

INSTRUMENTATION NUCLÉAIRE
OPTION PHYSIQUE NUCLÉAIRE
2017/2018

Rappel sur les différents types de rayonnements

I- LES DIFFÉRENTS TYPES DE RAYONNEMENTS NUCLÉAIRES

Un rayonnement peut être défini comme l'émission ou la propagation d'un ensemble de radiations avec transport d'énergie et émission de corpuscules, Il existe plusieurs types de rayonnements :

- ❑ les électrons, les protons, les alphas, les pions, les muons les neutrinos
- ❑ les noyaux lourds et fragments de fissions
- ❑ les neutrons et les photons.

LES PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES D'UN RAYONNEMENT SONT :

- Son origine : moléculaire, atomique ou nucléaire.
- Sa nature : photons, particule élémentaire ou noyau lourd.
- Sa charge : négative, nulle, positive.
- Son énergie : basse, intermédiaire, haute.
- Sa période : courte, moyenne, longue.
- Son intensité : faible, moyenne, forte.
- Le type de réactions potentiel : avec atome, noyau, nucléon. .
- Sa probabilité d'interaction : faible, moyenne, élevée.

La détection d'une particule ou d'un rayonnement donné est liée à ses interaction avec la matière, on va distinguer deux grandes familles :

- les particules chargées
- les particules non chargées

1) Les particules chargées

Elles se subdivisent en deux familles : les particules chargées lourdes (ions lourds et noyaux lourds) et les particules chargées légères (les électrons, les protons, l'alpha et les deutons)

2) Les particules non chargées ou neutres

Comme leur nom l'indique, il s'agit de particules électriquement : les photons et les neutrons.

2.1- Les photons

Appelés aussi rayonnements électromagnétiques, les photons ont:

- une masse nulle
- une énergie E proportionnelle à leur fréquence ($E=h\nu$)

h est appelée constante de Planck ; $h = 6,626 \times 10^{-34}$ J.s⁻¹.

Et:

ν est la fréquence en s⁻¹

Rappel : L'énergie E_γ du photon est reliée à sa fréquence ν et à sa longueur d'onde λ par:

$$E_\gamma = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad \Rightarrow \quad \boxed{E_\gamma_{(eV)} = \frac{1240}{\lambda_{(nm)}}$$

Classification des rayonnements électromagnétiques

Nom	Longueur d'onde (m)	énergie
Basses fréquences	10^8 à 10^3	---
Moyennes fréquences	10^3 à 10^2	---
Hautes fréquences	10^2 à 10^{-1}	---
Micro-ondes	10^{-1} à 10^{-3}	---
Infrarouge	10^{-3} à $7,5 \cdot 10^{-7}$	0,001 à 1,65 eV
Visible	$7,5 \cdot 10^{-7}$ à $4 \cdot 10^{-7}$	1,65 à 3,1 eV
Ultraviolet	$4 \cdot 10^{-7}$ à 10^{-7}	3,1 à 12,4 eV
Rayon X	10^{-7} à 10^{-11}	12,4 eV à 124 keV
Rayon γ	10^{-11} à 10^{-13}	0,124 à 12,4 MeV
Rayons cosmiques	10^{-13} à 10^{-14}	12,4 à 124 MeV

2.2 Les neutrons

- Le neutron est un nucléon de charge électriquement nulle et de masse égale à 1838 fois la masse de l'électron ($m_n = 1,008665 \text{ u}$).

3) Rappel sur la probabilité d'interaction

Elle est notée σ et s'exprime en barns ($1 \text{ barn} = 10^{-24} \text{ cm}^2$).

La notion de section efficace est liée :

- au type de particules incidentes (photon, neutron, proton, électron.)
- à l'énergie des particules incidentes,
- au noyau de l'isotope concerné (^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu , ^3He , $^{10}\text{B}..$),
- au type de réaction mis en jeu (absorption, diffusion, fission.).

LES SOURCES RAYONNEMENTS NUCLÉAIRES :

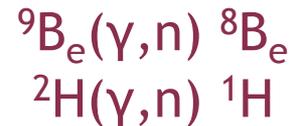
- ⊙ accélérateurs:
 - ✓ générateurs de neutrons
 - ✓ van de graaff
 - ✓ cyclotron
- ⊙ les réacteurs nucléaires
- ⊙ les sources radio-isotopiques

1) accélérateurs

- Les accélérateurs de particules, type:
 - Van de Graaff
 - Linéaires
 - synchrotrons ou cyclotrons

Peuvent fournir des neutrons résultants du bombardement d'une cible appropriée par des deutons, protons, alphas, etc.

- On peut encore utiliser le rayonnement de freinage d'un faisceau d'électrons, qui produit des réactions (γ, n) telles :

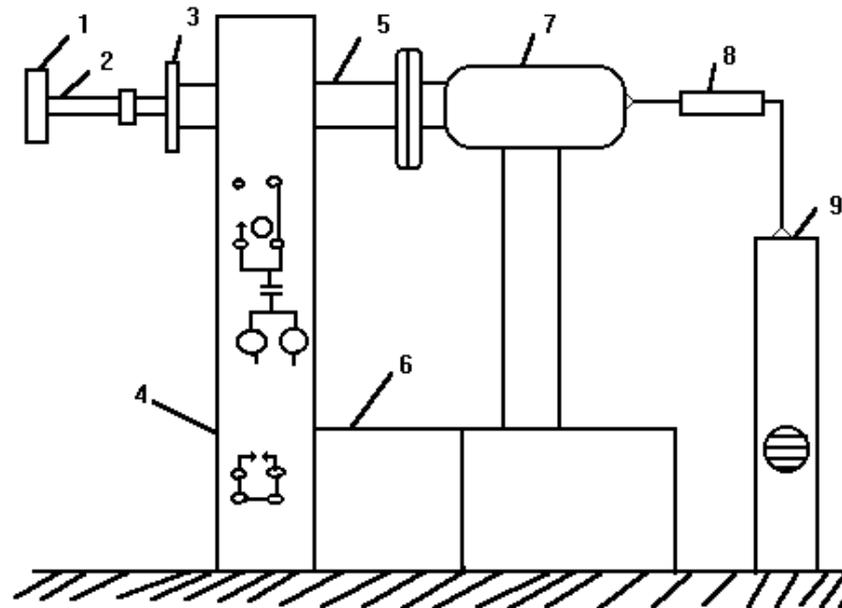


- Des accélérateurs de deutons de 100 à 200 KeV sont très utilisés pour constituer des générateurs de neutrons. Les réactions mises en jeu sont :

${}^2\text{H}(d, n){}^3\text{H}_e$ qui donne des neutrons de 2,6 MeV

${}^3\text{H}(d, n){}^4\text{H}_e$ qui donne des neutrons de 14 MeV.

- Les neutrons de 14 MeV sont très utilisés pour produire des réactions (n,p), (n, α) et (n,2n).



Accélérateur Sames, type J, 300 kV, 3 mA [39].

- 1- cible
- 2- Piège
- 3- Trappe escamotable
- 4- Tableau de commande
- 5-Tube accélérateur
- 6-Groupe de masse
- 7-électrode HT (contenant la source d'ions)
- 8 - Résistance d'amortissement 10 M Ω , 10 mA
- 9-Générateur HT 300 kV, 3 mA.

FONCTIONNEMENT:

- Le deutérium, contenu dans un réservoir, diffuse à travers une paroi en palladium dont la perméabilité augmente avec la température. Puis il rentre dans une ampoule de quartz appelée source d'ions où il est ionisé par un oscillateur de 100 MHz avec un rendement de 80 %.
- Ce pourcentage élevé, d'ions monoatomiques, permet de produire des neutrons de 14 MeV, lorsque les deutons accélérés par la haute tension de 300kV frappent une cible de tritium.
- La réaction nucléaire qui se produit est de type $T(d,n)\alpha$.
- Le tube permet de régler la focalisation du faisceau vers la cible qui est au potentiel de la terre.
- Il est maintenu sous vide grâce à une pompe primaire à palettes et une pompe secondaire à diffusion d'huile, pour que les deutons ne soient pas freinés par l'air.
- La cible est un disque de cuivre de 28,5 mm de diamètre, recouvert d'un dépôt constitué de titane et de deutérium

2) RÉACTEURS NUCLÉAIRES

Les réacteurs nucléaires sont les sources neutroniques très intenses.



Les neutrons bombardant l'échantillon dans un réacteur nucléaire sont isotropes



résultat une irradiation homogène dans toute la masse de l'échantillon irradié



Les positions d'irradiation dans ces réacteurs déterminent le flux neutronique disponible pour les irradiations.

Les flux utilisables vont en général de 10^{12} à plus de 10^{14} n.cm⁻²s⁻¹ selon le type de réacteur, les neutrons sont parfaitement thermalisés, bien thermalisés (1/1000 de neutrons rapides), ou imparfaitement thermalisés (10% de neutrons rapides).



<i>type de neutrons</i>	<i>thermiques</i>	<i>épithermiques</i>	<i>rapides</i>
<i>énergie des neutrons</i>	environ 0,025 eV	entre 0,025 et 10^5 eV	$\gg 10^5$ eV

Energies des différents types de neutrons

3) Sources isotopiques.

Les sources isotopiques sont portables et donnent un flux très stable de neutrons mais le flux neutronique obtenu est beaucoup moins intense que celui d'un réacteur nucléaire. L'émission neutronique de ces sources est exprimée en neutrons par seconde dans un angle solide de 4π stéradians.

Les sources sont de forme cylindrique et sont encapsulées dans une enceinte étanche. L'incertitude sur l'émission neutronique est estimée pour un intervalle de confiance de 99,7%.

Les neutrons sont obtenus par réactions du type (α, n) ou (γ, n) sur des noyaux légers. Les tableaux ci-dessous indiquent les caractéristiques de ces sources.

En plus de ces sources, on utilise le californium 252, de période 2,6 ans, qui produit des neutrons par fission spontanée : 1 mg de ^{252}Cf donne $2,3 \cdot 10^9$ n.s⁻¹ avec une énergie de 2,3 MeV.

Radionucléide	Cible	Période	En en MeV	Φ en $n.cm^{-2}.(4\pi)^{-1}$	ϵ en %
^{241}Am	Be (alliage)	433 ans	2	de 2.10^5 à 10^7	de 2,5 à 5
	Be (mélange)		2	de 2.10^4 à 10^7	
	F		3	2.10^5	3
	Li		2	10^5	3
	B		5	5.10^5	3
^{239}Pu	Be	$2,44.10^4$ ans	10	de 10^4 à 10^7	de 4 à 5
^{227}Ac	Be	21,8 ans	2	de 10^3 à 10^5	3
^{244}Cm	Be	18,1 ans	11,6	de 10^5 à 10^7	3

Caractéristiques des sources isotopiques de type (α,n)

Radionucléide	Cible	Période	En en KeV	ϕ en $n.cm^{-2}.(4\pi)^{-1}$	ε en %
¹²⁴ Sb	Be	60 j	25	10^5 à 10^7	2,5 à 3
²²⁶ Ra	Be	1620 ans	700	10^5 à 10^7	2,5 à 3

Caractéristiques des sources isotopiques de type (γ,n)

Avec :

ε = l'incertitude maximale en %

ϕ = le flux de neutrons produit en neutron/surface/ 4π

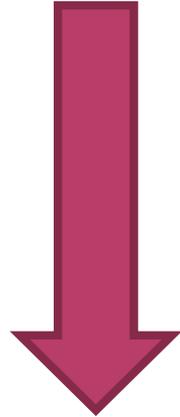
E_n = l'énergie maximale approximative des neutrons produits par la source.

CHAPITRE II:

TECHNOLOGIE DES DÉTECTEURS DE RAYONNEMENTS NUCLÉAIRES

- La détection de rayonnements nucléaires passe obligatoirement par leur interaction avec le milieu détecteur.
- Ces interactions génèrent directement ou indirectement des charges électriques lesquelles, une fois collectées sont amplifiées et converties en signaux électriques.
- Cette opération est rendue possible grâce à la polarisation électrique du détecteur conduisant à l'établissement d'un champ électrique responsable du mouvement des charges produites et de leur collection.

- La détection et la mesure de rayonnements est un processus à plusieurs étapes.
- Il s'agit dans un premier temps de faire interagir le rayonnement incident utile avec le milieu détecteur après qu'il ait franchi l'espace «source-détecteur».
- Ces interactions sont ensuite converties en impulsions électriques qui sont traitées électroniquement et acheminées vers une **unité d'acquisition et d'analyse**



Faire l'image de la répartition de la radioactivité dans une source/un volume :

- Principe de l'imagerie scintigraphique quand ce « volume source » est un patient chez qui on a injecté un produit radioactif

- La détection et la mesure de rayonnements nucléaires est une thématique pluridisciplinaire faisant appel à des connaissances en :
 - Physique nucléaire et atomique
 - Interaction rayonnement-matière
 - Électronique
 - Acquisition, traitement et analyse du signal
 - Statistiques et interprétation des résultats.

- Le taux de comptage, ne permet l'accès à l'activité de la source qu'au moyen d'un traitement approprié prenant en compte :
 - L'efficacité de détection
 - la sensibilité de détection
 - la distance source-détecteur
 - le bruit de fond.

Constitution d'un détecteur

- **Capteur : lieu d'interaction RI - matière**
- **Système d'amplification du signal**
- **Traitement signal: discriminateur d'amplitude**
- **Système d'affichage: fournit donnée mesure**
 - **flux de particules : compteur**
 - **Énergie particules: spectromètre**
 - **Dose absorbée dans milieu: dosimètre ou débitmètre**

Caractéristiques générales des détecteurs

Différents paramètres:

- Efficacité de détection***
- Temps mort***
- Mouvement propre***
- Résolution en énergie***
- Caractéristiques géométriques***

Classification des détecteurs

- **D. mettant en jeu l'ionisation des gaz**
- **D. à scintillations**
- **D. utilisant le noircissement des films photographiques**
- **D. à semi- conducteurs**
- **D. thermoluminescents**
- **Les autres:**
 - **Dosimètres par résonance paramagnétique électronique**
 - **Dosimètres chimiques**
 - **Appareils mettant en jeu les méthodes calorimétriques...**

Caractéristiques générales des détecteurs

Efficacité de détection: E.D: dépend de la nature et de l'énergie du RI

$$E.D = \frac{\text{Nombre particules détectées}}{\text{Nombre particules reçus par détecteur}}$$

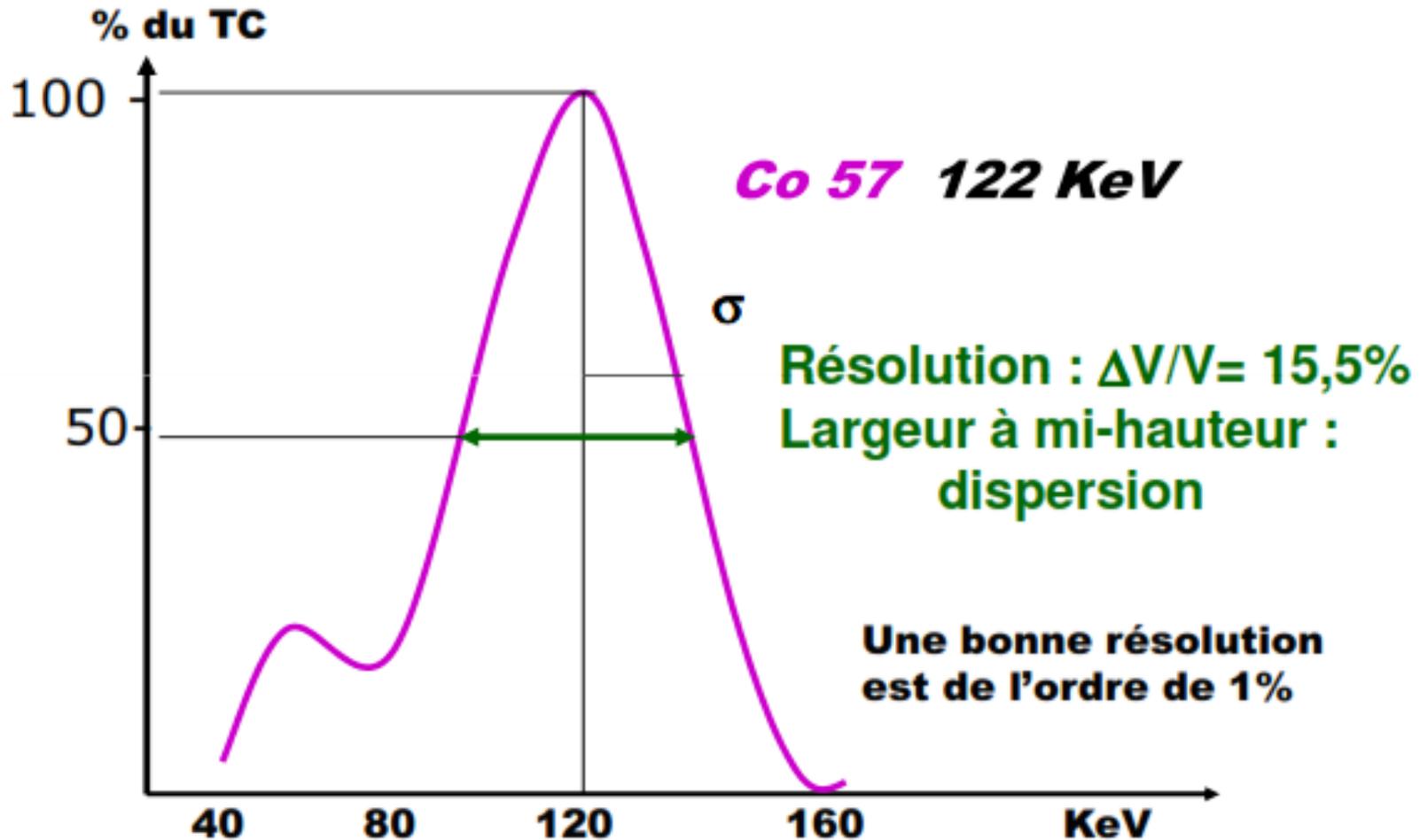
Résolution en énergie :

Caractérise la qualité du détecteur à séparer 2 énergies proches.

Le temps mort : τ

- Plus petit intervalle de temps qui doit séparer deux informations pour être prises en compte individuellement par le système.
- Dépend des caractéristiques du détecteur
- Si τ court \longrightarrow taux de comptage (TC) $\nearrow \nearrow$

Résolution d'un détecteur



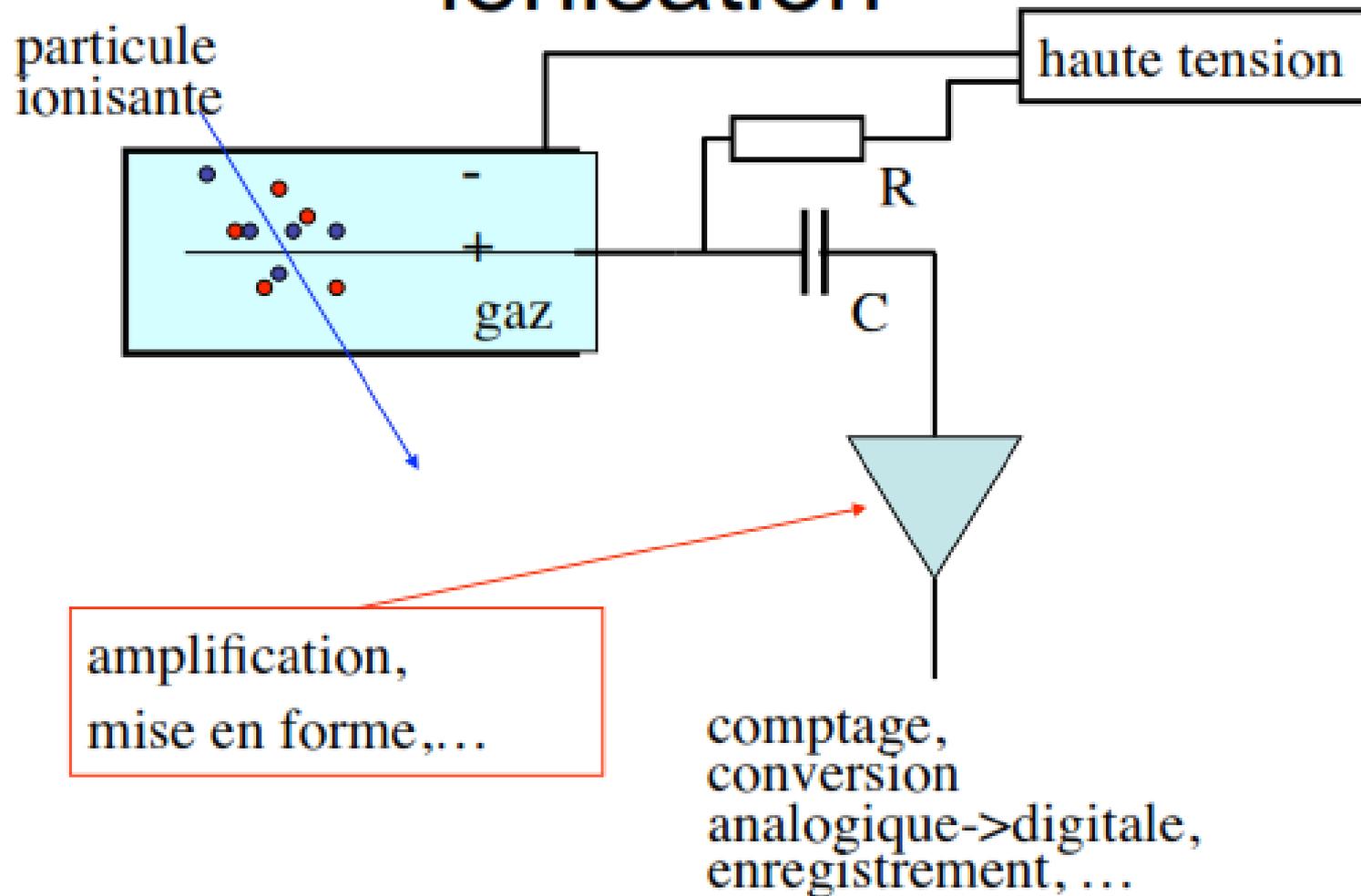
Le mouvement propre

- ❖ **Il correspond au T.C enregistré en *l'absence* de toute source***:
- ❖ ***Origine du M.P :***
 - **Le Bruit de Fond (BF) naturel:**
 - **radioactivité ambiante**
 - **rayonnements cosmiques**
 - **La radioactivité propre des matériaux du détecteur**
 - **Le bruit de l'électronique associée**

1. LES DÉTECTEURS D'IONISATION

- Ces détecteurs détectent le passage d'une particule chargée en mesurant la **charge totale des électrons** et les ions produits dans l'ionisation du milieu par la particule (**formule de Bethe-Bloch**). Le milieu peut être **de gaz, liquide ou solide**.
- Pour récupérer les électrons et les ions **avant qu'ils ne se recombinent en atomes**, il faut la présence d'un champ électrique qui les séparent et les font dériver vers les électrodes respectifs.
- Les charges (électrons et ions) induisent des courants sur les électrodes (figure suivante). Ces courants sont détectés par un amplificateur qui produit un signal électronique.
- Le nombre moyen de paires d'électron-ion produit dans un passage d'une particule chargée est proportionnel à l'énergie perdue, il est donné par la formule de Bethe-Bloch:

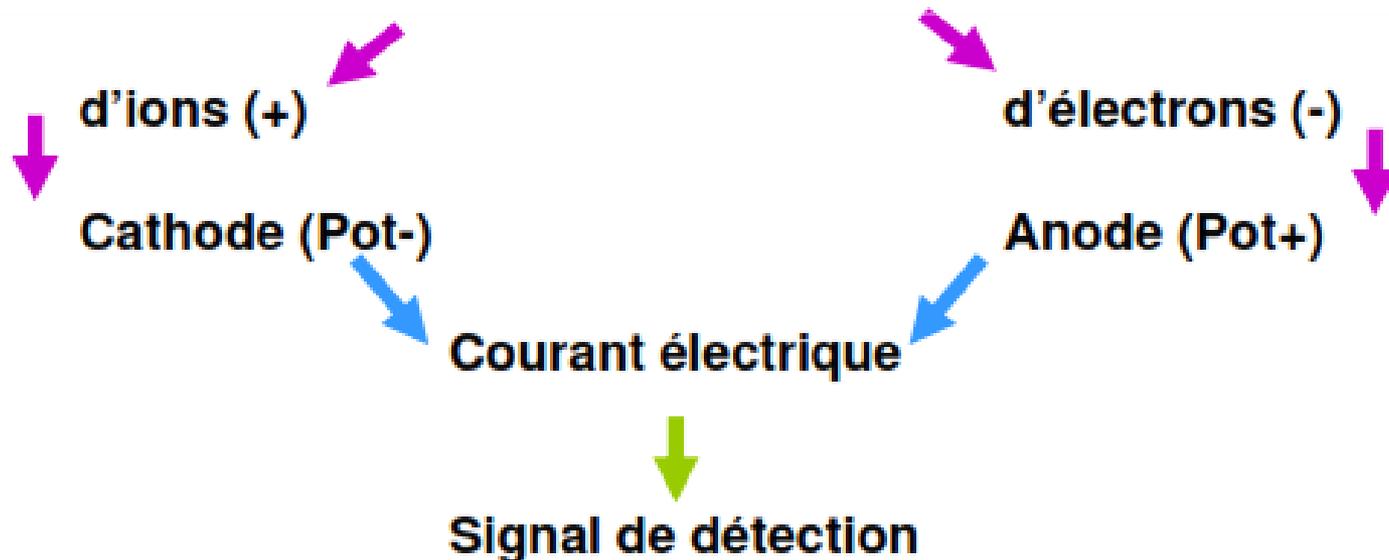
Détection avec chambres à ionisation



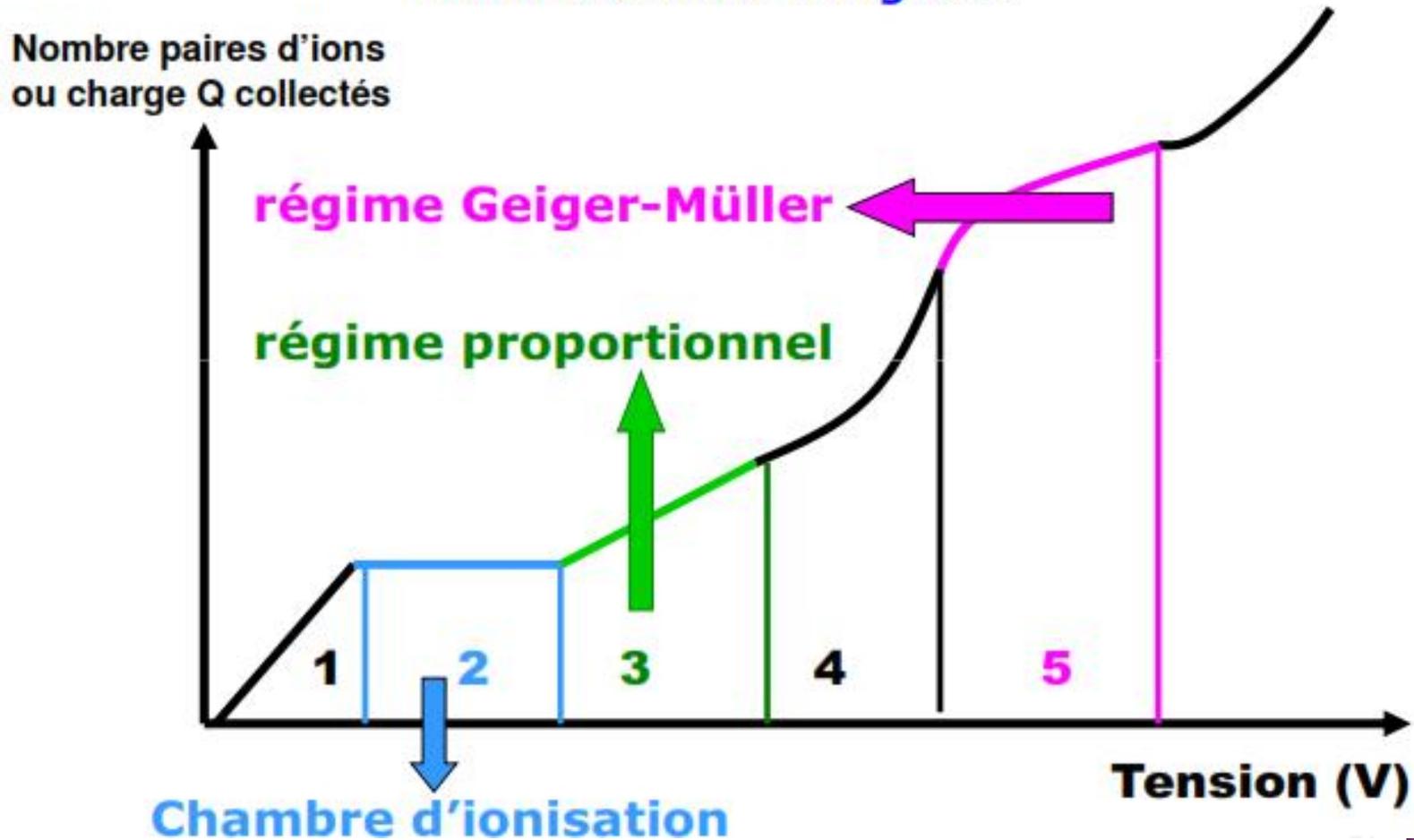
Détecteurs mettant en jeu l'ionisation des gaz (suite)

- ❖ Normalement , en l'absence de tout RI , \forall la différence de potentiel (ddp) appliquée, aucun courant ne traverse la chambre
- ❖ Mais si une particule ionisante pénètre dans l'enceinte :

Production d'un grand nombre



**L'étude de l'impulsion en fonction de la tension permet
d'individualiser 5 régions:**



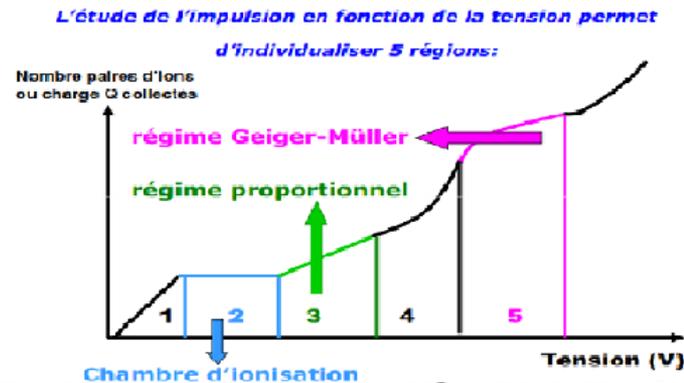
Les 5 régions des détecteurs à gaz

1/ Régime de recombinaison :

- V petite ddp < 100V, champ électrique faible:
- e- et ions se recombinent tous avant d'atteindre les électrodes

2/ Régime d'ionisation primaire :

- ddp $\geq 100-200V$: recombinaison i
- l'amplitude de l'impulsion dépen
- Les appareils fonctionnant dans d'ionisation type «Babyline»; rôl

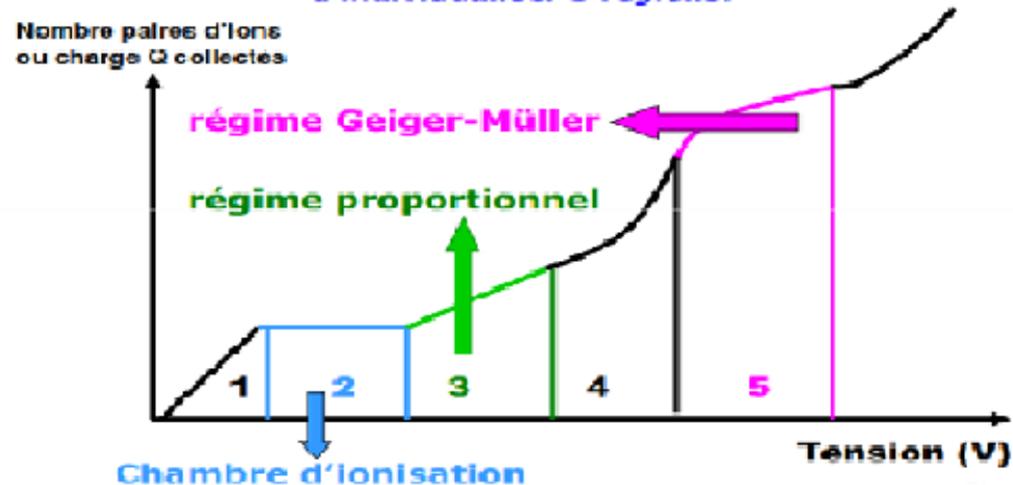


- mesurent leur énergie.

5/ Régime Geiger-Müller: GM

- $P_1 \longrightarrow$ ions I \longrightarrow ions II \longrightarrow ions III
- Avalanche d'ions multipliés en chaîne ,
- Charge Q: indépendante l'ionisation primaire
- Le compteur GM:
 - ne peut *discriminer* es particules selon leur énergie,
 - il ne permet que leur dénombrement
- Le temps de collection des charges: élevé
- Le temps mort également

L'étude de l'impulsion en fonction de la tension permet
d'individualiser 5 régions:



Principales caractéristiques des détecteurs à ionisation

Détecteurs	Particules détectées	t.m : μs	t.c : i/s
Chambre d'ionisation	$\alpha - \beta - X - \gamma$	1-10	$10^4 - 10^5$
Compteur proportionnel	$\alpha - \beta - X -$	1-10	$10^4 - 10^5$
Compteur GM	$\beta - X - \gamma$	100	10^3



NOTER

$$N_1 = n_1 d = \frac{-dE}{W} d$$

Avec :

d : épaisseur du détecteur

W : énergie moyenne pour créer une paire d'électron-ion. Dans les gaz $W \sim 30$ eV.

Puisque l'énergie ou une fraction de l'énergie perdue par une particule chargée est déterminée à partir de l'ionisation produite sur la totalité ou une partie de son parcours dans le milieu de détection, la précision des mesures est soumise aux fluctuations du nombre de paires « électron-trou » produit.

Le calcul le plus simple donne ce nombre, n , en divisant l'énergie perdue dans le milieu, ΔE , par l'énergie moyenne de production d'une paire « é-trou », w

$$n = \frac{\Delta E}{w}$$

- On général, la distribution obéit à loi de poisson, de sorte que l'écart type σ est relié à la moyenne \bar{N} par

La précision statistique d'une mesure, appelée encore erreur standard relative est :

$$\frac{\sqrt{N}}{N}$$

Si la distribution n'obéit pas à la loi de poisson, l'écart-type σ , Il faut distinguer deux cas :

- Perte total d'énergie de la particule dans le détecteur, $\sigma = \sqrt{F \cdot n}$

- F est le « facteur de Fano »

- Perte partielle d'énergie de la particule dans le détecteur, les calculs font intervenir les expressions compliquées de Landau et Bohr

PROBLÈMES DE COLLECTION:

- ⊙ Chocs ions-molécules : la charge + peut être transférée à un autre atome ou molécule du milieu : il y a transfert de charge. La charge + passera sur l'atome ou la molécule de plus faible énergie d'ionisation.
- ⊙ Chocs électron-molécule : on obtient une molécule chargée négativement (exp l'oxygène et l'eau).
- ⊙ Recombinaisons : entre (é, trou), le nombre de recombinaison est donné par :

$$\frac{dn}{dt} = -\alpha \cdot n^- \cdot n^+$$

n^- et n^+

sont les nombres 'l'électron et d'ions par unité de volume, α étant le coefficient de recombinaison

MOBILITÉ DES CHARGES:

- Electrons et ions ont des vitesses de déplacement v très différentes :
$$v = \mu \frac{\varepsilon}{p}$$
- ε : champ électrique, p : pression et μ la mobilité
- Une chambre d'ionisation peut fonctionner en courant pour mesurer l'énergie totale laissée par flux de particules (\emptyset de B ou neutrons) dans le détecteur ou en impulsion pour mesurer l'énergie d'une particule chargée définie
- Gaz : quand on fonctionne en courant, souvent c'est l'air : la création d'ions négatifs à faible vitesse de déplacement n'est pas gênante puisqu'on travail en continu, ce sera différent dans le cas de fonctionnement en impulsion.
- Tension : elle doit être telle que la recombinaison et la diffusion soient négligeables, donc travailler à haut voltage sans atteindre la zone des compteurs proportionnels.

Compteurs à scintillations

- **Utilisent les propriétés de certaines substances d'émettre de la lumière visible sous l'action des R.I**
- **Cette émission correspond à *la désexcitation* des molécules du scintillateur consécutives aux ionisations et excitations provoquées par le passage d'un rayonnement ionisant**
- **Détecteur à scintillation composé:**
 - **Scintillateur**
 - **Photomultiplicateur couplé au scintillateur**
 - **Électronique associée**

Le Scintillateur : Cristal NaI+++ Détection gamma: Gamma caméra
Convertit le rayonnement incident en photons lumineux.

Le photomultiplicateur : PM

❖ **Convertit signal lumineux en signal électrique; le PM comprend :**

- **Photocathode : transforme les photons lumineux en électrons.**
- **multiplicateur d'électrons: dynodes.**
- **anode: recueille les é issus et les transforme en impulsions.**

❖ ***L'électronique associée:***

- **alimentation H.T**
- **amplificateur d'amplitude monocanal;**
- **préamplificateur,**
- **analyseur multicanaux**
- **dispositif de comptage.**

Le cristal scintillant

- Scintillateur solide : convertit l'énergie gamma en énergie lumineuse
- Contraintes
 - Densité élevée
 - Scintillateur : absorption + fluorescence
 - Transparent à sa propre lumière
 - Usinable en grandes dimensions
- Iodure de sodium (NaI) dopé au thallium

- Propriétés du NaI

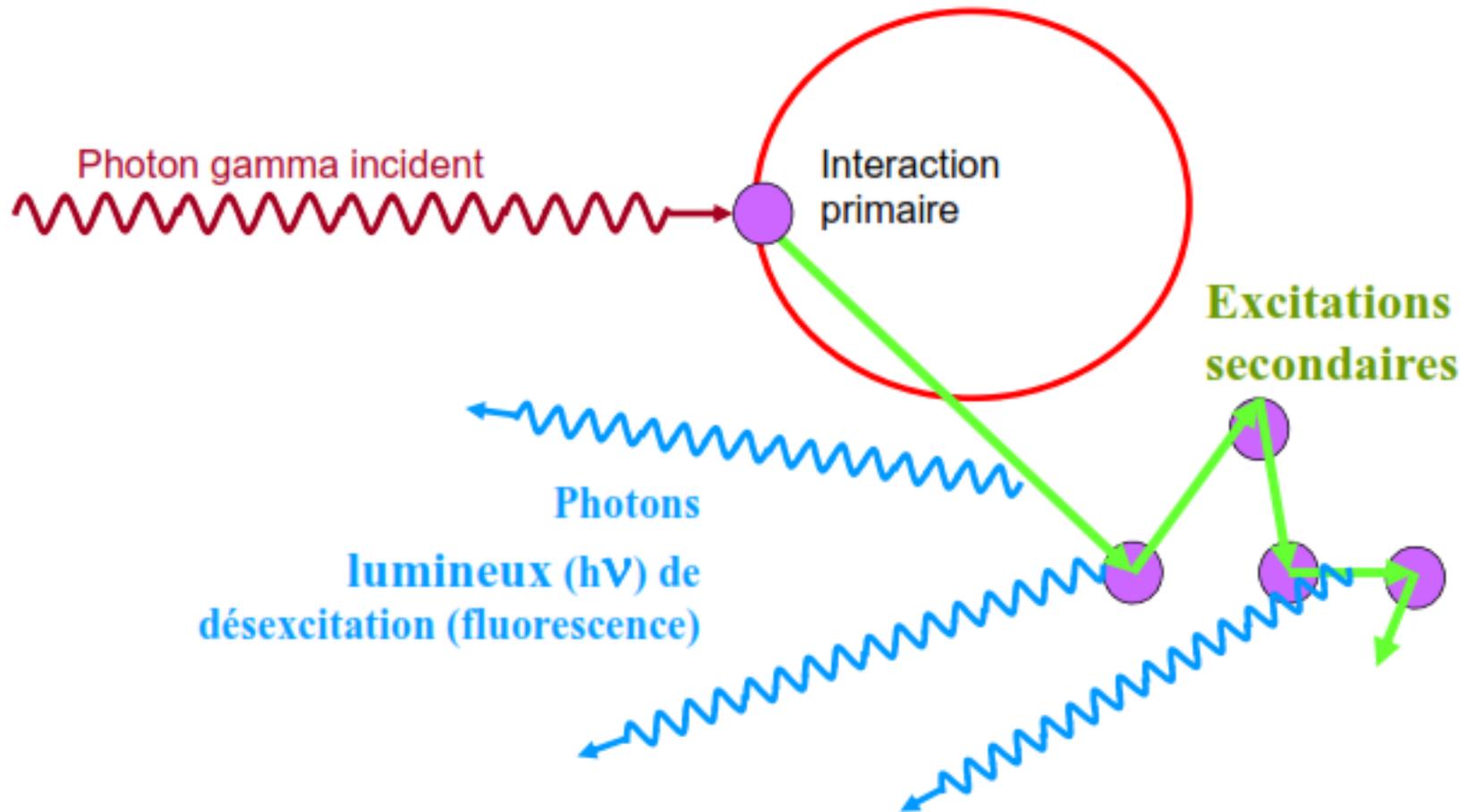
- Masse volumique élevée → absorption d'une fraction importante du rayonnement γ
- Désexcitation des atomes d'iode par émission de photons lumineux de fluorescence

- Intérêt des « impuretés » de thallium

- La lumière émise par l'iode est absorbée par les atomes de Tl qui réémettent une fraction constante sous forme de photons de 3 eV (4150 Å) (proche UV) auxquels le cristal est transparent

- 40 photons par keV

- 30 % de la lumière est transmise à la chaîne de détection

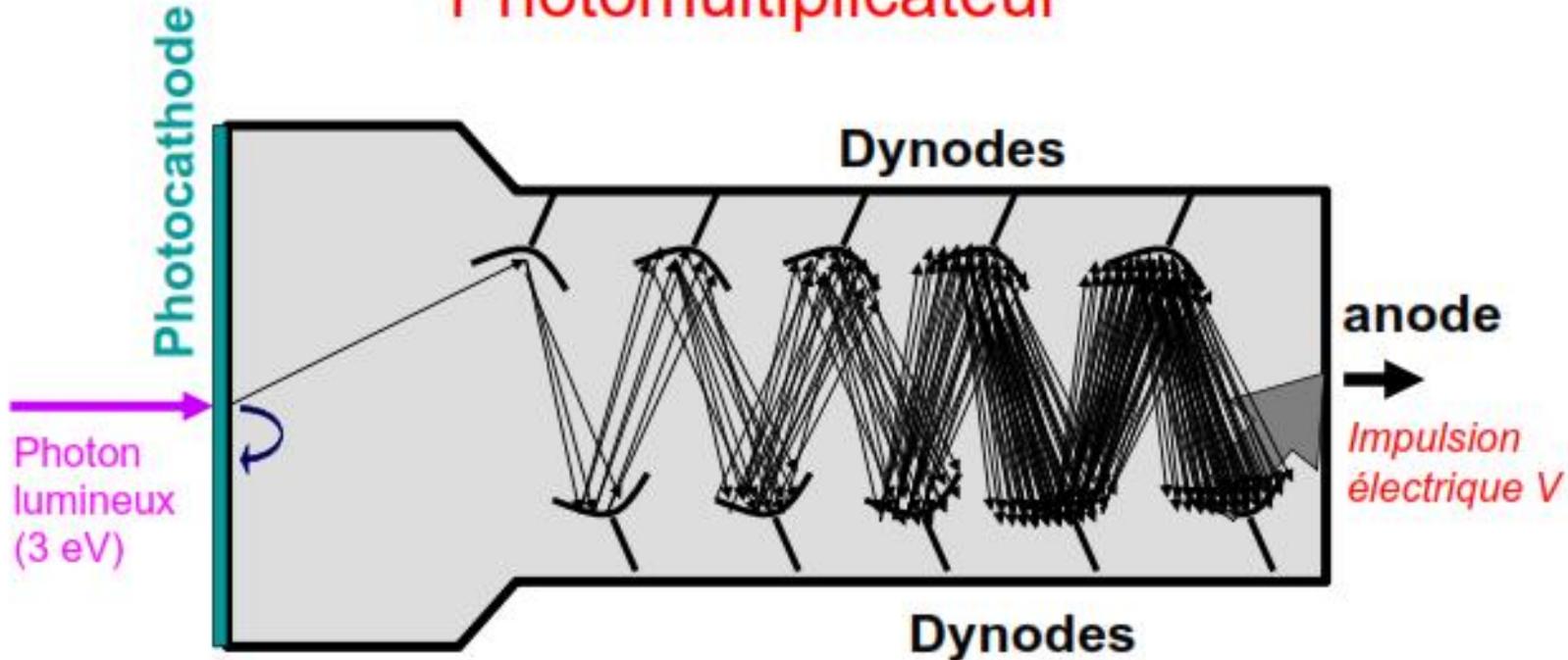


- Linéarité de réponse +++ : le nombre de photons lumineux réémis par le cristal est proportionnel à l'énergie cédée par le photon γ incident
- Contradiction liée à l'épaisseur : compromis entre la résolution et la sensibilité
- Fragilité (humidité, température)
- De plus en plus larges : caméras « grand champ »

Les photomultiplicateurs

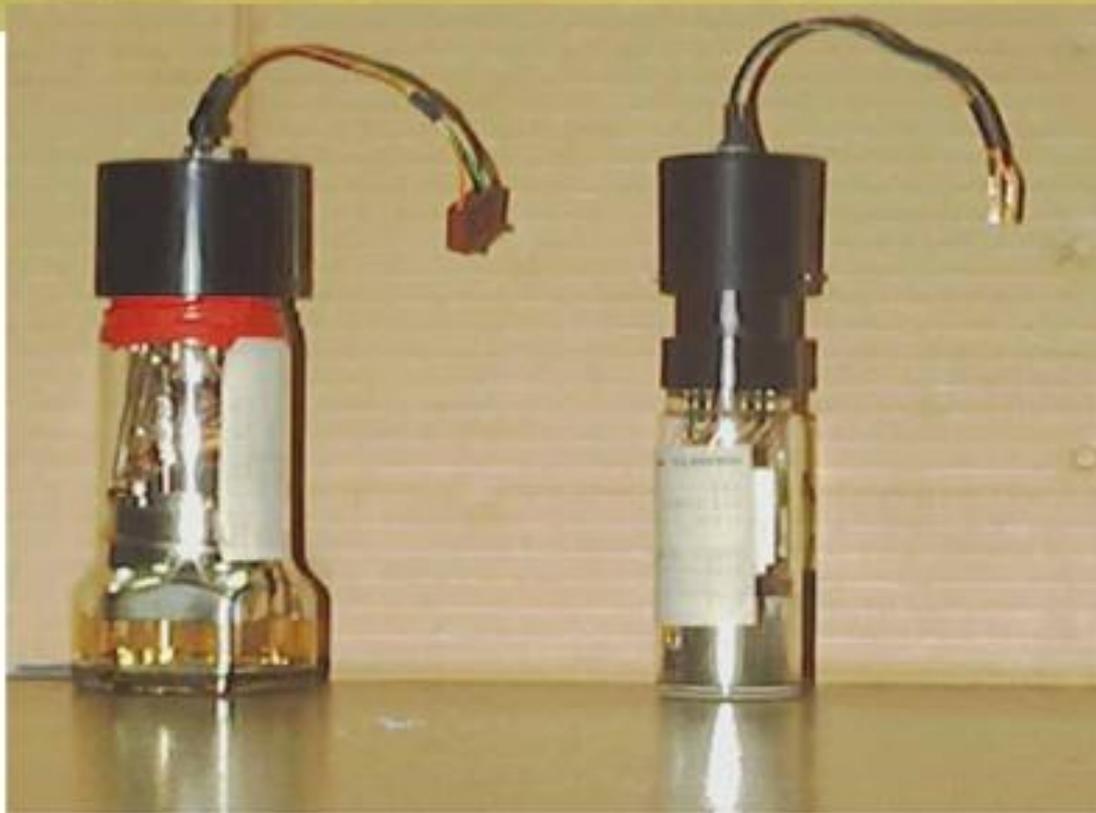
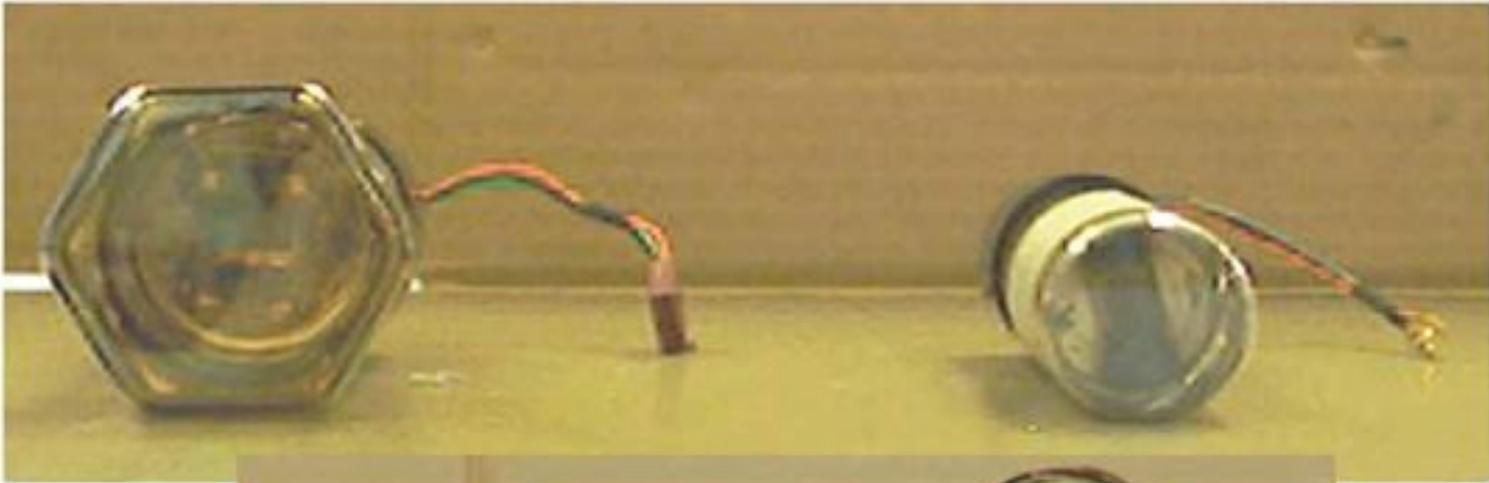
- Convertissent l'énergie lumineuse venant du cristal en signal électrique
- Signal électrique proportionnel à la quantité de lumière reçue (elle même proportionnelle à l'énergie déposée dans le cristal)
 - ↳ **Finalemment : signal électrique proportionnel à l'énergie des photons incidents**

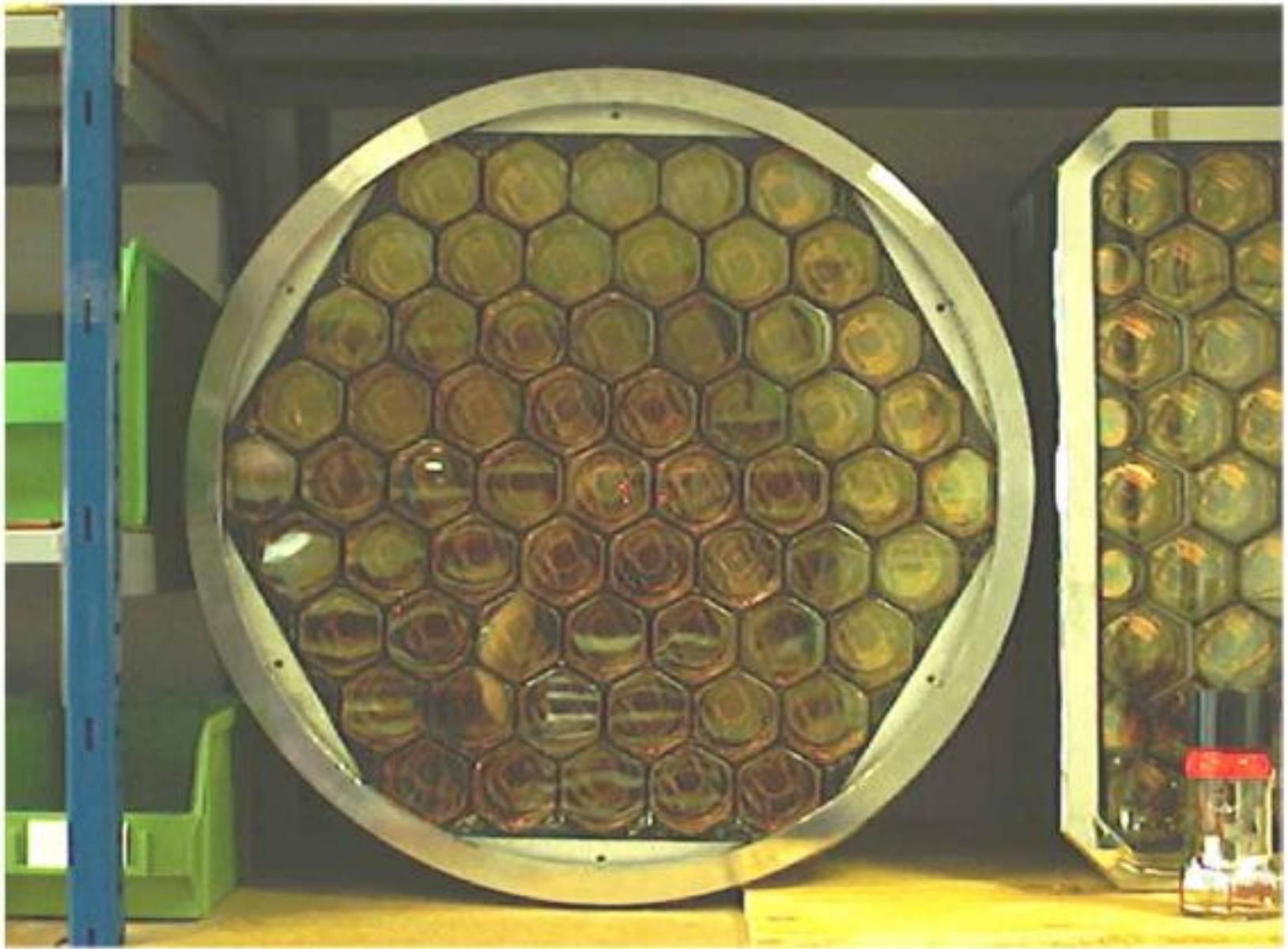
Photomultiplicateur



L' amplitude de V est proportionnelle à la quantité de lumière qui arrive sur la photocathode

- Dans les gamma caméras : matrice de plusieurs photomultiplicateurs :
7 → 19 → 37... → 96
- Buts :
 - Couvrir tout le cristal au mieux
 - Permettre la localisation de l'interaction
- C'est la somme des signaux électriques venant de tous les PM qui est proportionnelle à l'énergie lumineuse





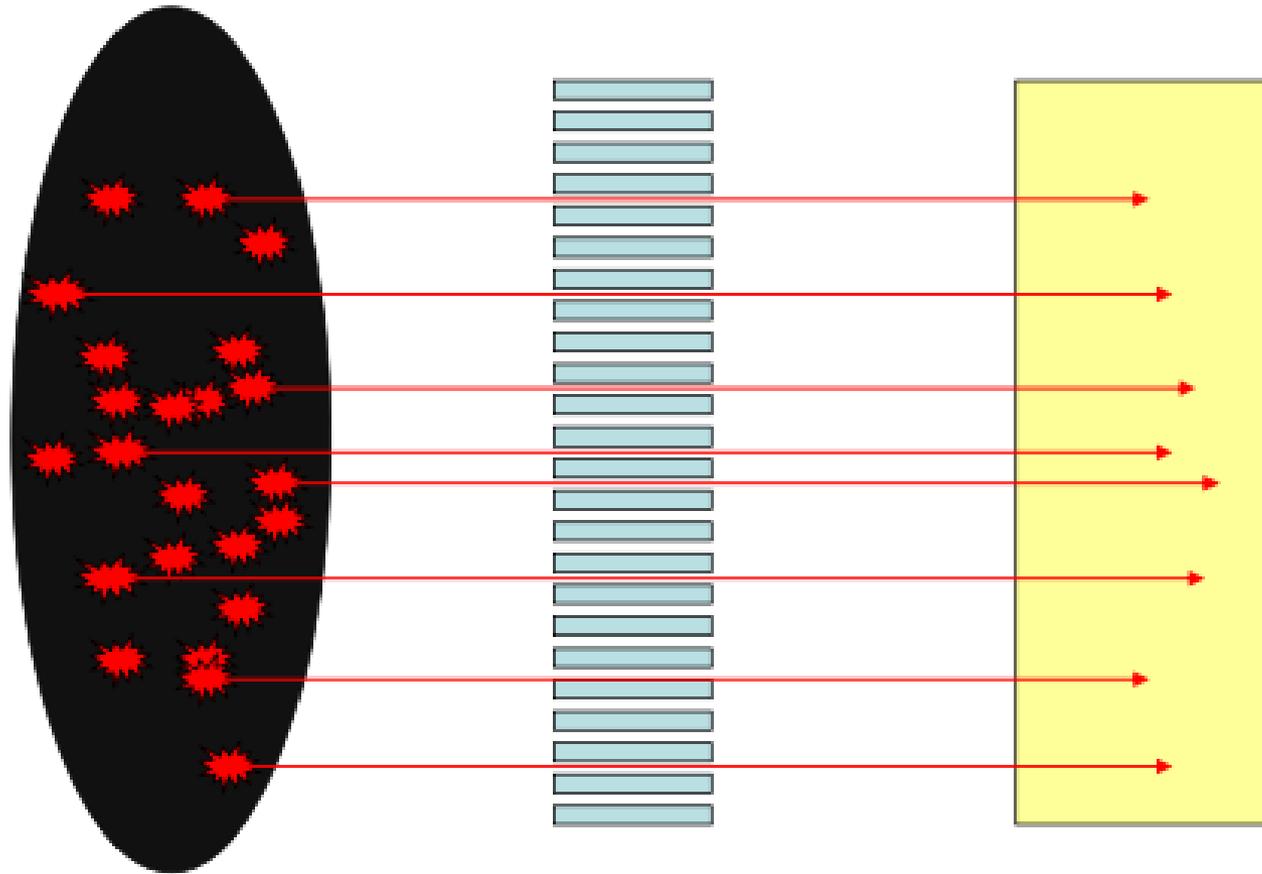
La localisation de l'information

- Collimateur : la cartographie des interactions dans le cristal reproduit la cartographie des événements de désintégration dans la source (= le patient)
- Il s'agit alors de repérer les coordonnées de chaque interaction dans le cristal : rôle des PM et du circuit de pondération

Le collimateur et la collimation

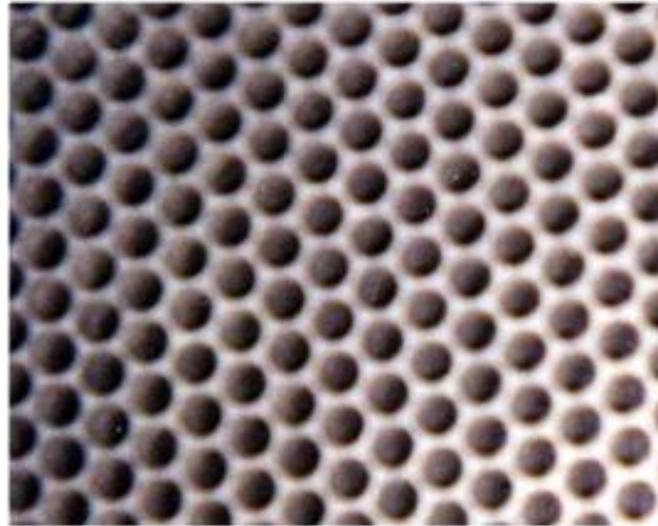
- \approx objectif d'un appareil photo : a pour rôle de sélectionner la direction des photons qui vont former l'image sur le plan de détection
 - MAIS : les photons X et γ ne peuvent pas être déviés
- ➔ On se « contente » d'éliminer ceux qui n'ont pas la direction souhaitée...

Le collimateur et la collimation

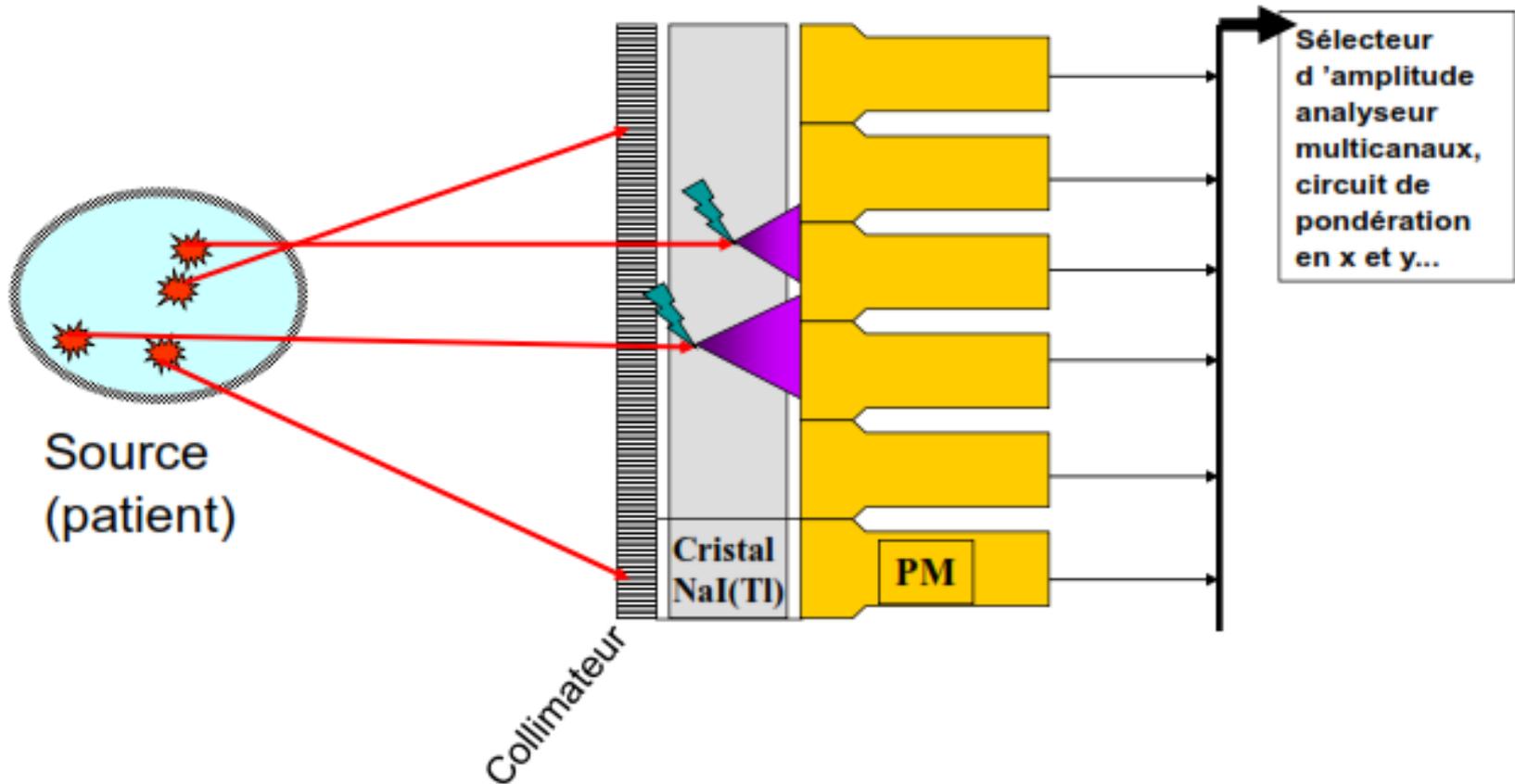


- Cette élimination est importante : pour un collimateur haute résolution, environ **1 photon sur 10 000 émis** traverse le collimateur...
- Le collimateur est l'élément le plus pénalisant de la chaîne de détection...
- Différents types définis par leur fonction de projection

Le collimateur et la collimation

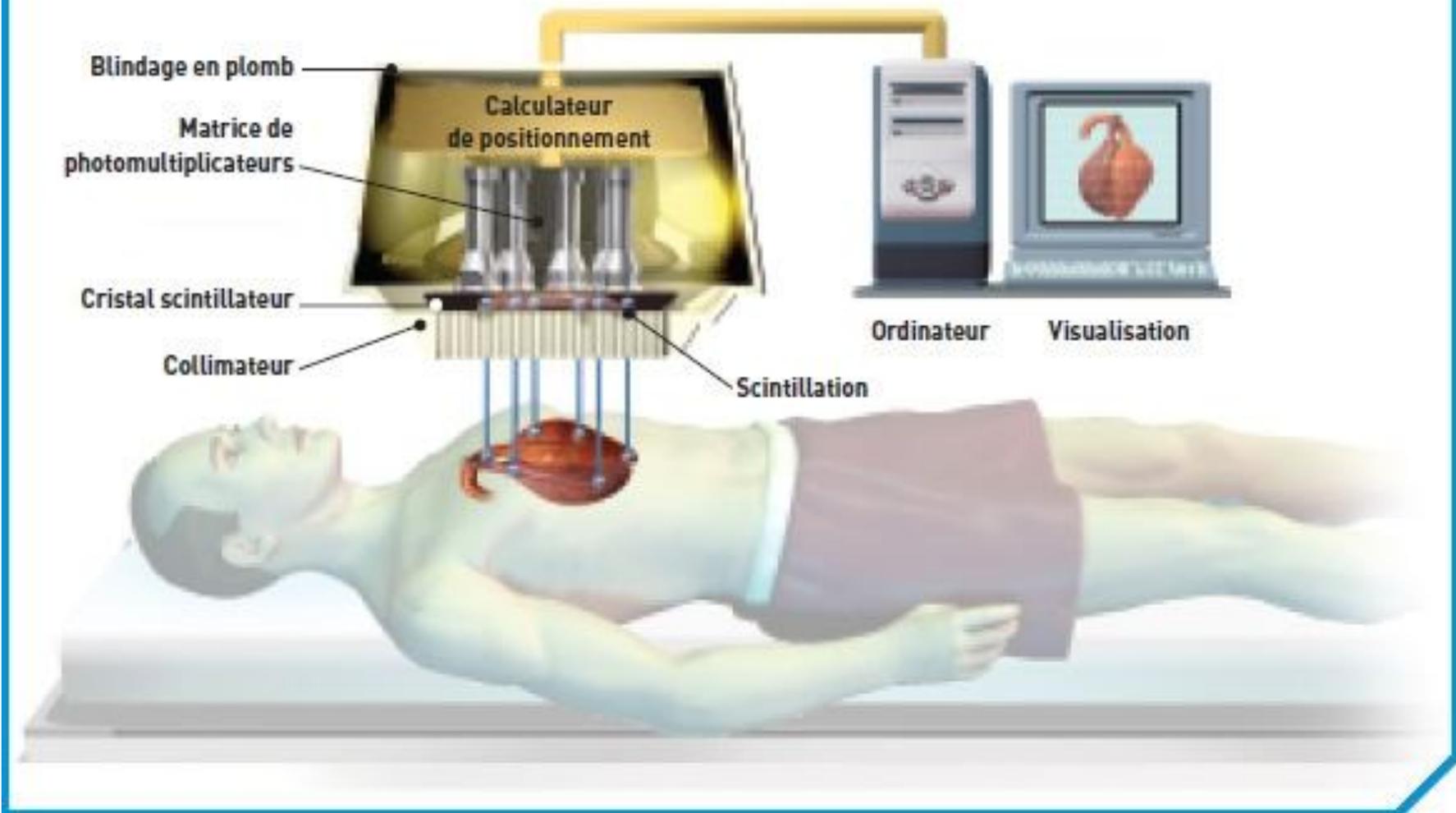


Principe de la détection gamma par scintillateur solide (gamma caméra)



Exemple

Principe de fonctionnement de la gamma-caméra

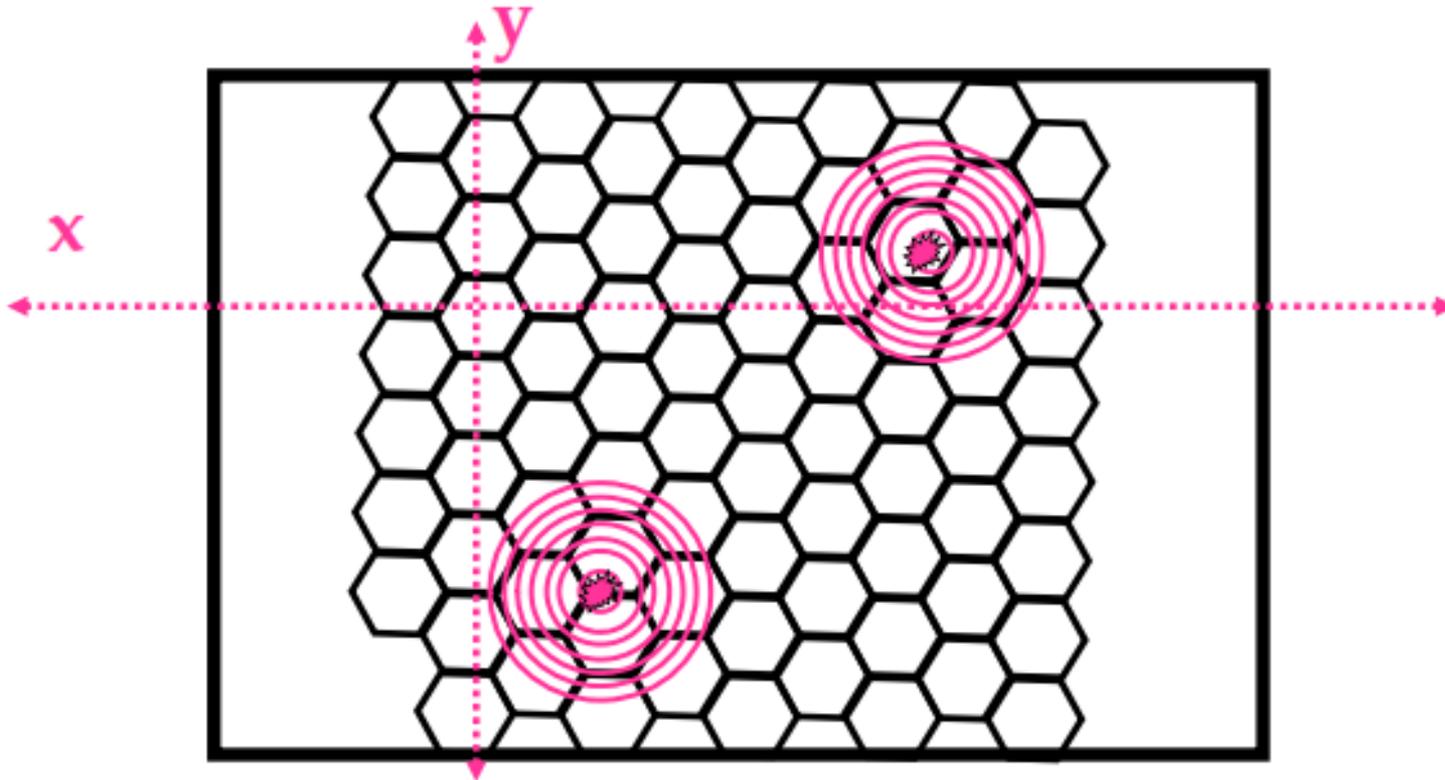


Photomultiplicateurs et localisation de l'information

- L'amplitude du signal de sortie d'un PM varie avec la distance entre le centre de sa photocathode et le lieu où s'est produit la scintillation dans le cristal
- La distribution de l'amplitude des impulsions de sortie des PM fournit l'information de localisation (valeur des coordonnées X et Y) par l'intermédiaire d'un calculateur de positionnement.



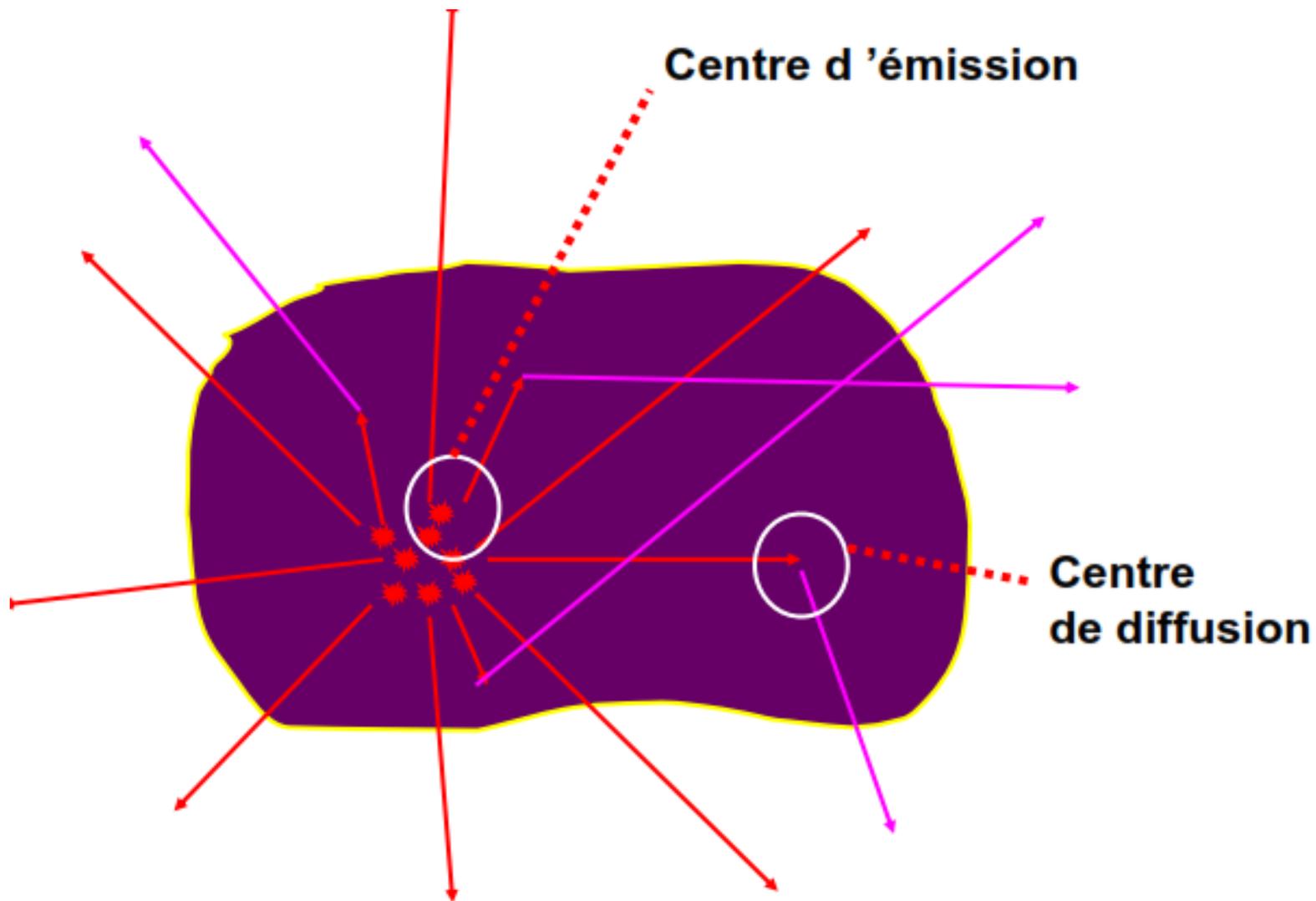
Localisation du point d'interaction dans le cristal
(=du point d'émission de la lumière) :



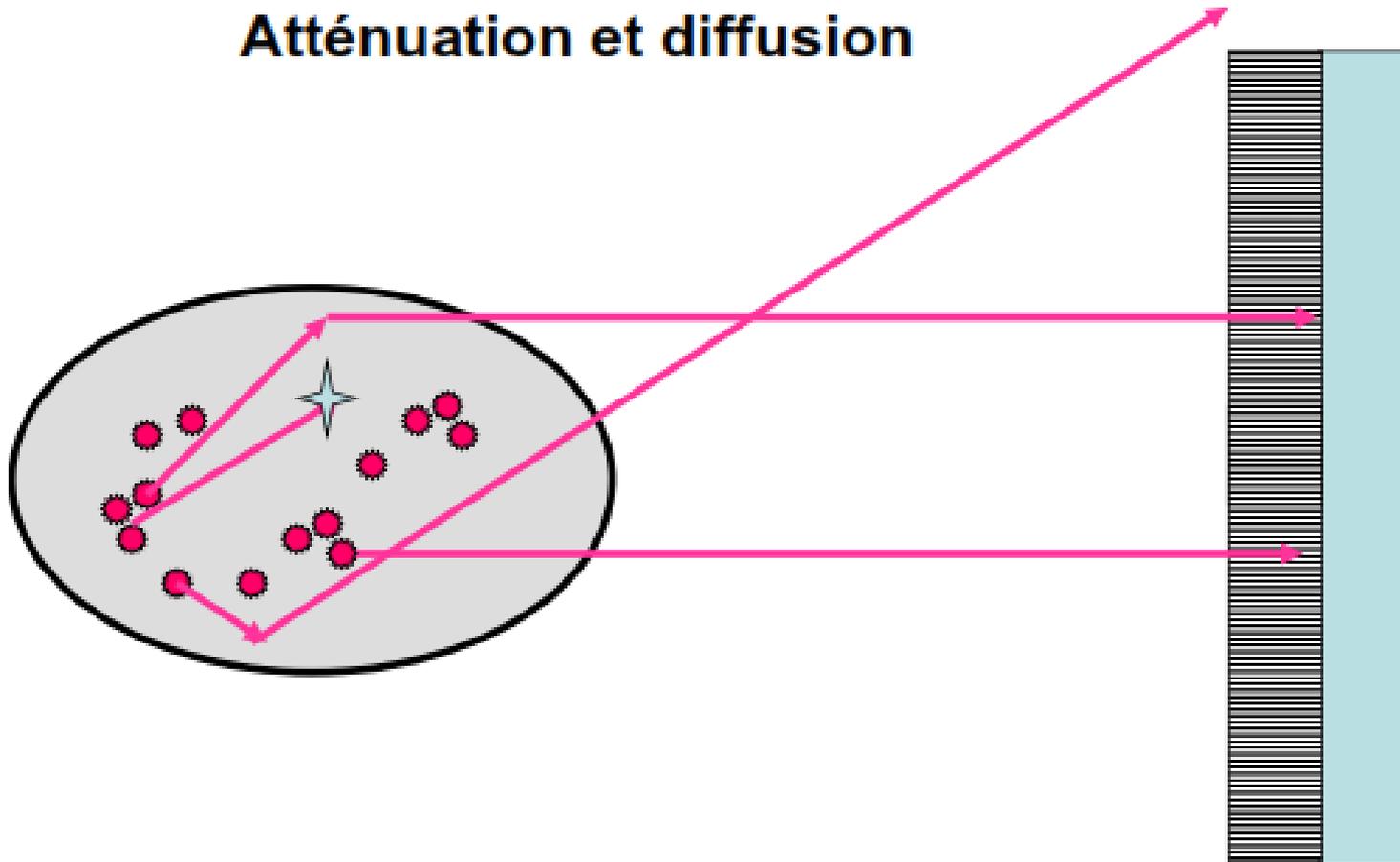
Analyse de l'amplitude des signaux qui sortent de chaque PM à travers un « *circuit de pondération* » (distribution de la lumière sur les différents PM = combinaison unique pour chaque point)

Le rayonnement diffusé et la spectrométrie

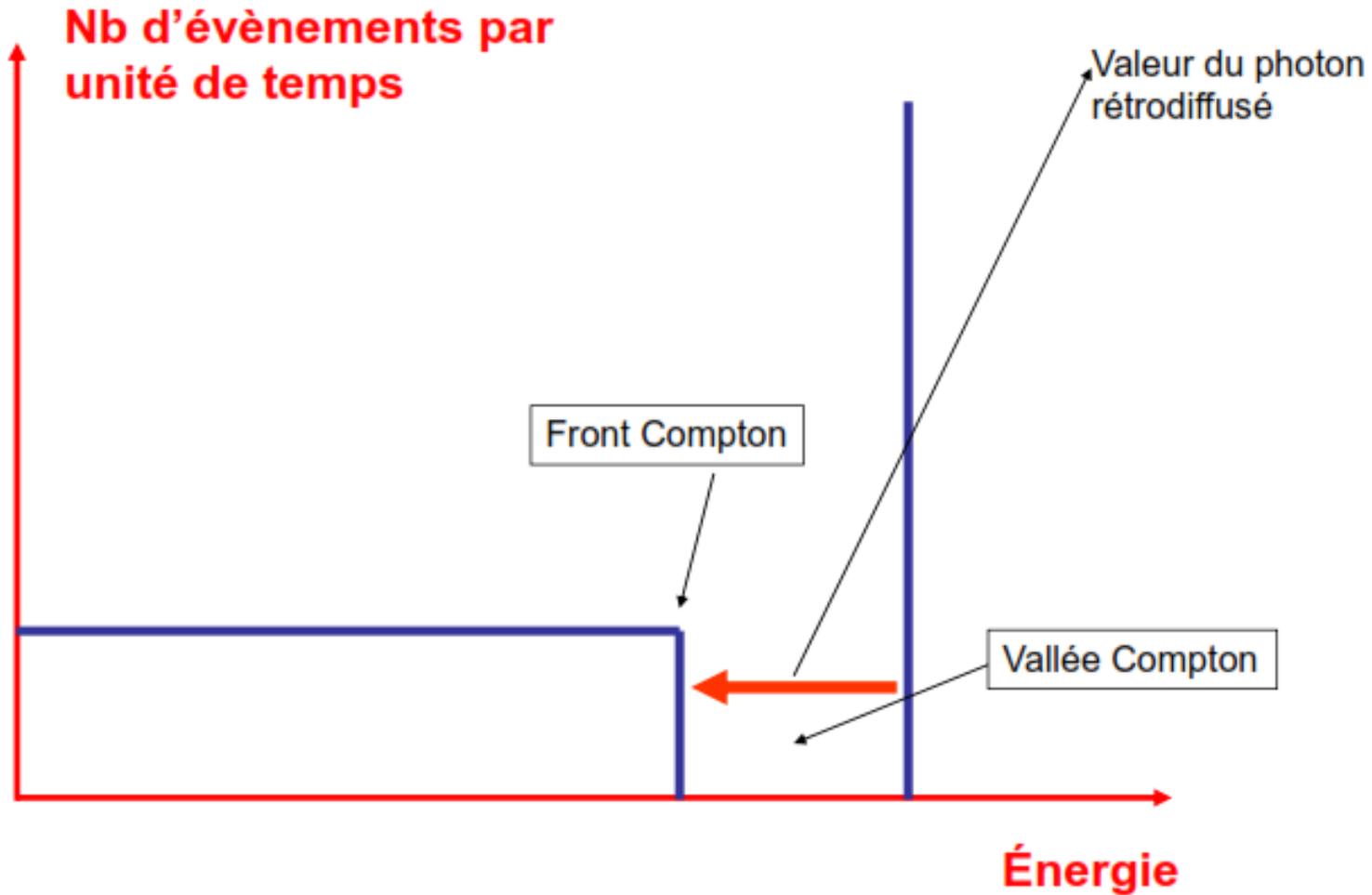
- Le problème du rayonnement diffusé
 - Origine
 - Conséquences
- Comment l'éliminer ?
- Notion de spectre d' énergie



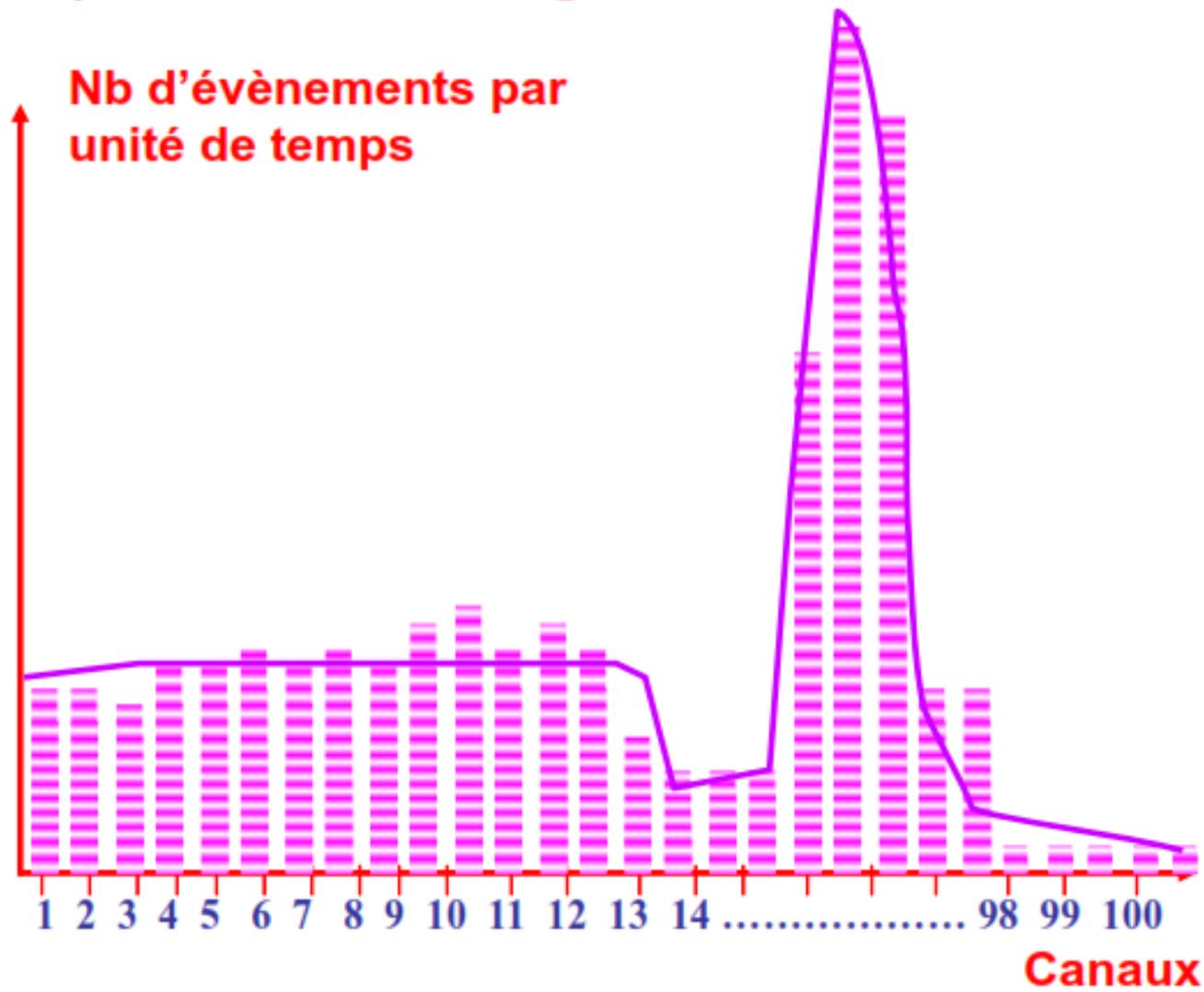
Atténuation et diffusion

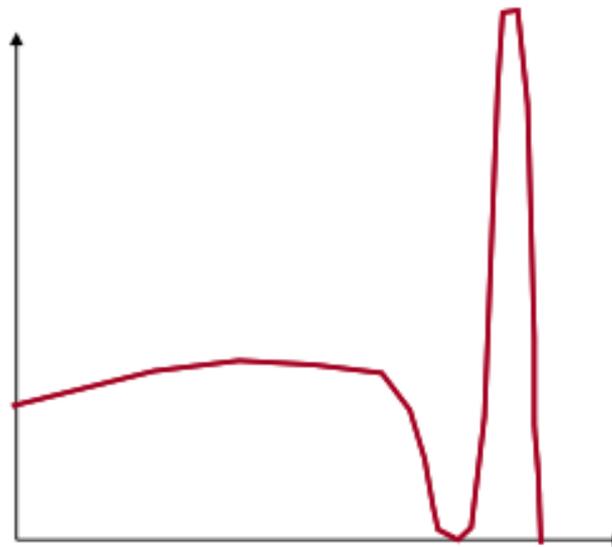
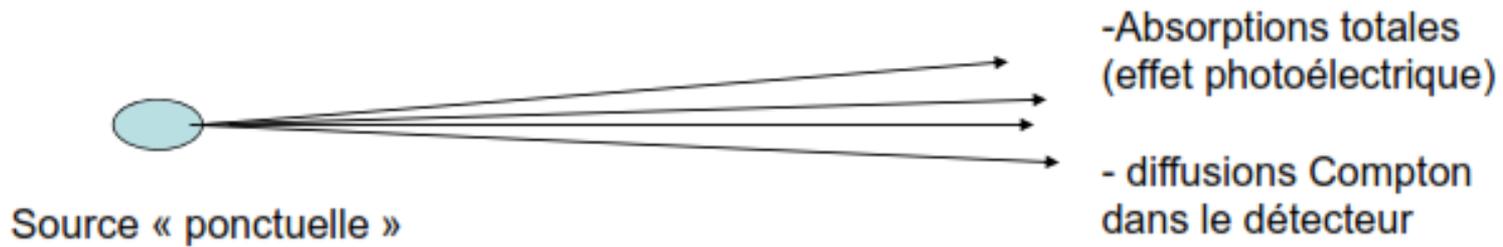


Spectre théorique



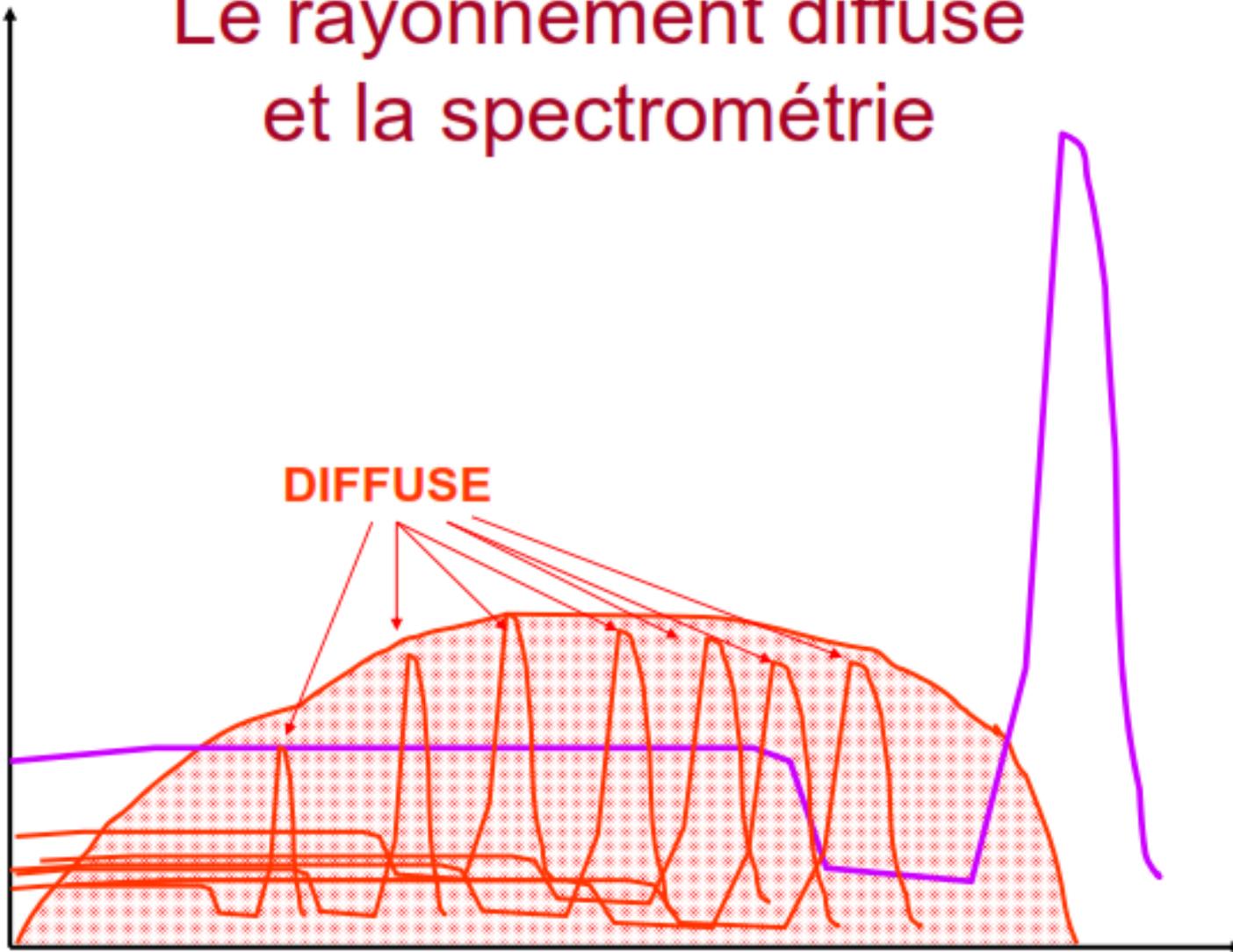
Spectre en énergie d'un détecteur





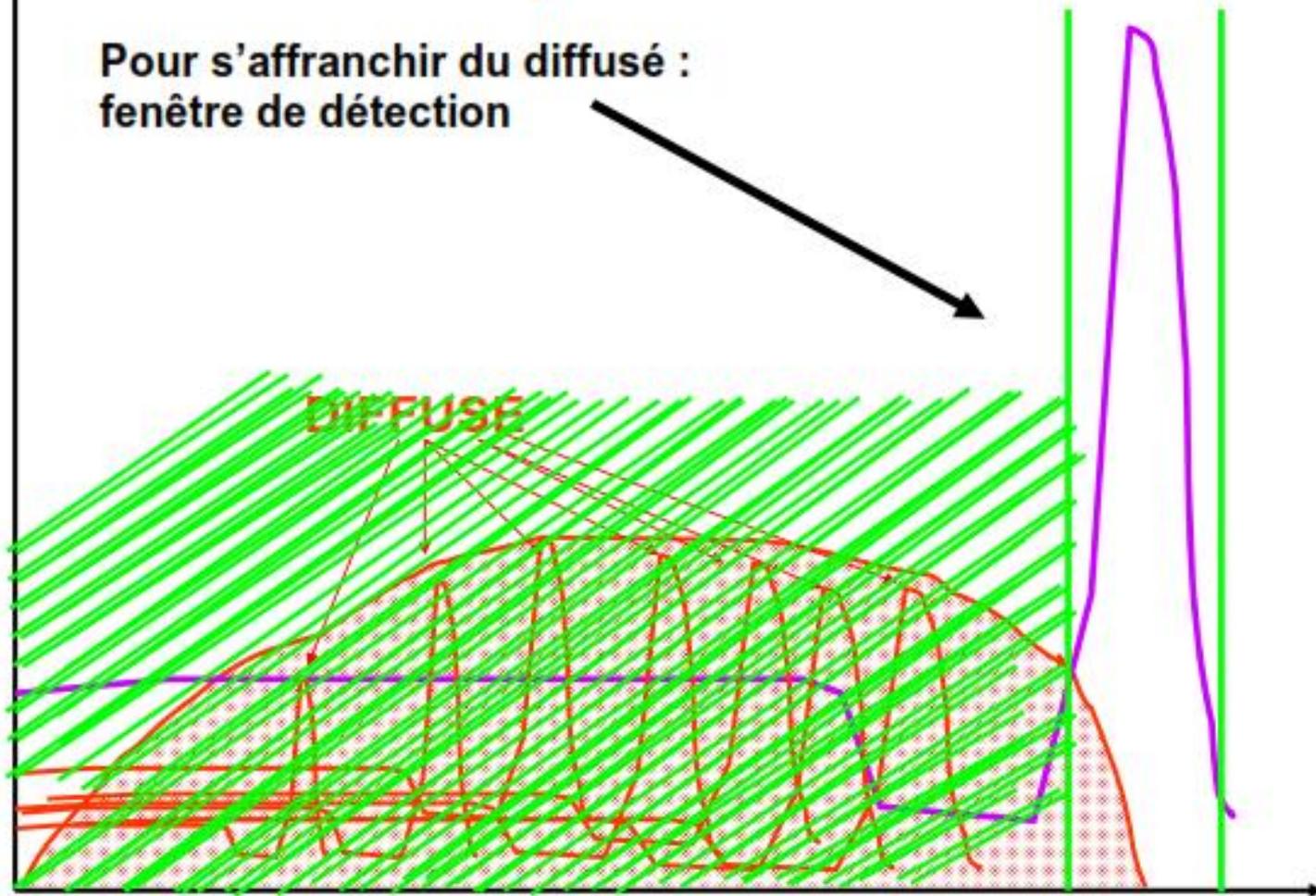
Spectre de détection

Le rayonnement diffusé et la spectrométrie

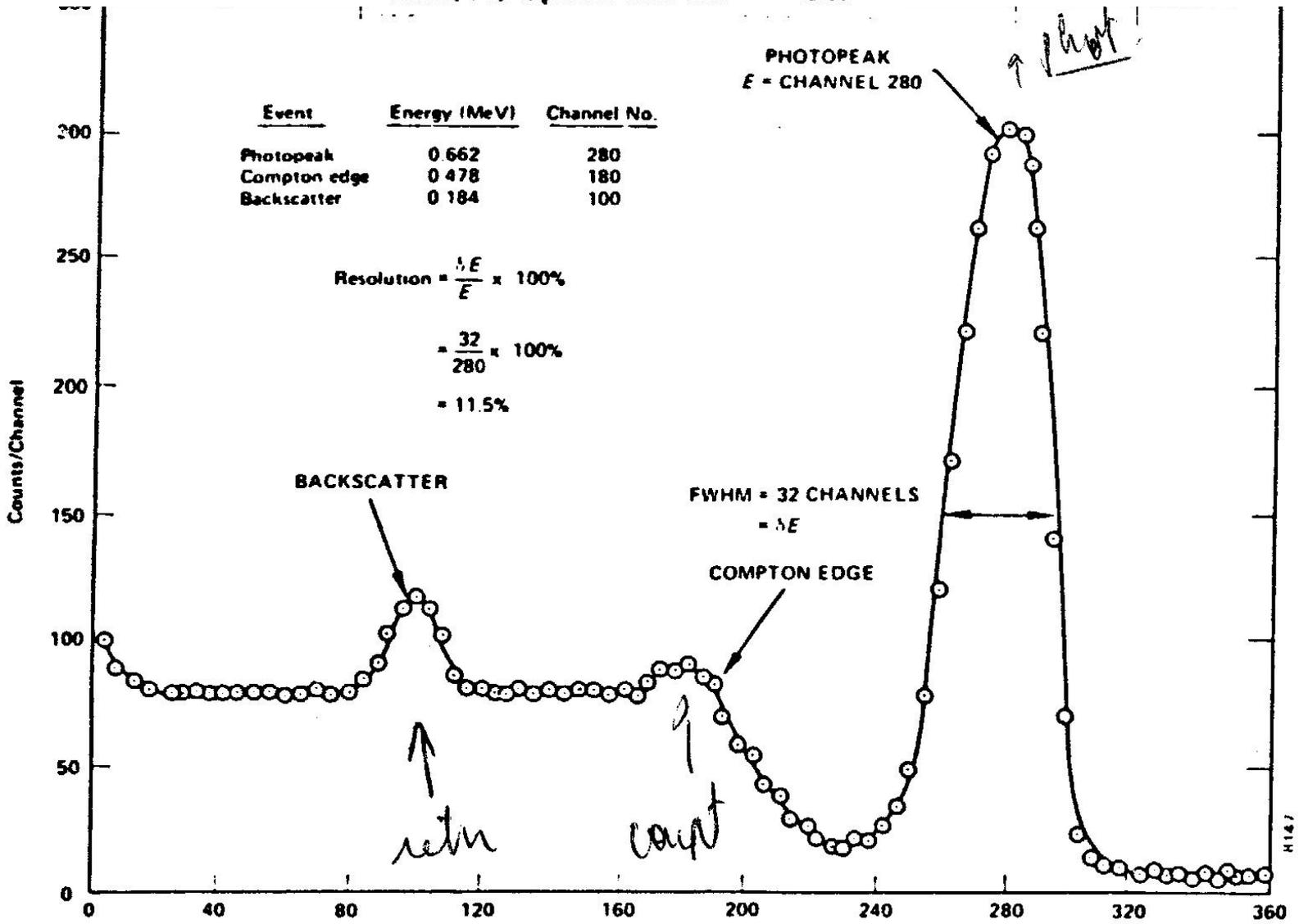


Le rayonnement diffusé et la spectrométrie

Pour s'affranchir du diffusé :
fenêtre de détection



NaI(Tl) Spectrum for ^{137}Cs .

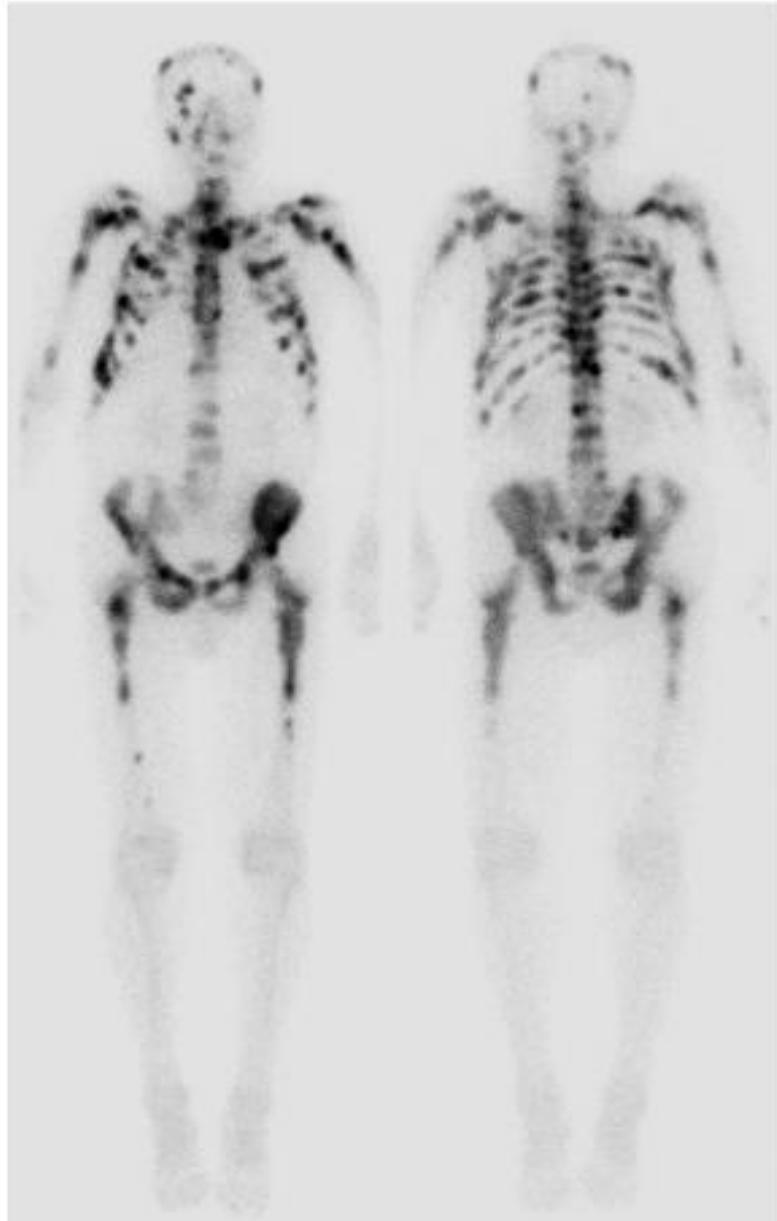


Le rayonnement diffusé et la spectrométrie (*sélecteur d'amplitude*)

- La fenêtre spectrométrique (sélection de l'énergie à double seuil) permet d'éliminer le flou dû au rayonnement diffusé (notamment dans la source c'est à dire le patient)
- Il s'agit de donner une image des concentrations radioactives, donc des centres d'émission et non des centres de diffusion...

Les compromis physiques de la détection nucléaire : incidence sur la conception des caméras

- Qualité des images de médecine nucléaire
 - Nombre limité de photons et bruit associé dans l'image
 - Présence de diffusé et résolution en énergie du détecteur
 - Résolution spatiale du détecteur



Principaux types de compteurs à scintillations

- **Compteur corps entier**
- **Scintigraphe à balayage**
- **Gamma-caméra**
- **Tomo-Gamma-Caméra**
- **Tomo-Gamma-Caméra à positons : 2 têtes détectrices, émetteurs à positons**

1.2 Détecteurs à semi-conducteurs

- **semi-conducteurs:** matériau à conductivité électrique intermédiaire entre isolant et métal (conducteur)

- basse énergie: isolant
- haute énergie: conducteur

- **semi-conducteur intrinsèque (silicium)**

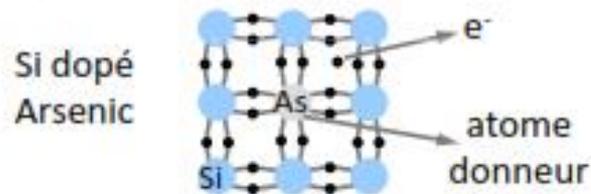
- 2 types de porteurs de courant:

électrons libres et **trous**

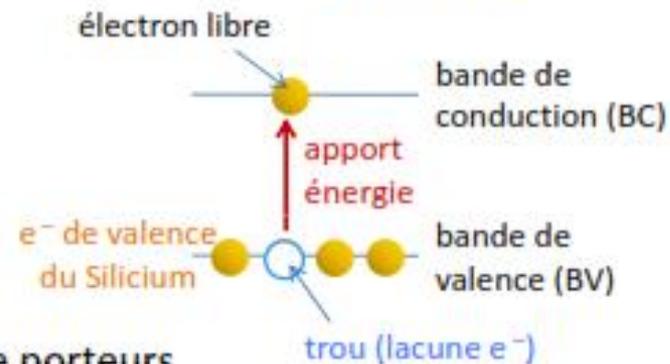
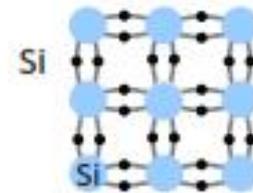
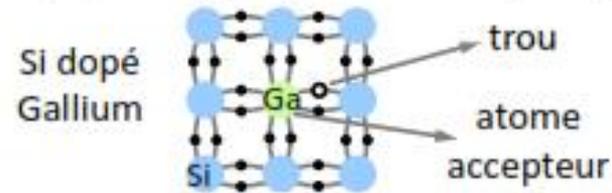
- **semi-conducteur dopés**

- impuretés qui modifient le nombre de porteurs

Dopage de type N (excès e^- - négatif)

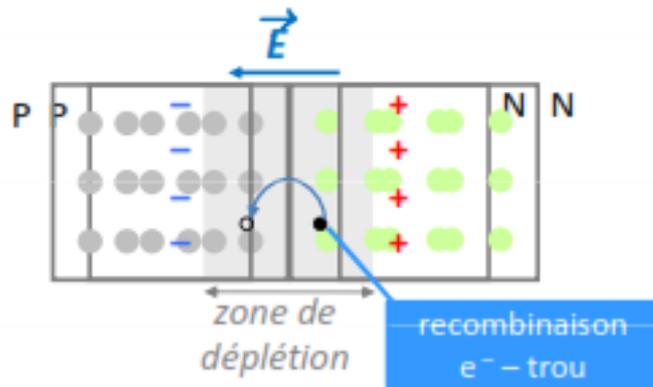


Dopage de type P (excès trous - positif)



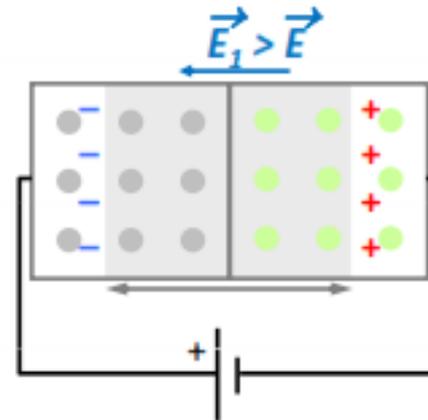
- Les détecteurs à semi-conducteurs sont un type particulier de détecteurs à ionisation.
- Au lieu d'exciter ou ioniser le milieu, une particule chargée traversant un semi-conducteur crée des paires d'électron-trous quasi-libres dans la bande passante (Fig 7.13).
- Il faut seulement à peu près 3 eV pour en créer une paire (comparé à 30 eV en gaz pour une ionisation)! Les charges ainsi créées peuvent être détectées en appliquant un champ électrique, comme dans d'autres types de détecteurs d'ionisation.

• **jonction PN:** mise en contact matériau dopé N et matériau dopé P



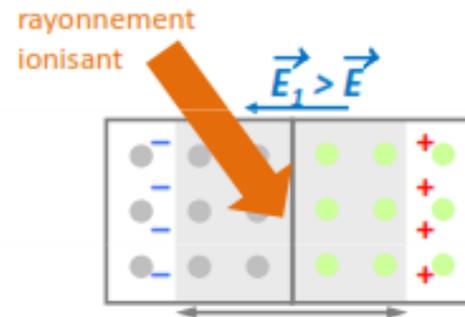
- recombinaisons paires e^- - trou
- création champ électrique (E)

- **polarisation** en sens inverse
- augmentation recombinaisons paires
- **agrandissement zone déplétion ($E_1 > E$)**



● **jonction PN:** mise en contact matériau dopé N et matériau dopé P

- action particules ionisantes idem **polarisation**
- **particules ionisantes** → recombinaisons paires
- **agrandissement zone déplétion** ($E_1 > E$)



- **détection: ddp induite par variation E**
 - faible tension (qqes V)
 - faible dimension
 - bonne résolution énergétique

La mobilité des porteurs : μ

- Aptitude des porteurs à se déplacer dans le réseau cristallin

- $v = \mu \cdot F$

- Valeurs de la mobilité :

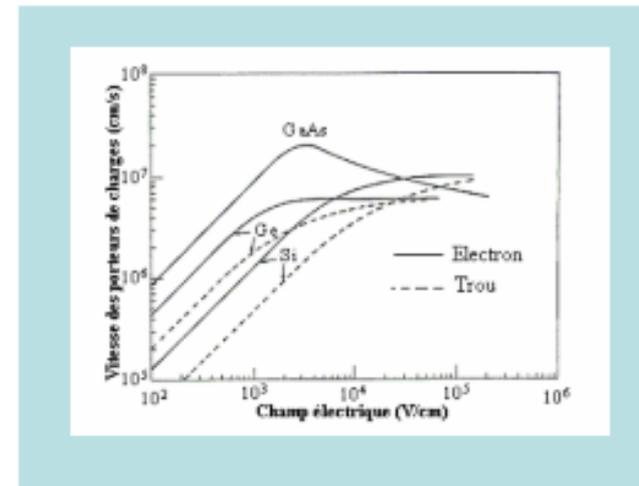
- μ_- : mobilité des électrons
- μ_+ : mobilité des trous

Si : $\mu_- \sim 1350 \text{ cm}^2 / \text{V.s}$

$\mu_+ \sim 480 \text{ cm}^2 / \text{V.s}$

Ge : $\mu_- \sim 3600 \text{ cm}^2 / \text{V.s}$

$\mu_+ \sim 1800 \text{ cm}^2 / \text{V.s}$ (à 300K)



- La mobilité dépend aussi du champ électrique F
(relation empirique):

$$\mu(x) = \frac{\mu_{\mp}}{[1 + (\frac{\mu_{\mp} F(x)}{v_s})^m]^{\frac{1}{m}}}$$

$m=2$ pour les électrons

$m=1$ pour les trous

v_s : vitesse de saturation

Si : $\sim 10^7 \text{ cm/s}$

Ge : $\sim 6 \cdot 10^6 \text{ cm/s}$

La résistivité du matériau

- Dépend du dopage : N_A et N_D
- Inverse de la conductivité : $q(n.\mu_- + p.\mu_+)$
- Pour du Si de type N : $\rho \approx \frac{1}{N_D \cdot q \cdot \mu_-}$
- Pour du Si de type P : $\rho \approx \frac{1}{N_A \cdot q \cdot \mu_+}$

à 300K

Si : $\rho_i \sim 200 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$

Ge : $\rho_i \sim 47 \text{ }\Omega \cdot \text{cm}$

L'énergie d'ionisation

- Énergie nécessaire pour créer une paire électron -trou : ω
 - Si : $\omega = 3.62 \text{ eV}$ (300K) et 3.76 eV (77K)
 - Ge : $\omega = 2.96 \text{ eV}$ (77K)

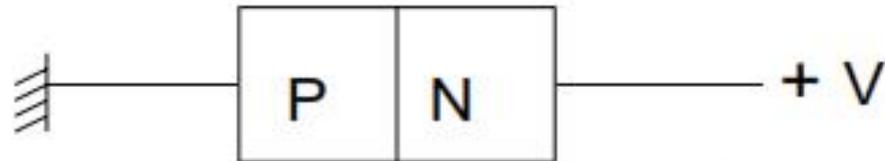
➔ $\omega > E_g$ (gap, énergie de bande interdite), elle tient compte des propriétés optiques, thermiques et de diffusion du cristal

- Rappel :

à 300K Si : $E_g = 1,1 \text{ eV}$

Ge : $E_g = 0,66 \text{ eV}$

La jonction polarisée en inverse

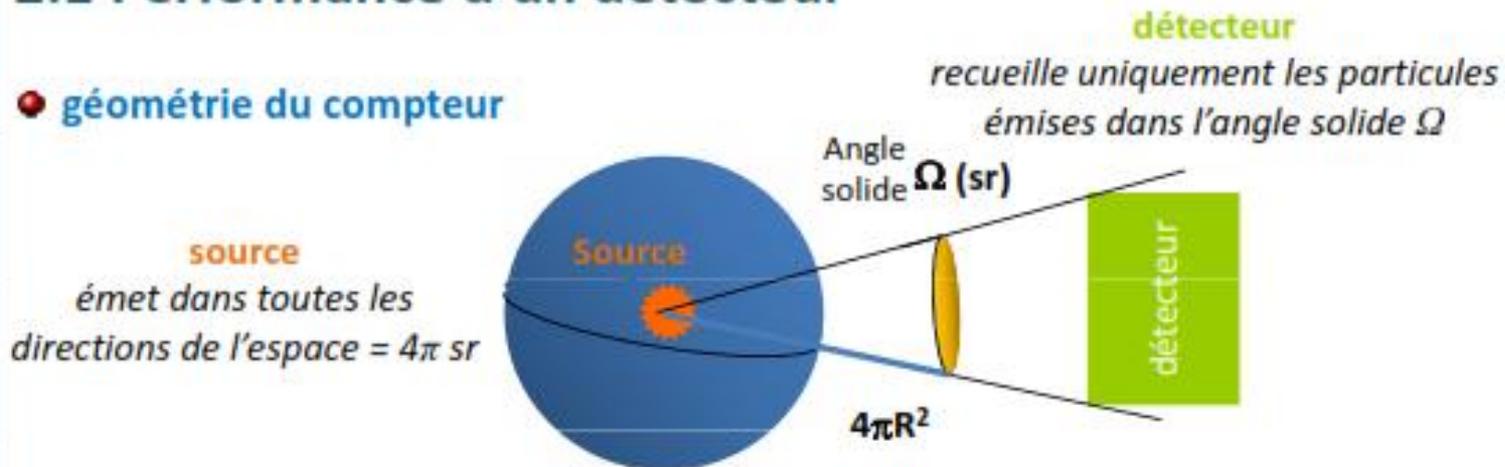


- La tension V se superpose au potentiel de diffusion V_d
- La barrière de potentiel augmente et devient infranchissable pour les porteurs majoritaires
- La zone de déplétion augmente
- Le courant est dû aux porteurs minoritaires

2. Mesure des rayonnements

2.1 Performance d'un détecteur

● géométrie du compteur



● bruit de fond et mouvement propre

☀ basses fréquences (BF) mesurées en l'absence de source radioactive

- ☀ rayonnement cosmique
- ☀ radioactivité ambiante
- ☀ contamination éventuelle du détecteur
- ☀ agitation thermique (pour les scintillateurs)

• sensibilité de la détection

- plus faible activité détectable

 - lié à bruit de fond

 - seuil de détection $S/B < 1$

• efficacité de la détection

- rapport entre le flux incident et le nombre d'évènements détectés

 - lié **principalement** à l'énergie du rayonnement, type de particule, compteur

• temps mort τ

- durée minimale pour qu'un autre rayonnement soit détecté

 - compteurs actuels → **taux de comptages élevé (jusqu'à 10^8**

 - évènements/seconde)**

• linéarité

- détecteur linéaire si comptage proportionnel au flux incident

2.2 Mesures quantitatives

● taux de comptage

- ☀ nombre d'impulsions par unité de temps par le compteur (imp.s^{-1})

$$n_{net} = n_{brut} - BF$$

● rendement du comptage

$$R = \frac{n_{net}}{A} \quad \bullet A \text{ activité de l'échantillon}$$

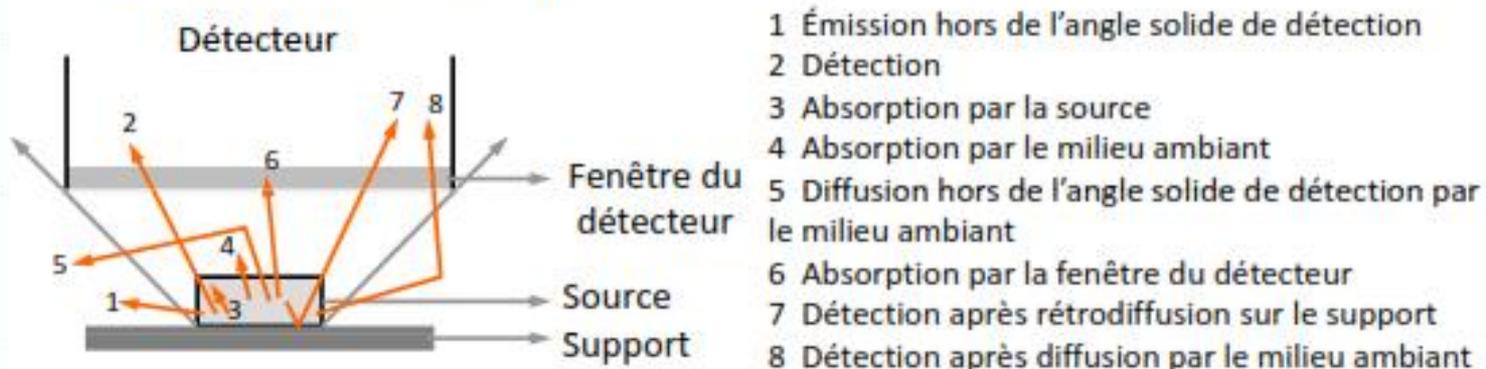
- ☀ R fonction plusieurs paramètres

- du type de désintégration
- de la géométrie du compteur
- de l'efficacité du compteur

☀ type de désintégration

- ☀ relation entre activité A et nombre de particules émises par unité de temps n
- ➔ Prise en compte des différents rapports d'embranchements et probabilités de désexcitation des noyaux fils

☀ géométrie du compteur



☀ facteur géométrique G

- ➔ prise en compte de Ω (angle solide), de la géométrie de la source et de toutes ces possibilités

nombre de particules qui pénètrent dans le détecteur par unité de temps

$$n' = G n$$

nombre de particules émises par la source par unité de temps

● mesures absolues

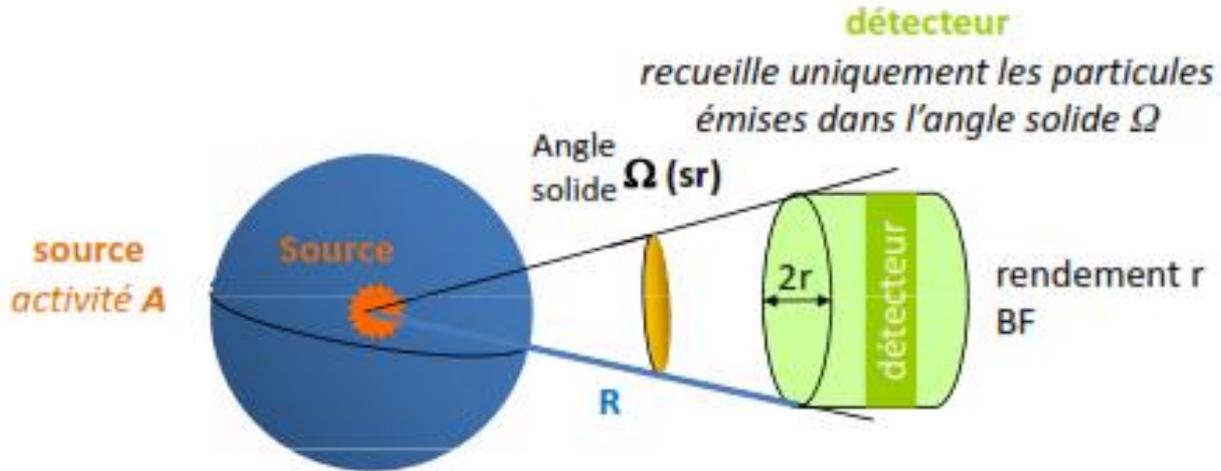
- ☼ R connu : la mesure de n_{net} donne l'activité A
- ☼ plus facilement : source étalon d'activité A_e connue
 - ➔ pour une autre source du même radioélément

$$A = A_e \frac{n_{net}}{n_{net_e}}$$

● mesures relatives

- ☼ comparaison des taux de comptage (au cours du temps, avec différentes épaisseurs d'écran,...)
- ➔ détermination de la période, de CDA, ...

● exemple



● taux de comptage brut

$$n_{\text{brut}} = n_{\text{net}} + \text{BF}$$

$$R = \frac{n_{\text{net}}}{A}$$

$$n_{\text{brut}} = AR + \text{BF} = AGr + \text{BF}$$

● G fraction de rayonnement reçu $G = \frac{\pi r^2}{4\pi R^2}$



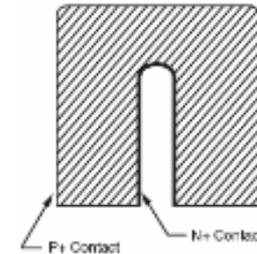
Tableau récapitulant les appareils utilisés habituellement pour détecter et mesurer la contamination de surface et de personnes.

	Chambre d'ionisation	Gelger-Muller	Semi-conducteur	Scintillations	
Type rayonnement détecté	I Na (Ti) $X_{\geq 5\text{KEV}}(^{125}\text{I})$ $\gamma_{\geq 30\text{KEV}}$	$\beta(^{14}\text{C } ^{35}\text{S } ^{32}\text{P})$ X et γ	X et γ	α SZn(Tl)	β X et γ I Na(Tl)
Gamme de débit	1 μ à 0,1 Sv Sv/h	0,1 mSv à 10 mSv/h	1 mSv à 0,1 Sv/h		
Gamme d'énergie	30 Kev à 2 Mev $\pm 15\%$	50 keV à 1,3 Mev $\pm 30\%$	70 Kev à 1Mev ± 20 à 30%		
Gamme de dose	50 mSv à 10 Sv	1 mSv à 10 Sv	1mSv à 1 Sv		
Rendement	X et $\gamma \approx 5$ à 10% α, β peut atteindre 100%	$\alpha, \beta \approx 100\%$ X et $\gamma \approx 1\%$			
Applications	Appareil d'alerte contrôle des personnes Mesure de débit de dose	β : Appareil d'alerte à seuil Contrôle des personnes et des surfaces X, γ : Un par type de rayonnement donné		Appareil d'alerte Contrôle des personnes	Appareil d'alerte Contrôle des personnes
Avantages		Mesure de débit dose robuste alarme sonore	Mesure de débit dose robuste petite taille possible		Bon rendement lumineux
Inconvénients	Sensibilité aux chocs et aux variations de condition atmosphérique	Ne détecte pas les photons de basse énergie et les $\beta < \text{qlques } 10 \text{ Kev}$ β sensibilité variable, durée de vie limitée selon le type et l'énergie du rayonnement	Sensibilité variable surtout aux énergies du radiognostic médical		Fortement hygroscopique sensible à la lumière et variation température

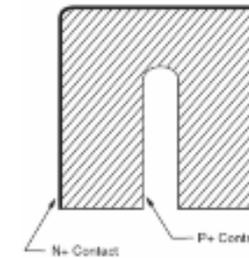


Le détecteur germanium

- Géométrie planaire ou coaxiale pour augmenter les volumes de détection
- cristaux de gros volume et de haute pureté (HPGe) :
exemple : 110mm de long, 98 mm de diamètre, 800 cm³,
4.4 kg, |NA-ND | $\sim 10^9$ cm⁻³
- type P (mais se dégradent plus en présence de neutrons) ou type N
- contact P⁺ : implantation de bore (dépôt mince : 0.3 μm)
- contact N⁺ : diffusion de lithium (couche épaisse : > 500 μm)



Ge type N



Ge type P

La géométrie cylindrique

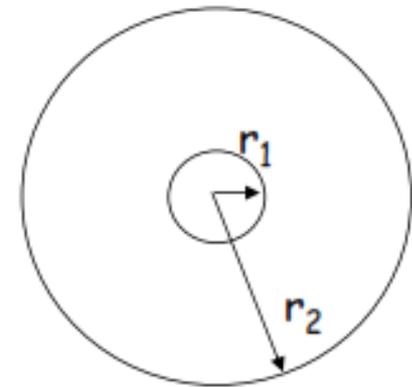
- On considère un cristal cylindrique coaxial
- On effectue le changement de coordonnées -> cylindriques
- On calcule les mêmes paramètres : tension de déplétion, champ radial, capacité....

$$V_0 = \frac{q|N_A - N_D|}{2\epsilon} \left[r_1^2 \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) - \frac{1}{2}(r_2^2 - r_1^2) \right]$$

$$F(r) = \frac{qN_A}{2\epsilon} r + \frac{V - \frac{qN_A}{4\epsilon}(r_2^2 - r_1^2)}{r \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}$$

$$C = \frac{2\pi\epsilon}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}$$

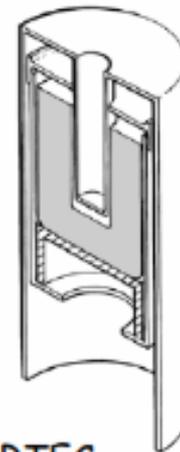
r_1 : rayon intérieur
 r_2 : rayon extérieur



Le fonctionnement

- Particularité : il fonctionne à la température de l'azote liquide (77K)
- À température ambiante, la génération thermique est trop importante le courant est élevé et le bruit statistique est trop fort.
- Nécessité d'avoir un cryostat, le cristal est sous vide
- Introduction de matière dans le parcours de la particule

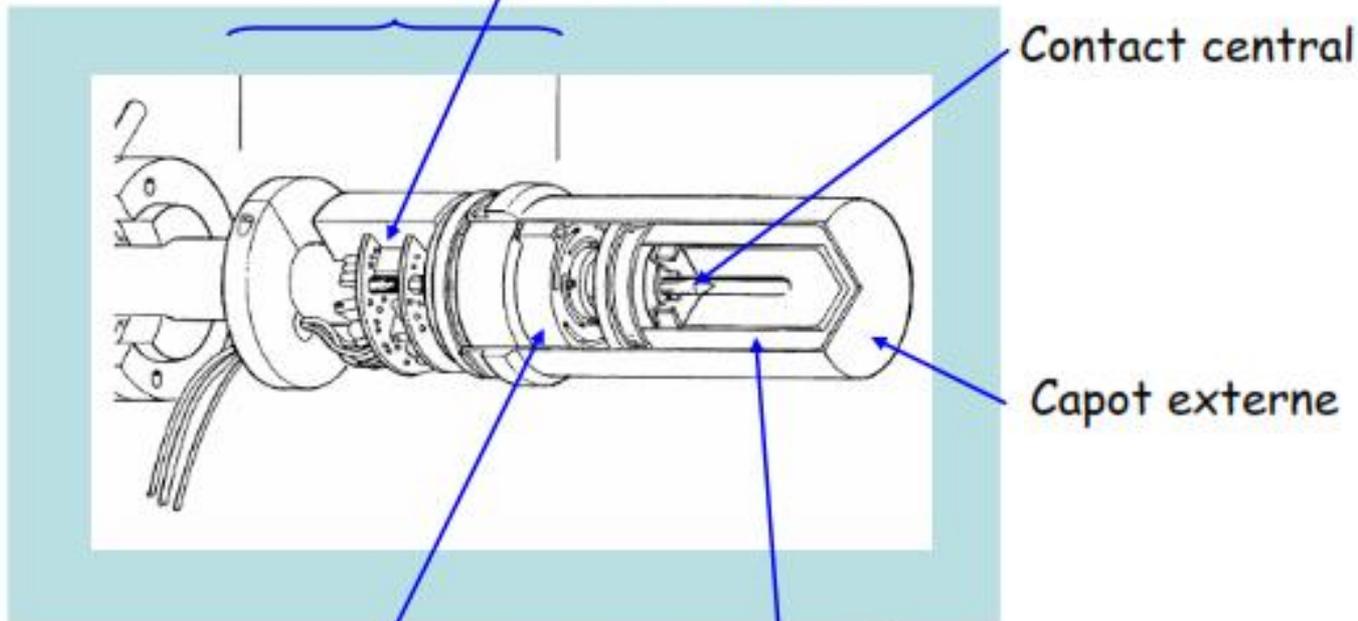
➔ Détection des X et des gammas



ex : détecteur puits - ORTEC

Le principe

Capot+ électronique « chaude » (préampli.)



Contact central

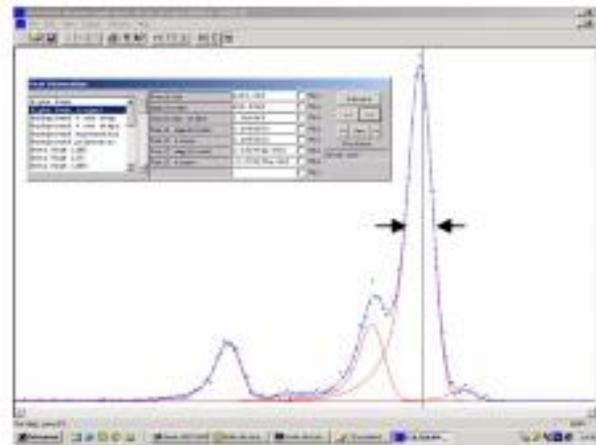
Capot externe

Capot (montage et écran thermique)

Électronique refroidie (R, C, FET)

La résolution en énergie

- En général la distribution est gaussienne
- Elle s'exprime par la largeur à mi-hauteur (LMH) de la distribution ou FWHM (Full width at half maximum) :
 $LMH = 2.35 \sigma$



Spectre du ^{238}Pu (5.155 MeV),
LMH=7.8 keV
Si 50 mm², 500 μm, -15°C

La calibration

- Quelques sources étalons (les principales): ➡ keV/canal

- Alpha de quelques MeV :

- ^{239}Pu (5.155 MeV), ^{241}Am (5.486 MeV), ^{244}Cm (5.806 MeV)

- Électrons de conversion :

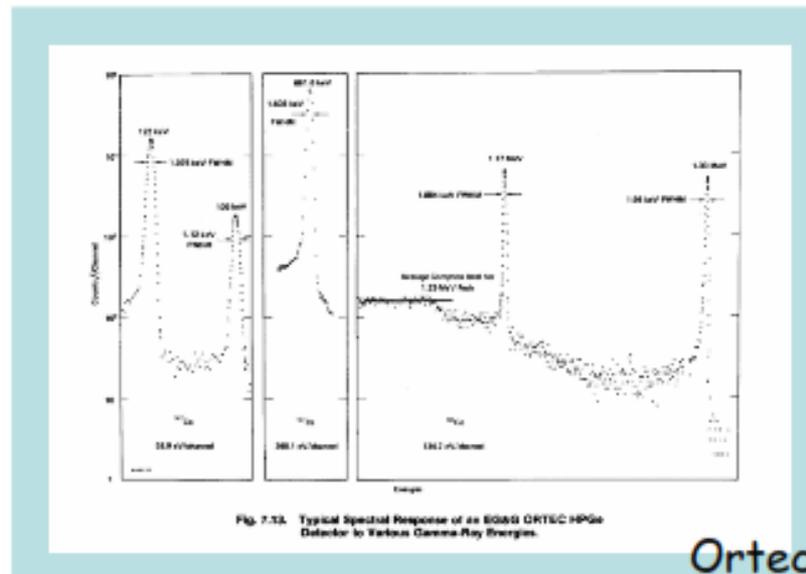
- ^{207}Bi : 975 keV

- X :

- ^{55}Fe : 5.9 keV
- ^{241}Am : 56 keV

- Gamma :

- ^{60}Co : 1.332 MeV
- ^{57}Co : 122 keV
- ^{137}Cs : 662 keV



Les émulsions photographiques

- C'est le plus simple et le plus ancien détecteur;
- formé de cristaux de $\text{Br}^- \text{Ag}^+$

