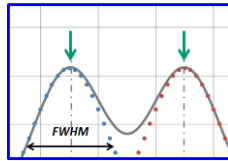


# Introduction à la détection



Jean Peyré

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

91405 Orsay, France  
Tél. : +33 1 69 15 52 43  
Fax : +33 1 69 15 50 08  
<http://www.csnsm.in2p3.fr>



Jean.Peyre@csnsm.in2p3.fr

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

## Introduction à la détection

### Sommaire

- I - Un peu d'histoire*
- II - Unités*
- III - Principes de détection*
- IV - Les critères de détection*
- V - Fluctuations statistiques*
- VI - Réponse des détecteurs*
- VII - Chaîne de mesure de charge*
- VIII - Résolution des détecteurs*
- IX - Synthèse*



Jean Peyré

P.2

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

# I

## Un peu d'histoire



Jean Peyré

P.3

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

## 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**

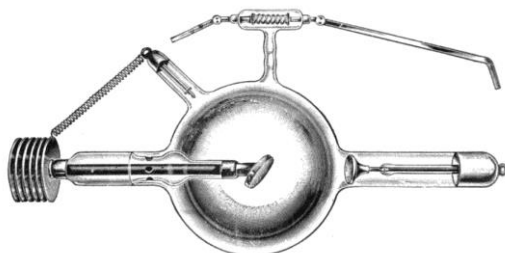


Jean Peyré

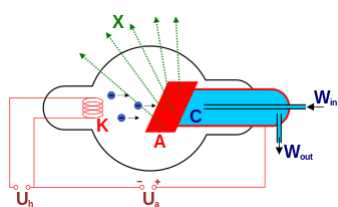
P.4

Joël Pouthas  
Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

## Tube de Crooks (rayons X)



~ 5000 V  
 $10^{-3}$  à  $10^{-5}$  mbar



Le freinage des électrons sur une cible dans un tube à rayons X :

- 1/ les électrons sont extraits par chauffage d'un filament métallique, la cathode, et accélérés par une tension électrique dans un tube sous vide.
- 2/ Ce faisceau est focalisé de manière à bombarder une cible métallique en tungstène ou en molybdène, appelée anode. Le ralentissement des électrons par les atomes de la cible provoque un rayonnement continu de freinage, (Bremsstrahlung).
- 3/ Il y a également des changements d'orbite d'électrons provenant des couches électroniques les plus profondes dues au bombardement électronique de l'anode ce qui induit des raies X

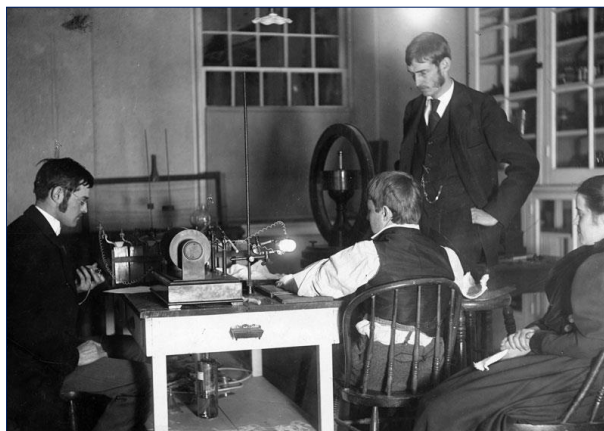


Jean Peyré

P.5

Ecole Technique de base des détecteurs  
 Cargèse 2017

## Utilisation des rayons X



Rudolf von Köhler

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

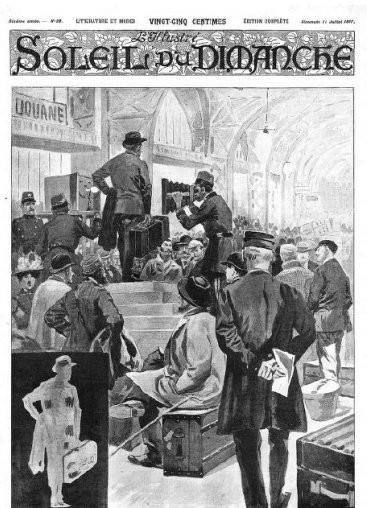


Jean Peyré

P.6

Joël Pouthas  
 Ecole Technique de base des détecteurs  
 Cargèse 2017

## Utilisation des rayons X



Vieilles des voyageurs et des bagages au moyen des rayons X, photographiés par le Dr. P. Curie.

### Douanes



Freddiane détonne par les rayons X.

1897 - Gare Saint Lazare



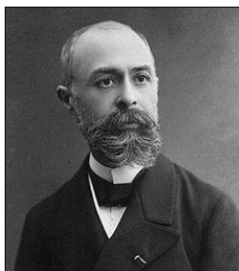
Jean Peyré

P.7

Joël Pouthas  
Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

## 1896 - Rayons uraniques de Becquerel

Prix Nobel de physique  
1903

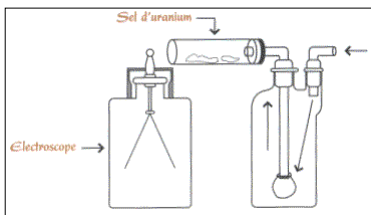


### Découverte De la Radioactivité

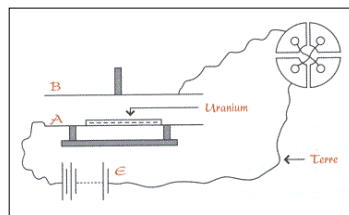


P. Curie

E. Rutherford



Electroscope à feuilles d'or  
Décharge de l'électroscope par ionisation de l'air



Electromètre à quadrants



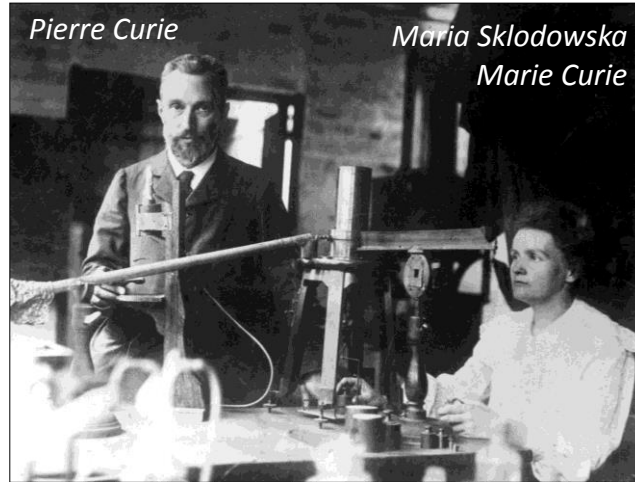
Jean Peyré

P.8

Joël Pouthas  
Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

# Radioactivité

Prix Nobel de physique  
1903



Pierre Curie

Maria Skłodowska  
Marie Curie

Polonium

1898

Radium



Jean Peyré

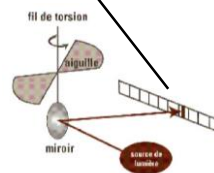
P.9

Joël Pouthas  
Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

## Dispositif expérimental de Pierre et Marie Curie



Chambre d'ionisation



Électromètre de Pierre  
Curie



Jean Peyré

P.10

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

## II

### Unités



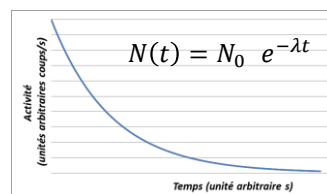
### Unités - Radioactivité

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

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

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

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



**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

## Principes de détection

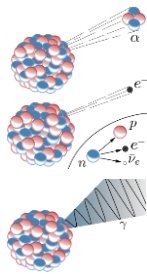


Jean Peyré

P.17

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

## Radioactivité



### Radioactivité : 3 types de rayonnement

**Radioactivité  $\alpha$  :**

*Emission d'une particule  $\alpha$  (noyau d'hélium), très fortement ionisante*

**Radioactivité  $\beta$  :**

*Emission d'une particule  $\beta$  (électron ou positron), fortement ionisante*

**Radioactivité X &  $\gamma$  :**

*Les rayons gamma sont produits par des processus nucléaires énergétiques au cœur des noyaux atomiques. Les rayons X sont produits par des réarrangements du cortège électronique.*

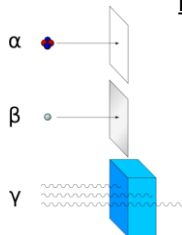
### Pouvoir d'arrêt

*Pouvoir de pénétration (exposition externe).*

*Les particules  $\alpha$  sont arrêtées par une feuille de papier ou 4 à 5 cm d'air.*

*Les particules  $\beta^-$  sont arrêtées par une feuille d'aluminium.*

*Le rayonnement  $\gamma$  est atténué (mais jamais arrêté) par de grandes épaisseurs de matériaux denses (écran en plomb, par exemple).*



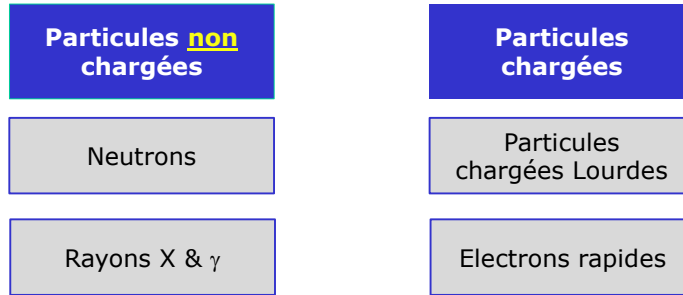
Jean Peyré

P.18

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017



## Les catégories de particules



**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.

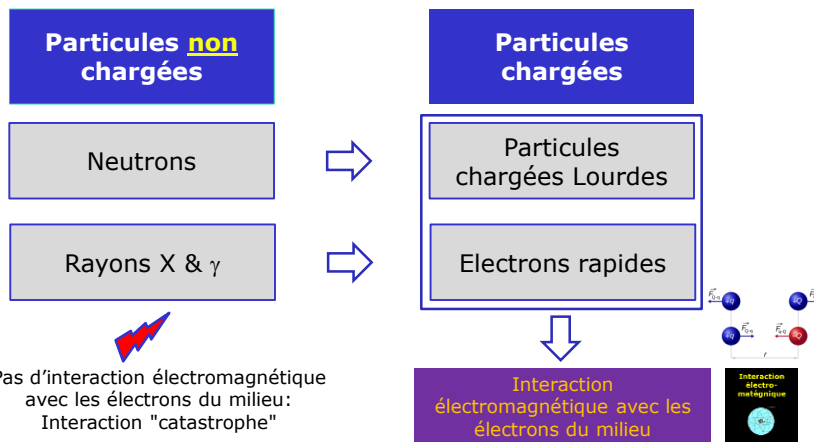


Jean Peyré

P.19

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

## Interaction particules - 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



Jean Peyré

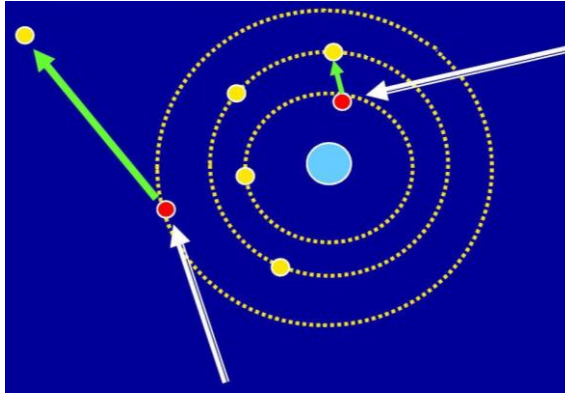
P.20

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

# Processus d'ionisation et d'excitation

ionisation

excitation



**Excitation :** L'énergie est insuffisante pour ioniser le milieu, mais capable de déplacer un électron vers un état situé à un niveau d'énergie plus élevé.

**Ionisation :** si l'énergie est suffisante pour arracher un e- aux atomes du milieu.



Jean Peyré

P.21

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

# 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)

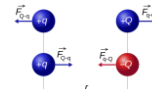
Ralentissement de la particule incidente

Formule de Bethe

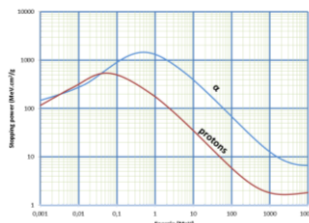
Perte d'énergie dans une épaisseur dx de matière

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

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



Courbe obtenue avec SRIM  
stopping power -> Silicium



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<sub>0</sub>: nombre d'électrons arrachés  
E: énergie perdue  
w: énergie pour créer une paire ionisée



Jean Peyré

P.22

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

## Le phénomène d'ionisation

### Exemples:

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

Valeur de  $w$  : gaz:  $\sim 30$  eV; Silicium :  $\sim 3$  eV

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 (1 électron =  $1,6 \cdot 10^{-19}$  C)
- 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

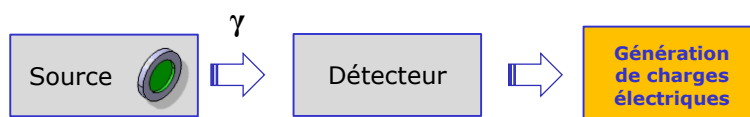


Jean Peyré

P.23

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

## Fluctuations statistiques

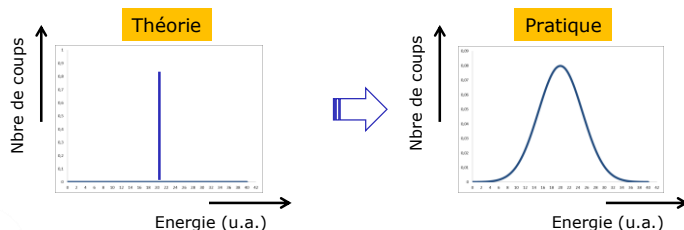


### Un exemple

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

P.24

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

## 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**

→ HT



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

→ **détecteurs à scintillation**



Jean Peyré

P.25

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

## IV

### Les critères de détection

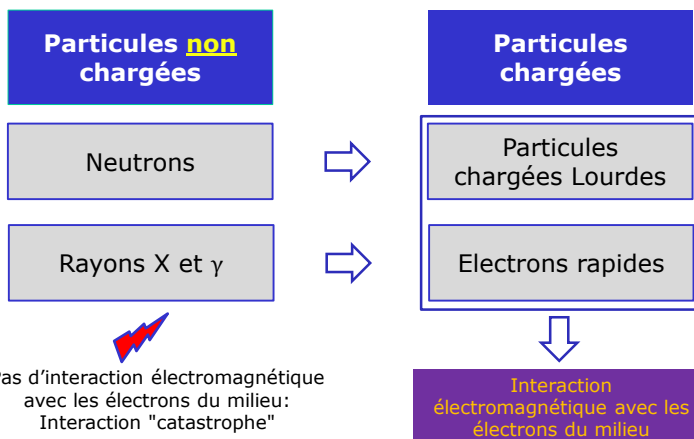


Jean Peyré

P.26

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

## 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

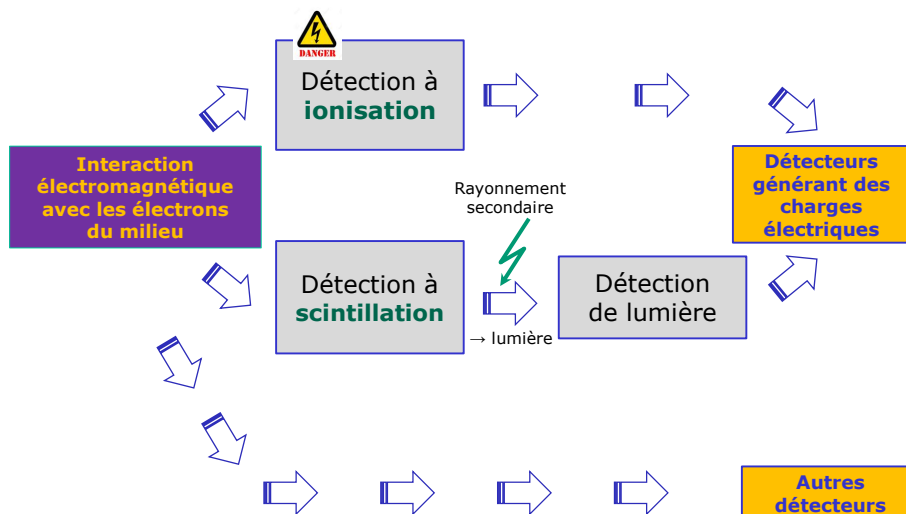


Jean Peyré

P.27

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

## Ionisation & scintillation



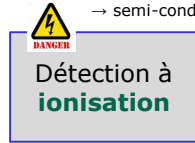
Jean Peyré

P.28

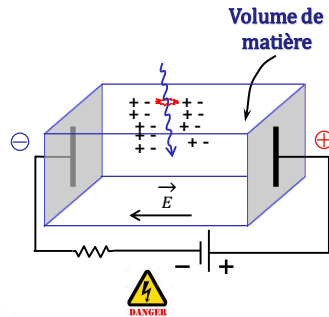
Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

## Fonctionnement de la détection à ionisation

→ gaz  
→ semi-conducteur



Détecteurs  
général des  
charges  
électriques



### Fonctionnement

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



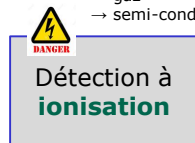
Jean Peyré

P.29

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

## Critères de la détection à ionisation

→ gaz  
→ semi-conducteur



Détecteurs  
général 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

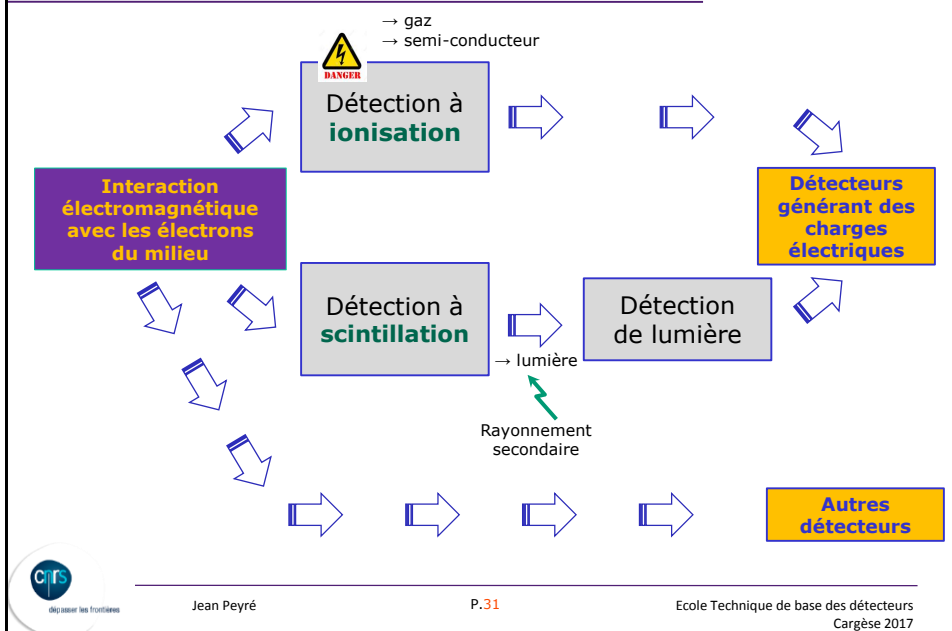


Jean Peyré

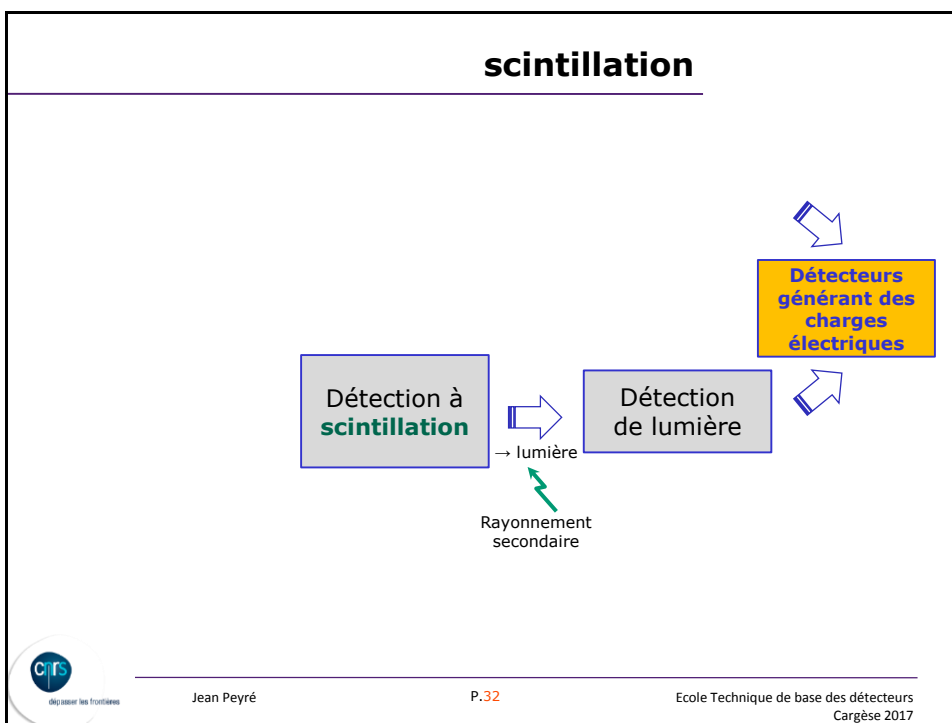
P.30

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

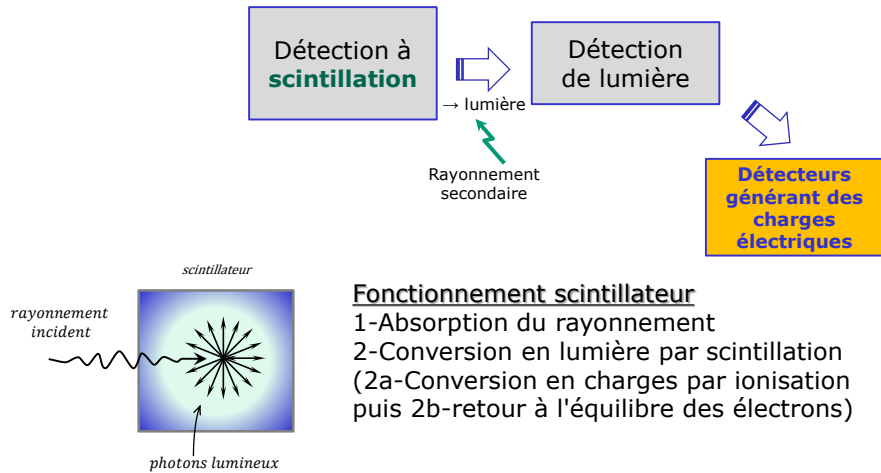
## Ionisation & scintillation



## scintillation



## Fonctionnement de la détection à scintillation

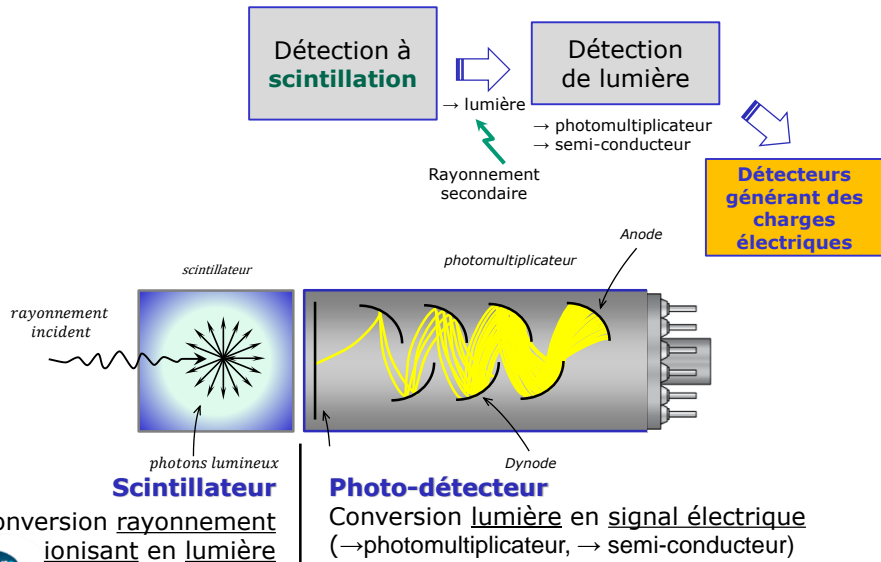


Jean Peyré

P.33

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

## Fonctionnement de la détection à scintillation



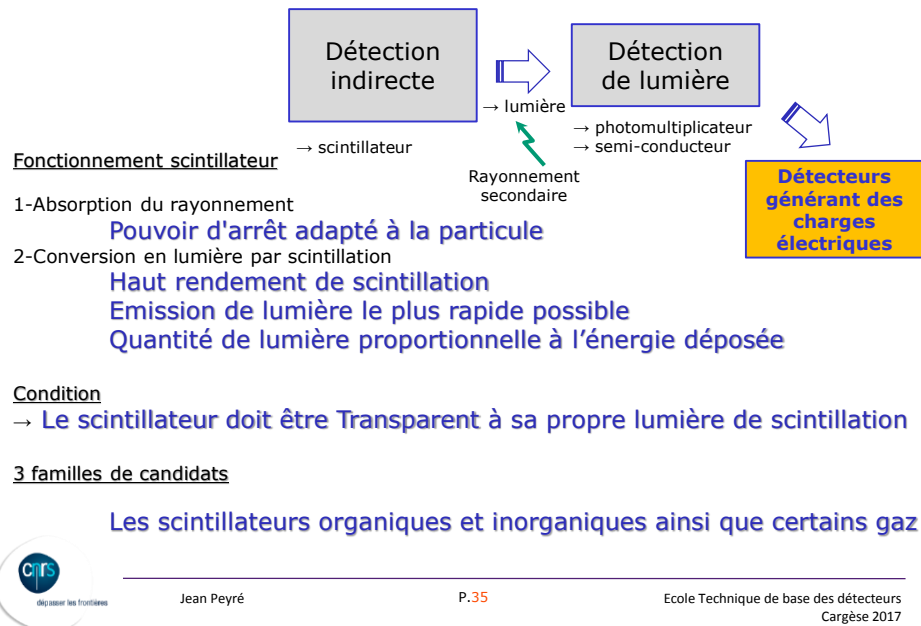
Jean Peyré

P.34

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017



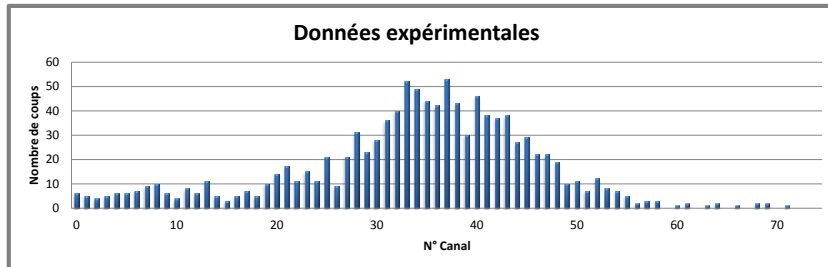
## Critères de la détection à scintillation



## V

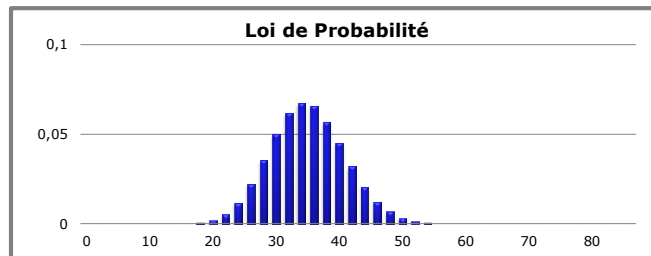
## Fluctuations statistiques

## Probabilités & Statistiques



### Statistiques

Probabilité  
Loi parente



Jean Peyré

P.38

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

## 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)

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

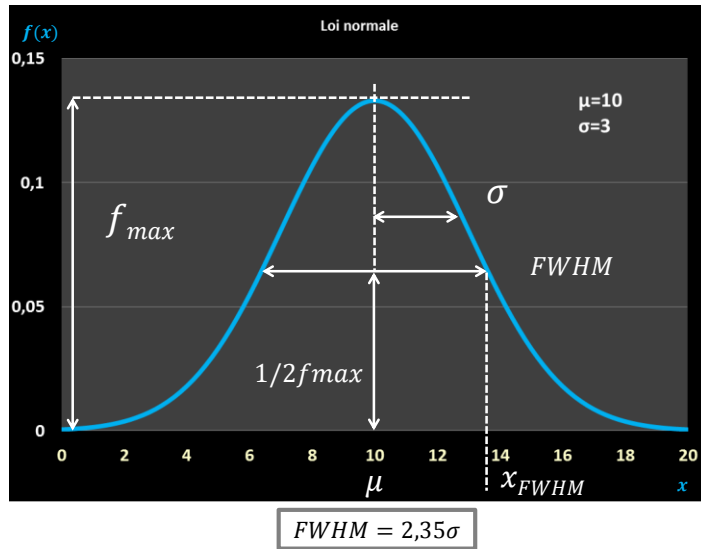


Jean Peyré

P.39

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

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

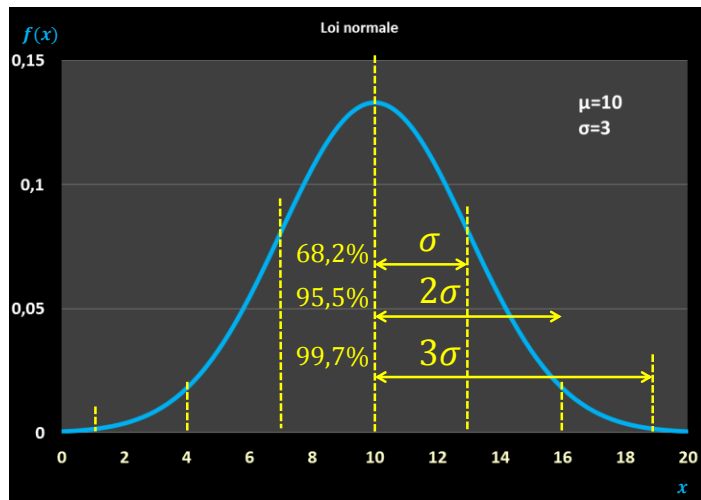


Jean Peyré

P.40

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

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

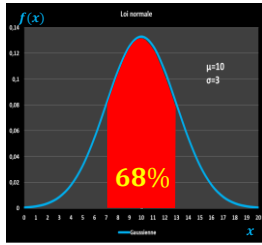


Jean Peyré

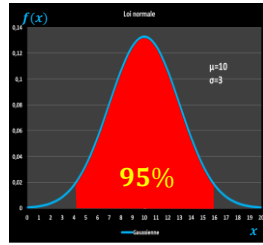
P.41

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

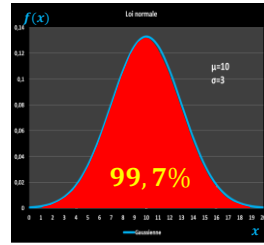
## En dessin ...toujours



$m - \sigma$     $m + \sigma$



$m - 2\sigma$     $m + 2\sigma$



$m - 3\sigma$     $m + 3\sigma$

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

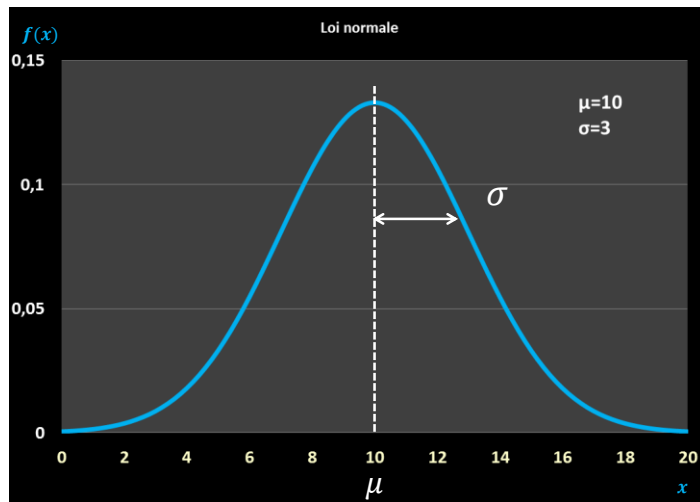


Jean Peyré

P.42

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

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

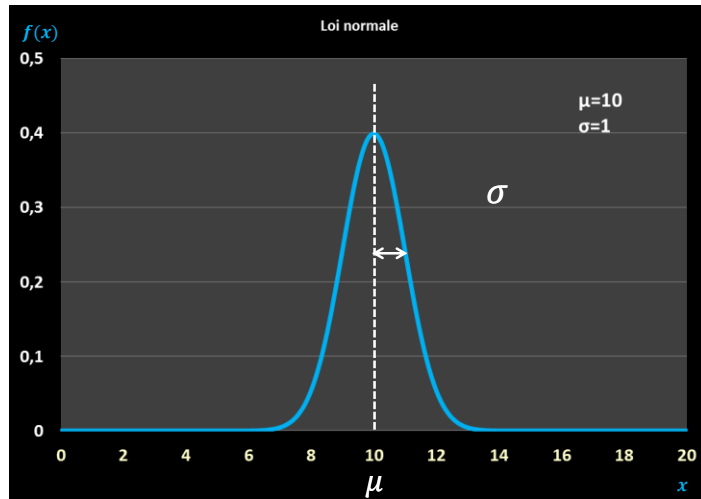


Jean Peyré

P.43

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

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

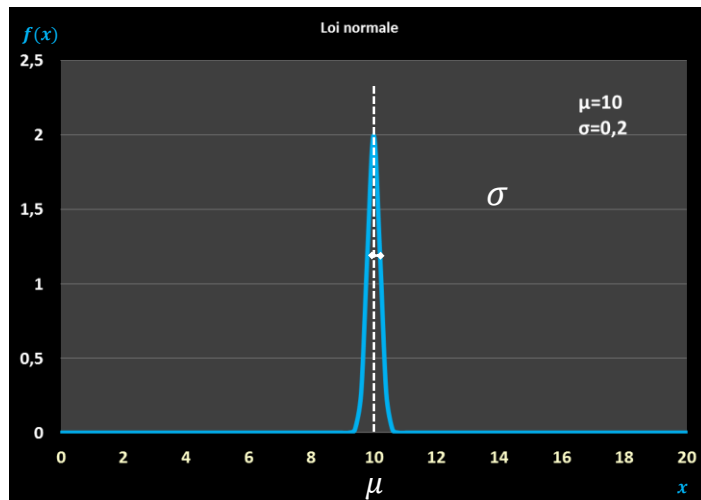


Jean Peyré

P.44

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

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



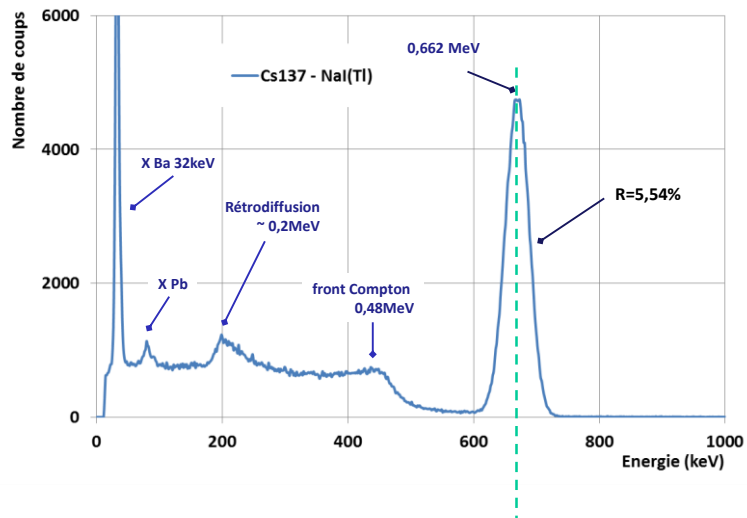
Jean Peyré

P.45

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

## Pic du $^{137}\text{Cs}$ à 662 keV

PMT + Cristal NaI(Tl)



Jean Peyré

P.46

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

## 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  $\mu$

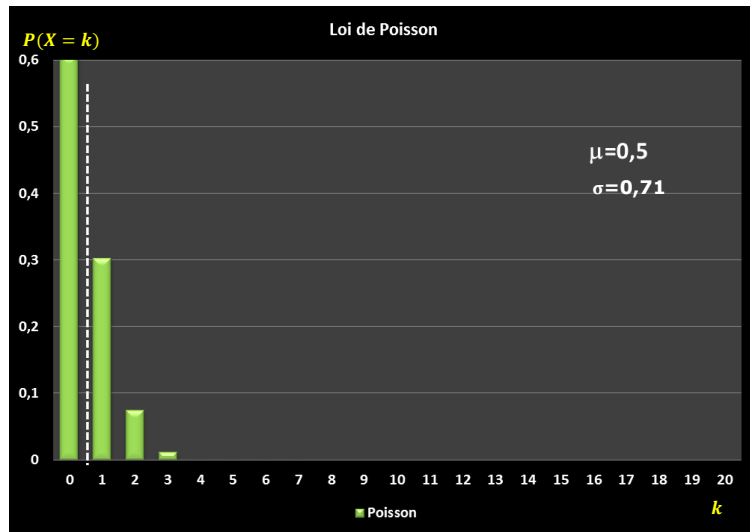


Jean Peyré

P.47

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

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

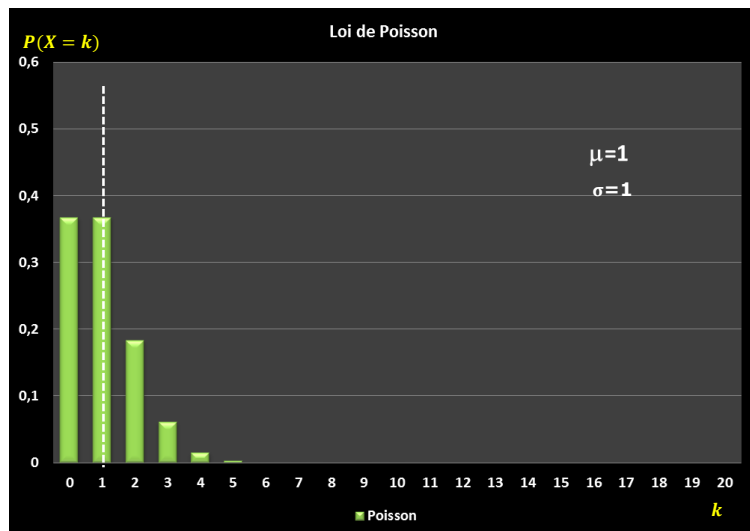


Jean Peyré

P.48

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

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

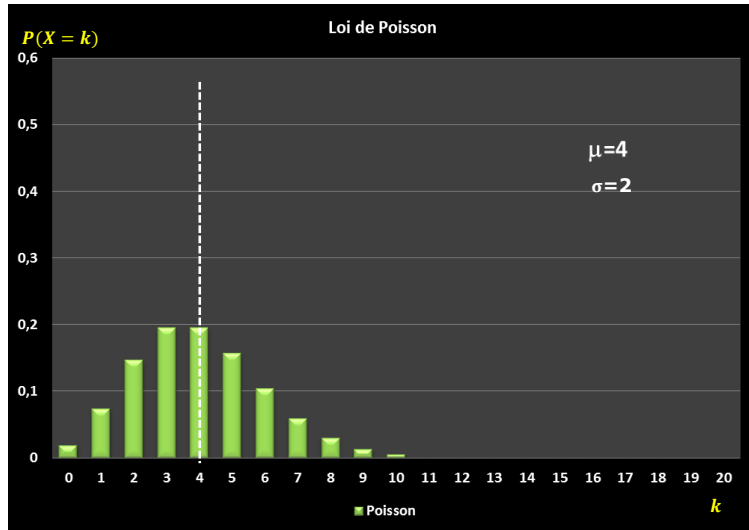


Jean Peyré

P.49

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

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

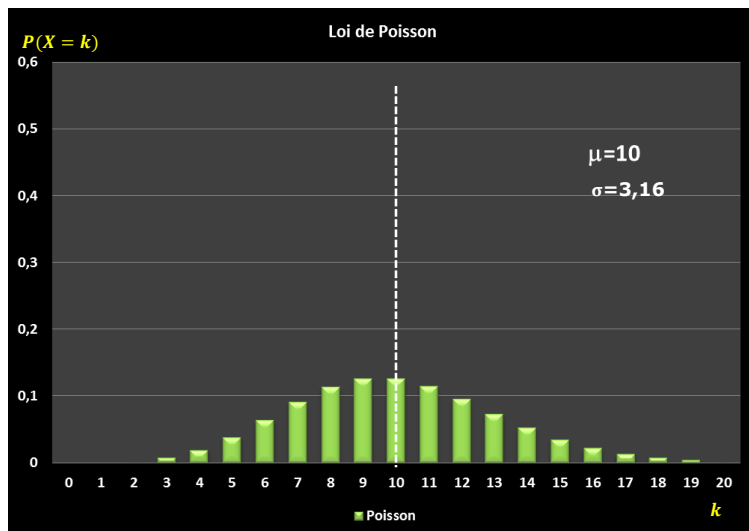


Jean Peyré

P.50

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

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



Jean Peyré

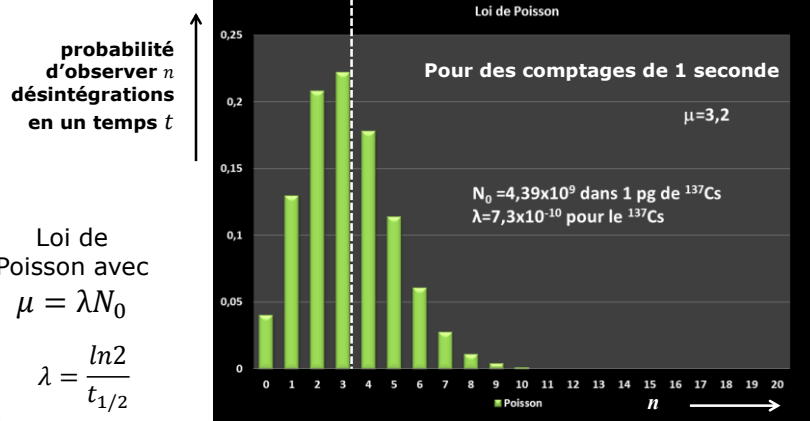
P.51

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017



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

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



Jean Peyré

P.52

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

## 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



Jean Peyré

P.53

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

## théorème de la limite centrale

Soient  $X_1, X_2, \dots, X_n$  un ensemble de variables aléatoires définies sur le même espace de probabilité, indépendantes suivant des lois d'espérance  $\mu$  et d'écart-type  $\sigma \neq 0$ . (ces lois ne sont pas forcément gaussiennes !)

On pose:  $S_n = X_1 + X_2 + \dots + X_n$

$$E(S_n) = n\mu$$

$$V(S_n) = n\sigma^2$$

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

Quand  $n$  est assez grand, la loi normale  $\mathcal{N}(n\mu, n\sigma^2)$  est une bonne approximation de la loi de  $S_n$

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} P(a \leq S_n \leq b) = \int_a^b f_X(x) dx \quad \text{avec} \quad f_X(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi n}\sigma} e^{-\frac{(x-n\mu)^2}{2n\sigma^2}}$$

Densité de probabilité de la loi normale  $\mathcal{N}(n\mu, n\sigma^2)$



Jean Peyré

P.54

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

## théorème de la limite centrale

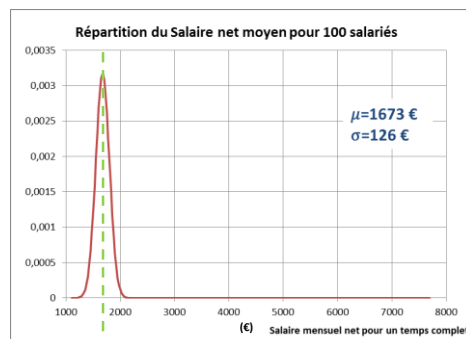
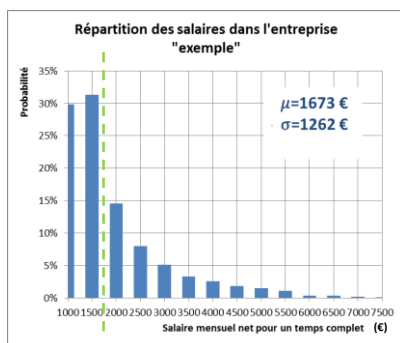
Exemple : Salaire moyen et répartition

$$M_n = \frac{S_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$$

$$E(M_n) = \mu$$

$$V(M_n) = \sigma^2/n$$

$n = 100$



A partir de la somme qui est gaussienne, on peut remonter à la moyenne et l'écart-type des variables d'origine sans en connaître la fonction de répartition

→ variance de la moyenne échantillonnée  $V(\bar{x}) = \sigma^2/n$



Jean Peyré

P.55

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

# VI

## Réponse des détecteurs



Jean Peyré

P.56

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

## 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**



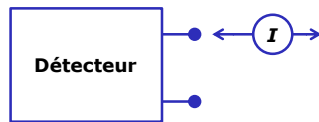
Jean Peyré

P.57

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

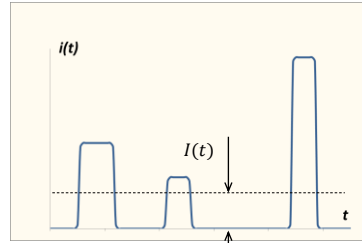
## Réponse des détecteurs

### 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



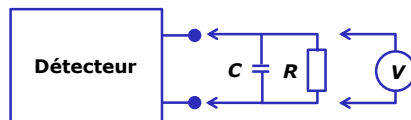
Jean Peyré

P.58

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

## Réponse des détecteurs

### b/ en mode impulsionnel

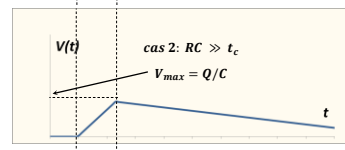
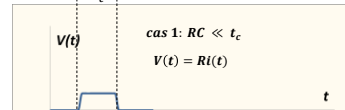
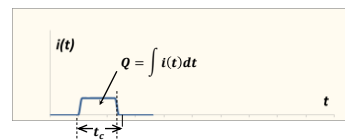


Cas 1:  $RC \ll t_c$

$V(t)$  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  $Q$ .



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



Jean Peyré

P.59

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

# VII – Chaîne de mesure de charge

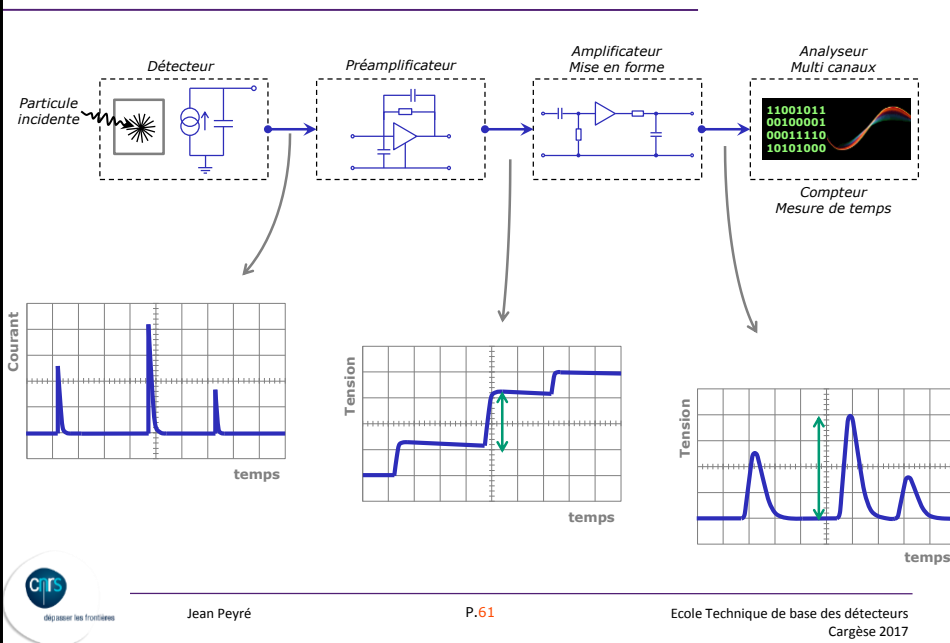


Jean Peyré

P.60

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

## La chaîne de détection



Jean Peyré

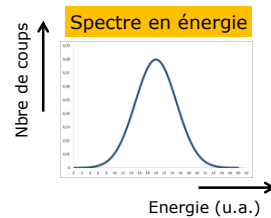
P.61

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

## VIII - Résolution des détecteurs

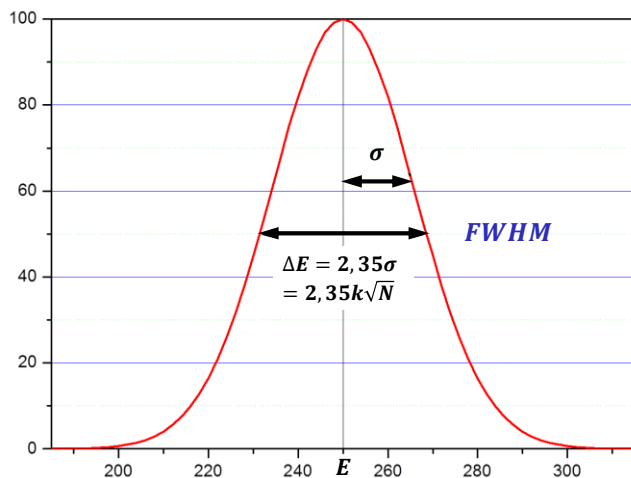
### Spectrométrie – Résolution

- 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



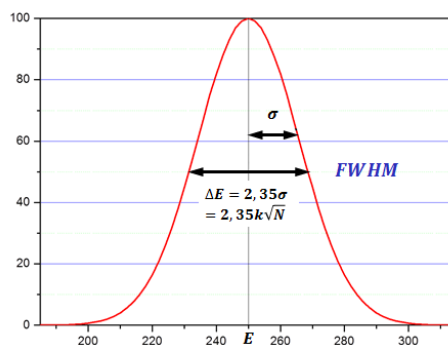
Jean Peyré

P.64

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

## Spectrométrie – Résolution

- La résolution  $R = \frac{\Delta E}{E}$   
s'exprime 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



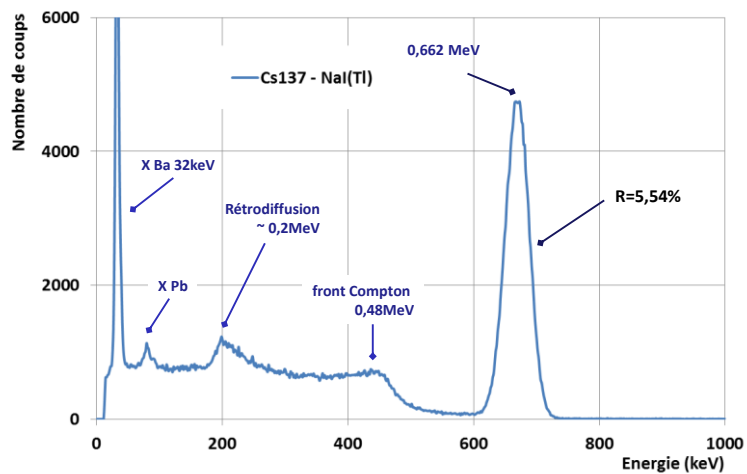
Jean Peyré

P.65

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

## Pic du $^{137}\text{Cs}$ à 662 keV

PMT + Cristal NaI(Tl)



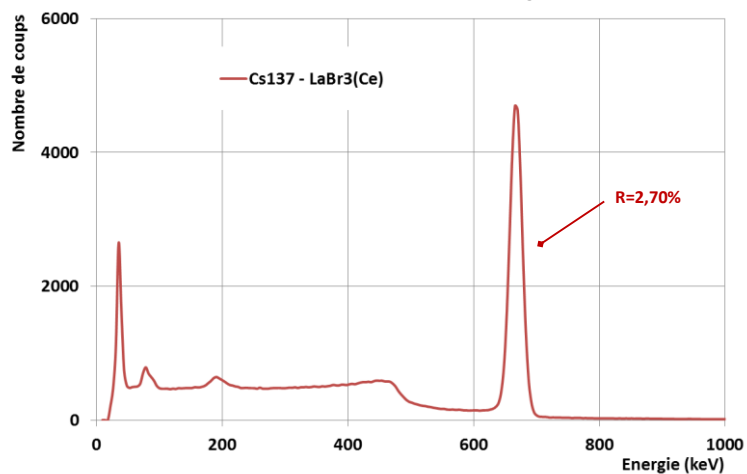
Jean Peyré

P.66

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

## Pic du $^{137}\text{Cs}$ à 662 keV

R6231-100 + Cristal LaBr<sub>3</sub>(Ce)



Jean Peyré

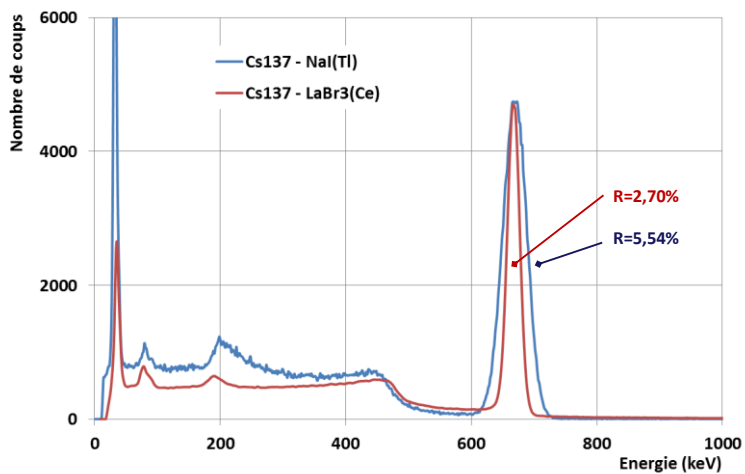
P.67

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017



## Pic du $^{137}\text{Cs}$ à 662 keV

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



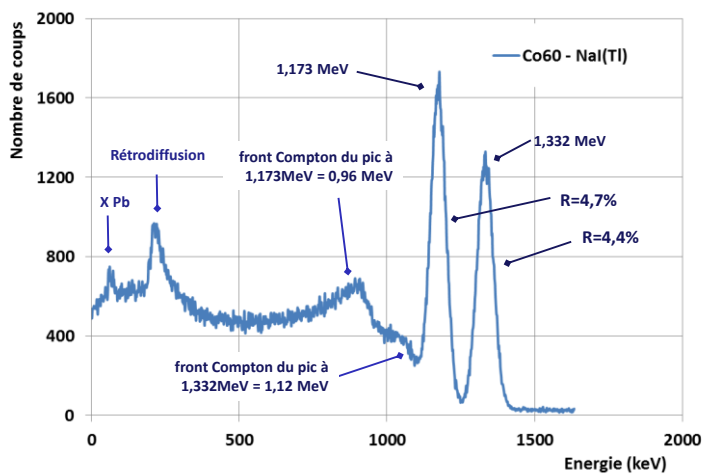
Jean Peyré

P.68

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

## Pics du $^{60}\text{Co}$

PMT + Cristal  $\text{NaI}(\text{TI})$



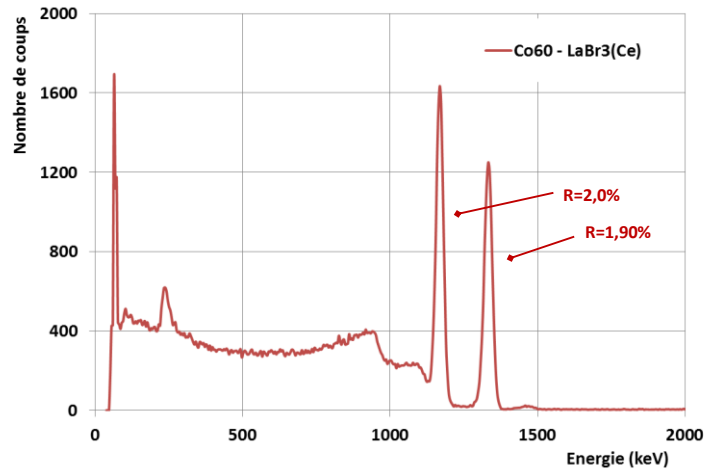
Jean Peyré

P.69

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

## Pics du $^{60}\text{Co}$

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



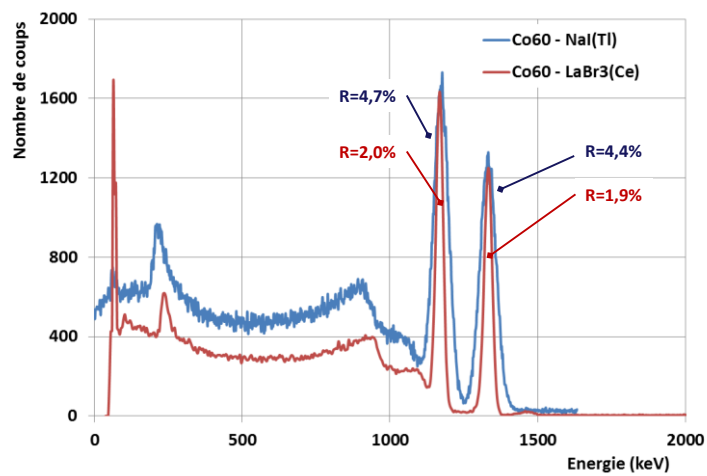
Jean Peyré

P.70

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

## Pics du $^{60}\text{Co}$

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



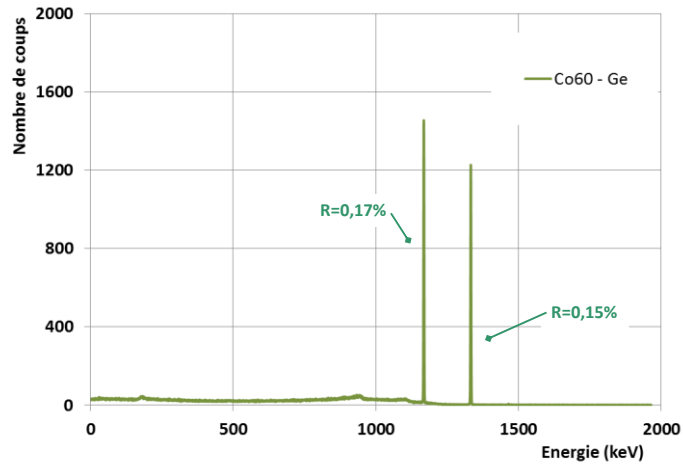
Jean Peyré

P.71

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

## Pics du $^{60}\text{Co}$

Cristal Ge



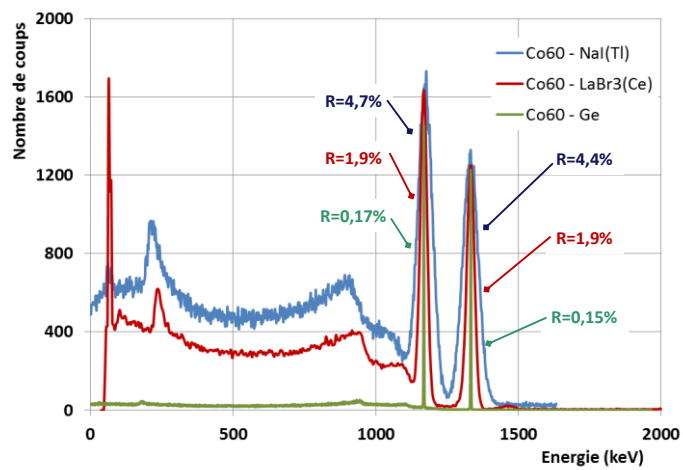
Jean Peyré

P.72

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

## Pics du $^{60}\text{Co}$

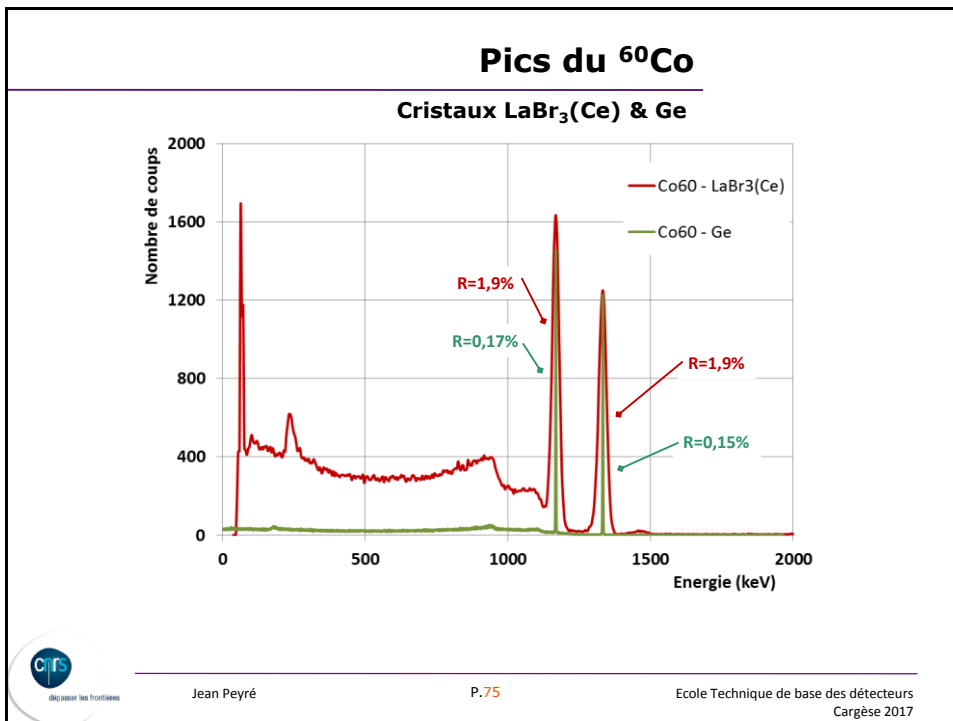
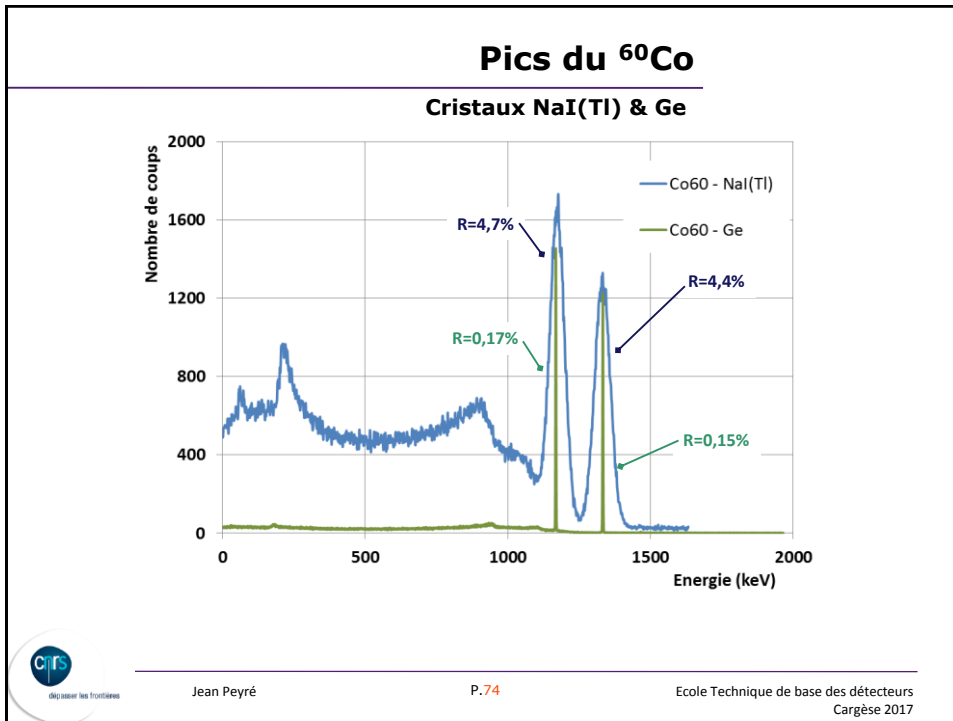
Cristaux  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ ,  $\text{NaI}(\text{TI})$  & Ge



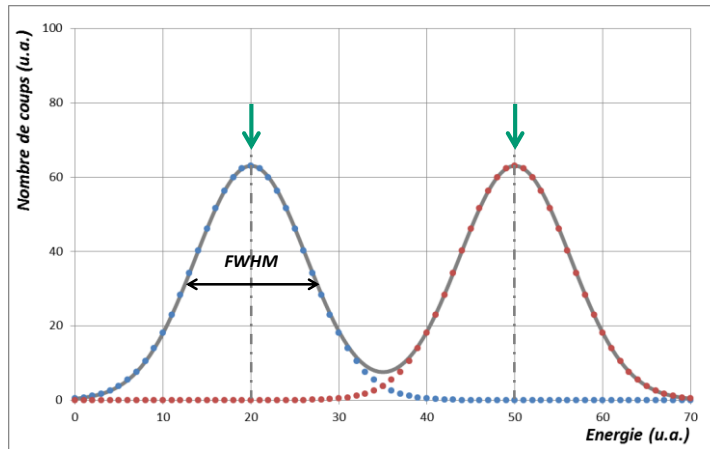
Jean Peyré

P.73

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017



## Spectrométrie – Résolution



*Pics séparés*

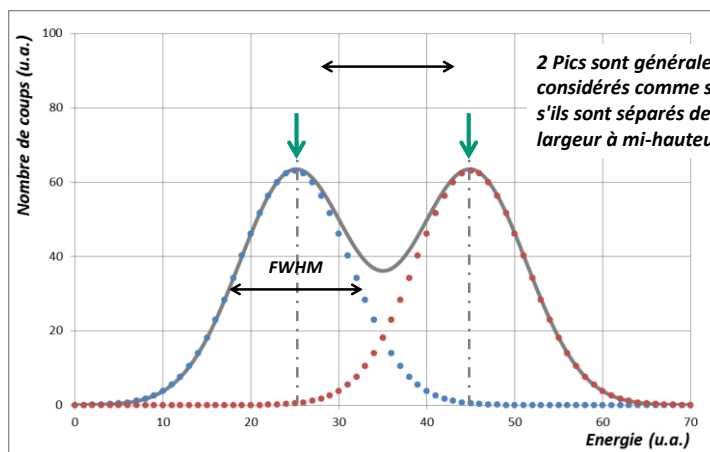


Jean Peyré

P.76

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

## Spectrométrie – Résolution



*Pics non séparés – Position juste*

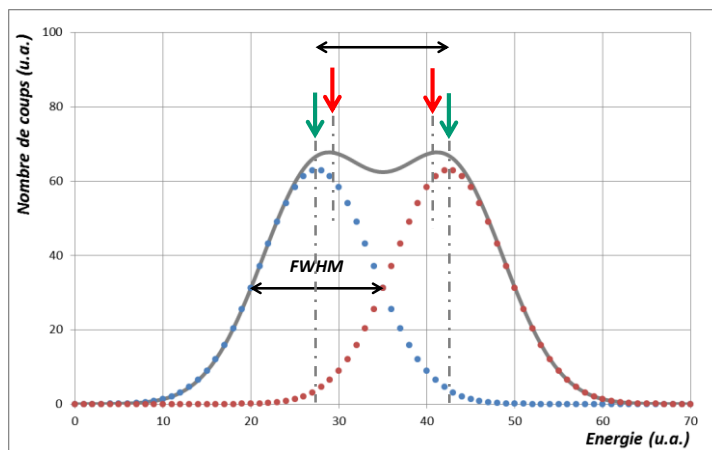


Jean Peyré

P.77

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

## Spectrométrie – Résolution



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

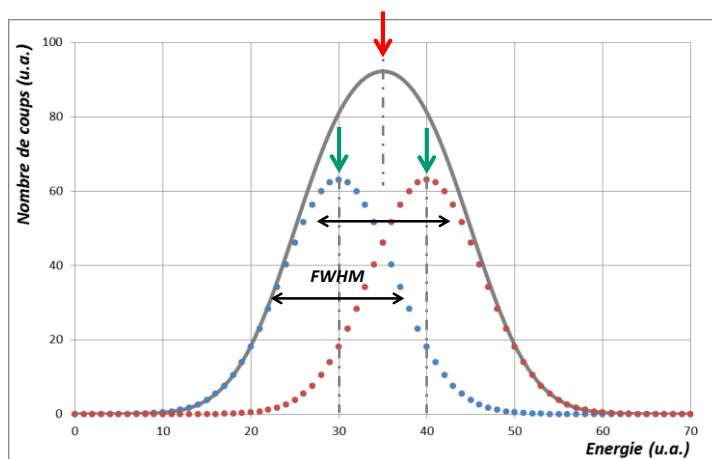


Jean Peyré

P.78

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

## Spectrométrie – Résolution



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



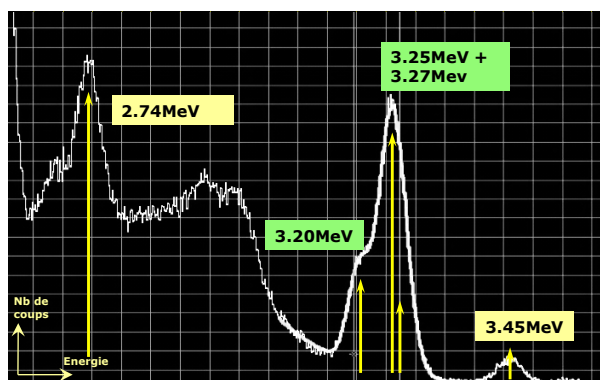
Jean Peyré

P.79

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

## 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?

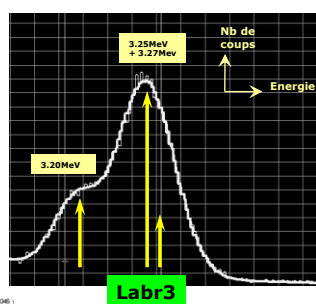


Jean Peyré

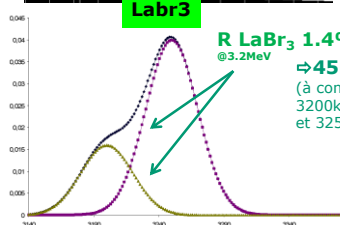
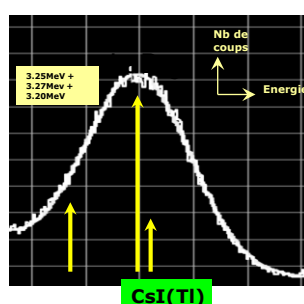
P.80

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

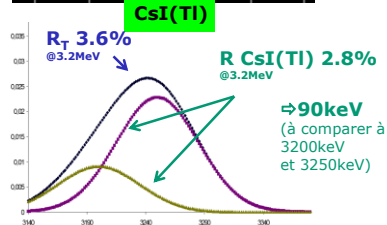
## Séparation de pics pour $\text{LaBr}_3$ & $\text{CsI(Tl)}$



Mesures



Simulation



Jean Peyré

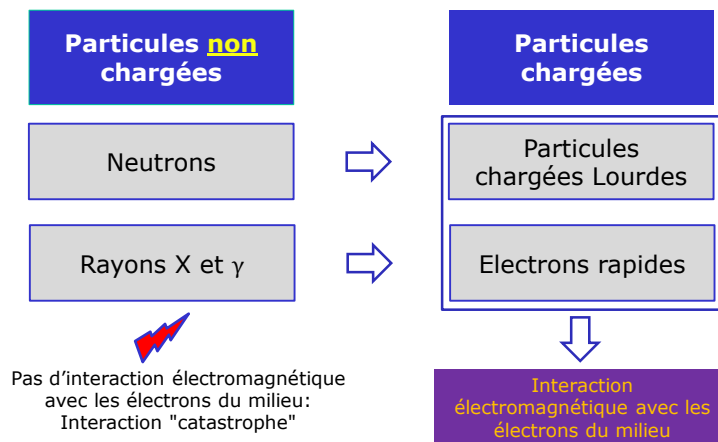
P.81

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017

# IX

## Synthèse

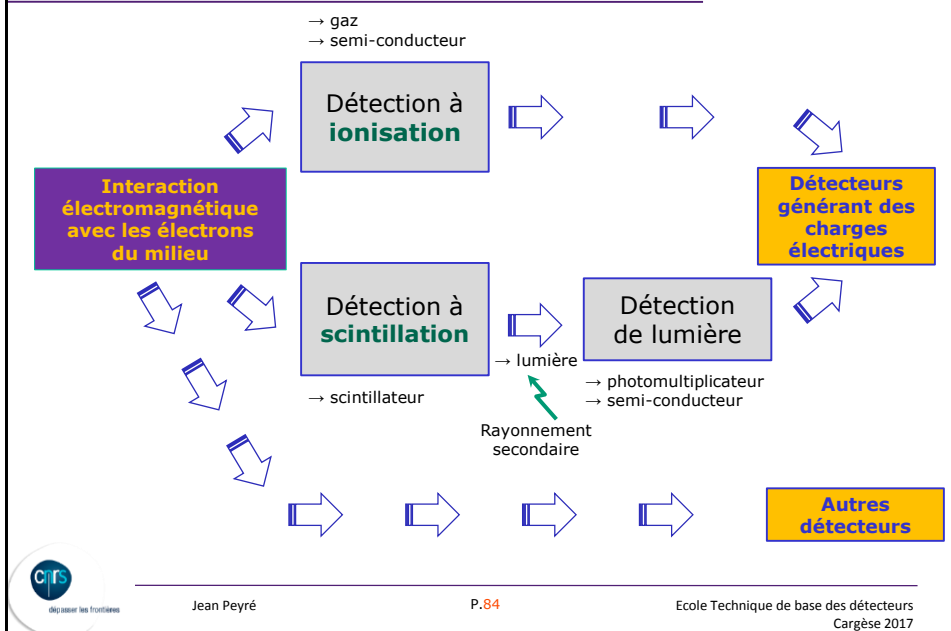
### La base de la détection



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



## Sites utiles

- <http://www.nist.gov/pml/data/index.cfm>
- <http://www.nist.gov/pml/data/xcom/index.cfm>



Database Search Form

**XCOM: Photon Cross Sections Database**

- <http://www.nist.gov/pml/data/xraytrans/index.cfm>



**Search the Database**

## Sites utiles

- [http://www.nucleide.org/DDEP\\_WG/DDEPdata.htm](http://www.nucleide.org/DDEP_WG/DDEPdata.htm)



Nuclide	Tables	Comments	ENSDF	ASCII	In	UpDate	Type
Ac-225	<a href="#">225Ac table</a>	<a href="#">comments</a>	<a href="#">ensdf</a>	<a href="#">txt</a>	5	26/08/2009	3
Ac-227	<a href="#">227Ac table</a>	<a href="#">comments</a>	<a href="#">ensdf</a>	<a href="#">txt</a>	4	16/02/2009	2
Ac-228	<a href="#">228Ac table</a>	<a href="#">comments</a>	<a href="#">ensdf</a>	<a href="#">txt</a>	6	22/01/2010	3
Ag-108	<a href="#">108Ag table</a>	<a href="#">comments</a>	<a href="#">ensdf</a>	<a href="#">txt</a>	3	4/09/2006	2
Ag-108m	<a href="#">108mAg table</a>	<a href="#">comments</a>	<a href="#">ensdf</a>	<a href="#">txt</a>	3	17/01/2012	2
Ag-110	<a href="#">110Ag table</a>	<a href="#">comments</a>	<a href="#">ensdf</a>	<a href="#">txt</a>	1	12/03/2004	1
Ag-110m	<a href="#">110mAg table</a>	<a href="#">comments</a>	<a href="#">ensdf</a>	<a href="#">txt</a>	1	24/03/2004	1
Al-26	<a href="#">26Al table</a>	<a href="#">comments</a>	<a href="#">ensdf</a>	<a href="#">txt</a>	99	24/07/2003	1
Am-241	<a href="#">241Am table</a>	<a href="#">comments</a>	<a href="#">ensdf</a>	<a href="#">txt</a>	5	20/08/2010	2
Am-242	<a href="#">242Am table</a>	<a href="#">comments</a>	<a href="#">ensdf</a>	<a href="#">txt</a>	5	18/01/2011	2
Am-242m	<a href="#">242mAm table</a>	<a href="#">comments</a>	<a href="#">ensdf</a>	<a href="#">txt</a>	6	18/01/2011	2
Am-243	<a href="#">243Am table</a>	<a href="#">comments</a>	<a href="#">ensdf</a>	<a href="#">txt</a>	5	26/02/2010	2
Am-244	<a href="#">244Am table</a>	<a href="#">comments</a>	<a href="#">ensdf</a>	<a href="#">txt</a>	5	18/01/2011	2
Am-244m	<a href="#">244mAm table</a>	<a href="#">comments</a>	<a href="#">ensdf</a>	<a href="#">txt</a>	5	18/01/2011	2
Ar-37	<a href="#">37Ar table</a>	<a href="#">comments</a>	<a href="#">ensdf</a>	<a href="#">txt</a>	7	16/10/2012	N
Ar-41	<a href="#">41Ar table</a>	<a href="#">comments</a>	<a href="#">ensdf</a>	<a href="#">txt</a>	6	4/05/2010	3
15O	<a href="#">15O table</a>	<a href="#">comments</a>	<a href="#">ensdf</a>	<a href="#">txt</a>	1	1/06/2004	1
32p	<a href="#">32p table</a>	<a href="#">comments</a>	<a href="#">ensdf</a>	<a href="#">txt</a>	1	8/04/2004	1
33p	<a href="#">33p table</a>	<a href="#">comments</a>	<a href="#">ensdf</a>	<a href="#">txt</a>	1	6/04/2004	1
31Pa	<a href="#">31Pa table</a>	<a href="#">comments</a>	<a href="#">ensdf</a>	<a href="#">txt</a>	6	23/02/2011	3
33Pa	<a href="#">33Pa table</a>	<a href="#">comments</a>	<a href="#">ensdf</a>	<a href="#">txt</a>	5	11/01/2010	2
34Pa	<a href="#">34Pa table</a>	<a href="#">comments</a>	<a href="#">ensdf</a>	<a href="#">txt</a>	6	31/01/2011	3
4mPa	<a href="#">4mPa table</a>	<a href="#">comments</a>	<a href="#">ensdf</a>	<a href="#">txt</a>	6	31/01/2011	3
33Pb	<a href="#">33Pb table</a>	<a href="#">comments</a>	<a href="#">ensdf</a>	<a href="#">txt</a>	3	20/09/2006	3
35Pb	<a href="#">35Pb table</a>	<a href="#">comments</a>	<a href="#">ensdf</a>	<a href="#">txt</a>	7	30/05/2011	N
19Pb	<a href="#">19Pb table</a>	<a href="#">comments</a>	<a href="#">ensdf</a>	<a href="#">txt</a>	4	17/01/2012	2
11Pb	<a href="#">11Pb table</a>	<a href="#">comments</a>	<a href="#">ensdf</a>	<a href="#">txt</a>	7	4/01/2013	1
12Pb	<a href="#">12Pb table</a>	<a href="#">comments</a>	<a href="#">ensdf</a>	<a href="#">txt</a>	2	6/04/2011	2
14Pb	<a href="#">14Pb table</a>	<a href="#">comments</a>	<a href="#">ensdf</a>	<a href="#">txt</a>	4	18/01/2011	2
35Pd	<a href="#">35Pd table</a>	<a href="#">comments</a>	<a href="#">ensdf</a>	<a href="#">txt</a>	6	22/01/2010	1
Pm-147	<a href="#">147Pm table</a>	<a href="#">comments</a>	<a href="#">ensdf</a>	<a href="#">txt</a>	7	4/01/2013	2
Pm-148	<a href="#">148Pm table</a>	<a href="#">comments</a>	<a href="#">ensdf</a>	<a href="#">txt</a>	6	4/01/2013	N



Jean Peyré

P.86

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2017