

Première édition  
1979-05-15

**ADDITIF 2**  
1989-12-01

---

---

**Rayonnements X et gamma de référence pour  
l'étalonnage des dosimètres et débitmètres et  
pour la détermination de leur réponse en  
fonction de l'énergie des photons**

**ADDITIF 2 : Rayonnements de photons de référence  
à des énergies comprises entre 4 MeV et 9 MeV**

*X and  $\gamma$  reference radiations for calibrating dosimeters and dose ratemeters and for  
determining their response as a function of photon energy*

*ADDENDUM 2: Photon reference radiations at energies between 4 MeV and 9 MeV*



## Avant-propos

L'ISO (Organisation internationale de normalisation) est une fédération mondiale d'organismes nationaux de normalisation (comités membres de l'ISO). L'élaboration des Normes internationales est en général confiée aux comités techniques de l'ISO. Chaque comité membre intéressé par une étude a le droit de faire partie du comité technique créé à cet effet. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec l'ISO participent également aux travaux. L'ISO collabore étroitement avec la Commission électrotechnique internationale (CEI) en ce qui concerne la normalisation électrotechnique.

Les projets de Normes internationales adoptés par les comités techniques sont soumis aux comités membres pour approbation, avant leur acceptation comme Normes internationales par le Conseil de l'ISO. Les Normes internationales sont approuvées conformément aux procédures de l'ISO qui requièrent l'approbation de 75 % au moins des comités membres votants.

L'additif 2 à l'ISO 4037 : 1979 a été élaboré par le comité technique ISO/TC 85, *Énergie nucléaire*.

L'annexe A du présent additif est donnée uniquement à titre d'information. \_\_\_\_\_

# Rayonnements X et gamma de référence pour l'étalonnage des dosimètres et débitmètres et pour la détermination de leur réponse en fonction de l'énergie des photons

## ● ADDITIF 2: Rayonnements de photons de référence à des énergies comprises entre 4 MeV et 9 MeV

### 1 Domaine d'application

Le présent additif à l'ISO 4037 prescrit les rayonnements de photons de référence pour la détermination de la réponse des dosimètres et débitmètres utilisés en radioprotection à des énergies de photons comprises entre 4 MeV et 9 MeV. Les rayonnements de référence dans ce domaine d'énergie sont donnés en raison des champs de photons de 6 MeV produits par de nombreuses centrales nucléaires et autres systèmes de réacteurs nucléaires. Les rayonnements de référence sont limités aux énergies spécifiées dans la mesure où la variation de la réponse de la plupart des dosimètres et débitmètres en fonction de l'énergie des photons ne présente pas de discontinuité dans ce domaine d'énergie.

### 2 Définitions

Pour les besoins du présent additif, les définitions données dans l'ISO 4037 : 1979, 3.3.1, s'appliquent.

Dans le présent additif, le terme «kerma dans l'air» doit être utilisé comme grandeur dosimétrique.

### 3 Rayonnements de référence

#### 3.1 Généralités

Les rayonnements de photons de référence doivent être produits par l'une des réactions suivantes :

- désexcitation de  $^{16}\text{O}$  dans la réaction  $^{19}\text{F}(p, \alpha\gamma)^{16}\text{O}$  (voir 3.2),
- désexcitation de  $^{12}\text{C}$  (voir 3.3),
- capture radiative de neutrons thermiques (voir 3.4),
- décroissance radioactive de  $^{16}\text{N}$  (voir 3.5).

#### 3.2 Rayonnements de photons de référence produits par désexcitation de $^{16}\text{O}$ dans la réaction $^{19}\text{F}(p, \alpha\gamma)^{16}\text{O}$ <sup>[1, 2 et 3]</sup>

Ces rayonnements de référence doivent être produits en utilisant un accélérateur de particules pour bombarder une cible de fluor (habituellement  $\text{CaF}_2$ ) avec des protons en utilisant la réaction  $^{19}\text{F}(p, \alpha\gamma)^{16}\text{O}$ .

Les niveaux d'énergie et les probabilités d'émission des photons produits par cette réaction avec des protons incidents d'énergie de 340,5 keV frappant une cible mince sont présentés à la figure 1. Pour cette énergie de proton, la probabilité de décroissance d'un état  $^{16}\text{O}$  excité par l'intermédiaire du niveau de 6,05 MeV par émission d'une paire électron-positron est inférieure à 2 %, la probabilité de décroissance par émission de photons de 6,13 MeV est de 97 % et l'écart par rapport à l'émission isotropique de ces photons est inférieur à 3,5 %. Pour des énergies de protons plus élevées, la contribution relative des photons de 6,13 MeV diminue au profit de photons d'énergie plus élevée, il se produit également une augmentation de la contribution de réactions parasites, par exemple (p, p' $\gamma$ ) et production de paires.

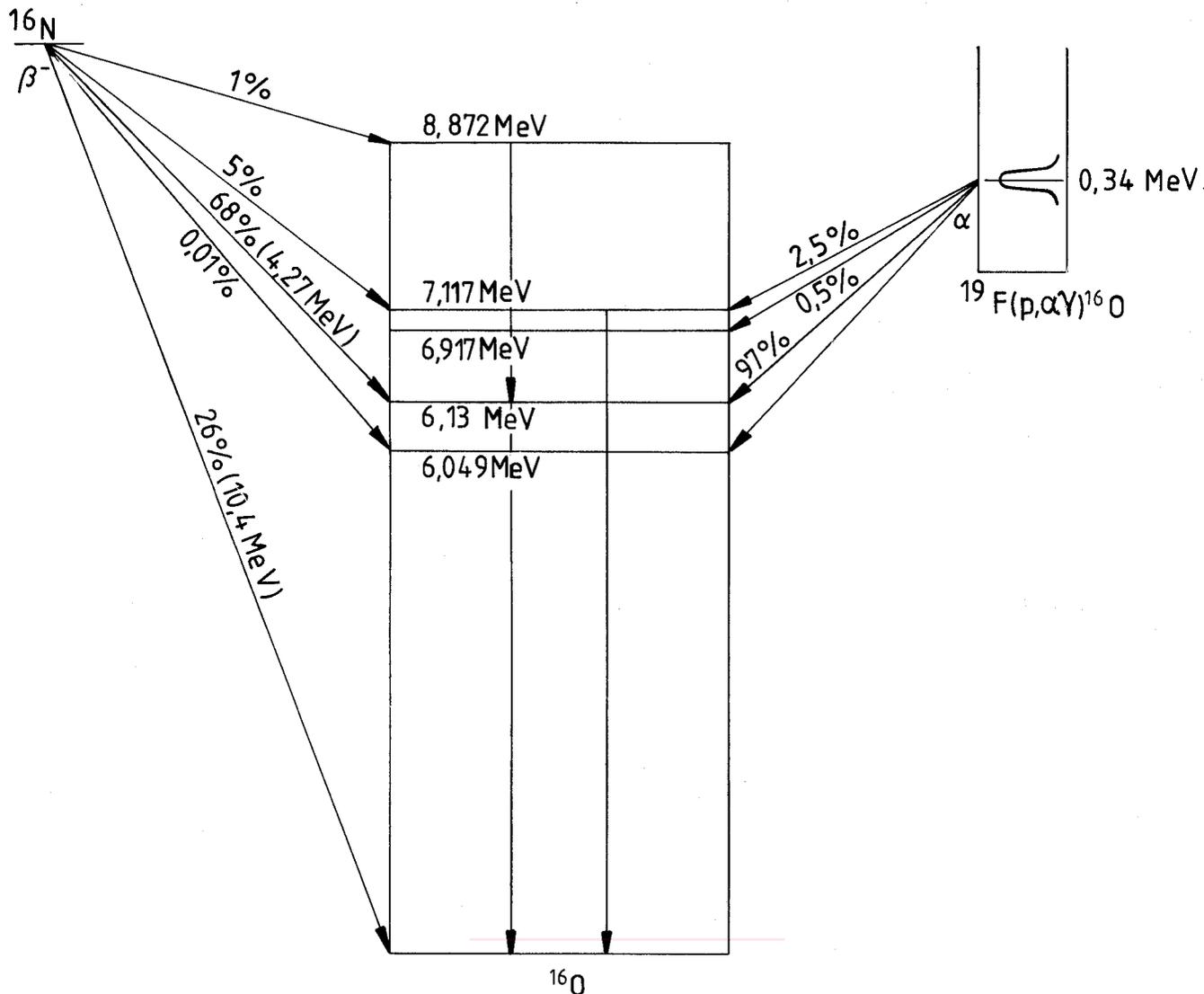


Figure 1 — Niveaux d'énergie et probabilités d'émission de photons produits par décroissance radioactive de  $^{16}\text{N}$  (à gauche) et par désexcitation de  $^{16}\text{O}$  pour une énergie de proton incident de 340,5 keV sur  $^{19}\text{F}$  (à droite)

La figure 2 montre le taux relatif de l'émission de photons (rendement) en fonction de l'énergie des protons. À mesure que l'épaisseur de la cible augmente (ainsi que la perte d'énergie des protons dans la cible) le rendement augmente et le spectre des photons se modifie car les protons entrant en interaction avec le fluor perdent de l'énergie au fur et à mesure qu'ils pénètrent dans la cible. L'énergie des photons émis est suffisamment élevée pour que leur atténuation dans la cible soit considérée comme négligeable.

En fonction du rendement requis, l'énergie des protons, choisie pour produire le rayonnement de référence, doit être soit l'une des énergies de résonance (340,5 keV ou 872,1 keV), soit une énergie appropriée comprise entre 2 MeV et 3 MeV. S'il faut un rendement élevé et si une contribution parasite au kerma dans l'air d'environ 4 % peut être tolérée, il convient d'utiliser des protons d'une énergie proche de 2,7 MeV arrivant sur une cible d'environ  $6 \text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}$  d'épaisseur (voir également 5.3). Pour obtenir le rayonnement de référence le plus pur possible, il est recommandé d'utiliser des protons de 340,5 keV, dans la mesure où des débits plus faibles de kerma dans l'air sont acceptables. Pour des protons de résonance de 340,5 keV, l'étalonnage doit être effectué successivement à l'énergie de résonance et à une énergie décalée de  $-10 \text{ keV}$ , afin de permettre de mesurer l'effet de tout rayonnement de faible énergie

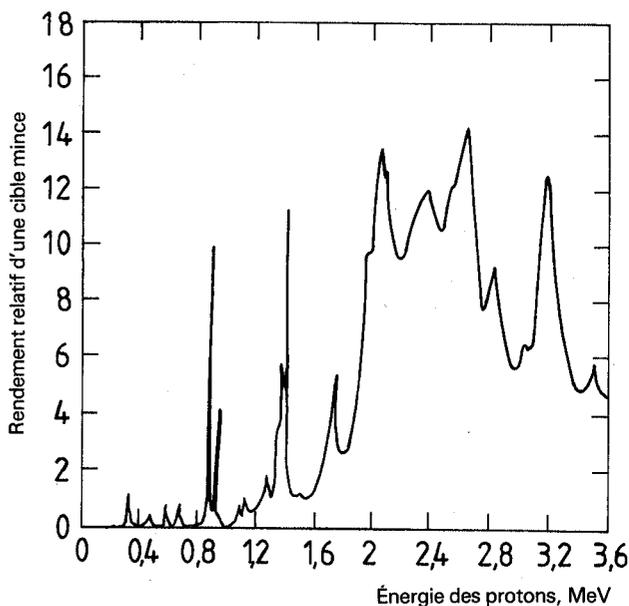


Figure 2 — Rendement en photons d'une cible mince en fonction de l'énergie des protons pour la réaction  $^{19}\text{F}(p,\alpha)^{16}\text{O}$

et hors résonance provenant de l'accélérateur. La différence entre l'étalonnage en résonance et l'étalonnage hors résonance doit être considérée comme provenant seulement du rayonnement de photons de 6,13 MeV et des électrons associés. Il convient de prendre soin de ne pas introduire dans l'accélérateur d'autre fluor que celui de la cible.

Le tableau 1 donne les rendements typiques et les débits de kerma dans l'air pour quatre énergies différentes de protons incidents, pour un courant de protons de 1  $\mu\text{A}$  et une cible d'environ  $6 \text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}$  d'épaisseur (la perte d'énergie des protons dans la cible est d'environ 600 keV pour un proton incident de 2,7 MeV).

La figure 3 représente une distribution-type des hauteurs d'impulsions produites avec des protons de 2,7 MeV et une cible d'environ  $6 \text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}$  d'épaisseur.

NOTE — La figure 3 aussi bien que les figures 4, 6 et 7 représentent des distributions de hauteurs d'impulsions et ont été données uniquement à des fins d'illustration. Ces distributions n'ont pas été corrigées pour tenir compte de la réponse du détecteur. La forme des spectres de photons du rayonnement de référence sera différente, étant donné que le rendement du pic photoélectrique du détecteur diminue de façon importante avec l'énergie des photons. Les informations concernant les spectres corrigés pour les photons provenant de la réaction  $^{19}\text{F}(p,\alpha\gamma)^{16}\text{O}$  sont données en [4].

### 3.3 Rayonnements de photons de référence produits par désexcitation de $^{12}\text{C}$ [5]

Ces rayonnements de référence doivent être produits en utilisant un accélérateur de particules pour bombarder une cible de carbone avec des protons aboutissant au niveau le moins excité de  $^{12}\text{C}$  à 4,44 MeV, suivi d'une désexcitation selon la réaction  $^{12}\text{C}(p,p'\gamma)^{12}\text{C}$ .

**Tableau 1 — Rendements de photons et débits de kerma dans l'air pour des énergies de protons déterminées et un courant de protons de 1  $\mu\text{A}$**

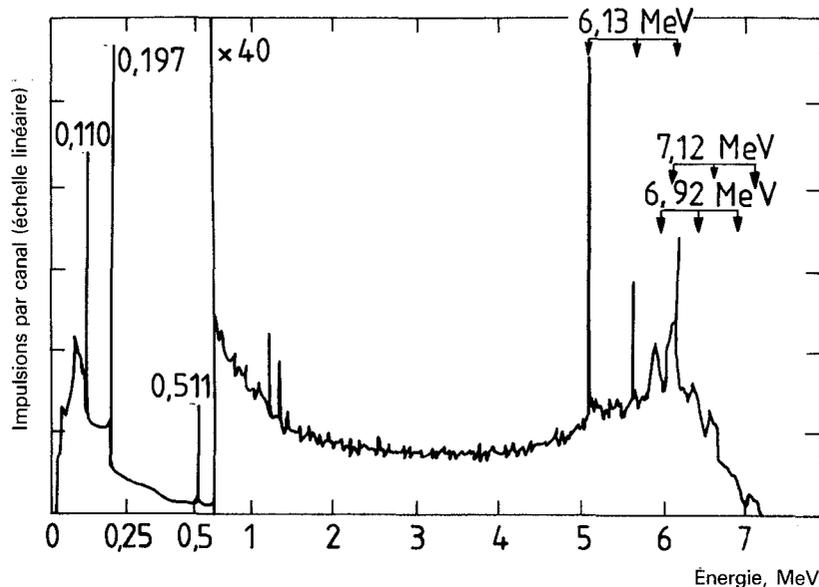
Énergie des protons MeV	Rendement de photons s <sup>-1</sup>	Débit de kerma dans l'air à 1 m de la cible $\mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$
0,340 5 (résonance)	$10^5$	0,05
0,872 1 (résonance)	$10^6$	0,5
2,05	$6 \times 10^7$	30
2,7	$2 \times 10^8$	100

La cible doit consister en une couche de carbone d'une haute pureté.

Si l'on utilise du carbone naturel, deux autres réactions vont entrer en concurrence avec la réaction  $^{12}\text{C}(p,p'\gamma)^{12}\text{C}$  :

- $^{13}\text{C}(p,p'\gamma)^{13}\text{C}$ , produisant un rayonnement de photons de 3,09 MeV; et
- $^{13}\text{C}(p,n)^{13}\text{N}$ , produisant des photons de dématérialisation de 0,511 MeV, générés par la décroissance des positons de  $^{13}\text{N}$  dont la demi-vie est de 9,96 min. L'état d'équilibre entre la production et la décroissance de  $^{13}\text{N}$  est atteint environ 20 min après le début de la réaction (c'est-à-dire lorsque le faisceau de protons est émis).

Les rapports des rendements des raies de 4,44 MeV et 3,09 MeV et des raies de 4,44 MeV et 0,511 MeV sont indépendants de l'énergie des protons.



**Figure 3 — Distribution des hauteurs d'impulsions enregistrée lors de la désexcitation de  $^{16}\text{O}$  avec un détecteur  $\text{Ge}(\text{Li})$  [2] [Épaisseur de la cible:  $\approx 6 \text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}$   $\text{CaF}_2$ ; énergie des protons: 2,7 MeV; réactions:  $^{19}\text{F}(p,\alpha\gamma)^{16}\text{O}$  et  $^{19}\text{F}(p,p'\gamma)^{19}\text{F}$ ]**

Pour un courant de protons de 1  $\mu\text{A}$ , une énergie de protons de 5,5 MeV et une distance de 1 m de la cible, les débits de fluence de photons sont d'environ  $160 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $12 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  et  $1\,800 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , et les débits de kerma dans l'air sont respectivement d'environ  $1,4 \mu\text{Gy} \cdot \text{h}^{-1}$ ,  $0,46 \mu\text{Gy} \cdot \text{h}^{-1}$  et  $85 \mu\text{Gy} \cdot \text{h}^{-1}$  pour des raies de 0,511 MeV, 3,09 MeV, et 4,44 MeV respectivement. La figure 4 représente une distribution-type des hauteurs d'impulsions.

### 3.4 Rayonnements de référence produits par la réaction de capture radiative de neutrons thermiques dans le titane ou le nickel

Ces faisceaux doivent être produits par la réaction de capture  $(n, \gamma)$  dans une cible de titane ou de nickel en utilisant un réacteur comme source de neutrons. La figure 5 représente un exemple d'installation d'irradiation<sup>[6]</sup>. Des spectres multiraies sont produits avec les deux types de cible. Le tableau 2 donne les rendements en photons pour les principales composantes spectrales, c'est-à-dire plus de 3 photons émis pour 100 captures de neutrons<sup>[7]</sup>.

Pour utiliser le rayonnement ainsi produit comme rayonnement de référence entre 4 MeV et 9 MeV, ses composantes de faible énergie doivent être atténuées ou éliminées au moyen d'une filtration supplémentaire appropriée. La contribution individuelle des différentes raies du spectre au kerma dans l'air total dépend de l'importance de la filtration supplémentaire. Avec une filtration adéquate, l'énergie effective du rayonnement de référence peut être augmentée et passer de 5 MeV à 6,5 MeV pour le titane et d'environ 7 MeV à 8,5 MeV pour le nickel<sup>[6]</sup>.

La figure 6 montre une distribution-type des hauteurs d'impulsions pour une cible en titane et la figure 7, une distribution-type des hauteurs d'impulsions pour une cible en nickel, les énergies de référence correspondantes étant respectivement 6,4 MeV et 8,1 MeV<sup>[8]</sup>. Les distributions des deux figures 6 et 7 n'ont pas été corrigées pour tenir compte de la réponse du détecteur. Dans les deux cas, la filtration produite par la cible elle-même, par l'absorbeur de neutrons (polyéthylène boré de 10 cm d'épaisseur) et par le moniteur de faisceau est renforcée par un filtre additionnel d'aluminium de 30 cm d'épaisseur.

Le tableau 3 donne des exemples de débits de kerma dans l'air et d'énergies de référence obtenues avec des cibles en nickel et en titane dans les conditions d'expérimentation spécifiées.

Tableau 2 — Principaux rendements en photons du titane et du nickel pour 100 captures de neutrons

a) Titane

Énergie des photons, keV	342	1 381	1 498	1 586	1 762	4 882	4 969	6 418	6 557	6 761
Nombre de photons, (supérieur à 3 photons pour 100 captures de neutrons)	26,3	69,1	4,1	8,9	5,6	5,2	3,6	30,1	4,7	24,2

b) Nickel

Énergie des photons, keV	283	465	878	6 837	7 537	7 819	8 121	8 533	8 999
Nombre de photons, (supérieur à 3 photons pour 100 captures de neutrons)	3,3	13	3,9	10,8	4,5	8,2	3,1	17	37,7

Tableau 3 — Rayonnement gamma de capture : exemples de cibles et énergies de référence et débits de kerma dans l'air associés<sup>[6]</sup>

Matériau	Cible			Énergie de référence MeV	Débit de kerma dans l'air* à 5 m de distance pour un débit de fluence des neutrons thermiques de $1,5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ Gy.h <sup>-1</sup>
	Dimensions mm	Masse kg	Pureté %		
Titane	550 × 100 × 15	3,7	98	6 ± 0,5	0,8
Nickel	550 × 100 × 10	4,9	98	8,5 ± 0,5	1,2

\*) Ces valeurs ne sont données qu'à titre indicatif. Elles ont été obtenues en utilisant une filtration du faisceau constituée de 102 g.cm<sup>-2</sup> de polyéthylène et 14 g.cm<sup>-2</sup> d'aluminium. Des filtrations différentes produisent des débits de kerma dans l'air différents.

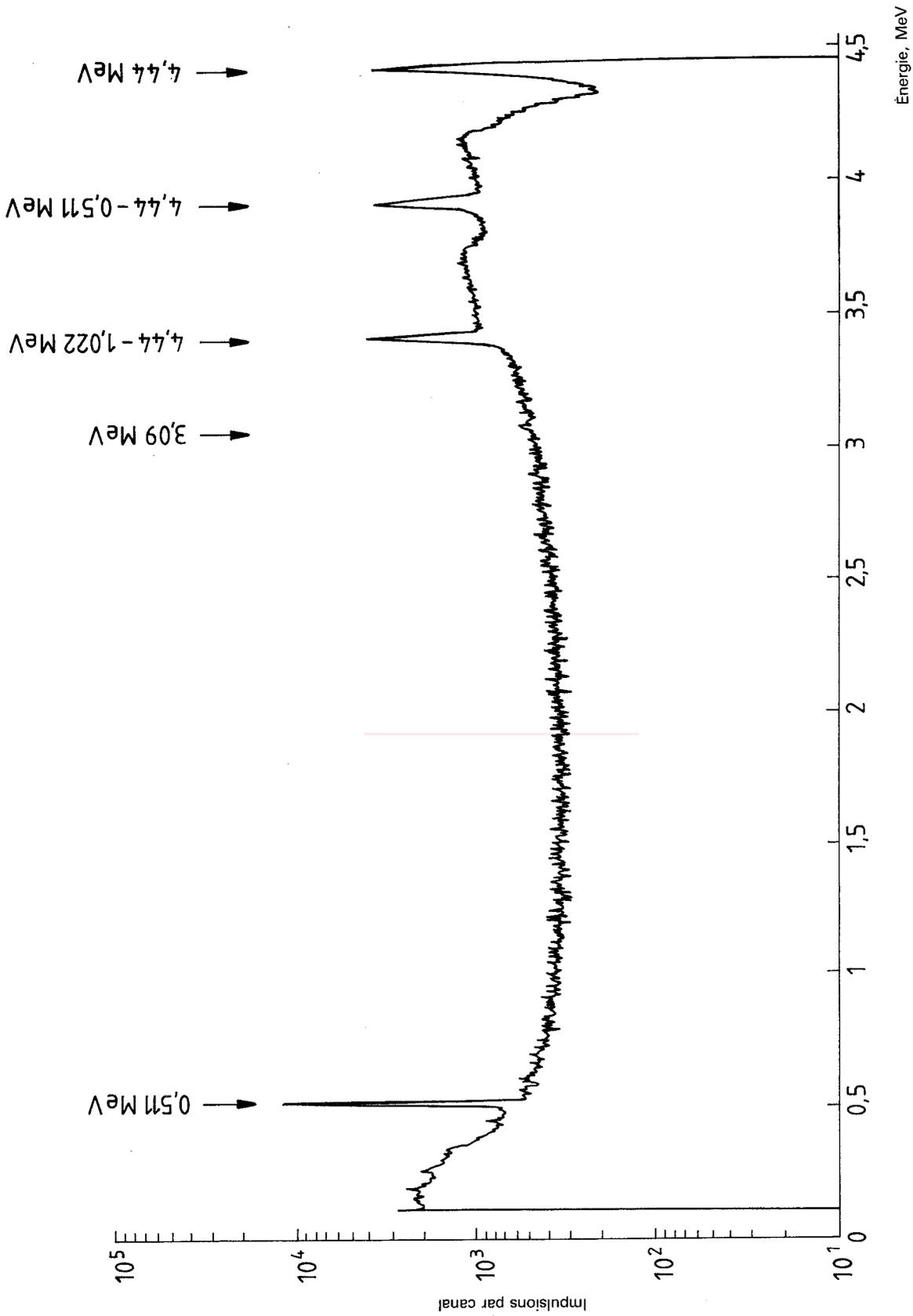


Figure 4 — Distribution des hauteurs d'impulsions enregistrée lors de la désexcitation de  $^{12}\text{C}$  avec un détecteur Ge(Li)<sup>[8]</sup>  
 [Épaisseur de la cible : 2 mm de carbone; énergie des protons : 5,5 MeV;  
 réactions:  $^{12}\text{C}(p, p'\gamma)^{12}\text{C}$ ,  $^{13}\text{C}(p, p'\gamma)^{13}\text{C}$  et  $^{13}\text{C}(p, n)^{13}\text{N}$ ]

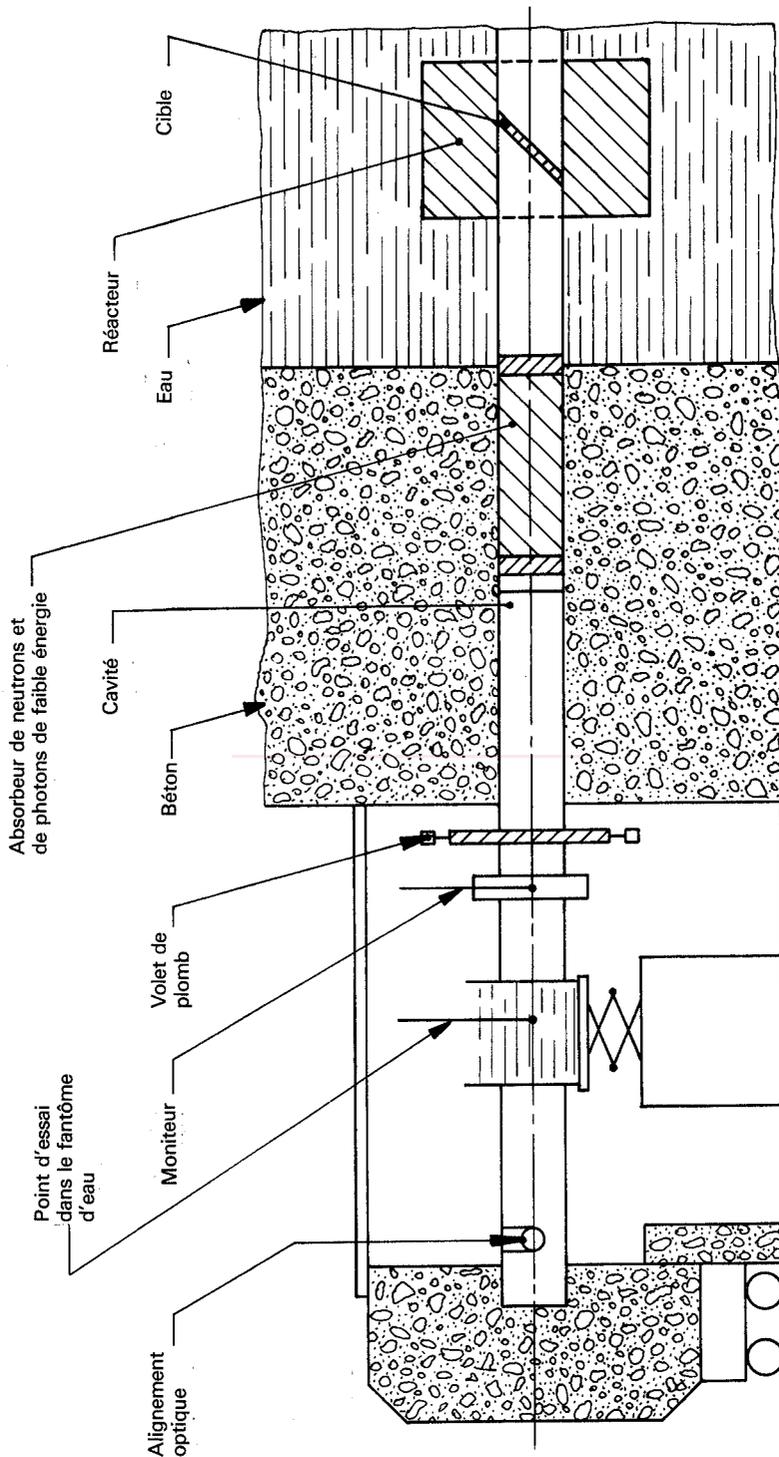


Figure 5 — Exemple d'installation d'irradiation pour la production de rayonnement gamma de capture

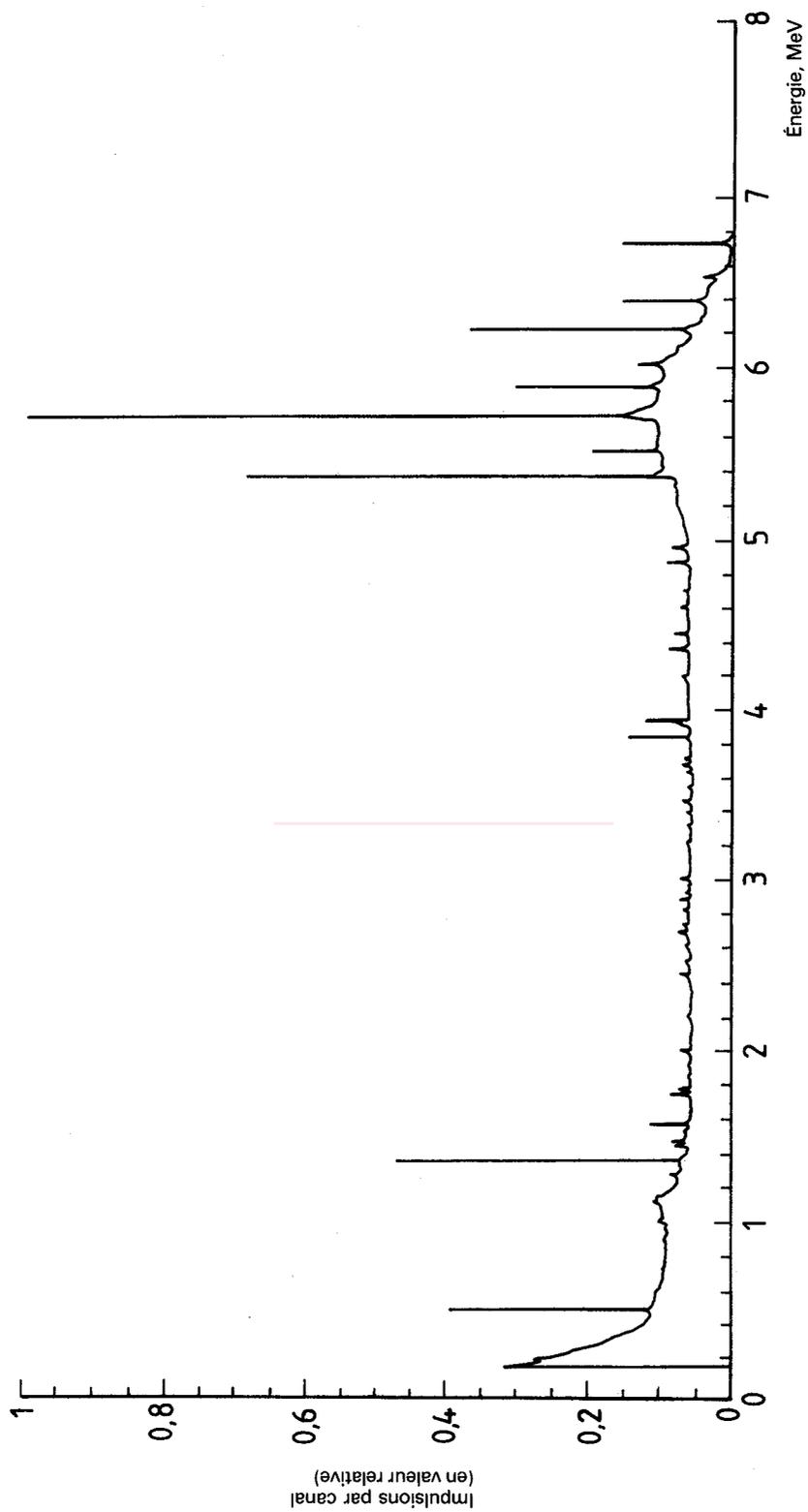


Figure 6 — Distribution des hauteurs d'impulsions enregistrée lors de la réaction de capture radiative dans le titane avec un détecteur Ge(Li)<sup>(7)</sup> [filtration supplémentaire du faisceau : 30 cm d'aluminium]

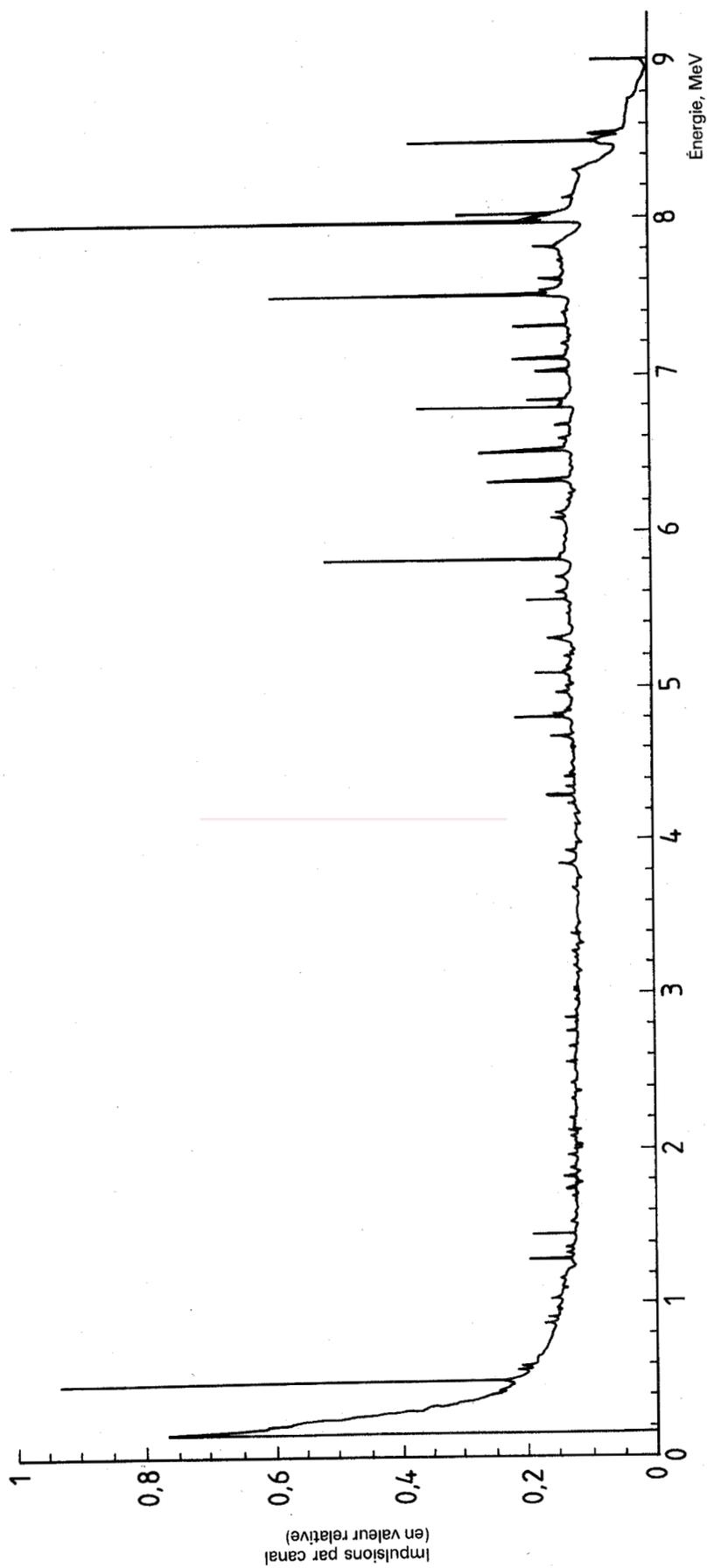


Figure 7 -- Distribution des hauteurs d'impulsions enregistrée lors de la réaction de capture radiative dans le nickel avec un détecteur Ge(Li)<sup>(8)</sup> [filtration additionnelle du faisceau : 30 cm d'aluminium]