current is too low, a d.c. light may be used to increase the single-electron emission rate as in Figure 5. The use of a d.c. (continuous) light is required to ensure that the output pulses are single-electron initiated. When dark current (or attenuated d.c. light) is used as a source of single electrons, the trigger signal for the sampling oscilloscope shall be derived from the anode output pulse. A signal pick-off probe may be used, provided its rise time is small ($\frac{1}{3}$ or less) compared to the anode pulse rise time. A resistive divider is suitable, and may be fabricated in a manner to produce a rise time of less than 100 ps. Delay lines with internal trigger pick-offs are also available.

If the single-electron resolution of the device being measured is more than approximately 200%, considerable difficulty may be experienced in setting the oscilloscope trigger threshold level, and measurements may be misleading.

A description of the instrumentation and techniques used should accompany SERT data.

5.3.2 Fall time measurements

Fall time measurements are made in accordance with procedures outlined in Sub-clause 5.3.1.

Photomultiplier fall time is the mean time difference between the 90% and 10% amplitude points on the trailing edge of the output pulse waveform for full-cathode illumination and delta-function excitation. The light source used should exhibit a fall time that is less than one-third of the photomultiplier fall time.

Le temps de descente à électrons uniques est mesuré comme il a été décrit pour le temps de montée à électrons uniques.

5.3.3 Mesures du temps de transit (voir figure 6, page 35)

a) Temps de transit du photomultiplicateur

Le temps de transit du photomultiplicateur nécessite pour la mesure une source d'impulsions lumineuses de Dirac, fournissant une impulsion repère de sortie synchronisée avec l'éclair lumineux et un oscilloscope à échantillonnage. Le temps de transit du photomultiplicateur est l'intervalle de temps entre le moment où la lumière atteint la photocathode (illumination totale) et le moment où le front de montée de l'impulsion de sortie atteint sa demi-amplitude.

L'impulsion repère et l'impulsion de sortie peuvent toutes les deux être représentées sur l'écran de l'oscilloscope en choisissant convenablement le retard des câbles. On calcule alors le temps de transit du photomultiplicateur à partir des temps de retard des lignes à retard du système, de la différence de temps entre l'impulsion repère et l'impulsion de sortie sur l'oscilloscope, et du retard optique (longueur/c) entre la source et la photocathode. Les temps de retard des câbles peuvent être mesurés avec précision au réflectomètre. Le temps de transit du photomultiplicateur variant avec les tensions, celles-ci doivent être spécifiées.

b) Temps de transit de la photocathode

C'est le temps mis par un paquet de photoélectrons pour aller de la photocathode à la première dynode. Cette mesure nécessite une source d'impulsions lumineuses de Dirac. La configuration du photomultiplicateur doit permettre la photoexcitation de la première dynode aussi bien que de la photocathode par la même source. La source de lumière doit donc avoir un spectre qui provoque la photoémission de la première dynode. On obtient la valeur du temps de transit de la photocathode, d'abord en mesurant le temps de transit du photomultiplicateur, puis en polarisant la photocathode à sa tension de coupure pour permettre la mesure combinée du temps de transit du multiplicateur et du temps de transit de la structure de sortie. Le retard optique entre photocathode et première dynode doit être pris en considération dans le calcul du temps de transit de la photocathode (voir figure 6).

Le temps de transit de la photocathode se mesure sous illumination globale de la cathode. La photocathode doit être polarisée à sa tension de coupure de telle façon que la configuration du champ électrique dans la structure du multiplicateur d'électrons ne soit pas modifiée du fait de son fonctionnement propre. Une polarisation de blocage de 10 V est généralement suffisante. Il faut prendre soin de s'assurer que la photoémission de toutes les surfaces autres que la première dynode est bien supprimée.

c) Temps de transit du multiplicateur d'électrons

C'est l'intervalle de temps entre le moment où un paquet d'électrons quitte la première dynode et le moment où le paquet multiplié frappe l'anode du photomultiplicateur. On détermine le temps de transit du multiplicateur, d'abord en mesurant la valeur des temps de transit combinés du multiplicateur et du montage de sortie, puis en soustrayant la valeur mesurée du temps de transit du montage de sortie.

d) Temps de transit du montage de sortie

C'est l'intervalle de temps entre le moment où un paquet d'électrons arrive à l'anode et le moment où l'impulsion de sortie au connecteur de sortie atteint sa demi-amplitude. La valeur du temps de transit du montage de sortie se mesure au réflectomètre. Si une embase câblée fait partie du montage externe de sortie, il faut spécifier son temps de retard en même temps que le temps de retard des structures internes de sortie du photomultiplicateur. Exemple: le temps de transit du montage de sortie est de 1,00 ns dont 0,85 ns de retard est dû à l'ensemble de l'embase et du câble coaxial fournis.

5.3.4 Mesure de la différence de temps de transit suivant les points de la photocathode

C'est la différence entre les temps de transit des électrons émis par le centre de la photocathode et des électrons émis par la photocathode en un point quelconque d'un diamètre donné. Elle peut être mesurée avec une source d'impulsions lumineuses de Dirac munie d'un signal de déclenchement qui indique l'instant d'apparition de l'éclair.

Les lignes à retard sont choisies de telle façon que le repère de déclenchement et l'impulsion de sortie soient représentés sur l'oscilloscope à échantillonnage par un petit point qui illumine le centre de la photocathode. On déplace le point le long d'un diamètre donné et la différence des temps par rapport au temps du point central pris comme référence est spécifiée en fonction du rayon. La valeur à demi-amplitude doit être prise comme référence.

Single-electron fall time is measured as outlined under single-electron rise time.

5.3.3 Transit time measurements (see Figure 6, page 35)

a) Photomultiplier transit time

Photomultiplier transit time measurements require a delta-function light source having a marker pulse output synchronized in time with the light flash, and a sampling oscilloscope. The photomultiplier transit time is the time difference between the incidence of the light upon the photocathode (full illumination) and the occurrence of the half-amplitude point on the output pulse leading edge.

The marker pulse and output pulse can both be positioned on the oscilloscope display by proper choice of delay cables. The photomultiplier transit time is then calculated from knowledge of the delay line delay times in the system, the time difference between marker pulse and output pulse on the oscilloscope and the optical delay (length/c) between source and photocathode. Delay times of cables can be measured accurately with a time-domain reflectometer. Since photomultiplier transit time varies with potentials, these data shall be specified.

b) Photocathode transit time

This is the time required for a packet of photoelectrons to travel from the photocathode to the first dynode. This measurement requires a delta-function light source. The photomultiplier configuration shall allow photo-excitation of the first dynode, as well as the photocathode, by the same source. The light source shall therefore have a spectrum that provides photoemission from the first dynode. The value of photocathode transit time is obtained by first measuring photomultiplier transit time, and then biasing off the photocathode to allow measurement of the combined multiplier transit time and output structure transit time. The optical delay between photocathode and first dynode shall be considered in the calculation of photocathode transit time (see Figure 6).

The photocathode transit time is measured with full-cathode illumination. The photocathode shall be biased off in such a manner that the electric field pattern in the electron multiplier structure is not altered from its proper operating distribution. A suppression bias of 10 V is usually sufficient. Care must be exercised to ensure that photoemission from all surfaces other than the first dynode is suppressed.

c) Multiplier transit time

This is the time delay between an electron packet leaving the first dynode and the multiplied packet striking the anode of the photomultiplier. Multiplier transit time is determined by first measuring the combined quantity, multiplier transit time and output structure transit time, and then subtracting the measured value of the output structure transit time.

d) Output structure transit time

This is the time delay between an electron packet arriving at the anode and the occurrence of the half-amplitude point of the output pulse at the output connector. The value of output structure transit time is measured with a time-domain reflectometer. If a wired socket is part of the external output structure, its delay time shall be specified along with the delay time of the internal output structure of the photomultiplier. Example: output structure transit time is 1.00 ns with 0.85 ns delay due to the supplied socket and coaxial cable assembly.

5.3.4 Photocathode transit time difference measurement

Photocathode transit time difference is the difference in transit time between electrons leaving the centre of the photocathode and electrons leaving the photocathode at some specified point on a designated diameter. It can be measured by using a delta-function light source with a trigger signal to designate the occurrence of the flash.

Delay lines are chosen such that the trigger marker and the output pulse are displayed on the sampling oscilloscope by a small spot illuminating the centre of the photocathode. The spot is then displayed along a designated diameter, and the time shift with respect to the centrespot reference is stated as a function of radius. The half-amplitude should be used as a reference.

5.3.5 Mesure de l'étalement du temps de transit (voir figures 7 et 8, pages 36 et 37)

On effectue ces mesures pour déterminer l'aptitude du photomultiplicateur à la résolution en temps. Contrairement aux autres mesures de temps, les mesures d'étalement du temps de transit sont faites à l'aide d'un convertisseur temps-amplitude (CTA) au lieu d'un oscilloscope à échantillonnage. La mesure revient à enregistrer la distribution statistique d'un nombre significatif d'impulsions qui, en vertu de la nature statistique du phénomène de photomultiplication, se produisent à des temps variables après l'apparition de l'éclair lumineux qui les a provoquées.

On peut mesurer l'étalement du temps de transit, appelé aussi résolution en temps du photomultiplicateur, soit pour un seul photomultiplicateur, soit pour une paire de photomultiplicateurs. Les deux mesures sont utiles et décrites ci-après. Dans l'exécution de ces mesures, plusieurs techniques sont possibles pour déterminer l'instant auquel l'impulsion de sortie atteint une amplitude donnée. La technique recommandée utilise la fraction constante de temps car ceci conduit à la meilleure performance de temps dans un large domaine d'amplitude des impulsions. La méthode de mesure (1 seul PM ou 2 PM) devra être indiquée. Dans la mesure du temps de résolution d'un seul PM, le signal de déclenchement de la source lumineuse fournit le signal « départ » au CTA ; le signal de sortie du dispositif fourni par le discriminateur de temps à fraction constante constitue le signal « arrêt ». Un nombre suffisamment grand d'impulsions fournies par le CTA est trié par un analyseur multicanal et la résolution est donnée par la largeur à mi-hauteur (LMH) du spectre de temps. La LMH devrait comprendre au moins 8 canaux et 50 000 événements. L'étalement du temps inhérent à la source de lumière et à son dispositif de déclenchement ne devrait pas excéder 30% de l'étalement du temps de transit mesuré et devrait être indiqué.

On devrait indiquer la résolution pour une illumination totale de la cathode. Comme la résolution augmente avec le nombre de photoélectrons par impulsion, la valeur moyenne de ce nombre doit être spécifiée. Une mesure particulièrement utile est le temps de résolution du dispositif pour des photoélectrons uniques.

La mesure du temps de résolution à électrons uniques pour un seul photomultiplicateur nécessite une source d'impulsions lumineuses de Dirac (voir paragraphe 5.3) munie d'un signal de déclenchement électrique pour marquer l'instant d'apparition de l'éclair, un convertisseur temps-amplitude et un analyseur d'amplitude. La mesure n'est valable que pour les photomultiplicateurs qui ont une résolution en amplitude pour électrons uniques de 200 % ou moins.

Il faut d'abord obtenir le spectre en électrons uniques du photomultiplicateur à l'essai en employant une lumière « continue » fortement atténuée (voir figure 7). Ensuite, la source d'impulsions lumineuses de Dirac doit être atténuée de telle façon que le nombre le plus probable de photoélectrons observés par éclair soit égal à 1. Le rapport des événements à 1 photoélectron aux événements à 2 photoélectrons ne doit pas être inférieur à 100 pour 1, observé sur l'analyseur d'amplitude. Ceci veut dire que pour une fraction importante des éclairs, aucun photoélectron ne sera libéré. (On pourra employer un discriminateur à niveau supérieur pour éliminer les événements à 2 électrons ; cependant, le réglage du niveau de discrimination est critique et, par suite, cette variante n'est pas préférée.)

Le convertisseur temps-amplitude doit être étalonné suivant le procédé du fabricant. Ce procédé comprend généralement un étalonnage de la base de temps effectué en relevant le déplacement dans le temps d'un grand nombre d'événements lorsqu'une valeur de câble de retard connue avec précision est introduite dans la ligne arrêt ou départ.

La distribution de la résolution en temps doit contenir au moins 50 000 coups sous la LMH et la LMH doit couvrir au moins 8 canaux.

Une seconde mesure de la résolution en temps du photomultiplicateur comprend l'emploi de 2 photomultiplicateurs qui regardent une source commune d'impulsions lumineuses de Dirac (voir paragraphe 5.3). Cette technique permet à un des photomultiplicateurs d'actionner le CTA « départ » pendant que l'autre actionne le CTA « arrêt ». Noter que cette technique ne nécessite pas un signal de déclenchement provenant de la source, de sorte que des sources Čerenkov ou à scintillation peuvent être employées. Comme dans la mesure à un seul tube, la résolution augmente avec le nombre de photoélectrons par impulsion, ce qui fait que cette valeur doit être précisée. La LMH de la distribution doit être précisée et l'appareillage doit être décrit. L'étalonnage de l'appareillage doit être effectué en suivant les méthodes indiquées par le fabricant. (Voir aussi les explications précédentes.)

5.3.5 Transit time spread measurements (see Figures 7 and 8, pages 36 and 37)

Transit time spread measurements are made to determine the time resolving ability of the photomultiplier. In contrast to other time measurements, transit time spread measurements are made with the aid of a time-to-amplitude converter (TAC) instead of a sampling oscilloscope. The measurement involves recording the distribution of a statistically significant number of pulses, which, by virtue of the statistical nature of the photomultiplication process, arrive at varying times after the occurrence of the initiating light flash.

Photomultiplier transit time spread, also called photomultiplier time resolution, can be measured for a single photomultiplier, and also for a pair of photomultipliers. Both measurements are useful and are described hereafter. In performing these measurements, a number of techniques are available to designate the instant in time at which the output pulse reaches a given amplitude. The recommended technique utilizes constant-fraction timing since this leads to the best timing performance for a wide range of pulse amplitudes. The measurement method (single-tube or two-tube) should be stated. In a single-tube time resolution measurement, the trigger signal from the light source supplies the "start" signal to the TAC; the device output signal obtained from the constant-fraction timing discriminator supplies the "stop" signal. A statistically large number of TAC pulses are sorted by a multi-channel analyser and the resolution is given by the full-width at half-maximum amplitude (FWHM) of the time spectrum. The FWHM should span at least eight channels and at least 50 000 events should be contained within the FWHM. The intrinsic time spread of the light source and its trigger output should not exceed 30% of the measured transit time spread and should be stated.

The resolution should be stated for full-cathode illumination. Since resolution improves with number of photoelectrons per pulse, the average value of photoelectrons per pulse shall be stated. A particularly useful measurement is the device time-resolution for single photoelectrons.

Single-electron time resolution measurements using a single photomultiplier require a delta-function light source (see Sub-clause 5.3) with an electrical trigger signal to mark the occurrence of the flash, a time-to-amplitude converter and a pulse amplitude analyser. The measurement is valid only for photomultipliers having a value of single-electron pulse amplitude resolution of 200% or less.

The single-electron spectrum of the photomultiplier under test shall first be obtained on the pulse amplitude analyser by employing a strongly attenuated d.c. (continuous) light (see Figure 7). Next the delta-function light source shall be attenuated so that the most probable number of observed photoelectrons per flash is equal to one. The ratio of one-photoelectron event to two-photoelectron events should be not less than 100 to 1 as monitored with the pulse amplitude analyser. This in turn means that for a significant fraction of the flashes no photoelectron shall be liberated. (An upper level discriminator could be employed to discriminate against two-electron events; however, the setting of the discriminator level is critical, and therefore this alternate method is not preferred.)

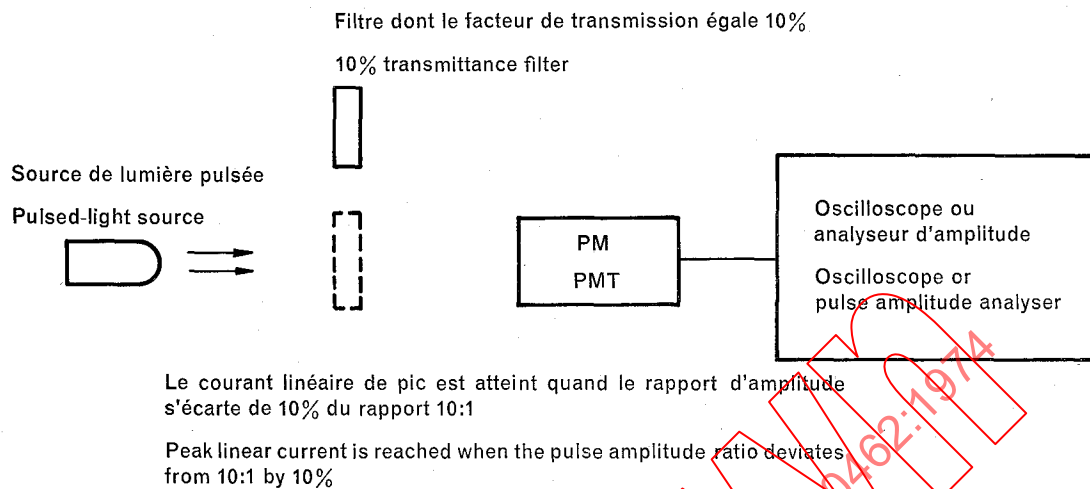
The time-to-amplitude converter shall be calibrated according to the manufacturer's procedure. Such procedure usually includes a calibration of the time base by noting the displacement in time of a large number of events when an accurately known value of delay cable is introduced into the start or stop line.

The time resolution distribution shall contain at least 50 000 events under the FWHM, and the FWHM shall span at least eight channels.

A second measurement of photomultiplier time resolution involves the use of two photomultipliers viewing a common delta function light source (see Sub-clause 5.3). This technique allows one photomultiplier to activate the TAC "start", while the other activates the TAC "stop". Note that this technique does not require a trigger signal from the source, so that either Čerenkov or scintillation sources can be employed. As with the single-tube measurement, resolution improves with the number of photoelectrons per pulse, so this figure must be stated. The FWHM of the distribution shall be stated, and the instrumentation shall be described. Calibration of the instrumentation shall be carried out according to the methods specified by the manufacturer. (See also previous discussion.)

Méthode des deux impulsions

Two-pulse method



Méthode du tracé logarithmique

Logarithmic plot method

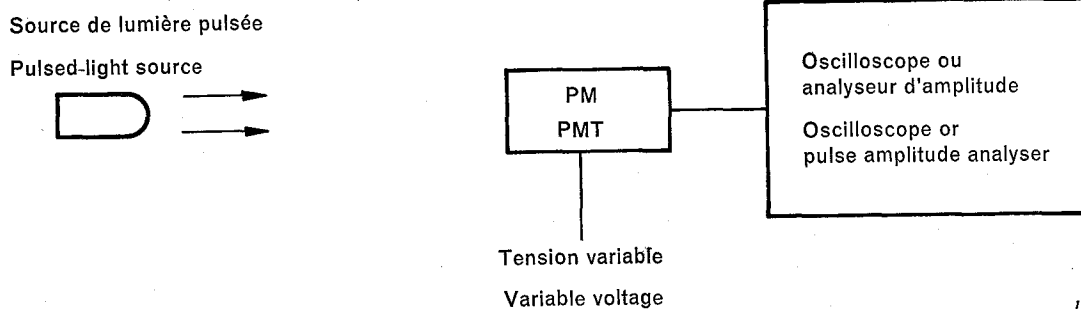
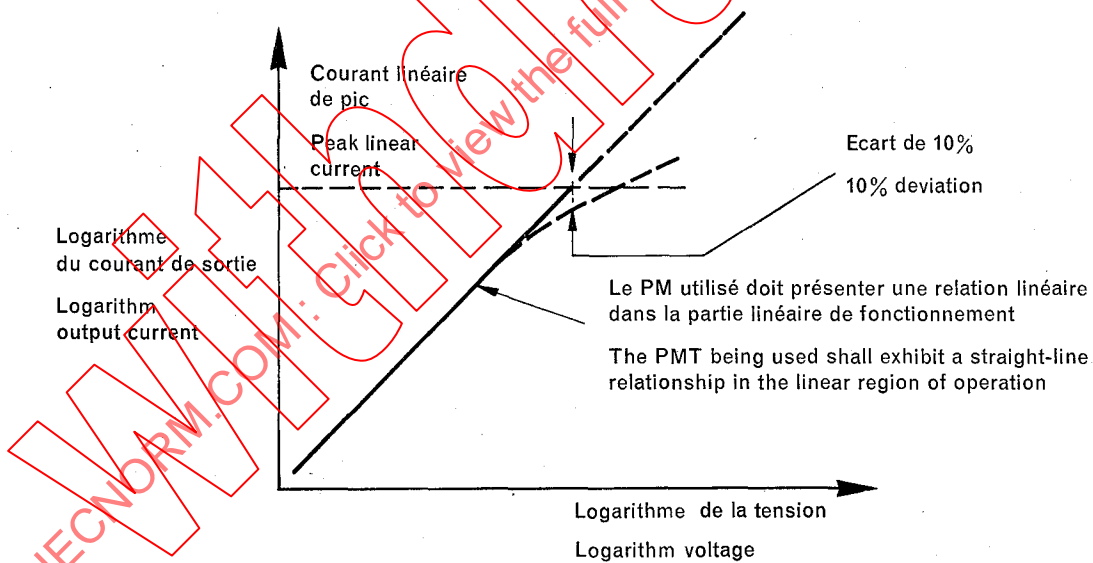


FIG. 1. — Linéarité de l'amplitude.
Pulse amplitude linearity.