

Partie III:  
Détection des rayonnements  
ionisants

# Chapitre 7:

## Propriétés générales des détecteurs

# Contenu

- Principes de base de la détection
- Modèle simplifié de détecteur
- Modes de fonctionnement
- Spectrométrie des rayonnements
- Efficacité de détection
- Temps mort

# Définition d'un détecteur

- Un détecteur est un instrument qui mesure une des grandeurs qui caractérisent une particule
- Pour ce cours → on considérera les particules qui proviennent directement ou indirectement de phénomènes nucléaires → le domaine des énergies considérées est limité
- La détection d'une particule est un phénomène complexe → les questions qu'il faut se poser sont →
  - Une particule est-elle présente?
  - Quelle est son énergie, sa quantité de mouvement?
  - Dans quelle direction est-elle émise?
  - Quelles est sa nature?
  - Quelles sont sa masse, sa charge, son spin, . . .
  - ...?



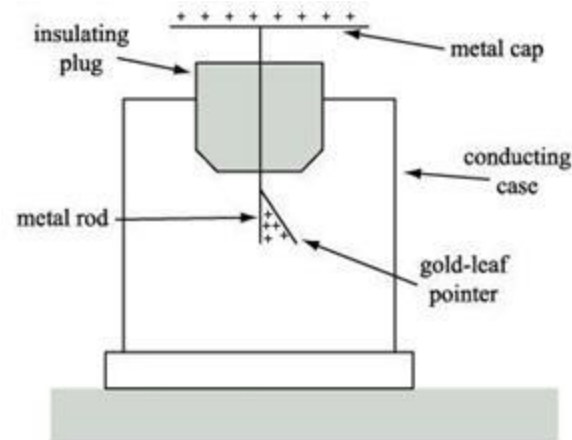
Il n'existe pas de détecteur « universel » qui peut répondre à toutes ses questions

# Types de mesures

- Détecteur pour des mesures immédiates de dose → débit de dose → **moniteur** → appelé « dosimètre » (ex: chambre d'ionisation)
- Détecteur pour des mesures de dose intégrées sur une période → **dosimètre** → appelé « dosimètre intégrateur » (ex: films, thermoluminescents,...)
- Détecteur pour l'identification des particules incidentes → **spectromètre**

# Historique: électroscope

Tous les détecteurs sont basés sur un principe fondamental unique → le transfert d'une partie (ou de la totalité) de l'énergie de la particule incidente au détecteur où elle est convertie en une autre forme qui peut être appréhendée




La tige métallique de l'électroscope est chargée (supposons des charges +) → la feuille d'or s'écarte de sa position d'équilibre à cause de la force répulsive entre les charges + sur la tige et la feuille → si l'air dans l'enceinte est ionisé par un rayonnement → la feuille revient progressivement à sa position d'équilibre à cause de la production de paires de charges positive et négative dans l'enceinte → les charges négatives sont attirées la tige et la feuille → moins de charges positives sur celles-ci → déviation angulaire plus faible de la feuille

## Détection de $N_i$

Un électroscope est donc sensible à la quantité totale  $N_i$  de charges négative et positive  $Q$  produites dans l'enceinte →

$$N_i = \frac{E_{abs}}{W}$$



Les détecteurs modernes sont basés sur le même principe → la mesure directe ou indirecte du nombre d'ionisations produites par le rayonnement à l'intérieur d'un matériau non-conducteur via la formation d'une impulsion électrique



### Importance de $W$ !

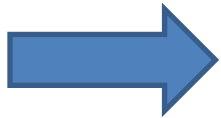
---

Gas:	30 eV for one electron-ion pair
Scintillator:	between 20 and 500 eV for one photoelectron
semiconductor	between 3 and 10 eV for one electron-ion pair

---

# Méthodes de détection

Toutes les méthodes de détection sont basées sur la détection des particules chargées (mesure directe) → les particules neutres doivent d'abord interagir et produire des particules chargées avant de pouvoir être détectées (mesure indirecte)



3 principales méthodes de détection →

- Détecteurs à gaz
- Détecteurs à semiconducteur
- Scintillateurs

D'autres méthodes existent mais moins fréquentes



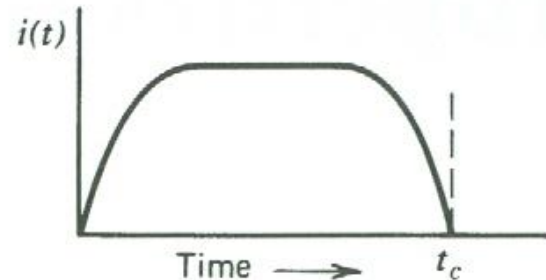
# Modèle simplifié de détecteur (1)

- Considérons un détecteur hypothétique soumis à l'interaction d'une particule chargée ou non dans son volume actif via l'un des mécanismes discutés dans la partie II
- Le temps d'interaction est court  $\rightarrow$  l'énergie est déposée **instantanément**
- On a donc apparition d'une charge électrique  $Q$  dans le volume actif du détecteur au temps  $t = 0$
- Cette charge est collectée et forme le signal électrique de base
- La collection de la charge se fait via l'imposition d'un champ électrique  $\rightarrow$  migration des charges + and - dans des directions opposées

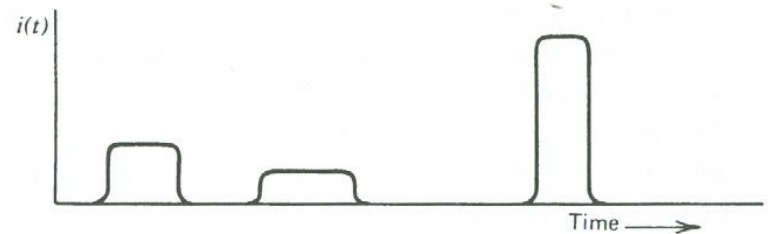
## Modèle simplifié de détecteur (2)

- Le temps nécessaire au détecteur pour collecter complètement la charge (temps de collection de charge:  $t_c$ ) dépend du type de détecteur ( $1 \text{ ns} < t_c < 100 \mu\text{s}$ )  $\leftrightarrow$  mobilité des charges, distance parcourue,...
- Réponse du détecteur  $\rightarrow$

$$\int_0^{t_c} i(t) dt = Q$$



- L'amplitude et la durée de chaque impulsion de courant dépend du type d'interaction



## Modèle simplifié de détecteur (3)

- La probabilité d'observer les rayonnements est soumise à la statistique de Poisson → le temps entre 2 impulsions est gouverné par la distribution d'Erlang
- Si deux impulsions individuelles déposent leur énergie en même temps dans le volume actif du détecteur → le courant mesuré sera la somme des courants des 2 particules → on ne distingue plus les particules
- On supposera toujours que  $a$ , le nombre moyen de désintégrations par unité de temps est suffisamment « faible » pour que chaque particule individuelle donne lieu à une impulsion individuelle

# Modes de fonctionnement

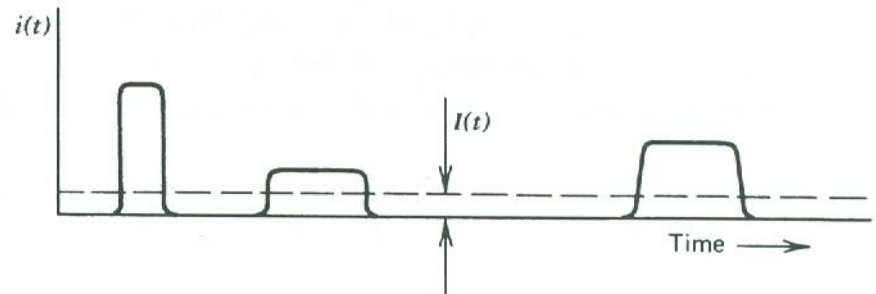
3 modes de fonctionnement →

- Le mode courant mode: utilisé quand le taux d'événements est très élevé et que les impulsions se superposent
- Le mode fluctuation (« Mean square voltage mode » - MSV): utilisé quand les charges sont produites par 2 types de rayonnements différents que l'on veut différencier
- Le mode impulsion: utilisé le plus souvent

## Mode courant

Un appareillage permettant la mesure du courant ( pico-ampèremètre) est connecté au détecteur →

$$I(t) = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t i(t') dt'$$

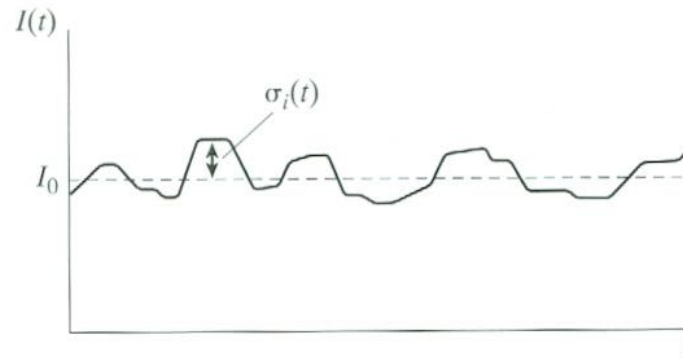


avec  $T$  la résolution temporelle de l'appareil de mesure, long comparé au temps moyen entre 2 impulsions → on obtient un courant moyen  $I_0$  tel que  $I_0 = rQ$  ( $r$ : taux d'interaction et  $Q$ : charge produite par interaction →  $Q = E_{abs}e/W$ ) →

$$I_0 = r \frac{E_{abs}}{W} e$$

# Mode fluctuation (1)

- Développé par Campbell en 1946 → aussi appelé mode Campbell
- Le courant moyen  $I_0$  est bloqué et on mesure uniquement les fluctuations de courant  $\sigma_i(t)$  →



- La variance est donnée par →

$$\overline{\sigma_I^2(t)} = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t [I(t') - I_0]^2 dt' = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t \sigma_i^2(t') dt'$$

## Mode fluctuation (2)

- Statistique de Poisson (avec  $n$ , le nombre d'événements enregistrés pendant un temps  $T$ )  $\rightarrow$  la déviation moyenne du nombre d'événements enregistrés vaut  $\rightarrow$

$$\sigma_n = \sqrt{n} = \sqrt{rT}$$

- Si chaque impulsion correspond à la même charge  $Q \rightarrow$

$$\frac{\overline{\sigma_I(t)}}{I_0} = \frac{\sigma_n}{n} = \frac{1}{\sqrt{rT}}$$

- En utilisant la définition de  $I_0 = rQ \rightarrow$

$$\overline{\sigma_I^2(t)} = \frac{rQ^2}{T}$$

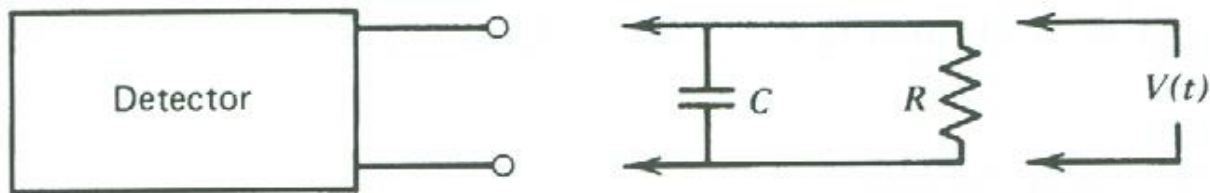
## Mode fluctuation (3)

- En pratique → on bloque le courant moyen → on mesure les fluctuations → on met le résultat au carré → réponse  $\propto$  à  $r$  et à  $Q^2$
- Comme on a une réponse en  $Q^2$  → quand le rayonnement incident est un mélange de rayonnements qui produisent des charges  $Q$  très différentes → on donne plus de poids au rayonnement qui donne la plus grande valeur de  $Q$  → on peut discriminer les rayonnements qui produisent des charges très différentes (exemple: rayonnements mixtes: neutron- $\gamma$ )
- En pratique → très peu utilisé



## Mode impulsion (1)

- Le détecteur est fait pour enregistrer individuellement chaque rayonnement qui interagit dans son volume actif
- La nature d'un signal impulsionnel dépend des caractéristiques d'entrée du circuit auquel le détecteur est connecté (généralement un préamplificateur) →




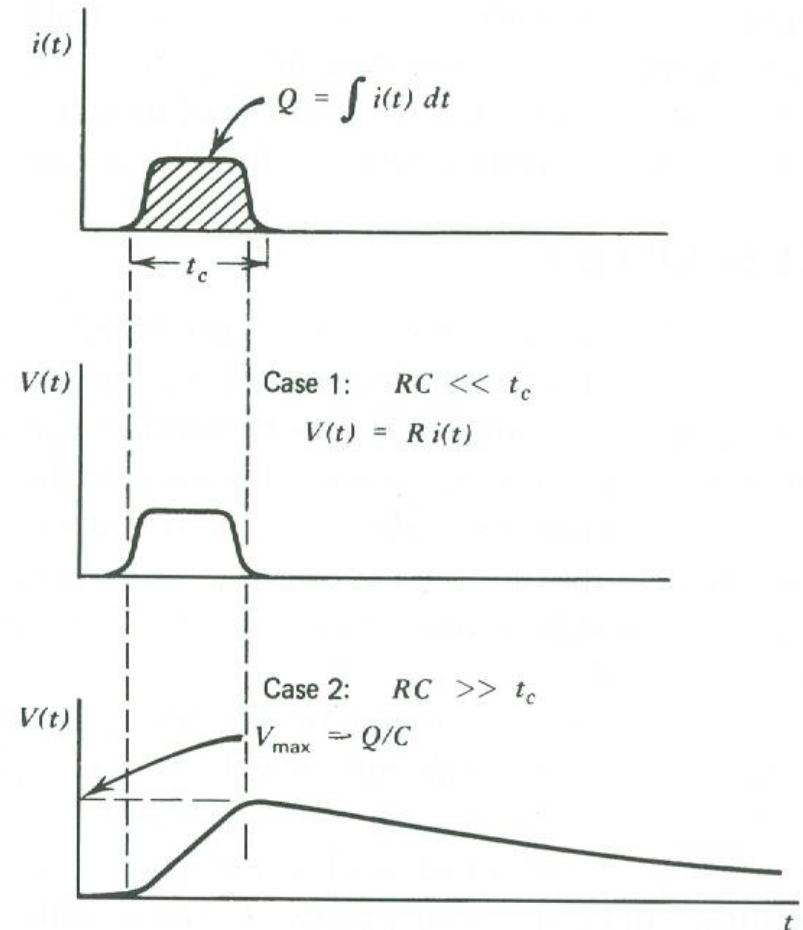
- C: capacité équivalente de l'ensemble détecteur-circuit de mesure
- R: résistance d'entrée du circuit externe
- V(t): tension mesurée (dépendant du temps)

## Mode impulsion (2)

Deux modes de fonctionnement extrêmes en fonction de la constante de temps  $\tau = RC$  du circuit de mesure  $\rightarrow$

1.  $\tau \ll t_c$ :  $V(t)$  a une forme identique à celle du courant du détecteur  $\rightarrow$  utilisé pour des taux de comptage élevés ou quand une information temporelle est plus importante qu'une information énergétique
2.  $\tau \gg t_c$ : l'amplitude du signal  $V_{max}$  est déterminée par  $V_{max} = Q/C$   
 $\rightarrow$  temps de montée  $\leftrightarrow$  détecteur  
 $\rightarrow$  temps de descente  $\leftrightarrow$  circuit externe

 le plus commun



## Mode impulsion (3)

Le mode impulsion est le plus utilisé car

1. La sensibilité du détecteur en mode impulsion est largement meilleure que pour les 2 autres modes → chaque impulsion est détectée individuellement → on distingue facilement une impulsion du bruit ambiant tandis qu'en mode courant le niveau de bruit peut être élevé
2. En mode impulsion → chaque impulsion apporte des informations utiles tandis qu'en mode courant on mesure un courant moyen → perte d'informations

# Spectrométrie des rayonnements

- Mode de fonctionnement → mode impulsion (avec  $\tau \gg t_c$ )
- Grands nombres d'impulsions
- Les impulsions présentent différentes amplitudes car →
  - chaque interaction n'implique pas l'absorption totale de l'énergie de la particule incidente dans le détecteur
  - à cause de la réponse inhérente du détecteur → on n'a pas un signal constant pour une énergie donnée



La distribution des amplitudes des impulsions est une propriété fondamentale du signal de sortie du détecteur et est utilisée pour obtenir des informations sur le rayonnement incident



**Spectrométrie des rayonnements**

# Visualisation des amplitudes d'impulsion

La méthode la plus utilisée est la distribution différentielle des hauteurs d'impulsion

→ L'abscisse est une échelle linéaire des amplitudes d'impulsion (en volts ou en adresses obtenues par conversion analogique-digitale)

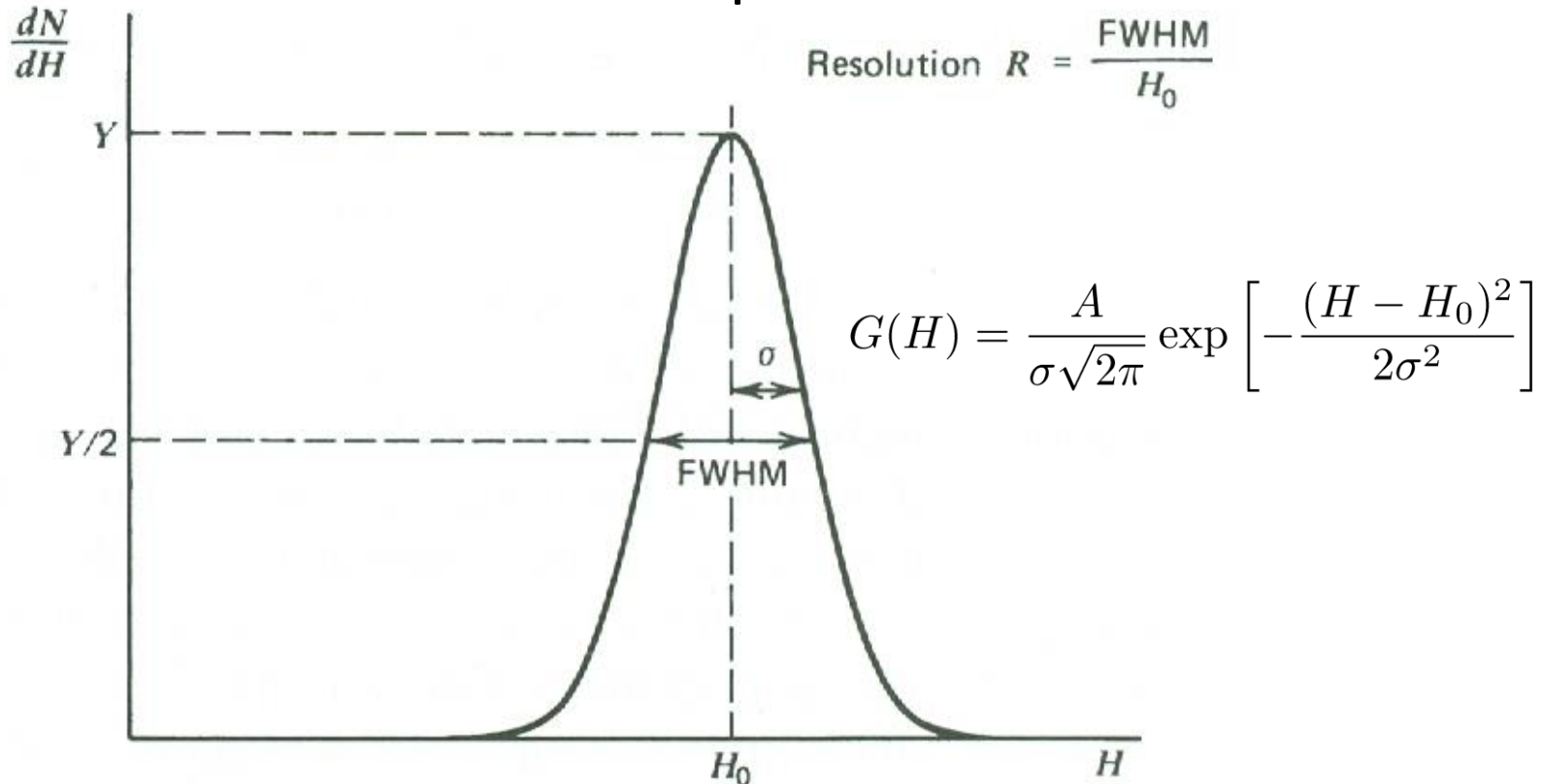
→ L'ordonnée est le nombre différentiel  $dN$  d'impulsions observées avec une amplitude qui correspond à l'incrément différentiel en amplitude  $dH$ , divisé par cet incrément →  $dN/dH$

→ Le nombre d'impulsions pour lesquels l'amplitude se situe entre 2 valeurs spécifiques est obtenue par intégration de la surface entre ces 2 limites

→ Présence de pics ( $H_0$ ) dans la distribution → indication de la détection d'une particule incidente caractérisée par une énergie bien précise

→ Pour la plupart des détecteurs utilisés en pratique → réponse linéaire →  $H_0 = KN_i$

# Exemple de distribution différentielle des hauteurs d'impulsion



La résolution en énergie  $R$  du détecteur est par convention définie comme la largeur à mi-hauteur du pic (« Full Width at Half Maximum » - FWHM) divisée par la position du centroïde du pic  $H_0$  (généralement assimilé à une Gaussienne)

## Résolution du détecteur (1)

- Différent processus sont impliqués → détermination complexe
- Si le nombre d'ionisations suit une distribution de Poisson → la déviation standard du pic  $\sigma(H_0)$  est obtenue par →  $\sigma^2(H_0) = \sigma^2(KN_i) = K^2\sigma^2(N_i) \rightarrow \sigma(H_0) = K(N_i)^{1/2}$
- La résolution  $R$  vaut (rappel:  $\text{FWHM} = 2\sqrt{2 \ln 2} \sigma$ ) →

$$R = \frac{\text{FWHM}}{H_0} = \frac{2.35\sigma}{H_0} = \frac{2.35K\sqrt{N_i}}{KN_i} = \frac{2.35}{\sqrt{N_i}} = 2.35\sqrt{\frac{W}{E_{abs}}}$$

- On observe que la résolution s'améliore (càd  $\searrow$ ) quand  $N_i \nearrow$  ou de manière équivalente quand  $W \searrow$

## Résolution du détecteur (2)

- Si nous nous rappelons que

---

Gas:	30 eV for one electron-ion pair
Scintillator:	between 20 and 500 eV for one photoelectron
semiconductor	between 3 and 10 eV for one electron-ion pair

---

- $R_{\text{semiconducteur}} < R_{\text{gas}} < R_{\text{Scintillator}}$



## Résolution avec le facteur de Fano

- Introduisons le facteur empirique de Fano  $F$  (qui inclut toutes les différences par rapport à la distribution de Poisson)  $\rightarrow \sigma_i^2 = FN_i \rightarrow$

$$R = 2.35 \frac{\sqrt{FN_i}}{N_i} = 2.35 \sqrt{\frac{FW}{E_{abs}}}$$

- Pour beaucoup de détecteurs tels les semiconducteurs ou les gaz  $\rightarrow F < 1$

# Efficacité de détection (1)

- Particules chargées → interaction immédiate avec le détecteur → le détecteur détecte toute particule qui rentre dans son volume actif
- Particules non-chargées → la particule peut entrer dans le volume actif du détecteur et en ressortir sans subir d'interaction → pas de détection
- Nécessité de définir la notion d'efficacité
- On définit 2 classes d'efficacité → efficacité absolue et efficacité intrinsèque

## Efficacité de détection (2)

1. Efficacité absolue (dépend des propriétés du détecteur et de la géométrie de détection) →

$$\epsilon_{abs} = \frac{\text{nombre d'impulsions enregistrées}}{\text{nombre de rayonnements émis par la source}}$$

2. Efficacité intrinsèque (dépend des propriétés du détecteur) →

$$\epsilon_{int} = \frac{\text{nombre d'impulsions enregistrées}}{\text{nombre de rayonnements incidents sur le détecteur}}$$

Pour une source isotrope   $\epsilon_{int} = \epsilon_{abs} (4\pi / \Omega)$

Avec  $\Omega$ , l'angle solide du détecteur vu de la position de la source

## Efficacité de détection (3)

- On peut aussi définir des efficacité en fonction de la nature de l'événement enregistré
- Si on accepte toutes les impulsions du détecteur sans discrimination d'énergie déposée → on parle d'efficacité totale  $\epsilon_{tot}$
- Si on ne considère que les impulsions telles que toute l'énergie est déposée dans le détecteur → on parle d'efficacité du pic  $\epsilon_{peak}$
- Exemple de photons incidents sur le détecteur → spectre constitué d'un palier Compton et d'un pic d'absorption totale →  $\epsilon_{tot}$  correspond à l'ensemble du spectre et  $\epsilon_{peak}$  correspond au pic d'absorption totale
- On définit parfois le rapport pic-sur-total  $r = \epsilon_{peak} / \epsilon_{tot}$

## Efficacité de détection (4)

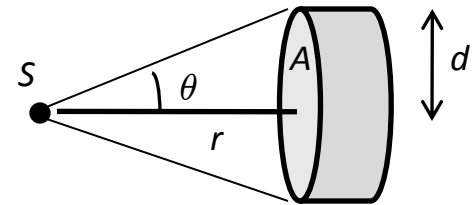
- On peut aussi combiner les 2 types de probabilité → par exemple → l'efficacité qui est le plus souvent tabulée est l'efficacité intrinsèque de pic,  $\epsilon_{ip}$
- Pour une source de photons isotrope et monoénergétique émettant  $S$  rayonnements pendant un temps  $T$  et  $N_p$ , le nombre d'événements correspondant au pic d'absorption totale enregistrés pendant le temps  $T$  →

$$S = N_p \frac{4\pi}{\epsilon_{ip}\Omega}$$

# Angle solide

- L'angle solide est défini par  $\rightarrow$

$$\Omega = \int_A \frac{\cos \theta}{r^2} dA$$



- Pour la source positionné sur l'axe du cylindre représentant le détecteur  $\rightarrow$

$$\Omega = 2\pi \left( 1 - \frac{r}{\sqrt{r^2 + d^2}} \right)$$

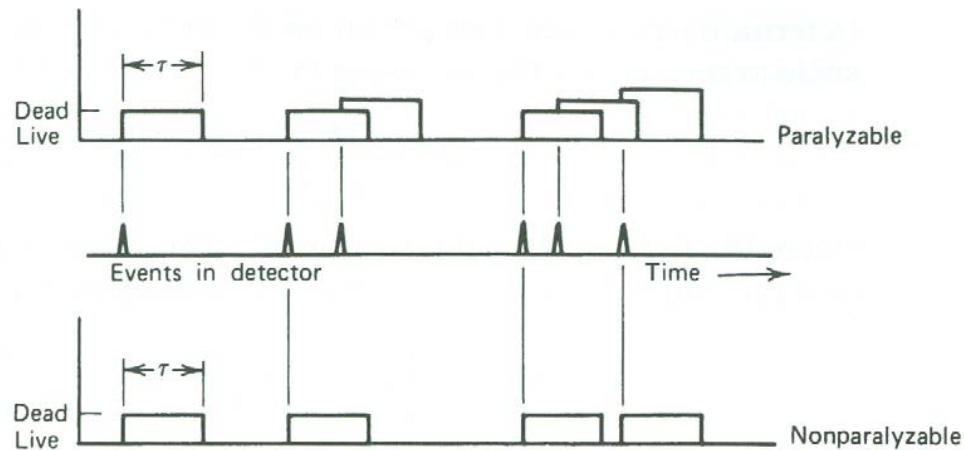
- Pour  $r \gg d \rightarrow$

$$\Omega \simeq \frac{\pi d^2}{r^2}$$

# Temps mort

Temps mort → temps minimum qui doit séparer 2 événements pour être enregistrés comme 2 impulsions séparés → 2 modèles de temps mort →

1. Modèle paralysable (aussi appelé cumulatif)
2. Modèle non-paralysable (aussi appelé non-cumulatif)



Les systèmes réels sont intermédiaires

## Modèle non-paralysable

$n$ : taux d'interaction réel,  $m$ : taux d'interaction enregistré,  $\tau$ : temps mort

non-paralysable  $\rightarrow$  fraction de temps pendant lequel le détecteur est mort =  $m\tau \rightarrow$  taux auquel les événements réels sont perdus =  $nm\tau \rightarrow$  comme le taux de perte se note aussi  $n-m \rightarrow nm\tau = n-m \rightarrow$

$$n = \frac{m}{1 - m\tau} \quad \longleftrightarrow \quad m = \frac{n}{1 + n\tau}$$



## Modèle paralysable

paralysable: les périodes de temps mort n'ont pas une longueur fixe → la distribution des intervalles entre 2 événements →

$$P(t)dt = n \exp(-nt)dt$$

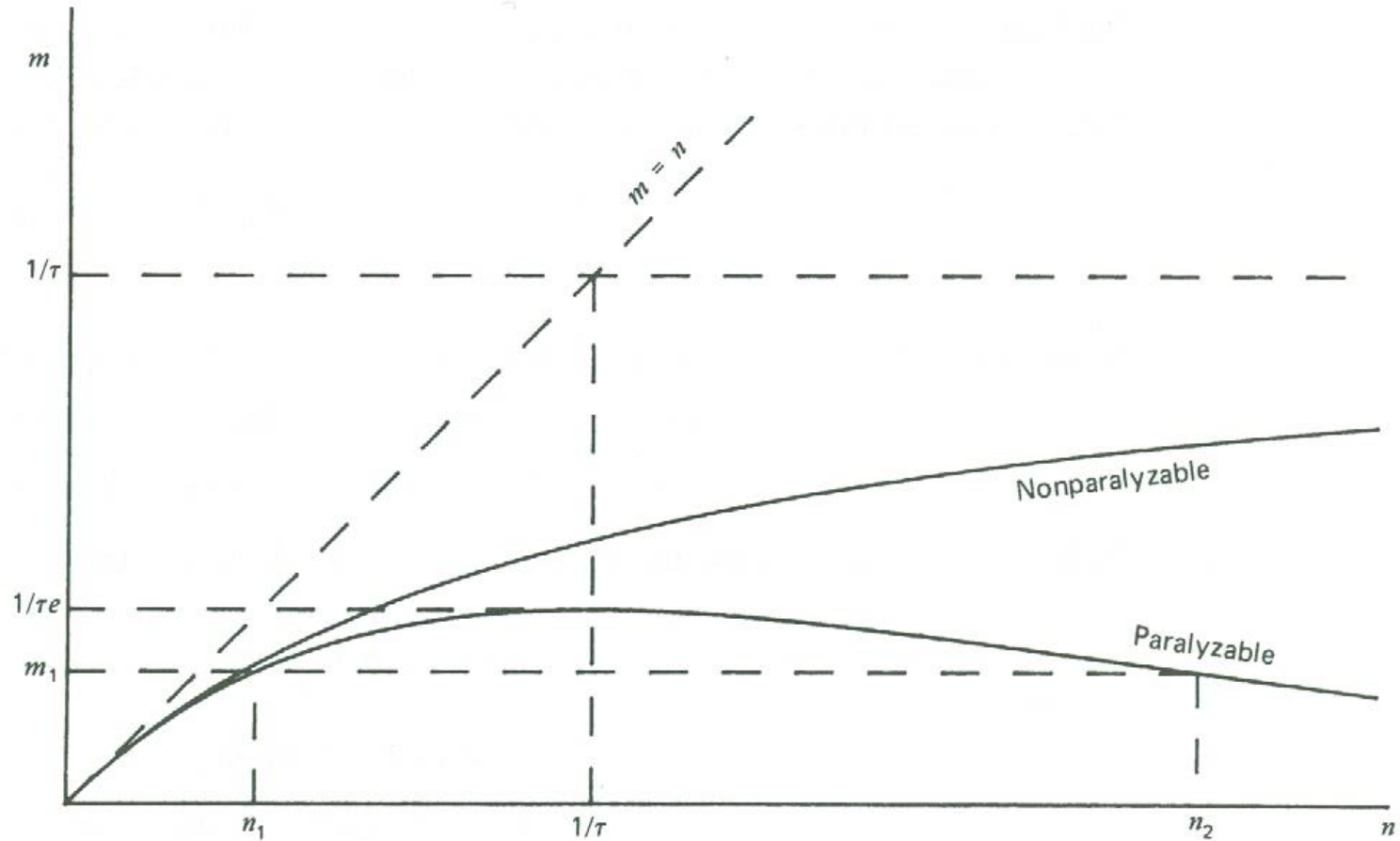
La probabilité que  $t > \tau$  →

$$P(t > \tau) = n \int_{\tau}^{\infty} \exp(-nt)dt = \exp(-n\tau)$$

Le taux d'occurrence de ces intervalles est obtenu en multipliant cette expression par le taux vrai  $n$  pour obtenir

$$m = n \exp(-n\tau)$$

# Variation de $m$ en fonction de $n$



Pour  $n$  faible  $\longrightarrow m \cong n(1 - n\tau)$