

JULLIOT C.

Rapport CEA n° 1428

Spectrographe γ enregistreur avec élimination du bruit de fond Compton.

Sommaire. - Cet appareil dérivé du spectrographe γ enregistreur permet d'obtenir une meilleure définition des pics photoélectriques, par élimination des impulsions provenant des photons γ incomplètement absorbés dans le scintillateur (effet Compton).

Cet ensemble met en oeuvre une méthode originale due à Peirson : le spectre, dépourvu de pic photoélectrique, fourni par un détecteur, équipé avec un scintillateur d'anthracène, est retranché du spectre donné par un détecteur classique, équipé avec un scintillateur de NaI (Tl).

Le réglage de l'ensemble mécanique, support des détecteurs et de la source, permet d'ajuster les rendements de détection. L'ensemble électronique se présente sous un aspect identique à celui du spectrographe enregistreur.

1960

14 pages

JULLIOT C.

Report CEA n° 1428

Recording γ spectrometer with elimination of Compton background.

Summary. - This instrument, derived from the recording γ spectrograph, gives better definition of photoelectric peaks by elimination of pulses caused by γ photons incompletely absorbed in the scintillator (Compton effect).

This system uses an original method devised by Peirson : the spectrum, devoid of photoelectric peak, supplied by a detector equipped with an anthracene scintillator, is cut off from the spectrum provided by a conventional detector equipped with a NaI (Tl) scintillator.

The regulation of the mechanical system, detector support and source allows the detection yields to be adjusted. The electronic system is identical in presentation with that of the recording spectrograph.

1960

14 pages

- Rapport C.E.A. n° 1428 -

Service d'Electronique Physique

**SPECTROGRAPHE γ ENREGISTREUR AVEC ELIMINATION
DU BRUIT DE FOND COMPTON**

par

C. JULLIOT

(Rapport DE/1167/SEP/144 de Juillet 1959)

R. 60.616

**PREMIER MINISTRE
COMMISSARIAT A
L'ÉNERGIE ATOMIQUE**

**SPECTROGRAPHE γ ENREGISTREUR
AVEC ELIMINATION
DU BRUIT DE FOND COMPTON**

par

C. JULLIOT

Rapport CEA N° 1428

1960

**CENTRE D'ÉTUDES
NUCLÉAIRES DE SACLAY
SERVICE DE DOCUMENTATION
Boîte postale n° 2 - Gif-sur-Yvette (S.-et-O.)**

SPECTROGRAPHE γ ENREGISTREUR AVEC ELIMINATION DU BRUIT DE FOND COMPTON

INTRODUCTION

Pour les principes et l'utilisation courante du spectrographe γ à courbes, il sera utile de se reporter au rapport CEA N° 1.429 5 ce qui facilitera la compréhension du texte ci-dessous.

Lorsque l'on trace le spectre du rayonnement émis par un radioélément on obtient un ou plusieurs pics photoélectriques (fig. 1) qui émergent d'une distribution plus ou moins continue due à l'effet Compton.

Dans le cas de radioéléments émettant plusieurs raies de photons, du fait de la superposition de différents spectres Compton, le nombre d'impulsions devient beaucoup plus élevé aux faibles énergies, ce qui surcharge inutilement l'appareil de comptage. Pour les mesures quantitatives, l'appréciation de l'amplitude du pic photoélectrique n'est pas toujours facile. Enfin, dans certains cas, des pics photoélectriques peuvent être invisibles; c'est le cas de la fig. II où le pic de l'iode 131 n'apparaît pas.

Pour toutes ces raisons, de nombreux chercheurs se sont intéressés à l'élimination du bruit de fond Compton, dans l'utilisation du spectrographe à courbes. En fait deux méthodes sont susceptibles d'une utilisation relativement simple.

La première due à Albert [1] consiste à entourer le cristal de Na I (Tl) d'un second scintillateur qui a pour rôle

d'absorber le photon diffusé par effet Compton, quand il s'échappe du scintillateur de Na I (Tl). Les impulsions issues des deux détecteurs étant mises en anticoincidence, l'impulsion due à l'électron Compton sera éliminée, d'où disparition du bruit de fond Compton dans la mesure où le photon diffusé sera détecté dans le second scintillateur. Pour que cette méthode soit efficace il est nécessaire d'entourer le scintillateur de Na I (Tl), d'un scintillateur de grandes dimensions (28 litres de scintillateur liquide avec 4 photomultiplicateurs Dumont 6363 pour le montage de Bell [2]), d'où un montage complexe et coûteux. La source étant placée entre les deux scintillateurs, dans le cas de radioéléments émettant des photons en cascade, ^{60}Co , ^{24}Na) certains pics sont éliminés par anticoincidence.

La seconde méthode, d'un principe peut-être moins séduisant, mais d'utilisation beaucoup plus facile et conduisant à une réalisation plus simple, a été mise au point par Peirson [3 , 4] . Le principe est illustré par les figures 1, 2 et 3 . La figure 1 représente le spectre d'une source de $^{60}\text{Co} + ^{137}\text{Cs}$ obtenu à l'aide d'un scintillateur de Na I (Tl) de dimensions courantes. La figure 2 représente la réponse au même rayonnement d'un scintillateur organique de dimensions identiques au scintillateur de Na I (Tl). La section efficace pour l'effet photoélectrique étant très faible, il n'y a pas de pic, mais simplement une distribution d'impulsions due à l'absorption par effet Compton. Les spectres Compton pour les deux scintillateurs étant sensiblement identiques, après différence des deux distributions, seuls subsistent les pics photoélectriques (fig. 3); le pic de rétrodiffusion est un pic photoélectrique. Le scintillateur organique utilisé est un scintillateur d'anthracène.

Pour l'utilisation pratique il est nécessaire d'obtenir, d'une part des impulsions d'amplitudes égales à la sortie de chaque

détecteur pour des particules incidentes de même énergie, d'autre part des comptages équivalents (surfaces égales) pour les distributions Compton. Ce réglage constitue l'un des points délicats de la méthode.

I - DESCRIPTION DE L'APPAREILLAGE

L'ensemble électronique en plus de la fonction classique de sélection d'amplitude du spectrographe à courbes doit réaliser d'une façon continue la soustraction des impulsions issues des deux détecteurs, ce qui conduit à certaines modifications. La figure 4 représente le "bloc-diagramme" de l'appareil. L'alimentation des photomultiplicateurs, le préamplificateur, l'amplificateur et le sélecteur sont communs aux deux détecteurs, ceci pour des raisons d'économie et de stabilité. Nous allons décrire en détail l'ensemble détecteur qui constitue la partie délicate de l'appareillage.

A) ENSEMBLE DETECTEUR

L'ensemble de détection comme indiqué ci-dessus est composé de deux détecteurs, l'un équipé d'un scintillateur de Na I (Tl), l'autre d'un cristal d'anthracène. En ce qui concerne les scintillateurs nous insisterons sur deux points importants : rapport de l'énergie lumineuse obtenue à l'énergie de la particule incidente (facteur de conversion), efficacité de détection pour des photons γ d'énergie moyenne.

Facteur de conversion des scintillateurs

Pour des électrons d'énergie cinétique E_0 on admet généralement dans la littérature que le facteur de conversion de l'anthracène est la moitié de celui de Na I (Tl) à la température ordinaire. Nous indiquons dans le tableau ci-dessous les caractéristiques principales de ces deux scintillateurs.

	Masse Spécifique	Longueur d'onde moyen ne de la lu- mière émise	Facteur de conversion	Constante de décroissance θ
Anthracène	1,25	4500 Å	5 à 6 %	$2 \cdot 10^{-8}$ s
Na I (Tl)	3,67	4100 Å	10 à 12 %	$25 \cdot 10^{-8}$ s

Nous avons, en ce qui nous concerne, simplement comparé le facteur de conversion du Na I (Tl), (assez bien défini et qui varie peu d'un scintillateur à l'autre) à celui de l'anthracène. Les deux scintillateurs sont placés dans les mêmes conditions de mesure (même photomultiplicateur avec la même tension d'alimentation, électronique identique).

La figure 5 représente les spectres obtenus dans les deux cas. On notera évidemment pour l'anthracène, l'absence de pic photoélectrique. Nous avons défini une première grandeur : l'abscisse A à mi-hauteur du front Compton qui est proportionnelle au facteur de conversion (dans ce cas les impulsions correspondent à des particules ionisantes de même énergie $E = \frac{h\nu}{1+0.51} \approx \text{MeV}$), ensuite le rapport $R = \frac{B}{A}$, (B défini sur la figure 5) proportionnel à la pente du front Compton. La valeur de R est reliée à la dispersion en amplitude des impulsions; la substitution de scintillateurs mise à part, toutes les conditions de mesure restent identiques ; une variation de R indiquera une dispersion de certaines caractéristiques du scintillateur, facteur de conversion, facteur de collection, transparence, etc suivant l'endroit où se produit la scintillation (voir 6). Les mesures de A et R permettent une comparaison des scintillateurs entre eux. Quelques résultats sont indiqués dans le tableau ci-dessous. Dans la méthode de Peirson, pour que la compensation soit satisfaisante,

il est nécessaire que les valeurs de R et R' (fig. 5) soient identiques.

Tableau comparatif du rendement des scintillateurs
d'anthracène et de Na I (Tl)

	A en mm	Facteur de conversion rapporté au Na I(Tl)	R en %	OBSERVATIONS
Na I (Tl)	283	1	7,6	
Anthracène	103	0,36	9,5 8 9,5	Scintillateur entouré par un réflecteur non collé (voir Fig. 12)
Anthracène	78	0,27	10,5	Scintillateur non entouré du réflecteur
Anthracène	62	0,16	13	Scintillateur entouré d'un chiffon noir mat pour éliminer toute possibili- té de réflexion

Remarques

Les rapports de facteur de conversion que nous obtenons sont assez nettement différents de ceux relevés dans la littérature. Cet écart peut être dû à une mauvaise collection de lumière dans les scintillateurs d'anthracène de grandes dimensions, et aux nombreux défauts optiques qu'ils présentent.

Nous n'avons pas tenu compte dans nos résultats de l'influence de la constante de temps du circuit d'anode, $RC = 10^{-6}$ sec, vis à vis de la constante de décroissance des scintillateurs (très courte dans le cas de l'anthracène). Les rapports trouvés devraient être multipliés par $\frac{1}{0,7}$.

Efficacité de détection pour les scintillateurs d'anthracène et de Na I (Tl) -

Dans un précédent rapport les calculs de rendement du Na I (Tl) ont été faits en détail, pour des rayonnements de différentes énergies. Nous avons refait ici quelques calculs pour l'anthracène.

Coefficient d'absorption

Etant donné la gamme d'énergie utilisée, pour un matériau tel que l'anthracène, le coefficient total d'absorption est pratiquement égal au coefficient d'absorption par effet Compton.

La formule générale de l'anthracène étant $C_{14}H_{10}$ et sa densité : 1,25 on a :

$$\mu^{cm^{-1}} = 1,25 \times \frac{\mu^{at^{Carb}} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \cdot 14 + \mu^{at^H} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \cdot 10}{178}$$

Nous avons fait ce calcul pour E variant de 50 keV à 3 MeV (voir tableau ci-dessous). On remarque pour des énergies de 0,7 à 3 MeV où l'absorption par effet Compton est prépondérante aussi bien pour le Na I (Tl) que pour l'anthracène, que les courbes sont parallèles, μ étant pratiquement proportionnel à la densité (voir courbes fig. 6)

Coefficient d'absorption pour la Na I (Tl)

l'anthracène et le plomb

Energie en MeV	Anthracène μ_{tot}			Na I (Tl)			Plomb $\mu_{\text{cm}} - 1$	
	cm^2/g	cm^{-1}	cm^2/g μ_{tot}	μ_{cm}^{-1}			μ_{tot}	μ_{ph}
				μ_{tot}	μ_{ph}	μ_{comp}		
0,050	0,194	0,242	9,7	37,8	36,3	1,41		
0,1	0,16	0,2	1,65	6,05	5,3	0,75	62	58,5
0,2	0,13	0,163	0,33	1,2	0,74	0,46	10,7	9,4
0,3	0,113	0,141	0,164	0,6	0,235	0,365	4,3	3,14
0,4	0,1	0,125	0,115	0,425	0,105	0,32	2,5	1,51
0,5	0,092	0,115	0,093	0,342	0,061	0,285	1,73	0,86
0,6	0,085	0,106	0,082	0,3	0,037	0,261	1,35	0,57
0,8	0,075	0,094	0,067	0,246		0,226		
1	0,067	0,084	0,058	0,212		0,2	0,8	0,2
1,5	0,0545	0,068	0,046	0,169		0,163	0,57	0,095
2	0,0465	0,058	0,041	0,150		0,138		
3	0,037	0,046	0,0362	0,133				

Efficacité de détection

Après calculs, nous avons tracé les courbes indiquant le rendement de détection r en fonction de l'énergie du rayonnement γ , pour les scintillateurs d'anthracène et de Na I (Tl).

On constate que les courbes divergent sensiblement aux faibles énergies, le coefficient d'absorption par effet photoélectrique dans le Na I (Tl) devenant important (voir fig. 7)

Pour le scintillateur de Na I (Tl) d'efficacité r pour le rayonnement d'énergie E et d'intensité I , la quantité de rayonnement absorbé rI se répartit sur le spectre en deux parties : le pic photoélectrique, et la distribution Compton dans le cas où les photons sont simplement diffusés; si $p = \frac{N_{ph}}{N_{tot}}$ on aura $N_{ph} = r.I.p$ pour le pic photoélectrique et pour la diffusion Compton, $N_{Compton} = r.I.(1-p)$. Pour l'anthracène, par principe $p = 0$, d'où $N_{Compton} = r.I$. La méthode de Peirson est valable, si pour une certaine échelle d'énergie le rapport $\frac{rI_{anthracène}}{rI(1-p)_{NaI(Tl)}}$ est constant, l'égalisation des spectres Compton étant obtenue en positionnant la source entre les deux détecteurs. Ce réglage sera valable pour toutes les énergies. La source étant distante de 5 mm de chaque scintillateur, aux faibles énergies les courbes représentant le facteur r pour l'anthracène, et $r(1-p)$ pour le Na I (Tl) divergent; pour le cristal de Na I(Tl) p tend vers 1 aux faibles énergies. On corrige ce défaut en interposant un écran de plomb de quelques mm d'épaisseur entre la source et le cristal d'anthracène [4] de ce fait, la quantité de rayonnement qui atteint le scintillateur diminue considérablement aux faibles énergies, la section efficace du plomb étant très grande (effet photoélectrique).

Pour un écran d'épaisseur 3 mm nous avons calculé la quantité de rayonnement qui sera absorbé dans le cristal d'anthracène compte tenu de l'absorption par l'écran de plomb. En fait, nous avons tracé deux courbes. La première ne tient compte que de l'absorption par effet photoélectrique (le photon γ étant complètement absorbé). Pour la seconde, on a

tenu compte aussi de l'absorption par effet Compton, la courbe réelle est comprise entre ces deux courbes, un certain nombre de photons diffusés étant réabsorbés dans le plomb.

Les courbes, $r_N (1-p)$ qui donne en fonction de l'énergie la fraction du spectre correspondant au bruit de fond Compton, r_a qui donne la fraction de rayonnement absorbé dans le cristal d'anthracène après interposition de l'écran de plomb, sont sensiblement parallèles.

De plus, le pic photoélectrique étant extrêmement localisé contrairement à la distribution Compton, de légères variations dans le rapport $\frac{r_N (1-p)}{r_a}$ en fonction de l'énergie ont peu d'effet sur l'amplitude des pics photoélectriques, ce qui est très important pour les mesures quantitatives.

La calcul de l'efficacité a été fait pour un scintillateur d'anthracène de dimensions ci-après : $h = 25,4 \text{ mm}$
 $\phi = 44,4 \text{ mm}$

et nous indiquons l'efficacité pour un scintillateur de Na I (Tl) de $h = 25,4 \text{ mm}$
 $\phi = 38 \text{ mm}$ les résultats sont résumés ci-dessous :
 (voir courbes fig. 7)

Energie en MeV	0,1	0,3	0,5	1	2
distance 0,5 cm	0,3		0,2	0,152	0,114
d = ∞	0,4	0,3	0,265	0,2	0,14
d = 0,5 cm	0,95		0,42	0,28	0,21
d = ∞			0,57	0,41	0,3
p	1	0,75	0,44	0,23	

Commande des photomultiplicateurs

Les photomultiplicateurs sont bloqués en portant la tension de la 1ère dynode à une tension inférieure de quelques volts à celle de la photocathode. On envoie sur la dynode un train d'impulsions rectangulaires de période $T \simeq 0,2 \text{ s}$ le potentiel étant de 250 volts pendant la période conductrice (alimentation séparée, liaison continue) à 50 volts pour le blocage. La photocathode est portée à + 70 volts.

B) ENSEMBLE ELECTRONIQUE

Une partie de l'appareillage étant commune aux deux détecteurs, il est nécessaire d'envoyer à tour de rôle les impulsions issues de chaque détecteur dans la préamplificateur. Pour ceci, on bloque pendant des périodes égales chaque photomultiplicateur comme indiqué ci-dessus. De plus, les impulsions de chaque détecteur n'étant pas admises en même temps, on effectue par le fait une soustraction différée. Toutes ces fonctions sont réalisées par un commutateur électronique et un intégrateur spécial.

Le commutateur électronique est constitué par un univibrateur actionné à la fréquence 50 Hz suivi d'une série de bascules qui abaissent la fréquence à 6,25 Hertz (voir figure 8). Avec cette méthode on obtient une fréquence suffisamment stable, 2 tubes de sortie délivrent des impulsions de 200 volts d'amplitude pour la commande des photomultiplicateurs. Ces mêmes impulsions dont l'amplitude est réduite, sont utilisées pour ouvrir la voie de l'intégrateur correspondant au détecteur en fonctionnement (voir fig. 4).

L'intégrateur du type standard (modifié) (fig. 9) comprend un "trigger" de mise en forme commun aux deux voies,

deux amplificateurs de charge (tubes V_2 et V_3) bloqués alternativement par les impulsions rectangulaires du commutateur électronique (entrée 3 et 5); V_2 correspond au détecteur équipé du scintillateur de Na I (Tl), V_3 au détecteur équipé du scintillateur d'anthracène. Le circuit intégrateur CR est commun; il reçoit des charges $\pm \Delta q$, positives pour la voie V_2 , négatives pour la voie V_3 . La période de commutation est choisie très courte devant la constante de temps du circuit intégrateur ($T = 0,18 \text{ s}$. $RC = 5 \text{ s}$ minimum). La charge $n \cdot \Delta q$ (n nombre d'impulsions pendant la période de commutation T) ne varie pas appréciablement d'une période à la suivante et pour 2 périodes successives la charge résultante est $\Delta Q = n_1 \Delta q - n_2 \Delta q$, ainsi elle traduit bien la différence de comptage dans le canal d'amplitude ΔV , pour les deux détecteurs.

II - MISE AU POINT ET REGLAGE

Cette partie fera l'objet d'une notice détaillée. Cependant la plus grande partie de la mise au point sera effectuée de la même façon que pour un spectrographe à courbes. Comme nous l'avons déjà signalé, la partie délicate porte sur le réglage de l'ensemble détecteur. En tenant compte de ce qui a été vu ci-dessus, le scintillateur sera monté entouré d'un réflecteur (voir fig. 12). La sélection des photomultiplicateurs sera particulièrement sévère en ce qui concerne la stabilité du gain. Le scintillateur d'anthracène a le facteur de conversion le plus faible; il sera monté sur le photomultiplicateur qui a le gain le plus élevé. L'ensemble étant mis au point (voir spectrographe à courbes), les deux détecteurs fixés sur le support, le filtre en plomb d'épaisseur 3 mm placé devant le cristal d'anthracène, on peut procéder au réglage de l'amplitude des impulsions. A l'aide d'une source de ^{137}Cs on trace le spectre qui correspond à chaque détecteur. Il est nécessaire que les abscisses A des

fronts Compton respectifs soient égales (voir figure 5). On obtient ce résultat en agissant sur l'alimentation de l'un des photomultiplicateurs, par exemple, celui sur lequel est monté le cristal de Na I (Tl). Le repérage se fait plus facilement par le pic photoélectrique.

Ce réglage étant effectué, on égalise, pour une énergie choisie, le taux de comptage des spectres Compton en réglant la position de la source entre les deux détecteurs. On cale le canal du sélecteur en un point tel que (*) (fig.5) où le taux de comptage est sensiblement stationnaire, l'appareil étant en fonctionnement normal, 2 voies en service, le comptage résultant est nul.

Ce réglage sera valable tant que les conditions géométriques seront inchangées, et que les gains des photomultiplicateurs resteront dans le rapport qui leur a été imposé au départ. L'appareil peut fonctionner correctement plusieurs jours sans retouches.

III - UTILISATION - PERFORMANCES -

Les performances de cet appareil sont très voisines de celles du spectrographe γ à courbes. Les deux avantages essentiels de l'appareil : taux de comptage diminué aux faibles énergies et meilleure définition des pics photoélectriques apparaissent nettement sur le spectre figure 10 qui a été obtenu à l'aide d'une source de ^{60}Co + ^{137}Cs .

La figure 11 est encore plus représentative : c'est le spectre d'une source de produits de fission avec du sodium 22 comprenant les raies suivantes :

$E \gamma = 0,76 \text{ Mev}$	-	^{95}Zr
$= 0,66 \text{ Mev}$	-	^{137}Cs
$= 0,51 \text{ Mev}$	-	$^{22}\text{Na} + ^{103}\text{Ru}$
$= 0,36 \text{ Mev}$	-	^{131}I
$= 0,145 \text{ Mev}$	-	^{144}Ce
$= 1,3 \text{ Mev}$	-	^{22}Na

Sur le spectre "normal" en pointillé, la raie de 0,36 Mev correspondant à l'iode 131 est noyée dans le front Compton de la raie de 0,51 MeV, alors qu'elle est parfaitement définie après élimination du bruit de fond Compton.

Ainsi la meilleure définition des pics photoélectriques facilite à la fois les mesures qualitatives et quantitatives par spectrographe- γ : pour les mesures quantitatives on pourra se reporter au rapport général sur le spectrographe- γ à courbes.

Etant donné que l'on effectue la différence de deux comptages les fluctuations peuvent être très importantes comparées au comptage affiché; de plus, le comptage pour chaque détecteur a lieu pendant la moitié du temps seulement. Pour ces deux raisons, il est nécessaire de choisir des constantes d'intégration plus longues que pour un spectrographe- γ à courbes classique, ce qui automatiquement conduit à des temps d'exploration plus longs.

Dans la bande d'énergie de 0,2 à 2,5 MeV qui correspond à l'utilisation courante, la correction du bruit de fond Compton est faite à mieux que 10 %. Le pic de rétrodiffusion ne peut être éliminé puisque c'est un pic photoélectrique. Pour les énergies supérieures à 2,5 MeV, l'absorption par effet de paires dans le Na I (Tl) fait apparaître des pics qui ne peuvent être compensés.

BIBLIOGRAPHIE

- [1]- ALBERT. RSI 24.7. p 1096 1953
- [2]- RC DAVIS and PR BELL . scintillateur counter symposium N° 4
(1956) - p 82 - IRE Transactions on nuclear Science vol. Ns 3
N° 4 - 1956
- [3]- PEIRSON DH - Revue Nature r 173 - p 990 - 1954
- [4]- PEIRSON DH British Journal of Applied Physics N° 6, 7,p 144
1955
- [5]- JULLIOT - Rapport CEA N° 1.429

Fig:1.2.3. Spectre γ d'une source de Co^{60} et Cs^{137} obtenu par méthode Peirson

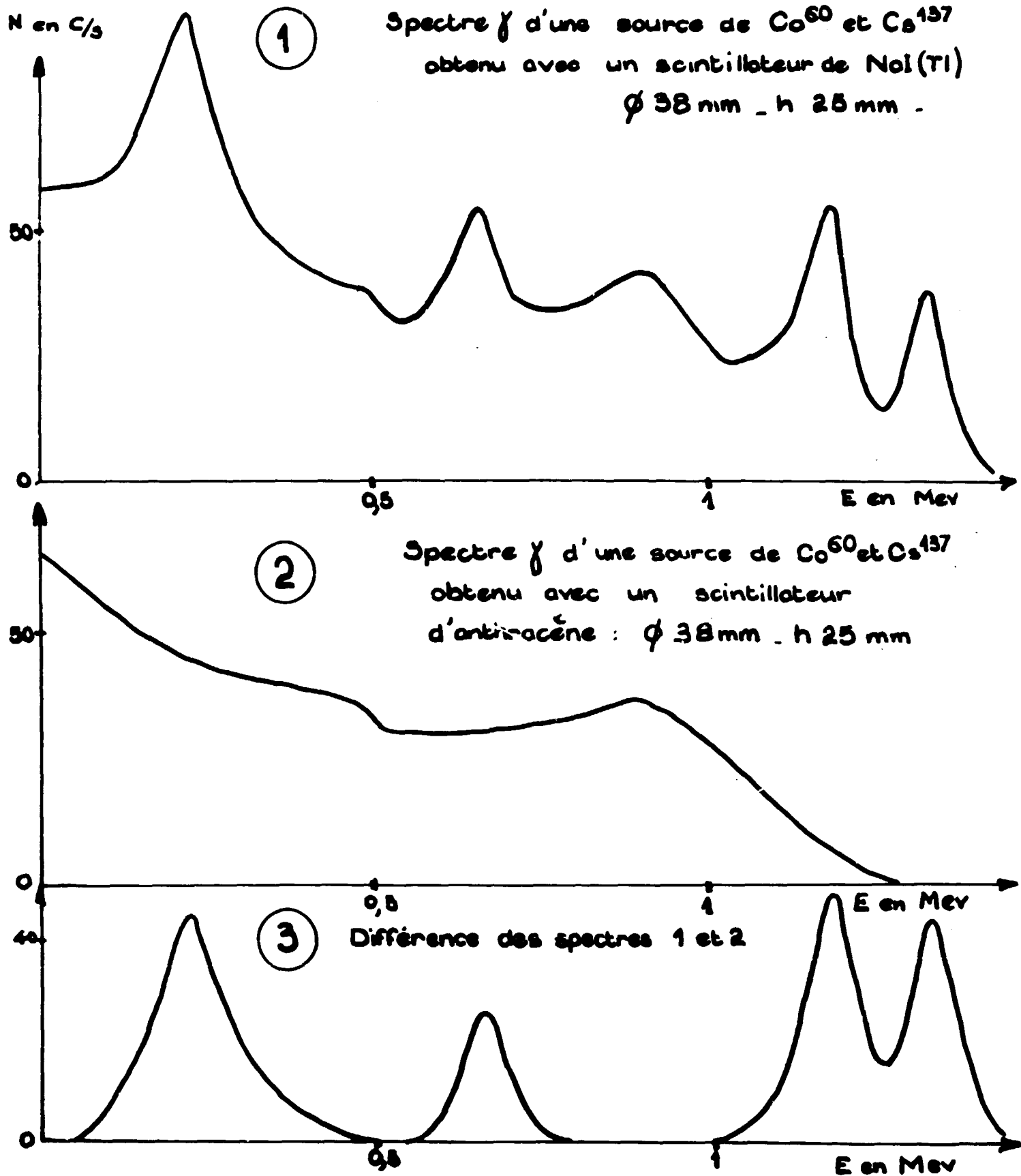
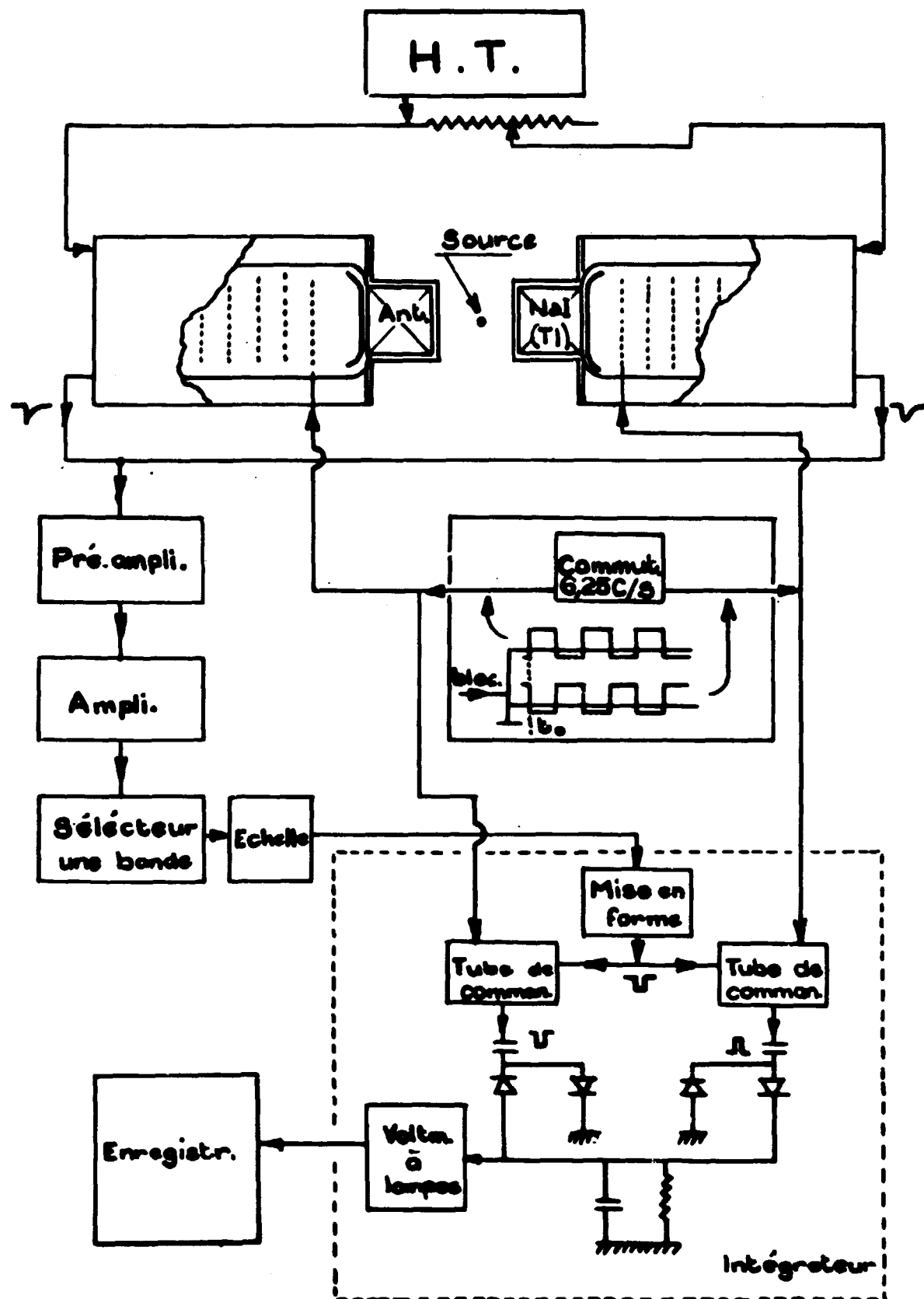
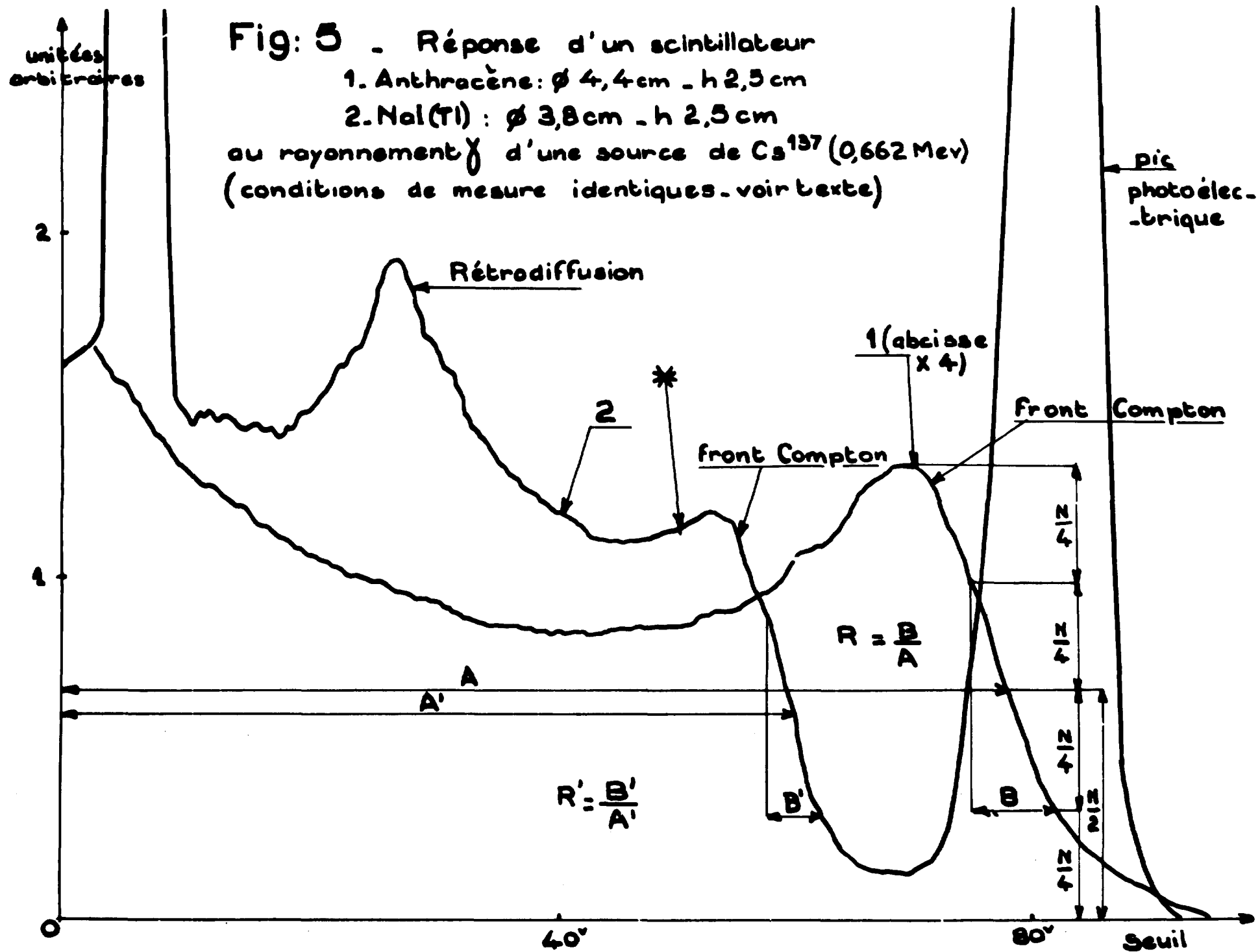


FIG: 4 - Bloc diagramme du spectro à courbes (Méthode Peirson)





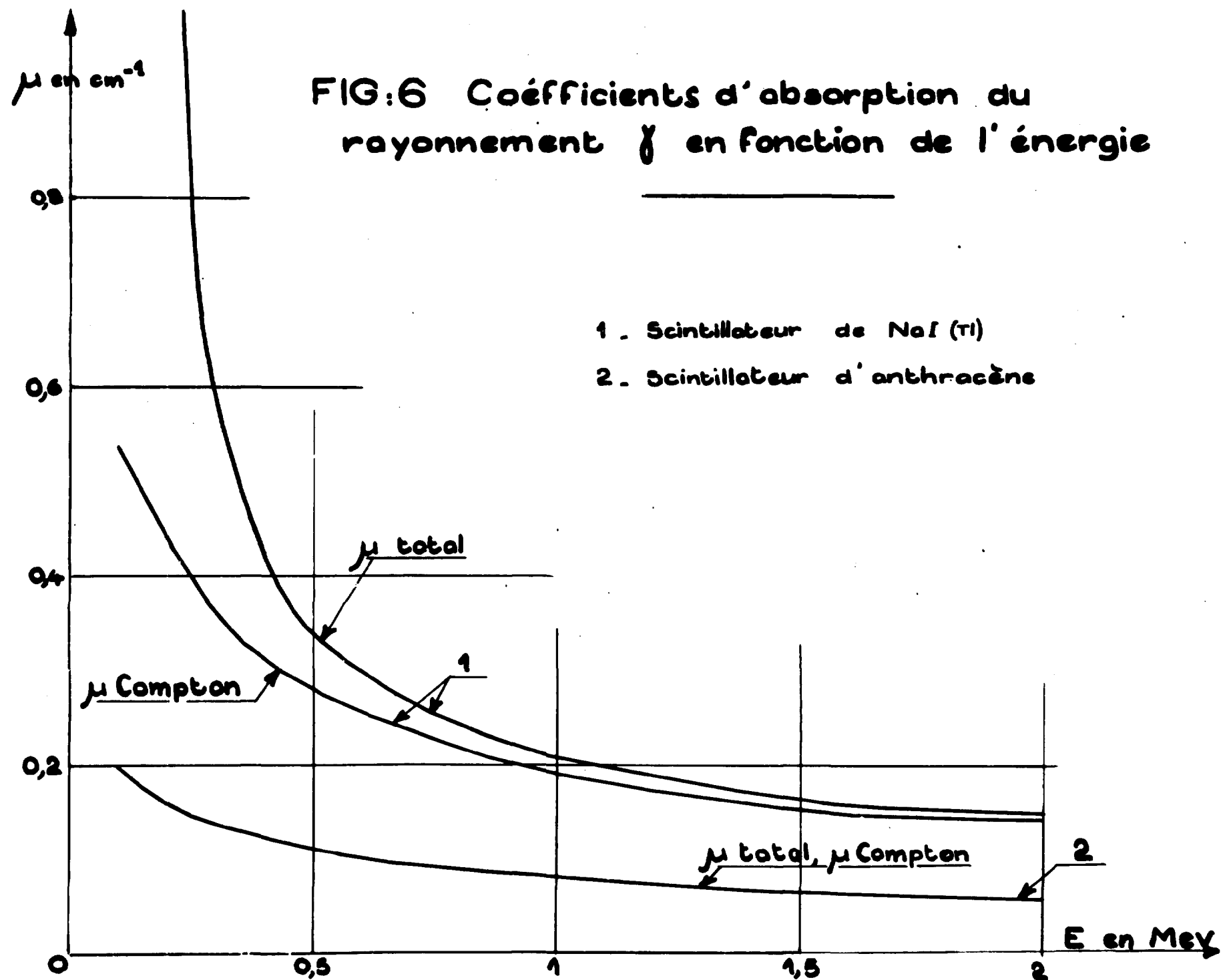
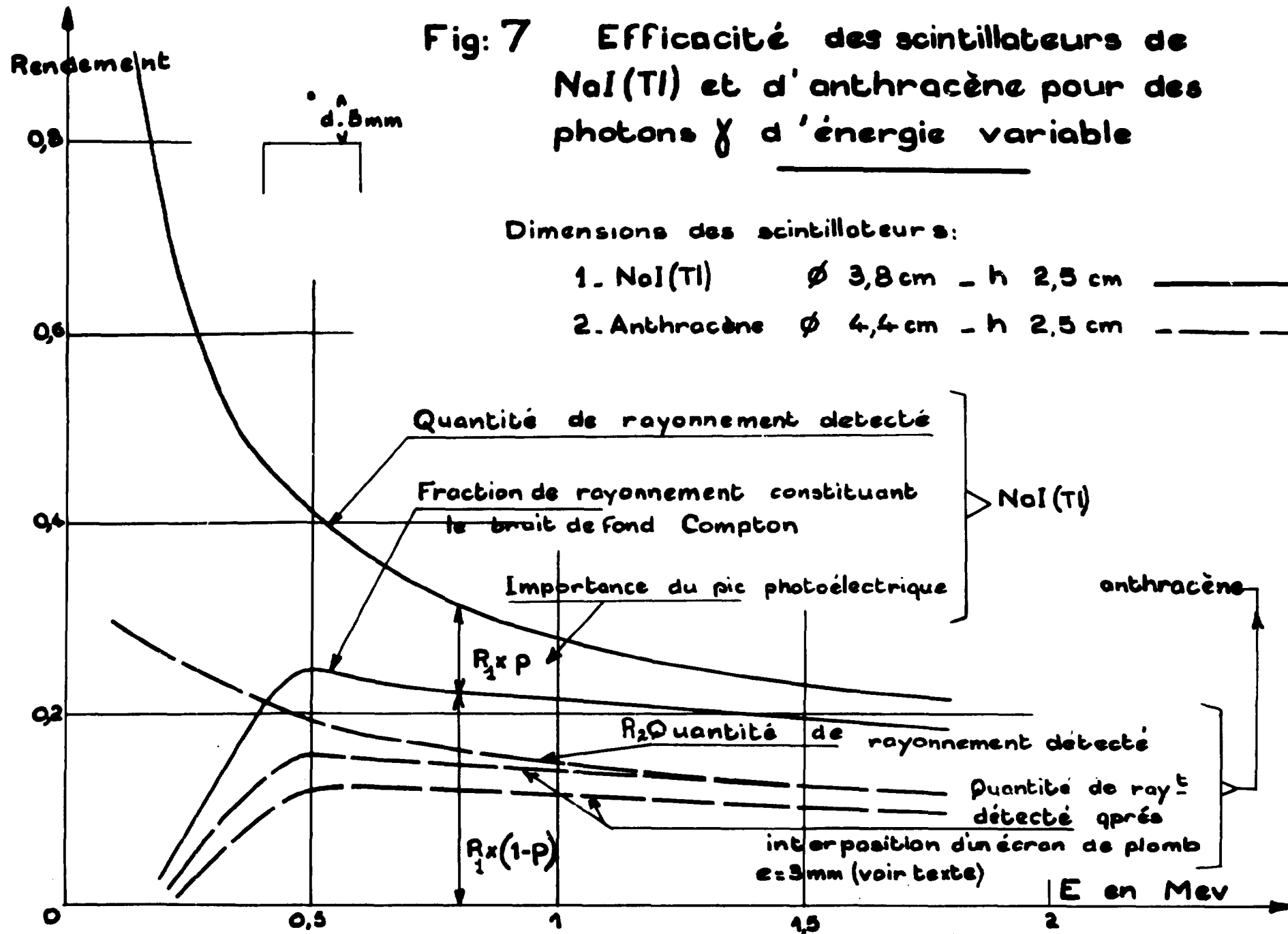


Fig: 7 Efficacité des scintillateurs de NaI(Tl) et d'anthracène pour des photons γ d'énergie variable



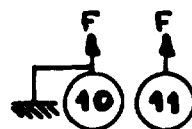
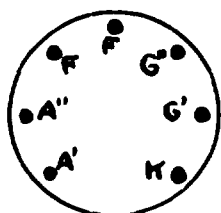


FIG:8 - Commutateur 6,25 c/s

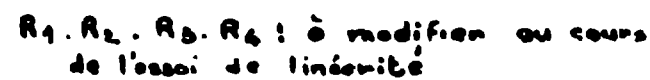
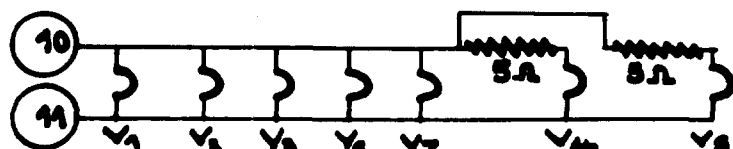
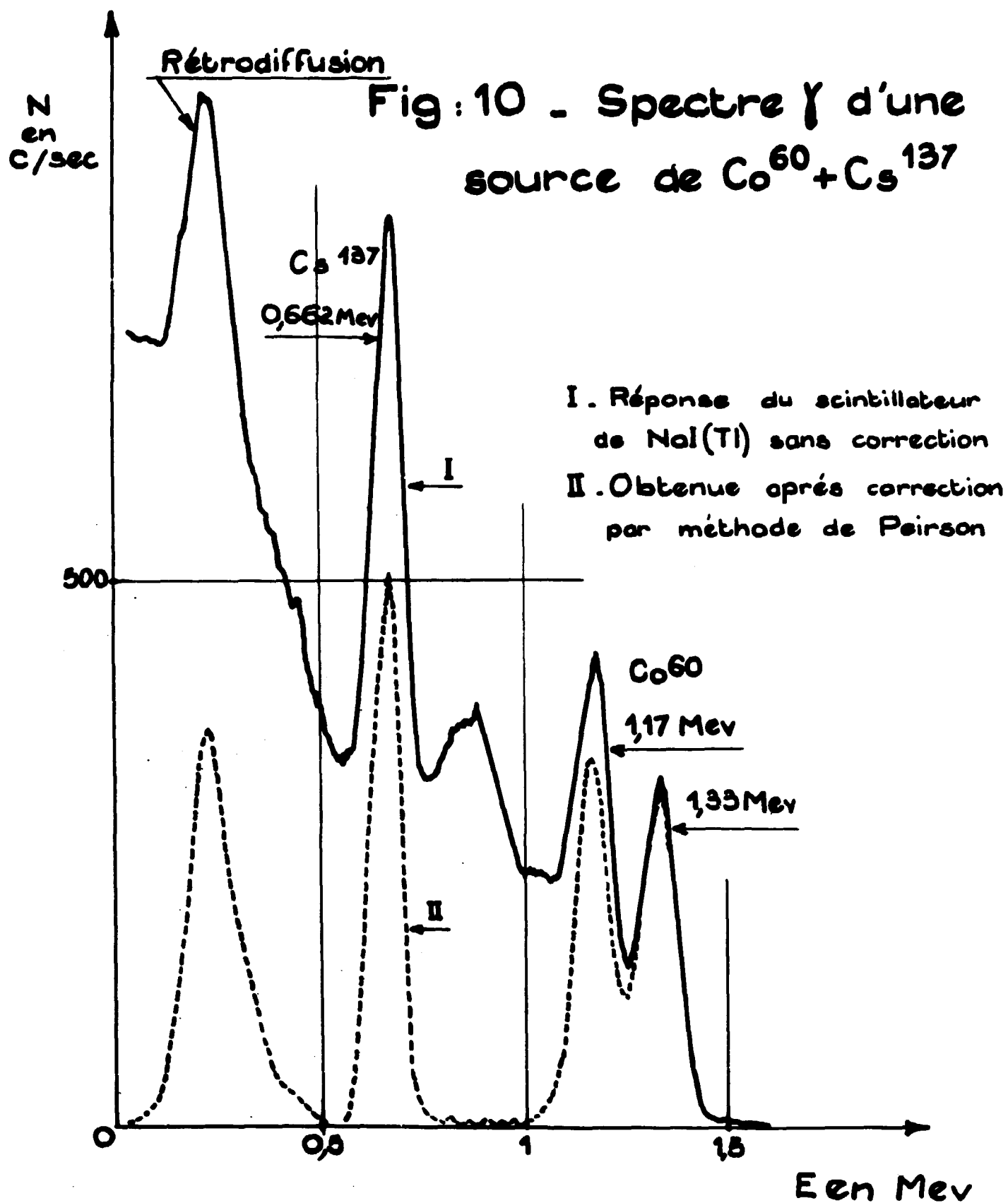


FIG :9



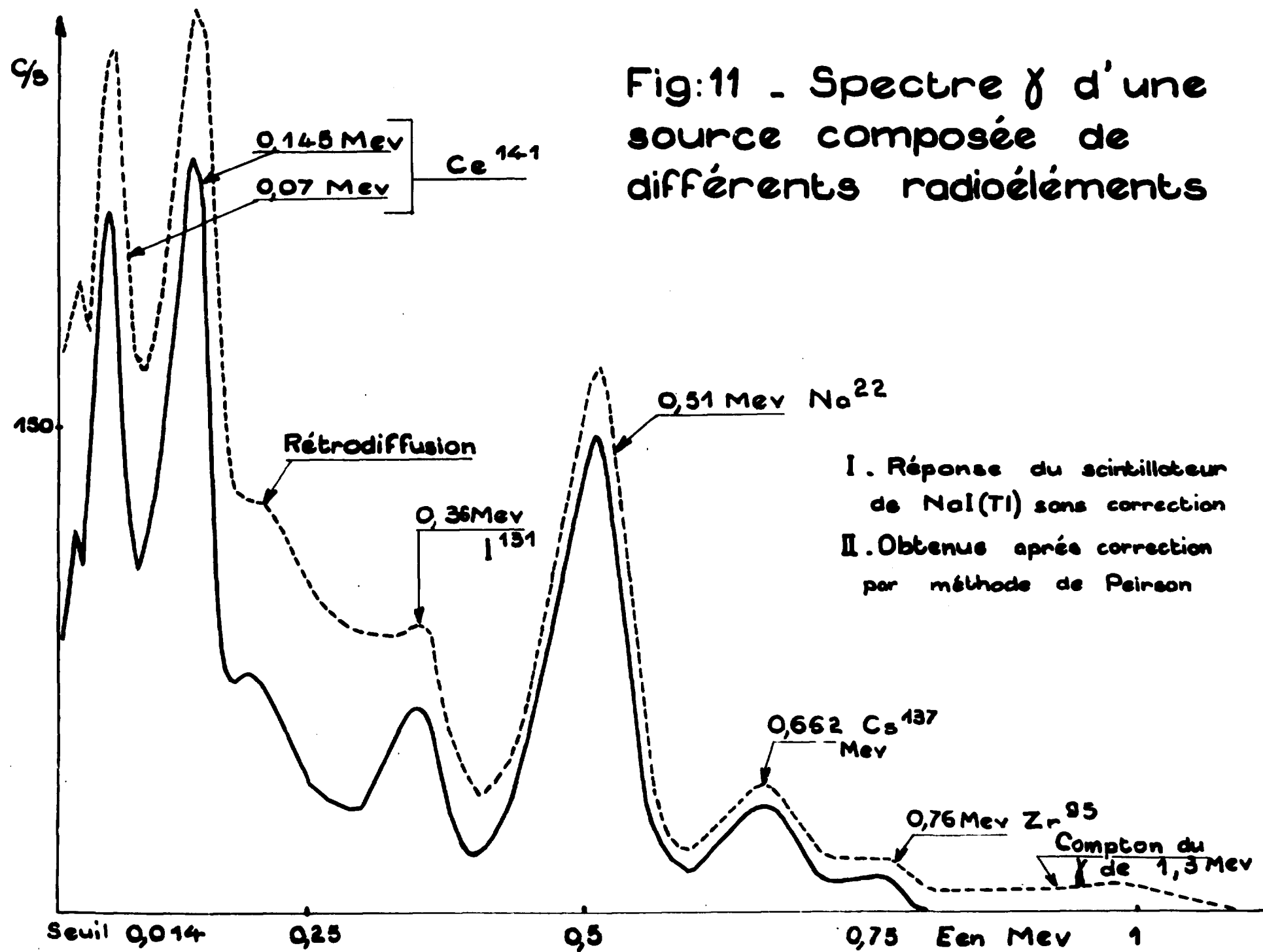
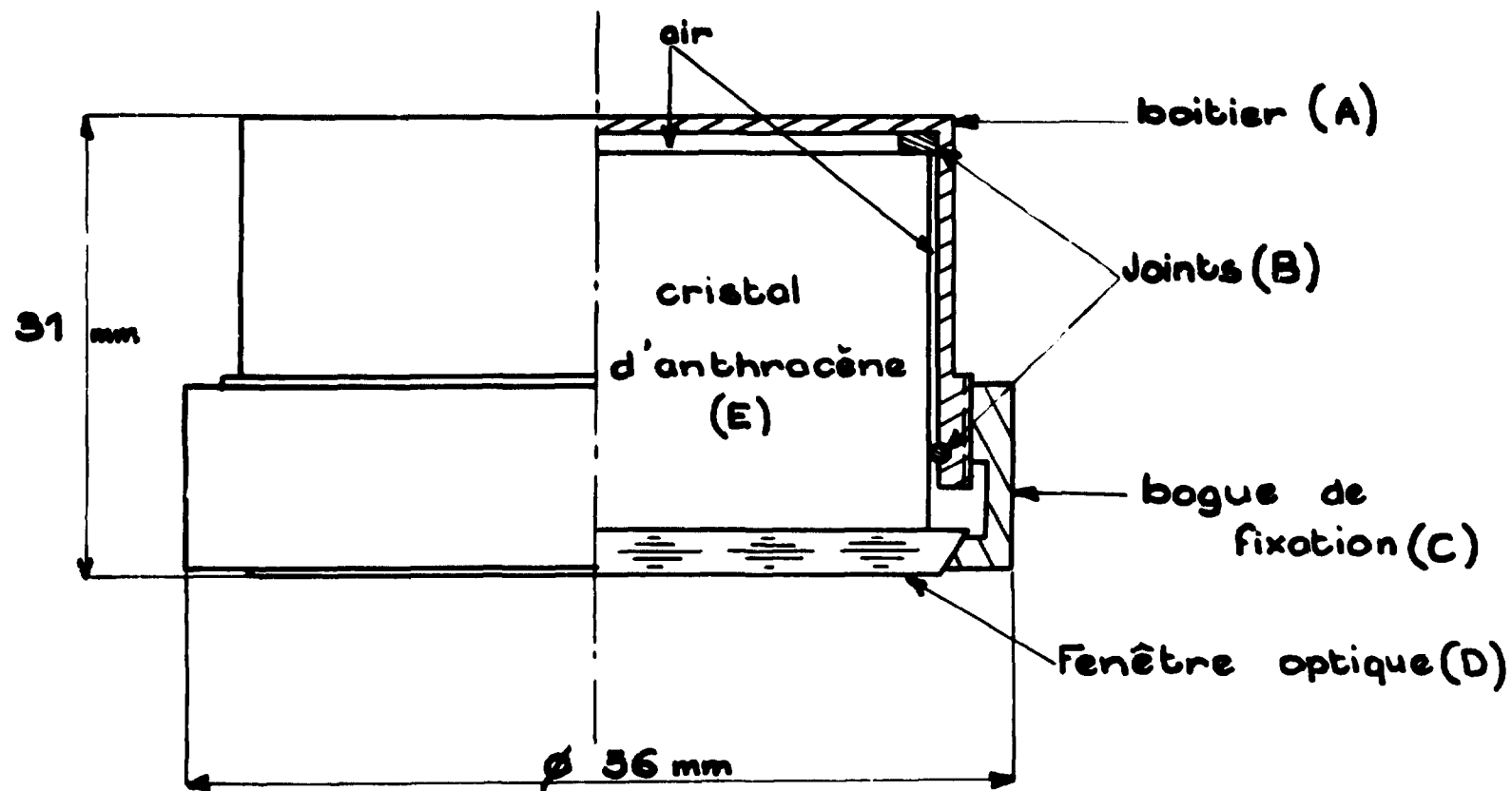


Fig: 12 .Montage d'un cristal d'anthracène



A. boitier en duralumin . épaisseur 1mm

B. Joints de caoutchouc

C. Bague moletée en laiton

D. Fenêtre optique en plexiglas . épaisseur 3 mm

E. Cristal d'anthracène : Ø 45 mm . h 25 mm

FIN