



# Influence de la température sur l'efficacité des compteurs à scintillation

A. Meessen

## ► To cite this version:

A. Meessen. Influence de la température sur l'efficacité des compteurs à scintillation. Journal de Physique et le Radium, 1958, 19 (4), pp.437-442. <10.1051/jphysrad:01958001904043700>. <jpa-00235869>

**HAL Id: jpa-00235869**

**<https://hal.science/jpa-00235869v1>**

Submitted on 4 Feb 2008

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

## LE JOURNAL DE PHYSIQUE

ET

## LE RADIUM

INFLUENCE DE LA TEMPÉRATURE  
SUR L'EFFICIENCE DES COMPTEURS A SCINTILLATION

Par A. MEESSEN,

Centre de Physique Nucléaire de l'Université de Louvain.

**Sommaire.** — L'effet de température des compteurs à scintillations peut être analysé suivant trois groupes : 1) L'effet de température du scintillateur. Nous l'avons étudié pour le NaI : Tl. A basse température on observe l'émission fondamentale du NaI. La bande d'émission du centre Tl apparaît à température plus élevée et se transforme à 20 °C et à 100 °C. 2) L'effet de température dans la sensibilité de la photocathode se présente comme un glissement de la courbe de réponse spectrale vers le rouge quand la température est abaissée. 3) La multiplication électronique aux dynodes semble être augmentée par un refroidissement de celles-ci.

Les résultats expérimentaux existants sont revus et comparés à ceux de l'auteur ; l'interprétation des différents effets est indiquée.

**Abstract.** — Experimental results are reviewed and compared with those of the author. The temperature effect of the scintillator is interpreted for NaI : Tl by lattice emission at low temperature, and by a shift of the Tl-centre emission band at 20 °C and at 100 °C. The variation of the photocathode sensitivity reduces to a shift of the spectral response curve towards the red for lower temperature, at which the dynode-multiplication would be increased. This is interpreted by a surface-photoelectric effect for red light and a volume effect in secondary electron emission and blue light photo-electron emission.

**Introduction.** — Les compteurs à scintillation sont actuellement d'un usage constant en physique nucléaire, pour la détection et la spectrométrie des radiations. Il est de grande importance de savoir si ces mesures sont influencées par la température du milieu ambiant et dans quel sens. Une telle influence existe effectivement et peut être analysée d'après les différentes parties qui composent le compteur à scintillation.

1) Dans le scintillateur, solide ou gazeux, organique ou inorganique, la radiation incidente produit une luminescence de très courte durée, dont l'intensité est proportionnelle à l'énergie de cette radiation, au moins dans certaines limites [1]. En général, cependant, l'intensité et la forme du spectre de la luminescence émise, varient avec la température. Nous étudions cet effet pour les cristaux de NaI : Tl.

2) La lumière de cette scintillation est guidée vers la photocathode d'un photomultiplicateur, de laquelle des photoélectrons sont émis. La réponse aux longueurs d'onde de la lumière incidente dépend de la nature des alliages utilisés. Pour les

alliages métalliques Sb-Cs, elle s'étend le plus vers l'ultra-violet (types de réponse S-5 et S-4).

Pour assurer une bonne transmission optique en dessous de 3 500 Å le verre ordinaire est remplacé par du quartz. Les alliages en  $\text{SbCs}_3$  donnent des courbes de réponse (types de réponse S-8, S-9, S-11) dont le maximum de sensibilité se trouve entre 4 000 Å et 5 000 Å. D'autres alliages en Ag-Mn ou en Sb-K-Na fournissent également une réponse S-11 tout en diminuant le bruit de fond thermique. La sensibilité est déplacée davantage vers le rouge, si on utilise des photocathodes en Bi-Ag-Cs, etc.

Malgré leur nature différente, les photocathodes RCA 5819 ( $\text{SbCs}_3$ ) et Dumont 6292 (Ag-Mn) qui sont d'un même type de réponse (S-11) donnent lieu à un effet très semblable. Nous avons réuni les résultats expérimentaux des différents auteurs, qui s'expliquent tous par un glissement de la courbe de réponse, quand la température varie.

3) Les photoélectrons émis à la cathode, sont multipliés par émission secondaire répétée sur

l'ensemble des dynodes successives du photomultiplicateur. Pour un tube à dix étages on réalise ainsi un gain de  $10^4$  à  $10^7$  suivant les tensions appliquées. Les dynodes sont en général de la même matière que la photocathode. Dans ce cas encore, l'extraction des électrons de la matière utilisée dépendra de la température.

L'effet de température sur l'électronique subséquente, notamment sur les diodes est bien connu ; son étude est donc inutile.

Nous avons passé en revue les expériences apparemment contradictoires, faites jusqu'à présent sur ce sujet, tout en les comparant à nos propres mesures. Les explications proposées permettent de comprendre l'ensemble des résultats.

**1. Effet de température dans l'efficacité du scintillateur.** — 1.1. EXPÉRIENCES. — Pour le NaI : Tl cet effet a été étudié par de nombreux auteurs [2-10]. Les résultats expérimentaux sont résumés sur la figure 1. Nous avons mesuré [17] les variations des hauteurs d'impulsions pour le  $^{137}\text{Cs}$  quand le cristal NaI : Tl est refroidi par des mélanges réfrigérants ou chauffé dans un four électrique. Le photomultiplicateur RCA 5819 est maintenu à température normale en utilisant un guide de lumière en lucite suffisamment long. La courbe obtenue (fig. 1) indique une diminution de l'effi-

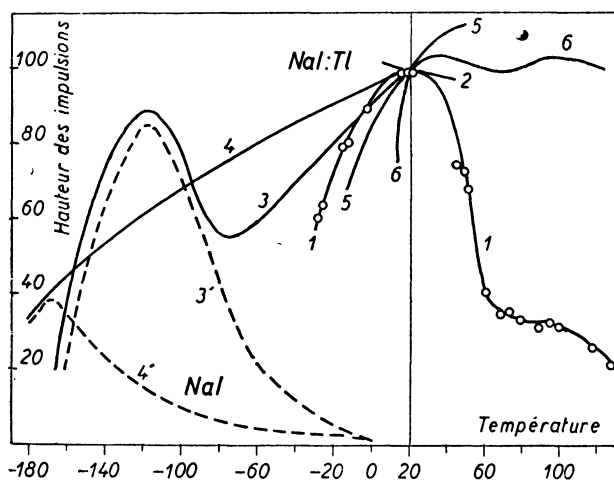


FIG. 1. — Influence de la température sur la hauteur des impulsions quand la température du cristal NaI : Tl seule varie.

Courbe 1 : Meessen [17].  
 » 2 : Webb et al. [3, 5, 6].  
 » 3 et 4 (pour le NaI : Tl), 3' et 4' (pour NaI) : der Maetesian et al. [7].  
 » 5 : Kinard [10].  
 » 6 : Solon et al. [4].

ciencia tant pour un échauffement que pour un refroidissement du cristal à partir de la température normale. Un deuxième maximum se présente vers 100 °C. La constante d'intégration des

circuits électroniques est de  $2 \mu\text{sec}$ . D'autres tubes 5819 et des tubes Dumont 6292, ont montré un comportement analogue.

Arnold [3], Webb and Johnson [5] et Webb [6] rapportent un coefficient négatif de

$$-0,12 \pm 0,02 \text{ } \%/^{\circ}\text{C},$$

en utilisant un tube Dumont 6292, et en variant la température du cristal entre 5° et 45 °C (courbe 2, figure 1).

E. der Maetesian et ses collaborateurs [7] ont mesuré avec un photomultiplicateur RCA 5819 et une constante d'intégration de  $15 \mu\text{sec}$  la variation des hauteurs d'impulsions pour les particules alpha du polonium et des rayons gamma du  $^{137}\text{Cs}$  quand on refroidit le cristal. Les auteurs ont montré que le comportement à basse températures est déterminé par les propriétés de luminescence du cristal pur ; celles-ci dépendent d'ailleurs de la méthode de production du cristal (courbes 3 et 4, figure 1). Les courbes pour le cristal NaI pur (courbes 3' et 4', figure 1) sont à rapprocher des courbes obtenues par Bonanomi et Rossel [11] pour la luminescence des cristaux d'halogénures alcalins purs. L'émission du réseau pur, à basse température, a été étudié par Van Sciver [13] et Van Sciver and Hofstadter [12]. Ils ont montré que dans les cristaux de NaI : Tl il y a deux bandes d'émissions. Celle entre 3 500 Å et 5 500 Å est caractéristique du centre de luminescence Tl. Celle entre 2 500 Å et 3 500 Å, très intense dans le cristal pur et diminuant d'intensité quand la concentration en Tl augmente, est associée à une émission du réseau (fig. 2). Elle n'existe qu'à basse température ; la

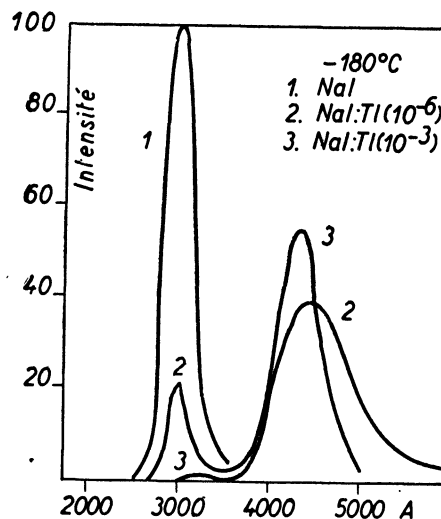


FIG. 2. — Spectres d'émission du NaI : Tl pour différentes concentrations en Tl (Van Sciver [13]).

constante de déclin est de  $1$  à  $3 \cdot 10^{-8}$  sec pour le NaI donc relativement petite par rapport à  $2,5 \cdot 10^{-7}$  sec pour le NaI : Tl.

Citons ici le travail de Smaller, May and Freedman [15] sur les cristaux de KI et de KI : Tl. La fluorescence du cristal due au K radioactif, donne lieu à des courbes analogues aux précédentes.

Mais ces auteurs ont trouvé en même temps des maximums de « thermoluminescence » dans la phosphorescence émise quand on réchauffe lentement le cristal KI : Tl, excité à basse température. Les deux maximums sont situés à  $-83^{\circ}\text{C}$  et  $-38^{\circ}\text{C}$ . Ils sont absents dans le cristal pur. La constante d'intégration des appareils utilisés est de  $5\text{ }\mu\text{sec}$  Cook and Mahmoud [9] ont mesuré entre  $-150^{\circ}$  et  $0^{\circ}\text{C}$  pour le NaI : Tl les variations de l'impulsion principale est de l'ensemble des impulsions secondaires qui suivent de 2 à  $400\text{ }\mu\text{sec}$

l'impulsion principale d'une source de  $^{60}\text{Co}$ . Ils ont utilisé un tube EMI 5311 (type de réponse S-11) et une constante d'intégration très petite, de  $0,15\text{ }\mu\text{sec}$ . Ils trouvent évidemment des maxima différents pour les impulsions principales et les impulsions secondaires de phosphorescence. Retenons que la hauteur de l'impulsion principale augmente en réchauffant le cristal à partir de  $-80^{\circ}\text{C}$ . Le maximum à  $-100^{\circ}\text{C}$  peut encore être attribué à une émission fondamentale du réseau, puisque le spectre d'émission avait son maximum à  $3\,800\text{ Å}$ , et non pas à  $4\,100\text{ Å}$ . Cette déviation du maximum d'émission constatée également par Eby and Jentschke [16] est due à l'émission fondamentale.

Dans les cristaux de NaI : Tl que nous avons

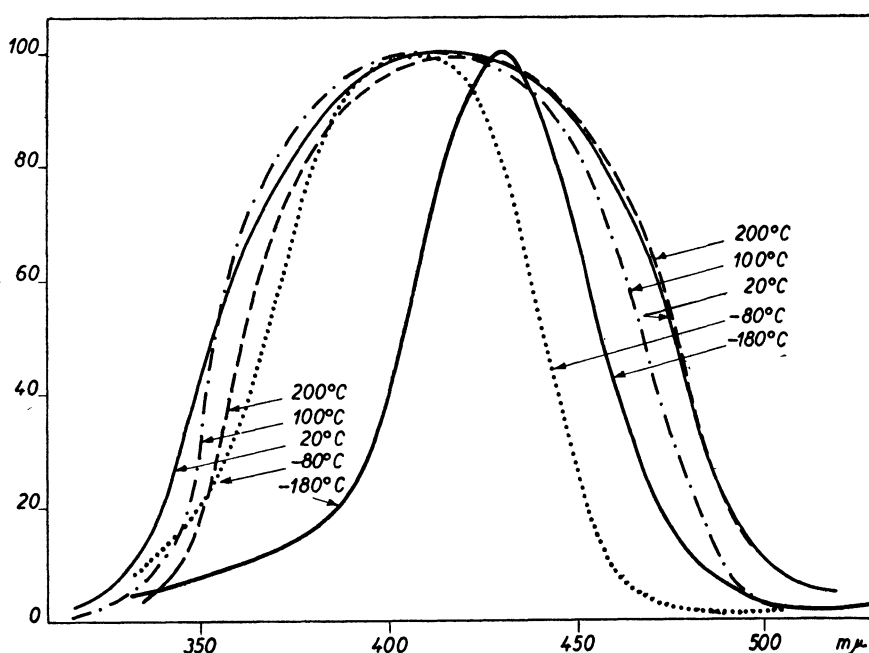


FIG. 3. — Spectres d'émission du NaI : Tl à différentes températures.

utilisés, fournis par le Dr. K. Korth à Kiel, la concentration en Tl était de 0,1 %, donc très élevée. L'émission fondamentale était donc absente, comme le prouvent les spectres que nous avons mesurés pour le NaI : Tl à différentes températures [17] (fig. 3). L'absence d'émission fondamentale explique la variation plus forte des hauteurs d'impulsions en dessous de  $20^{\circ}\text{C}$ , que nous avons mesurée (courbes 1, figure 1).

Enfin Kinard [10] a observé les variations de la hauteur des impulsions du NaI : Tl en utilisant une constante d'intégration de  $25\text{ }\mu\text{sec}$  et de  $0,4\text{ }\mu\text{sec}$ . Dans le premier cas il trouve une forte augmentation entre  $-15$  et  $50^{\circ}\text{C}$ , dans le deuxième cas il retrouve la diminution de 0,1 % déjà citée (courbes 5 et 2, figure 1). L'explication des courbes différentes réside dans le fait que le temps de déclin

des différentes composantes de la phosphorescence du cristal, augmente avec la température [11]. Une constante d'intégration plus grande inclut donc plus de lumière de phosphorescence dans la scintillation étudiée.

Selon, McLaughlin and Blatz [4] avaient mesuré les variations de réponse de l'ensemble photomultiplicateur et cristal NaI : Tl entre  $5$  et  $125^{\circ}\text{C}$  au moyen d'un intégrateur. Il est intéressant de remarquer que leurs courbes (courbe 6, figure 1) indiquent un maximum vers  $100^{\circ}\text{C}$  comme nous l'avions mesuré nous-même. Dans notre cas l'intensité à température élevée est évidemment plus faible à cause de l'exclusion de la phosphorescence. La possibilité d'un changement dans le pouvoir de transmission du guide de lumière ne peut cependant pas être entièrement exclu.

1.2. INTERPRÉTATION. — D'après ce que nous venons de dire l'effet observé à basse température aura l'interprétation suivante : c'est la luminescence fondamentale du cristal pur, quand la concentration en Tl est faible.

Pour expliquer les autres variations nous avons mesuré le spectre d'émission du NaI : Tl à différentes températures. Le cristal monté pour la spectrométrie gamma était irradié par une source intense de radium-béryllium ; la luminescence visible à l'œil nu était analysée dans un spectrographe Hilger. Nous avons normalisé les spectres à leur maximum, sans faire de correction pour la sensibilité des plaques utilisées (fig. 3).

Nous avons mesuré une seule bande, dont la forme dépend nettement de la température. Nous avons pu interpréter en détail toutes ces variations, par une étude des processus de luminescence dans le centre Tl du cristal activé [17] qui sera publiée ultérieurement [18]. Nous supposons que le spectre d'émission est composé de trois bandes, environ 3 900, 4 300 et 4 600 Å.

Nous devons tenir compte en même temps de la courbe de réponse de la photocathode. Pour le tube RCA 5819 et Dumont 6292 elle est du type S-11. Remarquons cependant qu'il peut y avoir de très larges variations individuelles d'un tube à l'autre [19]. Toutefois la sensibilité maximum de la photocathode se trouve vers 4 500 Å. C'est précisément dans cette région que l'émission devient plus intense, en chauffant de  $-80^{\circ}\text{C}$  à  $20^{\circ}\text{C}$  et diminue en passant de  $20^{\circ}\text{C}$  à  $100^{\circ}\text{C}$ , ce qui donnerait lieu au maximum d'efficacité à température normale.

Les variations dans l'intensité émise vers 3 700 Å tombent déjà dans une région où la réponse de la photocathode est moindre.

Nous remarquons qu'un effet inverse se produit de nouveau pour le spectre d'émission en passant de  $100^{\circ}\text{C}$  à  $200^{\circ}\text{C}$ . Pourtant nous ne pouvons pas nous attendre à trouver la même efficacité qu'à température normale, en effet, la somme de l'intensité émise diminue à cause de l'étouffement de la luminescence par transition non radiative, bien étudiée pour le cas du KCl : Tl par Johnson and Williams [20].

Retenons cependant la situation particulière du spectre d'émission à  $100^{\circ}\text{C}$ , confirmée également par les spectres à  $25^{\circ}\text{C}$  et  $145^{\circ}\text{C}$  qui s'intercalent bien entre les spectres précédents. L'étude des processus de luminescence dans les centres Tl [17, 18] laisse prévoir en effet un point d'équilibre entre deux effets contraires. Ce point où l'émission dans la bande à 4 600 Å diminue tandis que celle à 4 300 Å augmente, se situe bien vers  $100^{\circ}\text{C}$ . Le léger maximum à  $100^{\circ}\text{C}$  a donc une signification physique.

Différents auteurs [2, 21, 22] ont démontré également des variations en efficacité de l'anthracène et d'autres scintillateurs, le processus intime de

luminescence étant cependant beaucoup moins bien compris pour ceux-ci que pour le NaI : Tl, où on peut appliquer le modèle de Seitz-Williams [18]. Il est cependant démontré par ce travail, qu'on doit s'attendre également, dans ce cas, à des variations de l'intensité ou du spectre émis, à cause de changement dans les processus internes de luminescence.

2. Effet de température dans l'efficacité de la photocathode. — 2.1. EXPÉRIENCES. — Les résultats expérimentaux sont résumés sur la figure 4.

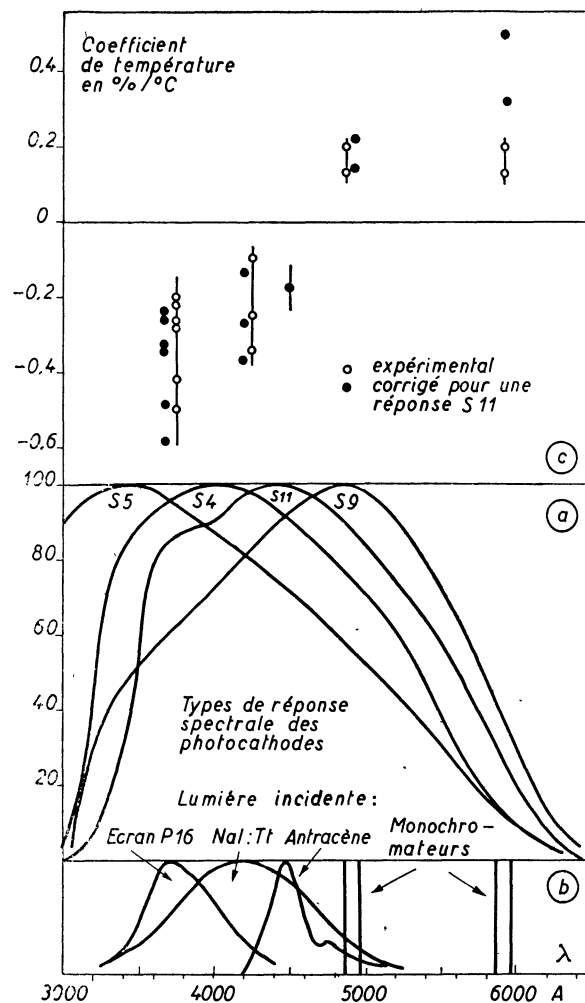


Fig. 4. — a) Différents types de réponse spectrale des photocathodes.  
 b) Spectres de lumière incidente utilisés pour la détermination des coefficients de température.  
 c) Coefficients de température en %/°C.

Seliger and Ziegler [23] ont trouvé un coefficient positif de  $0,13\ \text{\%/}^{\circ}\text{C}$  à  $0,2\ \text{\%/}^{\circ}\text{C}$ , pour des tubes RCA 5819 et Dumont 6292 et une source de lumière pulsée, filtrée pour une bande de 100 Å à 4 900

et 5 900 Å. L'intervalle de la température étudié est de  $-40^{\circ}\text{C}$  à  $25^{\circ}\text{C}$ .

Par contre Ball [8] pour des tubes Dumont 6291 et RCA 6199, ont trouvé un coefficient négatif de  $-0,2$  à  $-0,28$   $\%/^{\circ}\text{C}$  pour les premiers et de  $-0,27$  à  $-0,5$  pour les derniers, en utilisant les pulsations d'un oscillographe à écran P-16 dont le maximum d'émission se trouve à 3 700 Å. L'intervalle de température va de  $5$  à  $50^{\circ}\text{C}$ .

Ces deux mesures contradictoires doivent être comprises comme un effet différent pour différentes longueurs d'ondes de la lumière incidente. Cette idée a été exprimée déjà par Boeschoten [24]. Il a constaté qu'à  $-180^{\circ}\text{C}$  la sensibilité pour le bleu (4 000 Å) augmente de 40 % par rapport à celle à  $20^{\circ}\text{C}$ , tandis que celle pour le rouge (6 500 Å) diminue de 80 %.

Utilisant le spectre des scintillations du NaI : Tl et un Dumont 6292, Webb [6] trouve un coefficient négatif de  $-0,35 \pm 0,02$   $\%/^{\circ}\text{C}$ .

Herold [25] trouve environ  $-1$   $\%/^{\circ}\text{C}$  pour des tubes Du Mont 6292 et RCA 5819, entre  $25$  et  $60^{\circ}\text{C}$ . Kinard [10] trouve entre  $-20^{\circ}\text{C}$  et  $60^{\circ}\text{C}$  une diminution d'efficacité d'émission de 40 %, pour des tubes Du Mont 6292 et RCA 5819, 6655. Une mesure indirecte par différence entre l'effet de température pour le cristal seul et pour le cristal avec photocathode montre un effet quasi nul de la photocathode. Kinard associe alors la variation d'efficacité du phototube à un effet de température des dynodes. Pourtant il a montré que l'effet de température des dynodes seules, n'est que de moitié de l'effet de température de l'ensemble des dynodes et photocathodes, soit donc environ  $-25$   $\%/^{\circ}\text{C}$  pour la cathode et pour les dynodes respectivement.

Pour l'anthracène, qui a son maximum d'émission à 4 500 Å, P. Macq et J. Deutsch [26] ont effectué dans ce laboratoire des mesures sur les variations des hauteurs d'impulsions de  $^{137}\text{Cs}$  quand la température du photomultiplicateur RCA 5819 est abaissée de  $25^{\circ}\text{C}$  à  $-40^{\circ}\text{C}$ . Ils trouvent un coefficient négatif de  $-0,18 \pm 0,06$   $\%/^{\circ}\text{C}$ . Les résultats étaient bien reproductibles.

Kelley and Goodrich [21] trouvent pour l'anthracène également un coefficient négatif quand la température du photomultiplicateur RCA 1P21 (réponse S-4) varie entre  $20^{\circ}\text{C}$  et  $-160^{\circ}\text{C}$ . Les auteurs avaient associé cet effet à une variation de la transparence du verre de la photocathode. Vu les autres expériences nous pouvons admettre qu'il s'agit plutôt d'un effet interne de la photocathode. Pour tube RCA 1P28 (réponse S-5) ces auteurs trouvent cependant un effet négligeable.

**2.2. INTERPRÉTATION.** — Des expériences précédentes il résulte donc bien qu'il y a une diminution d'efficacité pour le rouge (4 900, 5 900, 6 500 Å) et une augmentation d'efficacité pour le bleu (anthracène, NaI : Tl, écran P-16) quand on refroidit la

photocathode du photomultiplicateur. Il y a donc glissement de la courbe de réponse vers le bleu, plus exactement il y a une déformation de la courbe de réponse. Sur la figure 4(C) nous donnons les coefficients trouvés expérimentalement pour un spectre donné de lumière incidente (b) et les coefficients corrigés pour la réponse moyenne S11 (a) de la photocathode.

Pour différents tubes d'un même type ou de types différents, on observe [10, 25] des coefficients variables mais toujours dans le même sens. Une variation de la haute tension appliquée au tube n'a pas d'effet sauf qu'au delà de 1 000 V le bruit de fond thermique augmente sensiblement quand on chauffe le tube. Les variations individuelles du coefficient d'un tube à l'autre sont dues à des variations individuelles dans la courbe de réponse pour ces différents tubes. Une réponse spécifiée S11, peut varier en effet entre une réponse S4 et S9 [19].

L'explication de l'effet de température dépendant de la longueur d'onde de la lumière incidente est la suivante [24] pour le rouge l'effet photoélectrique étant un effet de surface le travail d'extraction augmente pour une régression des niveaux de Fermi, donc à température plus basse. Par contre pour le bleu, on a plutôt un effet de volume, or à basse température le libre parcours moyen des électrons dans le métal devient plus grand et l'extraction des photoélectrons sera plus facile. Nous référons à l'étude de l'effet photoélectrique [27].

Des mesures sont entreprises dans notre laboratoire pour déterminer les variations de la courbe de réponse pour des photons bien monochromatiques en se rapportant pour chaque tube à sa propre courbe de réponse.

**3. Effet de température dans l'efficacité des dynodes.** — Cet effet n'a encore été observé que par Kinard [10] qui donne un coefficient négatif d'environ  $-0,25$   $\%/^{\circ}\text{C}$ . Ceci indique d'après l'interprétation précédente, valable également pour l'émission secondaire des dynodes, que celle-ci est un effet de volume. Il faudra en effet s'attendre à un effet de volume aussi longtemps que la tension d'accélération entre dynodes sera suffisamment grande.

Nous remercions vivement M. le Pr M. de Hempin pour la direction et l'encouragement dans ce travail, également MM. P. Macq et J. Deutsch pour la communication de leurs résultats de mesure et des discussions fructueuses. Notre reconnaissance va également à l'Institut Interuniversitaire des Sciences Nucléaires pour l'octroi d'une bourse de perfectionnement.

Manuscrit reçu le 14 décembre 1957.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] MEESSEN (A.), *Ann. Soc. Sc. Bruxelles*, 1955, **69**, 1, 102.
- [2] MINARIK (W. L.) et DRICKAMER (M. G.), *Rev. Sc. Instr.*, 1951, **22**, 704.
- [3] ARNOLD (J.), *Nucleonics*, 1954, **12**, March 28.
- [4] SOLON (L. R.), McLAUGHLIN (J. E.) et BLATZ (H.), *Nucleonics*, 1954, **12**, May 50.
- [5] WEBB (L. A.) et JOHNSON (R. F.), *Phys. Rev.*, 1955, **98**, 234.
- [6] WEBB (L. A.), *U. S. N. R. D. L.*, 1955, TR-48.
- [7] MATEOSIAN (E. DER), McKEOWN et MUEHLAUSSE, *Phys. Rev.*, 1956, **101**, 967.
- [8] BALL (W. P.), BOOTH (R.) et MCGREGOR (M.), *Nucleonics Instr.*, 1957, **1**, 71.
- [9] COOK (J. R.) et MAHMOND (K. A.), *Proc. Phys. Soc.*, B 1954, **67**, 817.
- [10] KINARD (F. E.), *Nucleonics*, 1957, April 92.
- [11] BONANOMI (J.) et ROSSEL (J.), *Helv. Phys. Acta*, 1952, **25**, 275.
- [12] VAN SCIVER (W.) et HOFSTADTER (R.), *Phys. Rev.*, 1956, **97**, 1181.
- [13] VAN SCIVER (W.), *Nucleonics*, 1956, April 50.
- [14] BOSE (N.) et SHARMA (N.), *Proc. Nat. Inst. Sc. India*,
- [15] SMALLER (B.), MAY (J.) et FREEDMAN (M.), *Phys. Rev.*, 1950, **79**, 940.
- [16] EBY (F.) et JENTSCHKE (W.), *Phys. Rev.*, 1954, **96**, 911.
- [17] MEESSEN (A.), *Thèse*, Univ. Louvain, 1955.
- [18] MEESSEN (A.), *Ann. Soc. Sc.*, Bruxelles, 1957, **71**, 222, et à paraître dans *J. Physique Rad.*
- [19] ENGSTROM (R.), STODENHEIMER (R.) et GLOVER (R.), *Nucleonics*, 1952, **10**, April 58.
- [20] JOHNSON (P. D.) et WILLIAMS (F. E.), *J. Chem. Phys.*, 1952, **20**, 124.
- [21] KELLEY (G.) et GOODRICH (M.), *Phys. Rev.*, 1950, **77**, 138.
- [22] LIEBSON (S. H.) et FARRAR (R. T.), *Phys. Rev.*, 1950, **79**, 733. LIEBSON (S. H.) et ELLIOT (J. O.), *Phys. Rev.*, 1950, **78**, 65. BIRKS (J. B.), *Phys. Rev.*, 1954, **95**, 277. HEUGST (U.), *Z. Naturf.*, 1951, **6a**, 540.
- [23] SELIGER (H. H.) et ZIEGLER (C. A.), *Nucleonics*, 1956, **14**, April 49.
- [26] BOESCHOTEN, MIMOZ et SMITH, *Physica*, 1954, **20**, 3, 139
- [25] HEROLD, KROPP et STUTHEIT, E. I. du Pont de Nemours, 1956, D. P.-47.
- [26] MACQ (P.) et DEUTSCH (J.), *Ann. Soc. Sc.*, Bruxelles, 1957, **71**, 172.
- [27] HUGHES et DU BRIDGE, *Photoelectric Phenomena*, McGraw-Hill, 1932. PHILIPP (H. R.), *Phys. Rev.*, 1957, **107**, 687. MAKINSON (R. E. B.), *Phys. Rev.*, 1949, **75**, 1908.