

CAPTEURS DE RAYONNEMENTS NUCLEAIRES

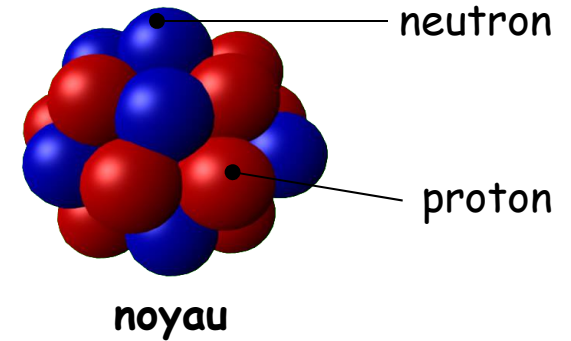
CAPTEURS DE RAYONNEMENTS NUCLEAIRES

PLAN DU COURS

- I - Les rayonnements "nucléaires"
 - 1 - Notions de physique nucléaire
 - 2 - Interactions des photons gamma avec la matière
 - 3 - Pertes en énergie des particules chargées
- II - Les détecteurs à gaz
 - 1 - Les chambres d'ionisation
 - 2 - Les compteurs proportionnel
 - 3 - Les compteurs Geiger-Mueller
- III - Les scintillateurs
 - 1 - Principe
 - 2 - Les scintillateurs organiques
 - 3 - Les scintillateurs inorganiques
 - 4 - Les photomultiplicateurs
- IV - Les détecteurs à semi-conducteur
 - 1 - Principe
 - 2 - Les détecteurs
- V - Acquisition et analyseurs multi-canaux
 - 1 - La chaîne d'acquisition
 - 2 - L'analyseur multi-canaux
- VI - Mesures
 - 1 - Le bruit de fond
 - 2 - La statistique de comptage
- VII - Applications
 - 1 - Mesures de flux
 - 2 - Imagerie X et gamma
 - 3 - Notions de radioprotection

I - Les rayonnements "nucléaires"

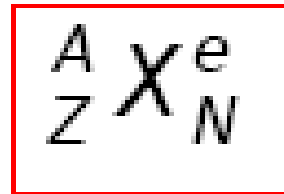
1 - Notions de Physique nucléaire



A - Le noyau de l'atome

a - Notation et définition

- X : symbole de l'élément
- A : nombre de masse ($A = Z + N$)
- Z : numéro atomique
- N : nombre de neutrons
- e = {gs, *, m, ...} ; état du noyau
- Deux éléments sont :
 - des isobares $\Rightarrow A$ identique
 - des isotopes $\Rightarrow Z$ identique
 - des isotones $\Rightarrow N$ identique



Ex. $^{12}\text{C}^*$, ^{22}Na , ^{60}Co , $^{26\text{m}}\text{Al}$

b - Energie de masse et masse atomique

$$M_{A_X} c^2 = Z M_{1\text{H}} c^2 + N M_n c^2 - B(A, Z) \quad \text{avec } B(A, Z) \text{ l'énergie de liaison}$$

Unités de masse atomique : $M_{^{12}\text{C}} = 12 \text{ u} = 12 \text{ g/mole}$

Nombre d'atomes ^AX dans une masse m_{A_X} : $n_{A_X} = \mathcal{N}_A m_{A_X} / M_{A_X}$

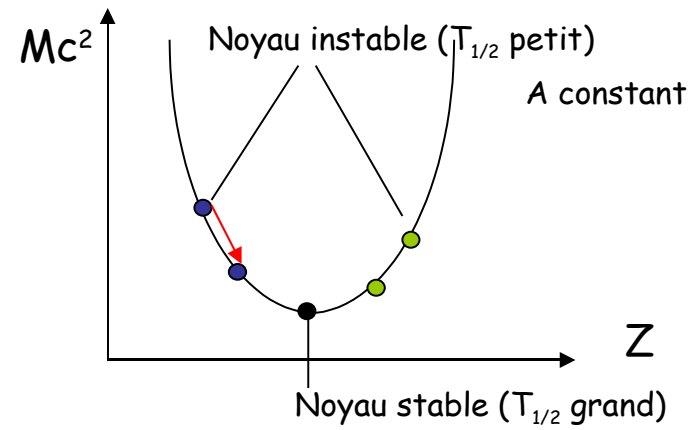
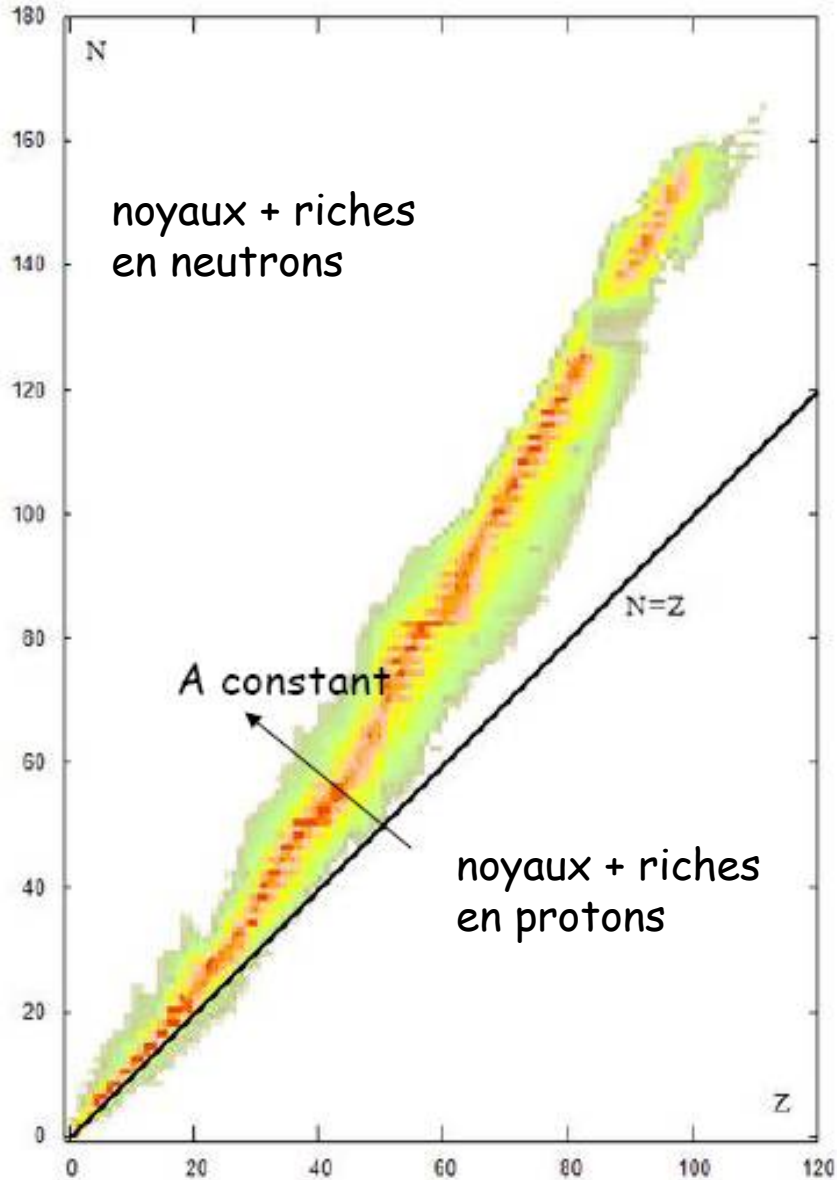
Masse molaire d'un élément naturel : $M_X = \sum_A a_A M_{A_X}$

\rightarrow a_A : abondance isotopique

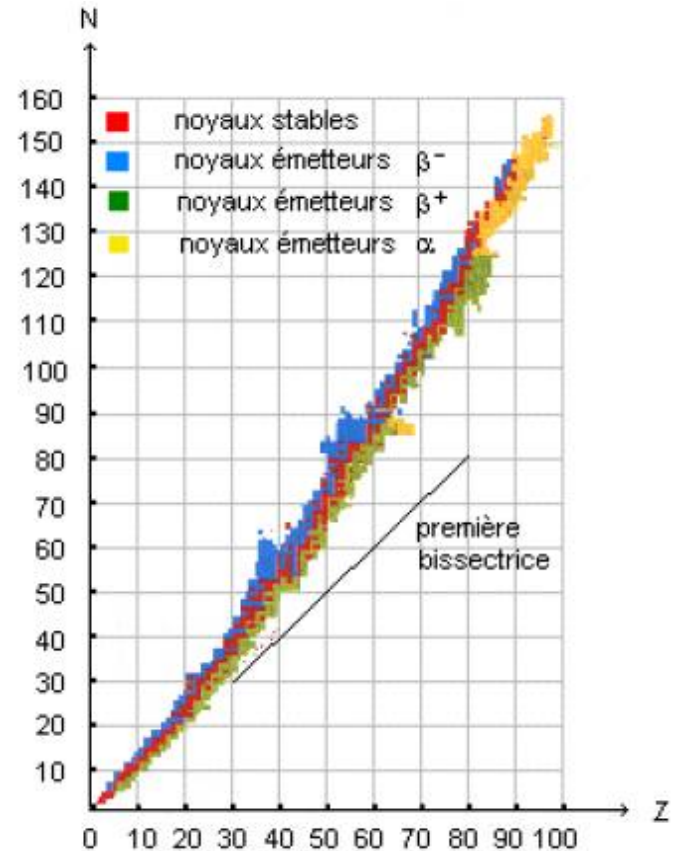
Ex. Bore, 19.8% ^{10}B et 80.2% ^{11}B

B - La radioactivité

a - Vallée de la stabilité



$T_{1/2}$: période de demi-vie de l'élément



b - Les décroissances radioactives β^-

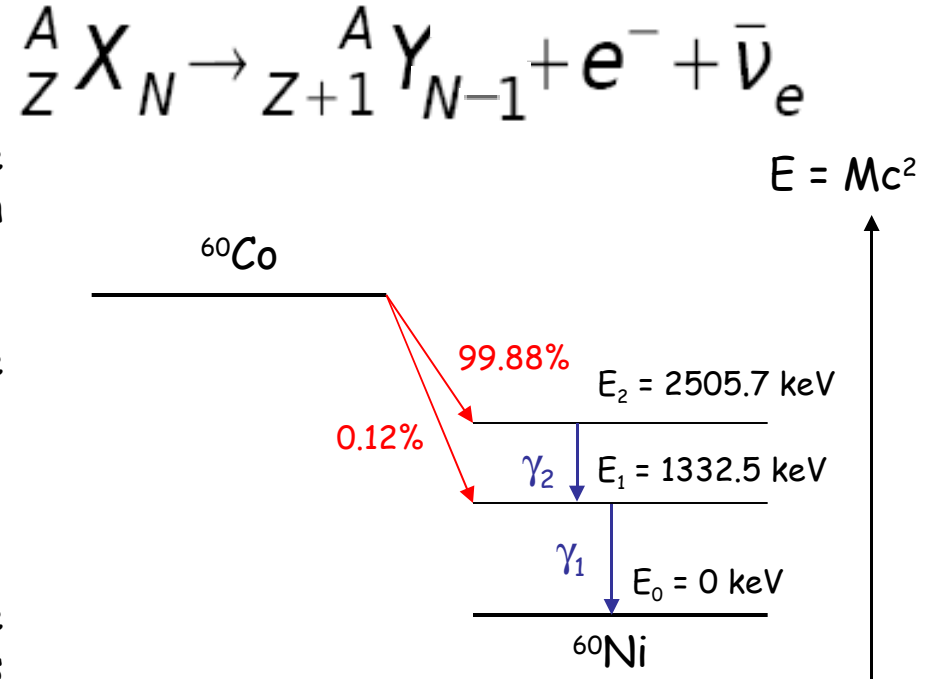
- Elle concerne les noyaux qui ont trop de neutrons. A l'intérieur de ces noyaux, un neutron se transforme en proton en émettant un électron (particule β^-) et un anti-neutrino.

- L'énergie cinétique de l'électron émis est de l'ordre de la centaine de keV à quelques MeV.

Rappel : $1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$.

- Après cette transformation (décroissance radioactive), le noyau se retrouve quelquefois dans un état excité. Il se désexcite en émettant un ou plusieurs photons (voir ex. décroissance du ^{60}Co).

- **L'énergie de ces photons est dans le domaine 10 keV - 10 MeV. Ce sont des photons gamma.**



Ex. ^{60}Co

=> Energie des photons :

$$E_{\gamma_1} = 1332.5 \text{ keV}$$

$$E_{\gamma_2} = 2505.7 - 1332.5 = 1173.2 \text{ keV}$$

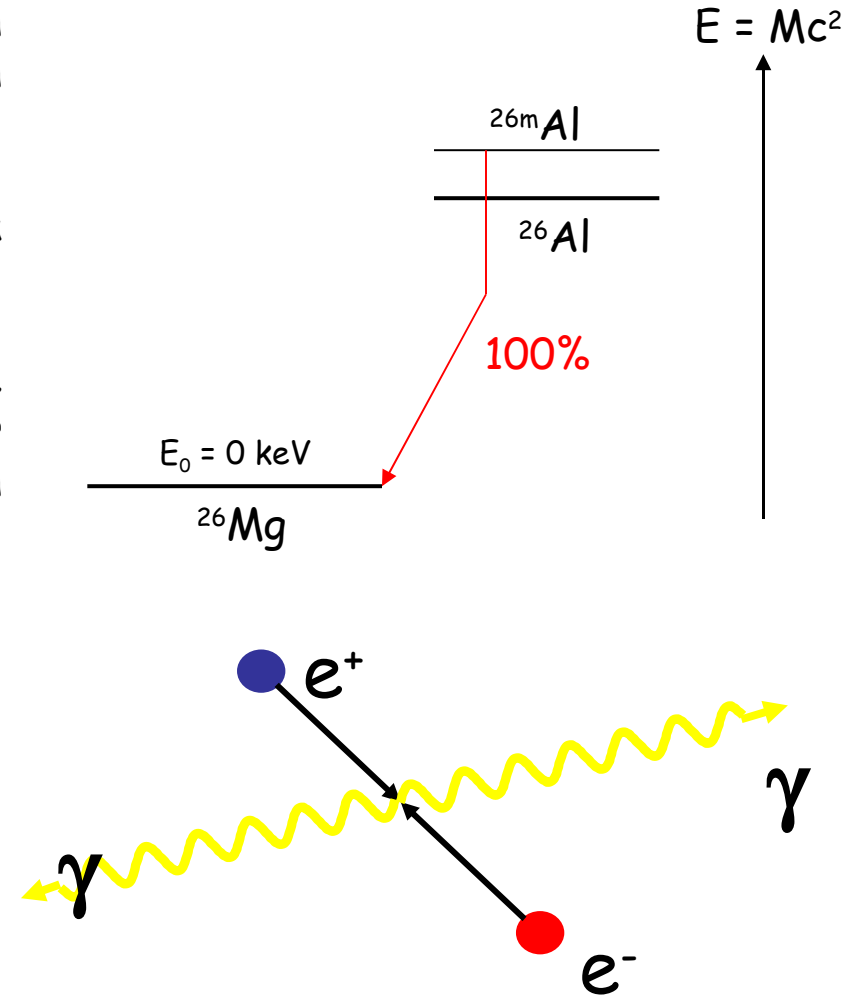
=> Intensité relative des raies (par décroissance)

$$I_{\gamma_1} = 99.88 + 0.12 = 100\%$$

$$I_{\gamma_2} = 99.88\%$$

c - Les décroissances radioactives β^+

- Elle concerne les noyaux qui ont trop de protons. A l'intérieur de ces noyaux, un proton se transforme en neutron en émettant un positron (particule β^+) et un neutrino.
- L'énergie cinétique du positron émis est de l'ordre de la centaine de keV à quelques MeV.
- Tout comme pour la décroissance β^- , après une décroissance radioactive β^+ , le noyau peut se retrouver quelquefois dans un état excité. Il se désexcite en émettant un ou plusieurs photons gamma.
- Le positron est l'anti-particule de l'électron, il s'annihile avec celui-ci en émettant 2 photons γ :
 - $e^+ + e^- \rightarrow \gamma + \gamma$ avec $E_\gamma = m_e c^2 = 511 \text{ keV}$
 - Une source β^+ émet des photons à 511 keV

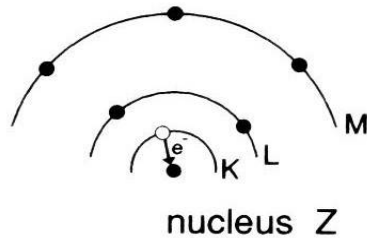


d - La capture électronique

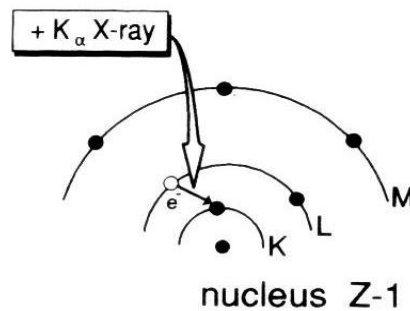
- Elle concerne les noyaux qui ont trop de protons. A l'intérieur de ces noyaux, un électron de l'atome interagit avec un proton du noyau pour produire un neutron et un neutrino.

- Ce mode de décroissance est parfois en compétition avec la décroissance β^+ (Ex. décroissance du ^{22}Na)

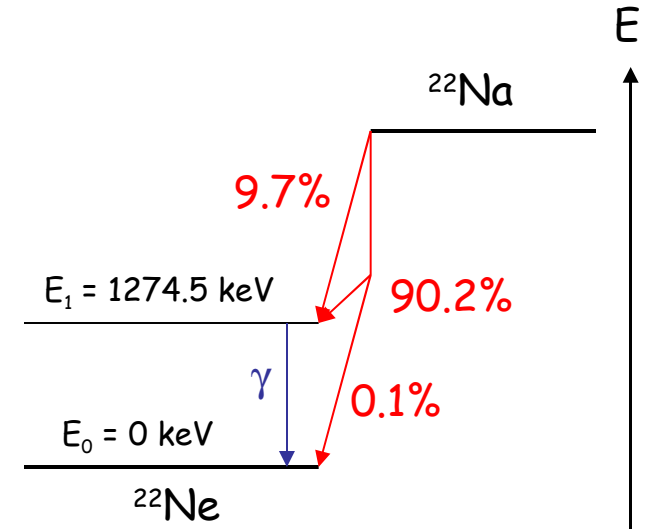
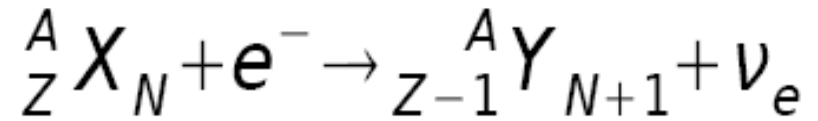
- L'atome fils a perdu un électron
 - ➔ ré-arrangement des couches électroniques
 - ➔ émission X



(a) electron capture



(b) followed by X-ray emission



Ex. ^{22}Na

-> $E_\gamma = 1274.5 \text{ keV}$

-> $I_\gamma = 99.9\%$

-> $I_{\beta^+} = 90.3\%$

-> $I_X = 9.7\%$

$\Rightarrow I_{\gamma_{511\text{keV}}} = 180.6\%$

Electron Auger : Dans certains cas, l'énergie du photon X est cédée à un électron de la couche L ou M

$\Rightarrow E_{e\text{-Auger}} = E_X - E_L$

e - Autres décroissances

- Décroissance α :

Ce type de décroissance apparaît pour des noyaux trop lourds. Ces noyaux se dirigent vers la stabilité en émettant une particule α dont l'énergie cinétique est de quelques MeV.

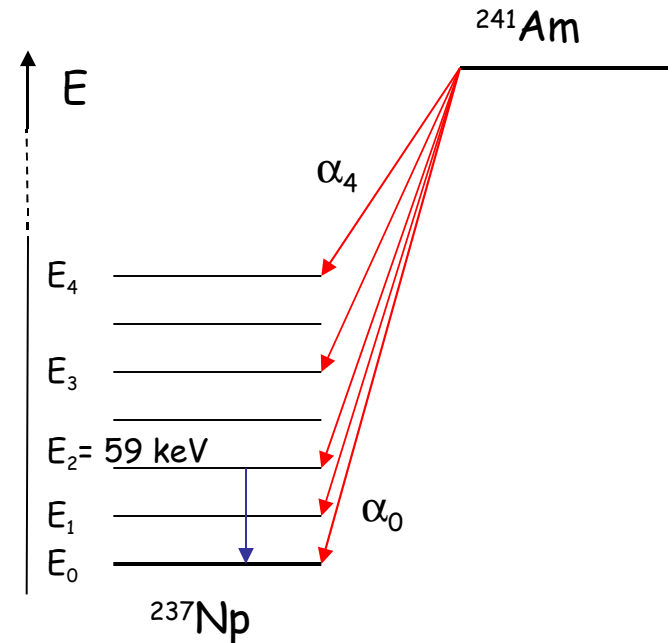
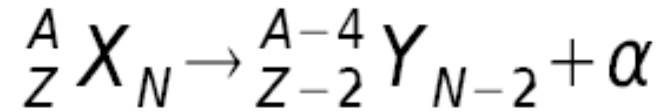
N.B. la particule α est le noyau de l'hélium.

Exemple : ^{241}Am

Niveaux	E_α (keV)	I (%)
0	5544.5	0.34
1	5511.5	0.22
2	5485.6	84.5
3	5442.8	13.0
4	5388.2	1.6

- Décroissance par émission de p, de n...

- Fission spontanée : Ex. $^{252}\text{Cf} \rightarrow ^{140}\text{Xe} + ^{108}\text{Ru} + 4\text{n}$



Remarque : ^{241}Am aussi utilisé comme source de photons à 59 keV

f - Taux de décroissances

- Variation du nombre de noyaux radioactifs :

avec τ : période ou vie moyenne

λ : constante de décroissance

λN : activité (nombre de décroissances par seconde) unité becquerel (Bq)

$$\frac{dN}{dt} = -\frac{N}{\tau} = -\lambda N$$

Equation différentielle du 1er ordre \rightarrow
avec $T_{1/2}$ la demi-vie du radioélément

$$N(t) = N(0) e^{-t/\tau} = N(0) 2^{-t/T_{1/2}}$$

$$T_{1/2} = \tau \ln(2)$$

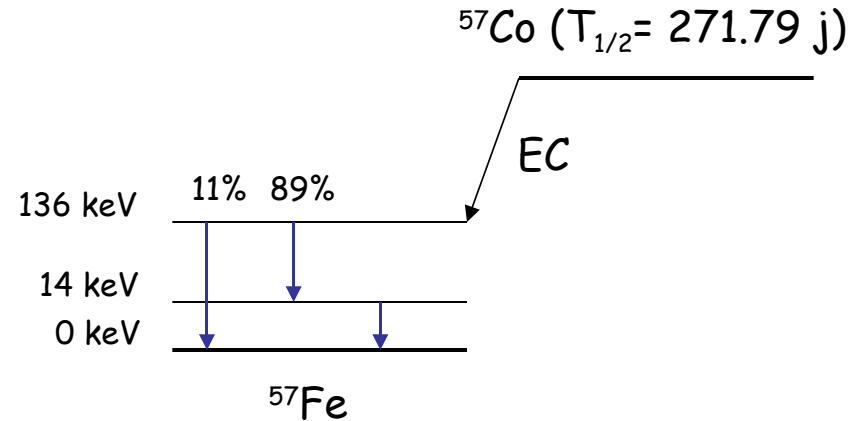
- Activité : $A(t) = -dN/dt = N(t)/\tau$

C'est le taux de décroissances par seconde

- Taux d'émission de particules i

$$R_i = dN_i/dt = p_i A(t)$$

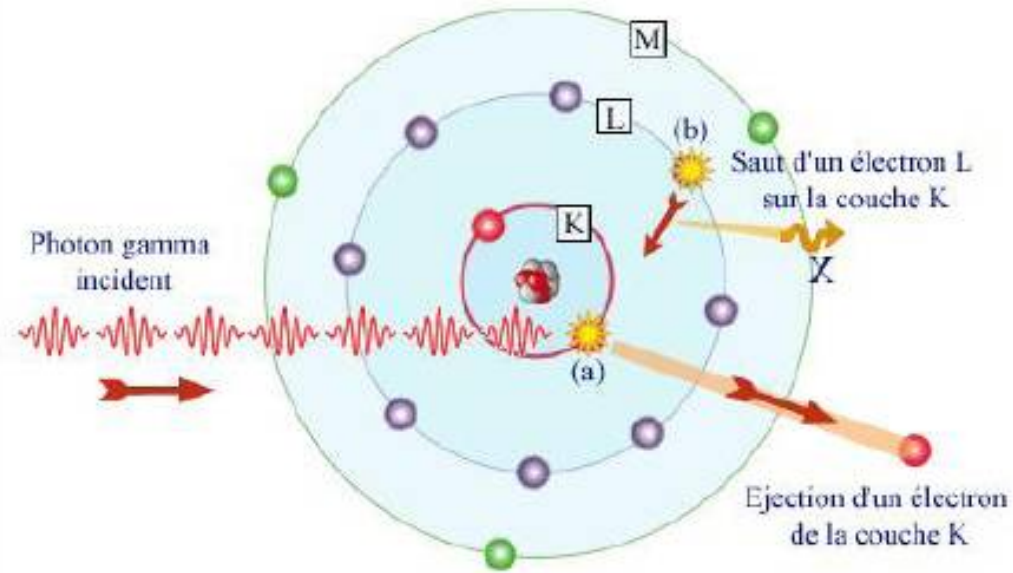
p_i : probabilité d'émission de i



2 - Interaction des photons gamma avec la matière

A - L'effet photoélectrique

- Le photon cède toute son énergie à un électron. A ces énergies, les photons interagissent principalement avec les électrons des couches internes (K, L).
- Un électron des couches supérieures vient combler le trou produit par l'éjection de l'électron → émission d'un photon X



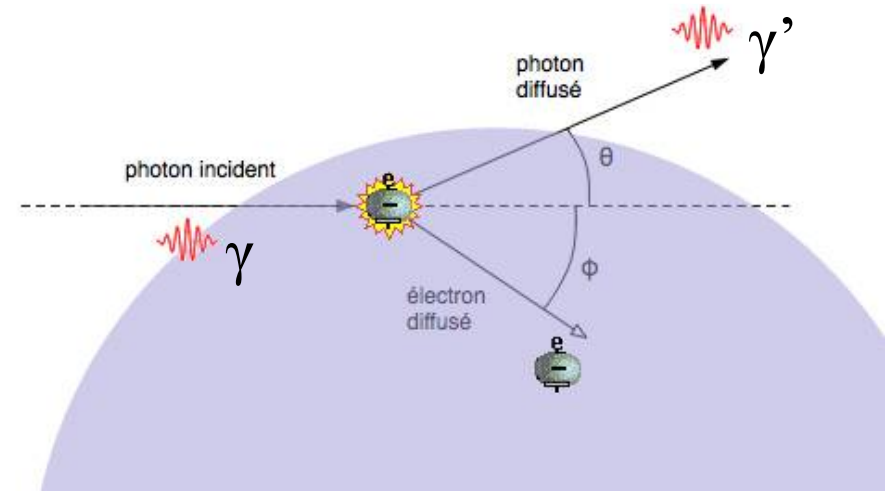
$$E_{e^-} = E_{\gamma} - E_{\text{Liaison}}$$

Processus dominant aux basses énergies

$$E_{\gamma} < 200 \text{ keV}$$

B - Diffusion Compton

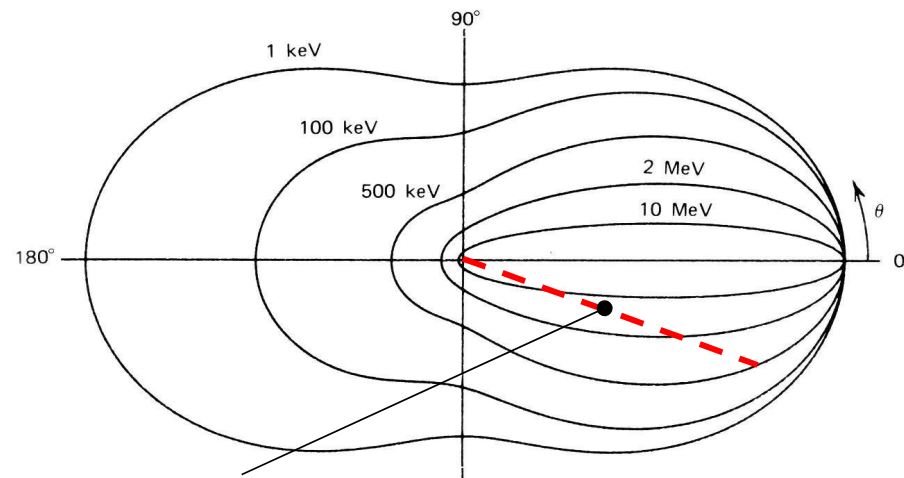
- Le photon cède une partie de son énergie à un électron (principalement) des couches externes de l'atome (considéré comme libre).
- Il s'agit d'une interaction élastique. A partir des lois de conservation de l'énergie et de la quantité de mouvement on montre :



$$E_{\gamma'} = \frac{E_{\gamma}}{1 + \alpha(1 - \cos(\theta))} \quad \text{avec} \quad \alpha = \left(E_{\gamma} / m_0 c^2 \right)$$

Processus dominant aux énergies intermédiaires

- La probabilité de diffuser avec un certain angle θ dépend de l'énergie des photons incidents. Les photons de haute énergie diffusent plutôt avec de faibles angles.



La longueur du trait correspond à la probabilité de diffusion suivant un angle θ

C - Création de paire $e^+ e^-$

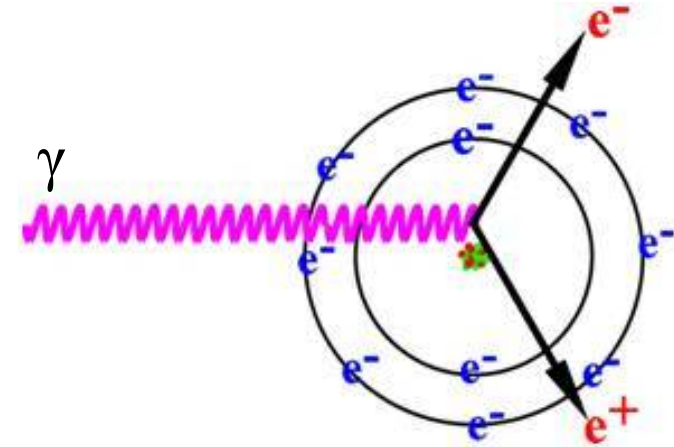
- Le photon se matérialise en une paire électron positron.
- L'énergie électromagnétique se transforme en énergie de masse et en énergie cinétique. Pour des raisons de conservation de la quantité de mouvement et de l'énergie, ce processus ne peut se produire :

(1) qu'au voisinage d'un noyau d'atome

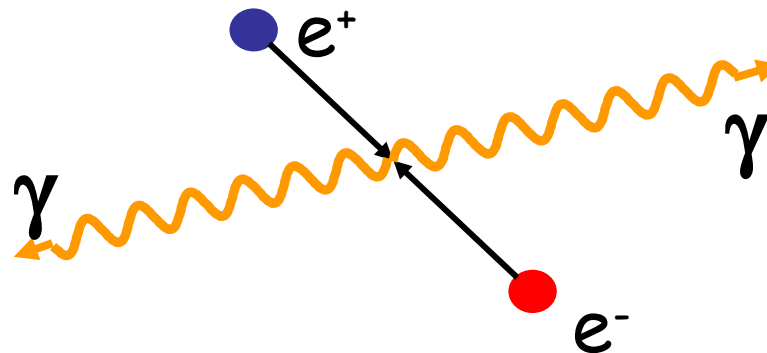
(2) que si l'énergie du photon $> 2 m_e c^2 = 1022 \text{ keV}$

$$E_{e^-} + E_{e^+} = E_\gamma - 2m_0c^2$$

Processus dominant aux hautes énergies



Généralement, après avoir perdu son énergie cinétique, le positron s'annihile avec un électron en produisant 2 photons γ d'énergie $E_\gamma = m_e c^2 = 511 \text{ keV}$.



D - Coefficient d'atténuation

- La probabilité qu'un γ interagisse sur un parcours infiniment petit dx est : μdx avec μ le **coefficient d'atténuation linéique**

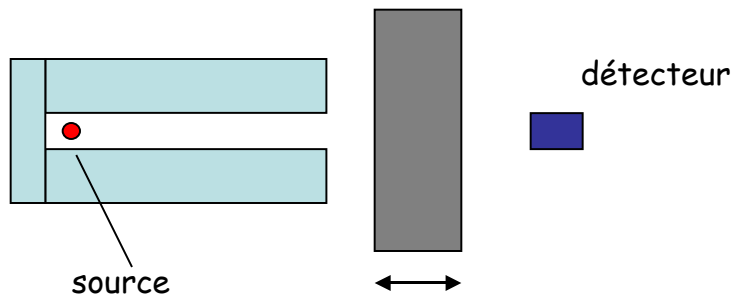
$$\mu = \psi + \sigma + \kappa$$

- La variation du nombre de photons d'énergie donnée est :

$$\frac{dN}{N} = -\mu dx$$

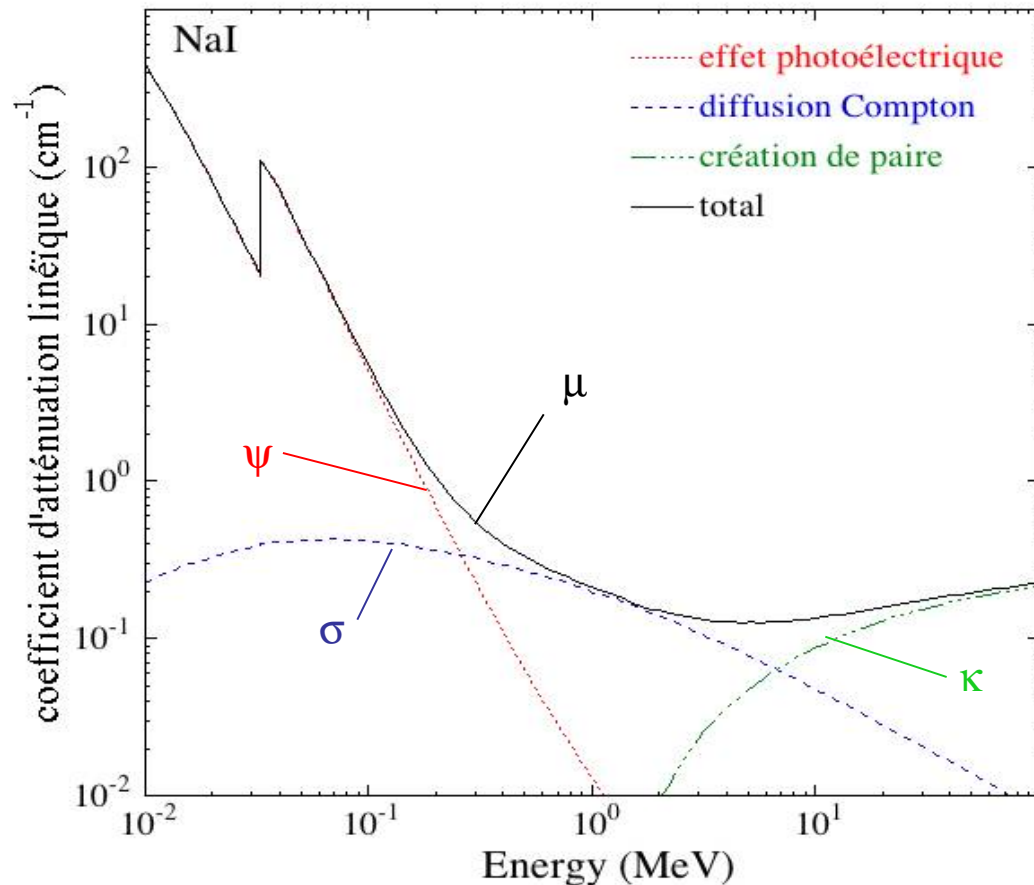
$$\frac{dN}{dx} = -\mu N = -\frac{N}{\lambda}$$

avec λ le **libre parcours moyen**.



$$N(x) = N(0)e^{-\mu x} = N(0)e^{-\frac{x}{\lambda}}$$

Très utile pour calculer la quantité de matériel à interposer entre la source et les utilisateurs



- **coefficient d'atténuation massique** : $\xi = \mu/\rho$
avec ρ la masse volumique du matériau (g/cm³)
unités : cm²/g
utile si la densité du matériau varie (ex. gaz)

Pour l'air, on a :

10 keV, $\lambda \sim 2$ m

100 keV, $\lambda \sim 60$ m

1 MeV, $\lambda \sim 130$ m

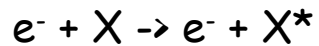
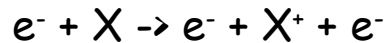
3 - Pertes en énergies des particules chargées

A - Les électrons rapides

a - Interactions des électrons

- Interactions coulombiennes

Ionisation et excitation d'atome

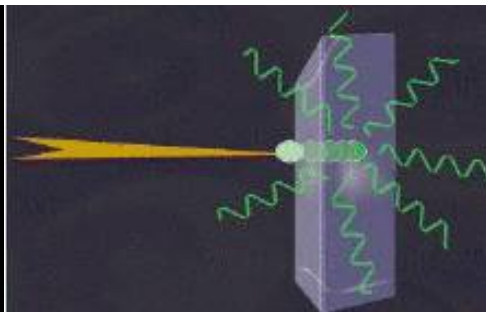
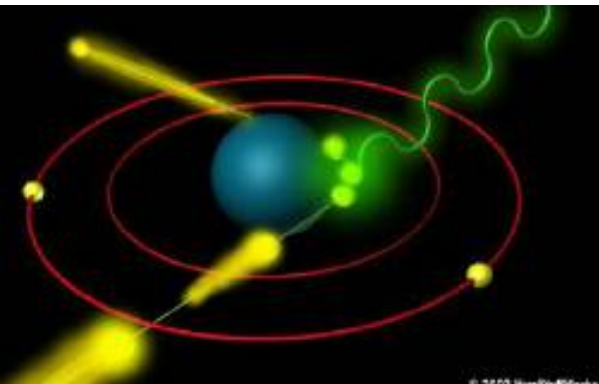
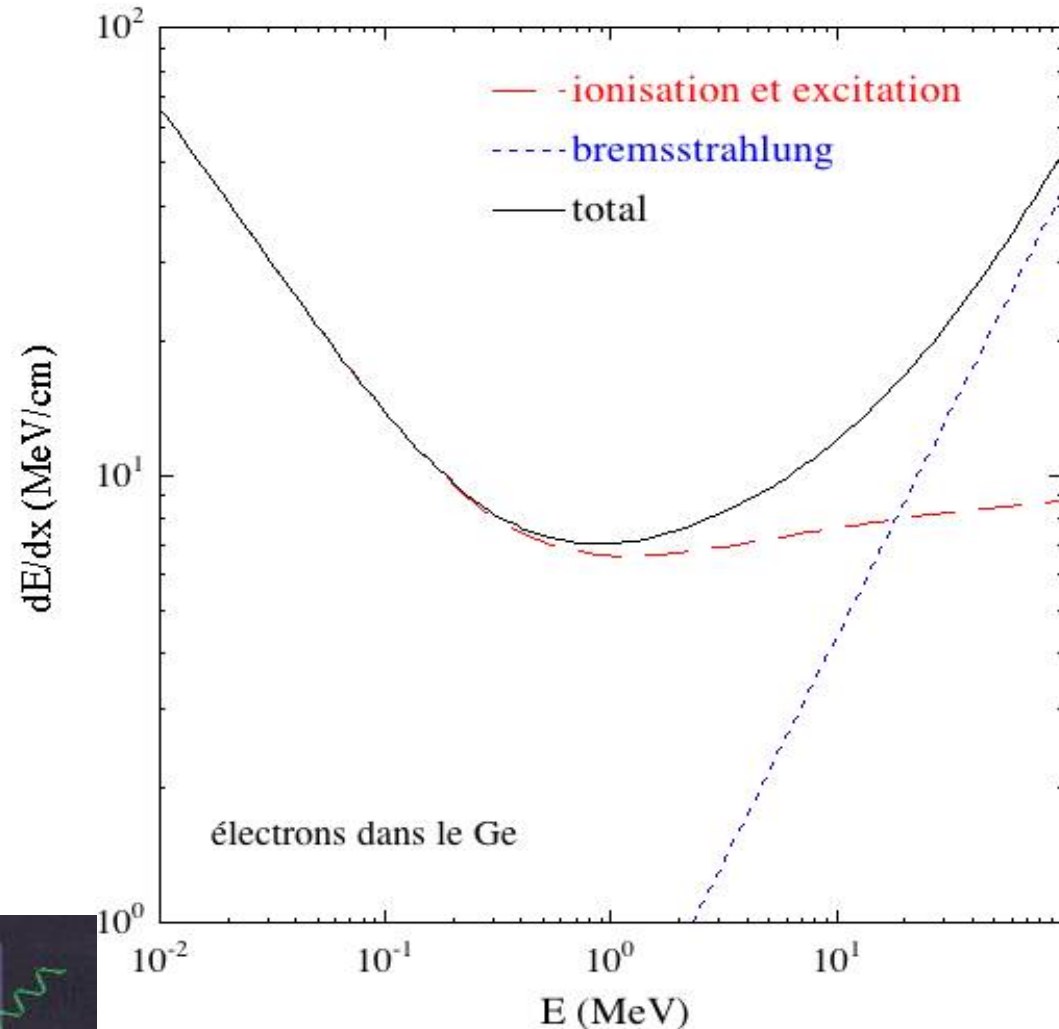


- Rayonnement de freinage

(appelé aussi bremsstrahlung)



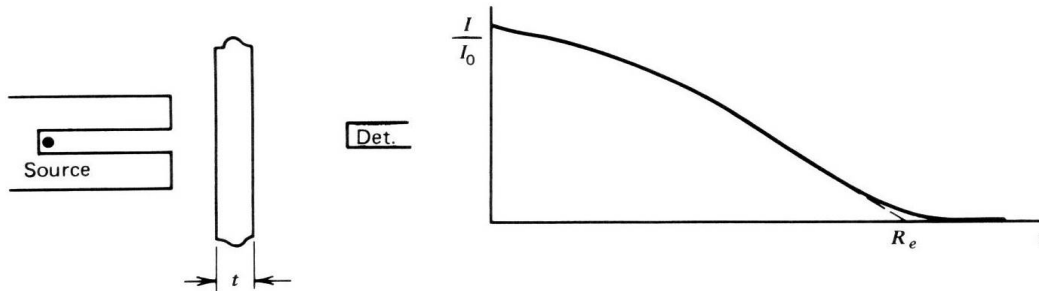
→ principe des générateurs de rayons X.



c - Parcours des électrons ("range")

La trajectoire des électrons dans la matière est erratique.

$I(t)$: taux d'électrons arrivant sur le détecteur après avoir traversé une épaisseur t .

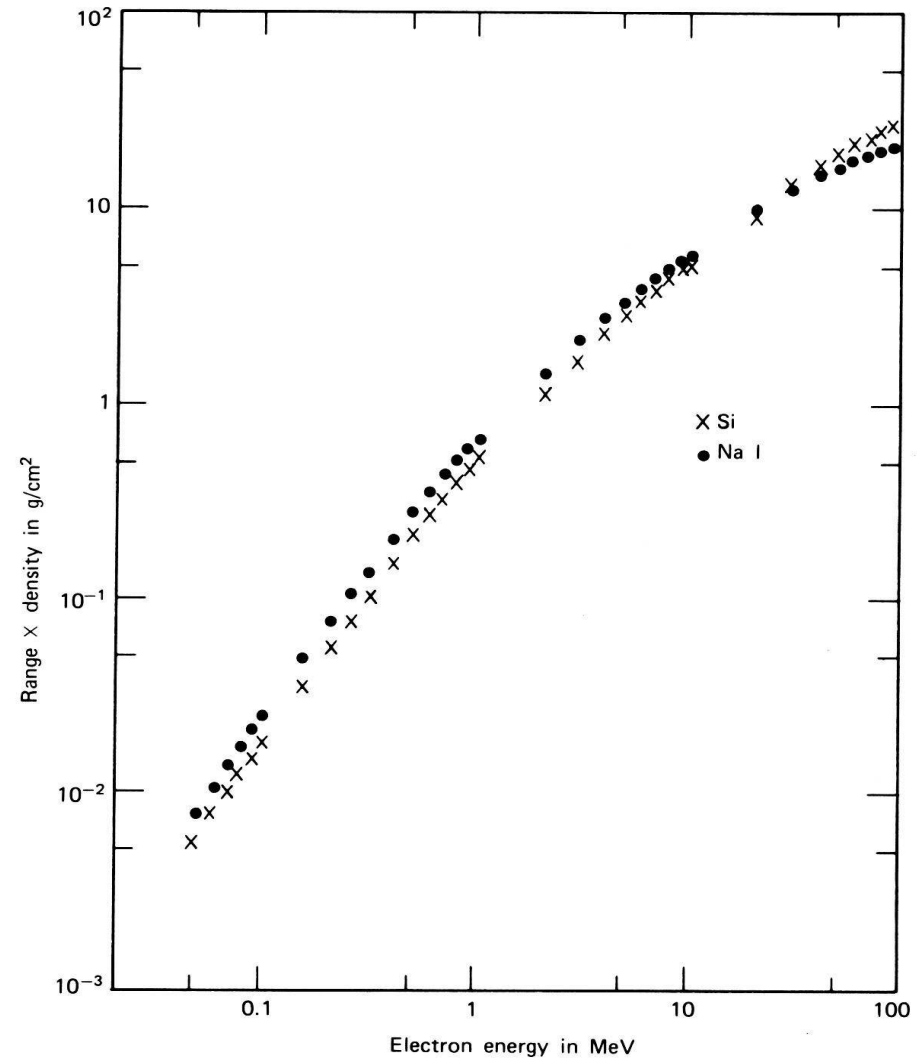


R_e : parcours ("range")

Ex. dans le NaI ($\rho = 3.67 \text{ g/cm}^3$)
 $R_e(1\text{MeV}) \approx 0.2 \text{ cm}$

dans le Si ($\rho = 2.33 \text{ g/cm}^3$)
 $R_e(1\text{MeV}) \approx 0.3 \text{ cm}$

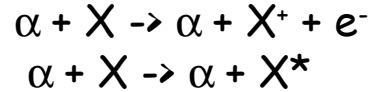
pour l'air, $R_e(1 \text{ MeV}) \sim 6 \text{ m}$



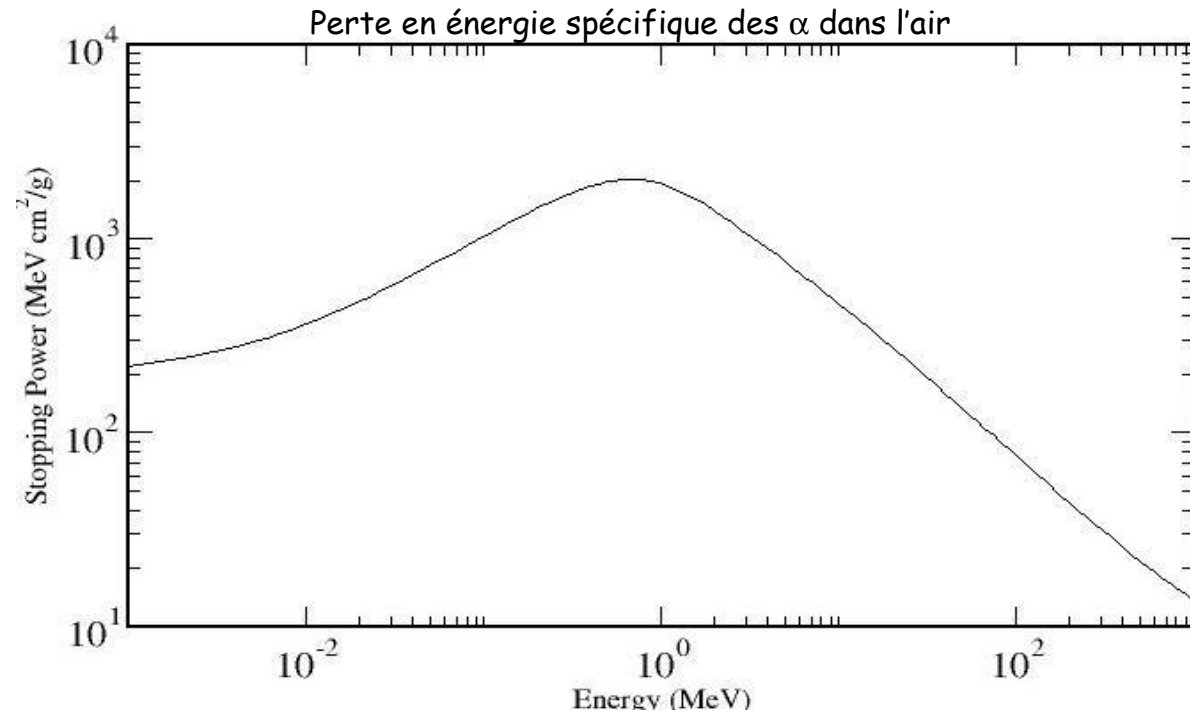
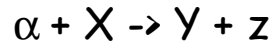
B - Les particules lourdes chargées

a - Interactions des particules lourdes chargées

- Interactions coulombiennes
Ionisation et excitation d'atome



- Réactions nucléaires (rare)



b - Pertes en énergie par unité de longueur

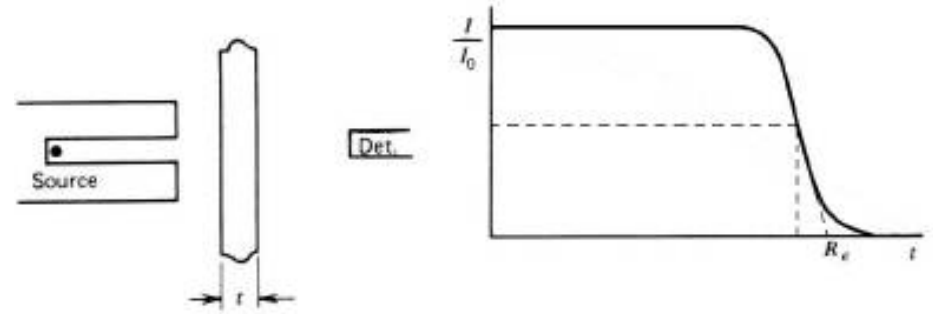
S : pouvoir d'arrêt linéaire ou perte en énergie spécifique

$$S = -dE/dx$$

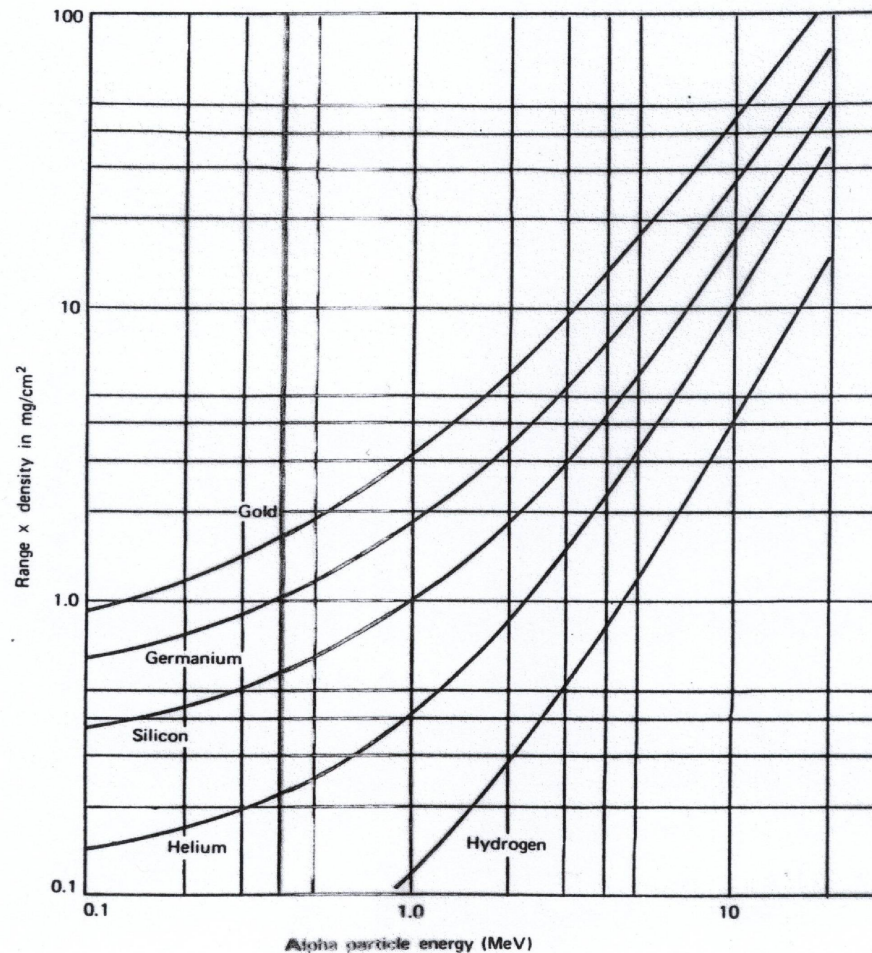
c - Parcours des particules "lourdes"

Trajectoire plutôt rectiligne

$I(t)$: taux de particules arrivant sur le détecteur après avoir traversé une épaisseur t .



Parcours des particules α dans différents matériaux



II - Les détecteurs à gaz

1 - Les chambres d'ionisation

A - Principe

• Les particules chargées ou les photons créent des paires ion- e^- dans le gaz. Le nombre de paires N_{\pm} est proportionnel à E_d l'énergie déposée par la particule ionisante.

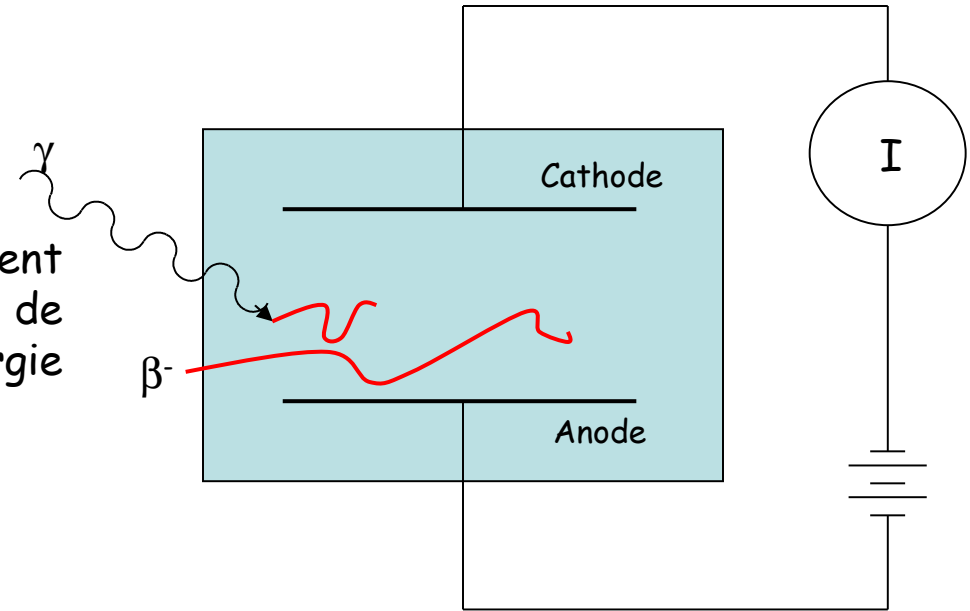
$$\bullet N_{\pm} \approx E_d / W$$

• Les charges issues de l'ionisation sont collectées en appliquant un champ électrique sur les électrodes.

→ Mode impulsionnel : mesure de $Q = e N_{\pm}$ proportionnel à l'énergie déposée par une particule (spectroscopie).

→ Mode continu : mesure du courant I proportionnel au taux de radiations.

$$I = e \frac{dN_{\pm}}{dt} \approx e \frac{dN_{\text{rad}}}{dt} \langle E_d \rangle / W$$



Gaz	W (eV/paire)	
	e^- rapides	α
Ar	26.4	26.3
He	41.3	42.7
Air	33.8	35.1
CH4	27.3	29.1

B - collection des charges

- Si le champ électrique n'est pas suffisant les ions peuvent se recombinaer



-> dans la colonne d'ionisation

-> dans le volume

→ Pertes de charges → courant I faible

- Si le champ E est suffisant, les ions n'ont pas le temps de se recombinaer.

→ toutes les charges sont collectées.

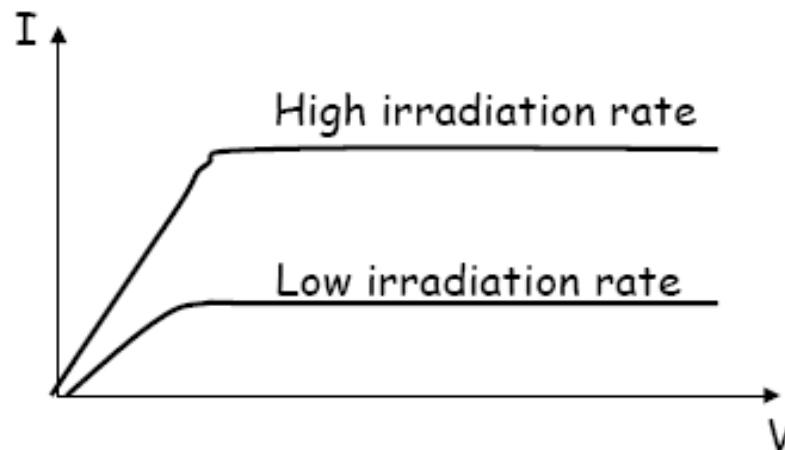
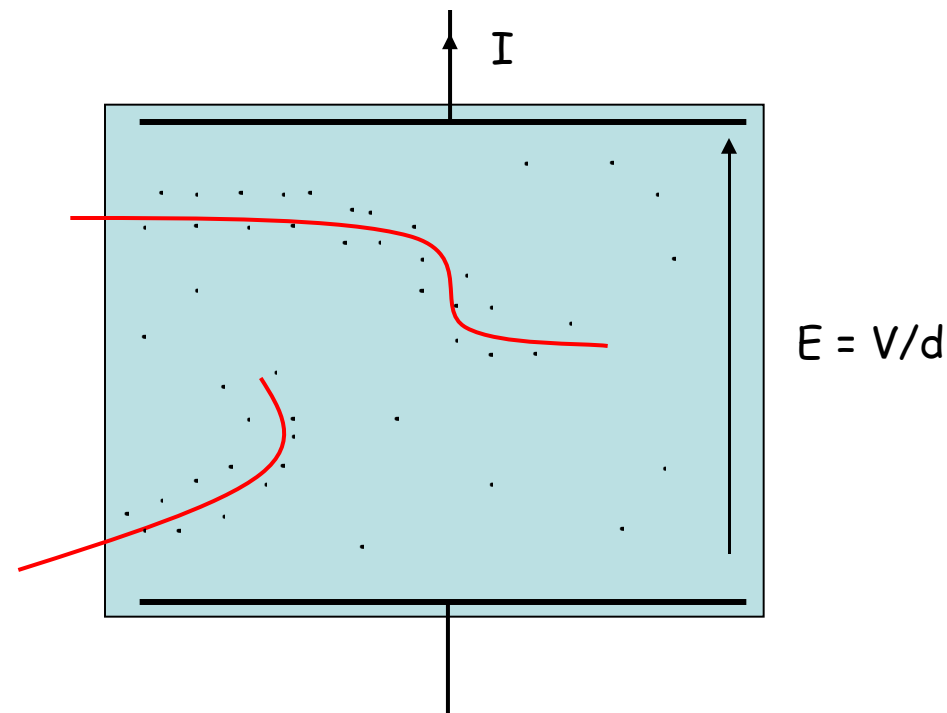
$$I = e \frac{dN_{\pm}}{dt} \propto \frac{dN_{\text{rad}}}{dt}$$

- Temps de collection des charges :

Dépend de la pression et du champ électrique pour P=1 atm et E=10⁴ V/m

→ temps de transit des ions (d=1 cm) ≈ 10 ms

→ temps de transit des e⁻ (d=1 cm) ≈ 1 μs



C - Mesure d'impulsions

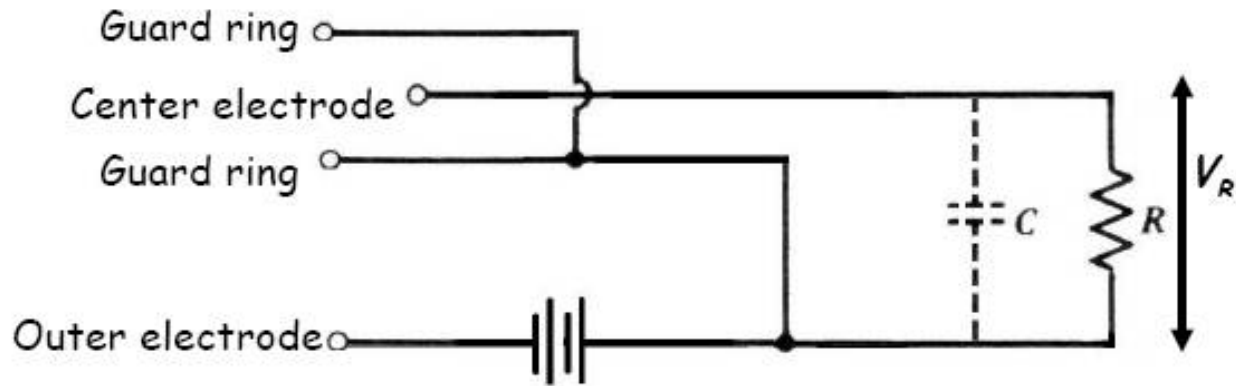
Utilisé en spectroscopie (obsolète)

$$\Delta Q = e N_{\pm} = e E_{\text{dep}}/W$$

$$\Delta V = \Delta Q/C$$

Conditions :

- $RC \gg$ temps de collection des charges
- $RC \ll 1/\text{fréquence d'arrivée des particules}$

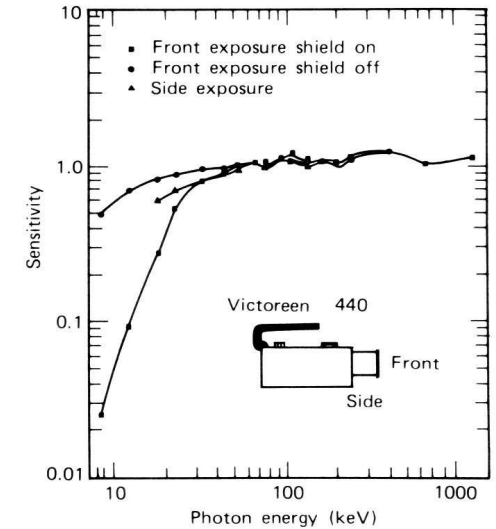
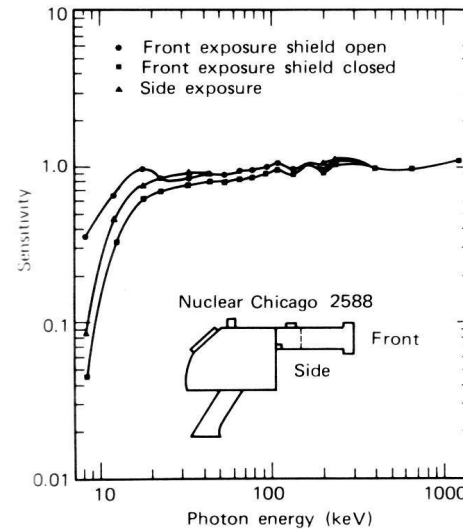


D - Applications

- Moniteur de radiation en radioprotection sensible aux X et γ ($E > 20$ keV)
mesure directe du taux d'exposition

$$R \text{ en } C/(kg \text{ s}) : R = I/M_{\text{air}}$$

- Calibration de sources radioactives
- Mesure de l'activité de gaz radioactifs



2 - Les compteurs proportionnels

A - Principe

- Si le champ électrique $E > 10^6$ V/m les électrons secondaires produisent une avalanche de paires d'ions



→ multiplication par M des charges

$$\rightarrow Q = M e N_{\pm} = M e E_d / W$$

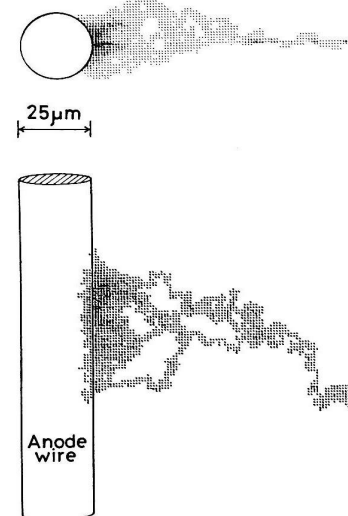
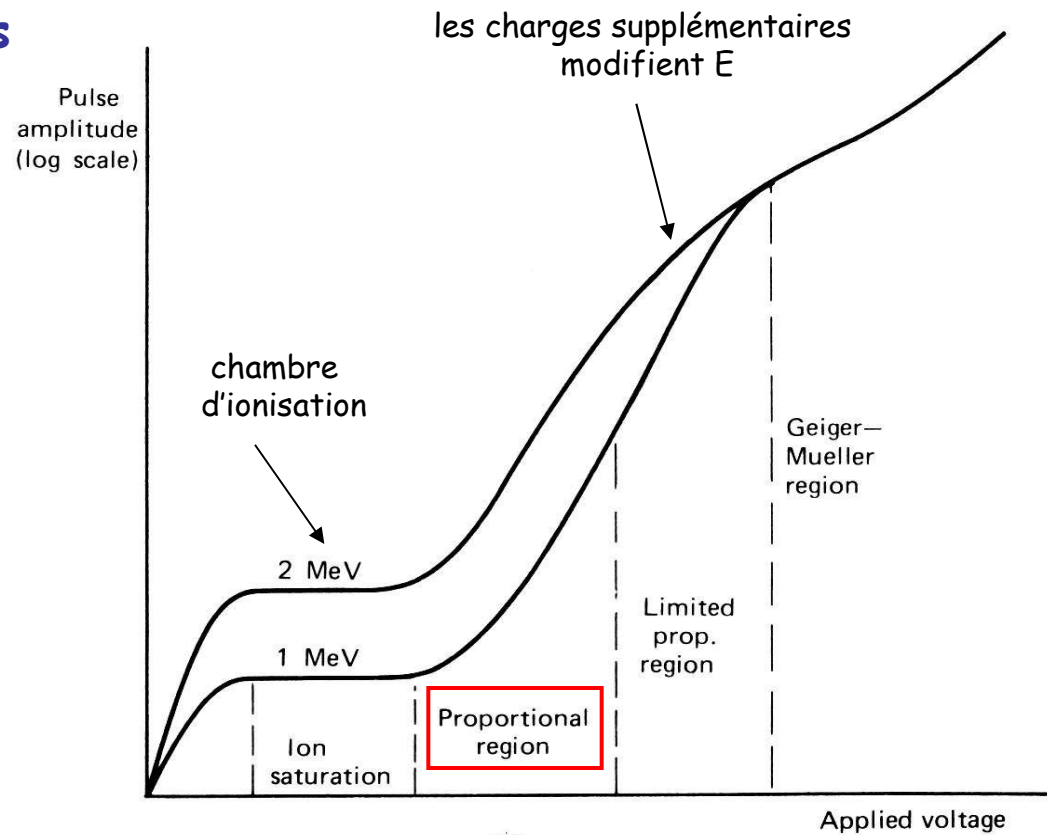
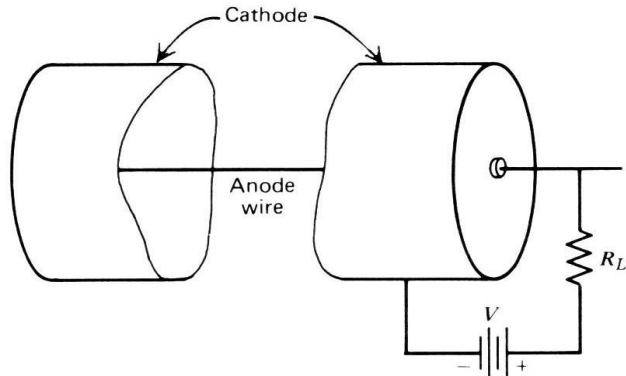
→ mode impulsionnel

- Géométrie cylindrique

Champs électrique : $E(r) = V/[r \ln(R_c/R_a)]$

Ex. $V = 2000$ V, $R_a = 80 \mu\text{m}$, $R_c = 1$ cm

$$\Rightarrow E(R_a) \approx 5 \times 10^6 \text{ V/m}$$



B - Caractéristiques et performances

- Gaz utilisés :

gaz avec faible coefficient d'attachement des électrons (pour éviter $e^- + Y \rightarrow Y^-$)

→ gaz nobles (He, Ar, Ne, Kr, Xe)

→ mélange 90% argon et 10% méthane

- Facteur multiplicatif dépend de la géométrie, de la pression et de la tension d'alimentation : $M \propto \exp(V)$

- Les impulsions en tension :

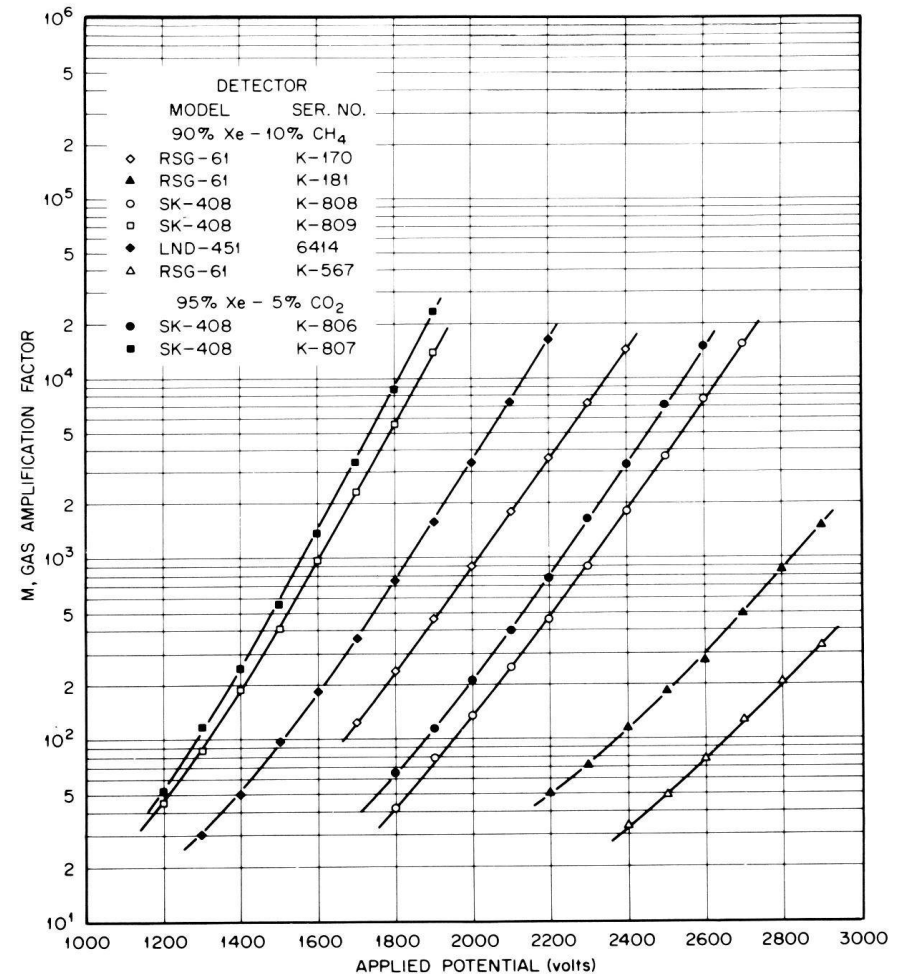
Elles sont exponentielles avec un temps de montée égal au temps de collection des charges $\tau_c \approx \mu s$ et une échelle de temps de décroissance $\tau = RC$.

→ Condition : $\tau \gg \tau_c$

- La hauteur des impulsions $V_{max} = Q/C$

→ $V_{max} \propto E_d$ (énergie déposée par la particule)

→ spectroscopie



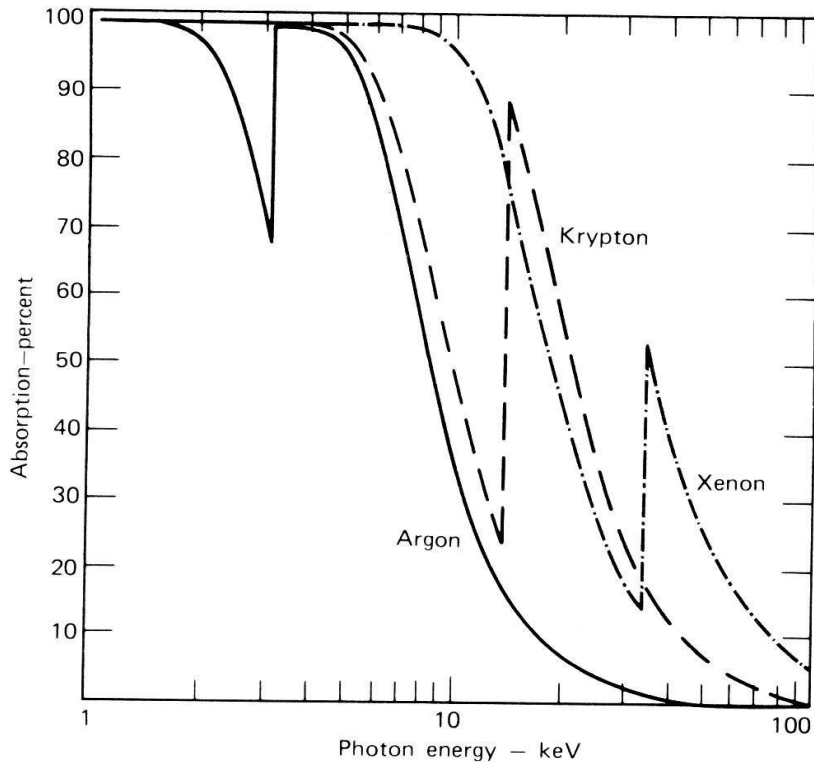
- Résolution en énergie

Elle est limitée par les fluctuations statistiques du nombre de charges initialement produit par le rayonnement et par les fluctuations statistiques du facteur multiplicatif.

On montre : $\Delta E \propto \sqrt{E}$

Mesures : $\Delta E/E \approx 11$ à 13% à 5.9 keV

- Efficacité de détection : $\varepsilon_d = (\text{nombre d'impulsions détectées}) / (\text{nombre de } \gamma \text{ incidents})$



L'efficacité de détection dépend de l'énergie, du gaz utilisé et de la nature & de l'épaisseur des parois de l'enceinte.

Domaine en énergie : 0.25 - 100 keV

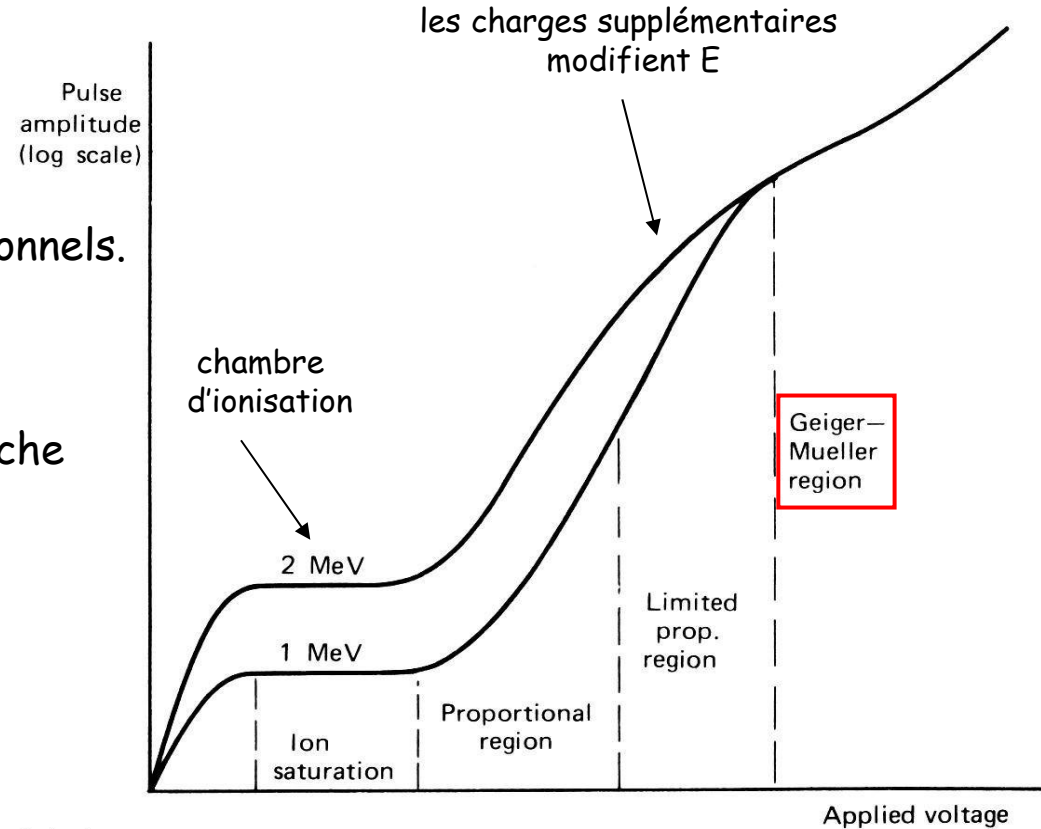
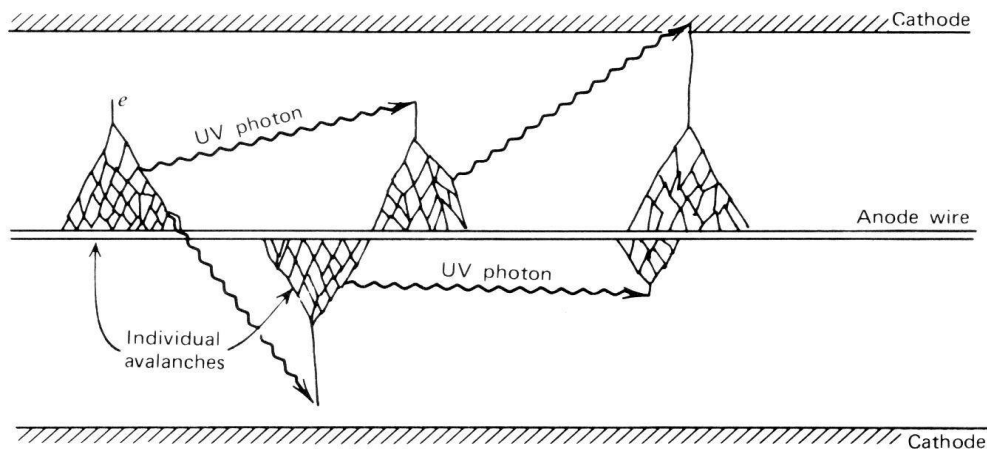
Processus dominant : effet photoélectrique

$$\varepsilon_d(E_x) \approx e^{-\mu_e(E_x)x_e} \left(1 - e^{-\mu_{\text{gaz}}(E_x)x_{\text{gaz}}} \right)$$

3 - Les compteurs Geiger-Mueller

A - Principe

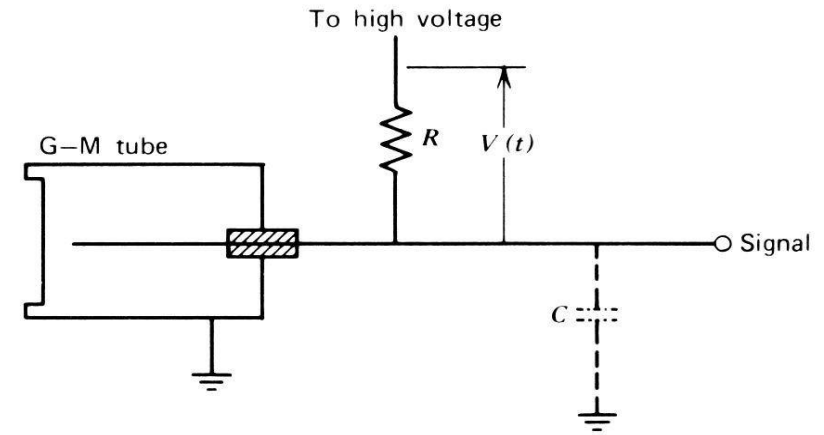
- Tension plus grande que les compteurs proportionnels.
- Facteur multiplicatif/avalanche $\approx 10^6 - 10^8$
- Grande quantité de charges secondaires/avalanche
 - (a) excitation des atomes
 - photons UV
 - avalanches secondaires
 - (b) écrantage du champ électrique



La quantité de charges collectées $\approx 10^9 - 10^{10}$ est indépendante de l'énergie déposée par la particule initiale.

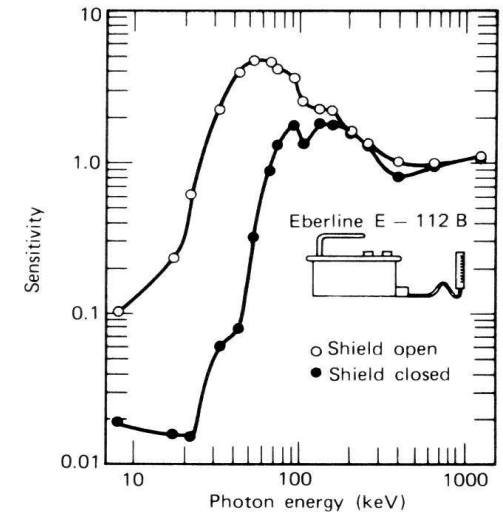
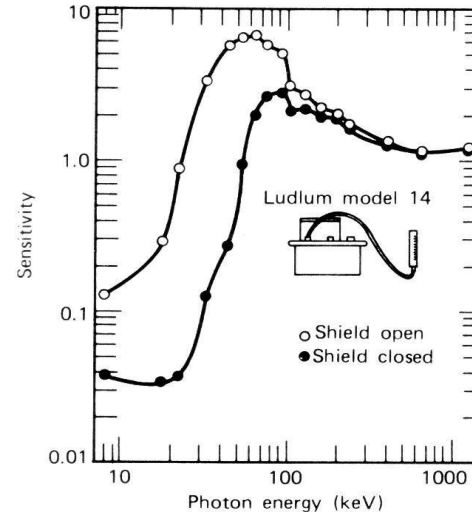
B - Mise en œuvre et performances

- Gaz : gaz nobles (He, Ar, Xe, Kr)
pression ≈ 0.1 atm.
- Impulsion : le temps de collection des charges est de l'ordre de quelques μs .
 $\Rightarrow \mu\text{s} \ll RC \ll 100 \mu\text{s}$ pour éviter la saturation



C - Application

- compteurs de particules chargées :
pour les particules qui traversent l'enceinte (efficacité de 100%).
- compteurs de gamma
Rq: incertitude d'un facteur 2 ou 3 sur le taux d'exposition.



"Sensibilité" de 2 moniteurs de rayons γ

$$\Delta \text{ "Sensibilité" } = R_{\text{mesuré}} / R_{\text{réel}}$$

facteur de correction du taux d'exposition en fonction de l'énergie des photons.

III - Les scintillateurs

1 - Principe

Dans le scintillateur, les particules chargées produisent des photons de scintillation. Les photons de scintillation qui atteignent la photocathode génèrent des électrons (photoélectrons) par effet photoélectrique. Ces photoélectrons déclenchent une cascade d'électrons dans le photomultiplicateur (PM).

Le signal est une quantité de charge Q récupérée sur l'anode du PM.

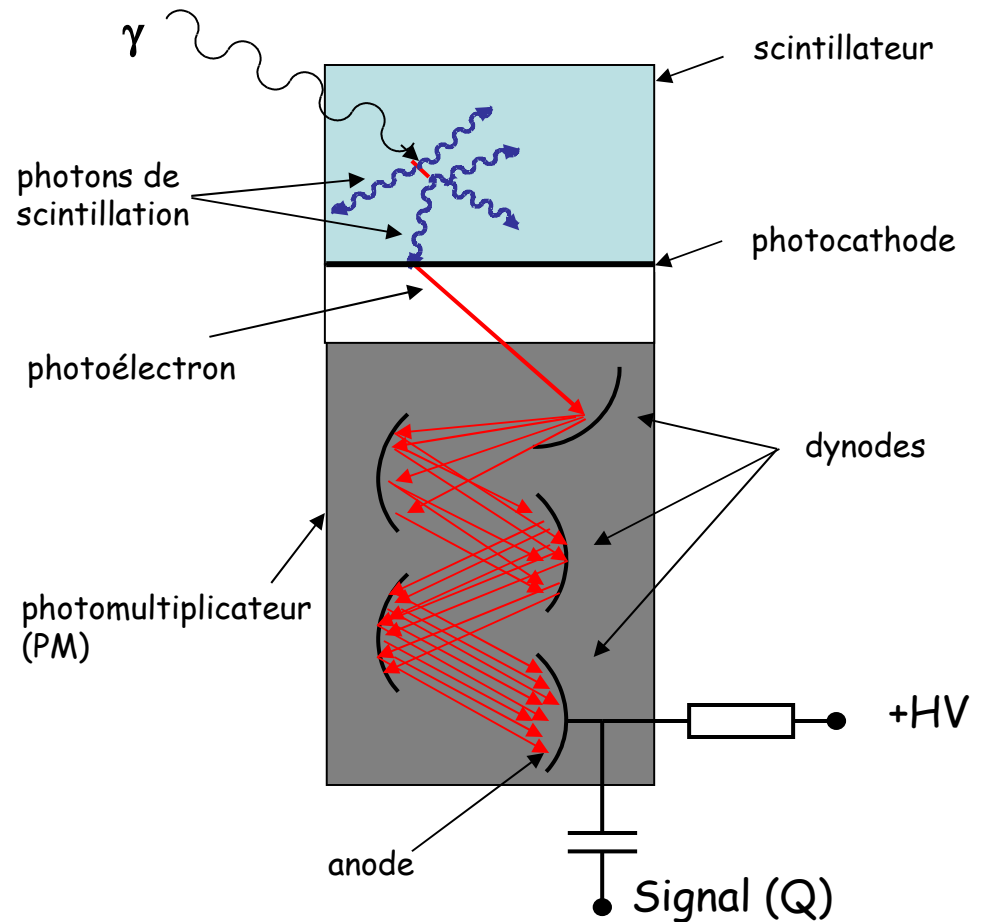
$$Q \propto N_{\text{photoélectrons}} \propto N_{\text{photonscintillation}} \propto E_{\text{déposée}}$$

Le scintillateur doit :

- convertir efficacement l'énergie déposée en photons de scintillation
- être transparent aux longueurs d'onde des photons de scintillation
- avoir un indice de réfraction ~ 1.5 pour transmettre les photons de scintillation au PM

Le photomultiplicateur doit :

- convertir efficacement les photons de scintillation en photoélectrons au niveau de la photocathode
- produire une quantité de charge par photoélectron suffisante pour donner un signal mesurable.



2 - Les scintillateurs organiques

Matériaux composés de H, C, O (ex. Anthracène $C_{14}H_{10}$, plastique...) de faibles densités ($\sim 1 \text{ g/cm}^3$) sous forme de solide, de gel ou de liquide.

Les particules chargées de haute énergie perdent leur énergie en excitant les molécules du scintillateur organique. Ces molécules se désexcitent avec une constante de temps de quelques nanosecondes en émettant des photons de scintillation (fluorescence) dans le domaine du visible.

- Production de lumière ("Light output")

$$L \approx N_{\phi} hc / \langle \lambda \rangle$$

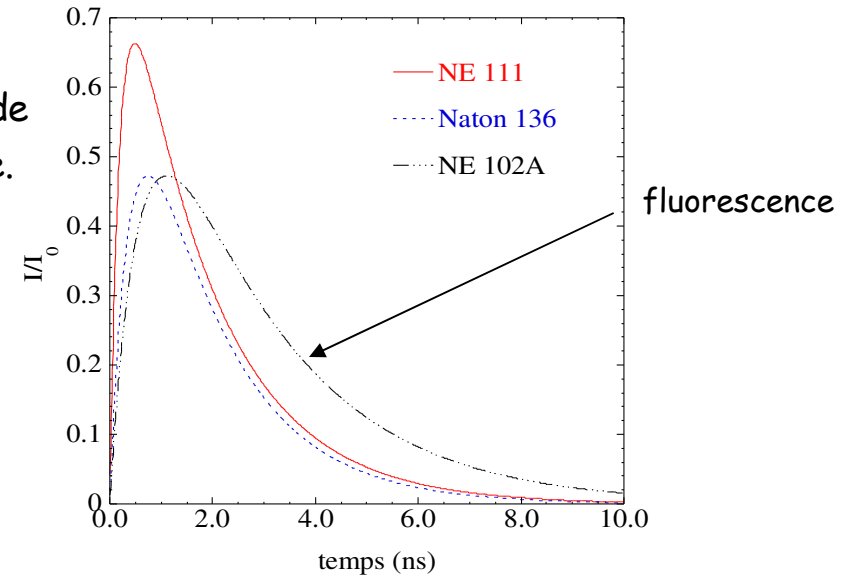
Le nombre de photons de scintillation (N_{ϕ}) est proportionnel à l'énergie déposée.

- Efficacité de scintillation

$$S = L/E$$

$S \sim 2-6\%$ à peu près constante pour les électrons ($E > 0.1 \text{ MeV}$).

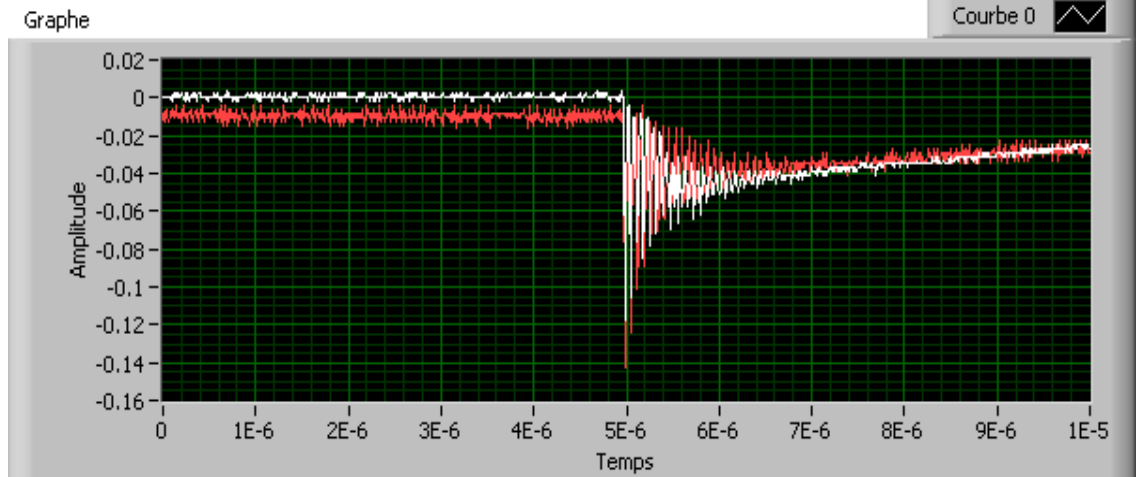
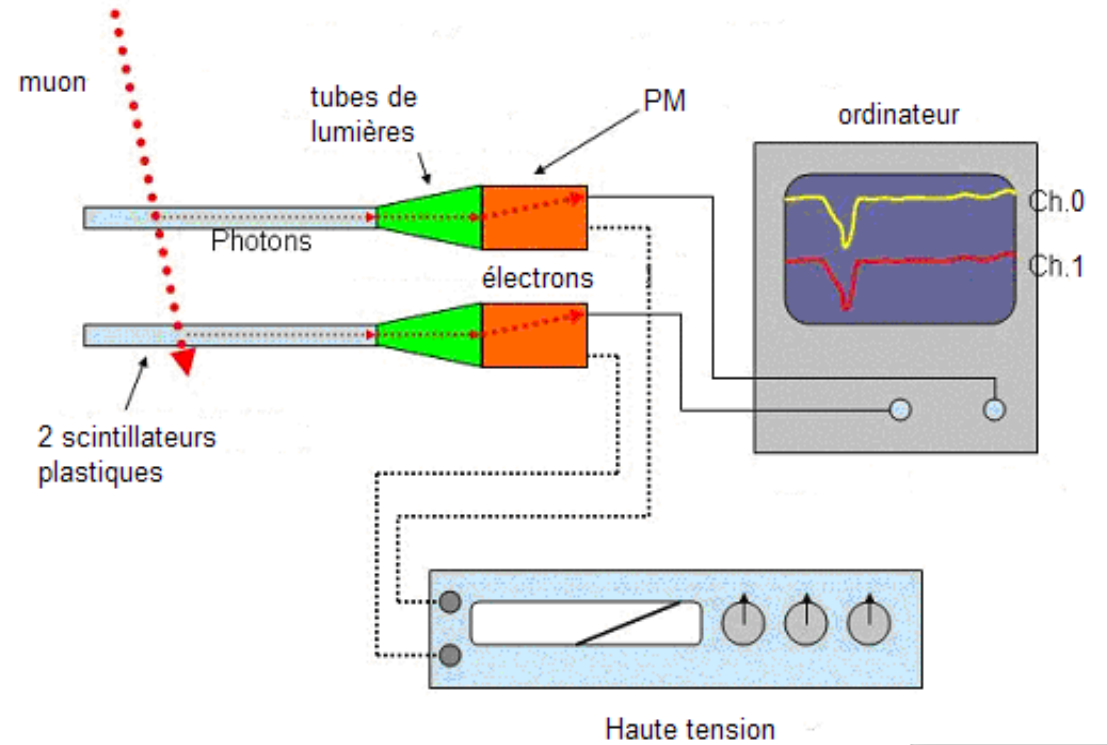
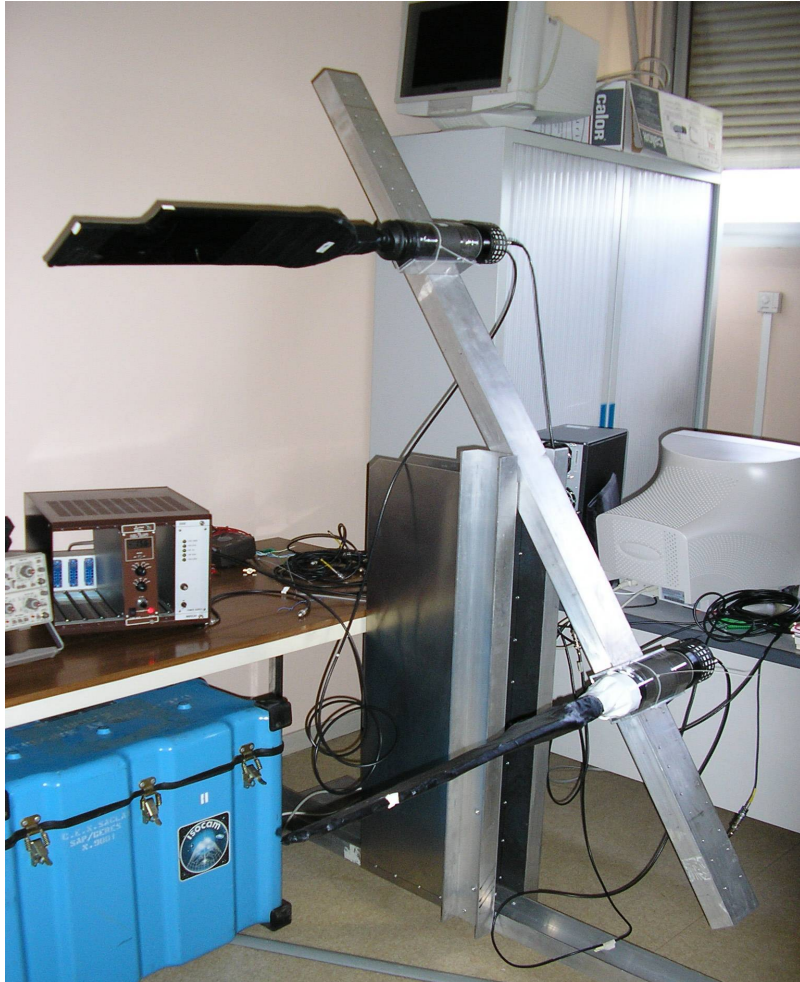
- Application : ces matériaux sont légers (HCO)
Les scintillateurs sont plutôt utilisés pour détecter les particules chargées.



Taux d'émission de photons de scintillation en fonction du temps

• Exemple d'utilisation de scintillateur organique

Télescope à muons avec deux scintillateurs plastiques

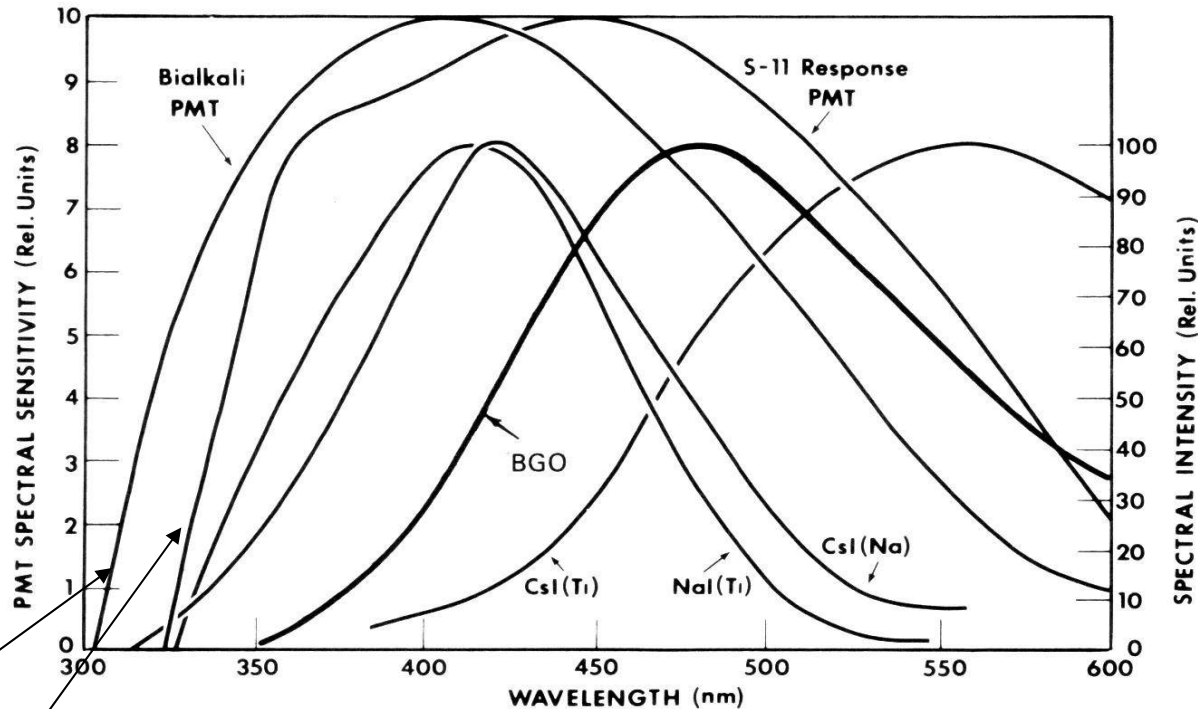


3 - Les scintillateurs inorganiques

Matériaux cristallins relativement denses (de 2.5 à 7.1 g/cm³) avec ajout d'impuretés. Exemples : NaI(Tl), CsI(Na), BGO...

Les particules chargées de haute énergie perdent leur énergie en excitant le cristal. Les photons de scintillation sont émis dans les désexcitations avec des échelles de temps de $\approx 0.1 \mu\text{s}$.

Spectre en émission de plusieurs scintillateurs inorganiques



Réponses spectrales de photomultiplicateurs

Performances des scintillateurs inorganiques

- Efficacité de scintillation ($S = L/E$)

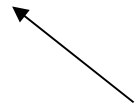
Elle est généralement 2 à 10 fois meilleure que les scintillateurs organiques.

- Temps de décroissance (τ)

Ces scintillateurs sont ~10 à 1000 fois plus lents que les scintillateurs organiques.

- Propriétés de scintillateurs inorganiques communs

Matériau	$\rho(\text{g/cm}^3)$	$\lambda_{\text{max}}(\text{nm})$	$\tau(\mu\text{s})$	N_{φ}/MeV	$S(\%)$
NaI(Tl)	3.67	415	0.23	38000	11.3
CsI(Tl)	4.51	540	1.00	52000	11.9
CsI(Na)	4.51	420	0.63	39000	11.4
LiI(Eu)	4.08	470	1.40	11000	2.8
BGO	7.13	505	0.30	8200	2.1
NE102A	1.03	423	0.002	10000	3.0



Scintillateur plastique pour comparaison

Les scintillateurs inorganiques absorbent assez bien l'énergie des photons gamma grâce à leur grande densité et valeur du coefficient d'atténuation linéique. Ils ont donc une bonne **efficacité de pic** et sont utilisés en spectroscopie gamma.

• Efficacité :

ϵ_p : **efficacité de pic** ou d'absorption totale

$$\epsilon_p = N_a / N_i$$

N_a : nombre de photons totalement absorbés dans le volume sensible et N_i , nombre de photons **incidents**.

ϵ_{ap} : **efficacité absolue de pic** ou d'absorption totale

$$\epsilon_{ap} = N_a / N_e$$

N_e le nombre de photons **émis** par la source.

Le NaI sert de **standard pour la calibration en efficacité de pic**.

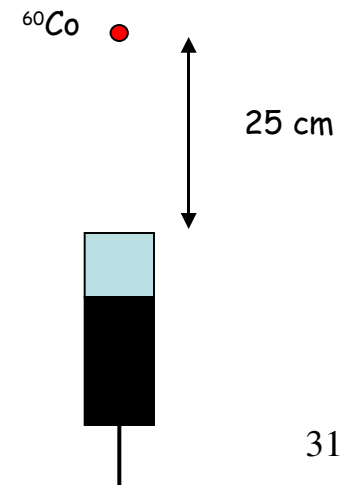
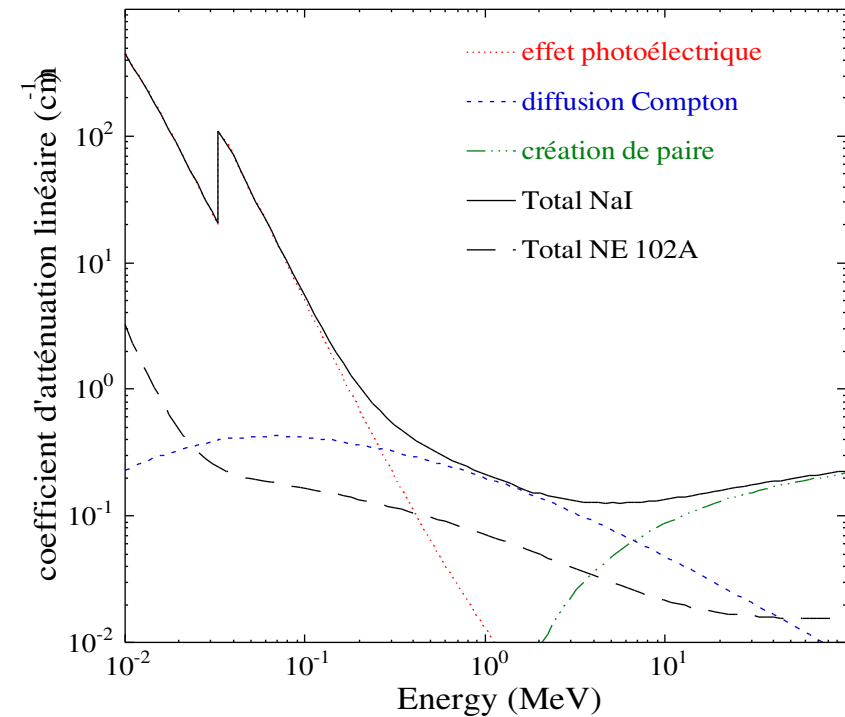
- Source : ^{60}Co (1332 keV)
- Distance source-scintillateur : 25 cm
- Taille du scintillateur de référence : 76.2 mm x 76.2 mm (3 in. x 3 in.)

$$\Rightarrow \epsilon_{ap, ref} = 1.2 \times 10^{-3}$$

ϵ_{rp} : **efficacité relative de pic** ou d'absorption totale d'un détecteur

$$\epsilon_{rp} = \epsilon_{ap}(1332 \text{ keV}, 25 \text{ cm}) / \epsilon_{ap, ref}$$

Coefficient d'atténuation

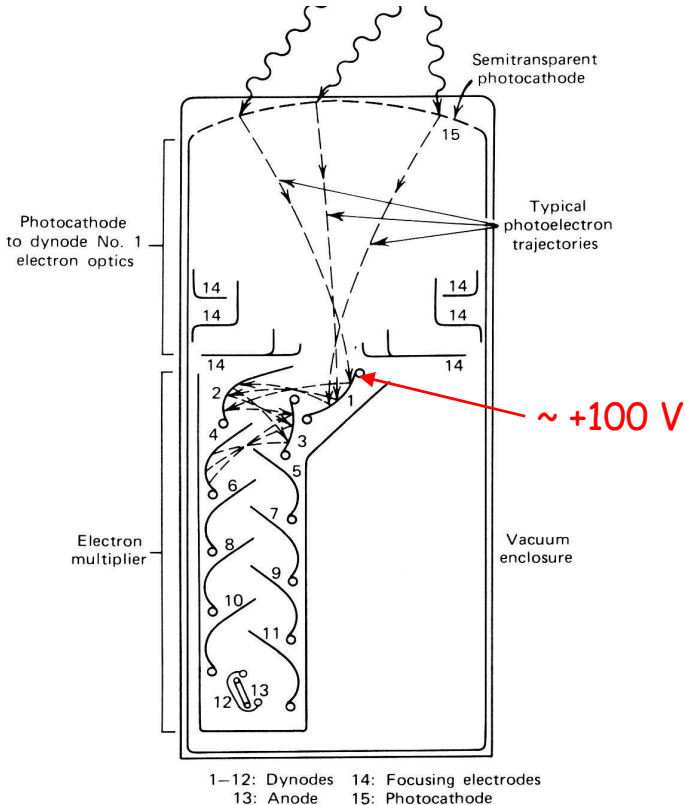


4 - Les photomultiplicateurs

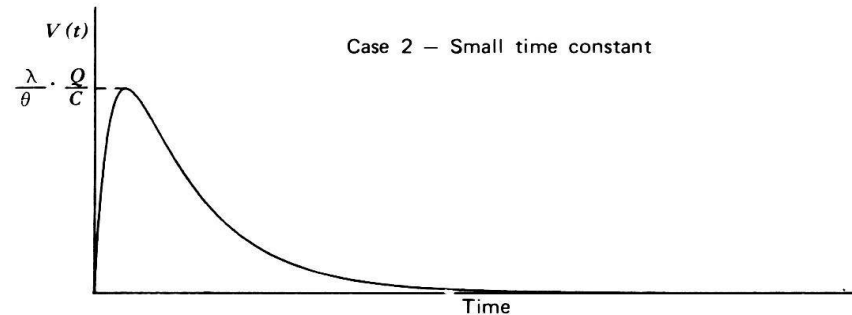
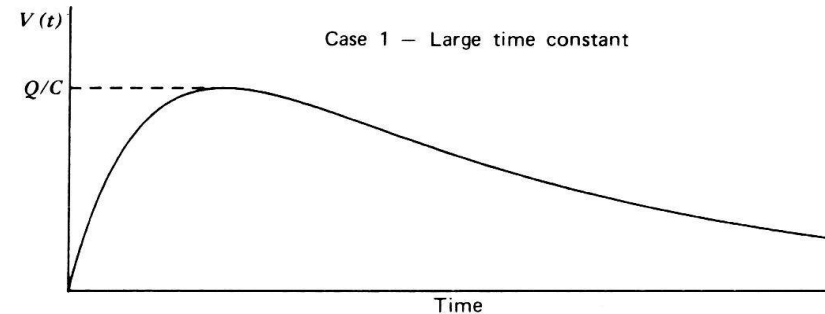
• Une fraction f des N_ϕ photons de scintillation va atteindre la photocathode. Le nombre de photoélectrons produits par effet photoélectrique dans la photocathode est : $N_{\phi e} = \epsilon_Q f N_\phi$ avec ϵ_Q est l'efficacité quantique ($\epsilon_Q \approx$ dizaines de %)

• Les photoélectrons sont accélérés et amenés vers une première **dynode** par un système d'électrodes focalisantes. Les photoélectrons produisent dans la première dynode δ électrons secondaires qui sont accélérés vers la seconde dynode. Les électrons secondaires produisent eux aussi chacun δ électrons sur la dynode suivante. Au niveau de l'anode, le nombre de charge est : $Q = G N_{\phi e} \approx \delta^n N_{\phi e}$

• n : nombre de dynodes, $\delta \sim 5-55$, gain $G \approx 10^3 - 10^7$



Tension à la sortie du photomultiplicateur



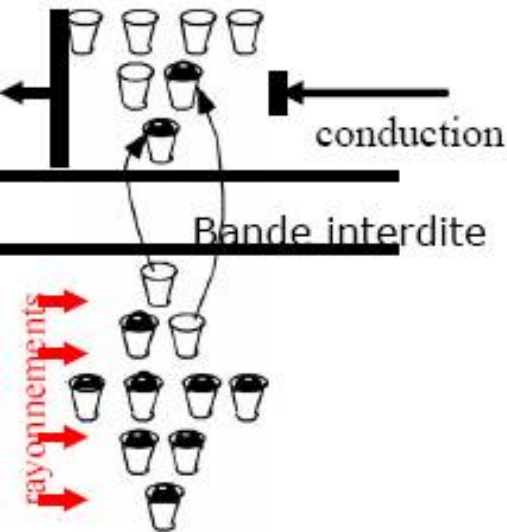
Dans les deux cas
 $V_{\max} \propto Q \propto$ Energie déposée par la particule

IV - Les détecteurs à semi-conducteur

1 - Principe

• Un photon γ cède la totalité ou une partie de son énergie à un ou plusieurs électrons. Ces derniers créent par collision des paires électrons-trous dans le semi-conducteur. Ces charges sont collectées par un champ électrique. La quantité de charges obtenues est proportionnelle à l'énergie déposée par le photon incident.

$$Q \propto N_{\text{charges}} \propto E_{\text{déposée}}$$

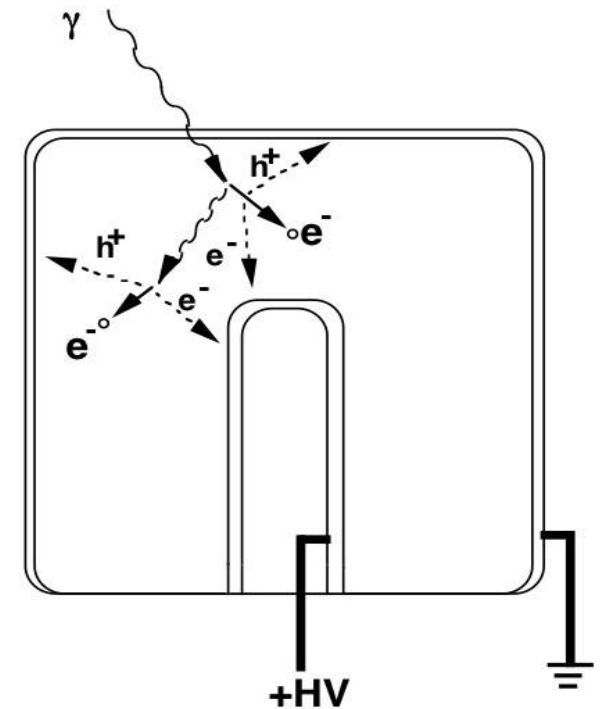


• Pour pouvoir collecter les charges il faut appliquer une haute tension aux bornes du semi-conducteur.

• L'avantage d'un tel détecteur est que pour un dépôt en énergie identique, le nombre de porteurs d'information (paires électrons-trous) est plus important que pour les scintillateurs (nombre de photoélectrons).

• L'incertitude relative ($\approx \Delta E/E$) sur l'énergie mesurée s'en trouve réduite.

• Utilisation en spectroscopie



Exemple :

$$\epsilon_{\text{NaI}} = 170 \text{ eV/photoe}^-$$

$$\epsilon_{\text{Ge}} = 2.96 \text{ eV/trou-e}^-$$

$$\Delta E (\text{Ge}) / \Delta E (\text{NaI}) \approx 0.03$$

2 - Les détecteurs

A - Détecteurs en silicium

- Caractéristiques

Si (Z = 14) : $\rho = 2.33 \text{ g/cm}^3$
 $\varepsilon \approx 3.62 \text{ eV}$

Disponible en couche mince

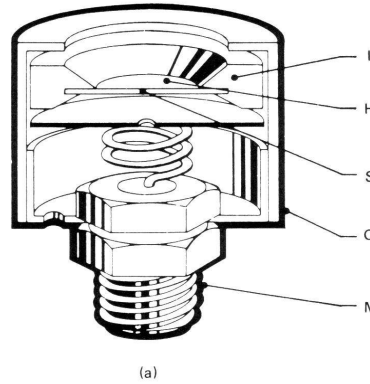
- Performances

$\Delta E \approx 0.25 \text{ keV à } 5.9 \text{ keV}$

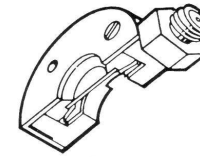
Temps de montée des impulsions $\approx 100\text{-}500 \text{ ns}$

- Utilisation

- détecteurs X
- détection de particules chargées
- moniteur de radiations



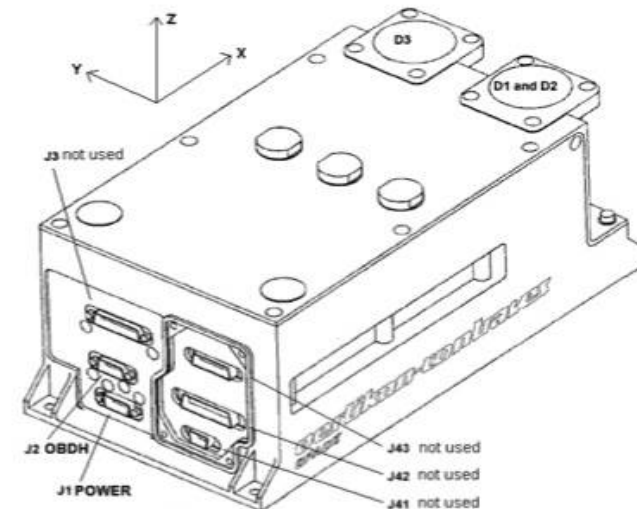
Diodes en Si



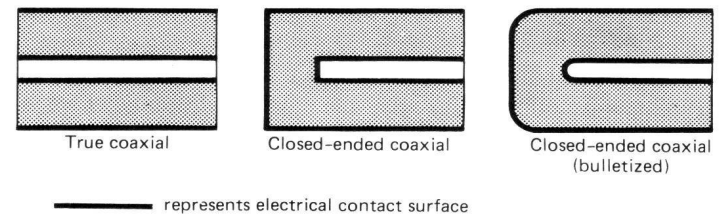
Détecteur en Si
strippé



Detectors	Type:	Thickness μm	Area mm^2	Front Shielding
D1	EG&G Ortec Ultra a T4-013-025-500	500	25	0.5 mm Al + 0.7 mm Brass
D2	EG&G Ortec Ultra a T4-013-050-500	500	50	D1 + 0.7mm Ta + 0.5mm Al
D3	EG&G Ortec Ultra a T4-013-025-500	500	25	0.65 mm Al



B - Détecteurs en germanium



• Caractéristiques

Ge ($Z = 32$): $\rho = 5.32 \text{ g/cm}^3$
 $\varepsilon \approx 2.96 \text{ eV}$

Doit être refroidi (77 K)

Disponible en grand volume

Géométrie : planaire, coaxiale, strippé

• Performances

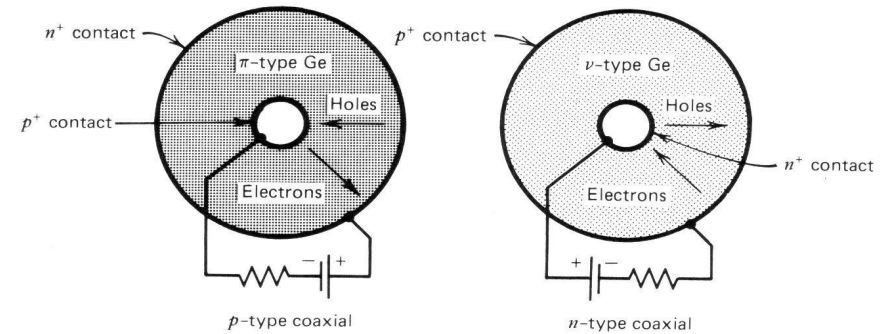
$\Delta E \approx 2 \text{ keV à } 1 \text{ MeV}$

Temps de montée des impulsions $\approx 0.5 \mu\text{s}$

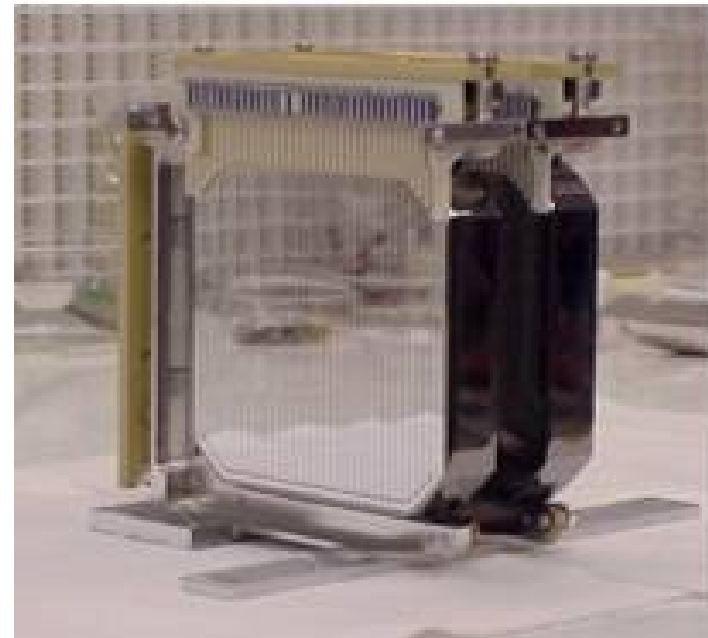
• Utilisation

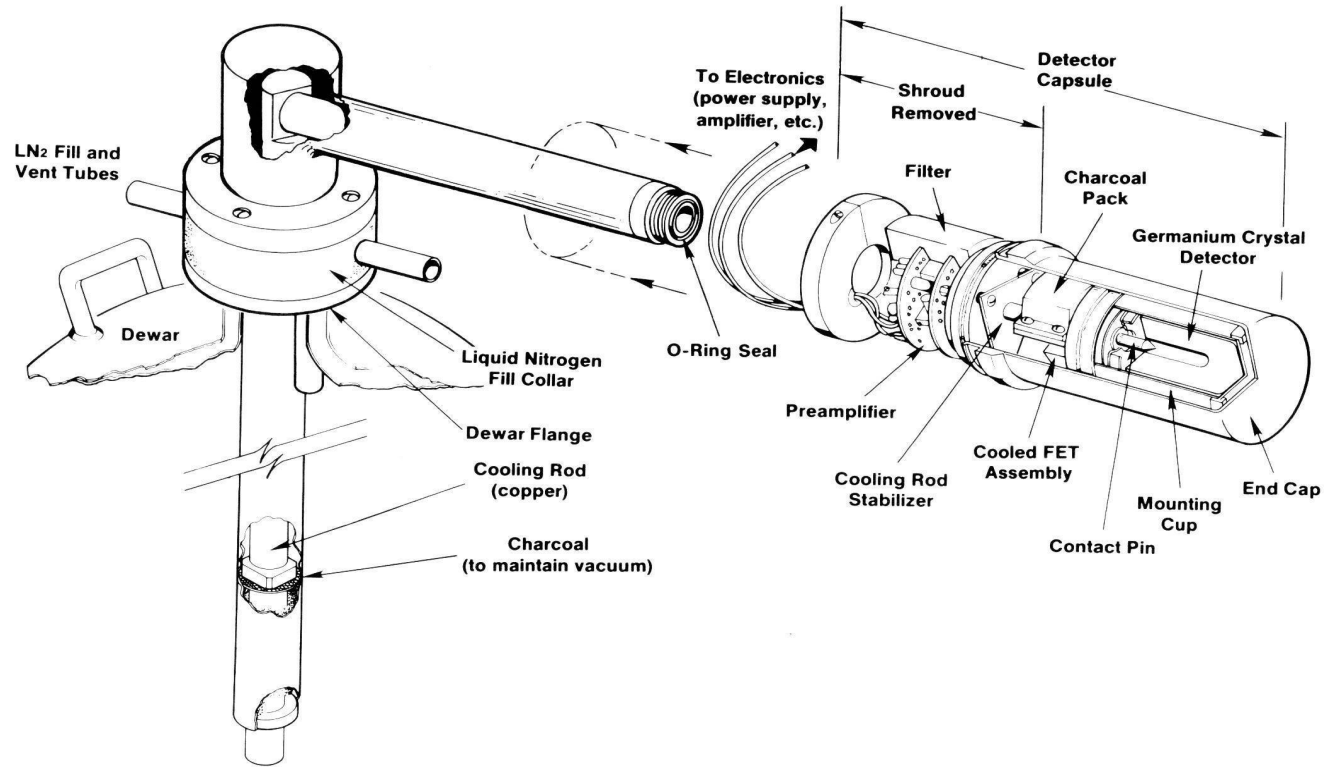
spectrométrie gamma

- mesures d'activités de sources
- mesures d'abondances
- physique nucléaire



Détecteurs en Ge
strippé





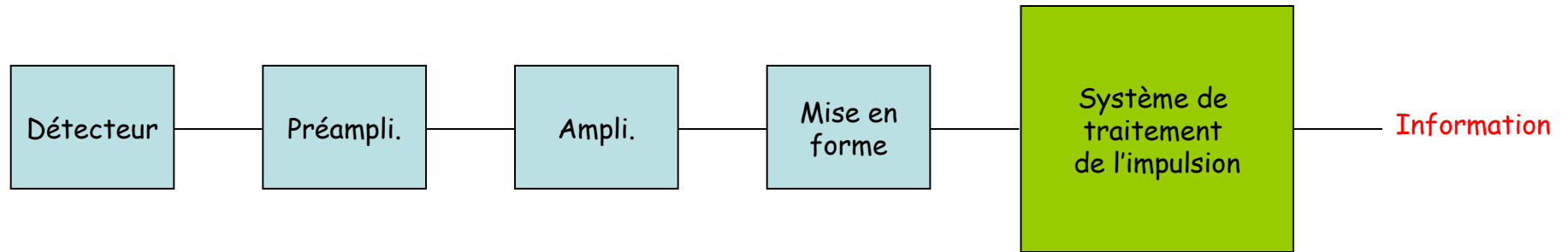
C - Autres détecteurs à semi-conducteur

- CdTe (telluride de cadmium) : compact, assez bonne résolution, fonctionne à température ambiante
- HgI₂ (iodure de mercure) : compact, résolution moyenne, fonctionne à température ambiante

V - Acquisition et analyseurs multi-canaux

1 - La chaîne d'acquisition

La configuration de la chaîne dépend des objectifs de la mesure (comptage, spectroscopie, déclencheur...)

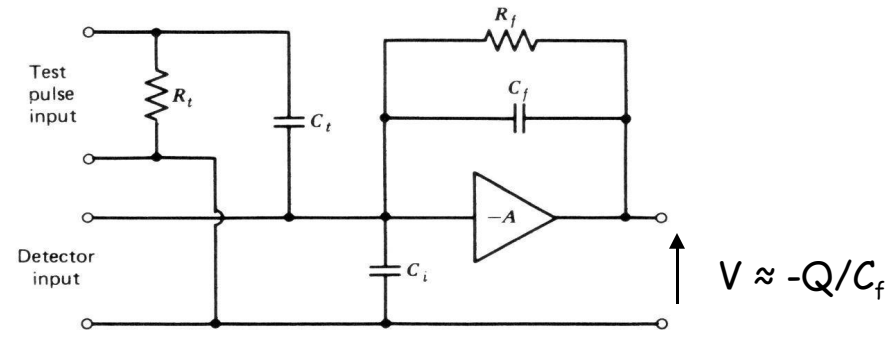


A retenir :

- Le signal fourni par le détecteur est généralement une quantité de charge Q .
- Le détecteur est alimenté soit directement soit à travers le préampli.
- Le préamplificateur est nécessaire si Q est trop faible
- La mise en forme est nécessaire pour la spectroscopie fine (ex. détecteurs Ge)
- Les éléments de la chaîne doivent être linéaires
- La définition et le réglage des éléments de la chaîne doivent être adaptés à l'objectif de la mesure
- Les signaux de la chaîne peuvent être utilisés pour d'autres analyses en parallèle (ex. datation, PSD)
- Le système de traitement de l'impulsion fournit un signal numérique

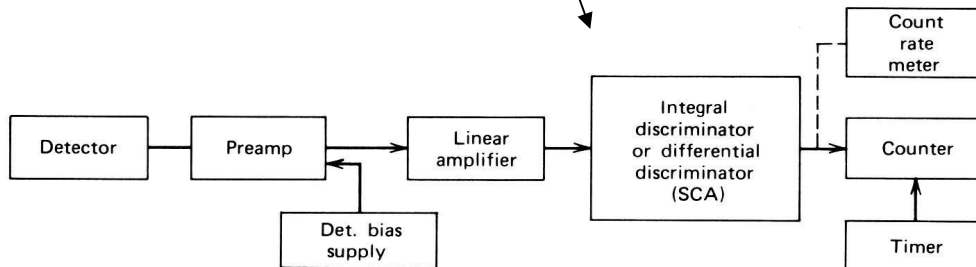
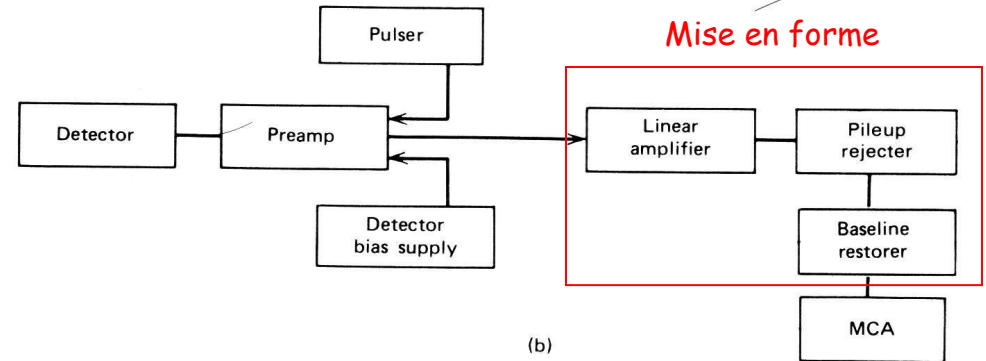
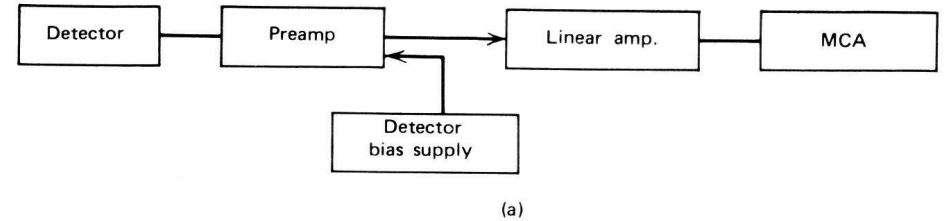
• Le préamplificateur

Localisé au plus près du détecteur (pour éviter les capacités parasites du câblage), il sert surtout pour l'adaptation d'impédance. La constante de temps est de l'ordre de 50 - 100 μ s.



• Exemples de chaînes

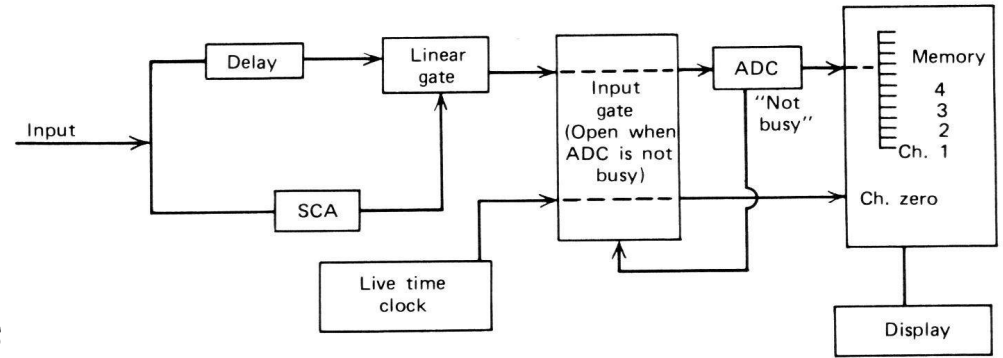
- pour la spectroscopie
- pour la spectroscopie fine
- pour le comptage



2 - L'analyseur multi-canaux

A - Description générale

L'analyseur multi-canaux (MCA) convertit l'amplitude des impulsions en valeur numérique appelée **numéro de canal**. Si la réponse du MCA est linéaire alors la valeur du numéro de canal (C) est proportionnelle à l'énergie déposée dans le détecteur : $E = a C + b$
Le MCA compte pour chaque canal, le nombre d'impulsions détectées \Rightarrow spectre

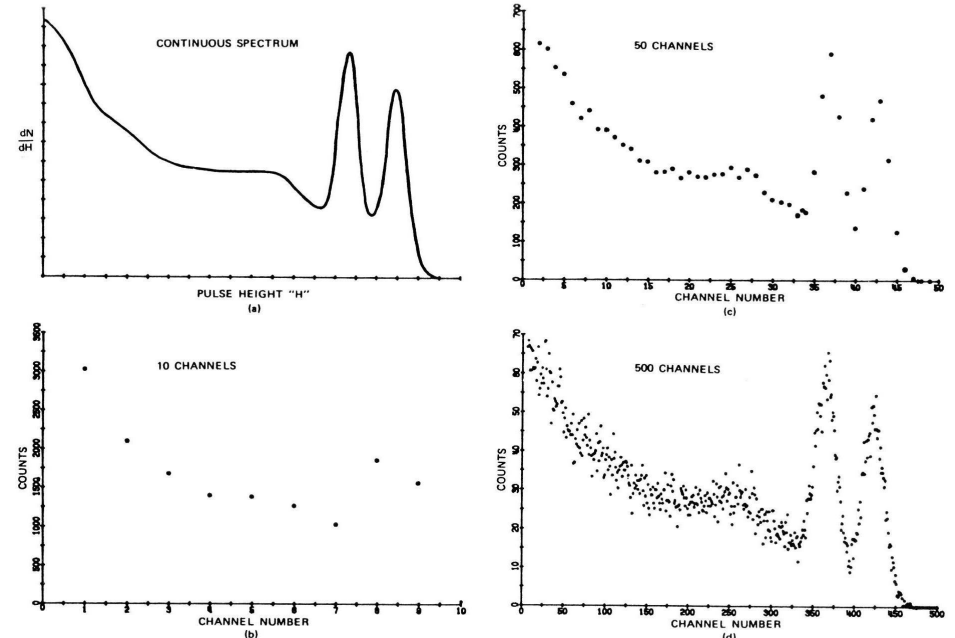


B - Réglage

Il faut régler le gain de l'amplificateur de la chaîne pour couvrir la plage de mesure souhaitée. Le nombre de canaux à utiliser ne doit être :

- trop petit \Rightarrow perte de résolution
- trop grand \Rightarrow pas assez de coups par canal

Il dépend donc de la résolution du détecteur



VI - Mesures

1 - Le bruit de fond

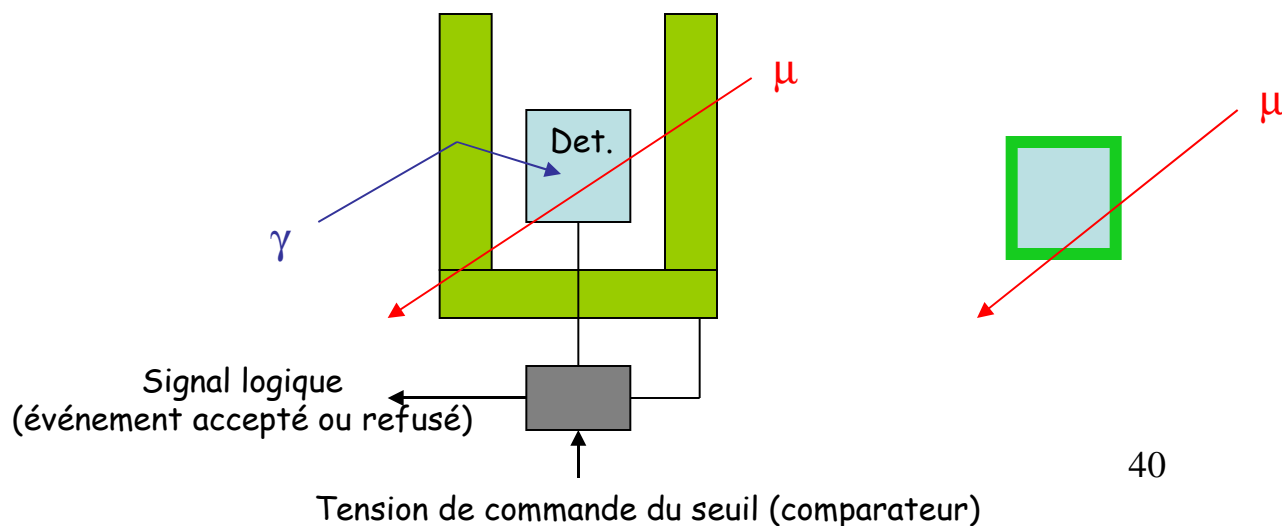
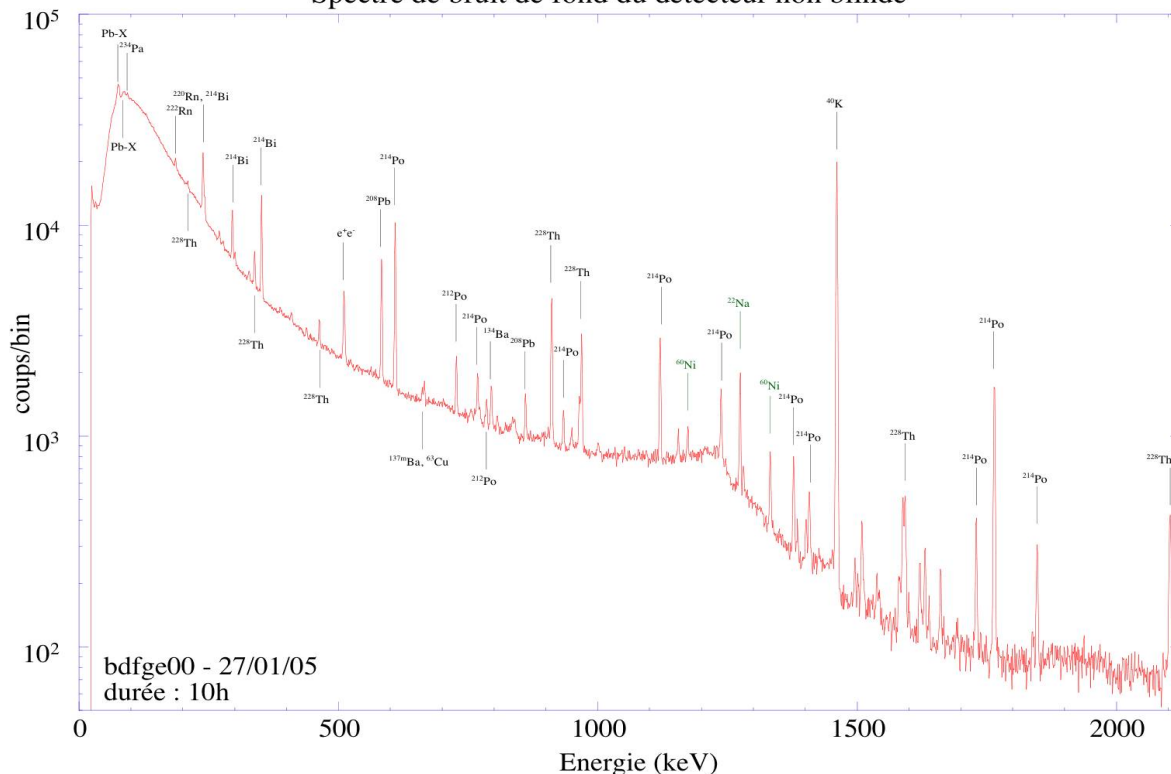
A - Origine :

- radioactivité naturelle
 - 4 familles (^{232}Th , ^{235}U , ^{238}U , ^{237}Np)
 - autres (^{40}K , ^{14}C , ...)
 - Radon, sous forme de gaz
- rayonnement cosmique
 - muons atmosphériques
 - neutrons secondaires (activation)
 - varie avec l'altitude et la latitude
 - protons (activation dans l'espace)
- radioactivité industrielle et militaire

B - Réduction du bruit de fond

- blindage passif : ex. puit de plomb
- blindage actif (anticoïncidence) :
 - puit de scintillateur inorganique
 - scintillateur plastique
- mesures sous terre

Spectre de bruit de fond du détecteur non blindé



2 - La statistique de comptage

- Incertitude sur un nombre d'événements

Un nombre d'événements détectés N suit une statistique de Poisson avec une valeur moyenne N et un écart-type : $\sigma = \sqrt{N}$

=> Erreur sur le taux de comptage $R = N/T$:

$$\sigma_R = (\sqrt{N})/T$$

=> Erreur relative : $\sigma_R/R = 1/\sqrt{N} = 1/\sqrt{R T}$

- Combinaison des erreurs

$$u = u(x, y, z, \dots) \text{ avec } x \pm \sigma_x, y \pm \sigma_y, z \pm \sigma_z, \dots$$

$$\sigma_u^2 = (du/dx)^2 \sigma_x^2 + (du/dy)^2 \sigma_y^2 + (du/dz)^2 \sigma_z^2 + \dots$$

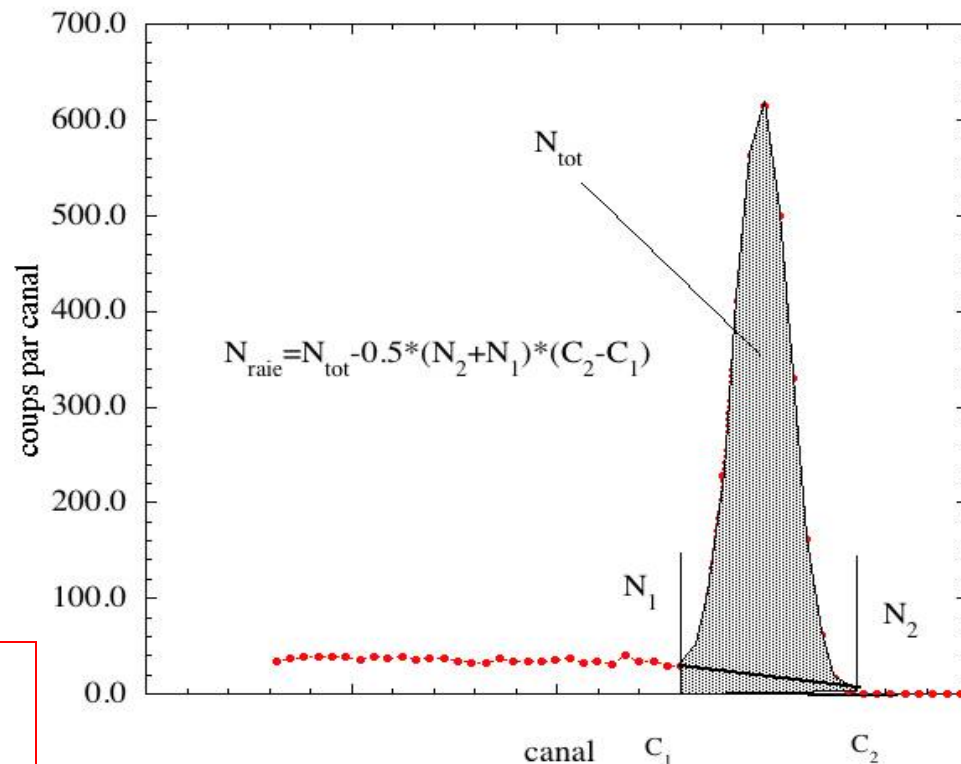
Exemple : mesure du nombre de coups dans une raie spectrale : $\sigma_{\text{raie}} = \sqrt{[N_{\text{tot}} + (N_1 + N_2) (C_1 - C_2)^2/4]}$

- Sensibilité et niveau de confiance d'une détection

- Niveau de confiance d'une mesure u (ex. flux), appelé « nombre de sigma » : $n_\sigma = u/\sigma_u$

=> détection probable à $\approx 99.7\%$ si $n_\sigma = 3$.

- Sensibilité à n_σ : flux ou taux de comptage minimum mesurable à n_σ par un détecteur pendant une durée de mesure donnée et compte tenu du taux de comptage du bruit de fond.

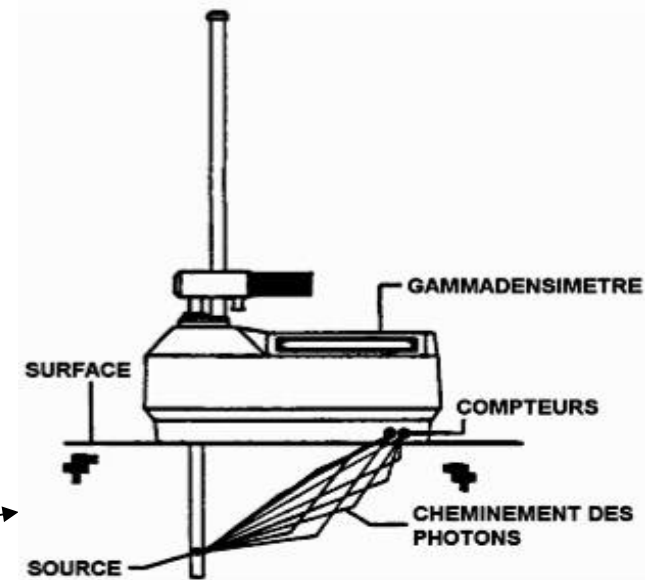


VII - Applications

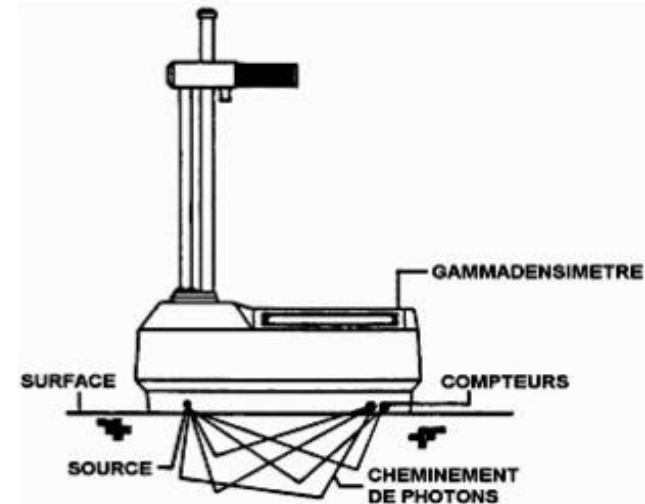
1 - Mesures de flux

• Mesures

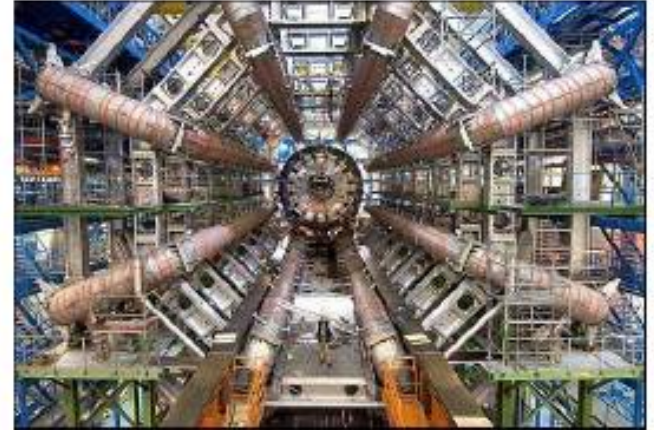
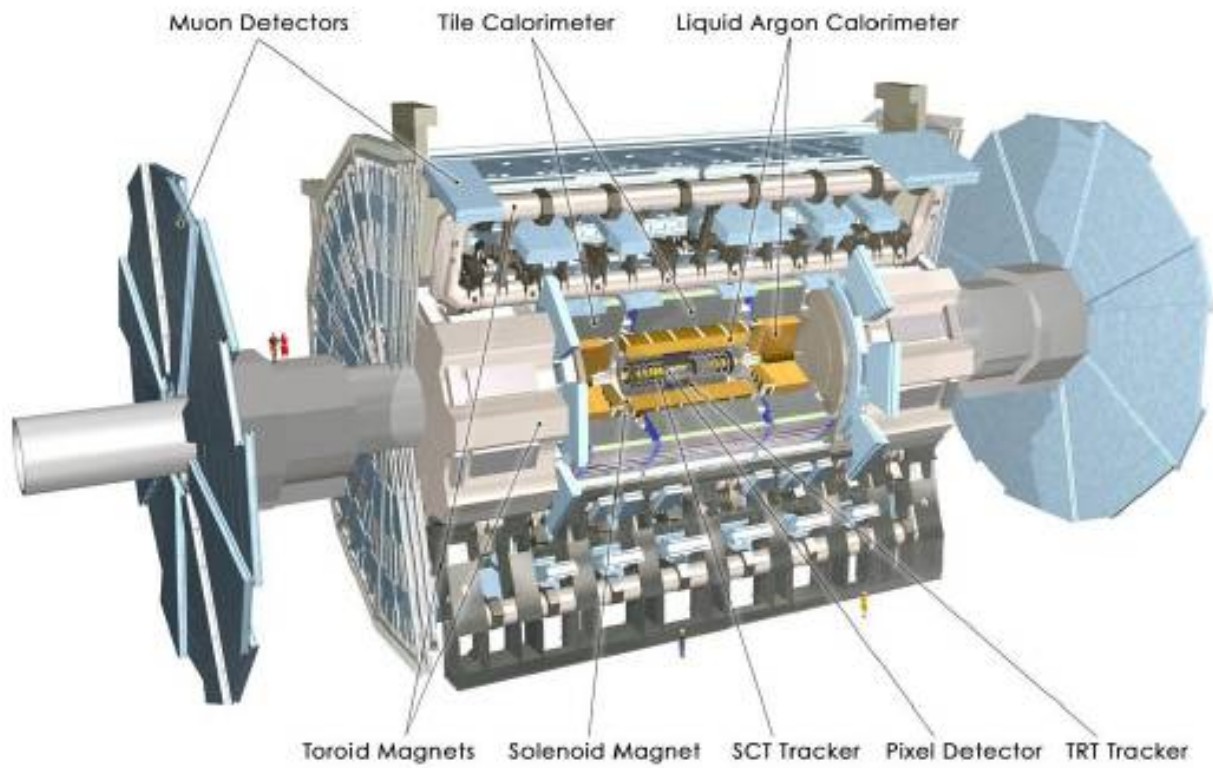
- spectroscopie gamma : identification d'isotopes
 - contrôle de taux de particules : radioprotection, réacteur à fission, accélérateurs...
 - jauge à radio-isotope : mesure de niveau d'un liquide ou d'un matériau, contrôle d'épaisseur, d'homogénéité, de densité d'un matériau
 - détecteurs d'incendie, dosage de grisou (détecteurs à ionisation).
 - traceurs : détection de fuites de liquide ou de gaz dans les canalisations enterrées ou inaccessibles, étude des parcours souterrains de l'eau ou des polluants, mouvement des sables et des vases.
 - mesure de la teneur en Pb d'une peinture (fluorescence X).
 - recherche fondamentale : caractérisation des noyaux
-
- Utilisation de sources radioactives et de rayonnements ionisants :
 - étalonnage de détecteurs
 - domaine agro-alimentaire : arrêt de la germination, destruction des parasites et des micro-organismes par irradiation (électron, X, γ).
 - domaine médical : stérilisation de matériaux, neutron-thérapie, radiothérapie
 - domaine industriel : élaboration de matériaux plus résistants et plus légers.



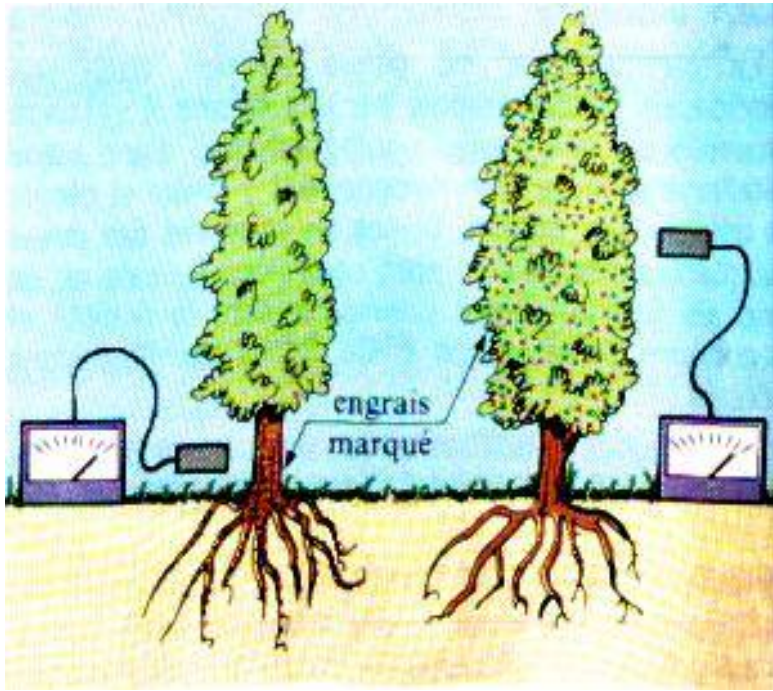
TRANSMISSION DIRECTE



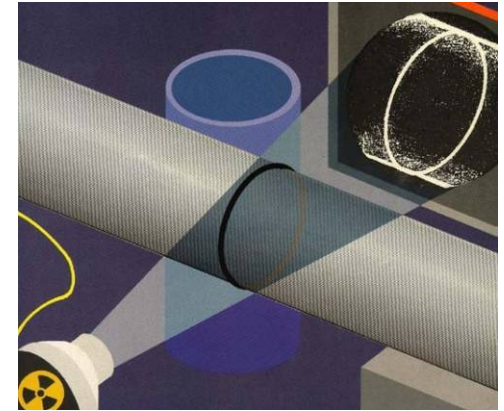
RETRO-DIFFUSION



Instrument ATLAS pour le LHC



Traceurs pour l'étude des plantes



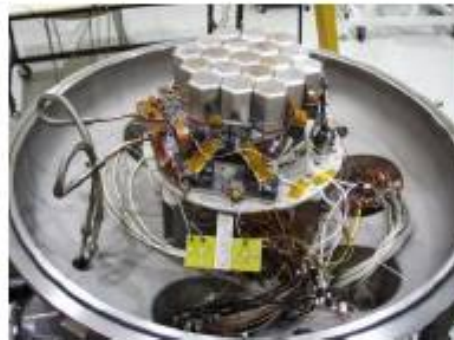
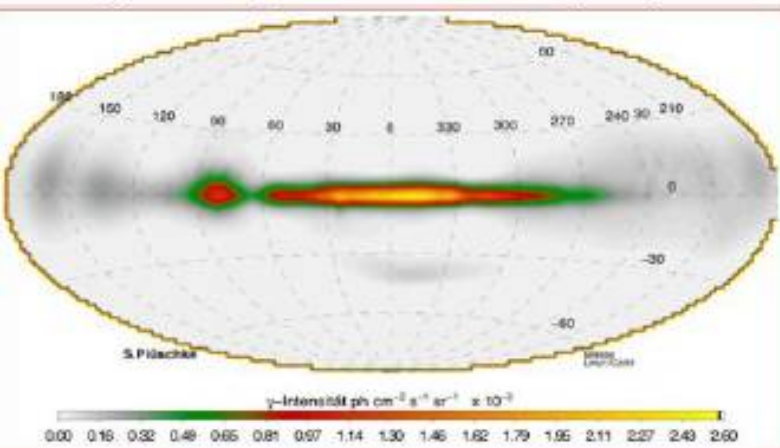
Vérification de soudures

2 - Imagerie X et γ

- imagerie médicale : tomographie par positrons (scintigraphie), radiologie,...
- radiographie industrielle X ou γ (gammagraphie) : contrôle non destructif, recherche des défauts à l'intérieur des matériaux, vérification des soudures.
- sécurité : ex. contrôle des bagages dans les aéroports
- Recherche fondamentale : ex. astrophysique nucléaire

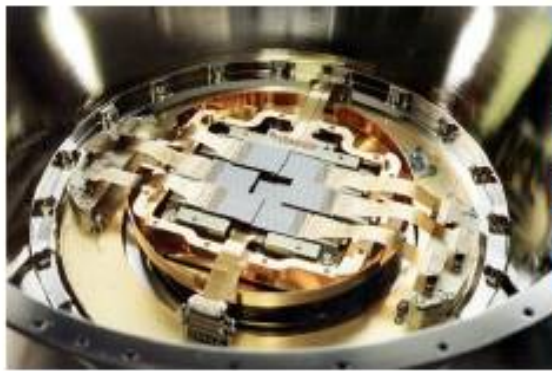


Image de la galaxie à 1.8 MeV (^{26}Al)



Container de source pour la gammagraphie

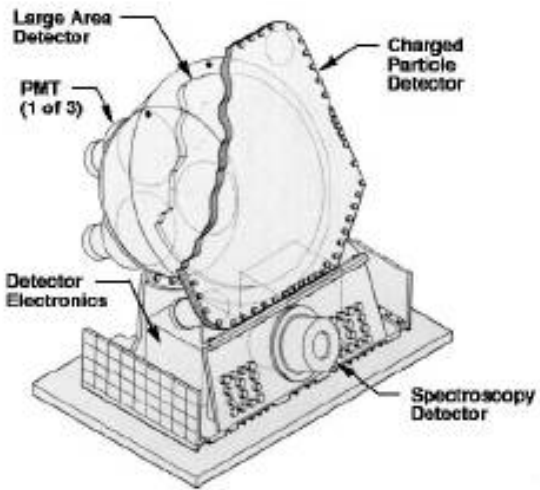
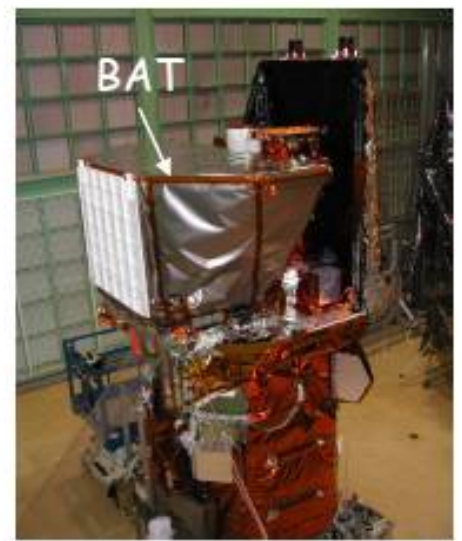
Spectromètre de l'observatoire spatial INTEGRAL



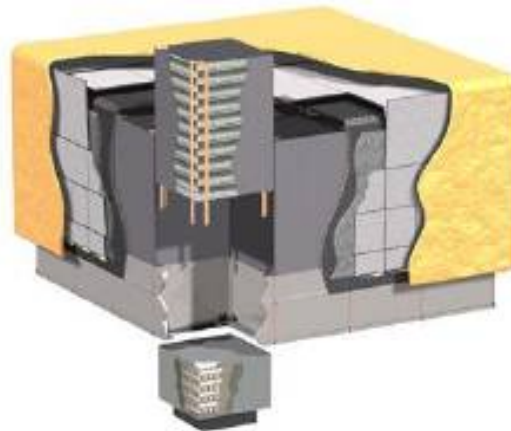
Caméra EPIC-MOS sur XMM-Newton



Module du plan de détection du *Swift*-BAT - Détecteurs de CdZnTe (CZT)



Module de l'expérience BATSE



Instrument LAT sur Fermi



Détecteurs sur RXTE (Compteurs proportionnels)

3 - Notions de radioprotection

- Notions de base :

- Principe ALARA : « As Low As Reasonably Achievable », aussi basse que raisonnablement possible

ALARA est une ligne de conduite en matière de gestion du personnel travaillant sous rayonnements ionisants : il s'agit de réduire la dose individuelle et collective au sein des personnels des entreprises qui utilisent des sources de rayonnements ionisants.

- > informer les travailleurs/les usagers de la présence de sources radioactives

- > réduire l'exposition des travailleurs/des usagers (éloignement, blindage)

- > organiser des consignes de sécurité (en relation avec l'ACMO et la direction de l'entreprise).

- Décret du 31/03/2003, Arrêté du 26 octobre 2005

- Dans les cas suivants : présence, manipulation, utilisation ou stockage de toute source radioactive ou d'un générateur électrique de rayonnements ionisants, le chef d'établissement désigne au moins une personne compétente en radioprotection (PCR) laquelle doit avoir suivi préalablement avec succès, une formation à la radioprotection dispensée par des personnes certifiées (ex. APAVE).

- La manipulation d'appareils de radiographie ou de radioscopie industrielle ne peut être confiée qu'à des personnes titulaires de Certificat d'Aptitude à Manipuler les Appareils de Radioscopie Industrielle et de Radiographie industrielle (CAMARI).

- Contrôles périodiques des installations qui utilisent des sources radioactives ou des générateurs de rayons X par un organisme accrédité (ex. APAVE).