

1 INTRODUCTION.....	2
2 DETECTION DU RAYONNEMENT GAMMA.....	2
3 scintillateur.....	
3.1 Introduction .....	4
3.2 Généralités.....	5
3.3 Light output response .....	6
3.4 Linéarité .....	7
3.5 Dépendance vis-à-vis de la température.....	7
3 SCINTILLATEUR.....	4
4 Photomultiplicateur.....	8
4.1 Introduction .....	8
4.2 Principe .....	8
4.3 Photocathode .....	9
4.4 System input electron optical .....	10
4.5 Le multiplicateur.....	10
4.6 Multiplier response .....	11
4.7 Paramètres d'exploitation .....	12
55 Le détecteur à scintillation.....	15
5.1 Principe.....	15
5.2 Caractéristiques .....	16
5.3 Contact entre le scintillateur et le PM.....	17
6 Chaine de détection.....	17
7 Comparaison des 2 scintillateurs.....	18
Annexes.....	19
Bibliographie.....	21
Data sheet.....	21

# 1 INTRODUCTION

Dans le cadre du mémoire, on doit utiliser un détecteur de radiation pour connaître le nombre d'émetteurs gamma se trouvant sur un dépôt. En comptant le nombre de rayonnements gammas mesurés, on obtient le nombre de ces atomes. Pour accomplir cette tâche, nous avons choisi d'utiliser un détecteur à scintillation. Plus précisément, notre choix s'est porté sur un détecteur de type inorganique.

Dans ce travail, nous commencerons d'abord par expliquer pourquoi nous avons choisi ce type de détecteur plutôt qu'un autre. On décrira brièvement les caractéristiques d'un rayonnement gamma.

Sachant qu'un détecteur à scintillation est composé de 2 parties principales, le scintillateur et le photomultiplicateur ; nous étudierons ces dispositifs séparément.

Ensuite, on considérera le détecteur dans son ensemble c'est-à-dire le scintillateur plus le photomultiplicateur. On passera en revue brièvement la chaîne de détection qui accompagne ce type de détecteur. Nous terminerons ensuite par une comparaison entre un scintillateur plastique et un scintillateur inorganique.

## 2 DETECTION DU RAYONNEMENT GAMMA

Le rayonnement gamma est un rayonnement de type électromagnétique. Il est de même nature que le rayonnement X. Ce qui les différencie est leur origine. Le rayonnement gamma est issu de transitions nucléaires tandis que son homologue X est issu d'une transition électronique.

Le rayonnement gamma possède comme caractéristiques d'être moins ionisant que des particules alpha ou des électrons ; mais par contre, il est beaucoup plus pénétrant que ces derniers. On en conclut que pour pouvoir être détecté, le matériau constituant le volume du détecteur doit être suffisamment dense pour être capable d'arrêter le rayonnement gamma. De ce fait, on privilégie l'utilisation de détecteur solide. La relation d'atténuation des photons gamma dans la matière est donnée par la loi de Beer-Lambert :

$$I(x) = I_0 \exp(-\mu x) \quad (1)$$

où  $I_0$  est intensité du rayon incident  
 $x$  est épaisseur du matériau  
 $\mu$  est le coefficient d'absorption (dépend du matériau)

Le rayonnement gamma est détecté de manière indirecte. Ce sont les particules chargées qu'il crée dans le détecteur qui sont détectés. Les principaux mécanismes d'interaction du rayonnement gamma avec la matière sont

- *l'effet photoélectrique (EP)* : L'énergie des photoélectrons est identique.
- *l'effet Compton (EC)* : L'énergie des électrons Compton est distribuée de manière continue.
- *la production de paire (PP)*

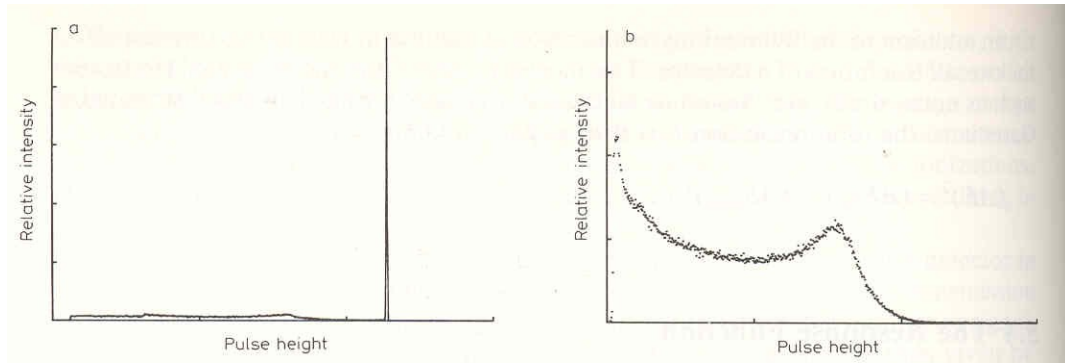


Figure 1 Voici la fonction de réponse pour un rayonnement gamma de 661keV de 2 detecteurs différents : a) detecteur Ge : La section efficace EP est plus importante que celle de EC b) Scintillateur organique : la section efficace EF est la plus importante

Les gamma sont plus efficacement détectés par les matériaux possédant un Z élevé. Ceux-ci possèdent une section efficace importante d'effet photoélectrique et de production paire électron trou comparé à celle de diffusion Compton. La dépendance des sections efficaces en Z est pour EP  $Z^5$ , pour PP  $Z^2$ , et pour EC Z.

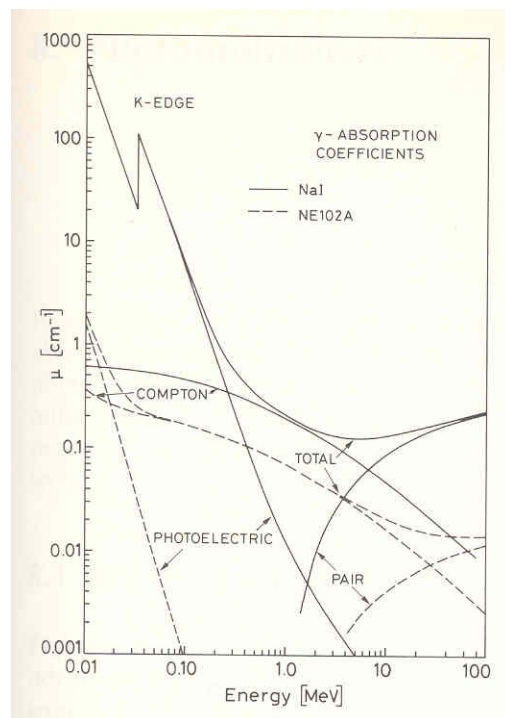


Figure 2 Graphe du coefficient d'atténuation en fonction de l'énergie du rayonnement gamma incident pour 2 types de détecteurs (inorganique NaI et plastique NE102A)

Il nous faut un détecteur dont la densité soit suffisante pour arrêter le rayonnement gamma ; le matériau servant à la détection doit posséder une section efficace importante d'effet photoélectrique. Notre choix s'est posé sur le détecteur à scintillation NaI(Tl). Le rayonnement gamma qui sera détecté à l'aide du scintillateur sera de 140 keV. A cette énergie, on remarque sur la figure 2, que la contribution principale est l'effet photoélectrique. On devrait observer un pic semblable à celui de la figure 1 a) avec un bord Compton plus important. Dans la suite du travail, on comparera le détecteur NaI(Tl) à un détecteur plastique.

### 3 SCINTILLATEUR

#### 3.1 Introduction

Les matériaux scintillants possèdent la propriété de *luminescence*. Lorsqu'ils sont exposés à une certaine forme d'énergie (lumière, chaleur, radiation, etc. ...) ; ils l'absorbent et puis la réémettent sous la forme de lumière visible. Si cette réémission se produit après l'absorption ou plus précisément endéans les  $10^{-8}$ sec (temps d'une transition atomique), le processus ainsi défini est appelé *fluorescence*. Si par contre la réémission se fait après  $10^{-8}$ sec, le processus porte le nom de *phosphorescence*.

#### *Scintillateur inorganique*

En première approximation, l'évolution en fonction du temps du processus de réémission peut être décrit comme ceci

$$N = \frac{N_0}{\tau_d} \exp\left(\frac{-t}{\tau_d}\right) \quad (2)$$

- où  $N$  est le nombre de photons émis au temps  $t$   
 $N_0$  est le nombre total de photons émis  
 $\tau_d$  est la constante radioactive

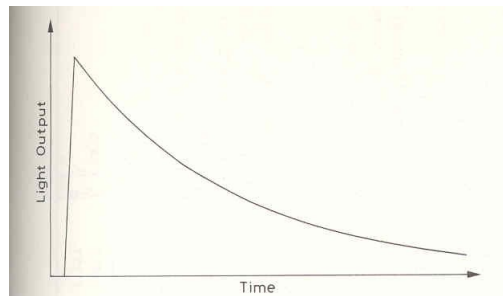


Figure 3 Illustration de l'équation (1)

Le temps requis pour monter de 0 au maximum de l'impulsion est d'habitude moins rapide que le temps de décroissance. Il est pris à zéro pour simplifier.

La première approximation ne fonctionne pas pour tous les cas. On utilise alors une formule un peu plus compliquée.

$$N = A \exp\left(\frac{-t}{\tau_f}\right) + B \exp\left(\frac{-t}{\tau_s}\right)$$

- où  $\tau_s$  et  $\tau_f$  sont des constantes de décroissance

Pour tous les scintillateurs, une composante est plus rapide que l'autre. De ce fait, on parle de composante *rapide* et de composante *lente* ( $s$  pour *slow* et  $f$  pour *fast*). En général, c'est la composante rapide qui domine. L'amplitude  $A$  et  $B$  varie d'un type de matériau à un autre.

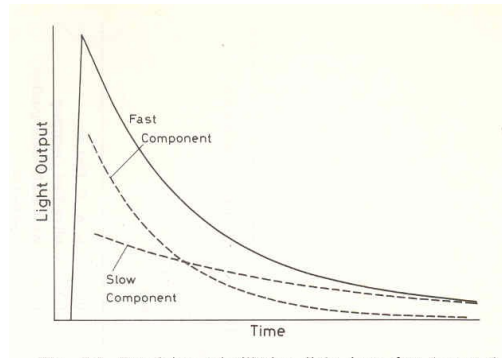


Figure 4 Illustration de l'équation (2)

### Scintillateur plastique

Une de leurs caractéristiques principales est leur temps de décroissance très rapide (quelques nanosecondes). De ce fait, on néglige le temps de montée de l'impulsion lumineuse. Voici la formule décrivant cette dernière :

$$N(t) = N_0 f(\sigma, t) \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (3)$$

où  $f(\sigma, t)$  est l'équation d'une gaussienne avec un écart type de  $\sigma$

### 3.2 Généralités

Les caractéristiques pour qu'un matériau scintillateur soit bon pour la détection sont :

- Grande efficacité pour convertir l'énergie d'excitation en radiation fluorescente.
- Transparent à ses radiations fluorescentes pour permettre ainsi la transmission de la lumière
- Emission dans une gamme spectrale en accord avec la réponse spectrale d'excitation du photomultiplicateur.
- Une petite constante de décroissance  $\tau$

Scintillateur	Densité	Index de réfraction	Melting softnin g or boiling point Ca	Light output response (% antracène)	Cst de Décroissance Composante principale (ns)	Longueur d'onde de l'émission max (nm)	Principal application
Anthracène	1.25	1.62	217	100	30	447	$\gamma, \alpha, \beta$ , fast n
Stilberne	1.16	1.626	125	50	4.5	410	fast n, $\gamma$
NaI(Tl)	3.67	1.775	650	232	230	413	$\gamma$ , x-rays
NaI (pure)	3.67	1.775	651	440	60	303	$\gamma$ , x-rays
LiI(Eu)	4.06	1.955	445	75	1200	475	(fc*)
CsI(Tl)	4.51	1.788	620	95	1100	580	n hp, $\gamma$

Tableau 1 Propriétés physiques de plusieurs scintillateurs

\*Fc =fast counting

### Scintillateur inorganique

Le scintillateur qu'on utilise est du type cristal inorganique. Ce sont principalement des cristaux d'alcalins contenant une petite quantité d'impureté. Nous utilisons le NaI(Tl) avec le Thallium comme impureté activatrice. La figure qui suit présente le spectre de lumière émise par différents types de cristaux.

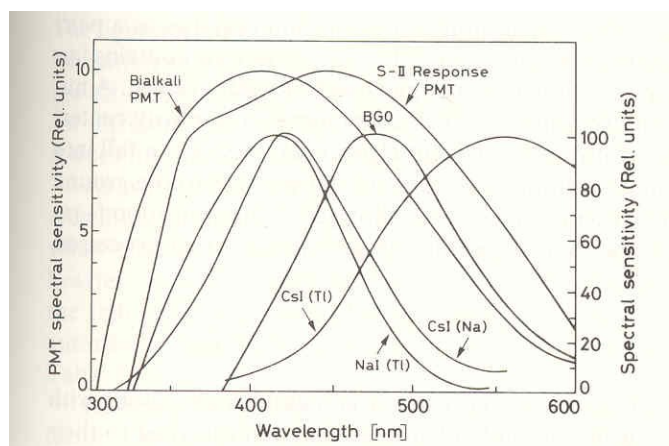


Figure 5 Spectre d'émission lumineuse pour différents cristaux inorganiques

Un des désavantages de ce type de cristaux est leur tendance hygroscopique (absorption de l'humidité de l'air). Pour protéger le scintillateur de l'humidité, il est mis dans une enceinte à l'abri de l'air.

Un des avantages tient dans le fait que ce type de cristaux possède un grand stopping power (due à une densité élevée et un nombre atomique élevé de ses composants). Il possède aussi une lumière de sortie importante, ce qui implique une meilleure résolution en énergie.

### Scintillateur plastique

Les scintillateurs organiques sont composés hydrocarbures aromatiques (ils possèdent dans leurs molécules au moins un cycle de carbone de type benzène).

Le scintillateur plastique est une solution de scintillateurs organiques dans un solvant plastique. Celui qu'on étudie est composé d'un plastique en polyvinyltoluène

La lumière est produite par des transitions réalisées par les électrons libres de valence des molécules.

Il existe 3 catégories de scintillateur :

- les cristaux organiques
- les liquides organiques
- les plastiques organiques (ceux qui nous intéressent)

### 3.3 Light output response

Le Light output response d'un scintillateur est l'efficacité avec laquelle l'énergie d'ionisation est convertie en photon. C'est une quantité importante car elle définit l'efficacité et la résolution d'un scintillateur. La lumière en sortie est différente pour des particules différentes même si elles sont de même énergie. Pour une particule donnée, elle ne varie pas de manière linéaire avec l'énergie. Quelques valeurs de light output response pour différents types de scintillateur se retrouve dans le tableau 1.

### 3.4 Linéarité

En approximant, on a supposé que le scintillateur répondait de manière linéaire selon l'énergie excitatrice. Cette réponse est la lumière fluorescente  $L$  qui est directement proportionnel à l'énergie  $E$  déposé par la particule ionisante.

$$L \propto E \quad (4)$$

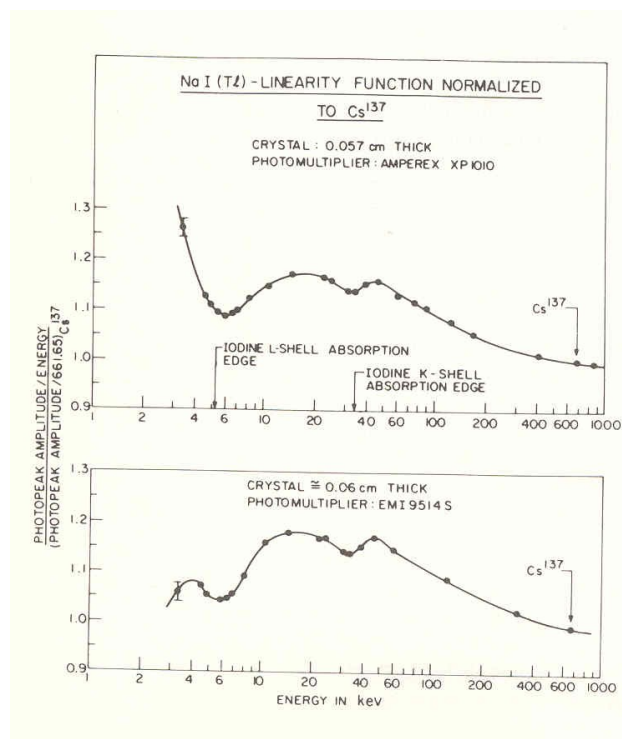


Figure 6 Réponse du NaI(Tl)

### 3.5 Dépendance vis-à-vis de la température

Le light output response est une fonction de la température. Dans le cas des scintillateurs plastiques, la lumière en sortie est indépendante de la température entre  $-60^{\circ}\text{C}$  et  $+20^{\circ}\text{C}$ . Pour les scintillateurs inorganiques la figure suivante illustre cette dépendance vis-à-vis de la température.

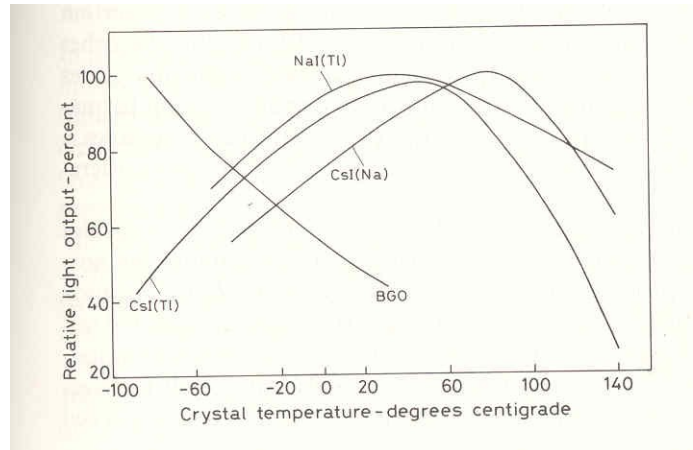
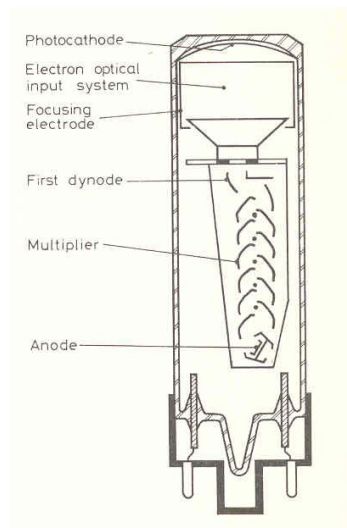


Figure 7 Variation en fonction de la température de la lumière en sortie pour des cristaux inorganiques

## 4 PHOTOMULTIPLICATEUR

### 4.1 Introduction



Un photomultiplicateur ou PM permet de convertir la lumière en un courant électrique mesurable.

Le photomultiplicateur comprend

- une cathode ou photocathode construite à partir d'un matériau photosensible ;
- d'un système permettant la collecte des électrons appelé *multiplicateur*. Ce dernier est composé de *dynodes* ;
- une anode duquel on peut extraire le signal final.

Le tous se trouvent sous le vide

Lors de l'utilisation une haute tension est appliquée à tout le dispositif (cathode, dynode, anode).

Figure 8 schéma d'un photomultiplicateur

### 4.2 Principe

Lorsqu'un photon incident venant du scintillateur atteint la photocathode, un électron est émis par effet photoélectrique. Grâce à la tension appliquée au dispositif, l'électron est accéléré vers la première dynode du multiplicateur. Il transfère alors son énergie à d'autres électrons de la dynode. Cela provoque une émission d'électrons secondaires qui sont à leur tour accélérés vers la deuxième dynode et ainsi de suite. L'anode collecte ensuite les nombreux électrons issus de ce processus ; cela permet de donner un courant qui pourra être analysé et amplifié par la suite.

Le photomultiplicateur peut fonctionner selon deux modes :

- *un mode continue* : il fonctionne sous une illumination continue

- *un mode pulsé* : il fonctionne sous un mode pulsé

Que ce soit dans l'un ou l'autre mode, si la cathode et la multiplicateur sont supposés être linéaire, le courant à la sortie du PM sera directement proportionnelle aux nombres de photons incidents.

### 4.3 Photocathode

Le rôle de la photocathode est de convertir la lumière en courant d'électrons issus de l'effet photoélectrique. Pour faciliter le passage de cette lumière, le matériau photosensible est déposé dans une fine couche à l'intérieur de la fenêtre (quartz ou verre) du PM.

Soit

$$E = h\nu - \phi \quad (5)$$

- où E est l'énergie cinétique de l'électron émis
- $\nu$  la fréquence de la lumière incidente
- $\Phi$  le travail d'extraction

L'efficacité de la conversion photoélectrique varie grandement avec la fréquence de la lumière incidente et la structure du matériau.

La réponse spectrale globale est exprimée par l'efficacité quantique :

$$\eta(\lambda) = \frac{\text{nombre de photoélectrons libérés}}{\text{nombre de photons incidents sur la cathode}(\lambda)} \quad (6)$$

- où  $\lambda$  est la longueur d'onde de la lumière incidente

Pour les métaux, l'efficacité quantique est de 0.1% c'est-à-dire qu'il faut 1000 photons pour créer 1 photoélectron. Pour les semiconducteurs, l'efficacité quantique est de l'ordre de 10 à 30 %.

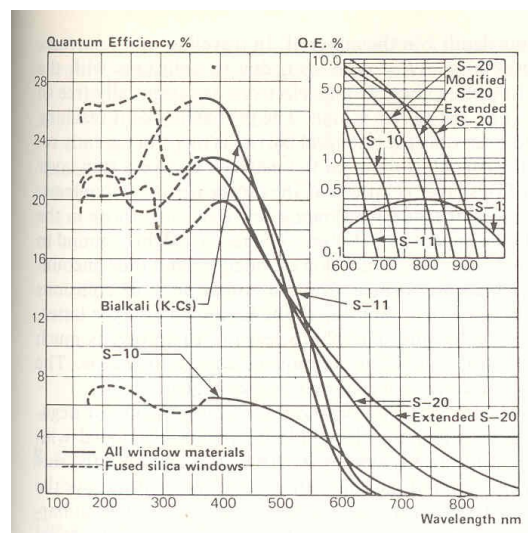


Figure 9 Efficacité quantique de différentes photocathodes

A noter qu'on parle aussi de *sensibilité lumineuse de la cathode* qui se définit comme le courant par lumen de flux de lumière incident. Mais elle est délaissée car elle est définie à partir de l'unité subjective qu'est le lumen.

#### 4.4 System input electron optical

Le rôle du optical system input est de focaliser sur la 1<sup>er</sup> dynode du multiplicateur, les électrons issus de la photocathode.

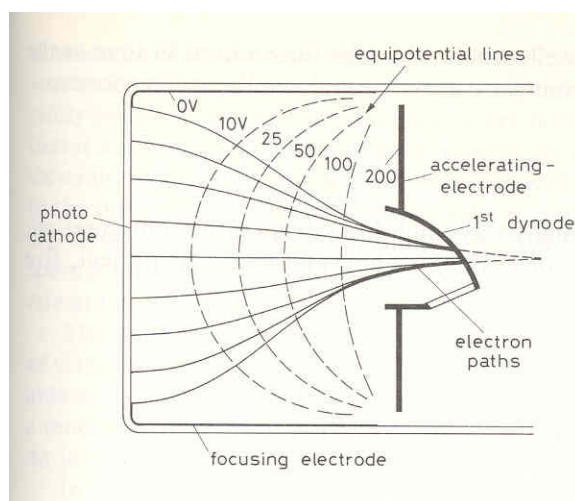


Figure 10 Le système d'electron optical input d'un PM

Il faut savoir que 2 conditions doivent être remplies :

- La 1<sup>er</sup> dynode doit collecter le plus possible d'électrons
- Le temps nécessaire pour un électron pour parcourir le chemin entre la cathode et la 1<sup>er</sup> dynode doit être indépendant le plus impossible du point d'émission.

#### 4.5 Le multiplicateur

Le multiplicateur d'électrons amplifie le faible courant d'origine due aux photoélectrons, en utilisant une succession de dynodes pour produire un courant mesurable sur l'anode du photomultiplicateur.

Le gain de chaque électrode est appelé le *facteur d'émission secondaire*  $\delta$ . La théorie relative à tout ceci est pareille à celle pour le photon ; sauf que celui-ci est remplacé par l'électron.

Les matériaux utilisés pour la dynode sont Ag-Mg, Cu-Be et Cs-Sb. Ils ont comme avantages d'avoir :

- un facteur d'émission secondaire élevé
- une stabilité de l'effet d'émission secondaire sous un grand courant
- un bruit de fond petit (une émission thermionique<sup>1</sup> petite)

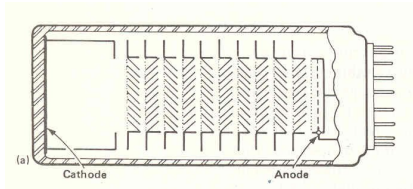
Le multiplicateur contient en général 10 à 14 étages d'amplifications ; donnant à la fin un gain de  $10^7$ .

<sup>1</sup> Voir Annexe

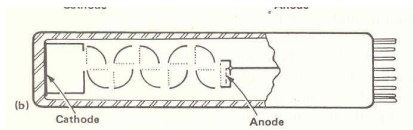
### 4.5.1 La configuration des dynodes

Il existe 5 types de configurations :

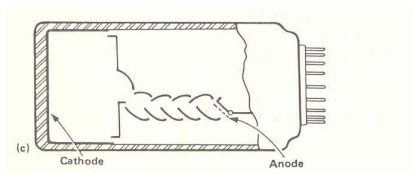
a) Venetian blind



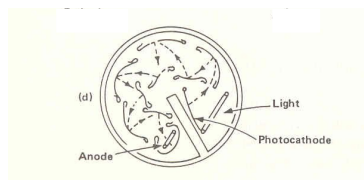
b) Box and grid



c) Linear focus



d) Circular focused



e) Microchannel plate

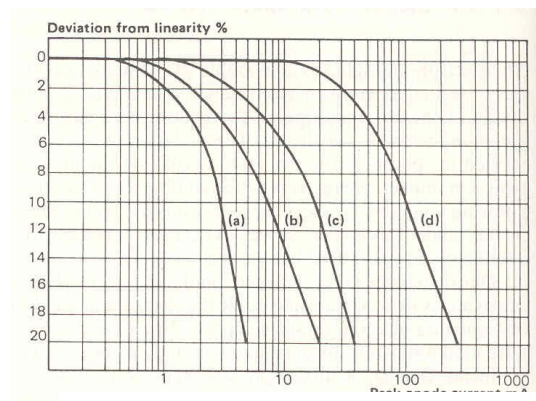


Figure 11 Linéarité des différents types de dynode

## 4.6 Multiplier response : Le spectre de l'unique électron

Le système de multiplication des électrons doit produire un gain constant pour toutes les énergies données d'électrons entrant dans le multiplicateur. En pratique, cela n'est pas possible due au caractère aléatoire du processus d'émission des électrons secondaires. Une bonne mesure de l'étendue des fluctuations dans une chaîne de multiplications est donnée par *le single electron spectrum*. C'est le spectre de pulses de la sortie du PM due à l'arrivée d'un seule électron dans le système de multiplication. Cette distribution donne la réponse du système de multiplication.

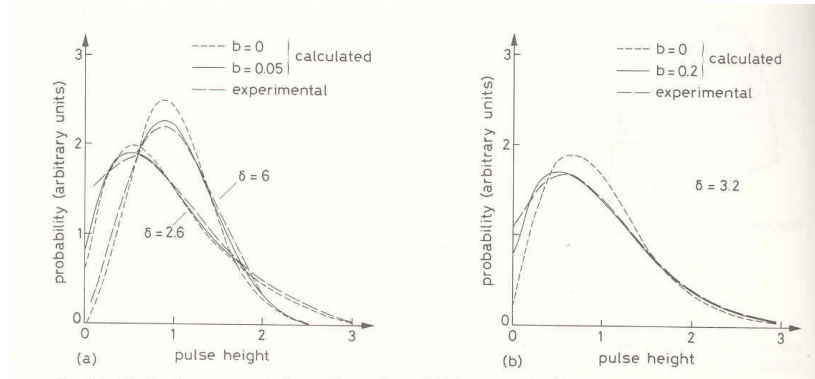


Figure 12 Spectre du single electron pour a) un PM linear-focused b) un PM venetian blind

## 4.7 Paramètres d'exploitation

### 4.7.1 Le gain et la tension à fournir

Le gain du PM dépend

- du nombre de dynodes du multiplicateur
- du facteur d'émission secondaire  $\delta$

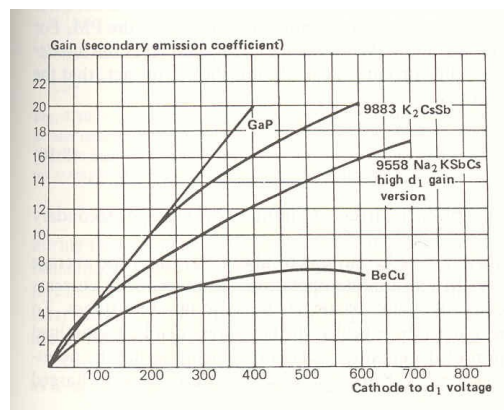


Figure 13 Facteur d'émission secondaire pour différents matériaux de dynode

Dans la chaîne de multiplications, l'énergie des électrons incidents sur chaque dynode dépend clairement de la différence de potentiel entre les dynodes :

$$\delta = KV_d \quad (7)$$

En supposant que la différence de potentiel appliquée entre chaque dynode est identique, le gain total de la PM est

$$G = \delta^n = (KV_d)^n \quad (8)$$

A partir de la relation précédente, on peut calculer le nombre d'étage  $n$  d'amplification pour avoir un gain donné avec un minimum de différence de potentiel  $V_b$  appliquée (on limite le bruit de fond).

$$V_b = nV_d = \frac{nG^{1/n}}{K} \quad (9)$$

$$\frac{dV_b}{dn} = \frac{1}{K}G^{1/n} - \frac{n}{K} \frac{G^{1/n}}{n^2} \ln G = 0 \quad n = \ln G \quad (10)$$

Autre relation importante est la variation de gain en fonction de la tension appliquée :

$$\frac{dG}{G} = n \frac{dV_d}{V_d} = n \frac{dV_b}{V_b} \quad (11)$$

Exemple :  $n=10$  ; une variation de 1% de  $V_b$  implique une variation du gain de 10%.

#### 4.7.2 Voltage divider

Pour stabiliser la tension appliquée aux dynodes, on utilise un voltage divider. Ce dernier est une chaîne de résistances choisie de manière à produire une tension désirée à chaque dynode. Le voltage divider est un dispositif qui vient juste après le PM.

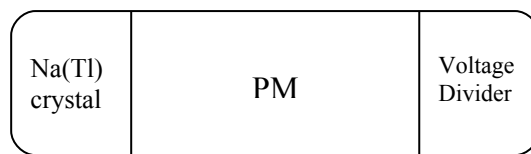


Figure 14 Schéma de l'emplacement du voltage divider

#### 4.7.3 Linéarité : courant de l'électrode

La linéarité du PM dépend

- du type de dynode
- du courant dans le PM

En général, la linéarité du PM nécessite que le courant à chaque étage soit entièrement défini. Cela permet de garder une stricte proportionnalité avec le courant initial de la cathode. La figure qui suit donne le graphe du courant de l'anode et de la cathode en fonction de la tension appliquée.

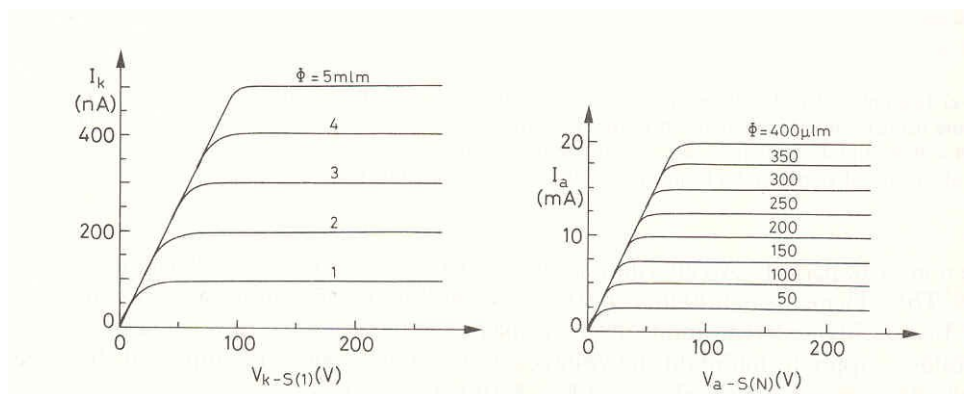


Figure 15 Caractéristiques courant - tension de la cathode et de l'anode d'un PM sous différentes intensités lumineuses

#### 4.7.4 La forme du pulse

Le signal de sortie à l'anode est un courant ou impulsion de charge dans lequel la charge totale est proportionnelle au nombre initial d'électrons émis par la photocathode. A noter que le photomultiplicateur satisfait les caractéristiques d'un générateur de courant idéal. On peut donc assimiler le système formé par le PM a un générateur de courant, une résistance R et une capacité C (qui sont la résistance et capacitance de l'anode plus d'autres contributions moindres). A partir de ce modèle, analysons la forme du signal de sortie. Supposons que la sortie est une lumière due à un scintillateur (décrit par une constante décroissance), le courant à l'anode est donné par

$$I(t) = \frac{GNe}{\tau_s} \exp\left(-\frac{t}{\tau_s}\right) \quad (12)$$

où G est le gain du PM  
 N est le nombre de photoélectrons émis par la cathode  
 e est la charge de l'électron  
 $\tau_s$  est constante du décroissance du scintillateur

On a une équation de la forme

$$I(t) = \frac{V}{R} + C \frac{dV}{dt} \quad (13)$$

qui a comme solution  $\tau = RC$

$$\begin{aligned} V(t) &= -\frac{GNeR}{\tau - \tau_s} e \left[ \exp\left(-\frac{t}{\tau_s}\right) - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right] & \tau \neq \tau_s \\ &= \left( \frac{GNeR}{\tau^2} \right) t \exp\left(-\frac{t}{\tau_s}\right) & \tau = \tau_s \end{aligned} \quad (14a-14b)$$

$\tau \ll \tau_s$ :

Le signal est petit mais reproduit fidèlement la décroissance du final initiale. Le temps de montée est rapide et est essentiellement donné par le  $\tau$  du circuit de sortie. On parle de *current mode*.

$\tau \gg \tau_s$ :

L'amplitude du signal devient large mais ainsi que le temps de montée est approximativement  $\tau_s$ . On appelle ce mode, le *voltage mode*.

En général, on utilise le voltage mode. Mais la longue constante de décroissance ne permet pas de grands taux de comptage. Par contre, Le fonctionnement en current mode permet les hauts taux de comptage. Néanmoins, le signal de sortie est plus petit et donc plus sensible aux fluctuations due à la cathode.

#### 4.7.5 Le temps de réponse et la résolution

Le temps de réponse est affecté par 2 choses :

- La variation dans le temps de transit des électrons à travers le PM  
 Elle est due à l'énergie de l'électron et la proximité à la première dynode.
- Les fluctuations dues au bruit statistique.

#### 4.7.6 Noise

Lorsqu'un photomultiplicateur n'est pas illuminé, on peut mesurer un petit courant qui est appelé *dark current*.

Les sources d'un tel courant sont dues à :

- l'émission thermionique de la cathode et de la dynode
- perte de courant
- contamination radioactive (sur la fenêtre du détecteur)
- phénomène d'ionisation (gaz resté dans le PM qui est ionisé par les électrons)
- phénomène lumineux
- bruit thermique (le plus important)

Pour illustrer le dernier point, l'équation de Richardson :

$$I = AT^2 \exp\left(-\frac{e\phi}{kT}\right) \quad (15)$$

- où
- A est une constante
  - $\Phi$  est le travail d'extraction
  - T est la température (Kelvin)
  - k est la constante de Boltzmann

#### 4.7.7 Le bruit statistique

Le bruit statistique est une conséquence du caractère statistique de la photoémission et de l'émission des électrons secondaires. On observe que le courant sur l'anode varie autour d'une valeur moyenne. Cette variation est donnée par

$$\langle \Delta I^2 \rangle = \frac{Ie}{\tau} \quad (16)$$

- où
- I est un le courant de la cathode
  - e est la charge électrique de l'électron
  - $\tau$  est le temps pendant lequel la photocathode collecte des photons

## 5 LE DETECTEUR A SCINTILLATION (SCINTILLATEUR + PM)

### 5.1 Principe

Le principe de base est d'abord une radiation qui passe à travers le scintillateur. Elle excite les atomes et les molécules du scintillateur qui produisent de la lumière. Cette dernière est transmise au photomultiplicateur où elle sera convertie en un faible courant de photoélectrons. Ce courant sera ensuite amplifié par un système de multiplicateur d'électrons. Le courant résultant est ensuite analysé par un système électronique.

Voici le schéma général d'un détecteur à scintillation :

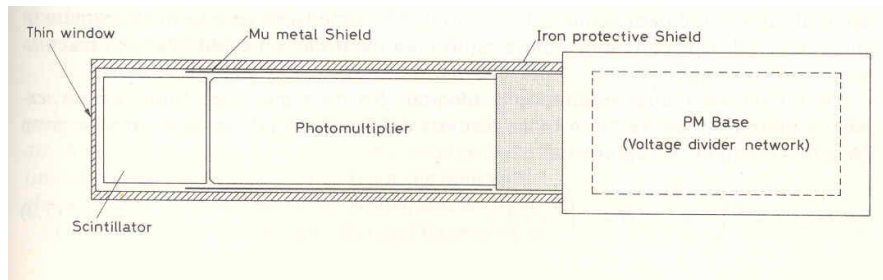


Figure 16 Schéma général d'un détecteur à scintillation

## 5.2 Caractéristiques

Les deux caractéristiques importantes qui doivent être prise en compte dans un détecteur à scintillation sont :

- la collection lumineuse
- le transport de la lumière

### 5.2.1 La collection lumineuse

La perte de lumière d'un scintillateur est due à 2 choses :

- la perte par les bords du scintillateur

C'est la plus importante cause de perte lumineuse. La lumière émise par le scintillateur voyage dans toutes les directions. Seulement une fraction de cette lumière atteint directement le PM. Le reste de lumière est réfléchi sur les bords du scintillateur. Selon l'angle d'incidence, plusieurs choses peuvent se produire. Si la lumière est réfléchi avec un angle supérieur à celui de Brewster qui est donné par

$$\theta_B = \sin^{-1} \left( \frac{n_{out}}{n_{scint}} \right) \quad (17)$$

où  $n_{scint}$  est l'indice de réfraction du scintillateur

$n_{out}$  est l'indice de réfraction du milieu entourant le scintillateur ,

alors il se produit une réflexion totale. Dans le cas contraire, une partie de la lumière est partiellement transmise et l'autre réfléchi. Ce qui implique une diminution de l'efficacité et de la résolution en énergie du détecteur. Pour contrer cela, on entoure le scintillateur d'un réflecteur (Al, MgO, TiO<sub>2</sub>) de lumière.

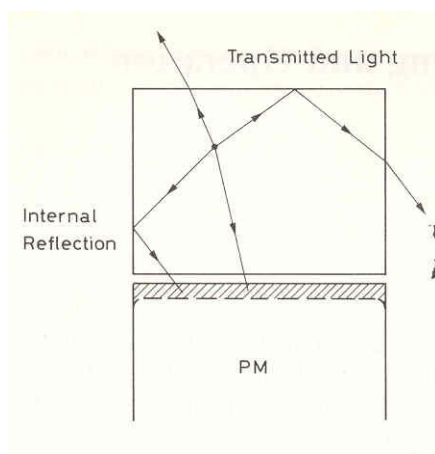
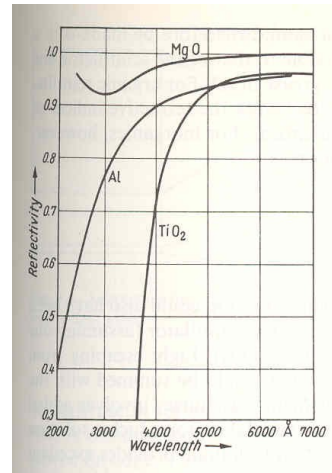


Figure 17 Collecte de lumière dans scintillateur typique

Figure 18 Réflectivité de différents matériaux



- l'absorption par le matériau scintillant

Pour les petits détecteurs, comme le notre, cette contribution est négligeable. Pour s'en convaincre voici la formule de l'intensité lumineuse :

$$L(x) = L_0 \exp\left(\frac{-x}{l}\right) \quad (18)$$

- où l est la longueur d'atténuation ( longueur après laquelle l'intensité lumineuse diminue d'un facteur e ≈ 1m)
- x le chemin parcourue par la lumière
- L<sub>0</sub> est l'intensité initiale de la lumière

### 5.3 Contact entre le scintillateur et le PM

Pour assurer le contact entre le scintillateur et le PM, on utilise un matériau qui a un indice de réflexion proche du scintillateur et de la fenêtre du PM. En général, on utilise de la graisse de silicone ou de l'huile.

## 6 CHAINE DE DETECTION

Brièvement, on va passer en revue les différents étages de la chaîne de détection liée au type de détecteur qui nous intéresse.

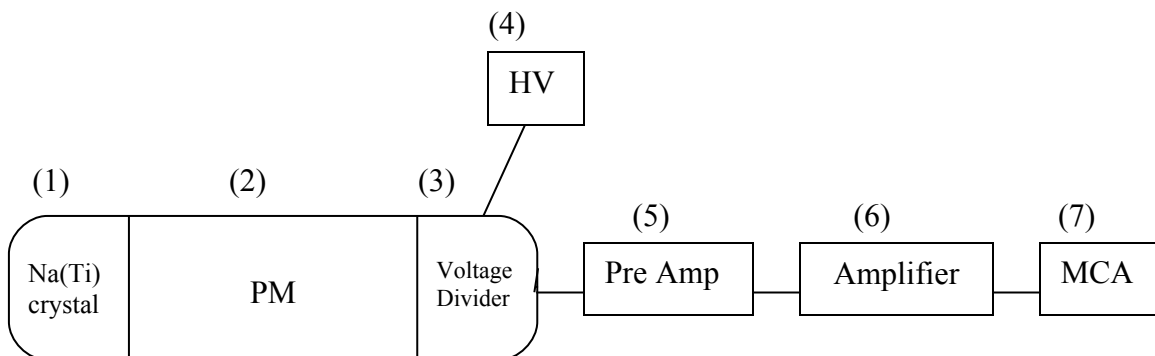


Figure 19 chaîne de détection typique pour un détecteur à scintillation

Le PM est alimenté par une haute tension (4) qui est connectée au voltage divider (3). Ce dernier démultiplie la tension pour qu'elle soit appliquée aux dynodes. Le pre amplificateur (5) est un amplificateur du type « charge integrating amplifier ». Il collecte la charge en sortie du PM ; et à partir de ce dernier, il génère un pulse de tension. L'amplificateur (6) sert à

amplifier le signal de tension de quelques centaines de millivolts à quelques volts. Il permet aussi de modifier la forme du signal pour la faire correspondre le plus possible à une gaussienne. Ensuite ce signal est transmis au Multi channel analyser (7). Le MCA est un voltmètre sophistiqué avec une mémoire. Il permet la mesure de l'amplitude de la tension du signal, et la mesure d'un nombre de coups qu'il garde en mémoire.

## 7 COMPARAISON DES 2 SCINTILLATEURS : BC408 et NaI(Tl)

Le tableau qui suit donne une comparaison de certaines propriétés des 2 scintillateurs.

	BC 408 (scintillateur plastique)	NaI(Tl) (scintillateur inorganique)
1) densité (gr/cm <sup>3</sup> )	1,032	3,67
2) Coeff. d'atténuation $\mu$ (1/cm)	~0.2	~2
2) indice de réfraction	1,58	1,85
3) light output %Anthracene	64	230
4) decay time(ns)	2,1	250

Tableau 2 Comparaison entre le scintillateur inorganique et le scintillateur plastique

Pour la détection des rayons gamma, le scintillateur NaI(Tl) est privilégié sur son homologue plastique. En effet, le problème est qu'il faut que le détecteur puisse stopper le rayonnement dans sa partie active. Cette notion est exprimée par le coefficient d'atténuation  $\mu$  qui est exprimé en cm<sup>-1</sup>. Le coefficient d'atténuation du NaI(Tl) est 10 fois plus grand que celui du scintillateur plastique. Voici la raison majeure pour laquelle, on privilégie le scintillateur inorganique.

On remarque comme autre grande différence entre les deux types de scintillateurs, que la résolution du NaI(Tl) est plus importante que celle du BC408 (à travers le point 4) Light output % anthracène).

Pour des applications de détection de sources possédant une grande activité, le scintillateur plastique est plus adéquat. En effet, son decay time est 120 fois plus petit que celui du détecteur inorganique.

## 8 Conclusion

Le premier but de ce travail fut d'expliquer le principe de fonctionnement d'un détecteur à scintillation. Pour cela, on a d'abord commencé par passer en revue les mécanismes d'interaction du rayonnement gamma avec la matière. Ensuite, on a expliqué ce qu'était un scintillateur, en exposant quelque une de ses caractéristiques. On a fait de même pour le photomultiplicateur. Et nous terminions avec le détecteur à scintillation. Ensuite, on exposait une chaîne de détection classique pour ce type de détecteur. Et nous terminions par une comparaison entre le scintillateur inorganique et organique. Cette dernière étape constituait le second but du travail, c'est-à-dire, expliquer pourquoi on avait privilégié le détecteur NaI(Tl) plutôt qu'un autre.

# ANNEXES

## I Rappel

### 1) Sensibilité

Elle se définit comme la capacité d'un détecteur, de produire un signal utilisable pour un type donné radiation et d'énergie. La sensibilité d'un détecteur pour un type donné de radiation d'une certaine énergie dépend de plusieurs facteurs :

- La section efficace d'ionisation dans le détecteur
- La masse du détecteur
- Le bruit de fond du détecteur
- Le matériau protégeant le volume sensible du détecteur.

### 2) La réponse du détecteur

En général, le signal en sortie des détecteurs électriques est une impulsion de courant. La quantité d'ionisation est reflétée dans la charge électrique contenu dans le signal. Supposons que la forme de l'impulsion ne change pas d'un événement à l'autre, alors l'intégrale est directement proportionnelle à l'amplitude du signal ou « pulse height ». La relation entre l'énergie de la radiation et la charge total ou le « pulse height » du signal de sortie est appelé *la réponse du détecteur*.

L'idéal est que cette réponse soit linéaire. Ce qui n'est pas toujours le cas. Elle est seulement en général pour une certaine gamme d'énergie.

### 3) La résolution en énergie

*La résolution en énergie* définit l'écart à partir duquel le détecteur peu distinguer 2 pics de proche en énergie. La résolution en énergie est donnée par le « Full Width at Half Maximum » ou FWHM. Si on envoie un faisceau mono énergétique sur le détecteur ; idéalement, on doit observer une impulsion delta. En réalité, on observe une gaussienne. Si l'épaisseur à mis hauteur du pic gaussien est donnée par  $\Delta E$ , la résolution à l'énergie  $E$  est donnée par

$$\text{Résolution} = \frac{\Delta E}{E} * 100$$

Dans le cas du détecteur NaI, il possède une résolution en énergie de 8% ou 9% pour un rayon gamma de 1MeV.

### 4) La fonction de réponse

La fonction de réponse est le spectre des « pulse heights » ou amplitude du signal observé par le détecteur lorsqu'il est bombardé par un faisceau mono énergétique d'une radiation donnée. Cette réponse est une gaussienne. Si néanmoins, on la considère comme une fonction delta de Dirac ; pour une énergie fixe de particule incidente, le signal de sortie possède une seule et fixe amplitude. Si la réponse est linéaire, le spectre de « pulse heights » mesurer du détecteur correspond directement au spectre d'énergie de la radiation incidente.

La fonction de réponse d'un détecteur à une certaine énergie dépend

- des différentes interactions que la radiation peut produire dans le détecteur
- du design du détecteur
- de la géométrie du détecteur.

### 5) Le temps de réponse

Le temps de réponse est le temps pendant lequel le détecteur met en forme le signal après l'arrivée de la radiation.

### 6) L'efficacité du détecteur

L'efficacité du détecteur se divise en 2 catégories : *L'efficacité absolue* et *l'efficacité intrinsèque*.

L'efficacité absolue ou totale d'un détecteur se définit comme :

$$\varepsilon_{tot} = \frac{\text{événements enregistrés}}{\text{événements émis par la source}}$$

Elle est fonction de

- la géométrie du détecteur
- la probabilité d'interaction dans le détecteur.

Considérons un détecteur cylindrique avec la source à une distance  $d$  sur l'axe de détection.

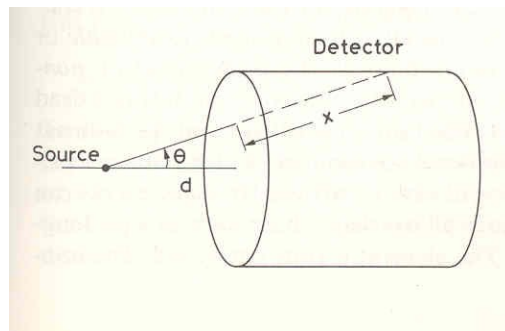


Fig. I Schéma d'un détecteur

Si la source émet de manière isotrope, alors la probabilité que la particule soit émise à un angle  $\theta$  est :

$$P(\theta) d\Omega = \frac{d\Omega}{4\pi} \quad (I)$$

La probabilité que la particule frappant le détecteur aura une interaction dans le détecteur est donné par

$$P_{int}(x) = 1 - \exp(-wx) \quad (II)$$

En combinant les deux dernières relations, on obtient

$$d\varepsilon_{tot} = \left[ 1 - \exp\left(-\frac{x}{\lambda}\right) \right] \frac{d\Omega}{4\pi} \quad (III)$$

où  $x$  est le chemin parcouru dans le détecteur  
 $\lambda$  le parcours moyen pour qu'il se produise une ionisation.

L'efficacité total est trouvé en intégrant la relation précédent sur le volume du détecteur.

L'efficacité total peut être se diviser en 2 partie : *l'efficacité intrinsèque*  $\epsilon_{int}$ , et *l'efficacité géométrique*  $\epsilon_{geom}$ . On a que

$$\epsilon_{tot} \cong \epsilon_{int} \epsilon_{geom} \text{ (IV)}$$

L'efficacité intrinsèque se définit comme

$$\epsilon_{int} = \frac{\text{évènements enregistrés}}{\text{évènement parvenant au détecteur}} \text{ (V)}$$

Cette probabilité dépend de la section efficace d'interaction de la radiation incidente dans le milieu réactif du détecteur.

L'efficacité intrinsèque est une fonction du type de radiation, de son énergie et du matériau constituant le détecteur.

### 7) Le temps mort

Le temps mort est le temps qu'il faut au détecteur pour traiter un évènement qui est habituellement en relation avec la durée de l'impulsion du signal.

## II Emission thermoïonique

Une **émission thermoïonique** est un flux d'électrons provenant d'un métal ou d'un oxyde métallique, qui est provoqué par les vibrations des atomes dû à l'énergie thermique lorsque ceux-ci parviennent à surmonter les forces électrostatiques. L'effet croît de manière importante avec l'augmentation de la température, mais est toujours présent pour les températures au-dessus du zéro absolu. La science en rapport avec ce phénomène est la **thermoélectronique**. Les particules chargées sont appelées **thermions**.<sup>2</sup>

## II BIBLIOGRAPHIE

Techniques for nuclear and particles physics Experiments : How to Approach – W.R Leo – Springer Verlag – 1987  
[www.wikipedia.fr](http://www.wikipedia.fr)  
[www.saintgobain.com](http://www.saintgobain.com)

## III DATA SHEET

---

<sup>2</sup> Définition de Wikipédia

## Features

- Guaranteed resolution
- Low mass housing
- Less than 0.5 ppm of potassium
- Mu metal magnetic light shield

## Description

The Model 802 Scintillation Detector is a hermetically sealed assembly which includes a high resolution NaI(Tl) crystal, a photomultiplier tube, an internal magnetic/light shield, an aluminum housing, and a 14-pin connector.

The 802 series of NaI(Tl) detectors provides high efficiency and uniform response on both the cylindrical and well configurations. These detectors have a proven record of long term reliability and stability.

Any Model 802 assembly plugs directly into the Model 2007 Tube Base which provides power for the photomultiplier tube. Alternatively, the Model 802 can plug into the Model 2007P combination tube base and preamplifier.

Many crystal sizes are available, with the most common sizes listed below. Consult the factory for information on other sizes.

Model	Crystal Size mm (in.)	Resolution*	Outline Drawing	Well Dimensions mm (in.)	
				D	L
802-2x.5	51 x 13 (2 x .5)	15%	A	N.A.	N.A.
802-2x2	51 x 51 (2 x 2)	8.5%	A	N.A.	N.A.
802-2x2W	51 x 51 (2 x 2)	9.0%	B	16.66 (0.656)	39.27 (1.546)
802-3x3	76 x 76 (3 x 3)	7.5%	C	N.A.	N.A.
802-3x3W	76 x 76 (3 x 3)	9.0%	C	16.66 (0.656)	54.40 (2.063)

\*Resolution is specified at the 662 keV peak of <sup>137</sup>Cs except for 802-2 x .5 which is specified at 122 keV.

## Specifications

WINDOW – Aluminum, 0.5 mm thick; density 147 mg/cm<sup>2</sup>

REFLECTOR – Oxide; 1.6 mm thick; density 88 mg/cm<sup>2</sup>

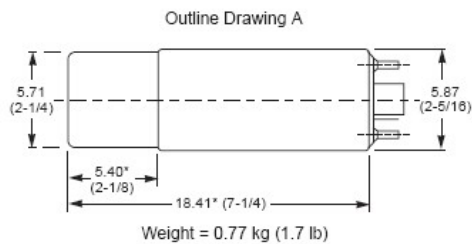
MAGNETIC/LIGHT SHIELD – Conetic lined steel

TYPICAL OPERATING VOLTAGES:

Cathode to Anode +1100 V dc

Dynode to Dynode +80 V dc

Cathode to Dynode +150 V dc



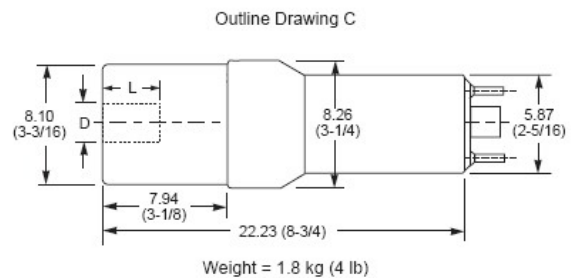
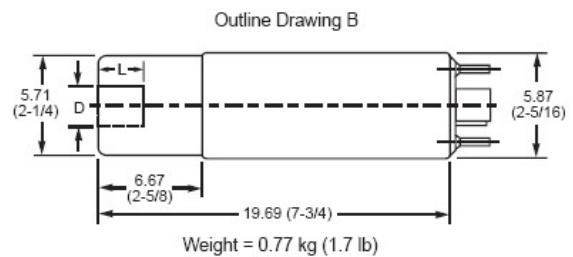
\*Deduct 3.8 (1.5) for 802-2 x .5



## OPTIONS

Model 2007 Tube Base with voltage divider and focus control.

Model 2007P Tube Base with voltage divider, focus control, and preamplifier.



Dimensions in the Outline Drawings are in cm (in.)

## Features

- Mounts directly on photomultiplier tube (PMT)
- Up to + 2 kV dc PMT bias
- Separate focus and gain controls
- Model 2007 has separate anode and dynode outputs
- Model 2007P combines tube base with low noise, charge sensitive preamplifier with HV transient protection

## Description

The Canberra Models 2007 and 2007P are compact PM tube bases containing a high-voltage divider network to supply all necessary bias voltages for most common 10-stage PM tubes. A focus control provides for optimization of detector resolution and a gain control permits trimming the HV bias when several tubes must be matched for array setups.

Designed for compatibility with the Canberra Model 802 Series scintillation detectors, or equivalent, the tube base connects directly to the PMT, providing one integrally mounted assembly.

The Model 2007 includes high-voltage blocking capacitors to couple the anode and dynode signal outputs to a preamplifier, such as the Canberra Model 2005, or to a constant fraction discriminator, such as the Canberra Model 2129.

The Model 2007P includes a preamplifier which integrates the charge impulse from the anode of the PM tube to a pulse-shaping main amplifier, such as the Canberra Model 2020. The preamp features high-voltage transient protection, noise contribution less than 0.1 fC rms, and a rise time of less than 20 ns.

## Specifications

### MODEL 2007

#### INPUTS

- HV – Accommodates PM tube bias up to + 2 kV dc, maximum.
- DETECTOR SIGNAL – Internally ac coupled to the anode (pin 11) and last dynode (pin 10).

#### OUTPUTS

- ANODE – Optional 50  $\Omega$  output resistance, shunt connected; ac coupled.
- DYNODE – Optional 50  $\Omega$  output resistance, shunt connected; ac coupled.

#### CONTROLS

- GAIN AND FOCUS – Screwdriver adjustable controls.

#### PERFORMANCE

- DIVIDER BIAS – Total resistance 7.2 M $\Omega$ , nominal; 10 dynodes at 75 V per kV dc of detector bias.
- FOCUS RANGE – +72 V to +145 V per kV dc of detector bias.
- GAIN RANGE – Varies total PM tube bias between 92% and 100% of applied high voltage.

#### CONNECTORS

- ANODE and DYNODE – BNC.
- HV – SHV.
- PM TUBE SOCKET – Cinch Jones 3M-14.



#### POWER REQUIREMENTS

HV – 0-2 kV dc at 0-300  $\mu$ A.

#### PHYSICAL

SIZE – 7.6 x 5.8 cm (3 x 2.3 in.) (1 x d).

NET WEIGHT – 0.14 kg (0.3 lb).

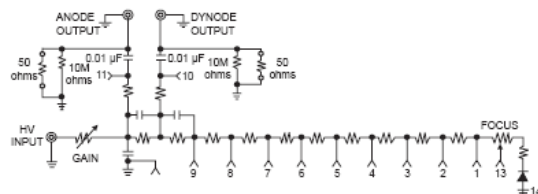
SHIPPING WEIGHT – 1.1 kg (2.3 lb).

#### ENVIRONMENTAL

OPERATING TEMPERATURE – 0 to 50  $^{\circ}$ C.

OPERATING HUMIDITY – 0-80% relative, non-condensing.

Tested to the environmental conditions specified by EN 61010, Installation Category I, Pollution Degree 2.



Model 2007 Functional Schematic

**MODEL 2007P**

**INPUTS**

**DETECTOR SIGNAL** – The preamp input is ac coupled internally to the anode through pin 11 of the PM tube socket.

**HV** – Accommodates PM tube bias up to 2 kV dc maximum.

**TEST** – Positive or negative tail pulse from test pulse generator; charge coupled at 30 pC/V;  $Z_{in} = 93 \Omega$ .

**PREAMP POWER** –  $\pm 12$  V dc from associated main amplifier through compatible cable provided.

**OUTPUTS**

**PREAMP SIGNAL** – Inverted tail pulse; rise time  $< 20$  ns; fall time, 50  $\mu$ s nominal; up to + 10 V through series connected 93  $\Omega$  resistor; direct coupled.

**CONTROLS**

**FOCUS** – Single turn screwdriver adjustment for optimization of resolution.

**GAIN** – Single turn screwdriver adjustment for trimming HV.

**PERFORMANCE**

**INTEGRAL NONLINEARITY** –  $< \pm 0.04\%$  for up to + 10 V output.

**GAIN DRIFT** –  $< \pm 0.01\%$  per  $^{\circ}\text{C}$  ( $\pm 100$  ppm/ $^{\circ}\text{C}$ ).

**PM TUBE BIAS ISOLATION** – + 2000 V dc maximum.

**NOISE** –  $< 1$  fC.

**CHARGE SENSITIVITY** – 4.5 mV/pC, nominal.

**DIVIDER BIAS** – Total resistance 7.2 M $\Omega$ , nominal; 10 dynodes at 72 V per kV dc of detector bias; anode limiting resistor 560 k $\Omega$ .

**FOCUS RANGE** – 72 V to + 145 V per kV dc of detector bias.

**GAIN RANGE** – Varies total PMT bias between 92% and 100% of applied high voltage.

**CONNECTORS**

**POWER** – Amphenol 17 series.

**OUTPUT and TEST** – BNC.

**HV** – SHV.

**PM TUBE SOCKET** – Cinch Jones 3M-14.

**POWER REQUIREMENTS**

**PREAMP** –  $\pm 12$  V dc at 15 mA.

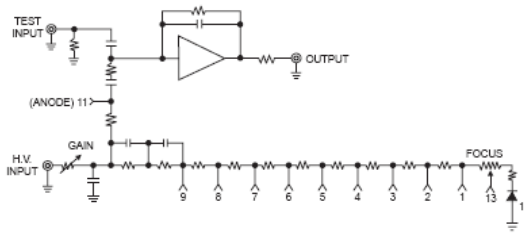
**HV** – 0-2 kV dc at 0-300  $\mu$ A.

**PHYSICAL**

**SIZE** – 7.6 x 5.8 cm (3 x 2.3 in.) (1 x d).

**NET WEIGHT** – 0.14 kg (0.3 lb).

**SHIPPING WEIGHT** – 1.2 kg (2.7 lb).



Model 2007P Functional Schematic

**ENVIRONMENTAL**

**OPERATING TEMPERATURE** – 0 to 50  $^{\circ}\text{C}$ .

**OPERATING HUMIDITY** – 0-80% relative, non-condensing.

Tested to the environmental conditions specified by EN 61010, Installation Category I, Pollution Degree 2.

