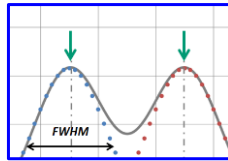


# Introduction à la détection



Jean Peyré

Centre de Sciences Nucléaires et de  
Sciences de la Matière (CSNSM)  
Université Paris Sud -CNRS-IN2P3

91405 Orsay Campus  
Tél. : +33 1 69 15 52 13  
Fax : +33 1 69 15 50 08  
<http://www.csnsm.in2p3.fr>



Jean.Peyre@csnsm.in2p3.fr

Ecole Technique de base des détecteurs  
Oléron 2015

## I

### Un peu d'histoire



Jean Peyré

Ecole Technique de base des détecteurs  
Oléron 2015

## 1895 Rayons de Röntgen (Rayons X)

premier prix Nobel de physique  
1901



Photographie de la main d'Anna Bertha Ludwig Röntgen prise le 22 décembre 1895



Würzburg

23 janvier 1896



Rudolf von Köhler



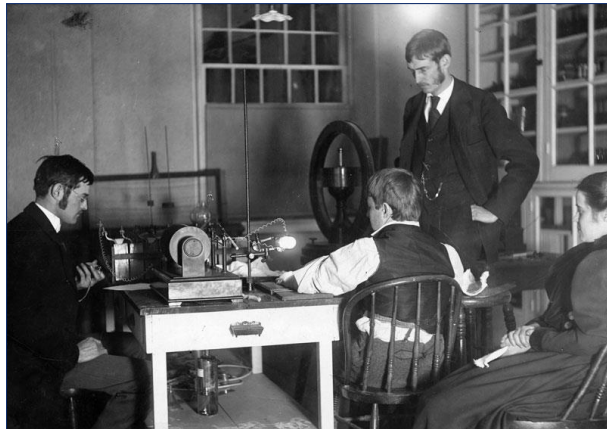
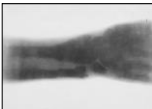
UNIVERSITÉ PARIS SUD

Jean Peyré

Joël Pouthas

Ecole Technique de base des détecteurs  
Oléron 2015

## Utilisation des rayons X



Edwin Frost (physicien) et Gilman Frost (médecin)  
Radiographie de l'avant bras  
Darmouth, USA  
3 février 1896



Rudolf von Köhler



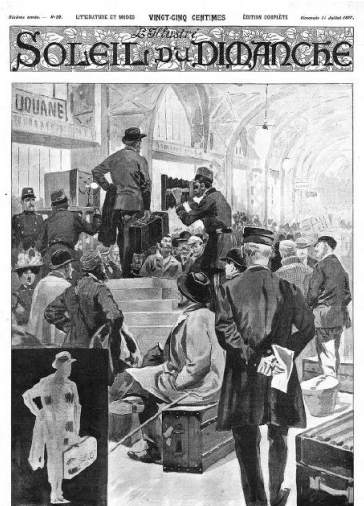
UNIVERSITÉ PARIS SUD

Jean Peyré

Joël Pouthas

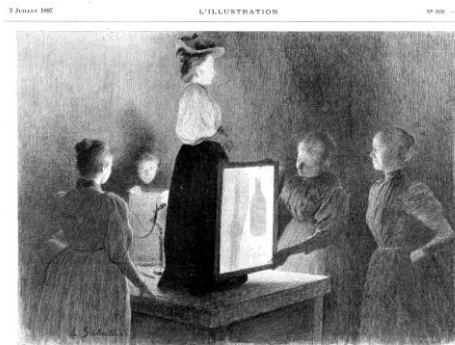
Ecole Technique de base des détecteurs  
Oléron 2015

## Utilisation des rayons X



Vue des voyageurs et des bagages au passage des rayons X, (photographie prise par le service de douanes)

## Douanes



Froufrou douane par les rayons X.

1897 - Gare Saint Lazare



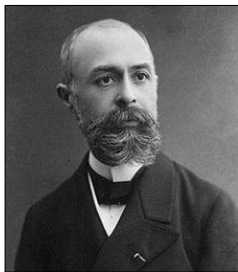
Jean Peyré

Joël Pouthas

Ecole Technique de base des détecteurs  
Oléron 2015

## 1896 - Rayons uraniques de Becquerel

Prix Nobel de physique  
1903

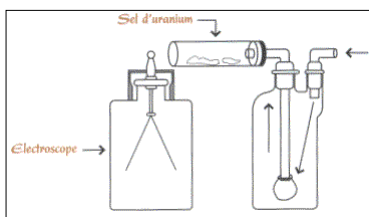


## Découverte De la Radioactivité



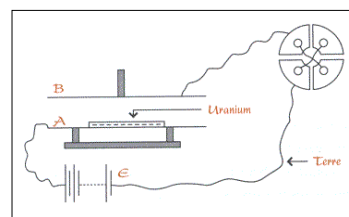
P. Curie

E. Rutherford



Electroscope à feuilles d'or

Décharge de l'électroscope par ionisation de l'air



Electromètre à quadrants



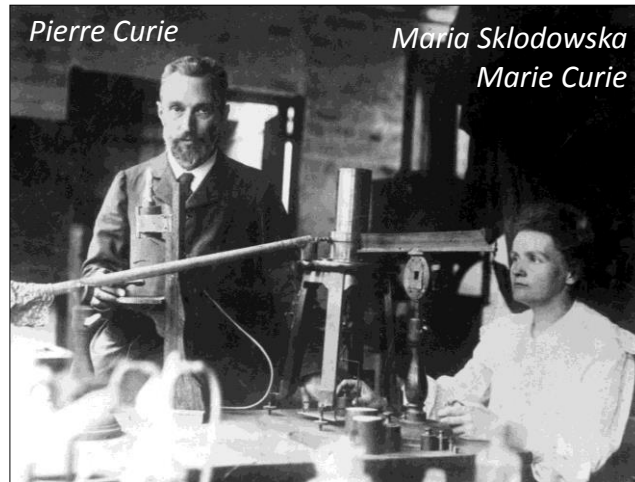
Jean Peyré

Joël Pouthas

Ecole Technique de base des détecteurs  
Oléron 2015

# Radioactivité

Prix Nobel de physique  
1903



Pierre Curie

Maria Skłodowska  
Marie Curie

Polonium

1898

Radium



Jean Peyré

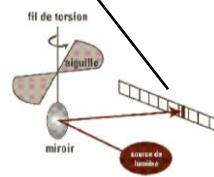
Joël Pouthas

Ecole Technique de base des détecteurs  
Oléron 2015

## Dispositif expérimental de Pierre et Marie Curie



Chambre d'ionisation



Électromètre de Pierre  
Curie



Jean Peyré

Ecole Technique de base des détecteurs  
Oléron 2015

## II

### Unités

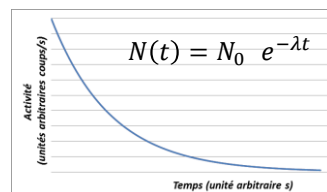
### Unités - Radioactivité

**L'activité d'une source** est définie par son taux de décroissance:

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

$\lambda$ : constante de désintégration.  
 $N$ : nombre de noyaux radioactifs.  
 $t_{1/2}$ : période radioactive.

$$\lambda = \frac{\ln 2}{t_{1/2}}$$



**Unité historique:** Curie (Ci), défini comme  $3,7 \times 10^{10}$  désintégrations / seconde  
1 Curie = activité d'un gramme de  $^{226}\text{Ra}$  pur.

**Depuis 1975:** Becquerel (Bq), défini comme 1 désintégration / seconde

$$1\text{Bq} = 2,703 \times 10^{-11} \text{ Ci}$$

## Unités - Energie

L'unité habituellement utilisée pour la mesure d'énergie est l'électron Volt (eV).

$$1\text{eV} = 1,602 \times 10^{-19} \text{ J}$$

Ou  $1 \text{ fJ} = 10^{-15} \text{ J} = 6241 \text{ eV}$

L'énergie des photons X et  $\gamma$  est reliée à la fréquence  $\nu$ :

$$E = h\nu$$

Constante de Planck:  $h = 6,626 \times 10^{-34} \text{ J.s}$  ou  $4,135 \times 10^{-15} \text{ eV.s}$

Vitesse lumière dans le vide:  $c = 299\,792\,458 \text{ m/s}$

$\lambda$  = longueur d'onde en m

$\nu$  = fréquence en Hz

La longueur d'onde  $\lambda$  est reliée à l'énergie E par:

$$\lambda\nu = c$$



$$E = h\nu = h \frac{c}{\lambda}$$

$$E(\text{eV}) = \frac{1240 \times 10^{-9}}{\lambda(\text{m})}$$

## X, $\gamma$ , visible: tous des photons

La lumière visible est de même nature que les rayons X et  $\gamma$

X, $\gamma$	UV			Visible				IR
	200	300	400	500	600	700	800	Longueur d'onde (nm)
	12	5	4	3		2		Energie photon (eV)



De la lumière verte à 550 nm correspond à une énergie de:

$$E = \frac{1240}{550} = 2,25 \text{ eV}$$

# III

## Principe de détection

## Les catégories de particules

Particules **non**  
chargées

Neutrons

Rayons X &  $\gamma$

Particules  
chargées

Particules  
chargées Lourdes

Electrons rapides

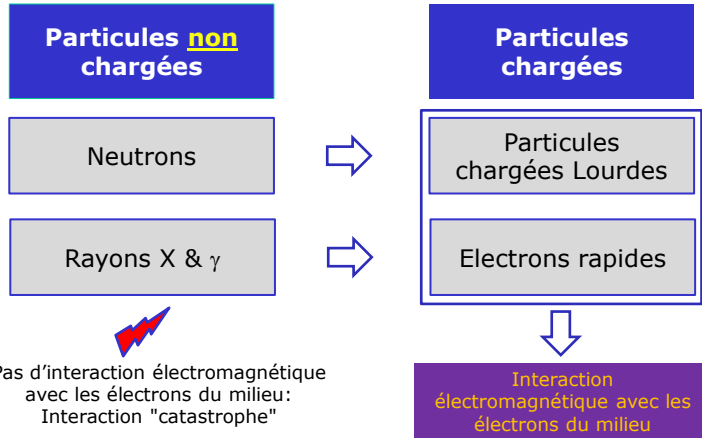
**Neutrons:** issus de transformations diverses du noyau (souvent divisé en 2 catégories: lents & rapides)

**Rayons X &  $\gamma$ :** Rayons X issus du réarrangement du cortège électronique et rayons  $\gamma$  dus aux transitions interne du noyau.

**Particules chargées lourdes:** ions avec une masse supérieure ou égale à 1 unité atomique (protons,  $\alpha$ , produits de fission...).

**Electrons rapides:** particules  $\beta^+$  et  $\beta^-$  et les électrons produits par d'autres processus.

## Interaction des particules avec la matière



1. Mise en **mouvement**, de manière directe ou indirecte, des **électrons** du milieu d'interaction
2. On ne sait **détecter** un rayonnement que s'il met en mouvement les électrons du milieu

## Le phénomène d'ionisation

*Une particule chargée qui pénètre la matière interagit principalement avec les électrons de celle-ci sous l'effet des forces coulombiennes.*

**Mise en mouvement d'électrons**  
*(ionisation ou excitation)*

**Ralentissement de la particule incidente**

**Formule de Bethe**  
*Perte d'énergie dans une épaisseur dx de matière*

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{z^2 m}{E} f(E)$$

*z: charge de la particule  
 m: masse de la particule  
 E: énergie de la particule*

*Courbe obtenue avec SRIM*  
stopping power -> Silicon

*Le phénomène d'ionisation est linéaire.*

- Les signaux issus des détecteurs sont proportionnels au nombre d'électrons d'ionisation: cela permet de mesurer l'énergie de la particule.
- Valeur de  $w$  : gaz: ~30 eV; Silicium : ~3 eV

$$n_0 = \frac{E}{w}$$

*$n_0$ : nombre d'électrons arrachés  
 E: énergie perdue  
 w: énergie pour créer une paire ionisée*



## Le phénomène d'ionisation

### Exemples:

arrêt d'une particule  $\alpha$  de 3 MeV :

**Gaz :**  $n = 3 \cdot 10^6 / 30 \approx 10^5$  paires électrons-ions créées par ionisation

**Silicium :**  $n = 3 \cdot 10^6 / 3 \approx 10^6$  paires électrons-trous créées par ionisation



### Signaux faible amplitude

- $10^5$  électrons  $\rightarrow 1,6 \cdot 10^{-14}$  Coulomb
- Dans une capacité de 1 pF ( $V=Q/C$ )  $\rightarrow 16$  mV



### Fluctuations statistiques du nombre d'électrons créés

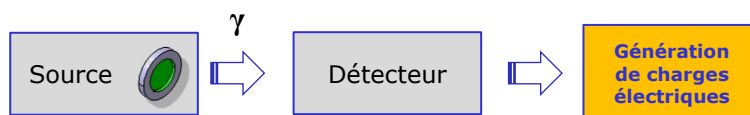
- 2 particules similaires (même nature et même énergie) n'auront pas exactement la même histoire dans le détecteur: le nombre d'électrons d'ionisation va fluctuer.
- Cela conduira à une limite en résolution du détecteur



Jean Peyré

Ecole Technique de base des détecteurs  
Oléron 2015

## Fluctuations statistiques

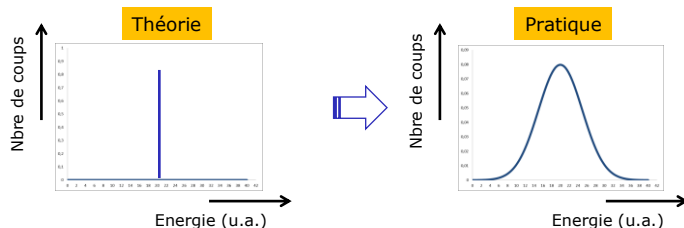


### Un exemple

Détection de  $\gamma$  mono-énergétique

**Emission de  $\gamma$  + interaction rayonnement matière + mise en mouvement d'électrons**

En supposant que toute l'énergie est déposée dans le détecteur:



Jean Peyré

Ecole Technique de base des détecteurs  
Oléron 2015

## 2 familles de détecteurs



*La matière ionisée veut revenir dans un état d'équilibre*

- *On empêche le retour à l'équilibre des paires créées par polarisation du détecteur et on détecte le mouvement des charges:*

→ **détecteurs à ionisation**

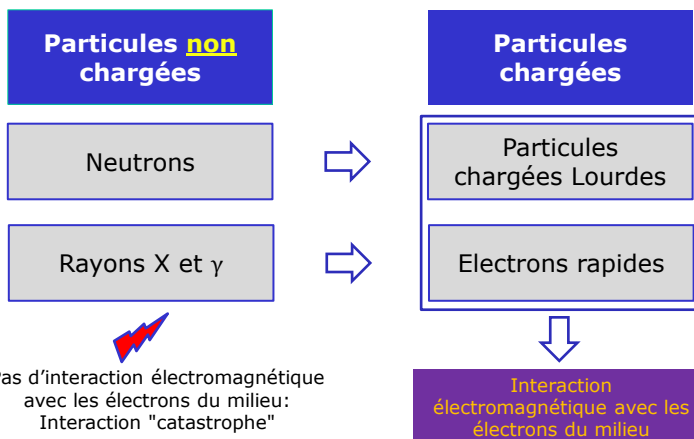
- *On observe la scintillation due au retour à l'équilibre des paires créées:*

→ **détecteurs à scintillation**

## IV

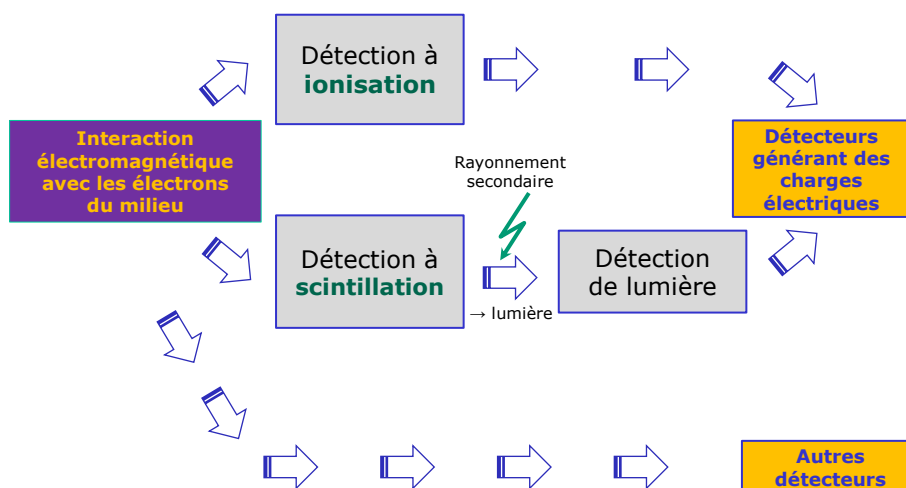
### Les critères de détection

## La base de la détection



1. Mise en **mouvement**, de manière directe ou indirecte, des **électrons** du milieu d'interaction
2. On ne sait **détecter** un rayonnement que s'il met en mouvement les électrons du milieu

## Ionisation & scintillation



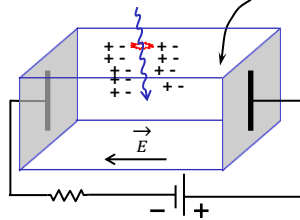
## Fonctionnement de la détection à ionisation

Détection à **ionisation**



Détecteurs **généralant des charges électriques**

Volume de **matière**



### Fonctionnement

- 1-Absorption du rayonnement
- 2-Conversion en charges par ionisation
- 3-Mouvement des charges grâce à la présence d'un champ électrique

### Conséquences

→ Peu de charges doivent être libres dans le matériau & Les charges générées doivent pouvoir se mouvoir

## Critères de la détection à ionisation

→ gaz  
→ semi-conducteur

Détection à **ionisation**



Détecteurs **généralant des charges électriques**

### Fonctionnement

- 1-Absorption du rayonnement  
**Pouvoir d'arrêt adapté à la particule**
- 2-Conversion en charges par ionisation  
**Energie de création de paire**
- 3-Mouvement des charges grâce à la présence d'un champ électrique  
**Polarisation du détecteur - Champ électrique homogène → matériau pur**

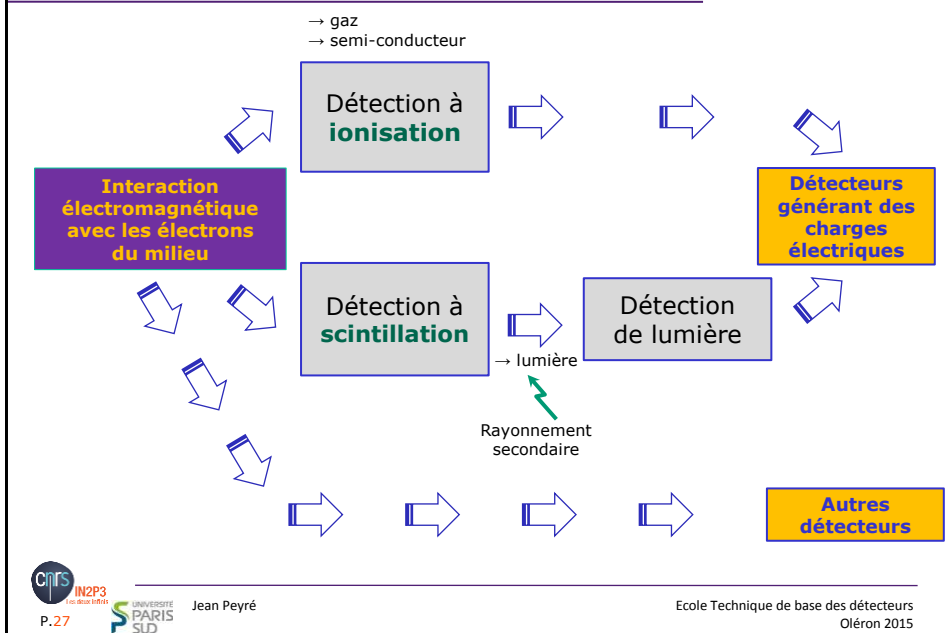
### Conséquences

→ Peu de charges doivent être libres dans le matériau pour ne pas perturber le champ électrique & Les charges générées doivent pouvoir se mouvoir  
**Matériau résistif pur mais non isolant**

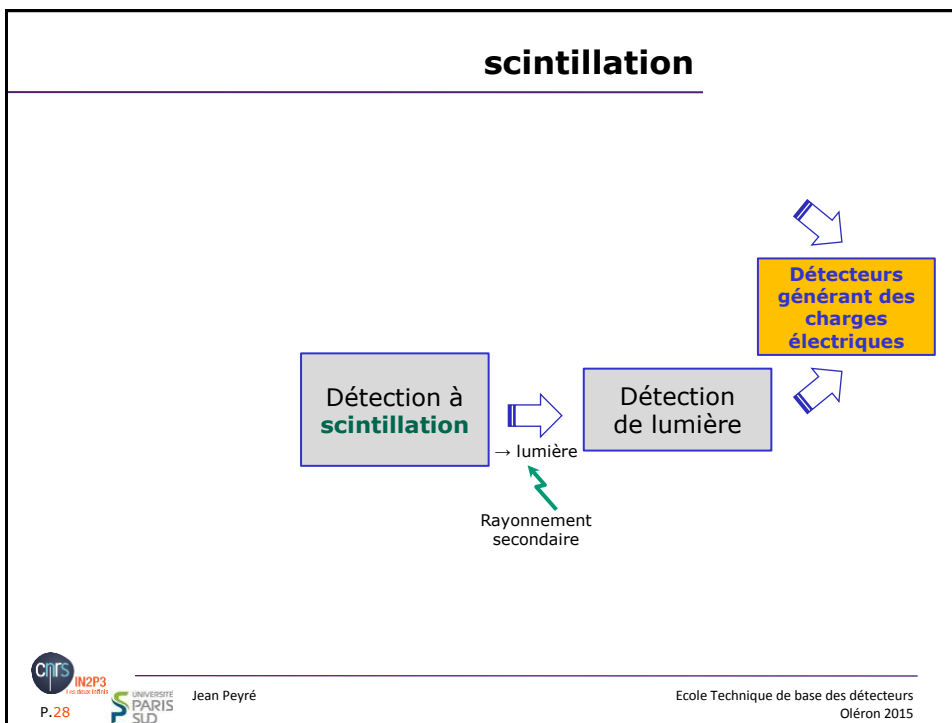
2 familles de candidats

→ **Les gaz et les semi-conducteurs**

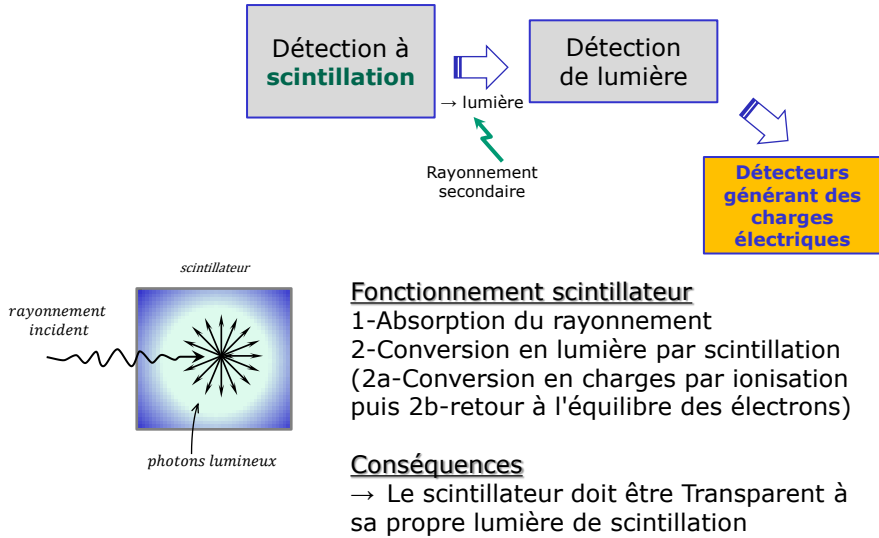
## Ionisation & scintillation



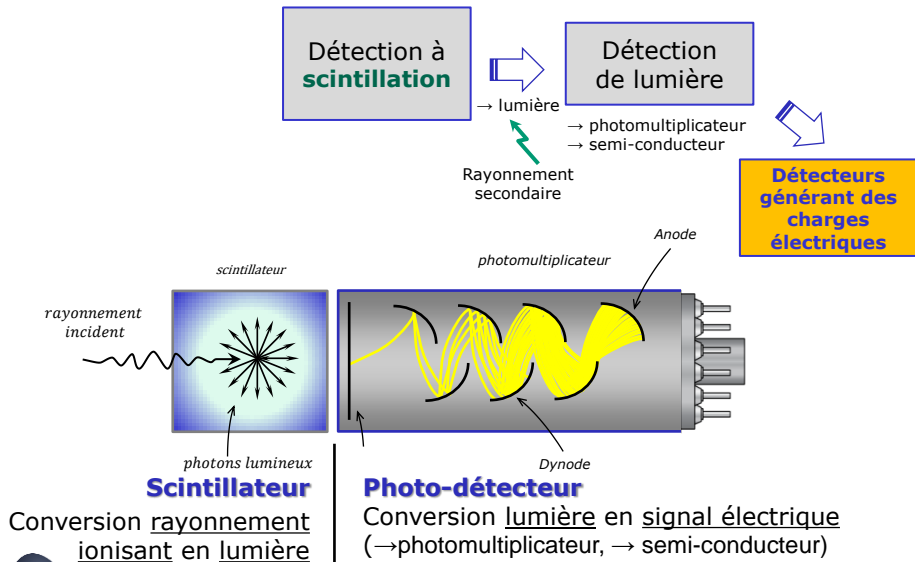
## scintillation



## Fonctionnement de la détection à scintillation



## Fonctionnement de la détection à scintillation



## Critères de la détection à scintillation

**Fonctionnement scintillateur**

- 1-Absorption du rayonnement  
**Pouvoir d'arrêt adapté à la particule**
- 2-Conversion en lumière par scintillation  
**Haut rendement de scintillation**  
**Emission de lumière le plus rapide possible**  
**Quantité de lumière proportionnelle à l'énergie déposée**

**Conséquences**

- Le scintillateur doit être Transparent à sa propre lumière de scintillation

**3 familles de candidats**

**Les scintillateurs organiques et inorganiques ainsi que certains gaz**

CNRS IN2P3 Université PARIS SUD Jean Peyré Ecole Technique de base des détecteurs Oléron 2015

## Critères de la détection à scintillation

**Notes sur la scintillation**

Il y a plusieurs sortes de scintillation

- fluorescence : rapide (ns)
- fluorescence retardée ( $\approx$  quelques centaines de ns)
- phosphorescence : lent (ms)

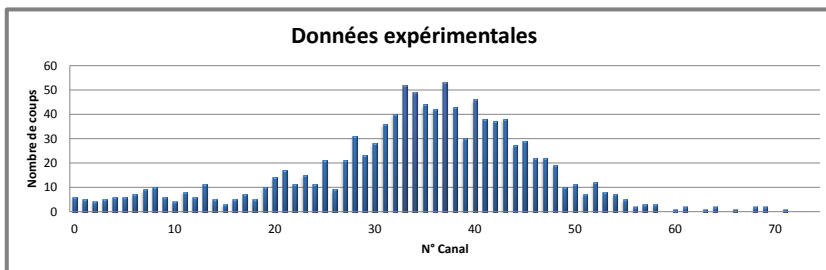
- La proportion de ces mécanismes dépend des particules chargées détectées => **Identification possible**

CNRS IN2P3 Université PARIS SUD Jean Peyré Ecole Technique de base des détecteurs Oléron 2015

# V

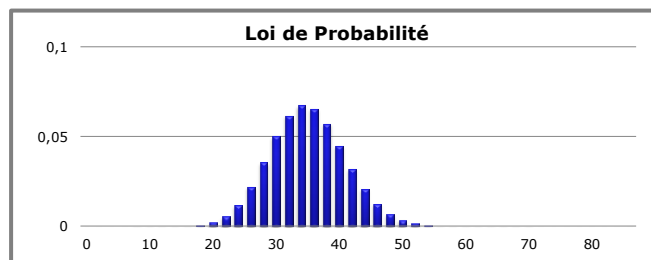
## Fluctuations statistiques

## Probabilités & Statistiques



### Statistiques

### Probabilité Loi parente





## La loi de Gauss ou loi normale

- La loi normale joue un rôle central dans tout le domaine des statistiques et est la distribution omniprésente dans l'ensemble des sciences. Les erreurs de mesure et en particulier les erreurs instrumentales sont généralement décrites par cette distribution de probabilité. De plus, même dans les cas où son application n'est pas strictement justifiée, la loi normale offre une bonne approximation de la distribution réelle.
- La loi normale est une distribution continue, symétrique de densité:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

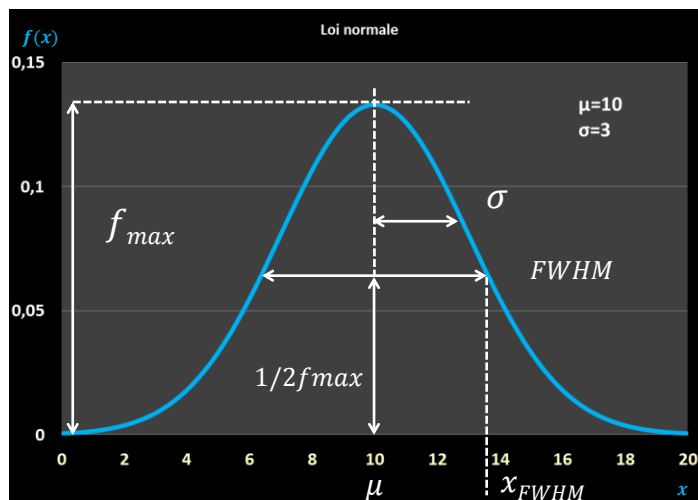
$$E(X) = \mu$$

$$V(X) = \sigma^2$$

- Les 2 paramètres  $\mu$  et  $\sigma^2$  représentent l'espérance et la variance de la distribution
- Largeur à mi hauteur (Full Width at Half Maximum)

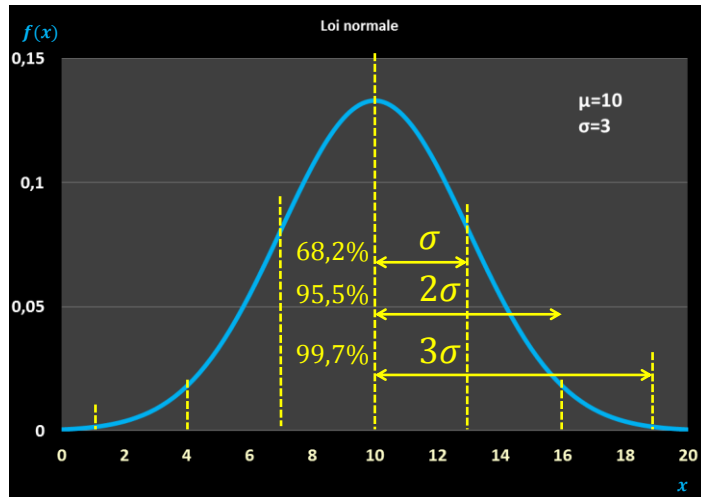
$$FWHM = 2\sigma\sqrt{2\ln 2} = 2,35\sigma$$

## Loi normale: $\mu = 10$ et $\sigma = 3$

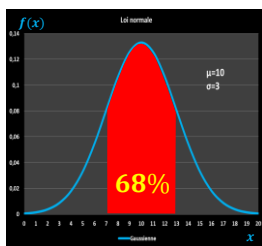


$$FWHM = 2,35\sigma$$

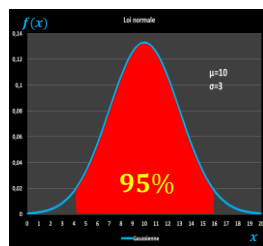
## Loi normale: $\mu = 10$ et $\sigma = 3$



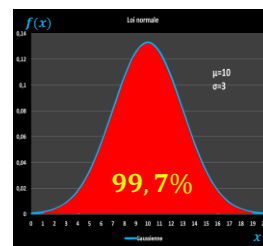
## En dessin ...toujours



$m - \sigma$     $m + \sigma$



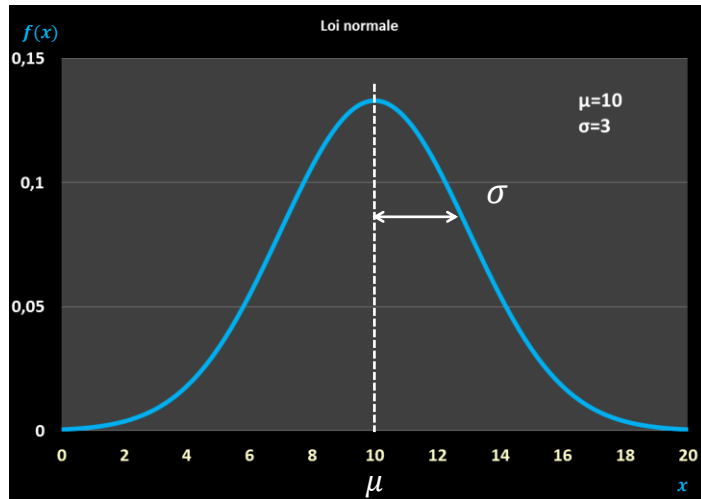
$m - 2\sigma$     $m + 2\sigma$



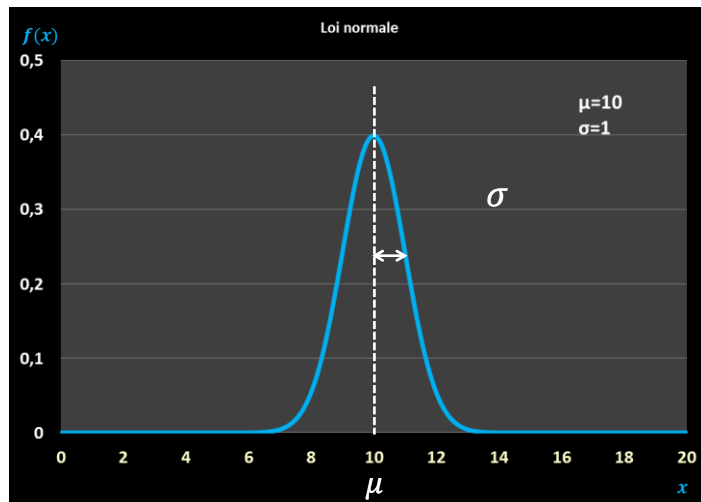
$m - 3\sigma$     $m + 3\sigma$

La loi normale permet de déterminer facilement la probabilité qu'une valeur  $x$  soit dans un intervalle donné en fonction de son écart-type  $\sigma$

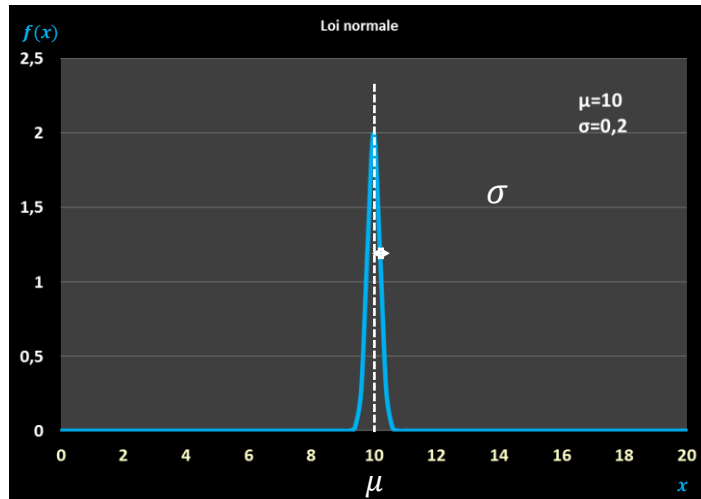
## Loi normale: $\mu = 10$ et $\sigma = 3$



## Loi normale: $\mu = 10$ et $\sigma = 1$

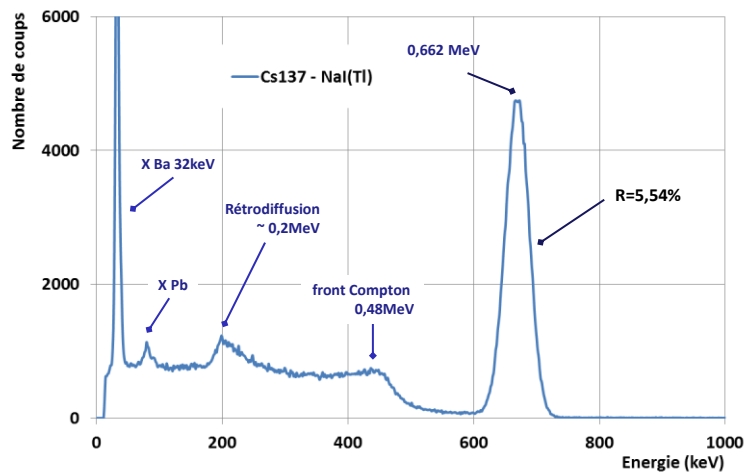


## Loi normale: $\mu = 10$ et $\sigma = 0,2$



## Pic du $^{137}\text{Cs}$ à 662 keV

PMT + Cristal NaI(Tl)



## La loi de Poisson

$$P(X = k) = \frac{\mu^k}{k!} e^{-\mu}$$

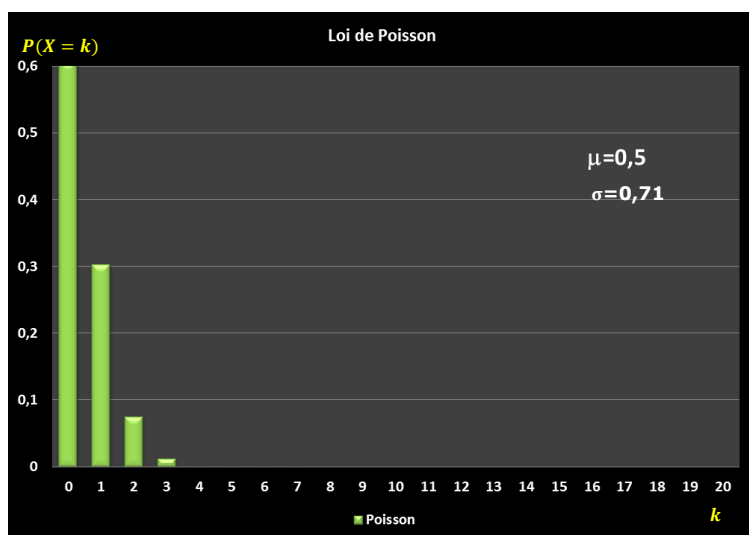
$$E(X) = V(X) = \mu$$

$$V(X) = \sigma^2$$

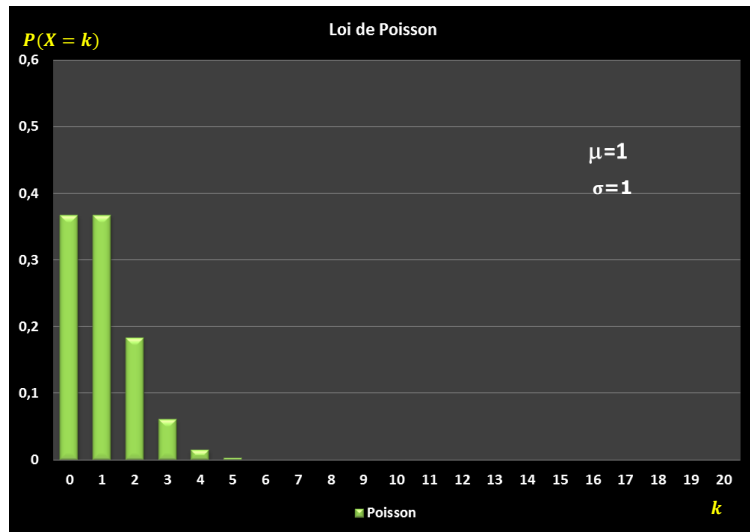
### Remarque

La loi de Poisson a pour paramètre unique  $\mu$  et l'espérance et la variance sont égaux à ce paramètre  $\mu$

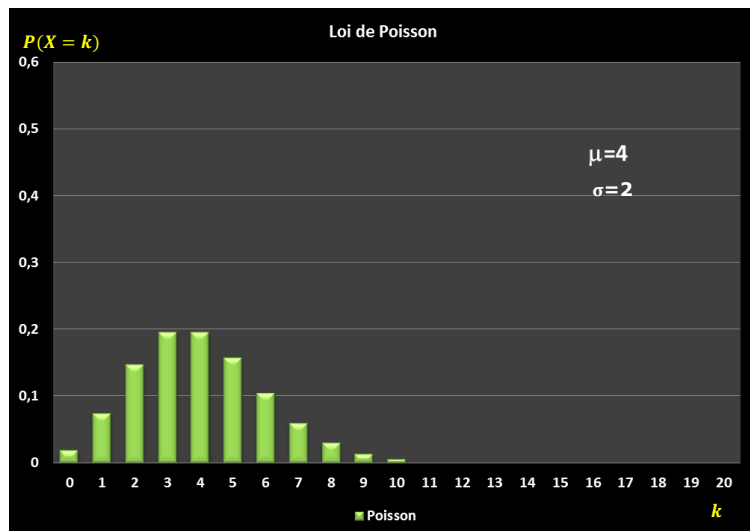
## Loi de Poisson: $\mu = 0,5$



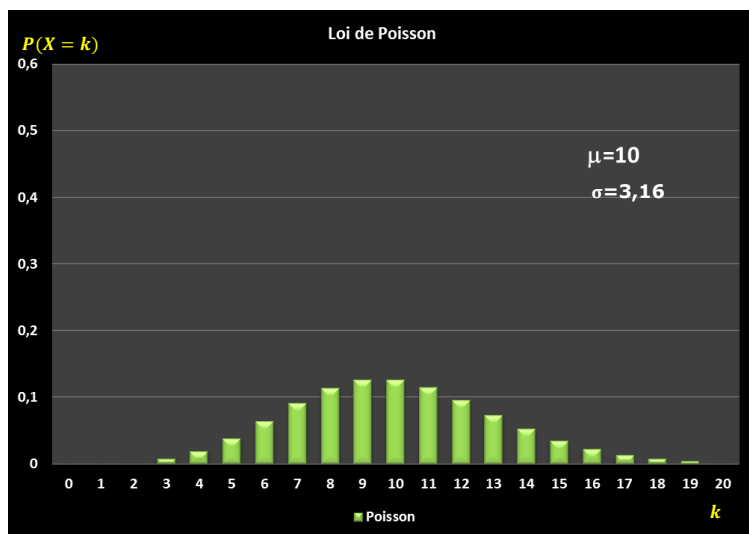
## Loi de Poisson: $\mu = 1$



## Loi de Poisson: $\mu = 4$



## Loi de Poisson: $\mu = 10$



## Source $^{137}\text{Cs}$ - loi de Poisson

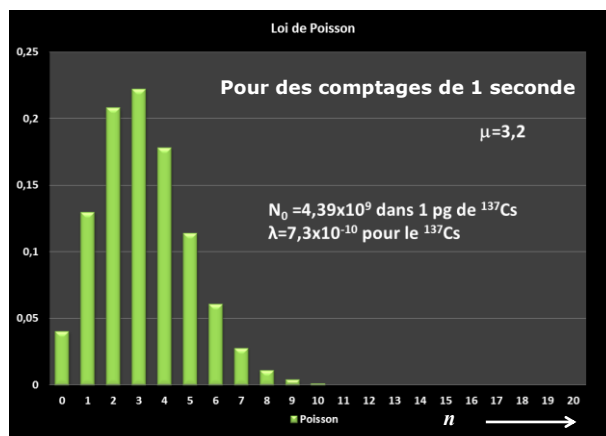
Le taux de comptage d'une source obéit à une loi de Poisson

probabilité  
d'observer  $n$   
désintégrations  
en un temps  $t$

Loi de  
Poisson avec

$$\mu = \lambda N_0$$

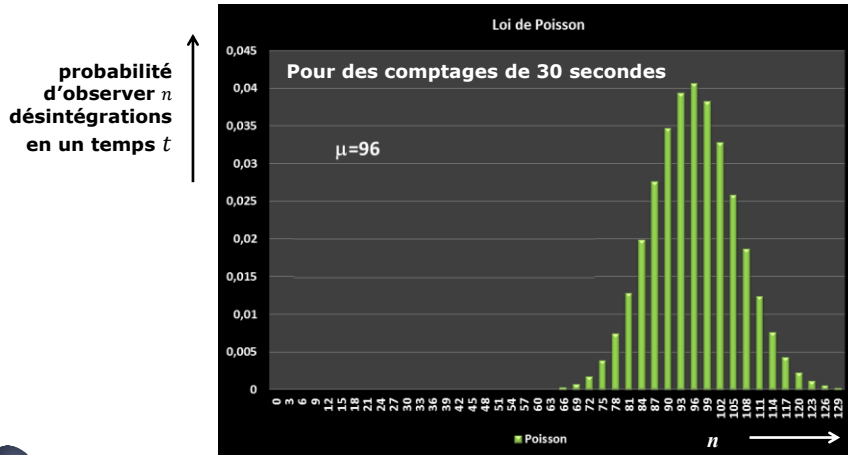
$$\lambda = \frac{\ln 2}{t_{1/2}}$$



## Source $^{137}\text{Cs}$ - loi de Poisson

loi de poisson  $\Rightarrow$  loi normale

Le taux de comptage d'une source obéit à une loi de Poisson



## VII

### Réponse des détecteurs



## Réponse des détecteurs

Quand un détecteur à ionisation interagit avec une particule, il y a :

1. irradiation du détecteur (durée d'interaction quelques  $ns$  - ~instantané)
  2. apparition d'une charge électrique  $Q$  dans le détecteur à  $t = 0$
  3. collection de la charge par application d'un champ électrique (charges + & - se déplacent en sens inverse)
  4. Le durée pour collecter toute la charge varie beaucoup d'un détecteur à l'autre.
    - Chambres ionisation: quelques  $ms$
    - Semi-conducteurs de type diodes: quelques  $ns$
- Ce temps est l'image de la mobilité des charges ainsi que de la distance à parcourir pour atteindre les électrodes.



**Ces détecteurs sont des générateurs de courant**



Il y a 2 modes principaux de fonctionnement de ces détecteurs:

**a/ en mode courant moyen**

**b/ en mode impulsionnel**

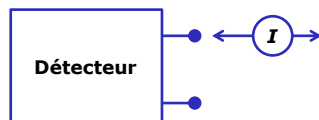


Jean Peyré

Ecole Technique de base des détecteurs  
Oléron 2015

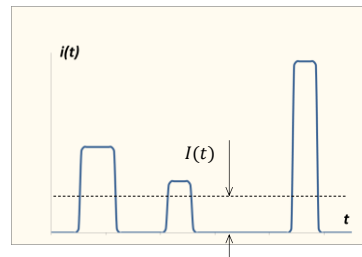
## Réponse des détecteurs

**a/ en mode courant moyen**



Le courant moyen est donné par l'intégrale des impulsions:

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



Le courant moyen pour T suffisamment grand est:

$$I_0 = rQ = r \frac{E}{w} q_e$$

$r$ : taux de comptage

$Q = \frac{E}{w} q_e$ : charge produite pour un évènement

$E$ : Energie moyenne déposée par évènement

$w$ : Energie moyenne nécessaire pour produire une paire chargée

$q_e$ :  $1,6 \times 10^{-19} C$

Attention aux fluctuations du courant dans ce mode

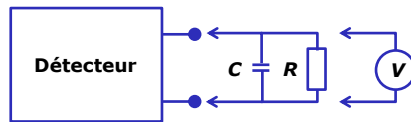


Jean Peyré

Ecole Technique de base des détecteurs  
Oléron 2015

## Réponse des détecteurs

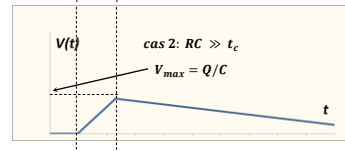
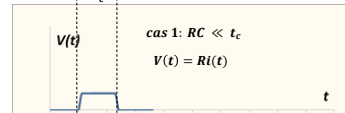
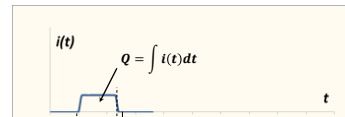
### b/ en mode impulsionnel



Cas 1:  $RC \ll t_c$   
 $V(t)$  à la même forme que  $i(t)$

Cas 2:  $RC \gg t_c$   
 Le courant charge la capacité qui se décharge ensuite avec la constante de temps  $RC$ . Dans ce mode,  $V_{max}$  est proportionnel à  $Q$ .

$$V_{max} = \frac{Q}{C}$$



## VIII - Résolution des détecteurs

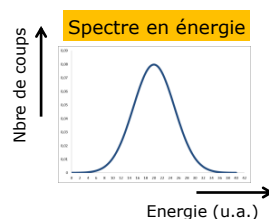
## Spectrométrie – Résolution

- Une des applications de la détection des rayonnements est de mesurer la distribution en énergie des rayonnements.

- Obtenir un spectre en énergie : La spectrométrie

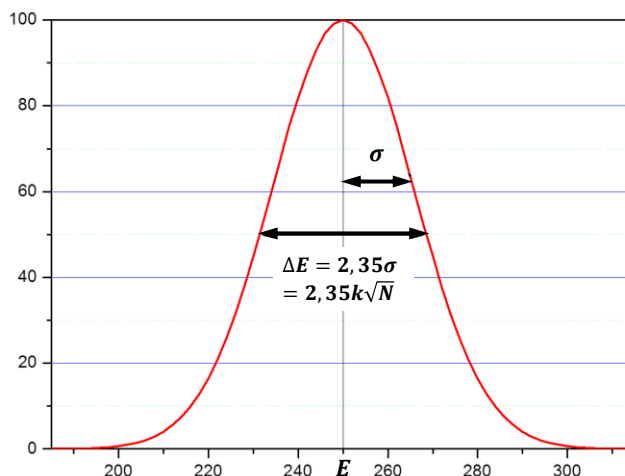
- Le détecteur doit pouvoir recueillir, autant que faire se peut, la totalité de l'énergie du rayonnement incident.

- Tous les éléments de la chaîne d'acquisition doivent être linéaires et reproductibles



## Spectrométrie – Résolution

- La plupart du temps dans ces mesures, on peut assimiler la loi de Poisson à une loi de Gauss
- Les pics à mesurer sont donc la plupart du temps gaussiens

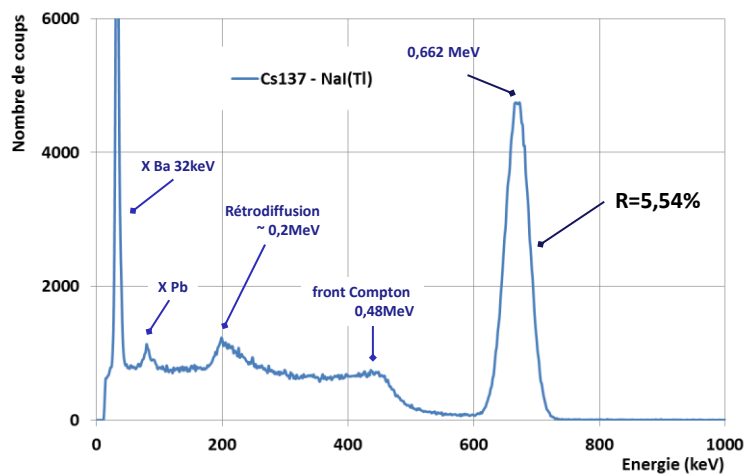


## Spectrométrie – Résolution

- La résolution  $R = \frac{\Delta E}{E}$  peut s'exprimer en % de la position du pic
  - $R$  la résolution
  - $\Delta E$ , la largeur à mi-hauteur (FWHM)
  - $E$  la position du pic
- $E$  et  $\Delta E$  peuvent s'exprimer en nb de canaux ou en énergie après étalonnage

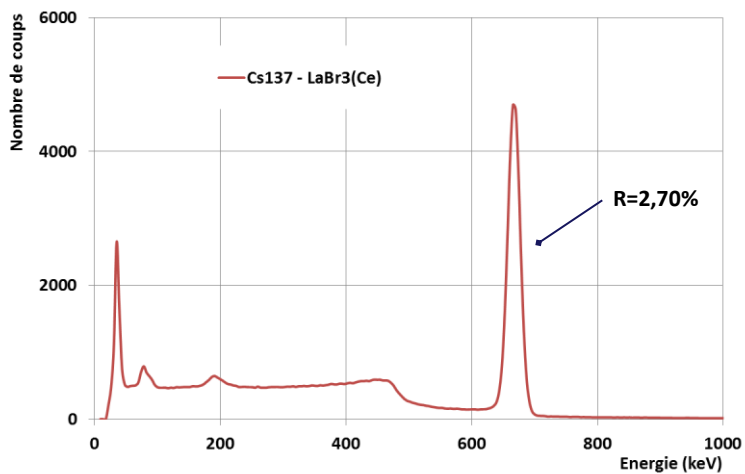
## Pic du $^{137}\text{Cs}$ à 662 keV

PMT + Cristal NaI(Tl)



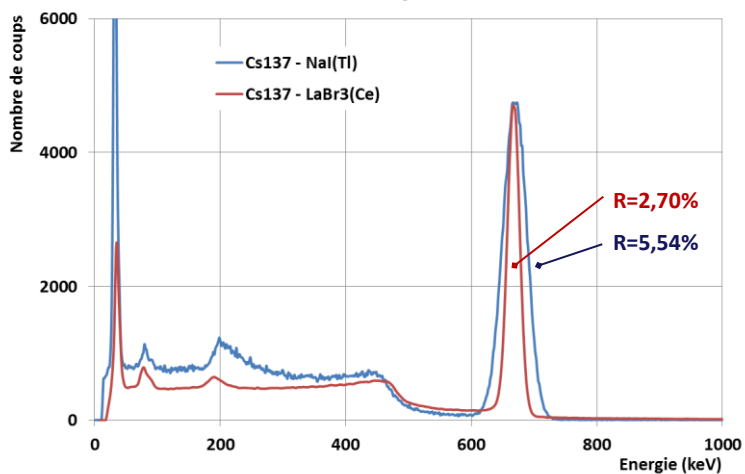
## Pic du $^{137}\text{Cs}$ à 662 keV

R6231-100 + Cristal  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$

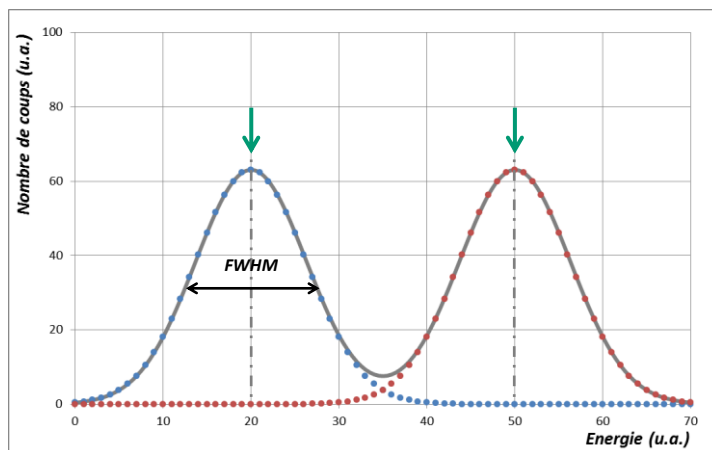


## Pic du $^{137}\text{Cs}$ à 662 keV

Cristaux  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$  &  $\text{NaI}(\text{TI})$

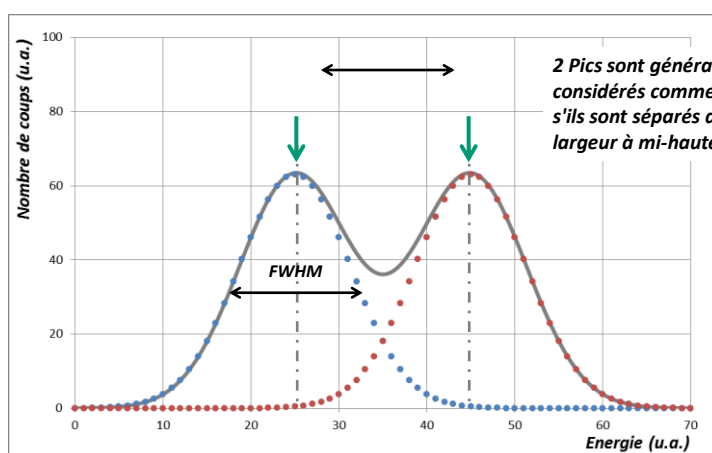


## Spectrométrie – Résolution



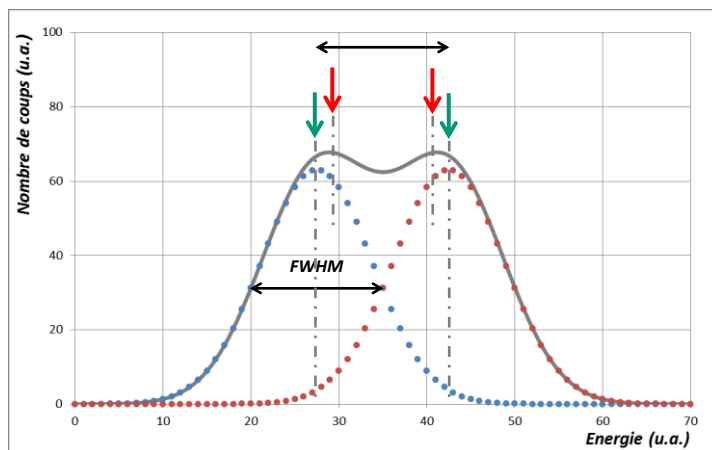
Pics séparés

## Spectrométrie – Résolution



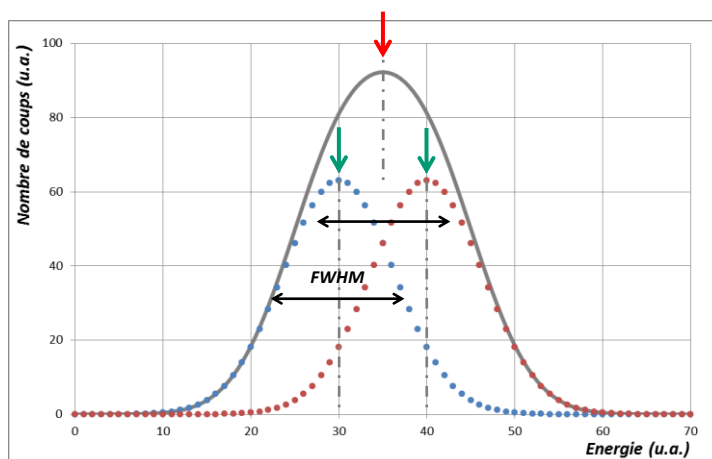
Pics non séparés – Position juste

## Spectrométrie – Résolution



*Pics non séparés et non séparables  
Position entachée d'erreur*

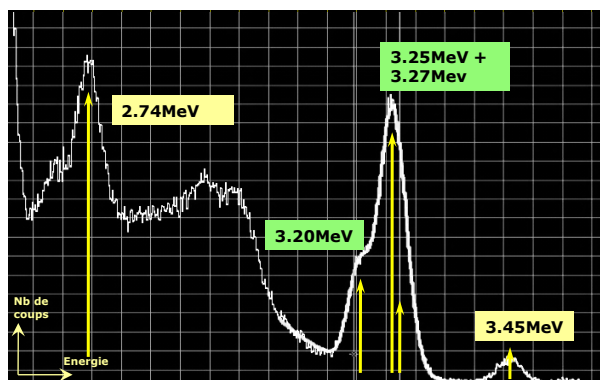
## Spectrométrie – Résolution



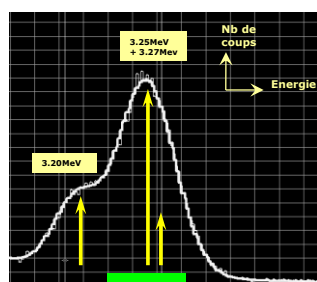
*Pics non séparables  
Résolution sans rapport avec les phénomènes  
physiques à l'intérieur du détecteur*

## Séparation de pics pour $\text{LaBr}_3$

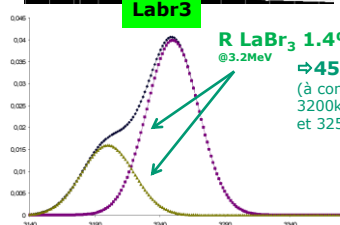
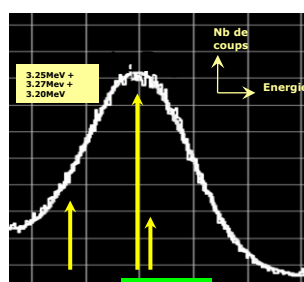
- Pour  $^{56}\text{Co}$ , 3 pics à 3,202, 3,253 et 3,273 MeV. Est-il possible de séparer ces pics les uns des autres?



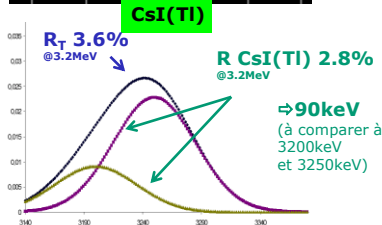
## Séparation de pics pour $\text{LaBr}_3$ & $\text{CsI(Tl)}$



Mesures



Simulation

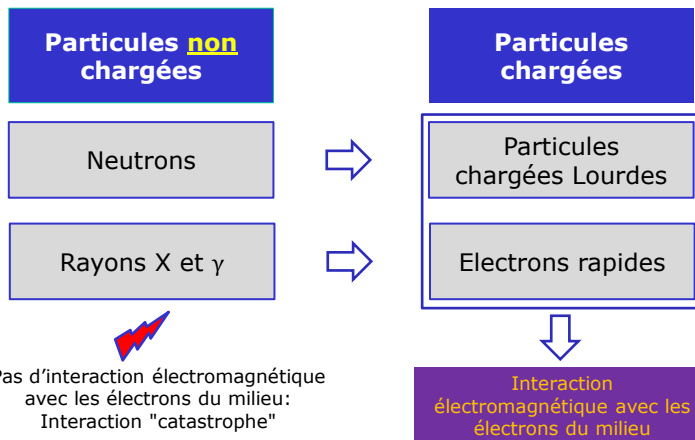




# IX

## Synthèse

### La base de la détection



1. Mise en **mouvement**, de manière directe ou indirecte, des **électrons** du milieu d'interaction
2. On ne sait **détecter** un rayonnement que s'il met en mouvement les électrons du milieu

# Ionisation & scintillation

