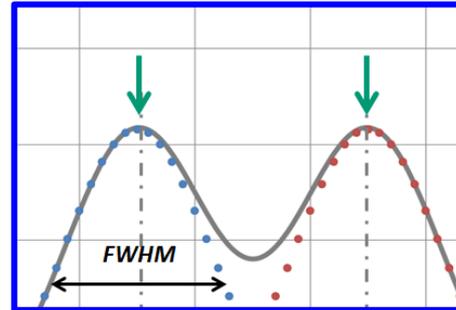


# Introduction à la détection



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>



# 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*

# I

## Un peu d'histoire

# 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

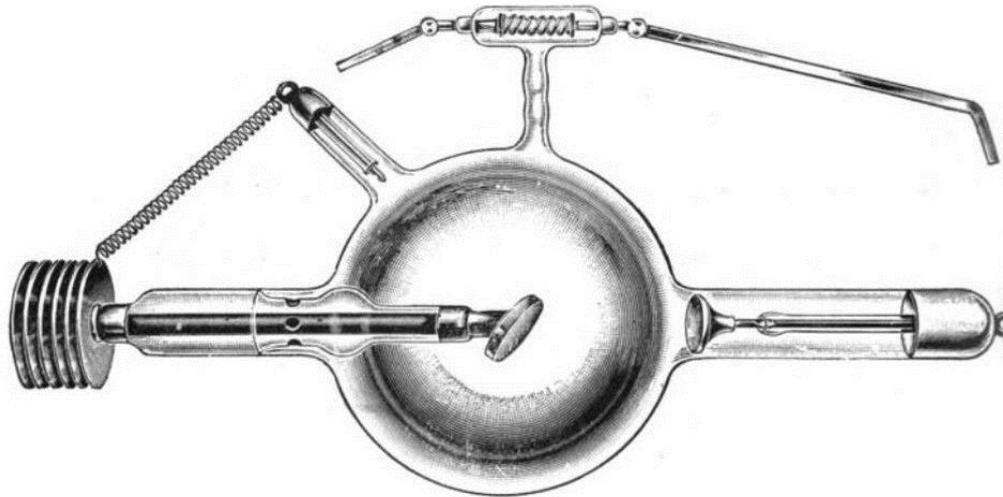


Rudolf von Köhler

**Würzburg**

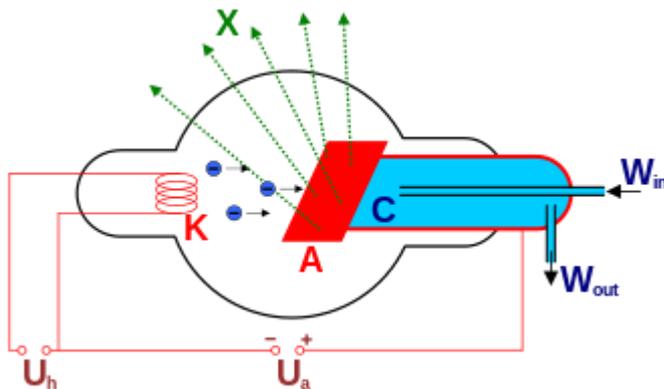
**23 janvier 1896**

# Tube de Crooks (rayons X)



$\sim 5000 \text{ V}$   
 $10^{-3}$  à  $10^{-5} \text{ mbar}$

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

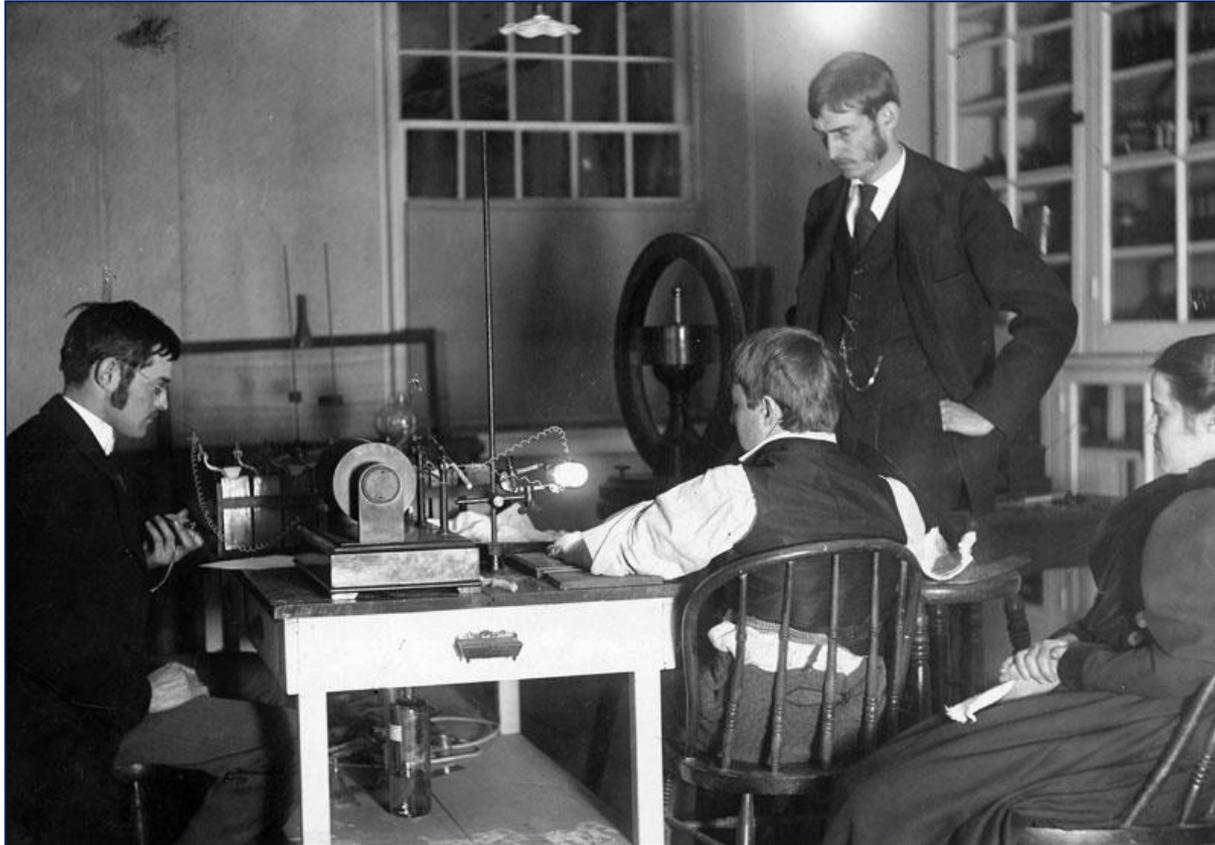
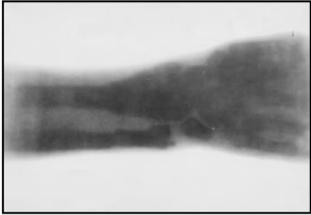


*1/ les électrons sont extraits par chauffage d'un filament métallique, la cathode, et accélérés par une tension électrique dans un tube sous vide.*

*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*

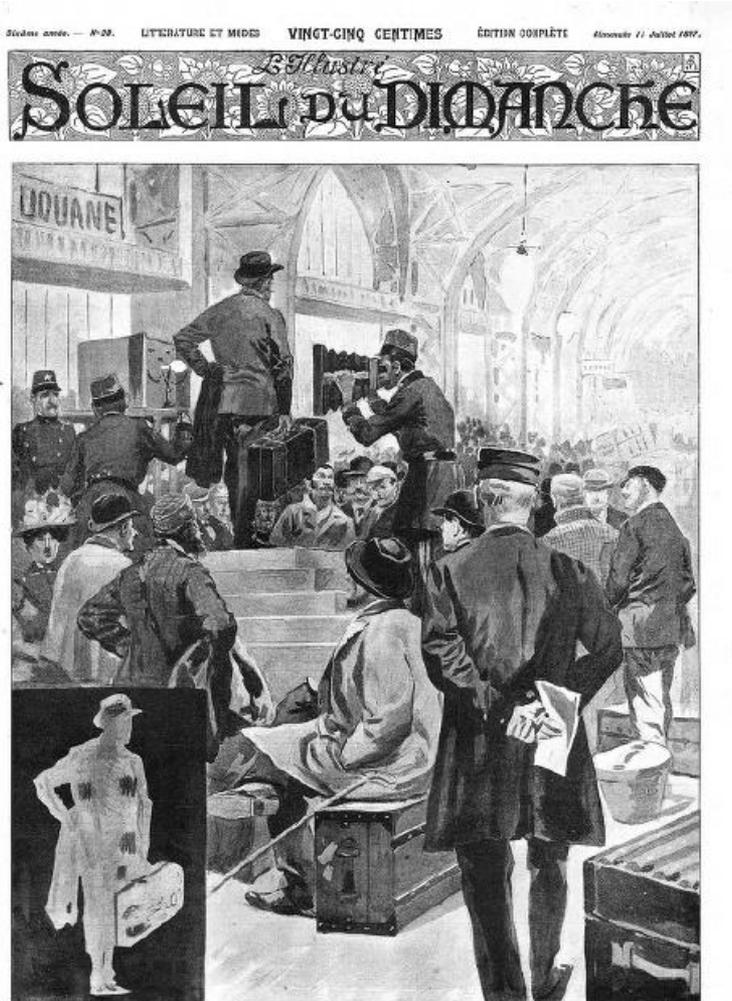
# Utilisation des rayons X



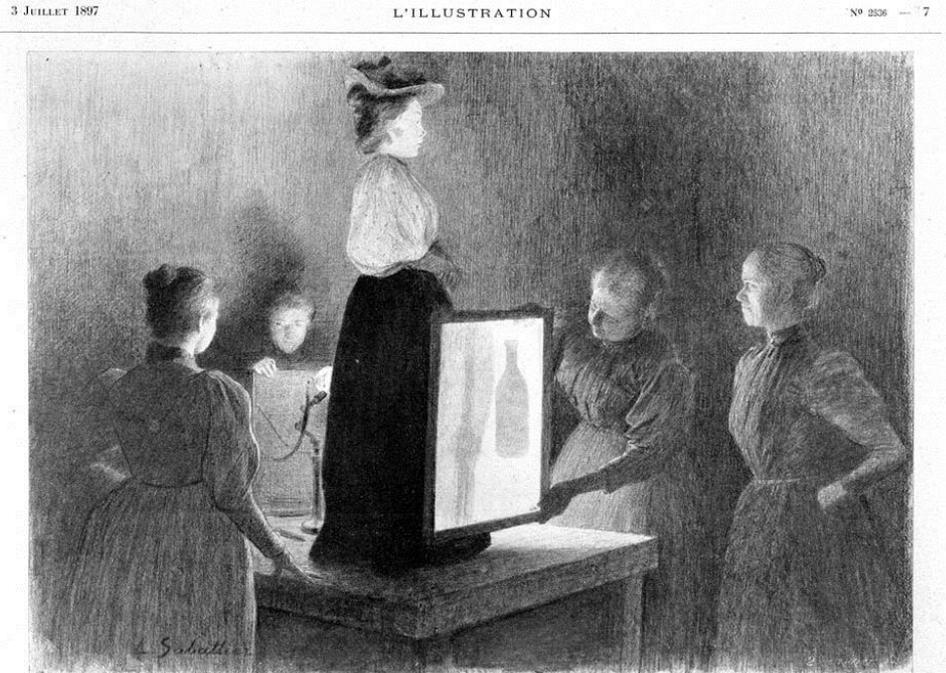
Rudolf von Köhler

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

# Utilisation des rayons X



*Douanes*



Fraudeuse dénoncée par les rayons X.

**1897 – Gare Saint Lazare**

Visite des voyageurs et des bagages au moyen des rayons X. (voir notre nomenclature, page 5)

Le Kiste à gauche représente ce que l'on aperçoit au radiogramme.



dépasser les frontières

Jean Peyré

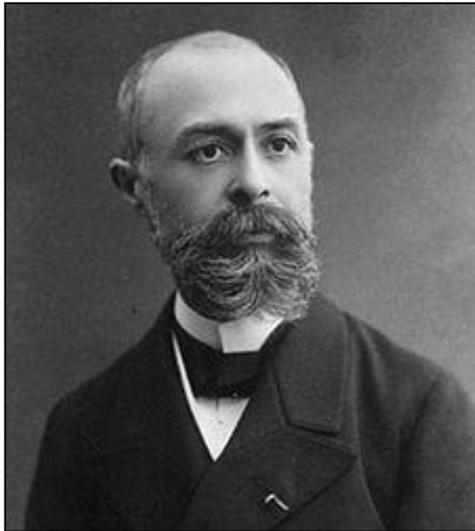
P.7

Joël Pouthas

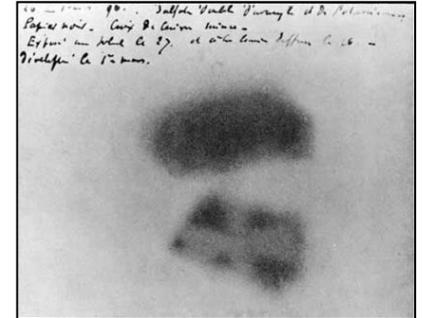
Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2019

# 1896 - Rayons uraniques de Becquerel

Prix Nobel de physique  
1903

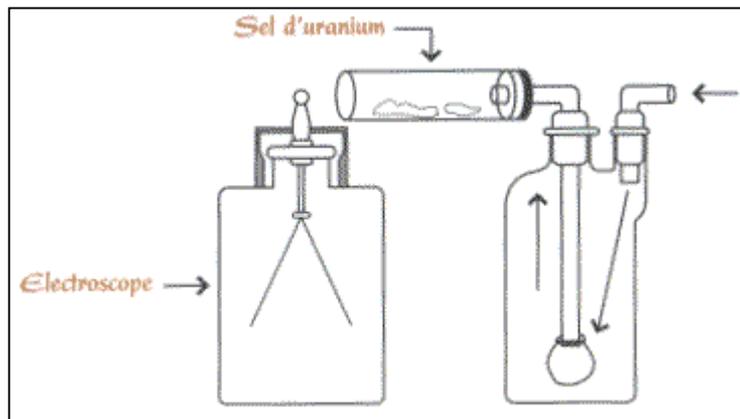


## Découverte De la Radioactivité



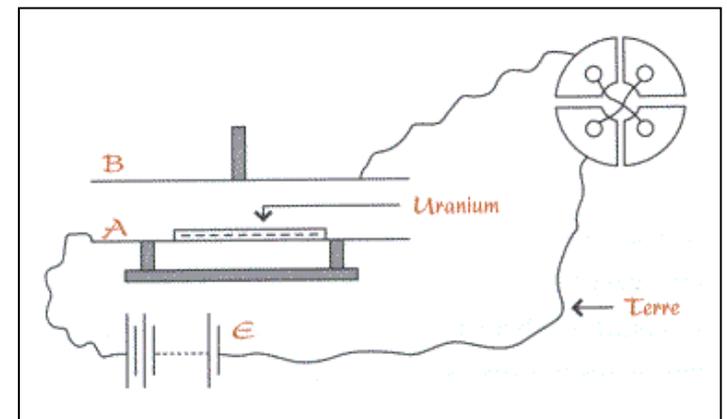
P. Curie

E. Rutherford



**Electroscope à feuilles d'or**

**Décharge de l'électroscope par ionisation de l'air**

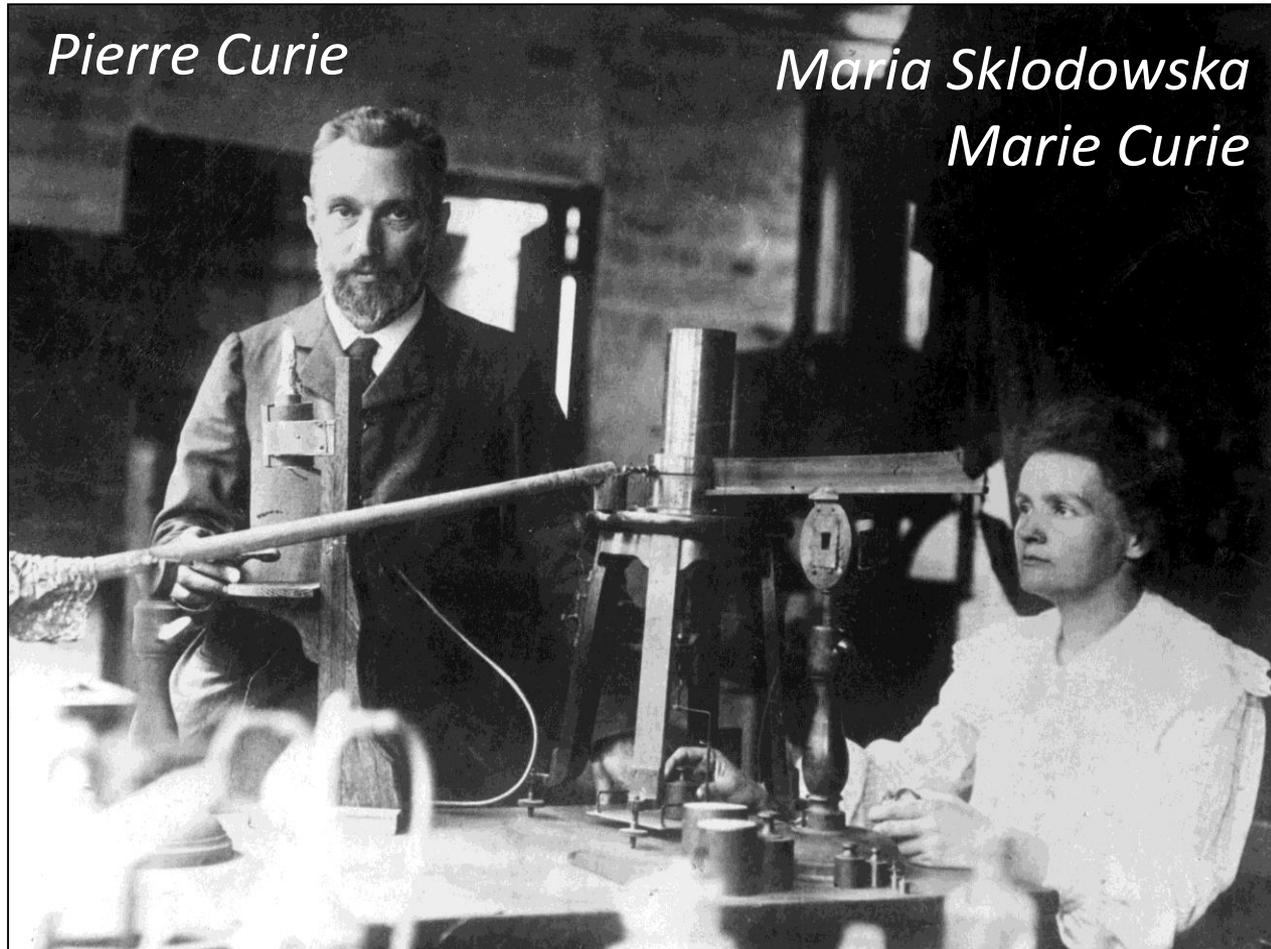


**Electromètre à quadrants**

Joël Pouthas

# Radioactivité

Prix Nobel de physique  
1903



*Pierre Curie*

*Maria Skłodowska  
Marie Curie*

**Polonium**

**1898**

**Radium**

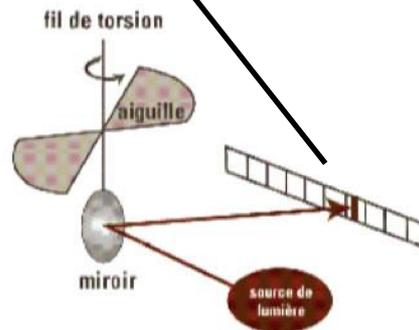
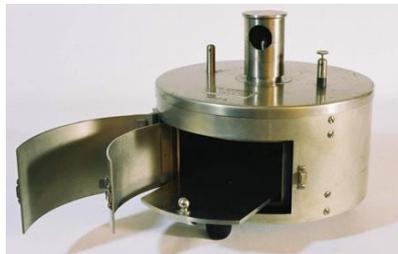
Joël Pouthas

# Dispositif expérimental de Pierre et Marie Curie

*Électromètre de Pierre Curie*



*Chambre d'ionisation*



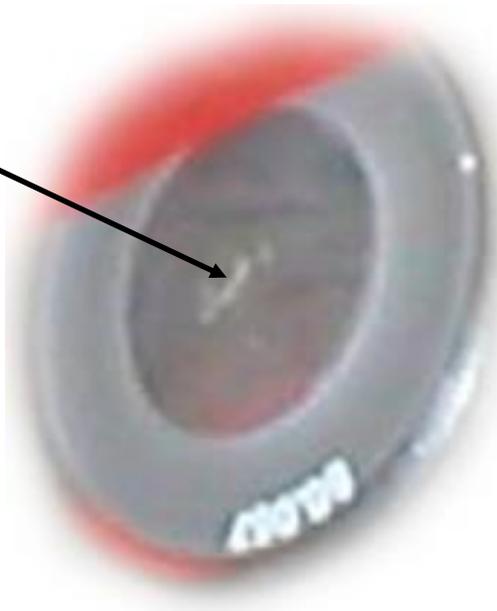
# II

## Unités

# Source Radioactive

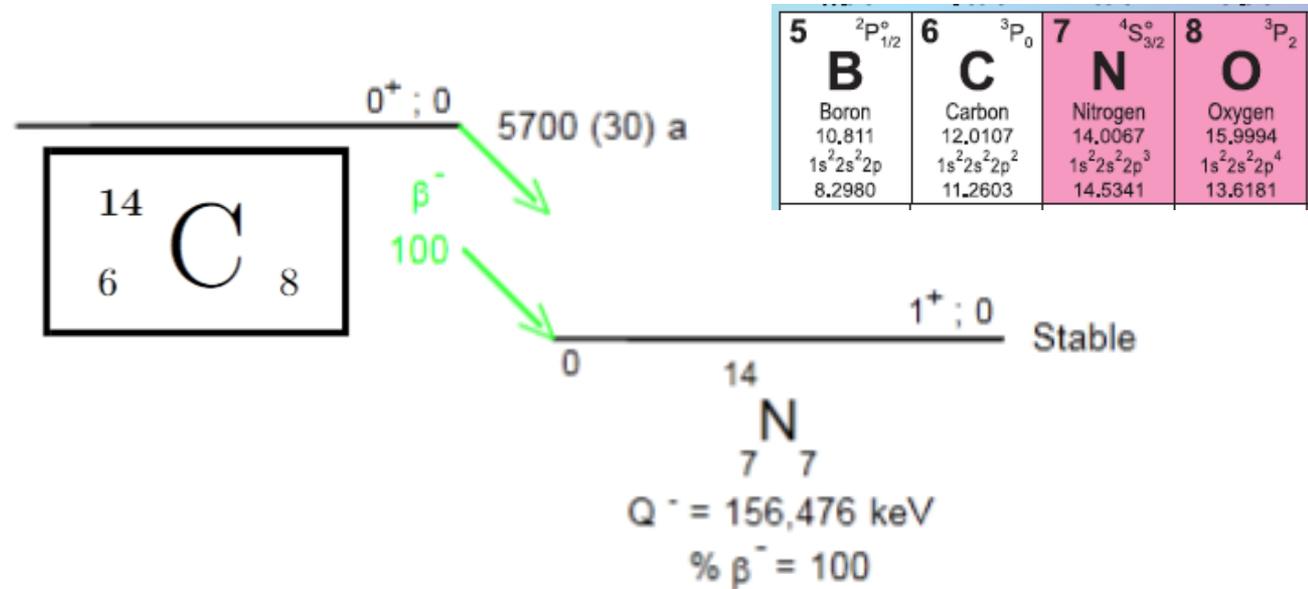
**Source Radioactive** : substance ou objet à l'origine de rayons radioactifs, ondes ou particules invisibles que certains atomes instables émettent en se transformant.

Dépôt de  $^{137}\text{Cs}$



# Source Radioactive

**Source Radioactive** : substance ou objet à l'origine de rayons radioactifs, ondes ou particules invisibles que certains atomes instables émettent en se transformant.



| isotope         | abondance | période           |
|-----------------|-----------|-------------------|
| $^{12}\text{C}$ | 98,93%    | Stable 6 neutrons |
| $^{13}\text{C}$ | 1,07%     | Stable 7 neutrons |
| $^{14}\text{C}$ | traces    | période 5730 ans  |

# Table périodique des éléments

## PERIODIC TABLE Atomic Properties of the Elements

**NIST**  
National Institute of  
Standards and Technology  
U.S. Department of Commerce

**Frequently used fundamental physical constants**  
For the most accurate values of these and other constants, visit [physics.nist.gov/constants](http://physics.nist.gov/constants)  
1 second = 9 192 631 770 periods of radiation corresponding to the transition between the two hyperfine levels of the ground state of <sup>133</sup>Cs

|                          |                                   |  |                      |
|--------------------------|-----------------------------------|--|----------------------|
| speed of light in vacuum | <i>c</i>                          | 299 792 458 m s <sup>-1</sup>                | (exact)              |
| Planck constant          | <i>h</i>                          | 6.6261 × 10 <sup>-34</sup> J s               | ( $\hbar = h/2\pi$ ) |
| elementary charge        | <i>e</i>                          | 1.6022 × 10 <sup>-19</sup> C                 |                      |
| electron mass            | <i>m<sub>e</sub></i>              | 9.1094 × 10 <sup>-31</sup> kg                |                      |
|                          | <i>m<sub>e</sub>c<sup>2</sup></i> | 0.5110 MeV                                   |                      |
| proton mass              | <i>m<sub>p</sub></i>              | 1.6726 × 10 <sup>-27</sup> kg                |                      |
| fine-structure constant  | <i>α</i>                          | 1/137.036                                    |                      |
| Rydberg constant         | <i>R<sub>∞</sub></i>              | 10 973 732 m <sup>-1</sup>                   |                      |
|                          | <i>R<sub>∞</sub>c</i>             | 3.289 842 × 10 <sup>15</sup> Hz              |                      |
|                          | <i>R<sub>∞</sub>hc</i>            | 13.6057 eV                                   |                      |
| Boltzmann constant       | <i>k</i>                          | 1.3807 × 10 <sup>-23</sup> J K <sup>-1</sup> |                      |

- Solids
- Liquids
- Gases
- Artificially Prepared

| Physics Laboratory<br>physics.nist.gov  |   | Standard Reference Data<br>www.nist.gov/srd   |   |   |  |  |  |  |  |   |  |  |  |   |   |   |  |
|---|---|---|---|---|--|--|--|--|--|---|--|--|--|---|---|---|--|
| 13<br>IIIA  | 14<br>IVA   | 15<br>VA  | 16<br>VIA   | 17<br>VIIA  | 18<br>VIIIA  |  |  |  |  |   |  |  |  |   |   |   |  |
| <b>5</b><br><b>B</b><br>Boron<br>10,811<br>1s <sup>2</sup> 2s <sup>2</sup> 2p<br>8.2980 | <b>6</b><br><b>C</b><br>Carbon<br>12,0107<br>1s <sup>2</sup> 2s <sup>2</sup> 2p <sup>2</sup><br>11.2603 | <b>7</b><br><b>N</b><br>Nitrogen<br>14,0067<br>1s <sup>2</sup> 2s <sup>2</sup> 2p <sup>3</sup><br>14.5341         | <b>8</b><br><b>O</b><br>Oxygen<br>15,9994<br>1s <sup>2</sup> 2s <sup>2</sup> 2p <sup>4</sup><br>13.6181           | <b>9</b><br><b>F</b><br>Fluorine<br>18,9984032<br>1s <sup>2</sup> 2s <sup>2</sup> 2p <sup>5</sup><br>17.4228  | <b>10</b><br><b>Ne</b><br>Neon<br>20,1797<br>1s <sup>2</sup> 2s <sup>2</sup> 2p <sup>6</sup><br>21.5645        |  |  |  |  |   |  |  |  |   |   |   |  |
| <b>13</b><br><b>Al</b><br>Aluminum<br>26,9815386<br>[Ne]3s <sup>2</sup> 3p<br>5.9858    | <b>14</b><br><b>Si</b><br>Silicon<br>28,0855<br>[Ne]3s <sup>2</sup> 3p <sup>2</sup><br>10.4867          | <b>15</b><br><b>P</b><br>Phosphorus<br>30,973762<br>[Ne]3s <sup>2</sup> 3p <sup>3</sup><br>10.4867                | <b>16</b><br><b>S</b><br>Sulfur<br>32,065<br>[Ne]3s <sup>2</sup> 3p <sup>4</sup><br>10.3600                       | <b>17</b><br><b>Cl</b><br>Chlorine<br>35,453<br>[Ne]3s <sup>2</sup> 3p <sup>5</sup><br>12.9676                | <b>18</b><br><b>Ar</b><br>Argon<br>39,948<br>[Ne]3s <sup>2</sup> 3p <sup>6</sup><br>15.7596                    |  |  |  |  |   |  |  |  |   |   |   |  |
| <b>19</b><br><b>K</b><br>Potassium<br>39,0983<br>[Ar]4s<br>4.3407                       | <b>20</b><br><b>Ca</b><br>Calcium<br>40,078<br>[Ar]4s <sup>2</sup><br>6.1132                            | <b>21</b><br><b>Sc</b><br>Scandium<br>44,955912<br>[Ar]3d <sup>1</sup> 4s <sup>2</sup><br>6.5615                  | <b>22</b><br><b>Ti</b><br>Titanium<br>47,867<br>[Ar]3d <sup>2</sup> 4s <sup>2</sup><br>6.8281                     | <b>23</b><br><b>V</b><br>Vanadium<br>50,9415<br>[Ar]3d <sup>3</sup> 4s <sup>2</sup><br>6.7462                 | <b>24</b><br><b>Cr</b><br>Chromium<br>51,9961<br>[Ar]3d <sup>5</sup> 4s<br>6.7665                              | <b>25</b><br><b>Mn</b><br>Manganese<br>54,938045<br>[Ar]3d <sup>5</sup> 4s <sup>2</sup><br>7.4340            | <b>26</b><br><b>Fe</b><br>Iron<br>55,845<br>[Ar]3d <sup>6</sup> 4s <sup>2</sup><br>7.9024                      | <b>27</b><br><b>Co</b><br>Cobalt<br>58,933195<br>[Ar]3d <sup>7</sup> 4s <sup>2</sup><br>7.8810     | <b>28</b><br><b>Ni</b><br>Nickel<br>58,6934<br>[Ar]3d <sup>8</sup> 4s <sup>2</sup><br>7.6399       | <b>29</b><br><b>Cu</b><br>Copper<br>63,546<br>[Ar]3d <sup>10</sup> 4s<br>7.7264                                 | <b>30</b><br><b>Zn</b><br>Zinc<br>65,38<br>[Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup><br>9.3942      | <b>31</b><br><b>Ga</b><br>Gallium<br>69,723<br>[Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p<br>5.9993 | <b>32</b><br><b>Ge</b><br>Germanium<br>72,64<br>[Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>2</sup><br>7.8994 | <b>33</b><br><b>As</b><br>Arsenic<br>74,9216<br>[Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>3</sup><br>9.7886  | <b>34</b><br><b>Se</b><br>Selenium<br>78,96<br>[Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>4</sup><br>9.7524   | <b>35</b><br><b>Br</b><br>Bromine<br>79,904<br>[Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>5</sup><br>11.8138  | <b>36</b><br><b>Kr</b><br>Krypton<br>83,798<br>[Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>6</sup><br>13,9996 |
| <b>37</b><br><b>Rb</b><br>Rubidium<br>85,4678<br>[Kr]5s<br>4.1771                       | <b>38</b><br><b>Sr</b><br>Strontium<br>87,62<br>[Kr]5s <sup>2</sup><br>5.6949                           | <b>39</b><br><b>Y</b><br>Yttrium<br>88,90585<br>[Kr]4d <sup>1</sup> 5s <sup>2</sup><br>6.2173                     | <b>40</b><br><b>Zr</b><br>Zirconium<br>91,224<br>[Kr]4d <sup>2</sup> 5s <sup>2</sup><br>6.6339                    | <b>41</b><br><b>Nb</b><br>Niobium<br>92,90638<br>[Kr]4d <sup>4</sup> 5s<br>6.7589                             | <b>42</b><br><b>Mo</b><br>Molybdenum<br>95,96<br>[Kr]4d <sup>5</sup> 5s<br>7.0924                              | <b>43</b><br><b>Tc</b><br>Technetium<br>(98)<br>[Kr]4d <sup>5</sup> 5s <sup>2</sup><br>7.28                  | <b>44</b><br><b>Ru</b><br>Ruthenium<br>101,07<br>[Kr]4d <sup>7</sup> 5s<br>7.3605                              | <b>45</b><br><b>Rh</b><br>Rhodium<br>102,90550<br>[Kr]4d <sup>8</sup> 5s<br>7.4589                 | <b>46</b><br><b>Pd</b><br>Palladium<br>106,42<br>[Kr]4d <sup>10</sup><br>8.3369                    | <b>47</b><br><b>Ag</b><br>Silver<br>107,8682<br>[Kr]4d <sup>10</sup> 5s<br>7.5762                               | <b>48</b><br><b>Cd</b><br>Cadmium<br>112,411<br>[Kr]4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup><br>8.9938 | <b>49</b><br><b>In</b><br>Indium<br>114,818<br>[Kr]4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup> 5p<br>7.3439 | <b>50</b><br><b>Sn</b><br>Tin<br>118,710<br>[Kr]4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup> 5p <sup>2</sup><br>7.3439     | <b>51</b><br><b>Sb</b><br>Antimony<br>121,760<br>[Kr]4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup> 5p <sup>3</sup><br>8.6084 | <b>52</b><br><b>Te</b><br>Tellurium<br>127,60<br>[Kr]4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup> 5p <sup>4</sup><br>9.0096 | <b>53</b><br><b>I</b><br>Iodine<br>126,90447<br>[Kr]4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup> 5p <sup>5</sup><br>10,4513 | <b>54</b><br><b>Xe</b><br>Xenon<br>131,293<br>[Kr]4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup> 5p <sup>6</sup><br>12,1298  |
| <b>55</b><br><b>Cs</b><br>Cesium<br>132,9054519<br>[Xe]6s<br>3.8939                     | <b>56</b><br><b>Ba</b><br>Barium<br>137,327<br>[Xe]6s <sup>2</sup><br>5.2117                            | <b>72</b><br><b>Hf</b><br>Hafnium<br>178,49<br>[Xe]4f <sup>14</sup> 5d <sup>2</sup> 6s <sup>2</sup><br>6.8251     | <b>73</b><br><b>Ta</b><br>Tantalum<br>180,94788<br>[Xe]4f <sup>14</sup> 5d <sup>3</sup> 6s <sup>2</sup><br>7.5496 | <b>74</b><br><b>W</b><br>Tungsten<br>183,84<br>[Xe]4f <sup>14</sup> 5d <sup>4</sup> 6s <sup>2</sup><br>7.8640 | <b>75</b><br><b>Re</b><br>Rhenium<br>186,207<br>[Xe]4f <sup>14</sup> 5d <sup>5</sup> 6s <sup>2</sup><br>7.8335 | <b>76</b><br><b>Os</b><br>Osmium<br>190,23<br>[Xe]4f <sup>14</sup> 5d <sup>6</sup> 6s <sup>2</sup><br>8.4382 | <b>77</b><br><b>Ir</b><br>Iridium<br>192,217<br>[Xe]4f <sup>14</sup> 5d <sup>7</sup> 6s <sup>2</sup><br>8.9670 | <b>78</b><br><b>Pt</b><br>Platinum<br>195,084<br>[Xe]4f <sup>14</sup> 5d <sup>9</sup> 6s<br>8.9588 | <b>79</b><br><b>Au</b><br>Gold<br>196,966569<br>[Xe]4f <sup>14</sup> 5d <sup>10</sup> 6s<br>9.2255 | <b>80</b><br><b>Hg</b><br>Mercury<br>200,59<br>10,4375<br>[Xe]4f <sup>14</sup> 5d <sup>10</sup> 6s <sup>2</sup> | <b>81</b><br><b>Tl</b><br>Thallium<br>204,3833<br>[Hg]6p<br>6.1082                             | <b>82</b><br><b>Pb</b><br>Lead<br>207,2<br>[Hg]6p <sup>2</sup><br>7.4167                         | <b>83</b><br><b>Bi</b><br>Bismuth<br>208,98040<br>[Hg]6p <sup>3</sup><br>7.2855                                | <b>84</b><br><b>Po</b><br>Polonium<br>(209)<br>[Hg]6p <sup>4</sup><br>8.414                                     | <b>85</b><br><b>At</b><br>Astatine<br>(210)<br>[Hg]6p <sup>5</sup>  | <b>86</b><br><b>Rn</b><br>Radon<br>(222)<br>[Hg]6p <sup>6</sup><br>10,7485                                      |  |
| <b>87</b><br><b>Fr</b><br>Francium<br>(223)<br>[Rn]7s<br>4.0727                         | <b>88</b><br><b>Ra</b><br>Radium<br>(226)<br>[Rn]7s <sup>2</sup><br>5.2784                              | <b>104</b><br><b>Rf</b><br>Rutherfordium<br>(261)<br>[Rn]5f <sup>14</sup> 6d <sup>2</sup> 7s <sup>2</sup><br>6.07 | <b>105</b><br><b>Db</b><br>Dubnium<br>(268)   | <b>106</b><br><b>Sg</b><br>Seaborgium<br>(271)  | <b>107</b><br><b>Bh</b><br>Bohrium<br>(272)  | <b>108</b><br><b>Hs</b><br>Hassium<br>(277)  | <b>109</b><br><b>Mt</b><br>Meitnerium<br>(276)   | <b>110</b><br><b>Ds</b><br>Darmstadtium<br>(281)   | <b>111</b><br><b>Rg</b><br>Roentgenium<br>(280)  | <b>112</b><br><b>Cn</b><br>Copernicium<br>(285)   | <b>113</b><br><b>Uut</b><br>Ununtrium<br>(284)   | <b>114</b><br><b>Uuq</b><br>Ununquadium<br>(289)   | <b>115</b><br><b>Uup</b><br>Ununpentium<br>(288)   | <b>116</b><br><b>Uuh</b><br>Ununhexium<br>(293)   | <b>117</b><br><b>Uus</b><br>Ununseptium<br>(294)  | <b>118</b><br><b>Uuo</b><br>Ununoctium<br>(294)   |  |

Period

Group  
1  
IA

**1**  
**H**  
Hydrogen  
1,00794  
1s  
13,5984

**2**  
**He**  
Helium  
4,002602  
1s<sup>2</sup>  
24,5874

**3**  
**Li**  
Lithium  
6,941  
1s<sup>2</sup>2s  
5,3917

**4**  
**Be**  
Beryllium  
9,012182  
1s<sup>2</sup>2s<sup>2</sup>  
9,3227

**11**  
**Na**  
Sodium  
22,98976928  
[Ne]3s  
5,1391

**12**  
**Mg**  
Magnesium  
24,3050  
[Ne]3s<sup>2</sup>  
7,6462

**19**  
**K**  
Potassium  
39,0983  
[Ar]4s  
4,3407

**20**  
**Ca**  
Calcium  
40,078  
[Ar]4s<sup>2</sup>  
6,1132

**37**  
**Rb**  
Rubidium  
85,4678  
[Kr]5s  
4,1771

**38**  
**Sr**  
Strontium  
87,62  
[Kr]5s<sup>2</sup>  
5,6949

**55**  
**Cs**  
Cesium  
132,9054519  
[Xe]6s  
3,8939

**56**  
**Ba**  
Barium  
137,327  
[Xe]6s<sup>2</sup>  
5,2117

**87**  
**Fr**  
Francium  
(223)  
[Rn]7s  
4,0727

**88**  
**Ra**  
Radium  
(226)  
[Rn]7s<sup>2</sup>  
5,2784



# Unités - Radioactivité

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

$\lambda$ : constante de désintégration.

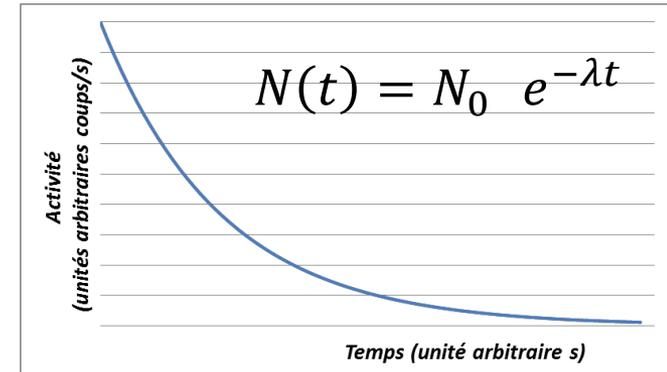
$N$ : nombre de noyaux radioactifs.

$t_{1/2}$ : période radioactive.

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

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

Après un temps de  $t_{1/2}$ , une source a perdu la moitié de son activité



**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*

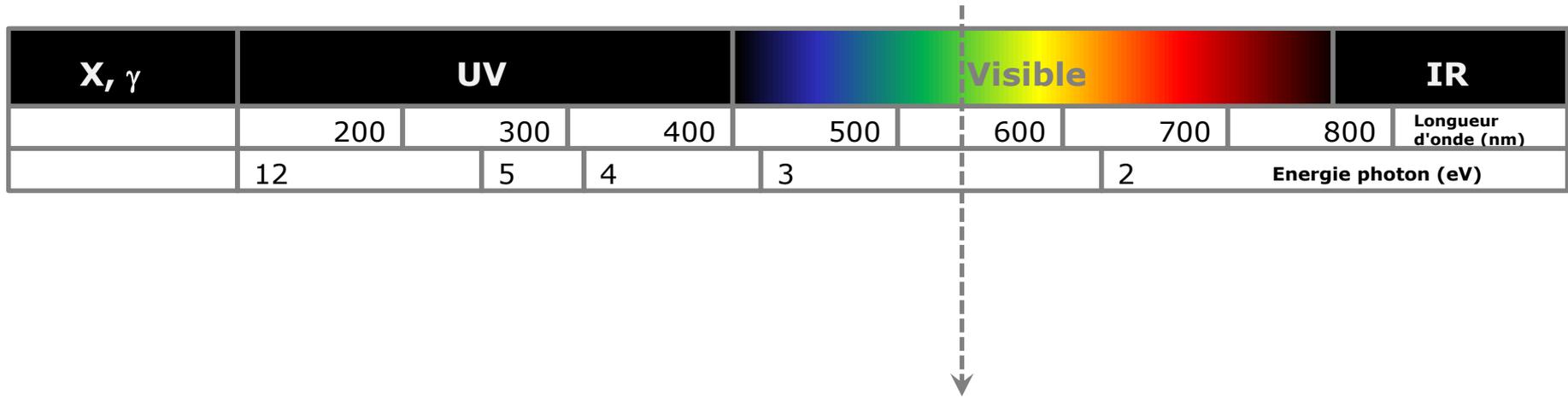
*La longueur d'onde  $\lambda$  est reliée à l'énergie  $E$  par:*

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

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

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

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



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

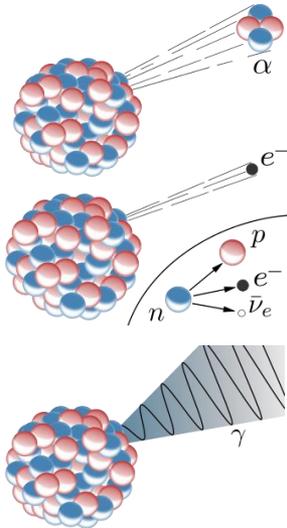
$$E = \frac{1240}{550} = 2,25 \text{ eV}$$

# III

## Principes de détection

# Radioactivité

## Radioactivité : 3 types de rayonnement



**Radioactivité  $\alpha$  :**

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

**Radioactivité  $\beta$  :**

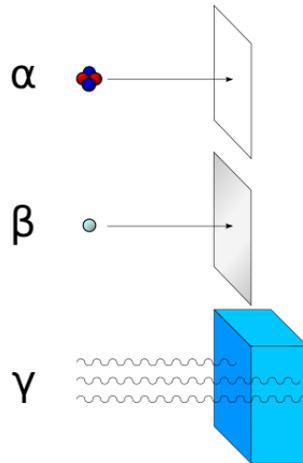
**Emission d'une particule  $\beta$  (électron ou positron), fortement ionisante**

**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).**

# 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 particules - matière

Particules **non** chargées

Neutrons

Rayons X &  $\gamma$



Pas d'interaction électromagnétique avec les électrons du milieu:  
Interaction "catastrophe"



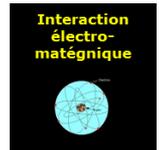
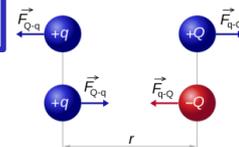
Particules chargées

Particules chargées Lourdes

Electrons rapides



Interaction électromagnétique avec les électrons du milieu

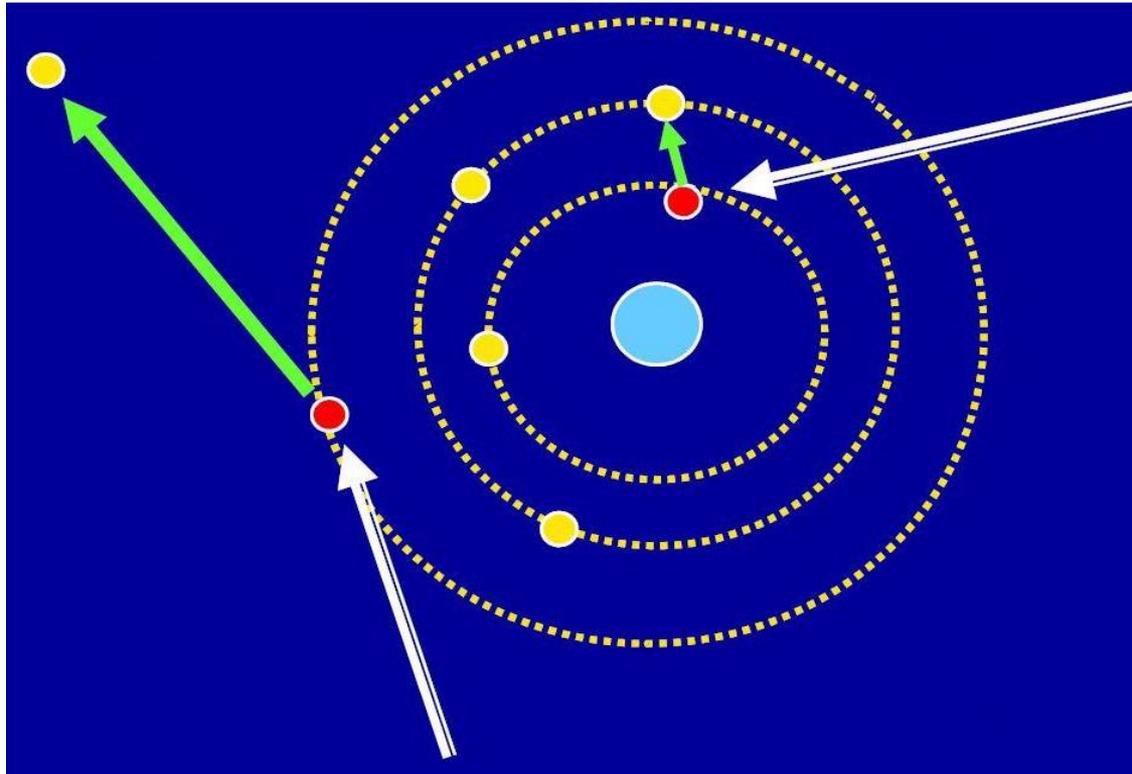


1. Mise en **mouvement**, de manière directe ou indirecte, des **électrons** du milieu d'interaction
2. On ne sait **détecter** un rayonnement que s'il met en mouvement les électrons du milieu

# 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.

# 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

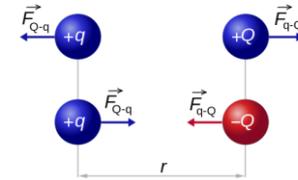


Formule de Bethe

Perte d'énergie dans une épaisseur  $dx$  de matière

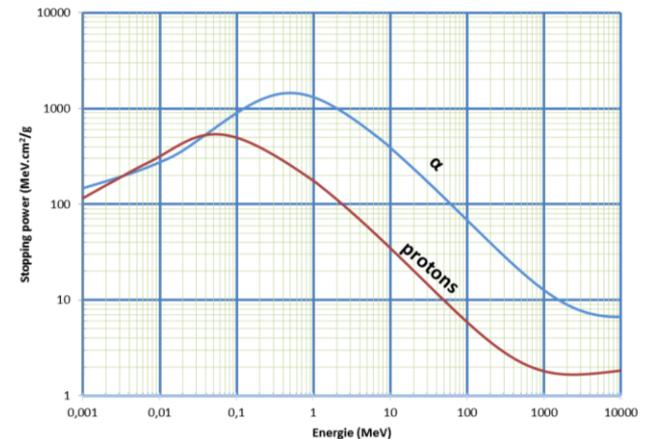
$$-\frac{dE}{dx} = \frac{z^2 m}{E} f(E)$$

$z$ : 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 :

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

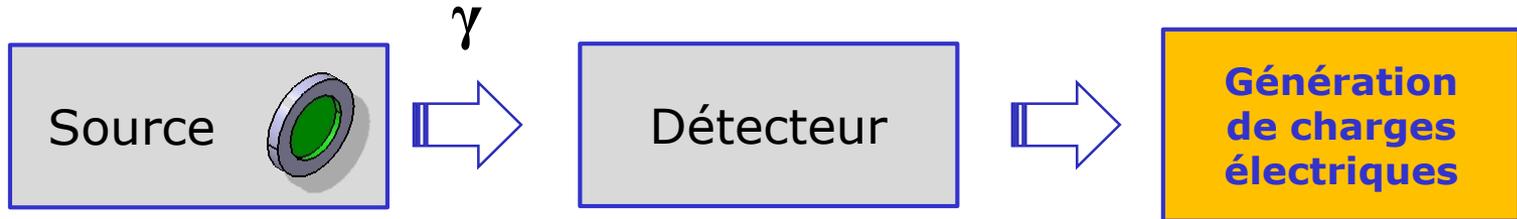
- $10^5$  électrons  $\rightarrow 1,6 \cdot 10^{-14}$  Coulomb (1 électron =  $1,6 \cdot 10^{-19}$  C)
- Dans une capacité de 1 pF ( $V=Q/C$ )  $\rightarrow 16$ mV



## 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

# Fluctuations statistiques

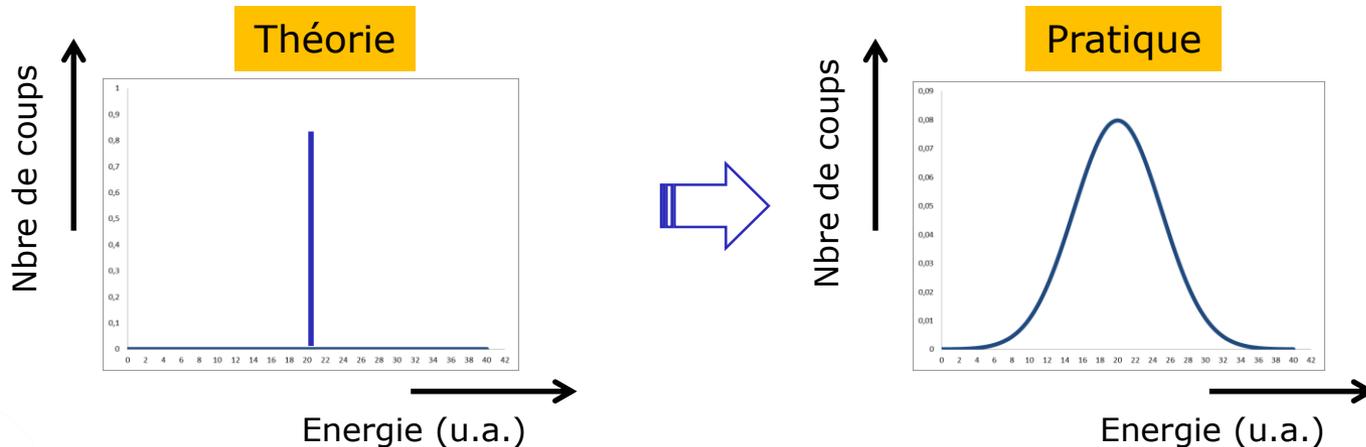


## Un exemple

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:



# 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**



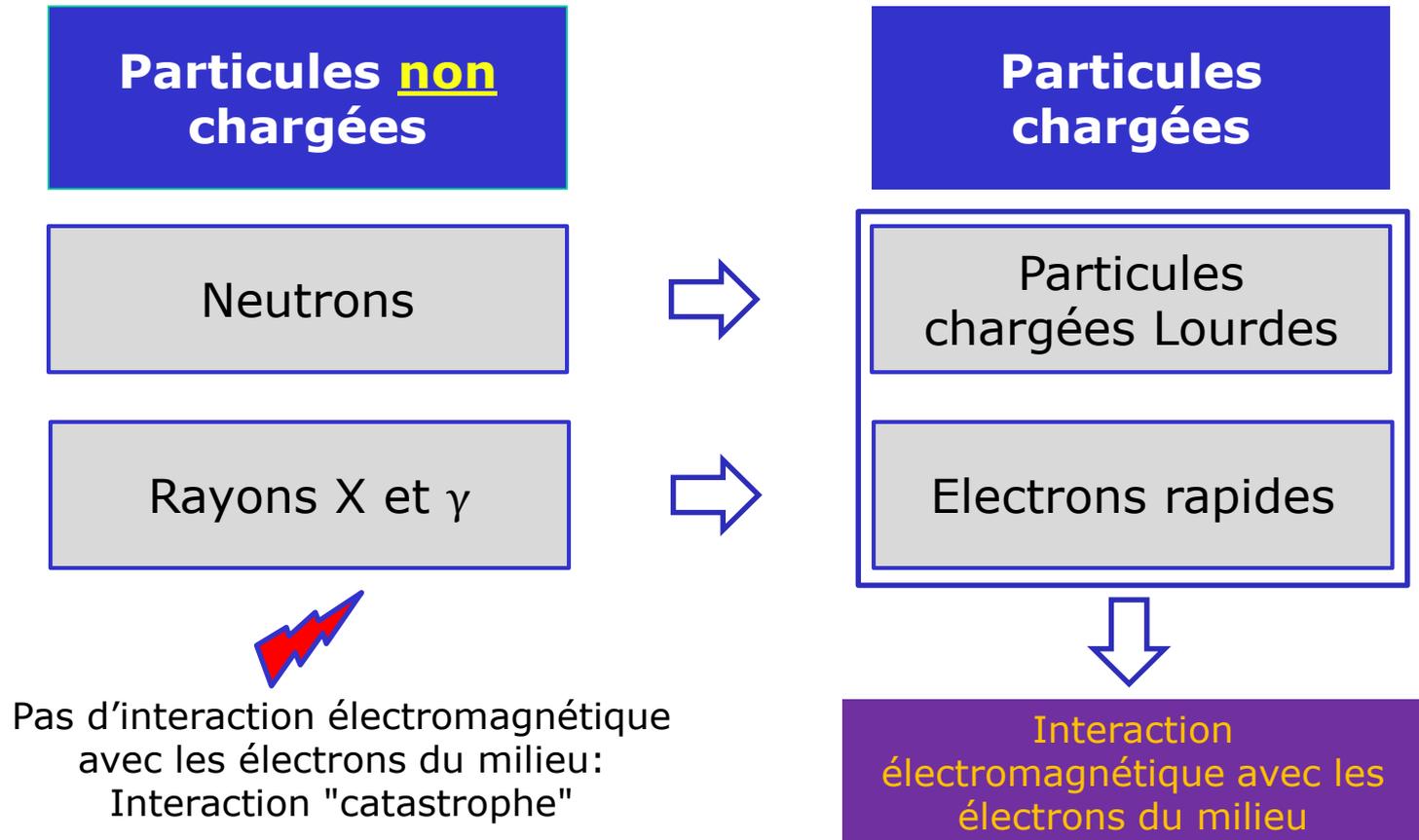
- *On observe la scintillation due au retour à l'équilibre des paires créées:*

**→ détecteurs à scintillation**

# IV

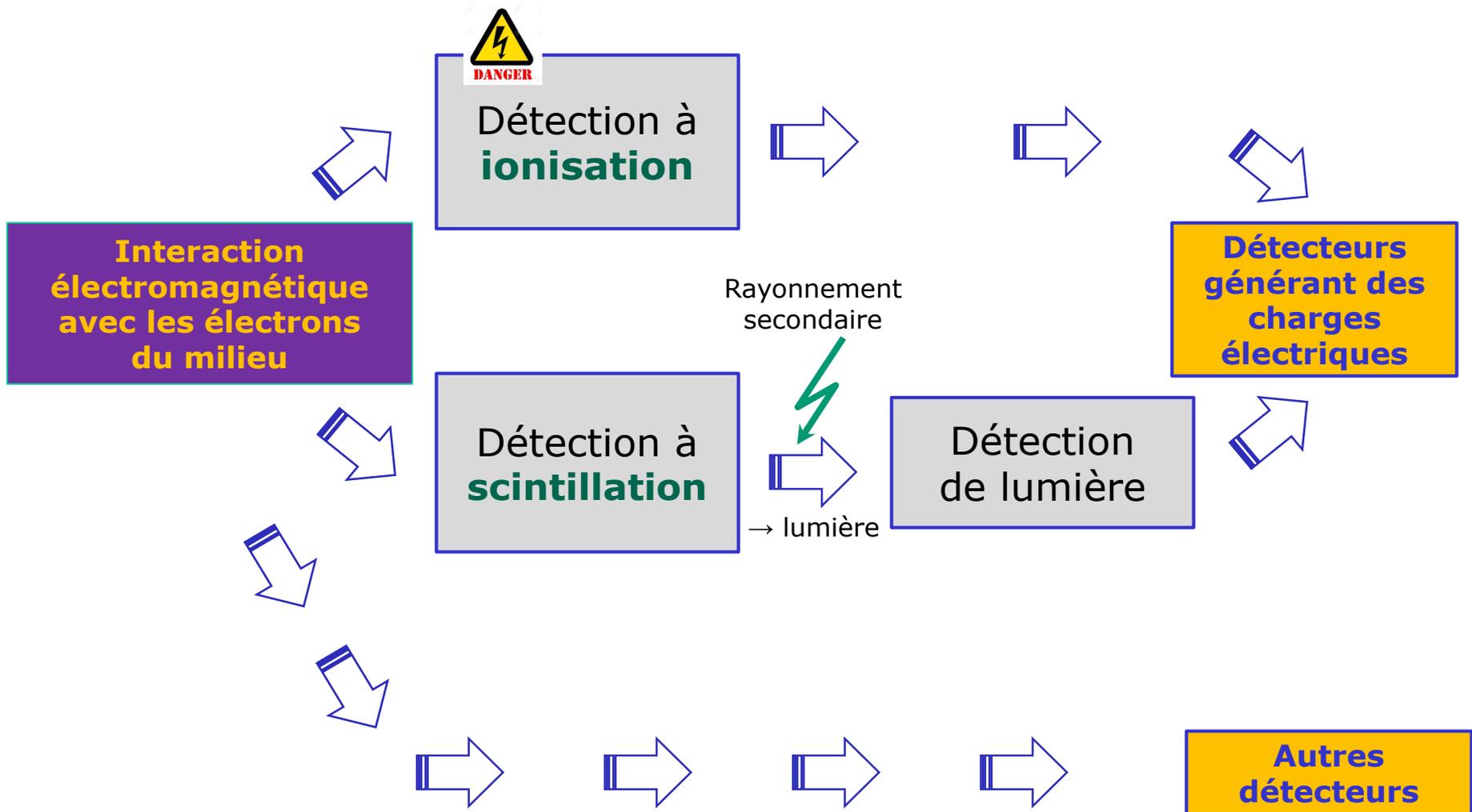
## Les critères de détection

# La base de la détection

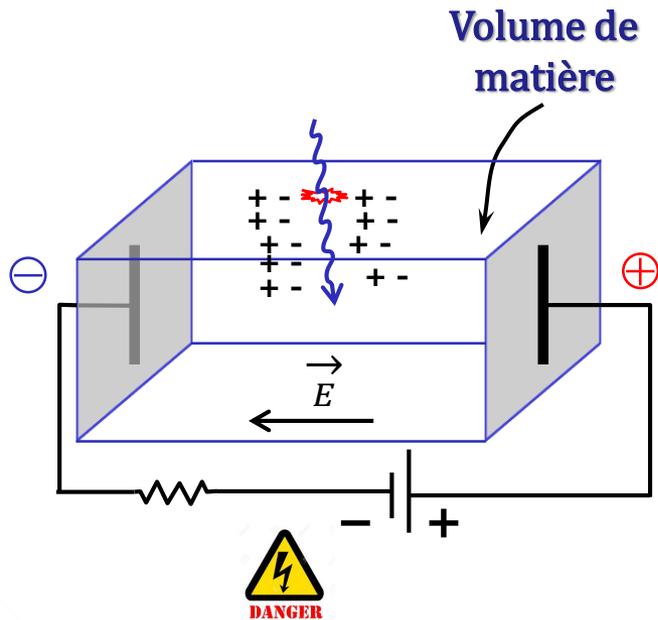
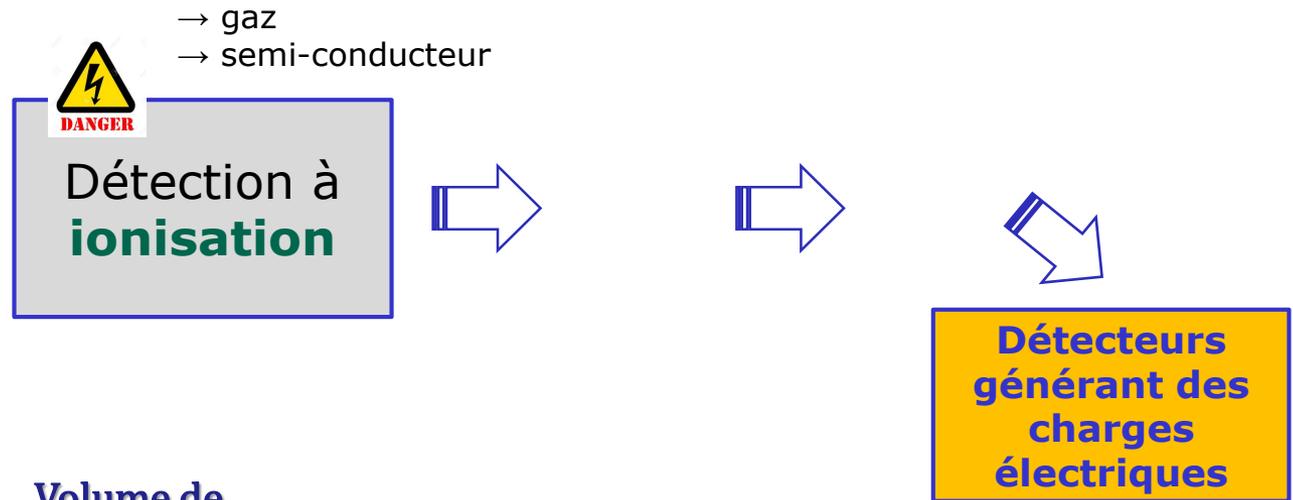


1. Mise en **mouvement**, de manière directe ou indirecte, des **électrons** du milieu d'interaction
2. On ne sait **détecter** un rayonnement que s'il met en mouvement les électrons du milieu

# Ionisation & scintillation



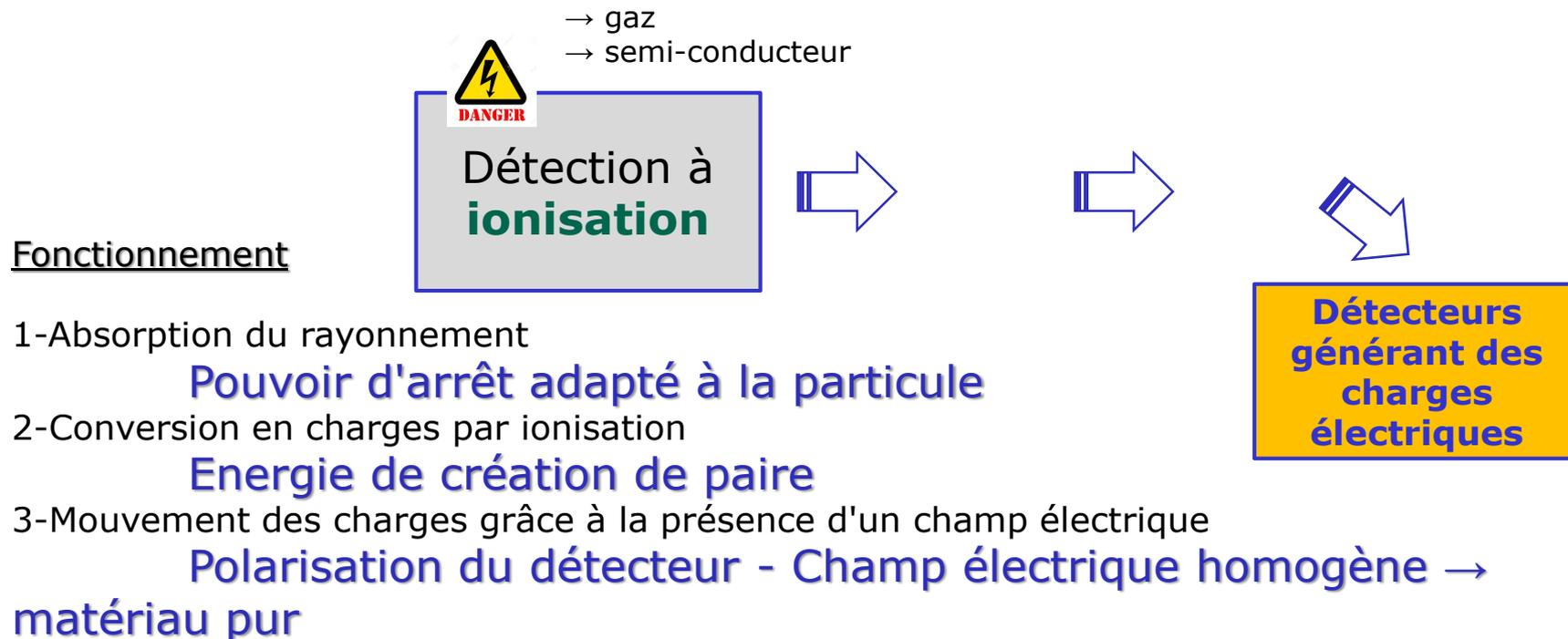
# Fonctionnement de la détection à ionisation



## Fonctionnement

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

# Critères de la détection à ionisation



## Conséquences

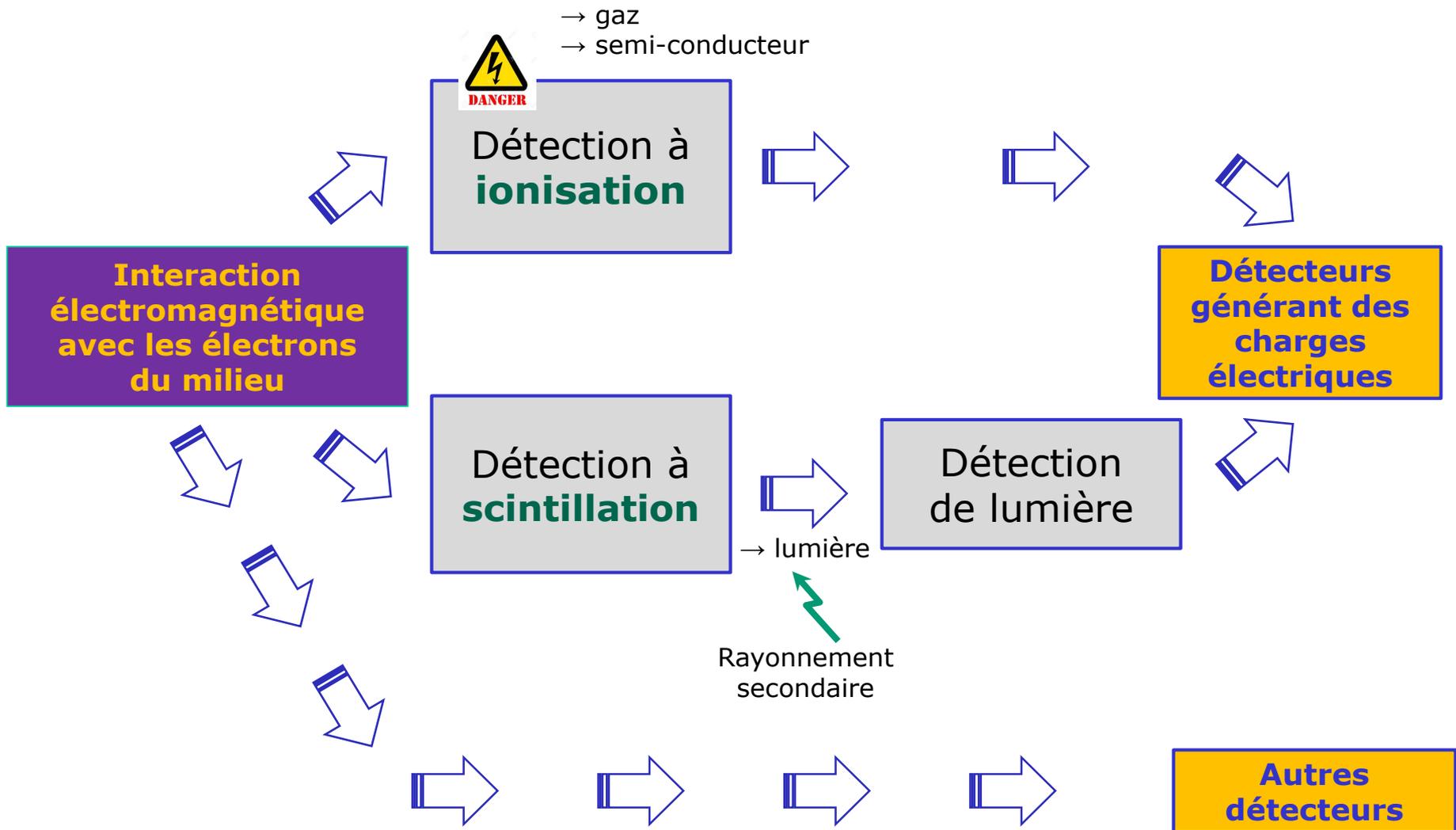
→ Peu de charges doivent être libres dans le matériau pour ne pas perturber le champ électrique & Les charges générées doivent pouvoir se mouvoir

**Matériau résistif pur mais non isolant**

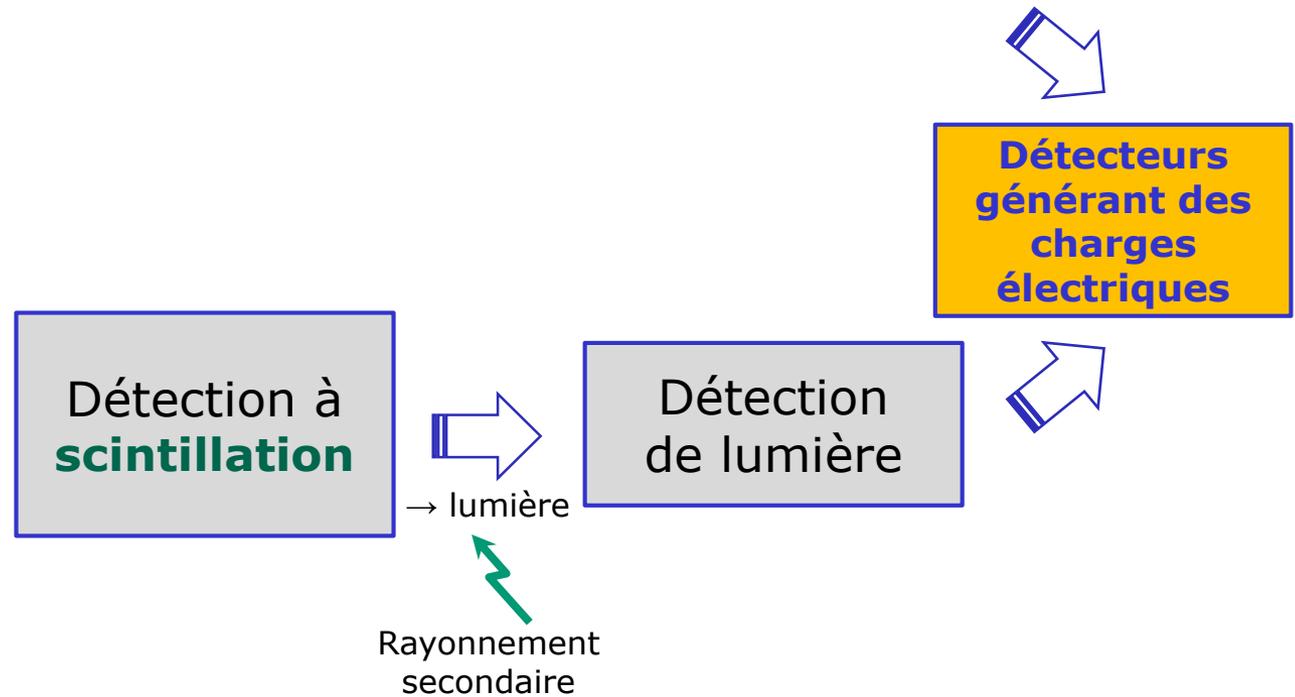
2 familles de candidats

→ **Les gaz et les semi-conducteurs**

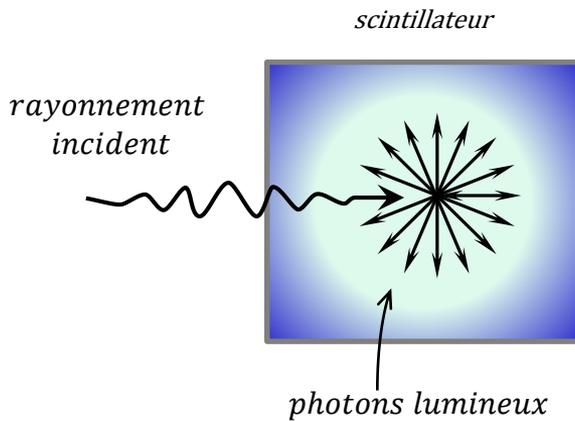
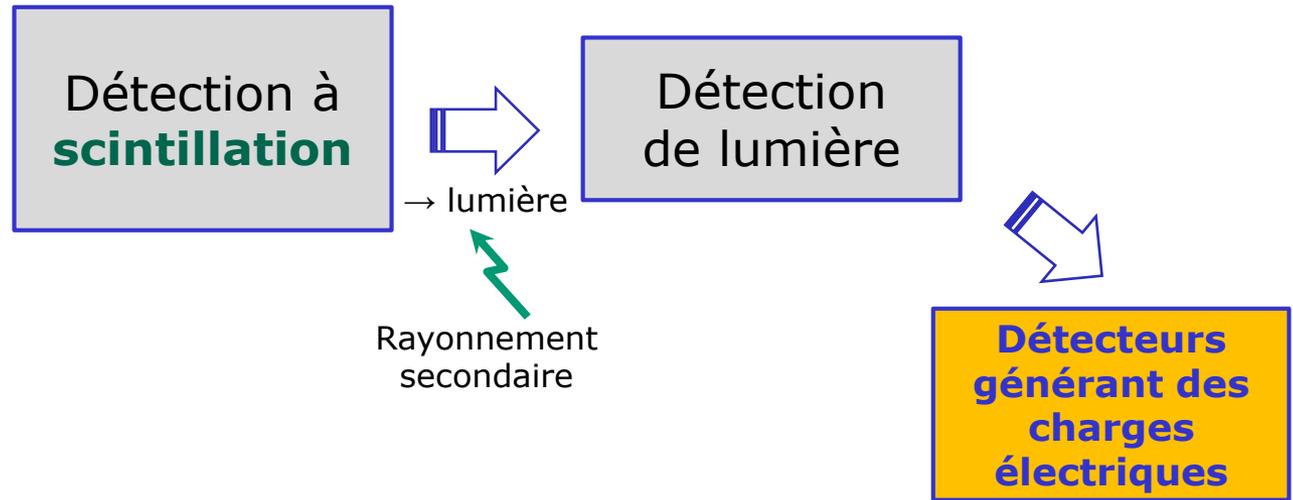
# Ionisation & scintillation



# scintillation



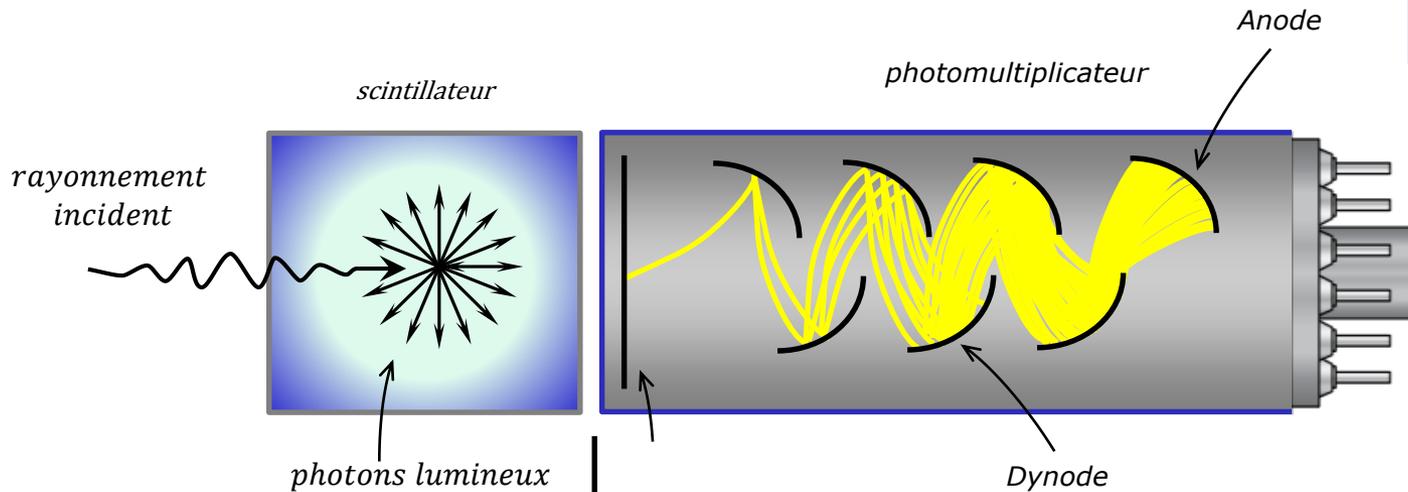
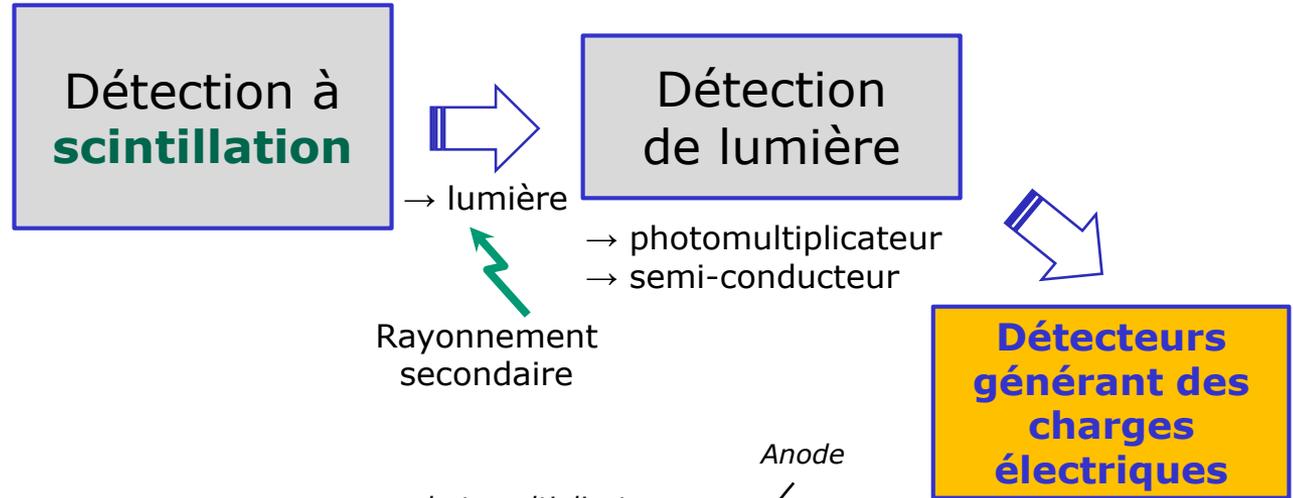
# Fonctionnement de la détection à scintillation



## Fonctionnement scintillateur

- 1-Absorption du rayonnement
- 2-Conversion en lumière par scintillation  
(2a-Conversion en charges par ionisation puis 2b-retour à l'équilibre des électrons)

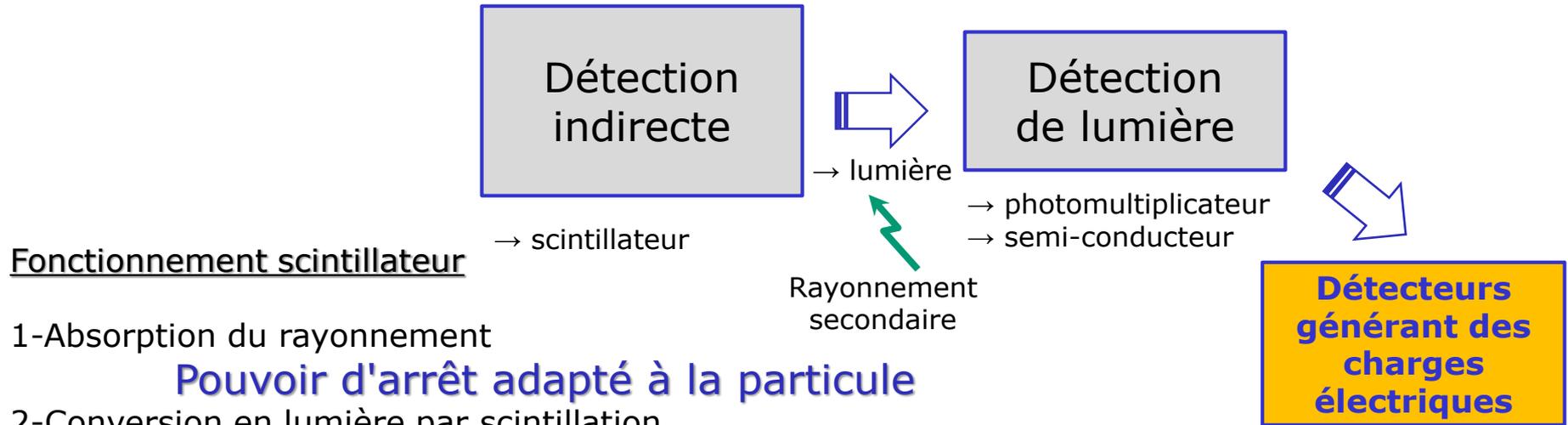
# Fonctionnement de la détection à scintillation



**Scintillateur**  
Conversion rayonnement ionisant en lumière

**Photo-détecteur**  
Conversion lumière en signal électrique  
(→ photomultiplicateur, → semi-conducteur)

# 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**

## Condition

→ **Le scintillateur doit être Transparent à sa propre lumière de scintillation**

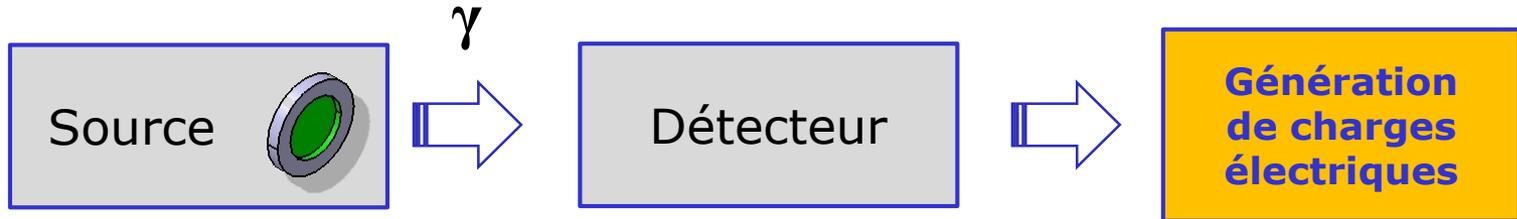
## 3 familles de candidats

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

**V**

# **Fluctuations statistiques**

# Fluctuations statistiques

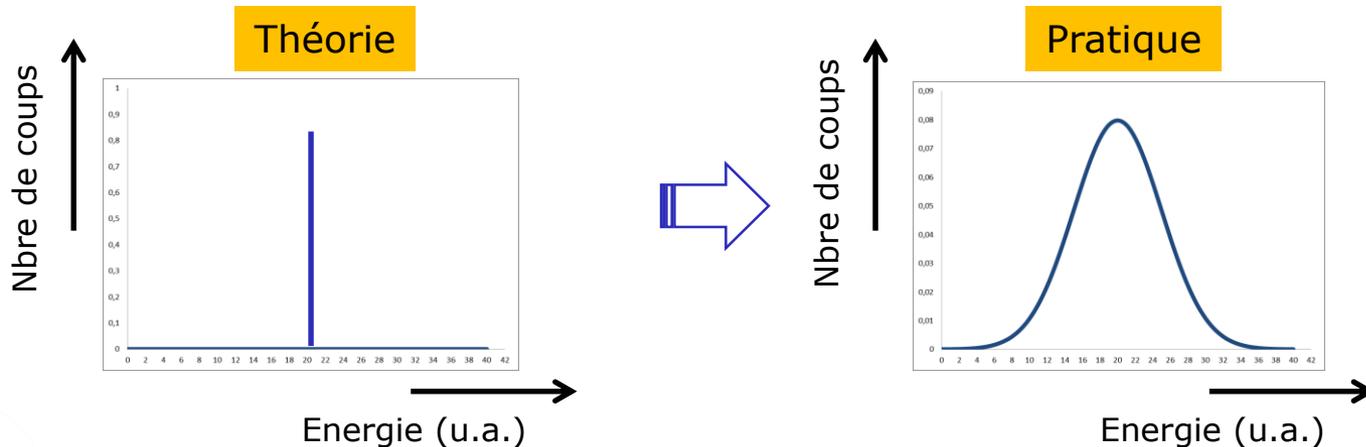


## Un exemple

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:



# Table périodique des éléments

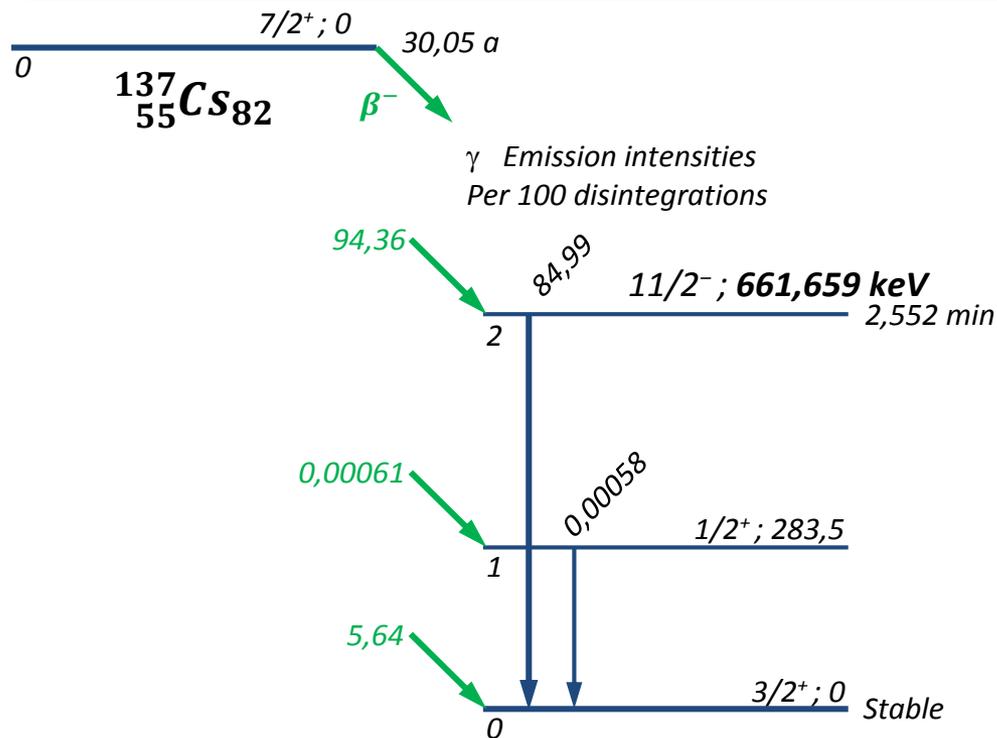
| PERIODIC TABLE                    |   |   |   |   |   |  |  |   |   |   |   |   |  |   |  |  |  | NIST<br>National Institute of Standards and Technology<br>U.S. Department of Commerce             |   |   |   |   |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |       |
|-----------------------------------|---|---|---|---|---|--|--|---|---|---|---|---|--|---|--|--|--|---|---|---|---|---|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|-------|
| Atomic Properties of the Elements |   |   |   |   |   |  |  |   |   |   |   |   |  |   |  |  |  | Physics Laboratory<br>physics.nist.gov  |   |   |   |   | Standard Reference Data<br>www.nist.gov/srd  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |       |
| Group                             |   |   |   |   |   |  |  |   |   |   |   |   |  |   |  |  | 18   |   |   |   |   |   |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |       |
| 1                                 |   |   |   |   |   |  |  |   |   |   |   |   |  |   |  |  | 2  |   |   |   |   |   |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |       |
| IA                                |   |   |   |   |   |  |  |   |   |   |   |   |  |   |  |  | IIA  |   |   |   |   |   |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | VIIIA |
| 1                                 | <b>H</b><br>Hydrogen<br>1,00794<br>1s<br>13.5984              |   |   |   |   |  |  |   |   |   |   |   |  |   |  |  |  | <b>He</b><br>Helium<br>4,002602<br>1s <sup>2</sup><br>24.5874                                     |   |   |   |   |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |       |
| 2                                 | <b>Li</b><br>Lithium<br>6,941<br>1s <sup>2</sup> 2s<br>5.3917 | <b>Be</b><br>Beryllium<br>9,012182<br>1s <sup>2</sup> 2s <sup>2</sup><br>9.3227 |   |   |   |  |  |   |   |   |   |   |  |   |  |  |  |   | <b>B</b><br>Boron<br>10,811<br>1s <sup>2</sup> 2s <sup>2</sup> 2p<br>8.2980 | <b>C</b><br>Carbon<br>12,0107<br>1s <sup>2</sup> 2s <sup>2</sup> 2p <sup>2</sup><br>11.2603 | <b>N</b><br>Nitrogen<br>14,0067<br>1s <sup>2</sup> 2s <sup>2</sup> 2p <sup>3</sup><br>14.5341 | <b>O</b><br>Oxygen<br>15,9994<br>1s <sup>2</sup> 2s <sup>2</sup> 2p <sup>4</sup><br>13.6181 | <b>F</b><br>Fluorine<br>18,9984032<br>1s <sup>2</sup> 2s <sup>2</sup> 2p <sup>5</sup><br>17.4228 | <b>Ne</b><br>Neon<br>20,1797<br>1s <sup>2</sup> 2s <sup>2</sup> 2p <sup>6</sup><br>21.5645 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |       |
| 3                                 | <b>Na</b><br>Sodium<br>22,98976928<br>[Ne]3s<br>5.1391        | <b>Mg</b><br>Magnesium<br>24,3050<br>[Ne]3s <sup>2</sup><br>7.6462              |   |   |   |  |  |   |   |   |   |   |  |   |  |  |  |   | <b>Al</b><br>Aluminum<br>26,9815386<br>[Ne]3s <sup>2</sup> 3p<br>5.9858     | <b>Si</b><br>Silicon<br>28,0855<br>[Ne]3s <sup>2</sup> 3p <sup>2</sup><br>10.4867           | <b>P</b><br>Phosphorus<br>30,973762<br>[Ne]3s <sup>2</sup> 3p <sup>3</sup><br>10.4867         | <b>S</b><br>Sulfur<br>32,065<br>[Ne]3s <sup>2</sup> 3p <sup>4</sup><br>10.3600              | <b>Cl</b><br>Chlorine<br>35,453<br>[Ne]3s <sup>2</sup> 3p <sup>5</sup><br>12.9676                | <b>Ar</b><br>Argon<br>39,948<br>[Ne]3s <sup>2</sup> 3p <sup>6</sup><br>15.7596             |  |  |  |  |  |  |  |  |  |       |
| 4                                 | <b>K</b><br>Potassium<br>39,0983<br>[Ar]4s<br>4.3407          | <b>Ca</b><br>Calcium<br>40,078<br>[Ar]4s <sup>2</sup><br>6.1132                 | <b>Sc</b><br>Scandium<br>44,955912<br>[Ar]3d <sup>4</sup> 4s <sup>2</sup><br>6.5615 | <b>Ti</b><br>Titanium<br>47,867<br>[Ar]3d <sup>2</sup> 4s <sup>2</sup><br>6.8281  | <b>V</b><br>Vanadium<br>50,9415<br>[Ar]3d <sup>3</sup> 4s <sup>2</sup><br>6.7462                    | <b>Cr</b><br>Chromium<br>51,9961<br>[Ar]3d <sup>5</sup> 4s<br>6.7665                                 | <b>Mn</b><br>Manganese<br>54,938045<br>[Ar]3d <sup>5</sup> 4s <sup>2</sup><br>7.4340             | <b>Fe</b><br>Iron<br>55,845<br>[Ar]3d <sup>6</sup> 4s <sup>2</sup><br>7.9024                      | <b>Co</b><br>Cobalt<br>58,933195<br>[Ar]3d <sup>7</sup> 4s <sup>2</sup><br>7.8810               | <b>Ni</b><br>Nickel<br>58,6934<br>[Ar]3d <sup>8</sup> 4s <sup>2</sup><br>7.6399                   | <b>Cu</b><br>Copper<br>63,546<br>[Ar]3d <sup>10</sup> 4s<br>7.7264                    | <b>Zn</b><br>Zinc<br>65,38<br>[Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup><br>9.3942          | <b>Ga</b><br>Gallium<br>69,723<br>[Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p<br>5.9993                | <b>Ge</b><br>Germanium<br>72,64<br>[Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>2</sup><br>7.8994 | <b>As</b><br>Arsenic<br>74,9216<br>[Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>3</sup><br>9.7886  | <b>Se</b><br>Selenium<br>78,96<br>[Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>4</sup><br>9.7524   | <b>Br</b><br>Bromine<br>79,904<br>[Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>5</sup><br>11.8138  | <b>Kr</b><br>Krypton<br>83,798<br>[Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>6</sup><br>13.9996 |   |   |   |   |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |       |
| 5                                 | <b>Rb</b><br>Rubidium<br>85,4678<br>[Kr]5s<br>4.1771          | <b>Sr</b><br>Strontium<br>87,62<br>[Kr]5s <sup>2</sup><br>5.6949                | <b>Y</b><br>Yttrium<br>88,90585<br>[Kr]4d <sup>5</sup> 5s <sup>2</sup><br>6.2173    | <b>Zr</b><br>Zirconium<br>91,224<br>[Kr]4d <sup>5</sup> 5s <sup>2</sup><br>6.6339 | <b>Nb</b><br>Niobium<br>92,90638<br>[Kr]4d <sup>5</sup> 5s<br>6.7589                                | <b>Mo</b><br>Molybdenum<br>95,96<br>[Kr]4d <sup>5</sup> 5s <sup>2</sup><br>7.0924                    | <b>Tc</b><br>Technetium<br>(98)<br>[Kr]4d <sup>5</sup> 5s <sup>2</sup><br>7.28                   | <b>Ru</b><br>Ruthenium<br>101,07<br>[Kr]4d <sup>7</sup> 5s<br>7.3605                              | <b>Rh</b><br>Rhodium<br>102,90550<br>[Kr]4d <sup>8</sup> 5s<br>7.4589                           | <b>Pd</b><br>Palladium<br>106,42<br>[Kr]4d <sup>10</sup><br>7.3605                                | <b>Ag</b><br>Silver<br>107,8682<br>[Kr]4d <sup>10</sup> 5s<br>7.5762                  | <b>Cd</b><br>Cadmium<br>112,411<br>[Kr]4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup><br>7.5762     | <b>In</b><br>Indium<br>114,818<br>[Kr]4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup> 5p<br>7.3439                | <b>Sn</b><br>Tin<br>118,710<br>[Kr]4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup> 5p <sup>2</sup><br>7.3439     | <b>Sb</b><br>Antimony<br>121,760<br>[Kr]4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup> 5p <sup>3</sup><br>8.6084 | <b>Te</b><br>Tellurium<br>127,60<br>[Kr]4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup> 5p <sup>4</sup><br>9.0096 | <b>I</b><br>Iodine<br>126,90447<br>[Kr]4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup> 5p <sup>5</sup><br>10,4513 | <b>Xe</b><br>Xenon<br>131,293<br>[Kr]4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup> 5p <sup>6</sup><br>12,1298  |   |   |   |   |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |       |
| 6                                 | <b>Cs</b><br>Cesium<br>132,9054519<br>[Xe]6s<br>3.8939        | <b>Ba</b><br>Barium<br>137,327<br>[Xe]6s <sup>2</sup><br>5.2117                 |   |   | <b>Hf</b><br>Hafnium<br>178,49<br>[Xe]4f <sup>14</sup> 5d <sup>4</sup> 6s <sup>2</sup><br>6.8251    | <b>Ta</b><br>Tantalum<br>180,94788<br>[Xe]4f <sup>14</sup> 5d <sup>3</sup> 6s <sup>2</sup><br>7.5496 | <b>W</b><br>Tungsten<br>183,84<br>[Xe]4f <sup>14</sup> 5d <sup>4</sup> 6s <sup>2</sup><br>7.8640 | <b>Re</b><br>Rhenium<br>186,207<br>[Xe]4f <sup>14</sup> 5d <sup>5</sup> 6s <sup>2</sup><br>7.8335 | <b>Os</b><br>Osmium<br>190,23<br>[Xe]4f <sup>14</sup> 5d <sup>6</sup> 6s <sup>2</sup><br>8.4382 | <b>Ir</b><br>Iridium<br>192,217<br>[Xe]4f <sup>14</sup> 5d <sup>7</sup> 6s <sup>2</sup><br>8.9670 | <b>Pt</b><br>Platinum<br>195,084<br>[Xe]4f <sup>14</sup> 5d <sup>9</sup> 6s<br>8.9588 | <b>Au</b><br>Gold<br>196,966569<br>[Xe]4f <sup>14</sup> 5d <sup>10</sup> 6s<br>9.2255 | <b>Hg</b><br>Mercury<br>200,59<br>[Xe]4f <sup>14</sup> 5d <sup>10</sup> 6s <sup>2</sup><br>10,4375 | <b>Tl</b><br>Thallium<br>204,3833<br>[Hg]6p<br>6.1082   | <b>Pb</b><br>Lead<br>207,2<br>[Hg]6p <sup>2</sup><br>7.4167  | <b>Bi</b><br>Bismuth<br>208,98040<br>[Hg]6p <sup>3</sup><br>7.2855                                 | <b>Po</b><br>Polonium<br>(209)<br>[Hg]6p <sup>4</sup><br>8.414                                     | <b>At</b><br>Astatine<br>(210)<br>[Hg]6p <sup>5</sup><br>10,4513                                  | <b>Rn</b><br>Radon<br>(222)<br>[Hg]6p <sup>6</sup><br>10,7485               |   |   |   |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |       |
| 7                                 | <b>Fr</b><br>Francium<br>(223)<br>[Rn]7s<br>4.0727            | <b>Ra</b><br>Radium<br>(226)<br>[Rn]7s <sup>2</sup><br>5.2784                   |   |   | <b>Rf</b><br>Rutherfordium<br>(261)<br>[Rn]5f <sup>14</sup> 6d <sup>2</sup> 7s <sup>2</sup><br>6.07 | <b>Db</b><br>Dubnium<br>(268)  | <b>Sg</b><br>Seaborgium<br>(271)   | <b>Bh</b><br>Bohrium<br>(272)   | <b>Hs</b><br>Hassium<br>(277)   | <b>Mt</b><br>Meitnerium<br>(276)  | <b>Ds</b><br>Darmstadtium<br>(281)  | <b>Rg</b><br>Roentgenium<br>(280)   | <b>Cn</b><br>Copernicium<br>(285)  | <b>Uut</b><br>Ununtrium<br>(284)  | <b>Uuq</b><br>Ununquadium<br>(289)   | <b>Uup</b><br>Ununpentium<br>(288)   | <b>Uuh</b><br>Ununhexium<br>(293)  | <b>Uus</b><br>Ununseptium<br>(294)  | <b>Uuo</b><br>Ununoctium<br>(294)   |   |   |   |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |       |

**Frequently used fundamental physical constants**  
 For the most accurate values of these and other constants, visit [physics.nist.gov/constants](http://physics.nist.gov/constants)  
 1 second = 9 192 631 770 periods of radiation corresponding to the transition between the two hyperfine levels of the ground state of <sup>133</sup>Cs

|                          |                                   |   |
|--------------------------|-----------------------------------|---|
| speed of light in vacuum | <i>c</i>                          | 299 792 458 m s <sup>-1</sup> (exact)               |
| Planck constant          | <i>h</i>                          | 6.6261 × 10 <sup>-34</sup> J s ( $\hbar = h/2\pi$ ) |
| elementary charge        | <i>e</i>                          | 1.6022 × 10 <sup>-19</sup> C                        |
| electron mass            | <i>m<sub>e</sub></i>              | 9.1094 × 10 <sup>-31</sup> kg                       |
|                          | <i>m<sub>e</sub>c<sup>2</sup></i> | 0.5110 MeV  |
| proton mass              | <i>m<sub>p</sub></i>              | 1.6726 × 10 <sup>-27</sup> kg                       |
| fine-structure constant  | <i>α</i>                          | 1/137.036   |
| Rydberg constant         | <i>R<sub>∞</sub></i>              | 10 973 732 m <sup>-1</sup>                          |
|                          | <i>R<sub>∞</sub>c</i>             | 3,289 842 × 10 <sup>15</sup> Hz                     |
|                          | <i>R<sub>∞</sub>hc</i>            | 13,6057 eV  |
| Boltzmann constant       | <i>k</i>                          | 1.3807 × 10 <sup>-23</sup> J K <sup>-1</sup>        |

- Solids
- Liquids
- Gases
- Artificially Prepared

# Source Radioactive : $^{137}\text{Cs}$



|  |   |
|--|---|
| 55 $^{2}S_{1/2}$<br><b>Cs</b><br>Cesium<br>132,9054519<br>[Xe]6s<br>3.8939 | 56 $^{1}S_0$<br><b>Ba</b><br>Barium<br>137,327<br>[Xe]6s <sup>2</sup><br>5.2117 |
| 87 $^{2}S_{1/2}$<br><b>Fr</b><br>Francium<br>(223)<br>[Rn]7s<br>1 0727     | 88 $^{1}S_0$<br><b>Ra</b><br>Radium<br>(226)<br>[Rn]7s <sup>2</sup><br>5 2784   |

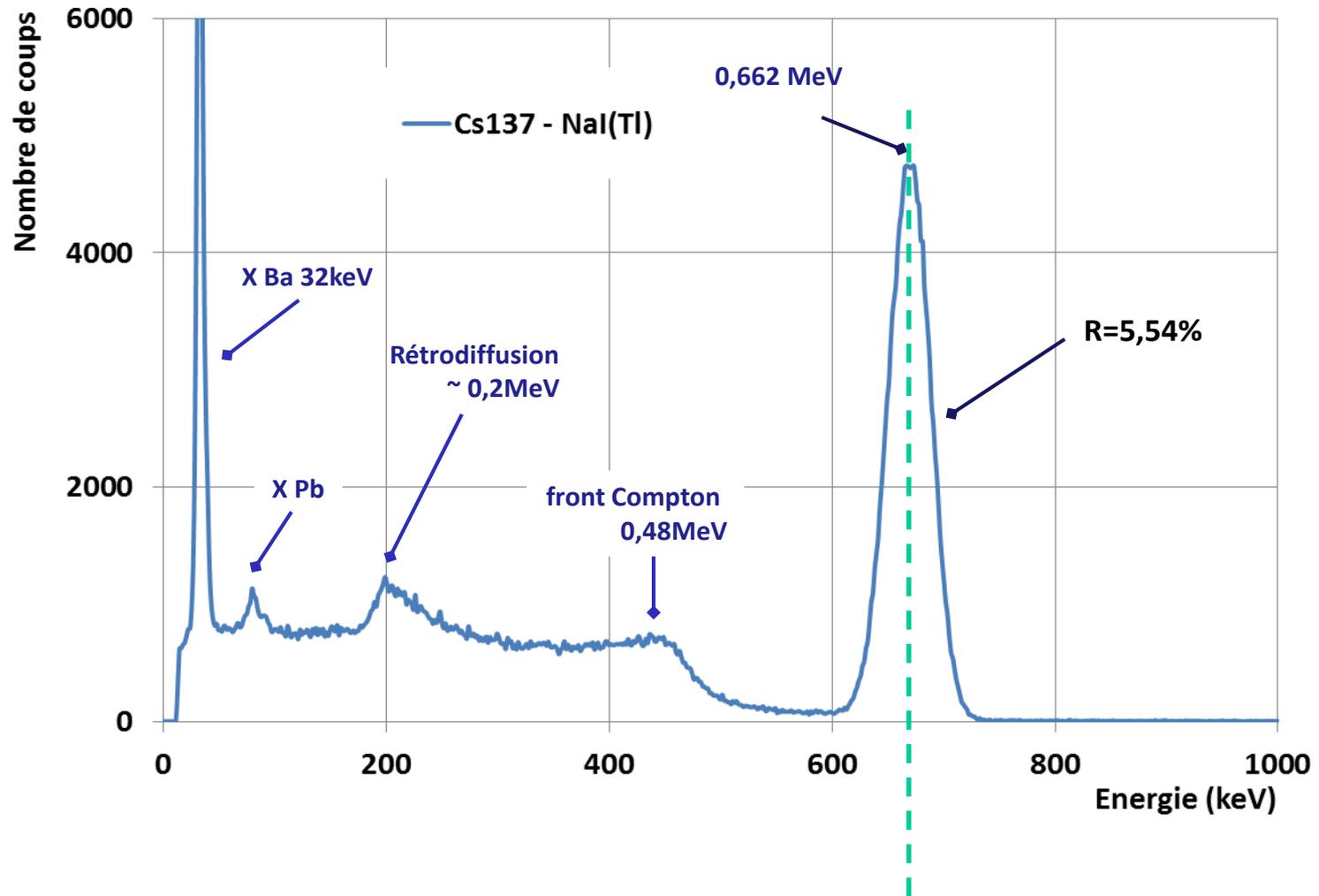
$\beta^-$  : émission  $\beta^-$

$Q^- = 1175,63 \text{ keV}$   
 $\% \beta^- = 100$

| isotope           | abondance | période            |
|-------------------|-----------|--------------------|
| $^{133}\text{Cs}$ | 100%      | Stable 78 neutrons |
| $^{137}\text{Cs}$ | synthèse  | Période 30,15 ans  |

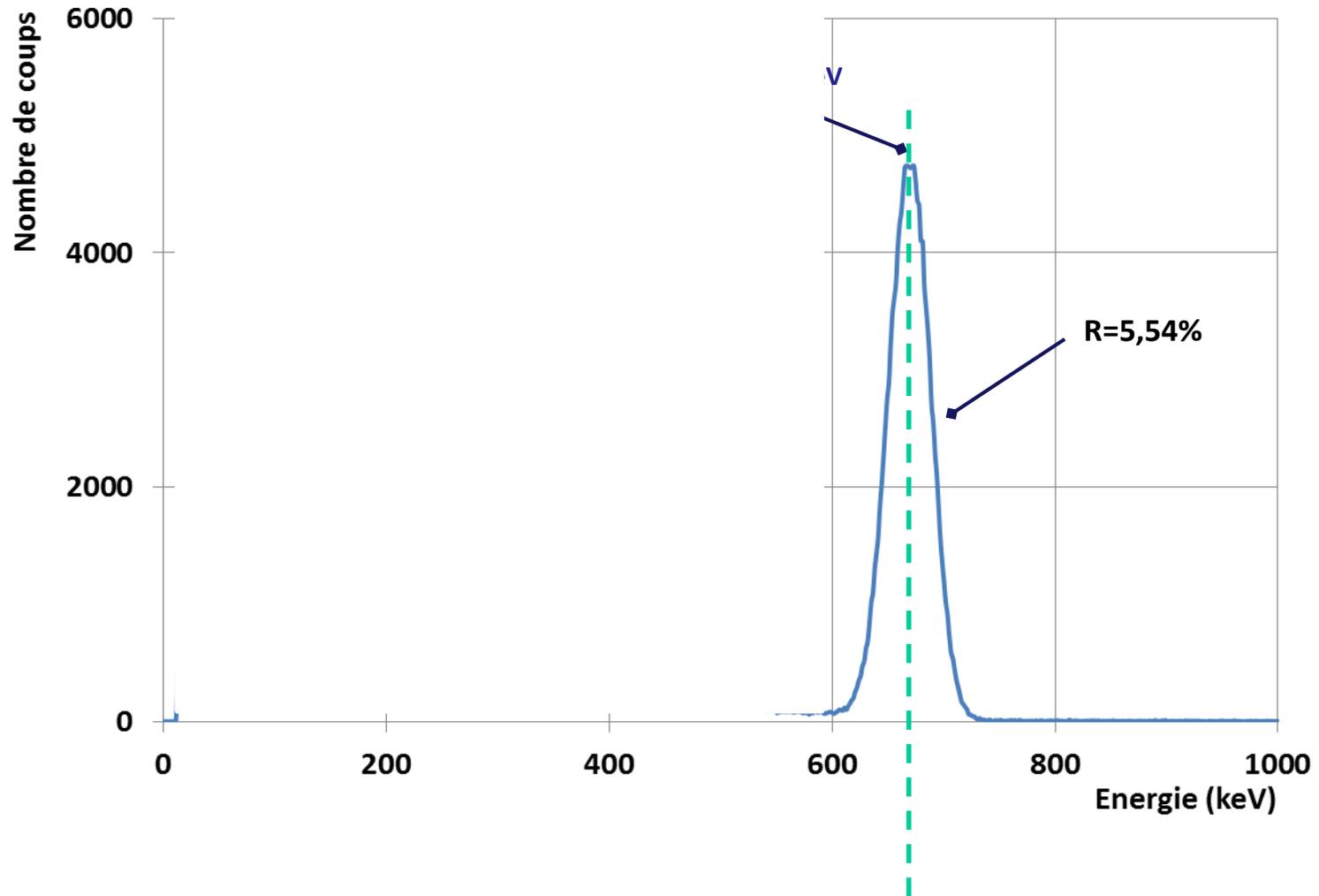
# Pic du $^{137}\text{Cs}$ à 662 keV

PMT + Cristal NaI(Tl)



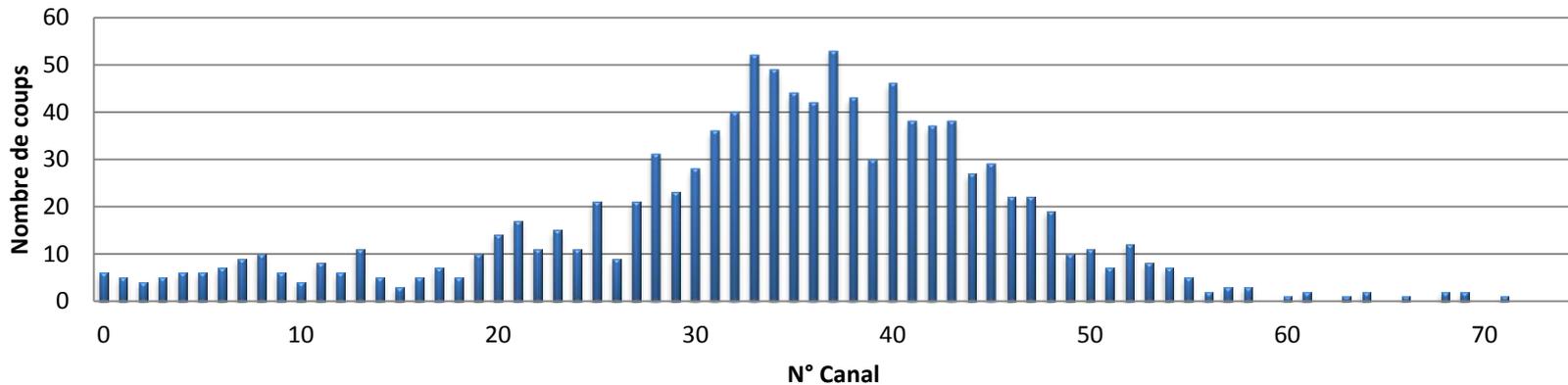
# Pic du $^{137}\text{Cs}$ à 662 keV

PMT + Cristal NaI(Tl)



# Probabilités & Statistiques

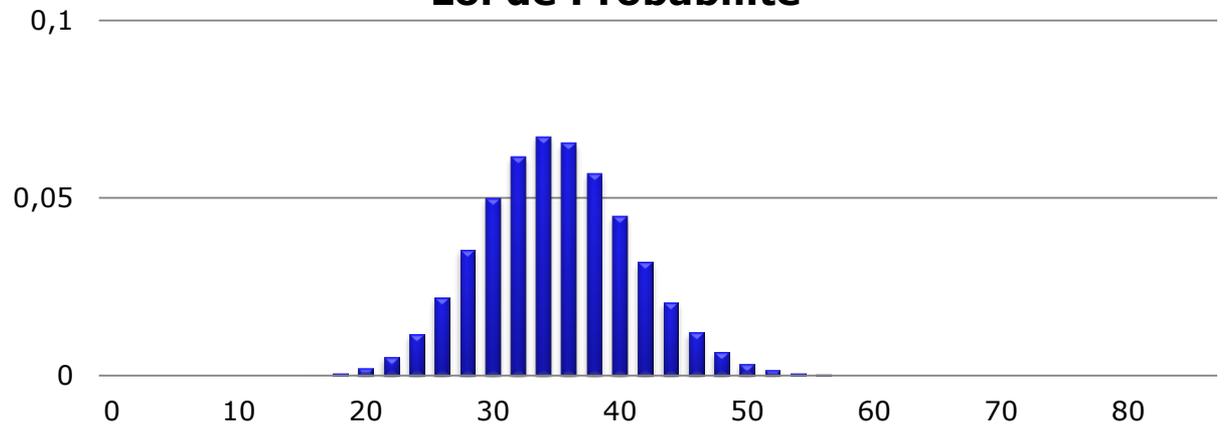
## Données expérimentales



## Statistiques

Probabilité  
Loi parente

## Loi de Probabilité



# 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:

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

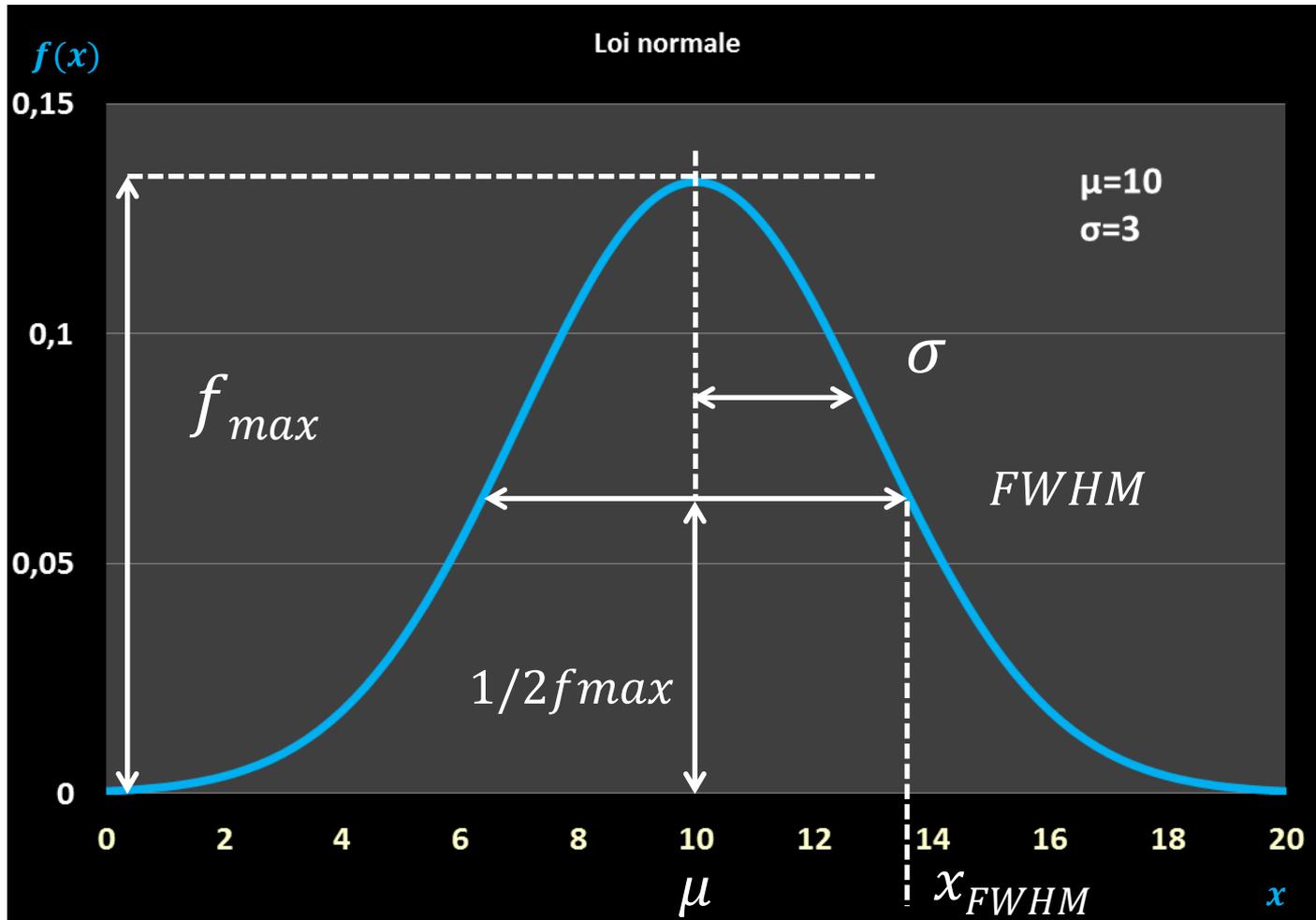
$$E(X) = \mu$$

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

- 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)

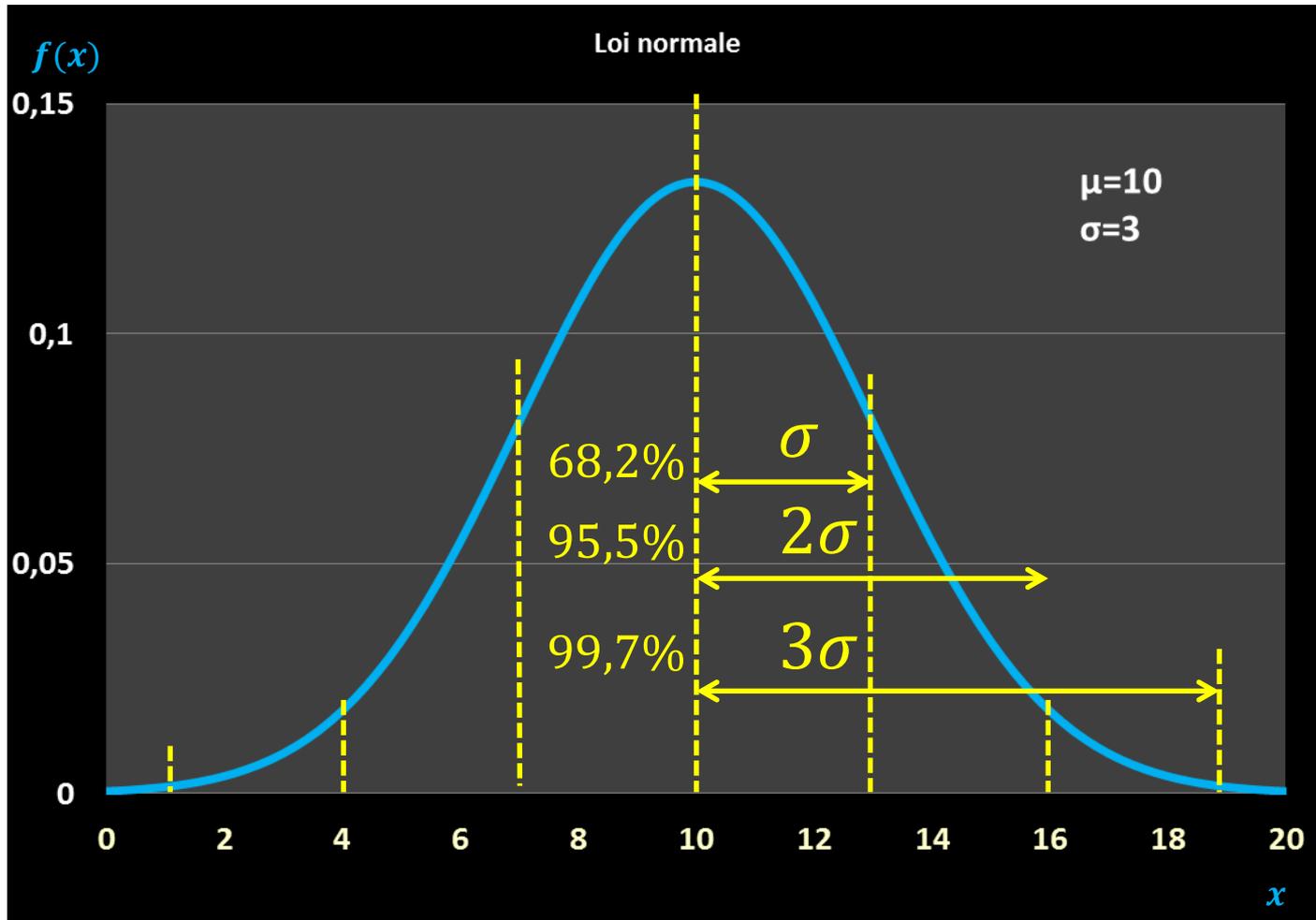
$$FWHM = 2\sigma\sqrt{2\ln 2} = 2,35\sigma$$

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

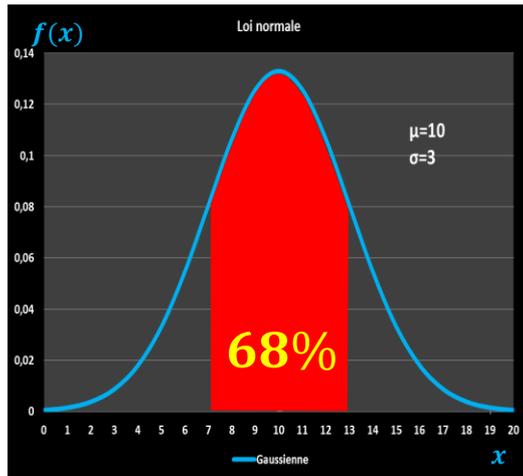


$$FWHM = 2,35\sigma$$

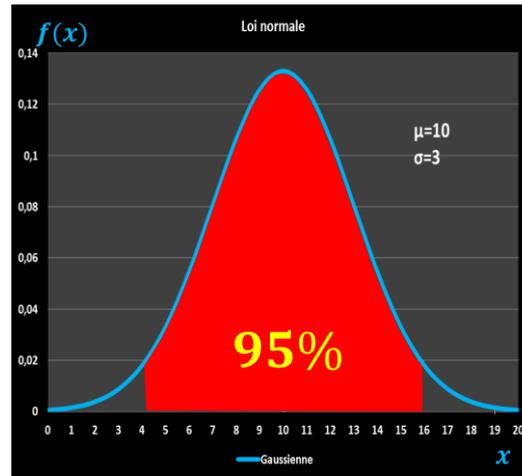
# Loi normale: $\mu = 10$ et $\sigma = 3$



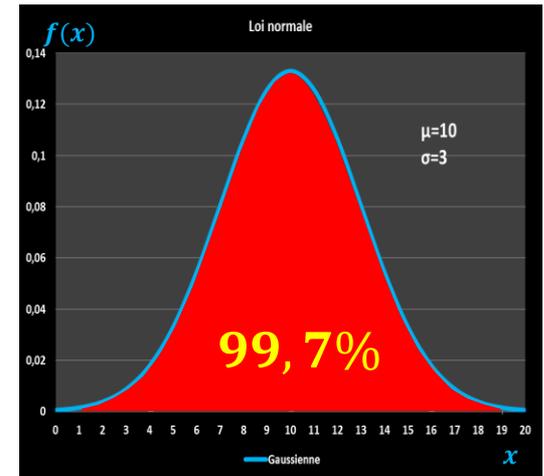
# En dessin ...toujours



$m - \sigma$      $m + \sigma$



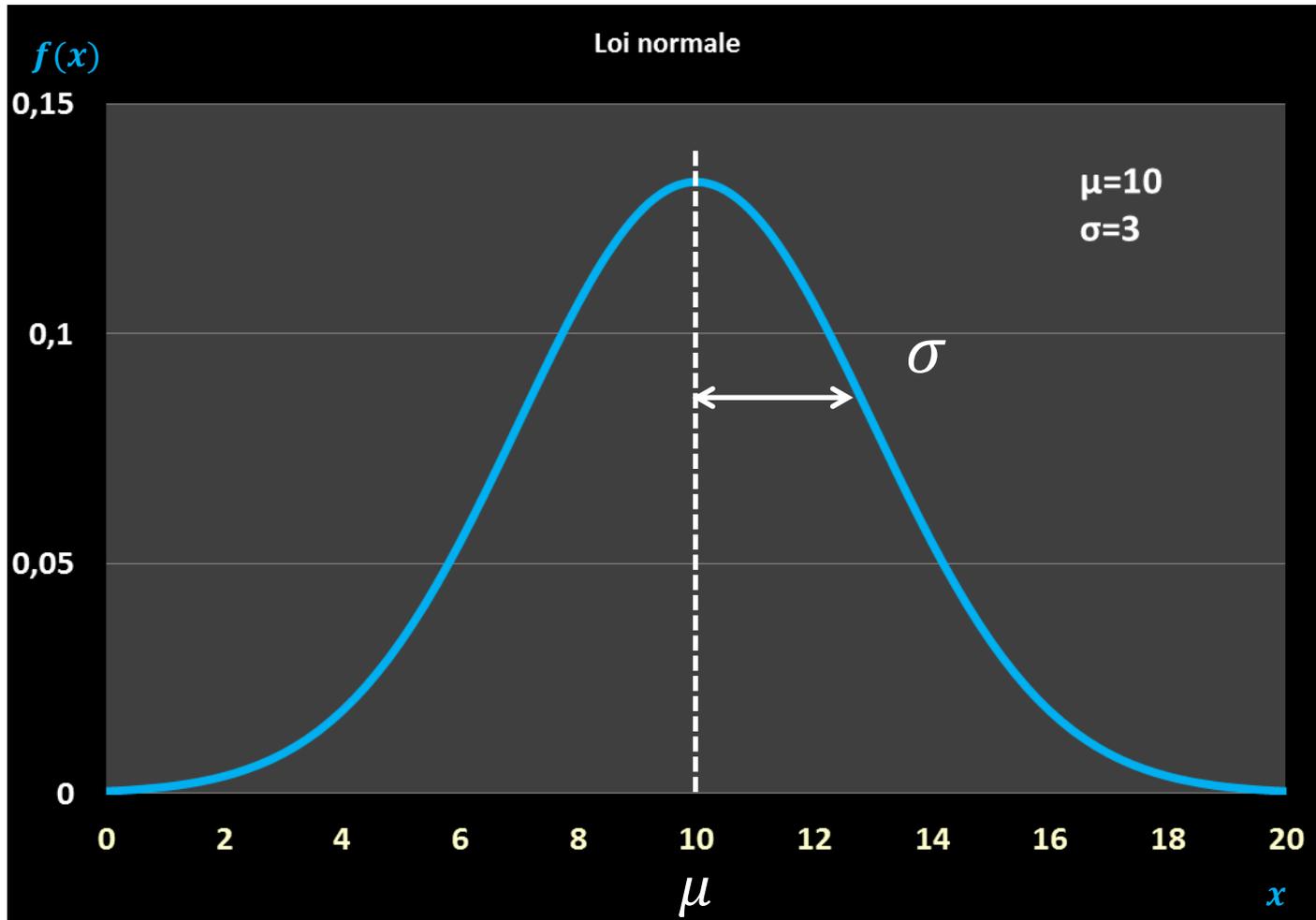
$m - 2\sigma$      $m + 2\sigma$



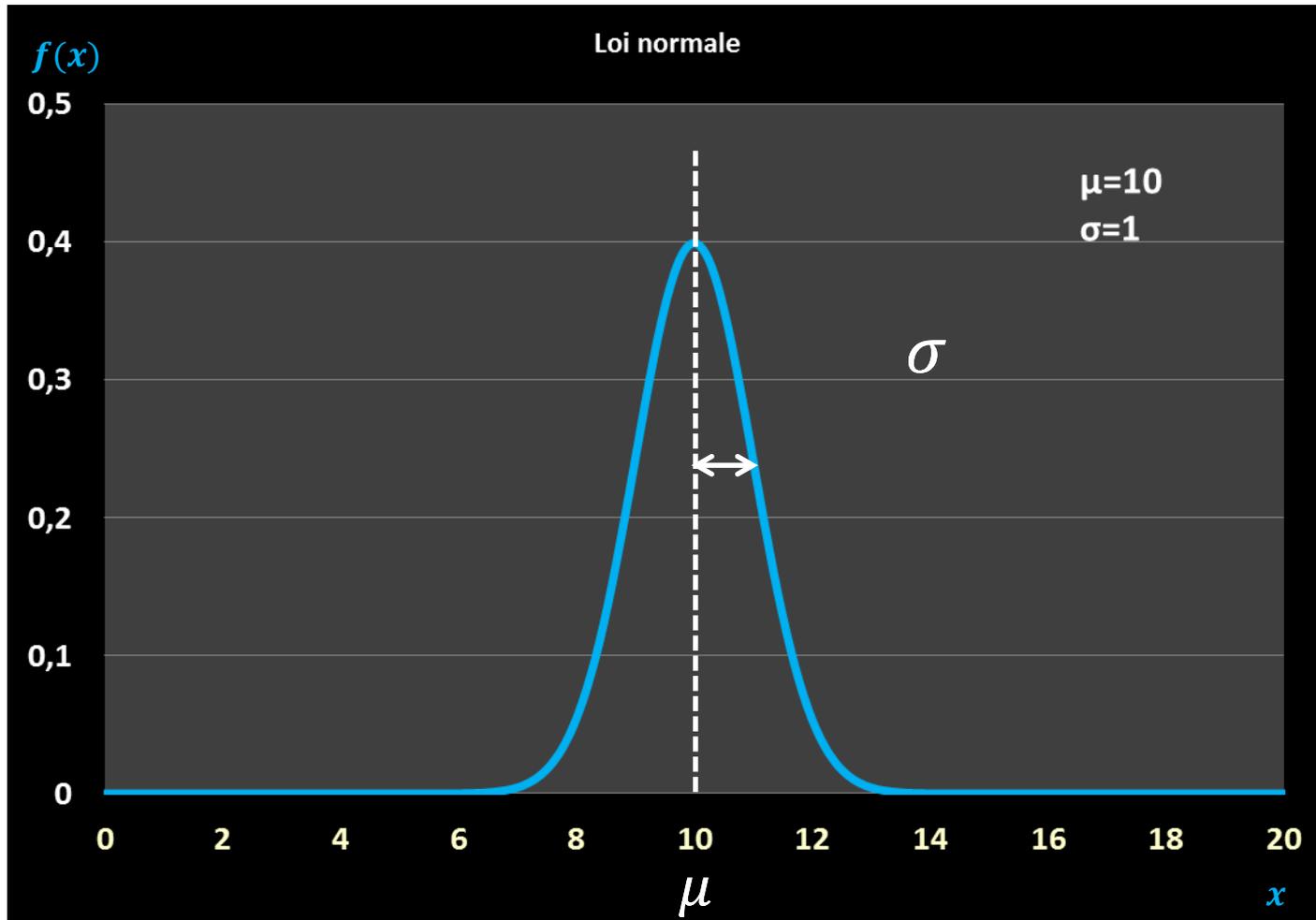
$m - 3\sigma$      $m + 3\sigma$

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

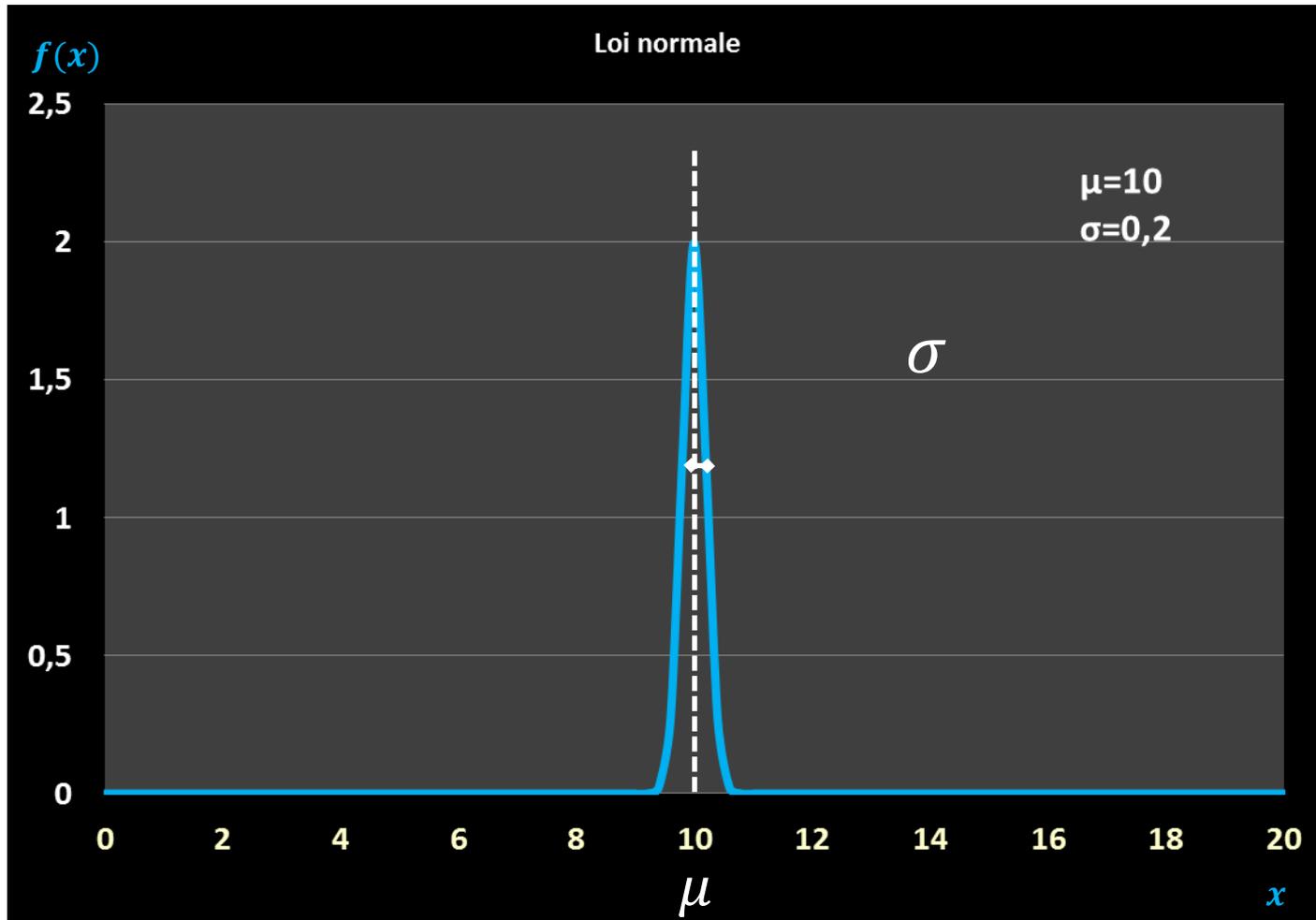
# Loi normale: $\mu = 10$ et $\sigma = 3$



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



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



# La loi de Poisson

---

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

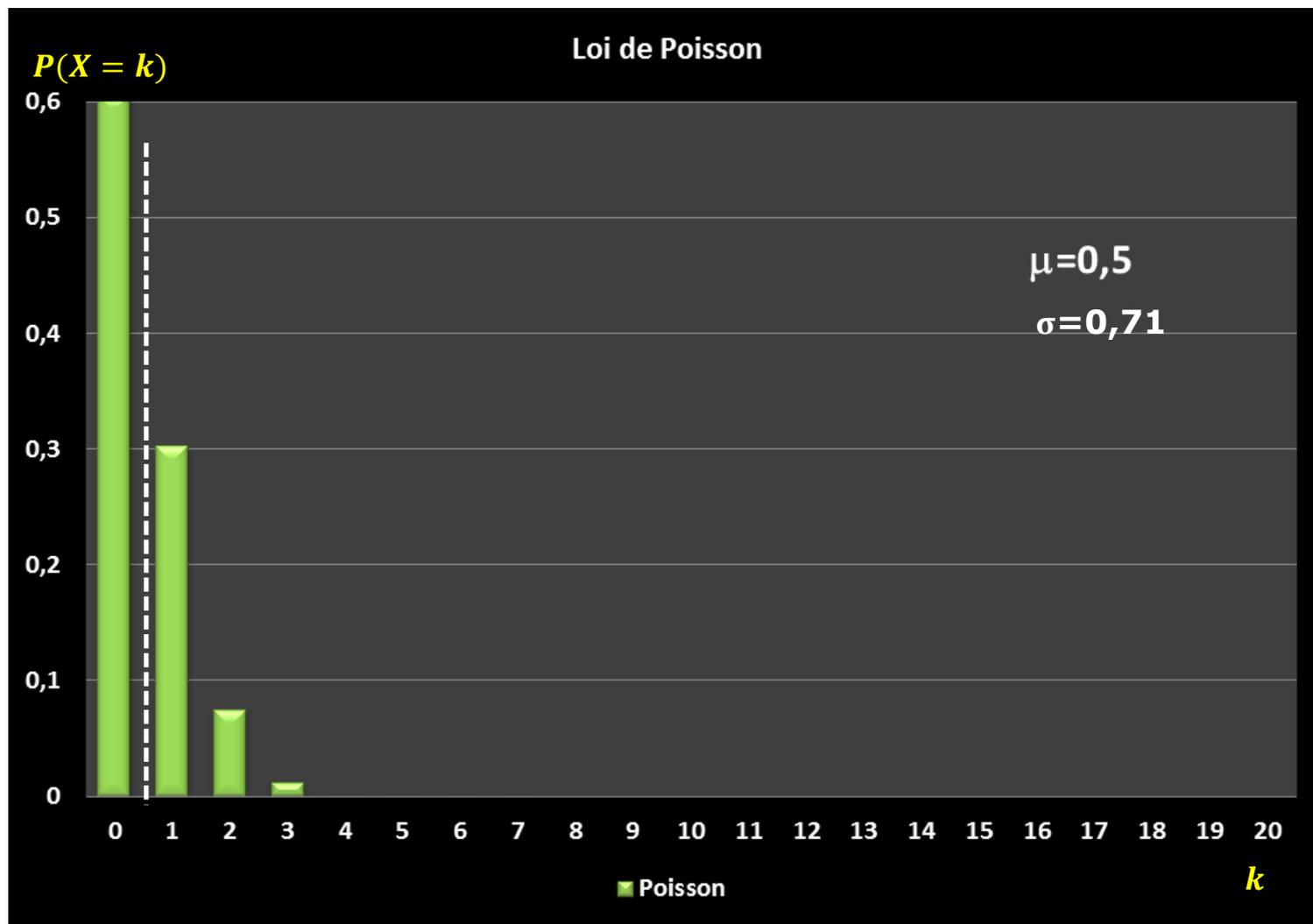
$$E(X) = V(X) = \mu$$

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

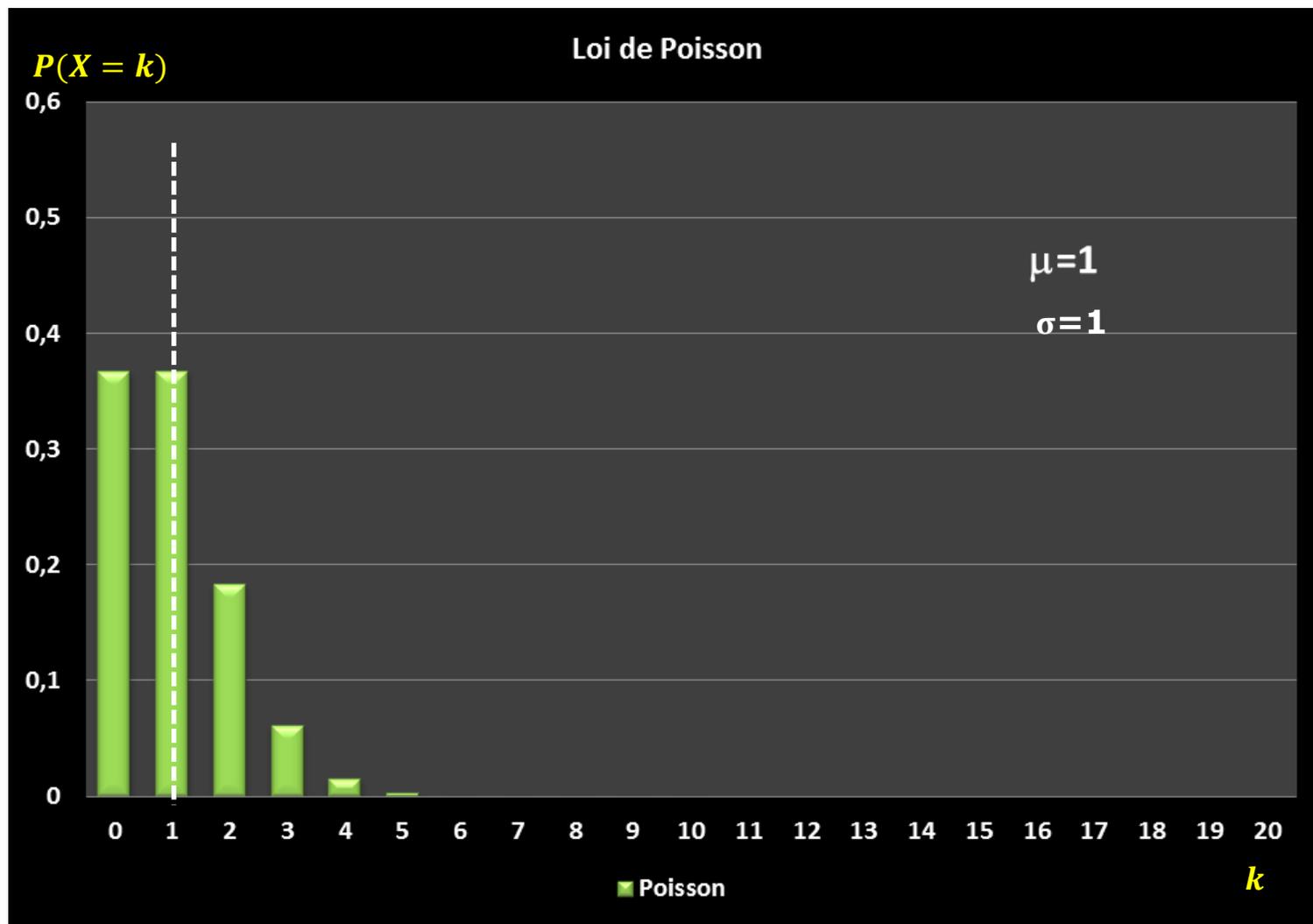
## Remarque

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

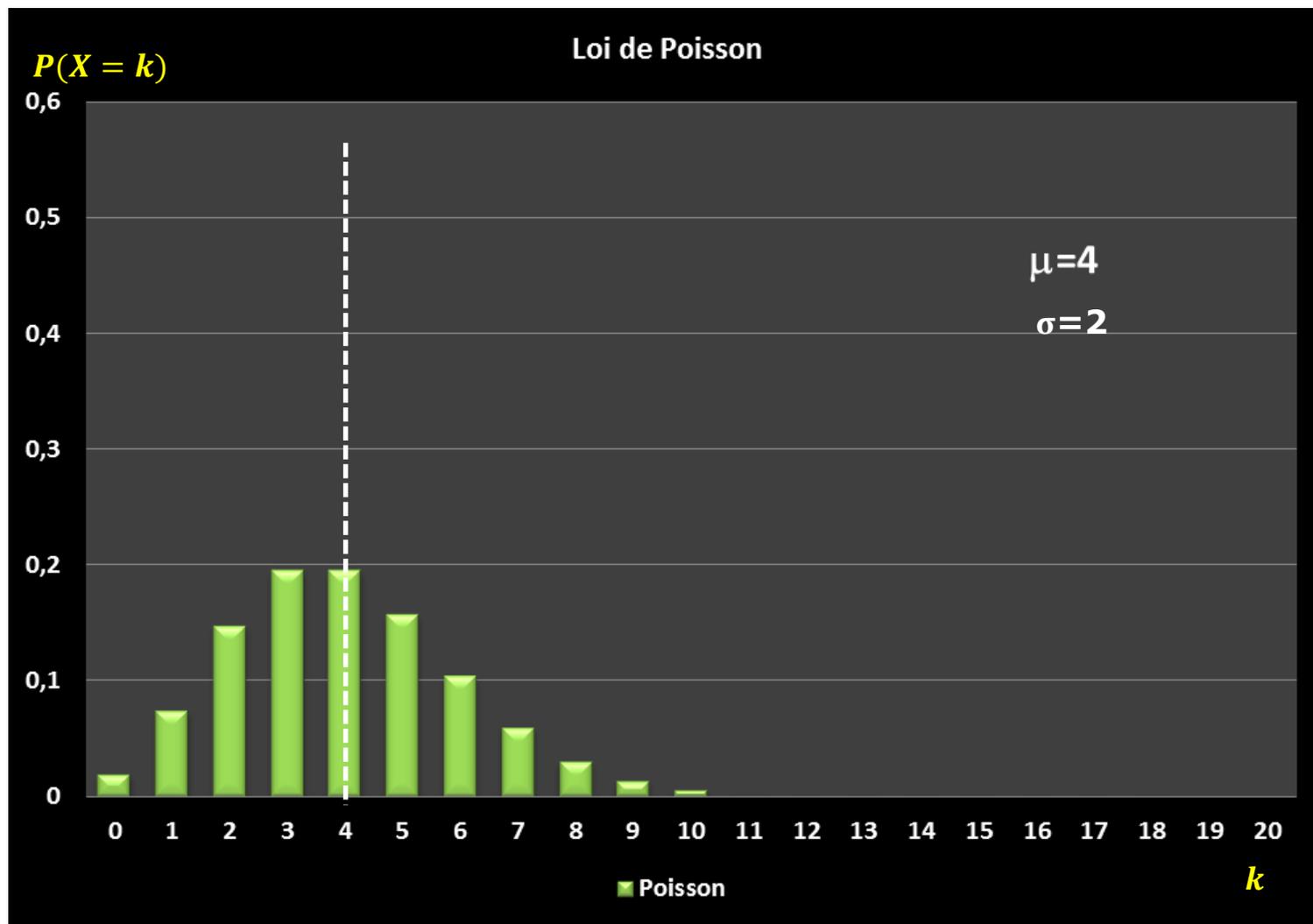
# Loi de Poisson: $\mu = 0,5$



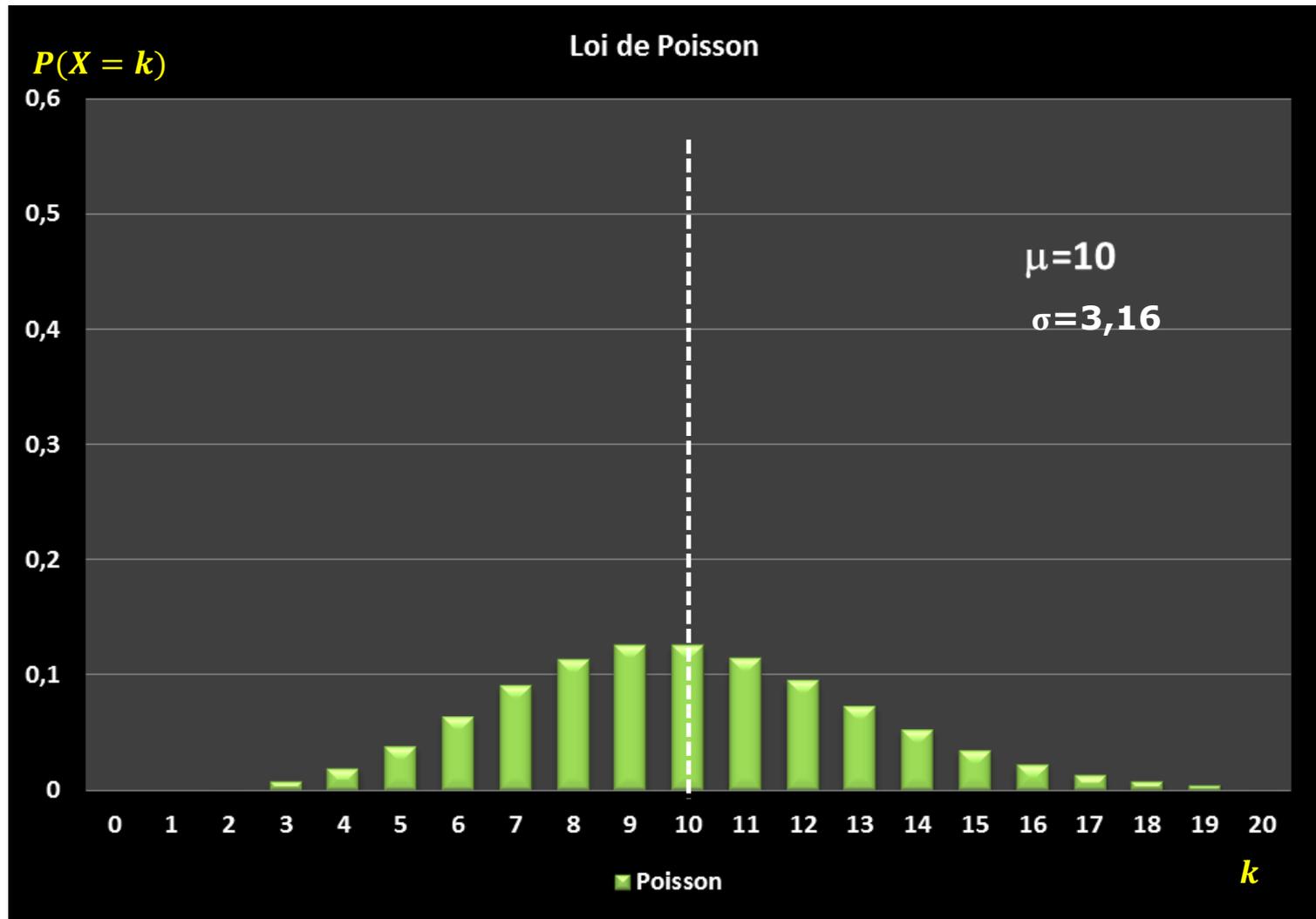
# Loi de Poisson: $\mu = 1$



# Loi de Poisson: $\mu = 4$



# Loi de Poisson: $\mu = 10$



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

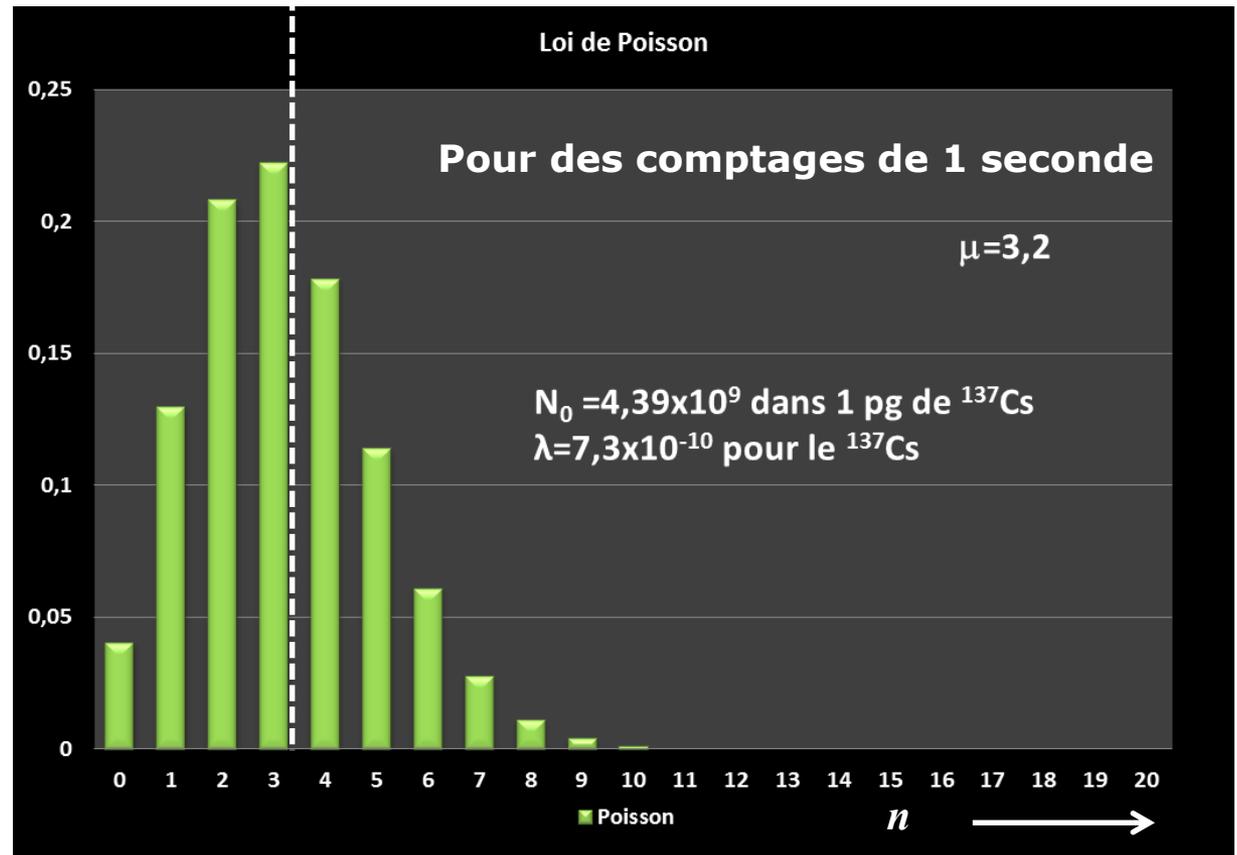
Le taux de comptage d'une source obéit à une loi de Poisson

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

Loi de  
Poisson avec

$$\mu = \lambda N_0$$

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

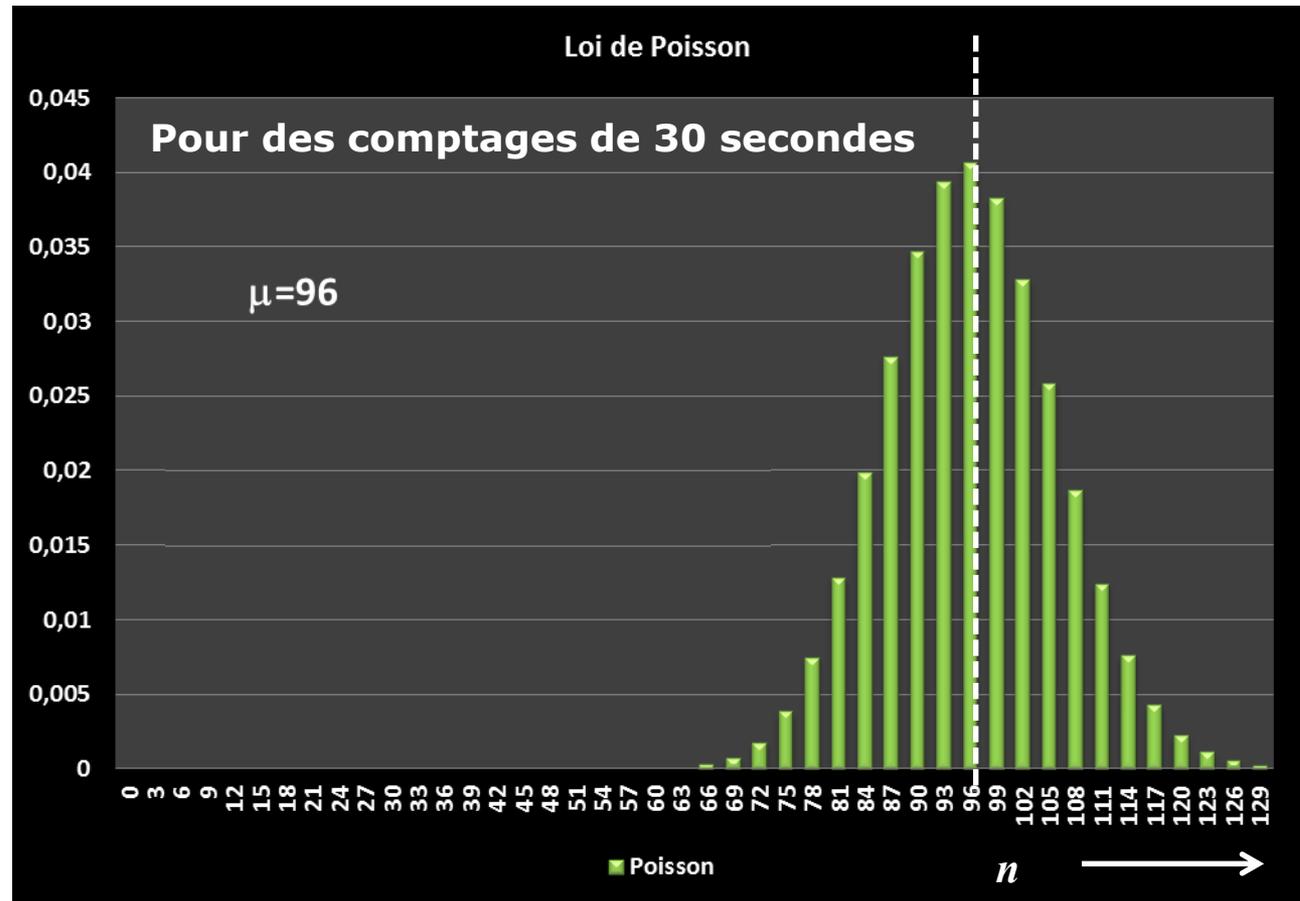


# Source $^{137}\text{Cs}$ - loi de Poisson

loi de poisson  $\Rightarrow$  loi normale

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

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



# 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  $S_n$**

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} P(a \leq S_n \leq b) = \int_a^b f_X(x) dx$$

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

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

# théorème de la limite centrale

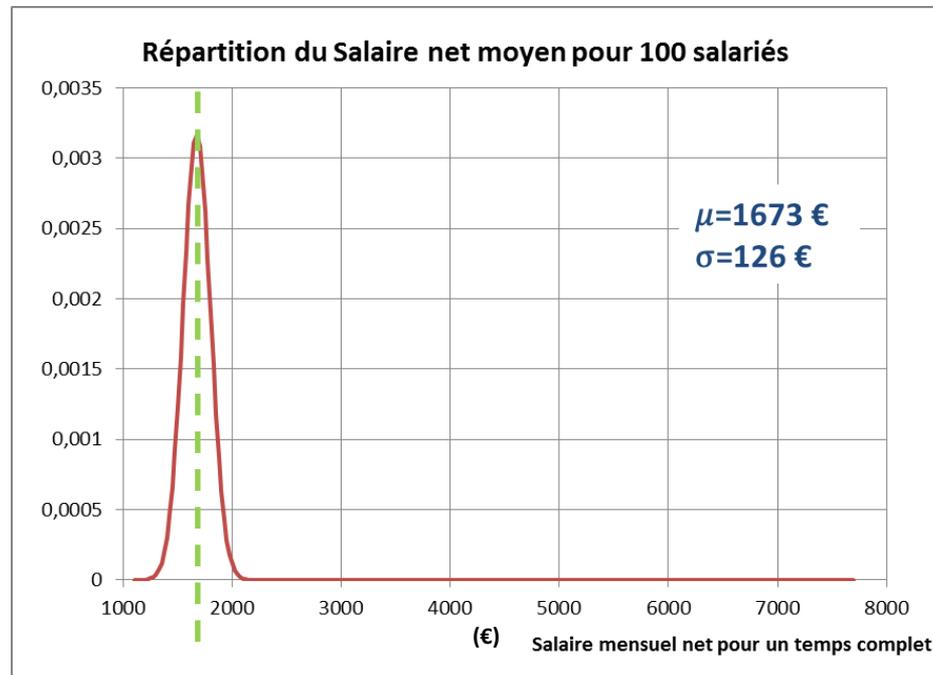
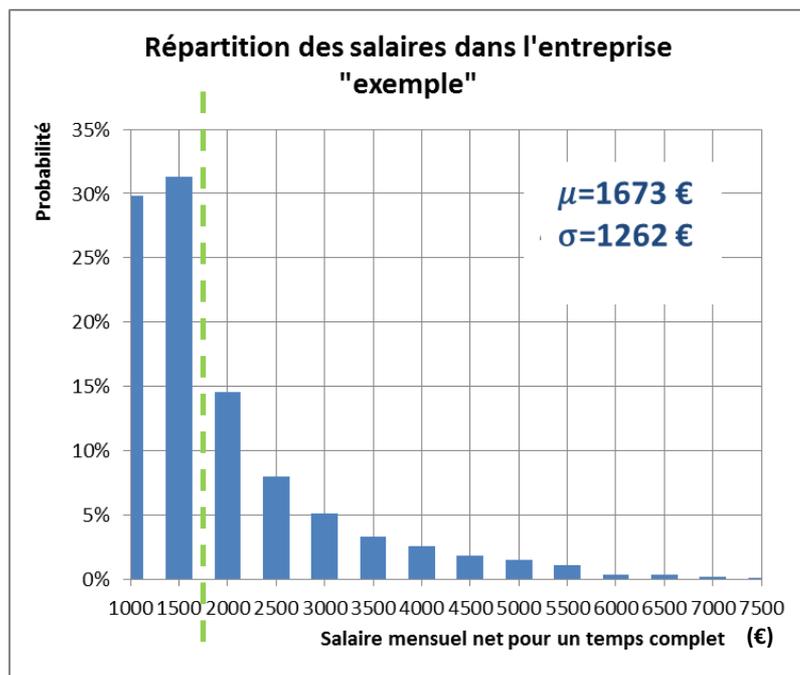
## Exemple : Salaire moyen et répartition

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

$$E(M_n) = \mu$$

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

$n = 100$



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**  $V(\bar{x}) = \sigma^2/n$

# VI

## 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  $ns$  -  $\sim$ 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**



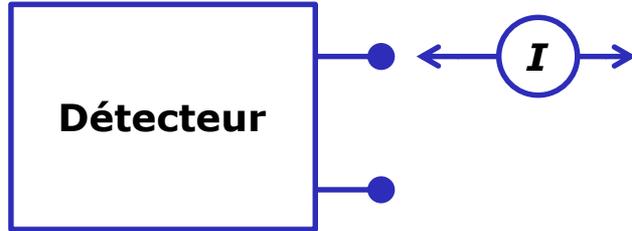
Il y a 2 modes principaux de fonctionnement de ces détecteurs:

**a/ en mode courant moyen**

**b/ en mode impulsif**

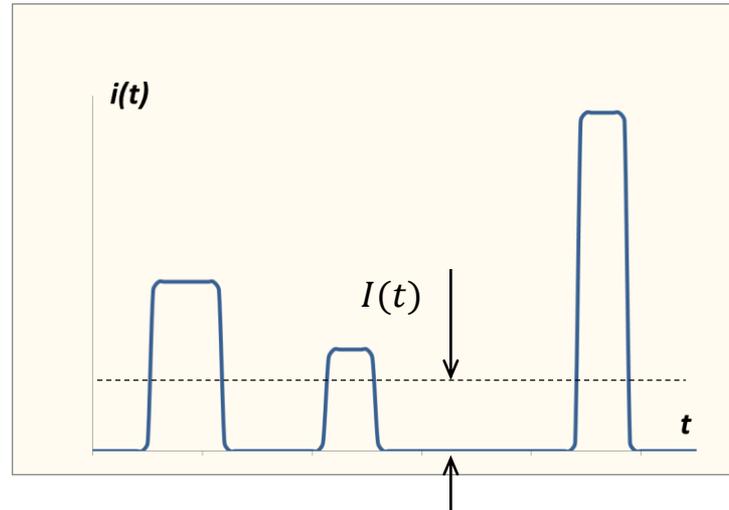
# Réponse des détecteurs

## 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 événement

$E$ : Energie moyenne déposée par événement

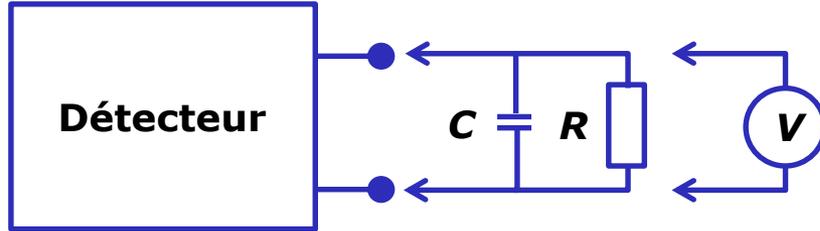
$w$ : Energie moyenne nécessaire pour produire une paire chargée

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

Attention aux fluctuations du courant dans ce mode

# Réponse des détecteurs

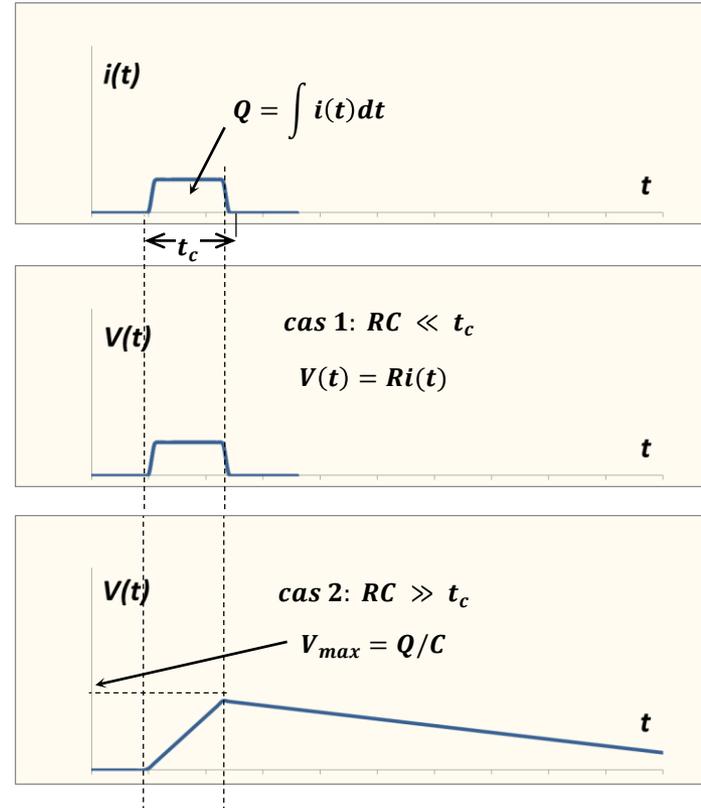
## b/ en mode impulsionnel



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  $Q$ .

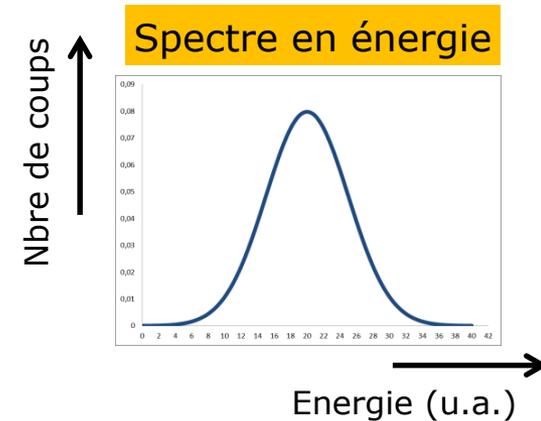
$$V_{max} = \frac{Q}{C}$$



# VIII - Résolution des détecteurs

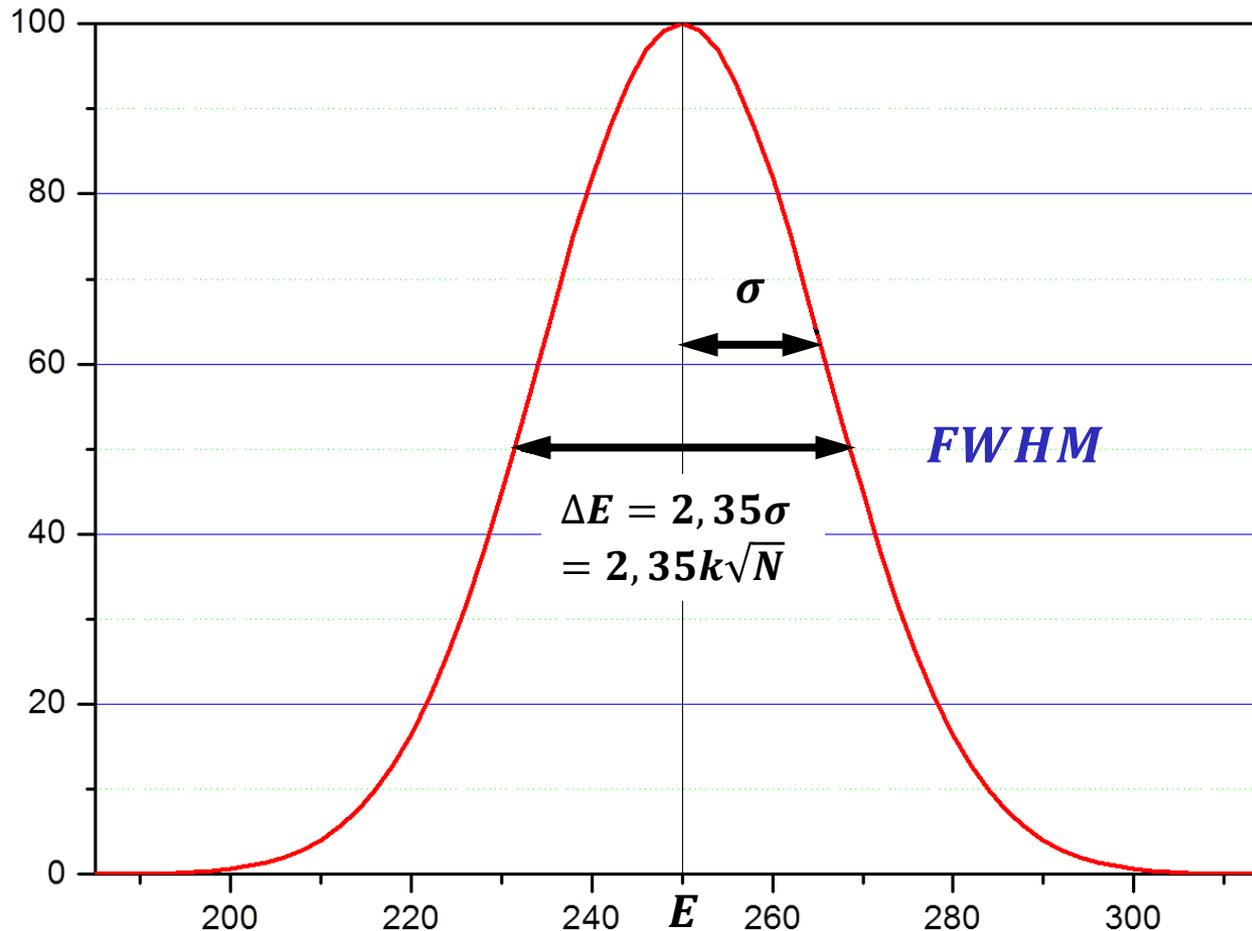
# Spectrométrie – Résolution

- 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



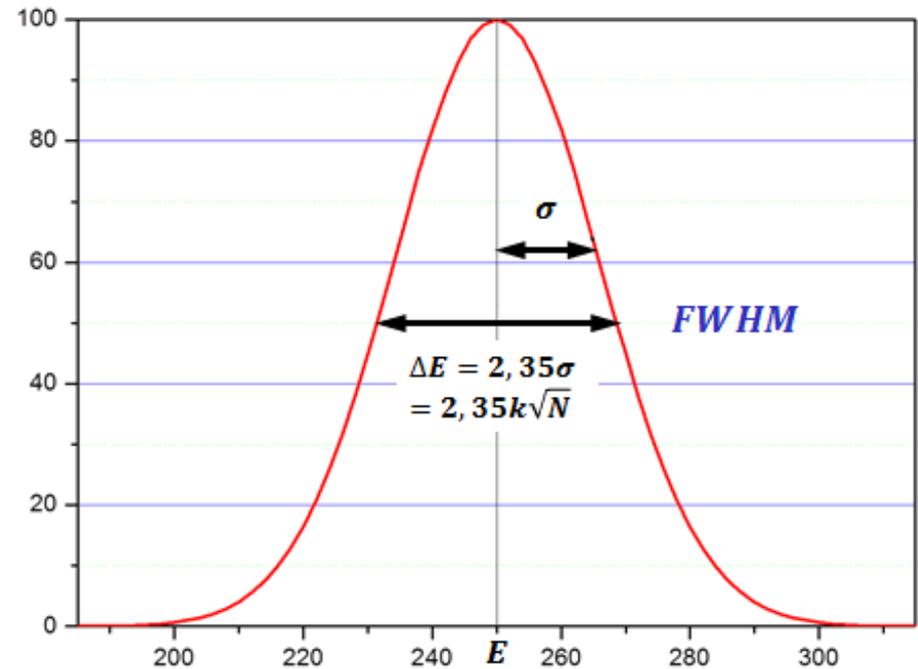
# Spectrométrie – Résolution

- 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



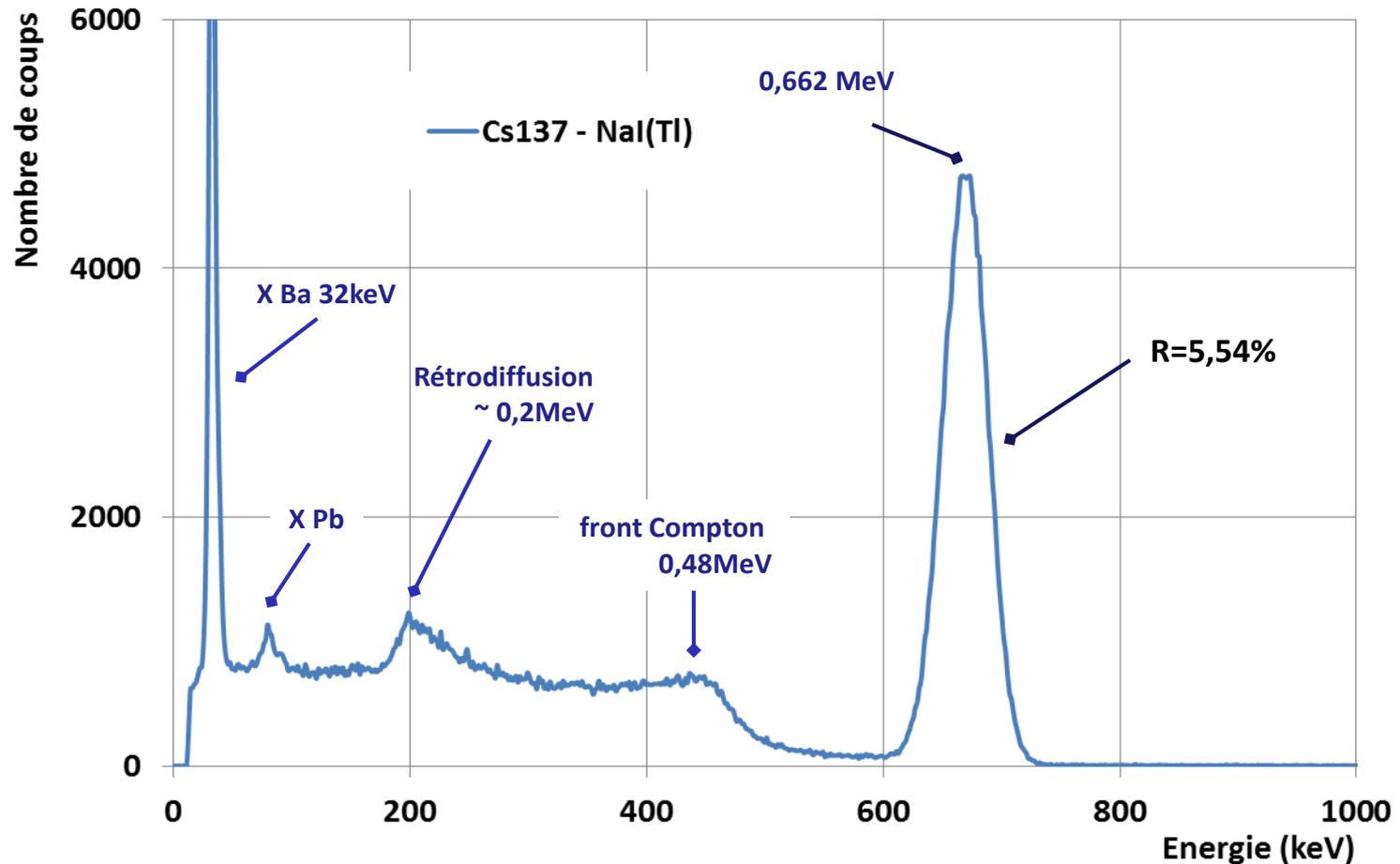
# Spectrométrie – Résolution

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



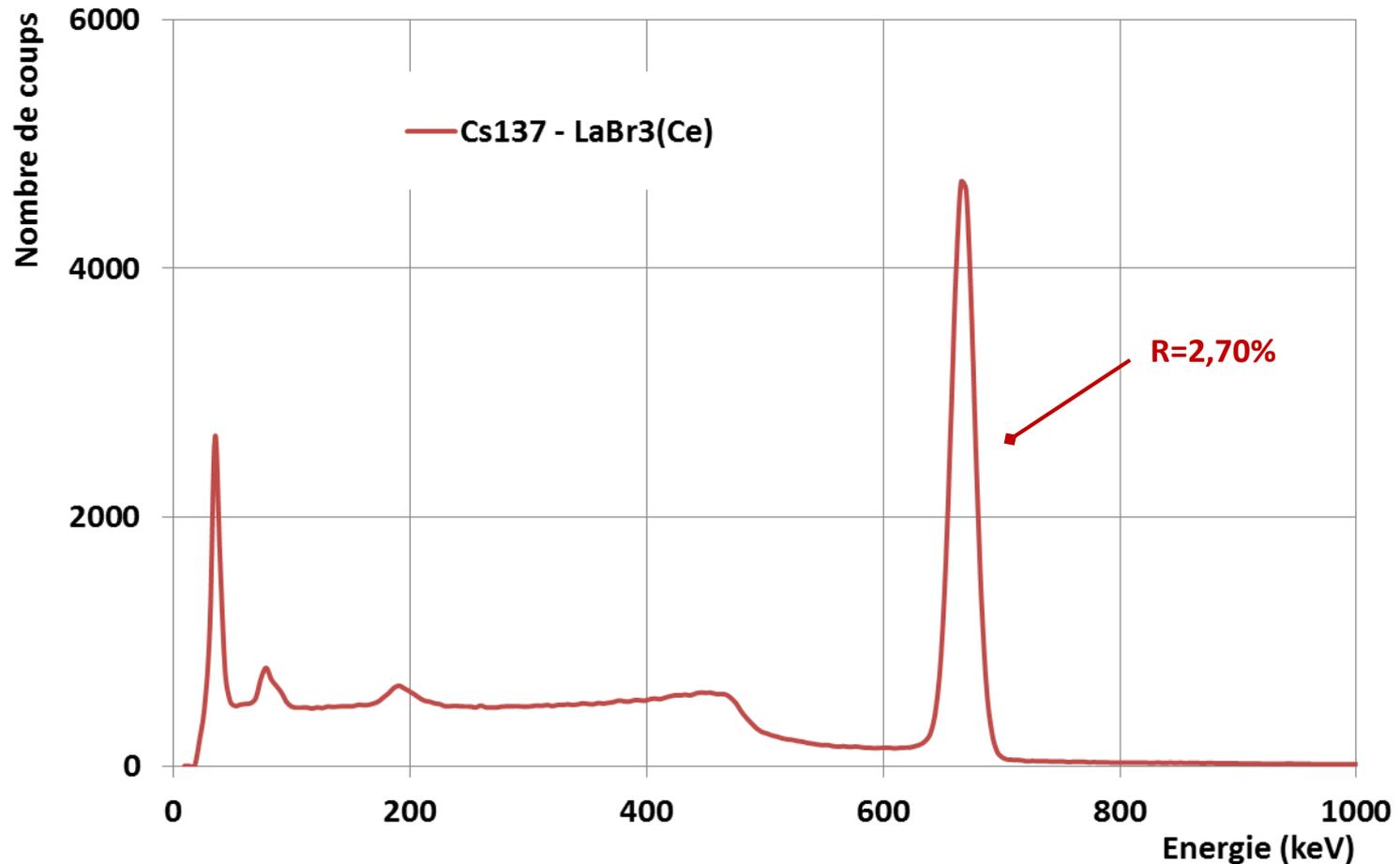
# Pic du $^{137}\text{Cs}$ à 662 keV

PMT + Cristal NaI(Tl)



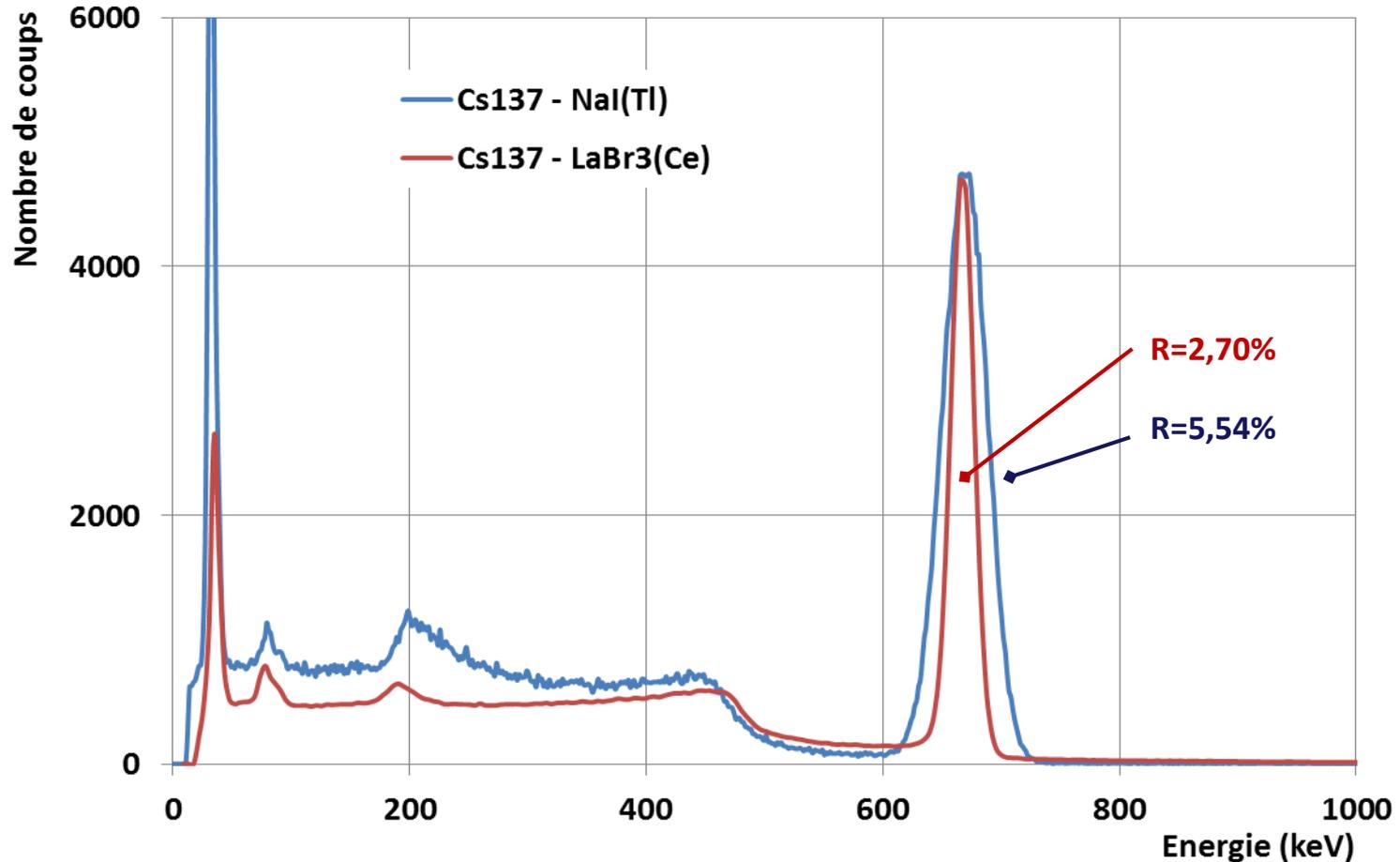
# Pic du $^{137}\text{Cs}$ à 662 keV

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



# Pic du $^{137}\text{Cs}$ à 662 keV

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



# Table périodique des éléments

## PERIODIC TABLE Atomic Properties of the Elements

**NIST**  
National Institute of  
Standards and Technology  
U.S. Department of Commerce

### Frequently used fundamental physical constants

For the most accurate values of these and other constants, visit [physics.nist.gov/constants](http://physics.nist.gov/constants)  
1 second = 9 192 631 770 periods of radiation corresponding to the transition between the two hyperfine levels of the ground state of <sup>133</sup>Cs

|                          |                                   |  |                      |
|--------------------------|-----------------------------------|--|----------------------|
| speed of light in vacuum | <i>c</i>                          | 299 792 458 m s <sup>-1</sup>                | (exact)              |
| Planck constant          | <i>h</i>                          | 6.6261 × 10 <sup>-34</sup> J s               | ( $\hbar = h/2\pi$ ) |
| elementary charge        | <i>e</i>                          | 1.6022 × 10 <sup>-19</sup> C                 |                      |
| electron mass            | <i>m<sub>e</sub></i>              | 9.1094 × 10 <sup>-31</sup> kg                |                      |
|                          | <i>m<sub>e</sub>c<sup>2</sup></i> | 0.5110 MeV                                   |                      |
| proton mass              | <i>m<sub>p</sub></i>              | 1.6726 × 10 <sup>-27</sup> kg                |                      |
| fine-structure constant  | <i>α</i>                          | 1/137.036                                    |                      |
| Rydberg constant         | <i>R<sub>∞</sub></i>              | 10 973 732 m <sup>-1</sup>                   |                      |
|                          | <i>R<sub>∞</sub>c</i>             | 3.289 842 × 10 <sup>15</sup> Hz              |                      |
|                          | <i>R<sub>∞</sub>hc</i>            | 13.6057 eV                                   |                      |
| Boltzmann constant       | <i>k</i>                          | 1.3807 × 10 <sup>-23</sup> J K <sup>-1</sup> |                      |

- Solids
- Liquids
- Gases
- Artificially Prepared

Physics  
Laboratory  
[physics.nist.gov](http://physics.nist.gov)

Standard  
Reference Data  
[www.nist.gov/srd](http://www.nist.gov/srd)

| Group  | 13 IIIA | 14 IVA  | 15 VA   | 16 VIA  | 17 VIIA | 18 VIIIA |
|--------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|
| 1 IA   |         |         |         |         |         | 2 IIA    |
| 1      |         |         |         |         |         | 2        |
| 2      |         |         |         |         |         |          |
| 3      |         |         |         |         |         |          |
| 4      |         |         |         |         |         |          |
| 5      |         |         |         |         |         |          |
| 6      |         |         |         |         |         |          |
| 7      |         |         |         |         |         |          |
| 8      |         |         |         |         |         |          |
| 9      |         |         |         |         |         |          |
| 10     |         |         |         |         |         |          |
| 11 IB  |         |         |         |         |         |          |
| 12 IIB |         |         |         |         |         |          |
| 13     | 5 B     | 6 C     | 7 N     | 8 O     | 9 F     | 10 Ne    |
| 14     | 13 Al   | 14 Si   | 15 P    | 16 S    | 17 Cl   | 18 Ar    |
| 15     | 19 K    | 20 Ca   | 21 Sc   | 22 Ti   | 23 V    | 24 Cr    |
| 16     | 25 Mn   | 26 Fe   | 27 Co   | 28 Ni   | 29 Cu   | 30 Zn    |
| 17     | 31 Ga   | 32 Ge   | 33 As   | 34 Se   | 35 Br   | 36 Kr    |
| 18     | 37 Rb   | 38 Sr   | 39 Y    | 40 Zr   | 41 Nb   | 42 Mo    |
| 19     | 43 Tc   | 44 Ru   | 45 Rh   | 46 Pd   | 47 Ag   | 48 Cd    |
| 20     | 51 Sb   | 52 Te   | 53 I    | 54 Xe   |         |          |
| 21     | 55 Cs   | 56 Ba   |         |         |         |          |
| 22     | 72 Hf   | 73 Ta   | 74 W    | 75 Re   | 76 Os   | 77 Ir    |
| 23     | 78 Pt   | 79 Au   | 80 Hg   | 81 Tl   | 82 Pb   | 83 Bi    |
| 24     | 84 Po   | 85 At   | 86 Rn   |         |         |          |
| 25     | 87 Fr   | 88 Ra   |         |         |         |          |
| 26     | 104 Rf  | 105 Db  | 106 Sg  | 107 Bh  | 108 Hs  | 109 Mt   |
| 27     | 110 Ds  | 111 Rg  | 112 Cn  | 113 Uut | 114 Uuq | 115 Uup  |
| 28     | 116 Uuh | 117 Uus | 118 Uuo |         |         |          |

Period



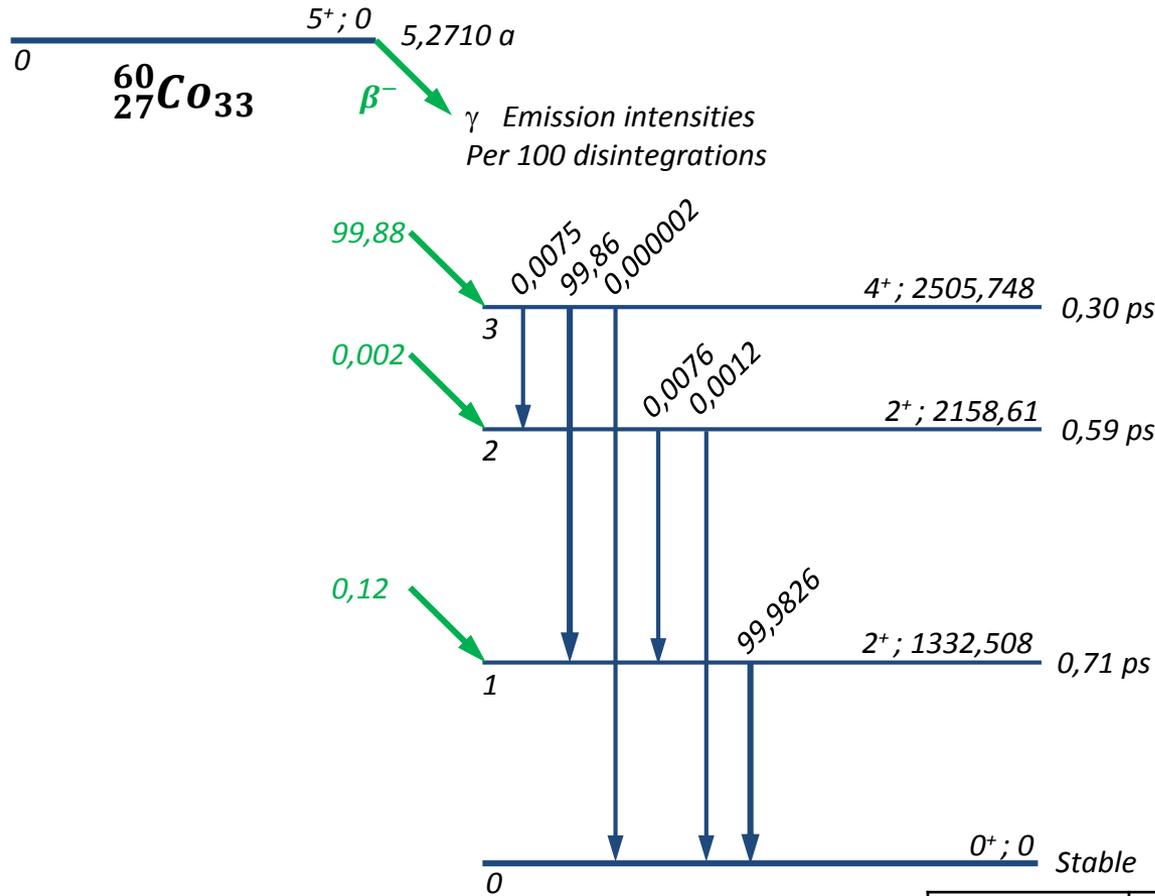
dépasser les frontières

Jean Peyré

P.75

Ecole Technique de base des détecteurs  
Cargèse 2019

# Source Radioactive : $^{60}\text{Co}$



|                                     |                   |                                     |                       |                                     |                   |
|-------------------------------------|-------------------|-------------------------------------|-----------------------|-------------------------------------|-------------------|
| 26                                  | $^{56}\text{D}_4$ | 27                                  | $^{59}\text{F}_{9/2}$ | 28                                  | $^{58}\text{F}_4$ |
| <b>Fe</b>                           |                   | <b>Co</b>                           |                       | <b>Ni</b>                           |                   |
| Iron                                |                   | Cobalt                              |                       | Nickel                              |                   |
| 55,845                              |                   | 58,933195                           |                       | 58,6934                             |                   |
| [Ar]3d <sup>6</sup> 4s <sup>2</sup> |                   | [Ar]3d <sup>7</sup> 4s <sup>2</sup> |                       | [Ar]3d <sup>8</sup> 4s <sup>2</sup> |                   |
| 7,9024                              |                   | 7,8810                              |                       | 7,6399                              |                   |

$^{58}\text{Ni}$  ; ab 68% ; stable 30 neutrons  
 $^{60}\text{Ni}$  ; ab 26% ; stable 32 neutrons  
 .....

$\beta^-$  : émission  $\beta^-$

$^{60}\text{Ni}_{32}$

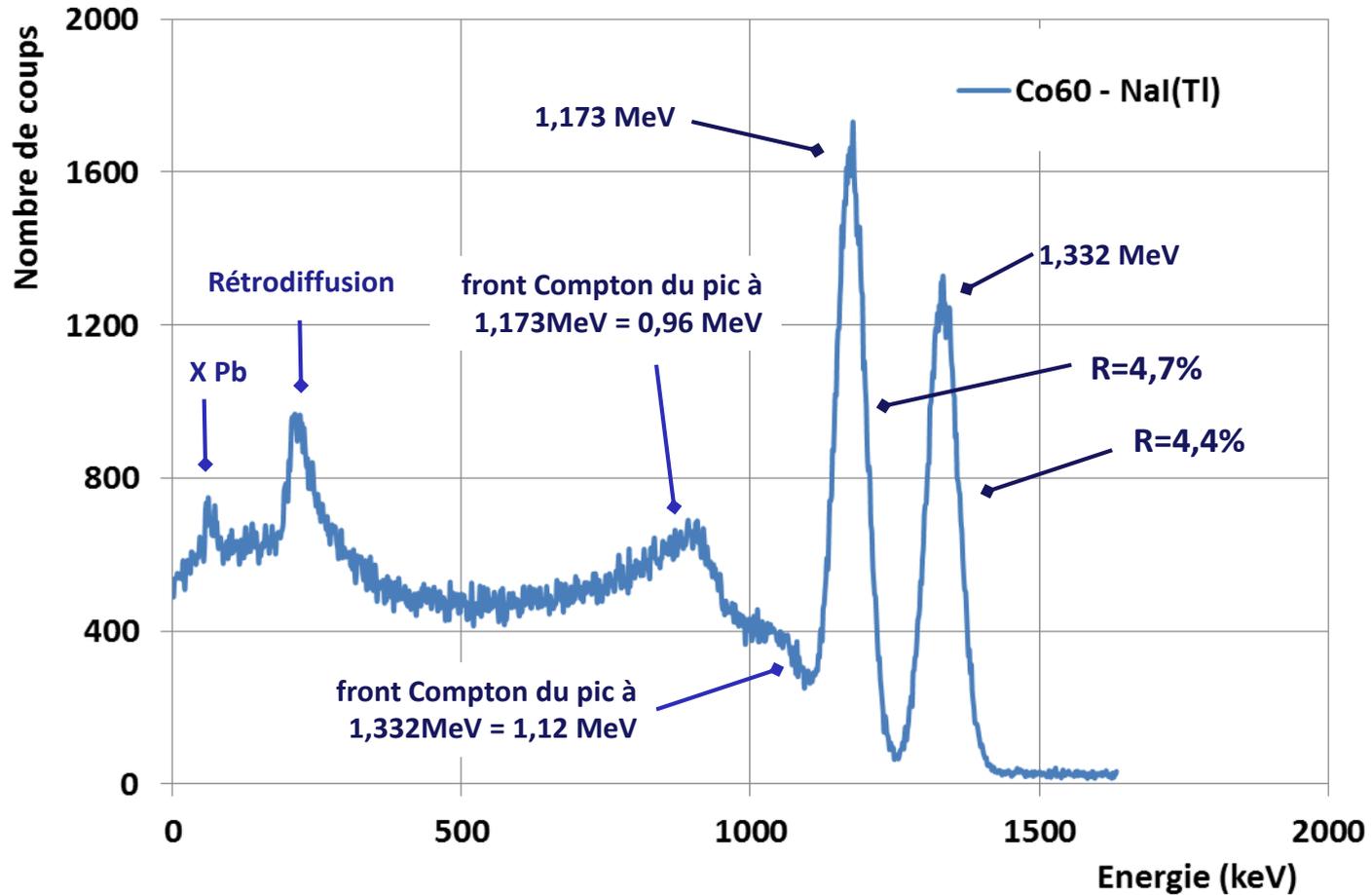
$Q = 2823,07\text{ keV}$

$\% \beta^- = 100$

| isotope          | abondance | période            |
|------------------|-----------|--------------------|
| $^{59}\text{Co}$ | 100%      | Stable 32 neutrons |
| $^{60}\text{Co}$ | synthèse  | Période 5,27 ans   |

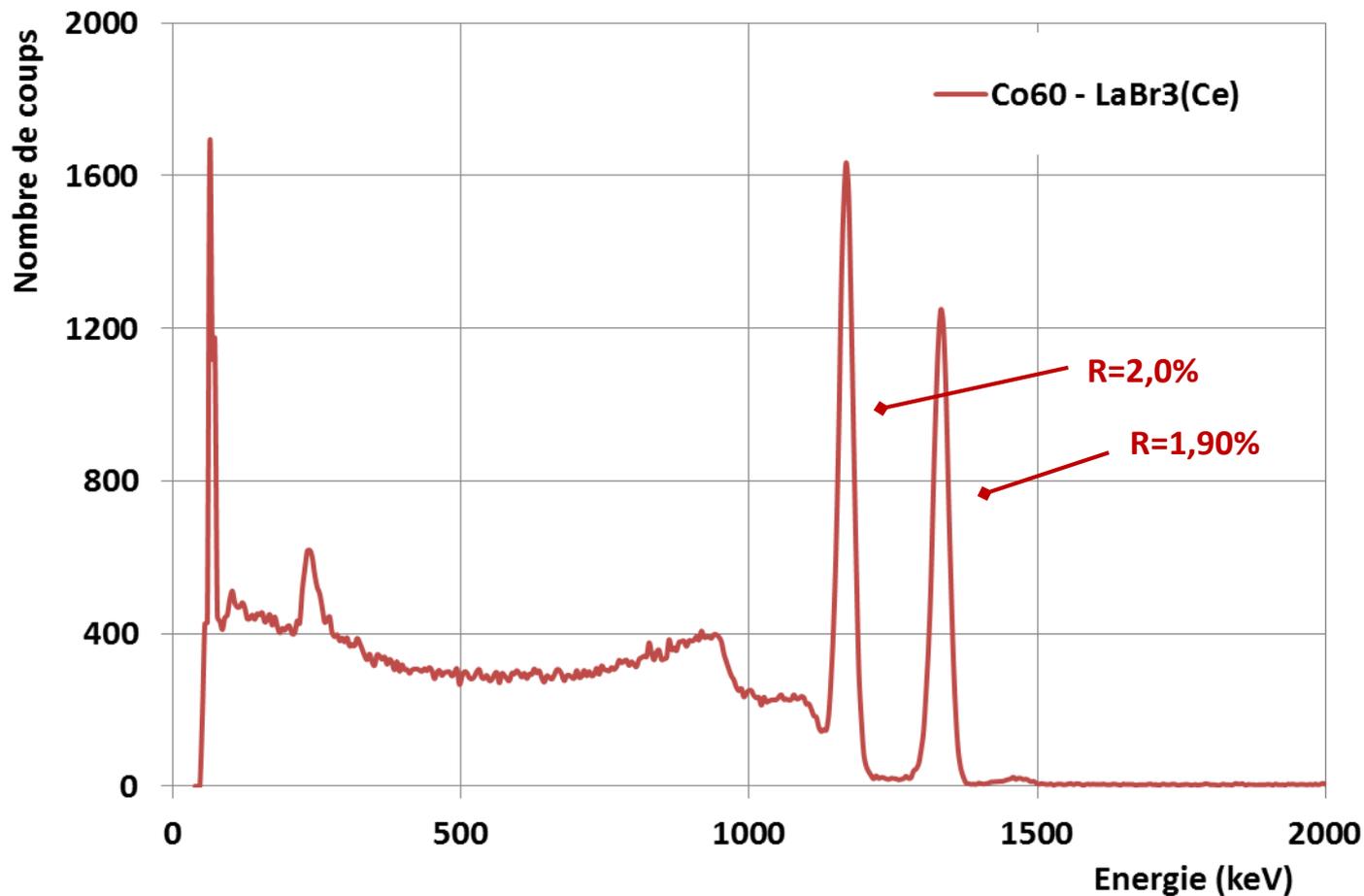
# Pics du $^{60}\text{Co}$

## PMT + Cristal NaI(Tl)



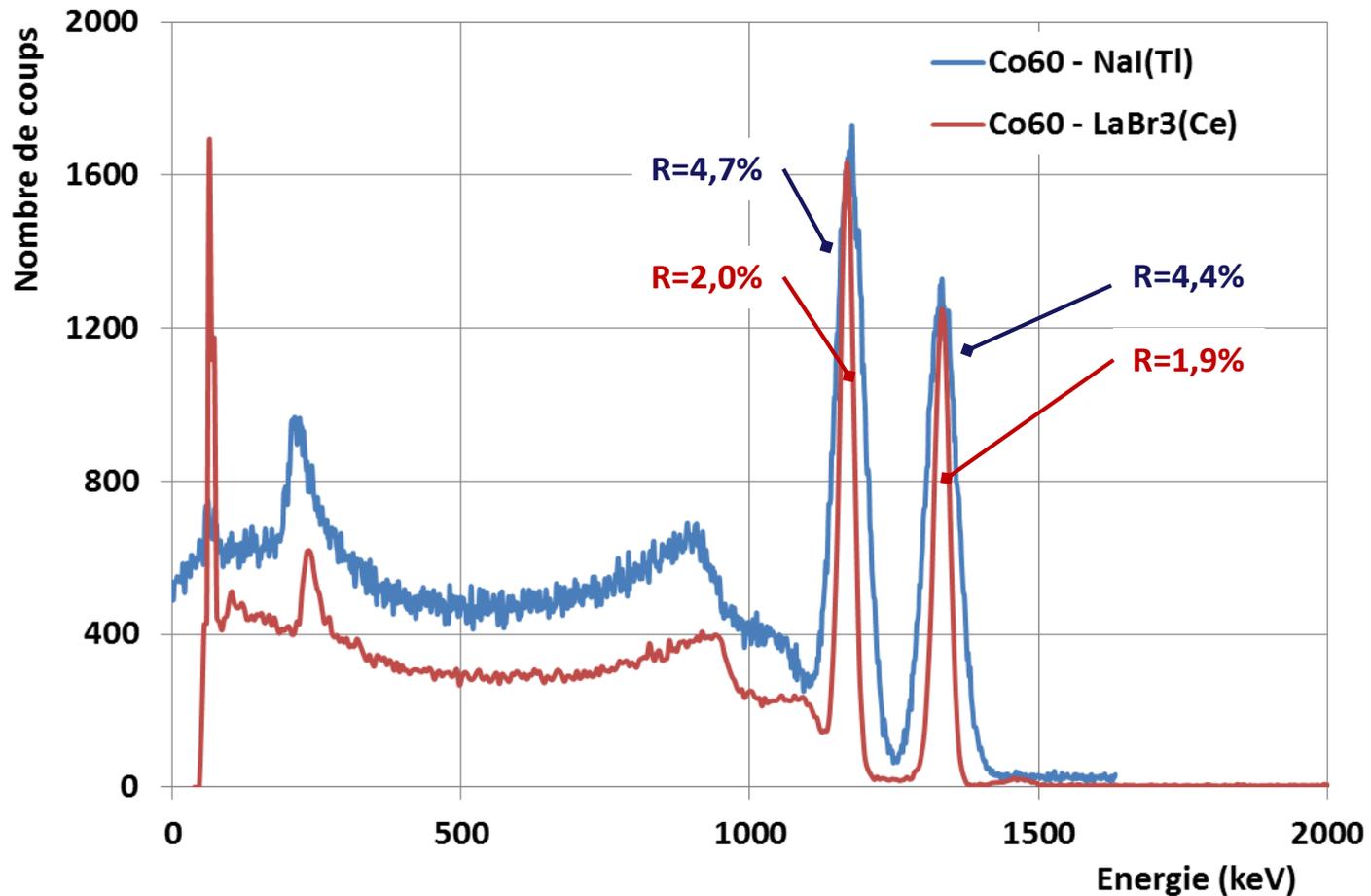
# Pics du $^{60}\text{Co}$

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



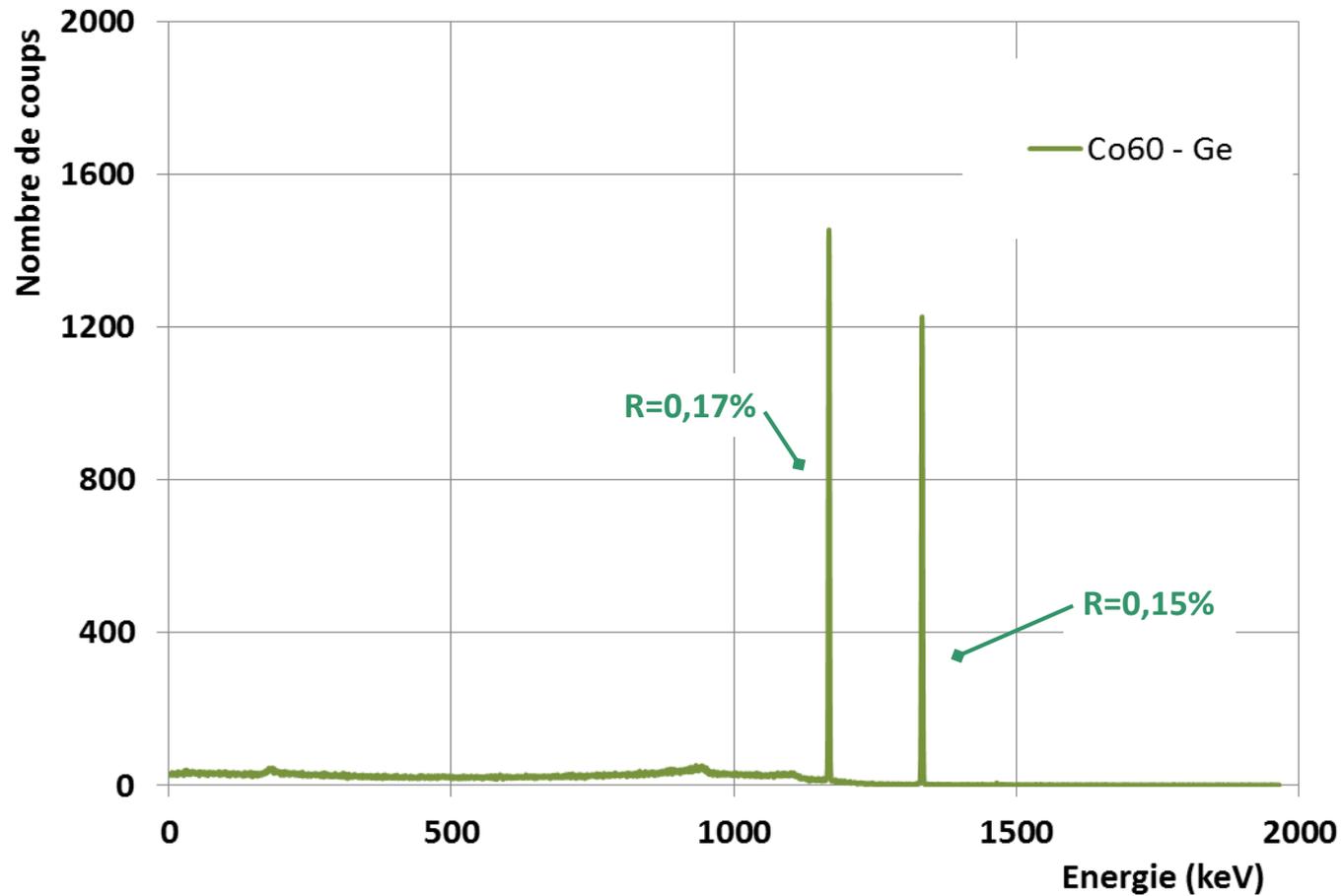
# Pics du $^{60}\text{Co}$

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



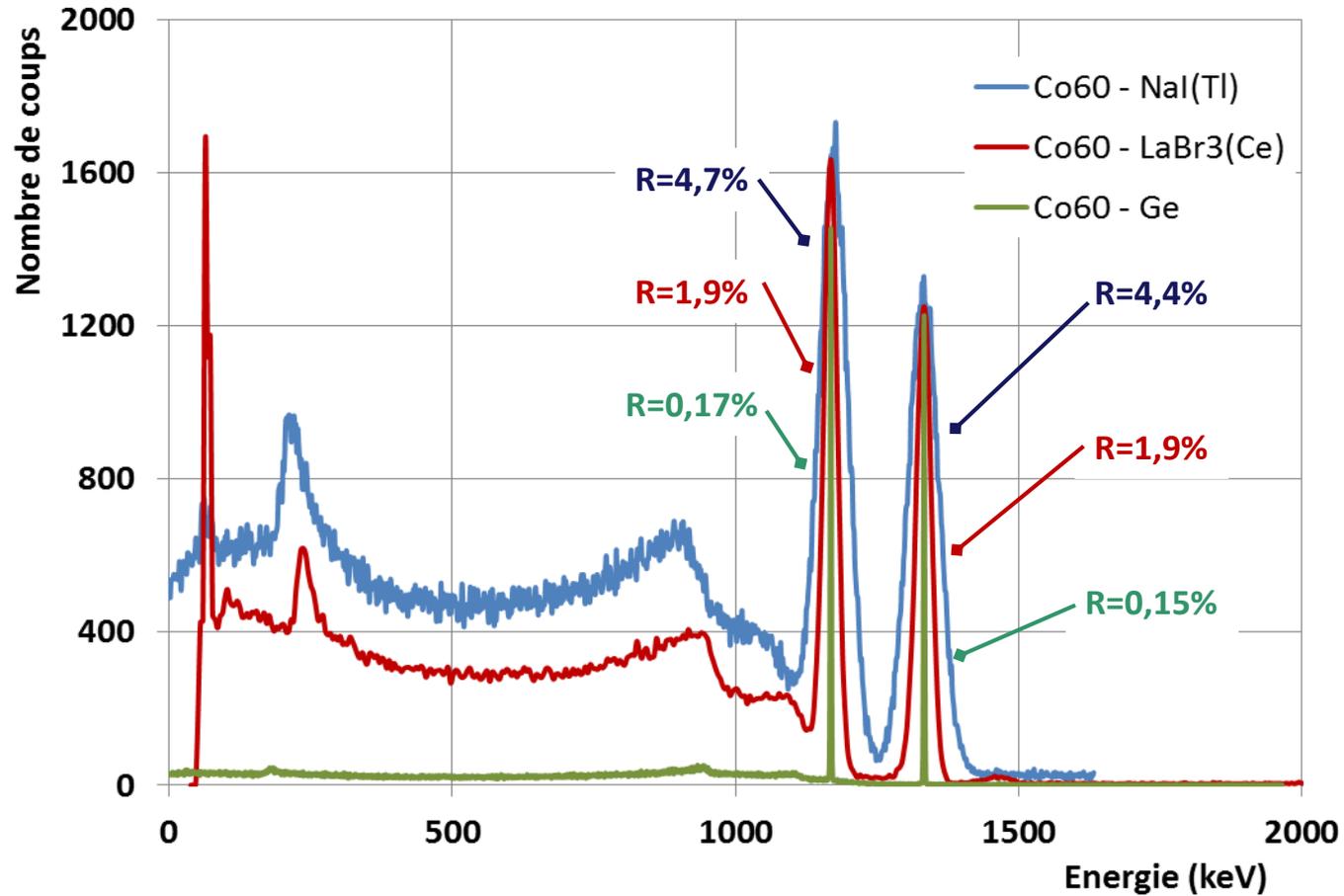
# Pics du $^{60}\text{Co}$

Cristal Ge



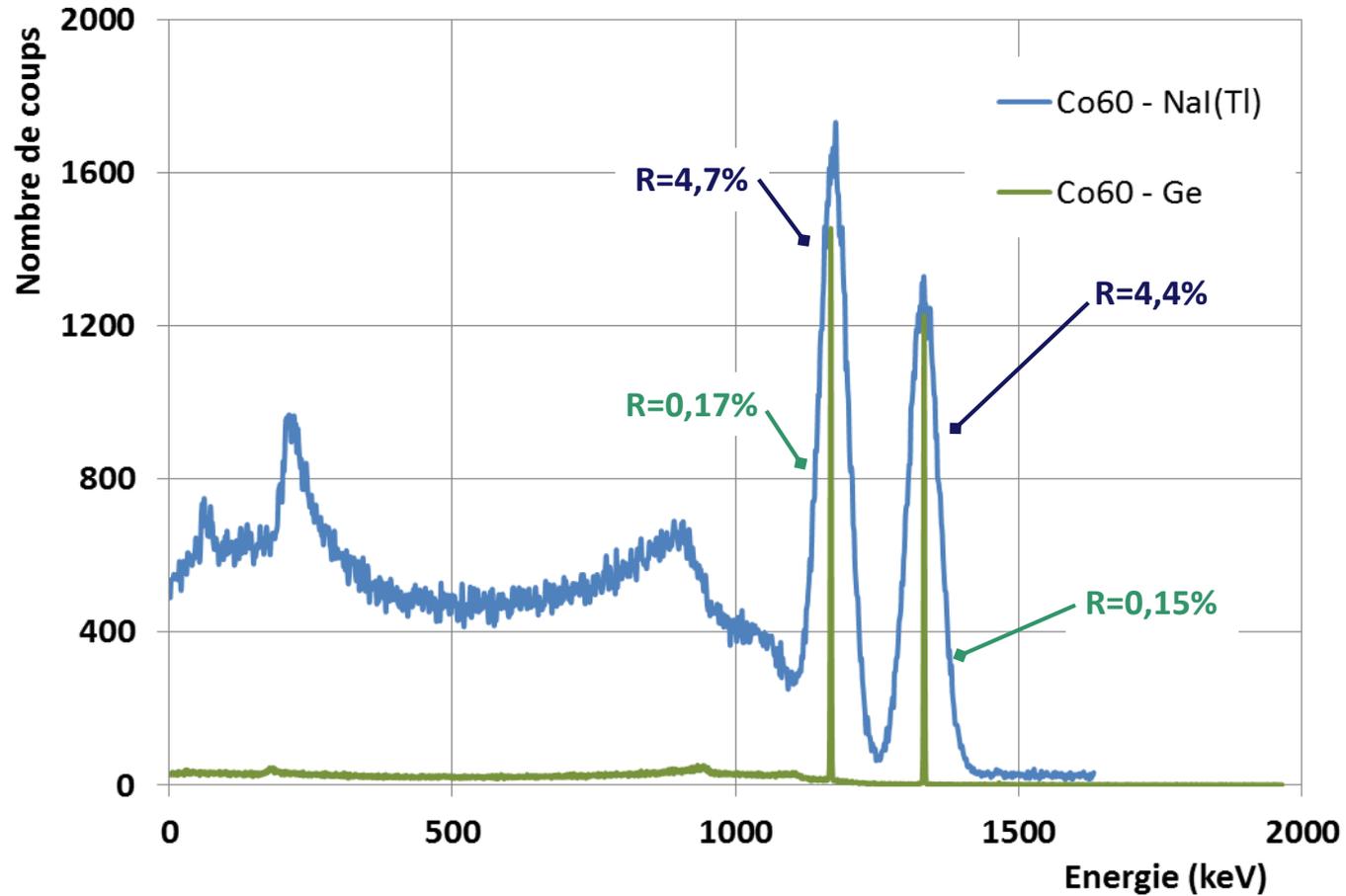
# Pics du $^{60}\text{Co}$

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



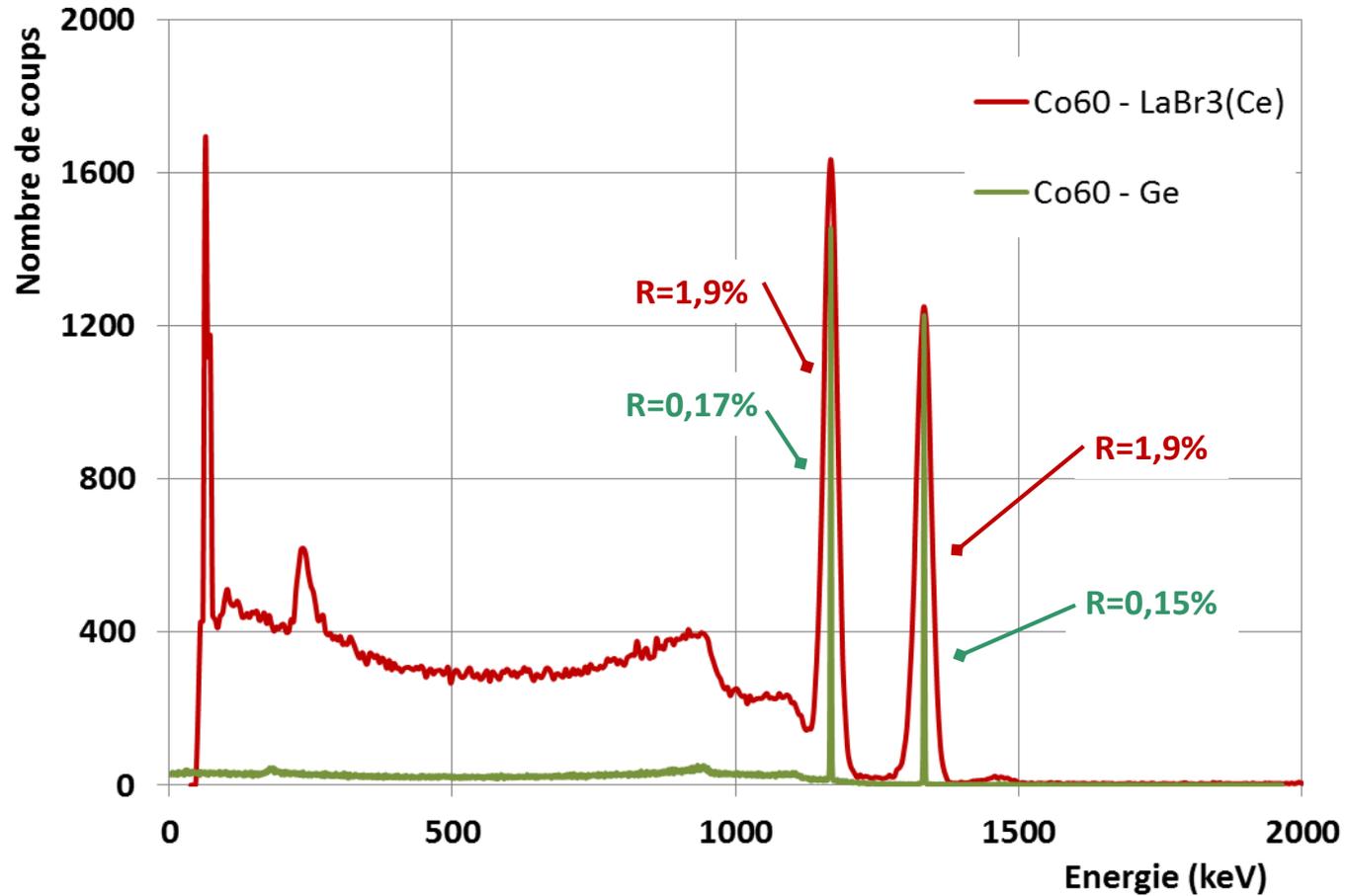
# Pics du $^{60}\text{Co}$

## Cristaux NaI(Tl) & Ge

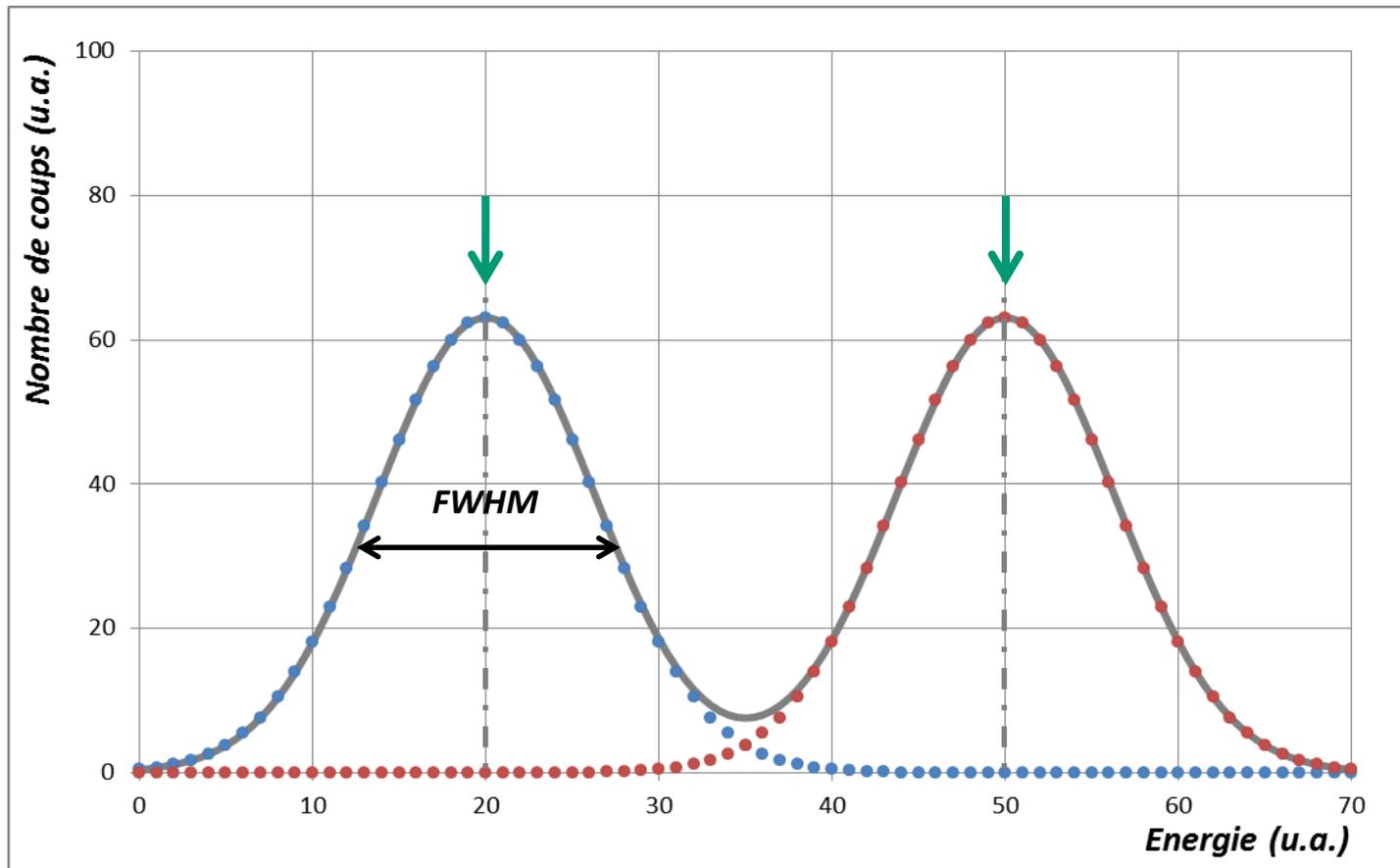


# Pics du $^{60}\text{Co}$

## Cristaux $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ & Ge

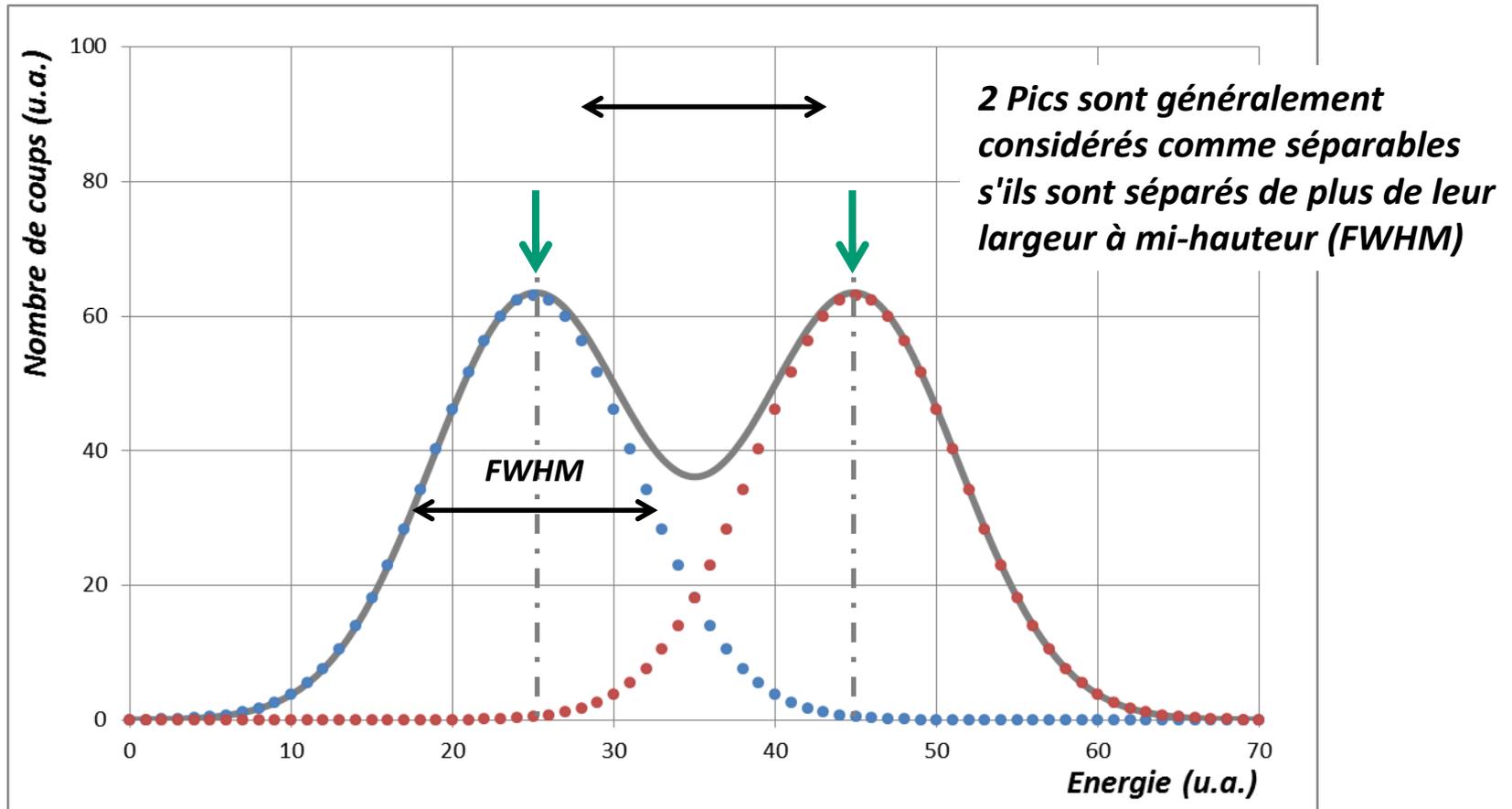


# Spectrométrie – Résolution



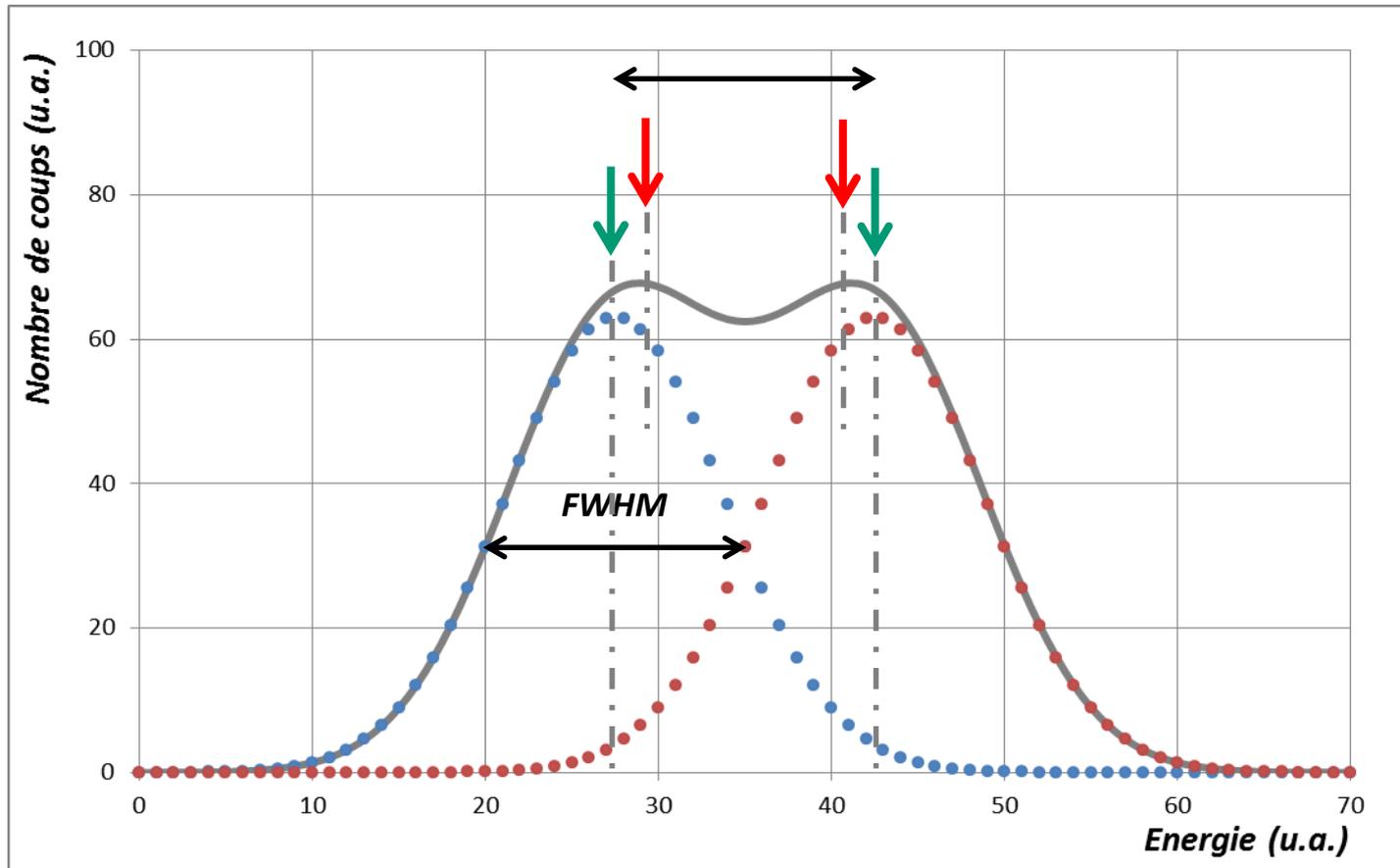
*Pics séparés*

# Spectrométrie – Résolution



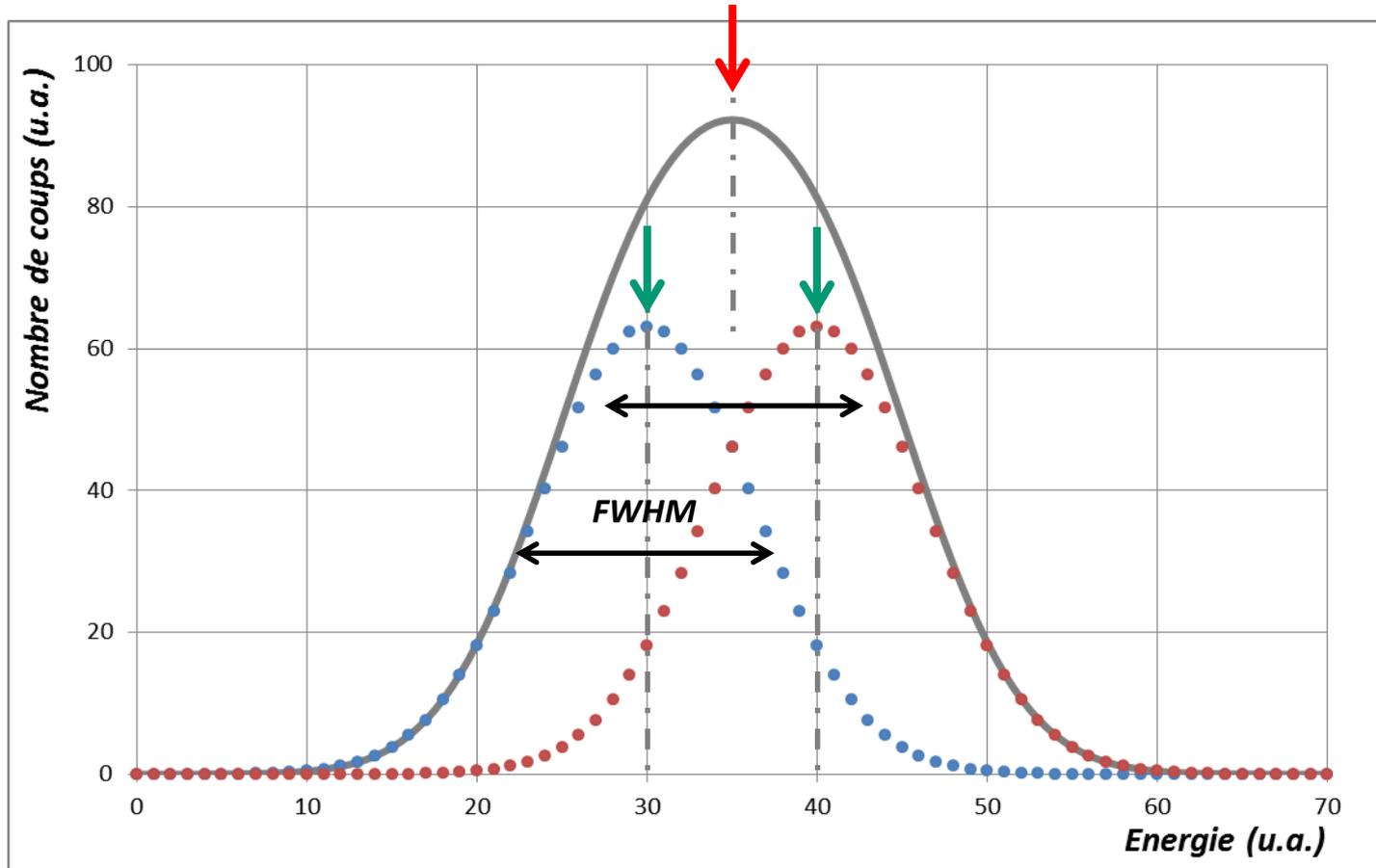
*Pics non séparés – Position juste*

# Spectrométrie – Résolution



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

# Spectrométrie – Résolution

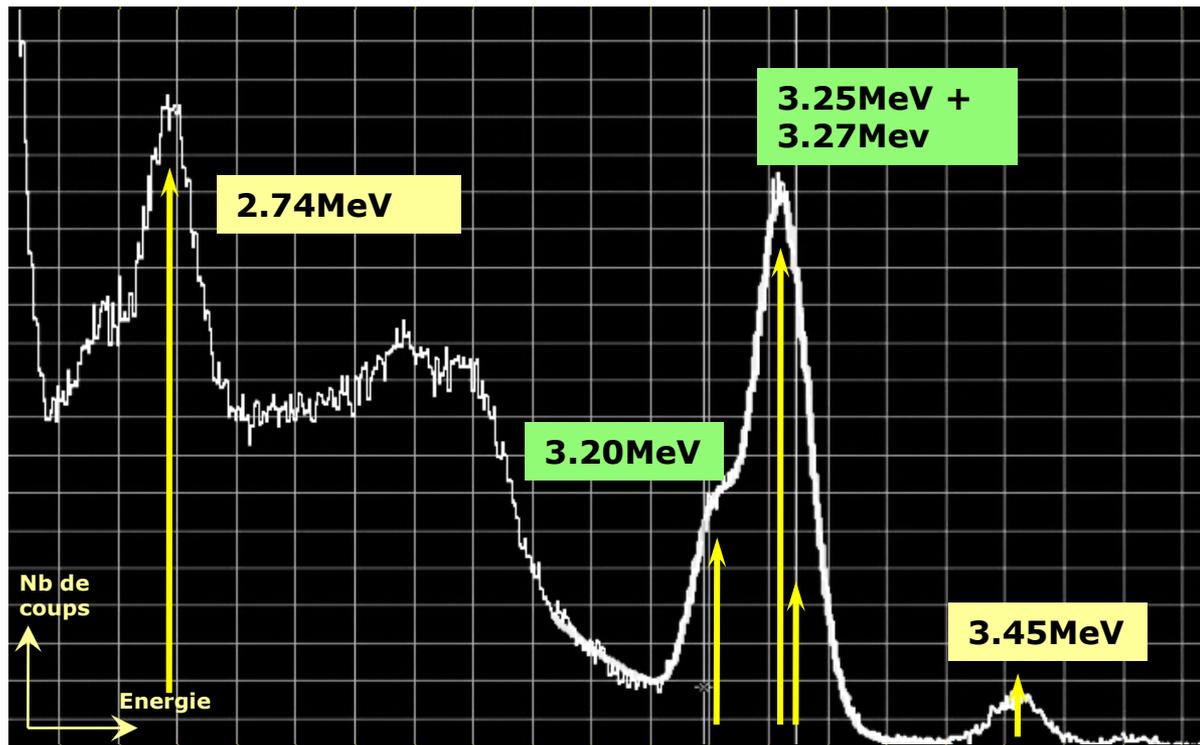


***Pics non séparables***

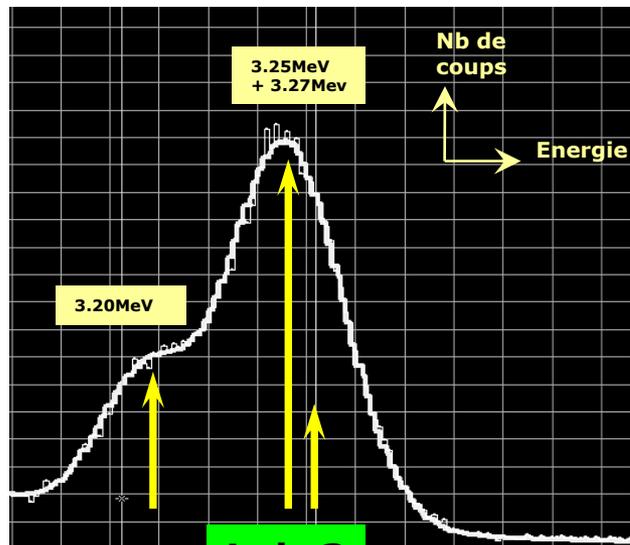
***Résolution sans rapport avec les phénomènes physiques à l'intérieur du détecteur***

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

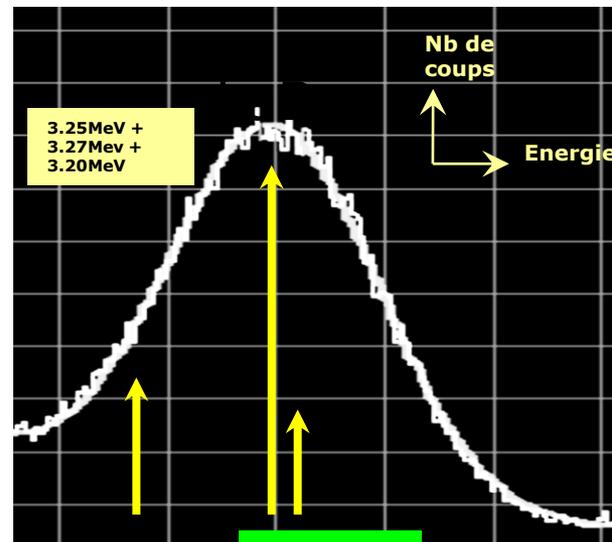
- Pour  $^{56}\text{Co}$ , 3 pics à 3,202, 3,253 et 3,273 MeV. Est-il possible de séparer ces pics les uns des autres?



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

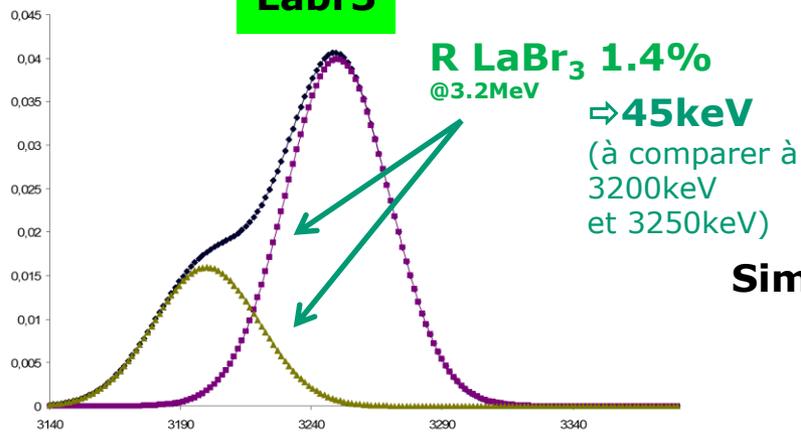


**LaBr3**

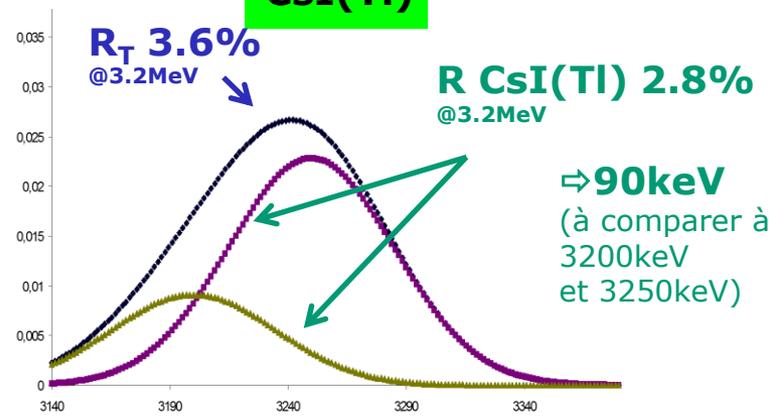


**CsI(Tl)**

Mesures



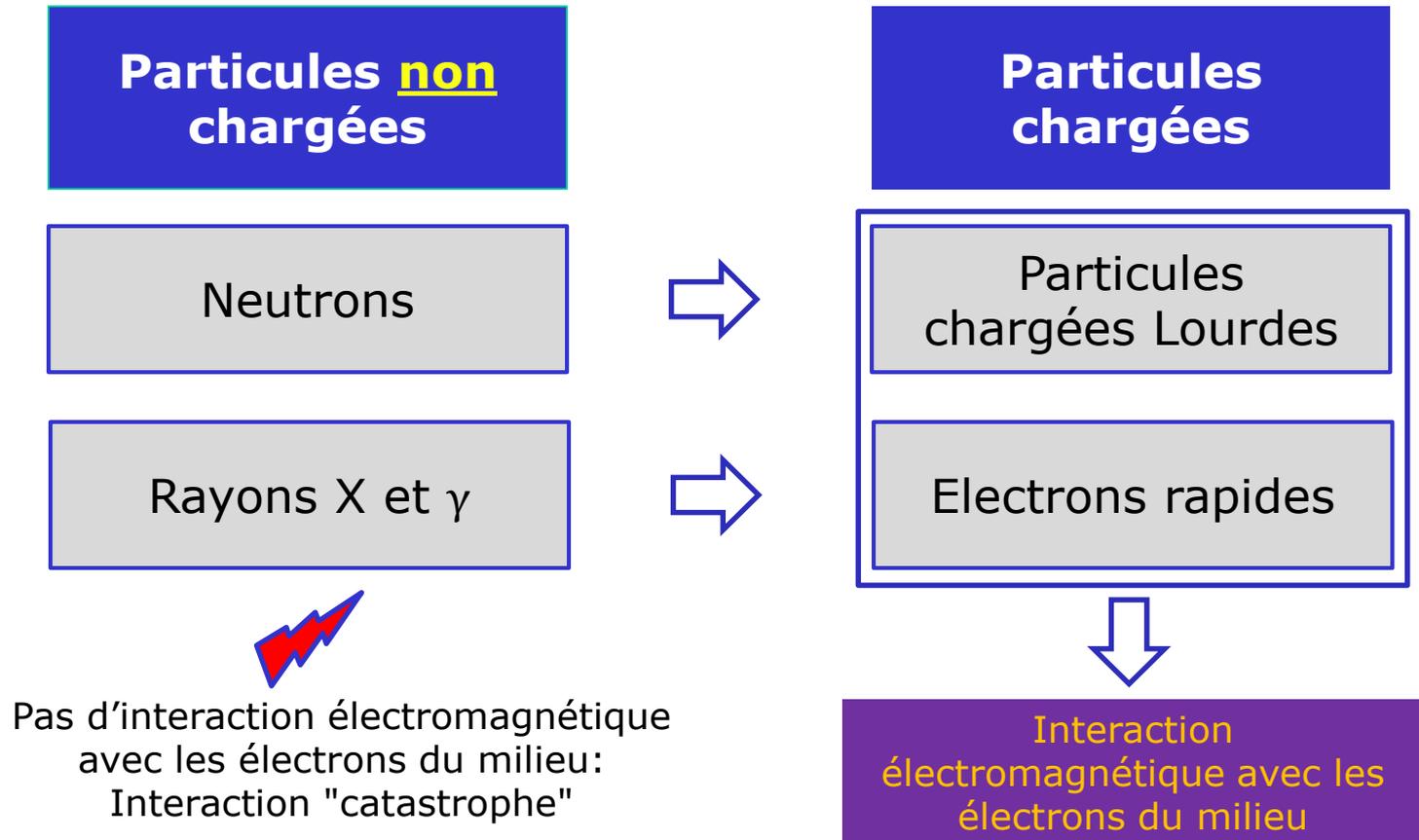
Simulation



# IX

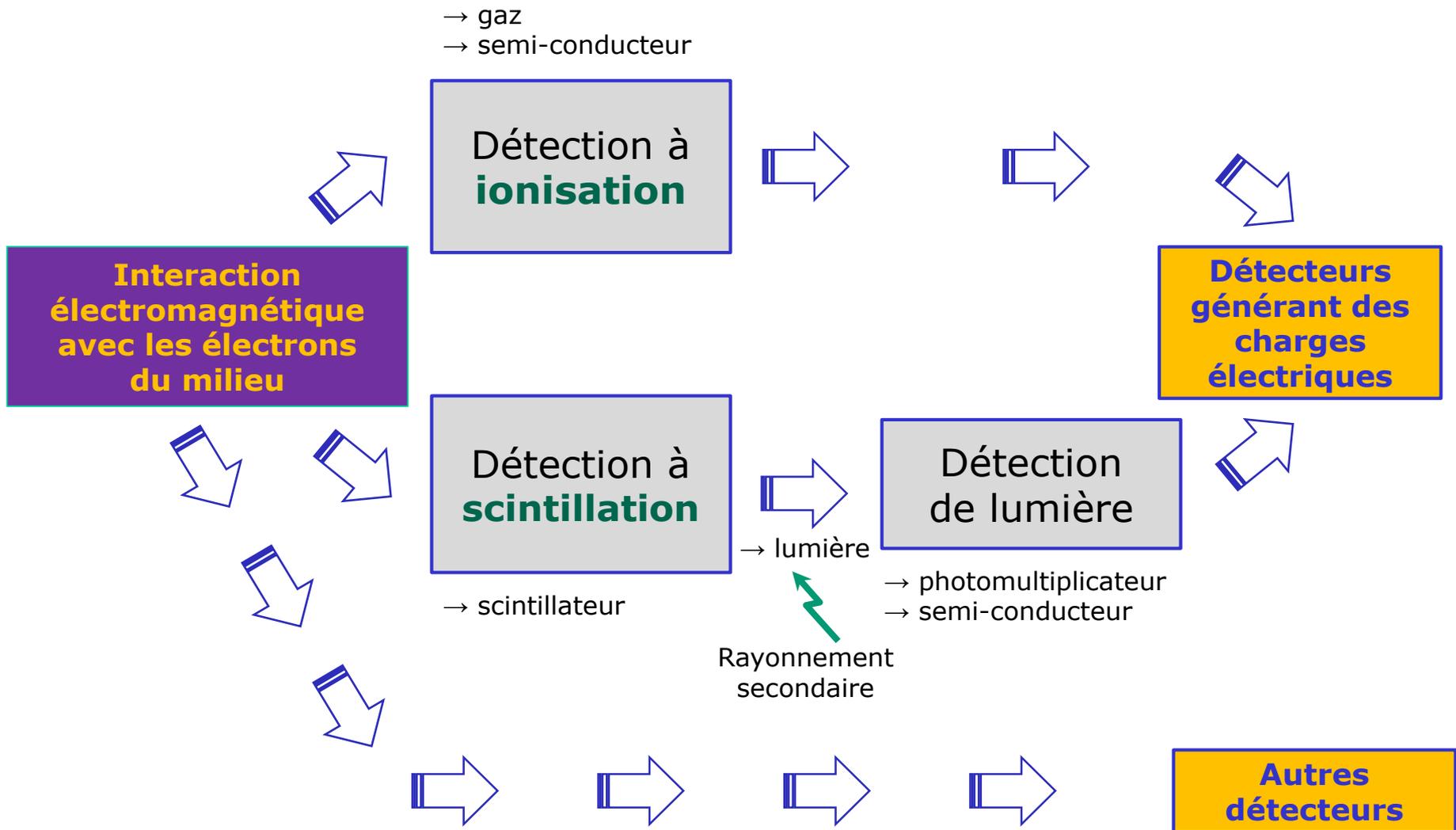
## Synthèse

# 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



# 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="#">table</a> | <a href="#">comments</a> | <a href="#">ensdf</a> | <a href="#">txt</a> | 5  | 26/08/2009 | 3    |
| Ac-227  | <a href="#">table</a> | <a href="#">comments</a> | <a href="#">ensdf</a> | <a href="#">txt</a> | 4  | 16/02/2009 | 2    |
| Ac-228  | <a href="#">table</a> | <a href="#">comments</a> | <a href="#">ensdf</a> | <a href="#">txt</a> | 6  | 22/01/2010 | 3    |
| Ag-108  | <a href="#">table</a> | <a href="#">comments</a> | <a href="#">ensdf</a> | <a href="#">txt</a> | 3  | 4/09/2006  | 2    |
| Ag-108m | <a href="#">table</a> | <a href="#">comments</a> | <a href="#">ensdf</a> | <a href="#">txt</a> | 3  | 17/01/2012 | 2    |
| Ag-110  | <a href="#">table</a> | <a href="#">comments</a> | <a href="#">ensdf</a> | <a href="#">txt</a> | 1  | 12/03/2004 | 1    |
| Ag-110m | <a href="#">table</a> | <a href="#">comments</a> | <a href="#">ensdf</a> | <a href="#">txt</a> | 1  | 24/03/2004 | 1    |
| Al-26   | <a href="#">table</a> | <a href="#">comments</a> | <a href="#">ensdf</a> | <a href="#">txt</a> | 99 | 24/07/2003 | 1    |
| Am-241  | <a href="#">table</a> | <a href="#">comments</a> | <a href="#">ensdf</a> | <a href="#">txt</a> | 5  | 20/08/2010 | 2    |
| Am-242  | <a href="#">table</a> | <a href="#">comments</a> | <a href="#">ensdf</a> | <a href="#">txt</a> | 5  | 18/01/2011 | 2    |
| Am-242m | <a href="#">table</a> | <a href="#">comments</a> | <a href="#">ensdf</a> | <a href="#">txt</a> | 6  | 18/01/2011 | 2    |
| Am-243  | <a href="#">table</a> | <a href="#">comments</a> | <a href="#">ensdf</a> | <a href="#">txt</a> | 5  | 26/02/2010 | 2    |
| Am-244  | <a href="#">table</a> | <a href="#">comments</a> | <a href="#">ensdf</a> | <a href="#">txt</a> | 5  | 18/01/2011 | 2    |
| Am-244m | <a href="#">table</a> | <a href="#">comments</a> | <a href="#">ensdf</a> | <a href="#">txt</a> | 5  | 18/01/2011 | 2    |
| Ar-37   | <a href="#">table</a> | <a href="#">comments</a> | <a href="#">ensdf</a> | <a href="#">txt</a> | 7  | 16/10/2012 | N    |
| Ar-41   | <a href="#">table</a> | <a href="#">comments</a> | <a href="#">ensdf</a> | <a href="#">txt</a> | 6  | 4/05/2010  | 3    |

|                   | Tables                | Comments                 | ENSDF                 | ASCII               | In | UpDate     | Type |
|-------------------|-----------------------|--------------------------|-----------------------|---------------------|----|------------|------|
| <sup>15</sup> O   | <a href="#">table</a> | <a href="#">comments</a> | <a href="#">ensdf</a> | <a href="#">txt</a> | 1  | 1/06/2004  | 1    |
| <sup>32</sup> P   | <a href="#">table</a> | <a href="#">comments</a> | <a href="#">ensdf</a> | <a href="#">txt</a> | 1  | 8/04/2004  | 1    |
| <sup>33</sup> P   | <a href="#">table</a> | <a href="#">comments</a> | <a href="#">ensdf</a> | <a href="#">txt</a> | 1  | 8/04/2004  | 1    |
| <sup>31</sup> Pa  | <a href="#">table</a> | <a href="#">comments</a> | <a href="#">ensdf</a> | <a href="#">txt</a> | 6  | 23/02/2011 | 3    |
| <sup>33</sup> Pa  | <a href="#">table</a> | <a href="#">comments</a> | <a href="#">ensdf</a> | <a href="#">txt</a> | 5  | 11/01/2010 | 2    |
| <sup>34</sup> Pa  | <a href="#">table</a> | <a href="#">comments</a> | <a href="#">ensdf</a> | <a href="#">txt</a> | 6  | 31/01/2011 | 3    |
| <sup>4m</sup> Pa  | <a href="#">table</a> | <a href="#">comments</a> | <a href="#">ensdf</a> | <a href="#">txt</a> | 6  | 31/01/2011 | 3    |
| <sup>203</sup> Pb | <a href="#">table</a> | <a href="#">comments</a> | <a href="#">ensdf</a> | <a href="#">txt</a> | 3  | 20/09/2006 | 3    |
| <sup>209</sup> Pb | <a href="#">table</a> | <a href="#">comments</a> | <a href="#">ensdf</a> | <a href="#">txt</a> | 7  | 30/05/2011 | N    |
| <sup>210</sup> Pb | <a href="#">table</a> | <a href="#">comments</a> | <a href="#">ensdf</a> | <a href="#">txt</a> | 4  | 17/01/2012 | 2    |
| <sup>211</sup> Pb | <a href="#">table</a> | <a href="#">comments</a> | <a href="#">ensdf</a> | <a href="#">txt</a> | 7  | 4/01/2013  | 1    |
| <sup>212</sup> Pb | <a href="#">table</a> | <a href="#">comments</a> | <a href="#">ensdf</a> | <a href="#">txt</a> | 2  | 6/04/2011  | 2    |
| <sup>214</sup> Pb | <a href="#">table</a> | <a href="#">comments</a> | <a href="#">ensdf</a> | <a href="#">txt</a> | 4  | 18/01/2011 | 2    |
| <sup>209</sup> Pd | <a href="#">table</a> | <a href="#">comments</a> | <a href="#">ensdf</a> | <a href="#">txt</a> | 6  | 22/01/2010 | 1    |
| Pm-147            | <a href="#">table</a> | <a href="#">comments</a> | <a href="#">ensdf</a> | <a href="#">txt</a> | 7  | 4/01/2013  | 2    |
| Pm-148            | <a href="#">table</a> | <a href="#">comments</a> | <a href="#">ensdf</a> | <a href="#">txt</a> | 8  | 8/11/2012  | N    |