

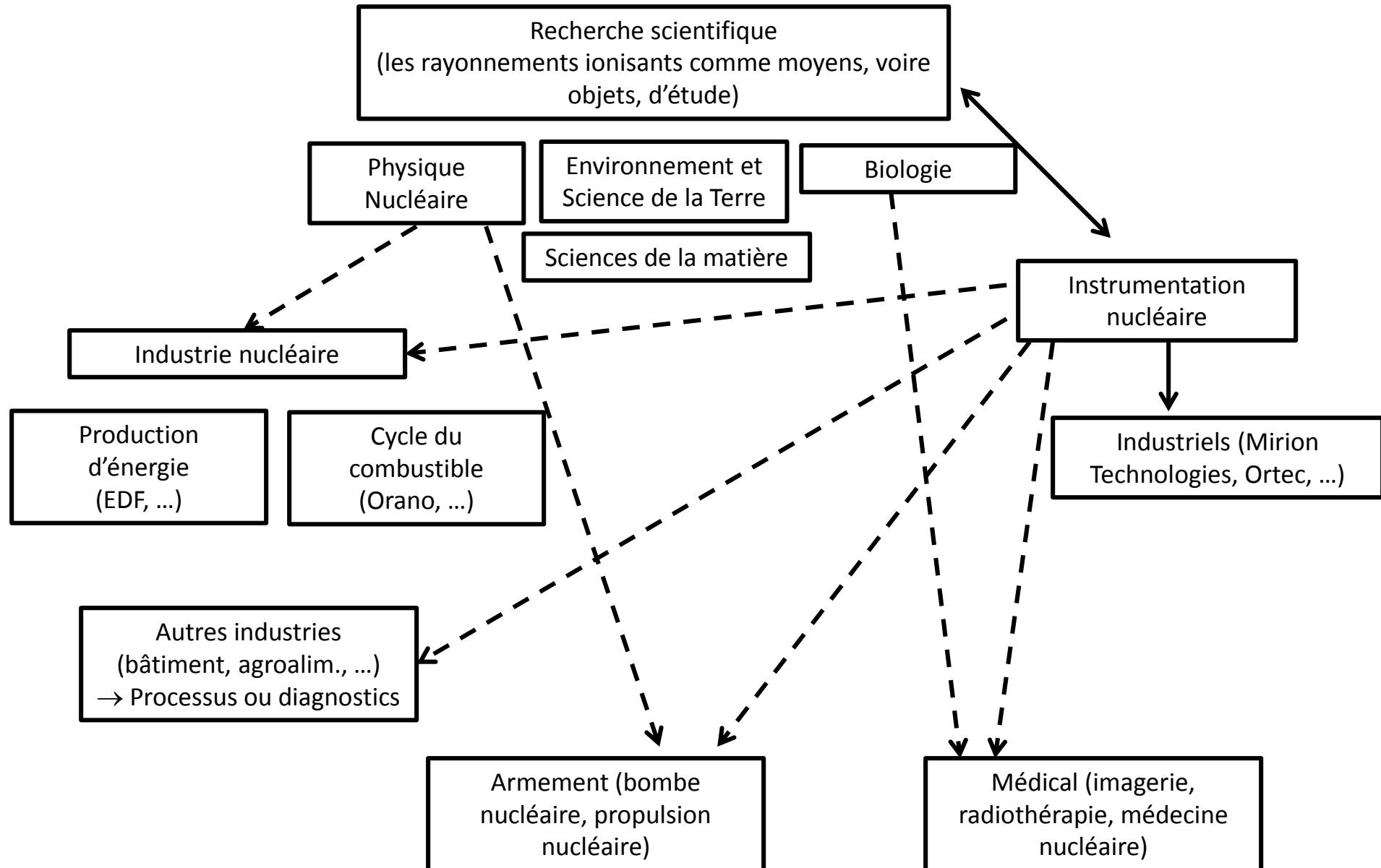
# Ionizing radiations: Origin, Measurement, Applications

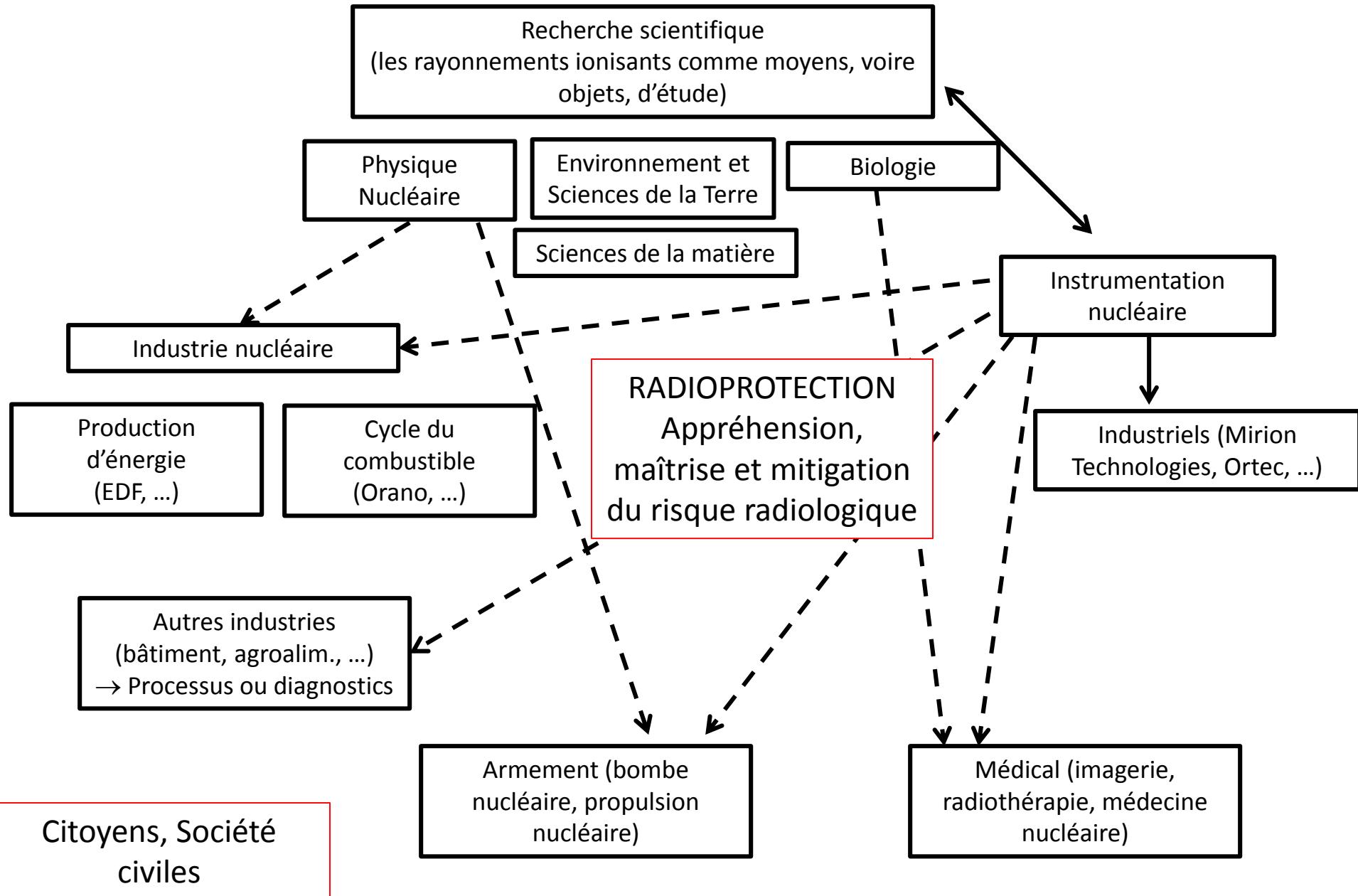
EUR TESS

Pierre-Yves Meslin

Institut de Recherche en Astrophysique et Planétologie (IRAP) – Toulouse

[pmeslin@irap.omp.eu](mailto:pmeslin@irap.omp.eu)





# Outline

**0. Ionizing radiations : introduction**

**1. Basics of radioactivity and Definitions**

**2. Origins of ionizing radiations**

**3. Interactions between ionizing radiations and matter**

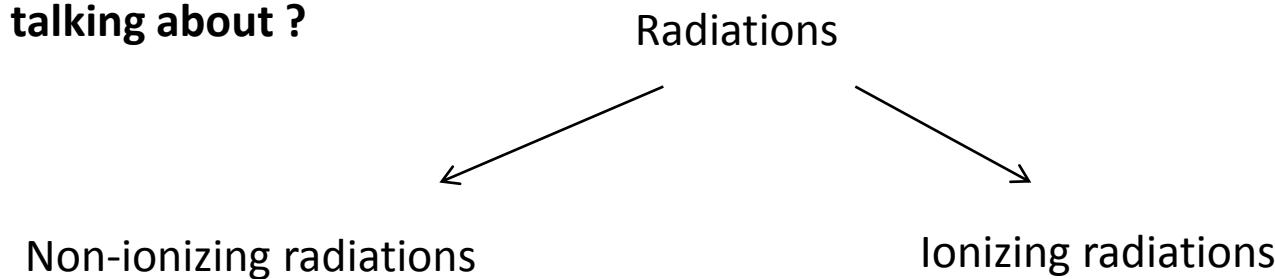
**4. Radionuclides found in the environment**

**5. Measurement of Ionizing radiations: Applications**

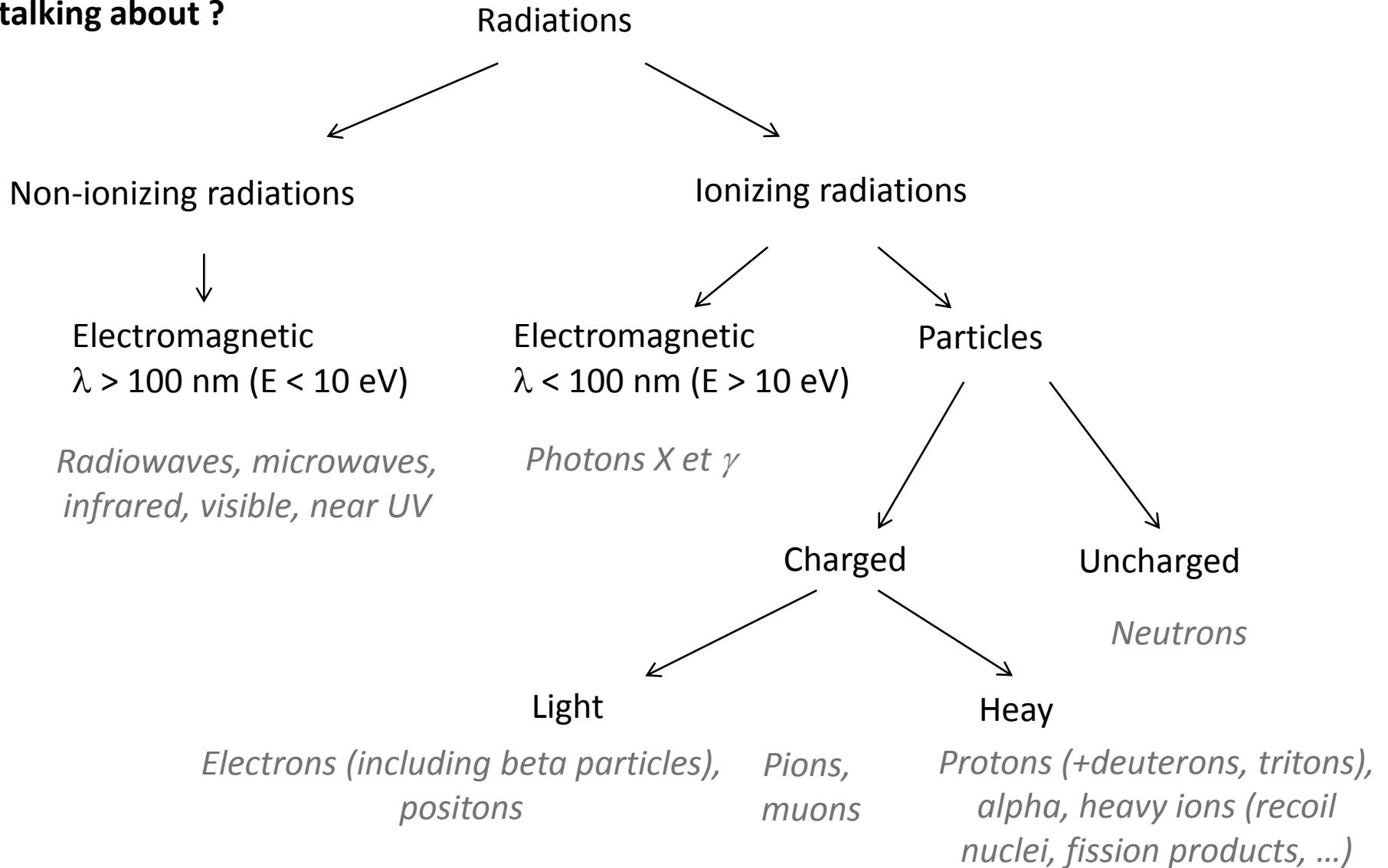
**6. How to measure them ? Basics of nuclear instrumentation**

**7. Case study**

**Which radiations are we talking about ?**



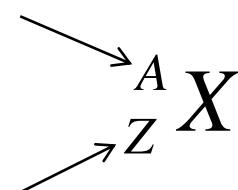
## Which radiations are we talking about ?



# 1. Basics of radioactivity and Definitions

## Definitions :

**Mass number** = number of nuclei  
 $(Z+N) \neq$  mass of the nucleus



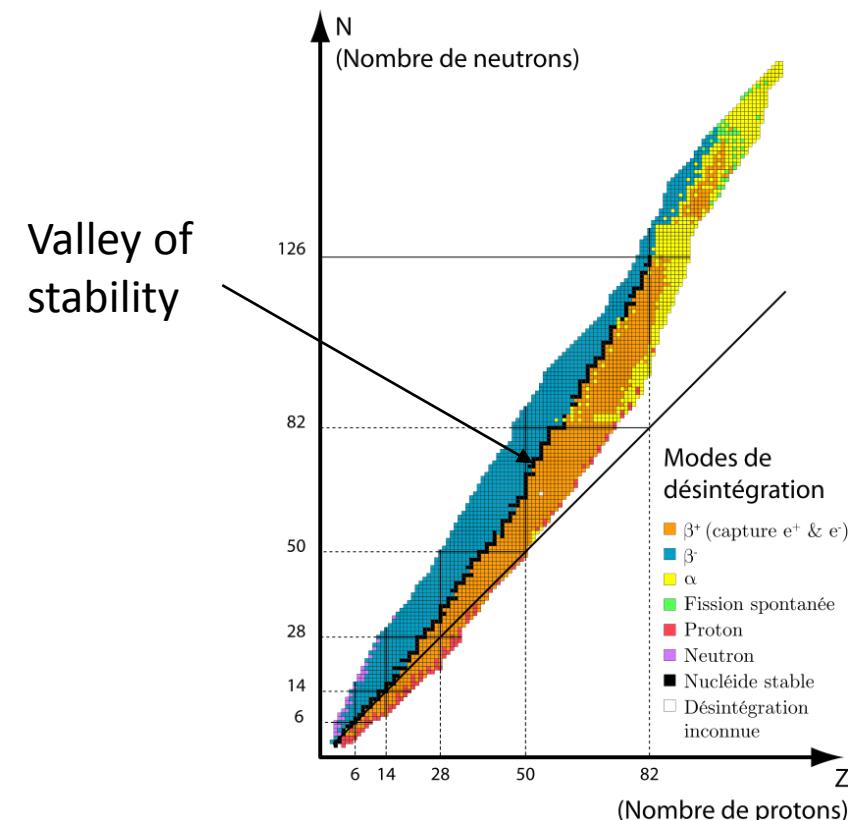
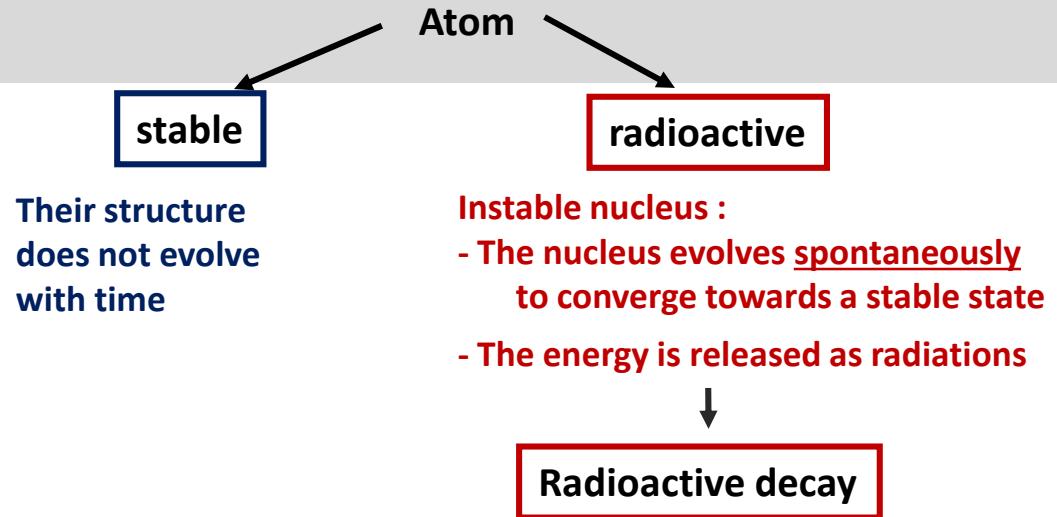
**Atomic number** = number of protons (= number of electrons)  
→ Defines chemical elements

- **Isotopes** : nuclei (or atoms) having same atomic number  $Z$ , but different mass number  $A$  (different number of neutrons)



- **Radioisotope** (or radionuclide) : radioactive isotope of an element

- **Radioelement** : elements that only possess radioactive isotopes ( $Z > 82$  (Lead))



## Definitions :

- Radioactive decay is a spontaneous and random process
- Activity  $A$  of a radionuclide (population of  $N$  nuclei) = average of number of disintegrations per unit of time (statistical concept):

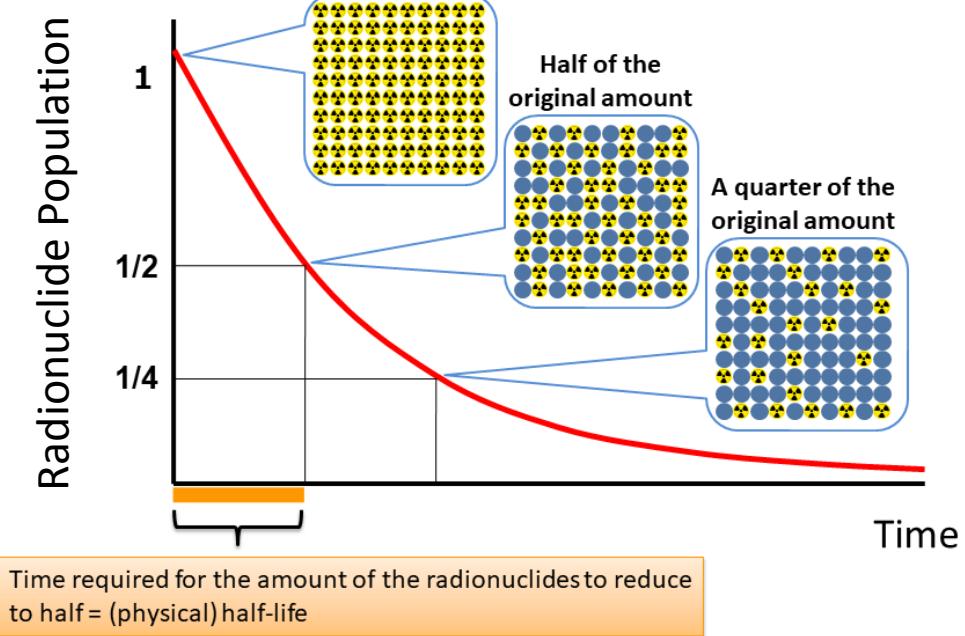
$$\frac{dN}{dt} \Big|_{\text{décroissance radioact.}} = -\lambda N \quad \text{and} \quad A = \lambda N$$

Unit: **1 Bq (s<sup>-1</sup>)**

- **Decay constant  $\lambda$**  = probability of disintegration per unit time (s<sup>-1</sup>)  
→ characteristic of a radionuclide

- Life expectancy :  $\tau = \frac{1}{\lambda}$

- Period (or half-life) :  $T = \frac{\ln(2)}{\lambda} < \tau$  (ex : <sup>137</sup>Cs : T = 30 years)



$$N(t) = N(0) e^{-\lambda t}$$

$$N(t) = \frac{N(0)}{2^{\frac{t}{T}}}$$

Time needed to divide the initial population by a factor of 1000 ?

### Definitions :

- **Usual energy unit:** electron-volt

1 eV = energy acquired by an electron accelerated under a difference of electrical potential of 1 Volt :

$$1 \text{ eV} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$$

In the field of ionizing radiations, units of keV, MeV are often used (and GeV, TeV in astrophysics and high-energy particles physics)

- **Atomic mass unit :**  $1 \text{ u} = \frac{m_{atom}(^{12}\text{C})}{12}$

## Origins of ionizing radiations?

➤ **Heavy charged particles ( $Z \geq 1$ )**

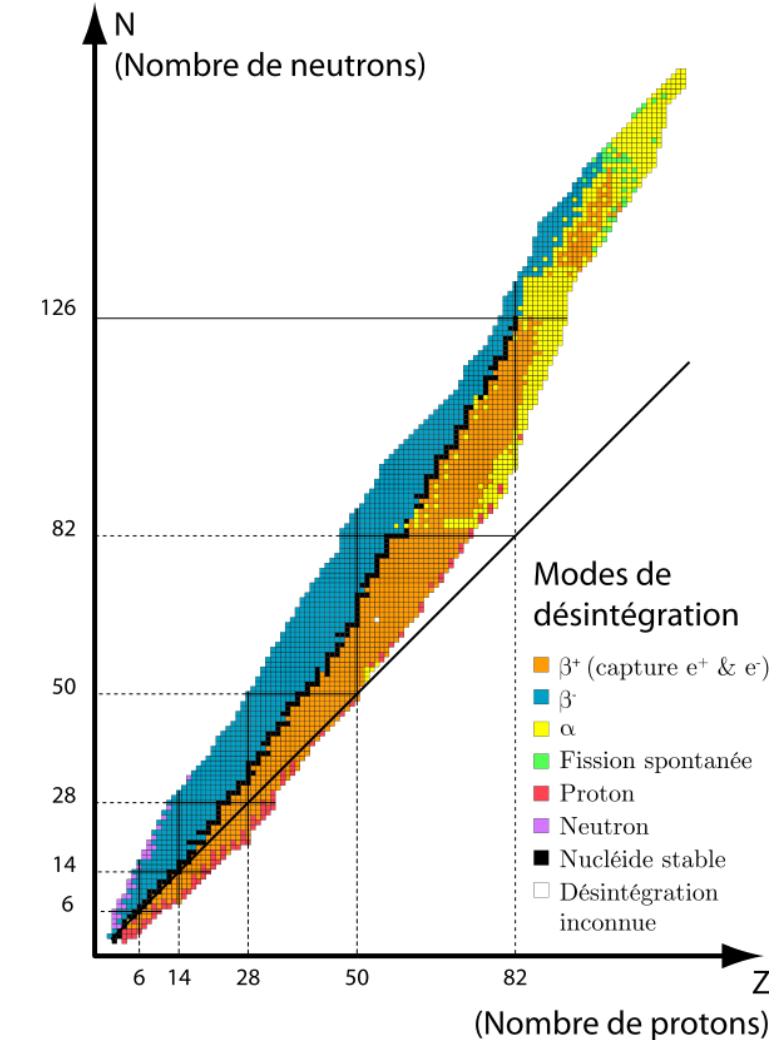
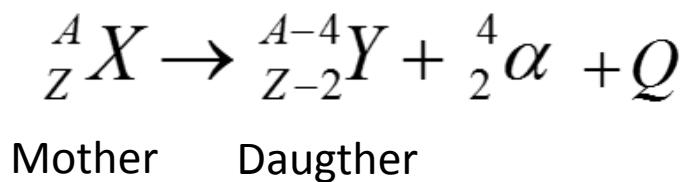
➤ **Alpha particles:**

## Origins of ionizing radiations?

### ➤ Heavy charged particles ( $Z \geq 1$ )

➤ **Alpha particles:**  $\alpha = {}_2^4He^{2+}$

- Originate from the radioactivity of **unstable heavy nuclei**, but also from the acceleration of helium-4 ions (e.g., 11% of cosmic rays), or from nuclear reactions

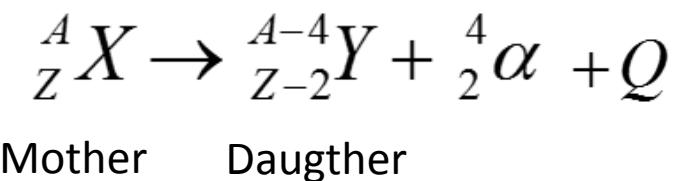


## Origins of ionizing radiations?

### ➤ Heavy charged particles ( $Z \geq 1$ )

➤ **Alpha particles:**  $\alpha = {}_2^4He^{2+}$

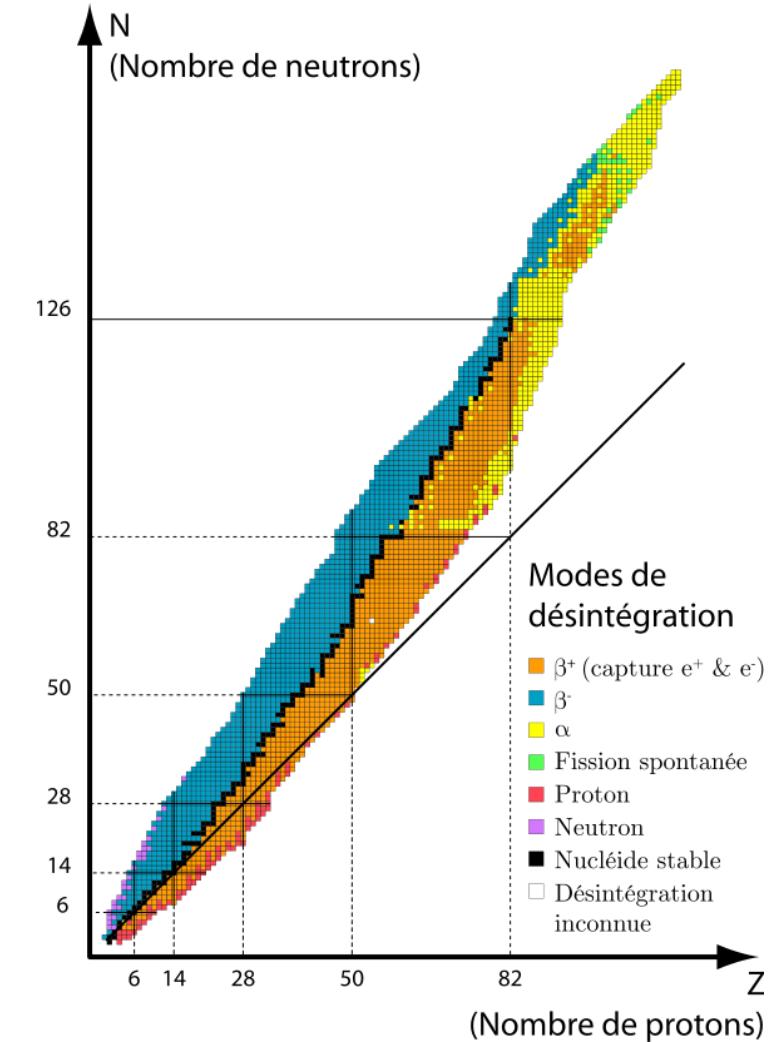
- Originate from the radioactivity of **unstable heavy nuclei**, but also from the acceleration of helium-4 ions (e.g., 11% of cosmic rays), or from nuclear reactions



$$Q = \Delta m_t c^2 = [m(X) - m(Y) - m(\alpha)] c^2 > 0 \rightarrow \text{Energy released}$$

Mass defect

$$= \Delta m_t (\text{u}) \times 931,5 (\text{MeV/u}) \rightarrow \text{MeV}$$

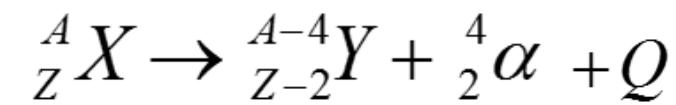


## Origins of ionizing radiations?

### ➤ Heavy charged particles ( $Z \geq 1$ )

➤ **Alpha particles:**  $\alpha = {}_2^4He^{2+}$

- Originate from the radioactivity of **unstable heavy nuclei**, but also from the acceleration of helium-4 ions (e.g., 11% of cosmic rays), or from nuclear reactions



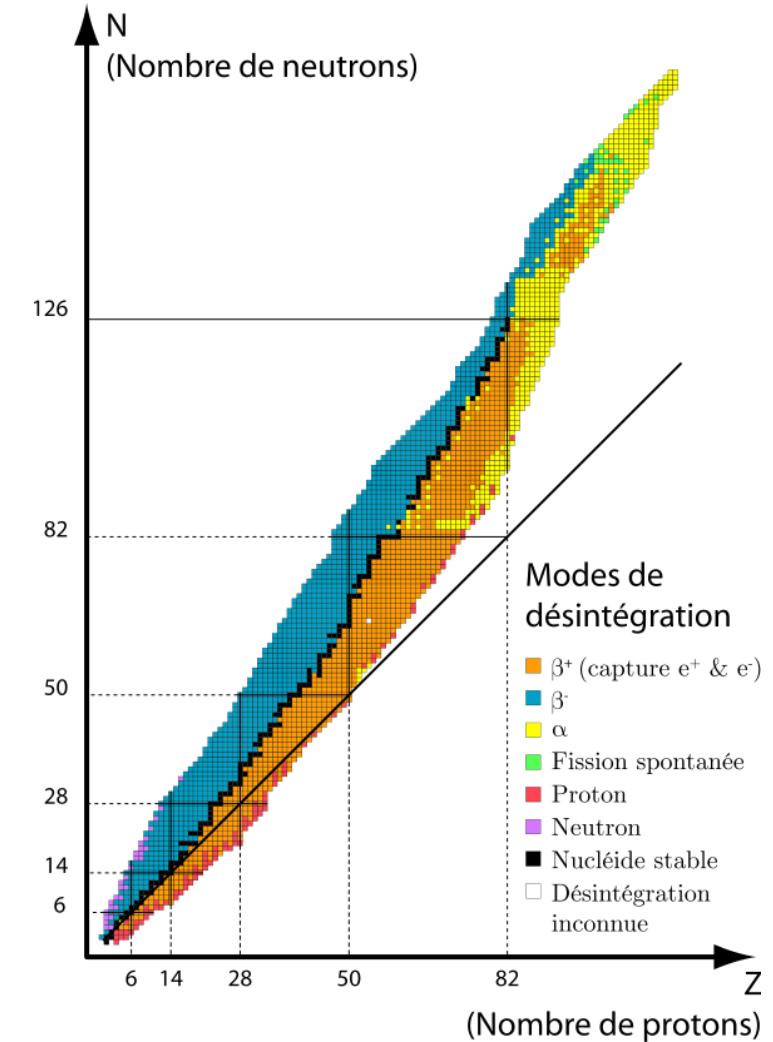
Mother      Daugther

$$Q = \Delta m_t c^2 = [m(X) - m(Y) - m(\alpha)] c^2 > 0 \rightarrow \text{Energy released}$$

↑  
Mass defect

$$= \Delta m_t (\text{u}) \times 931,5 (\text{MeV/u}) \rightarrow \text{MeV}$$

↓  
Released as kinetic energy of the decay products

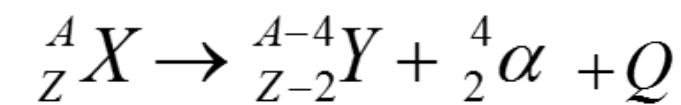


## Origins of ionizing radiations?

### ➤ Heavy charged particles ( $Z \geq 1$ )

➤ **Alpha particles:**  $\alpha = {}_2^4He^{2+}$

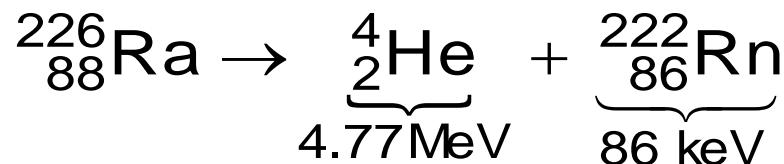
- Originate from the radioactivity of **unstable heavy nuclei**, but also from the acceleration of helium-4 ions (e.g., 11% of cosmic rays), or from nuclear reactions



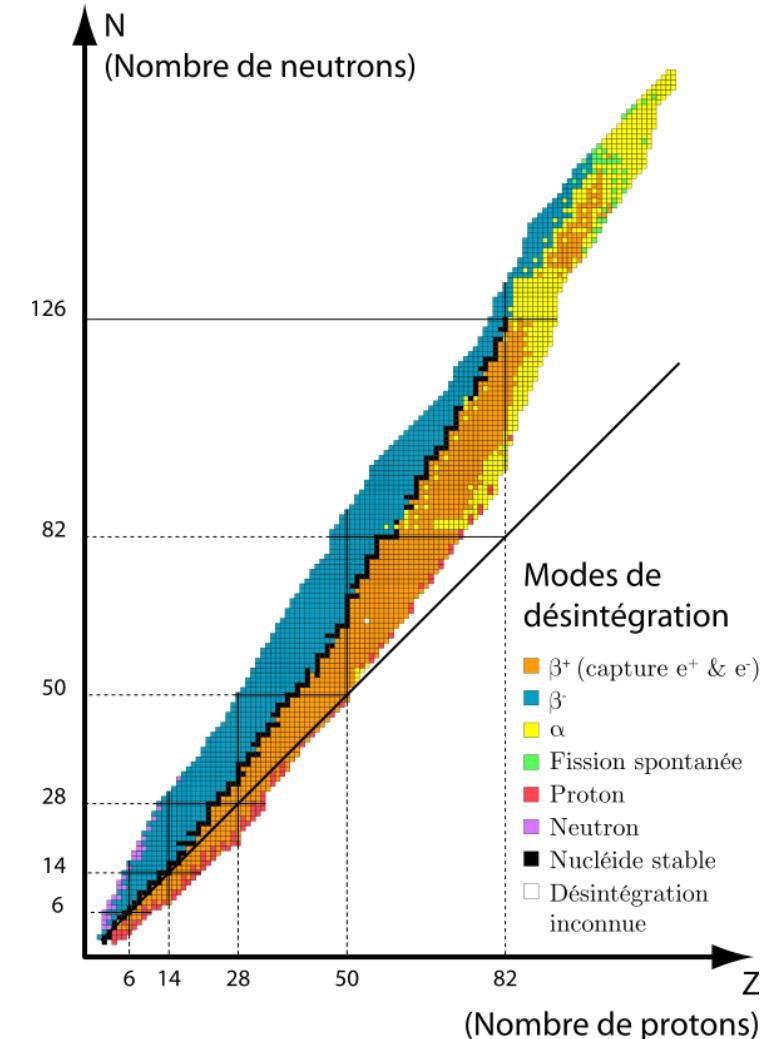
Mother      Daugther

$$Q = \Delta m_t c^2 = [m(X) - m(Y) - m(\alpha)]c^2 > 0 \rightarrow \text{Energy released}$$

Mass defect



Released as kinetic energy of the decay products

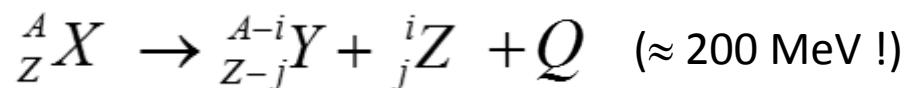


**Energy range of alpha particles emitted by radioactive decay:**  
 $\sim 4 \text{ à } 9 \text{ MeV}$  <sup>14</sup>

## Origins of ionizing radiations?

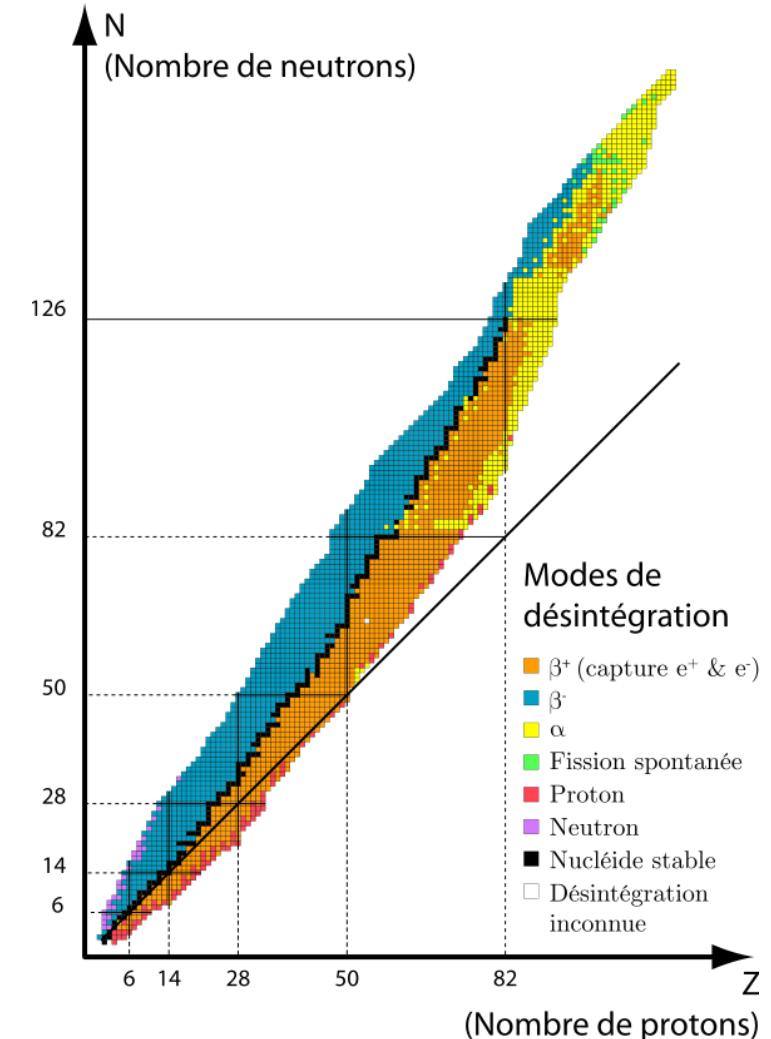
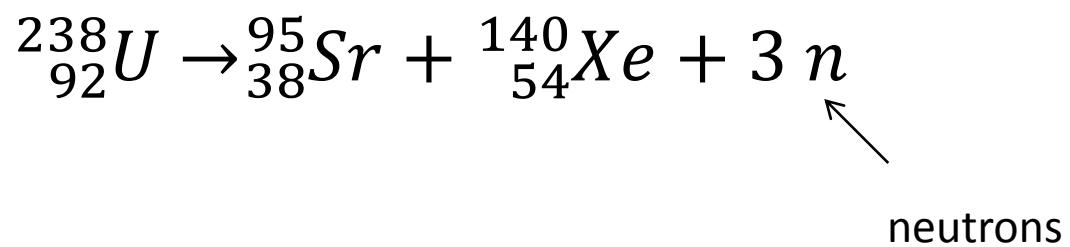
### ➤ Heavy charged particles ( $Z \geq 1$ )

#### ➤ Spontaneous Fission products (heavy ions):



Heavy ions

#### ■ Example:

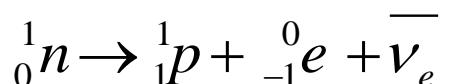


## Origins of ionizing radiations?

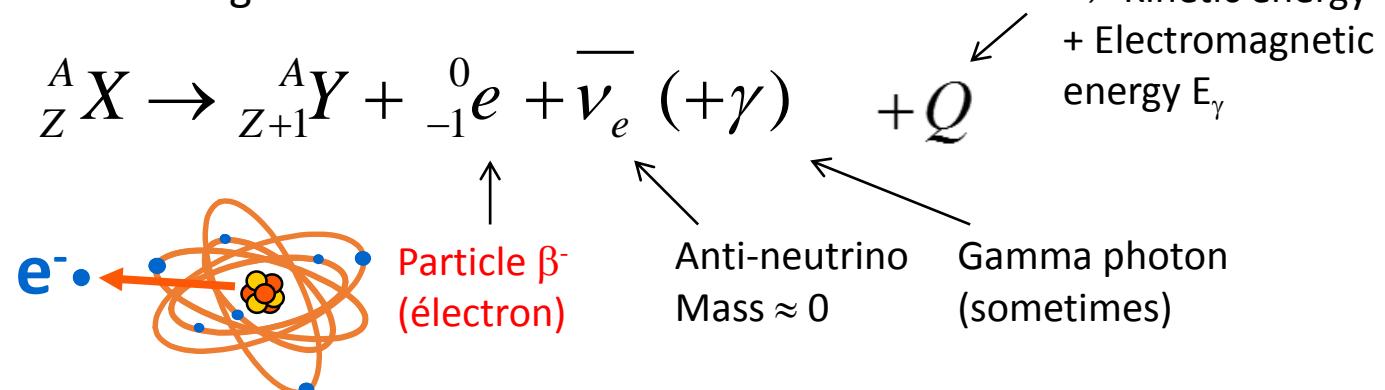
### ➤ Fast Electrons

#### ➤ Désintégration bêta moins ( $\beta^-$ ) :

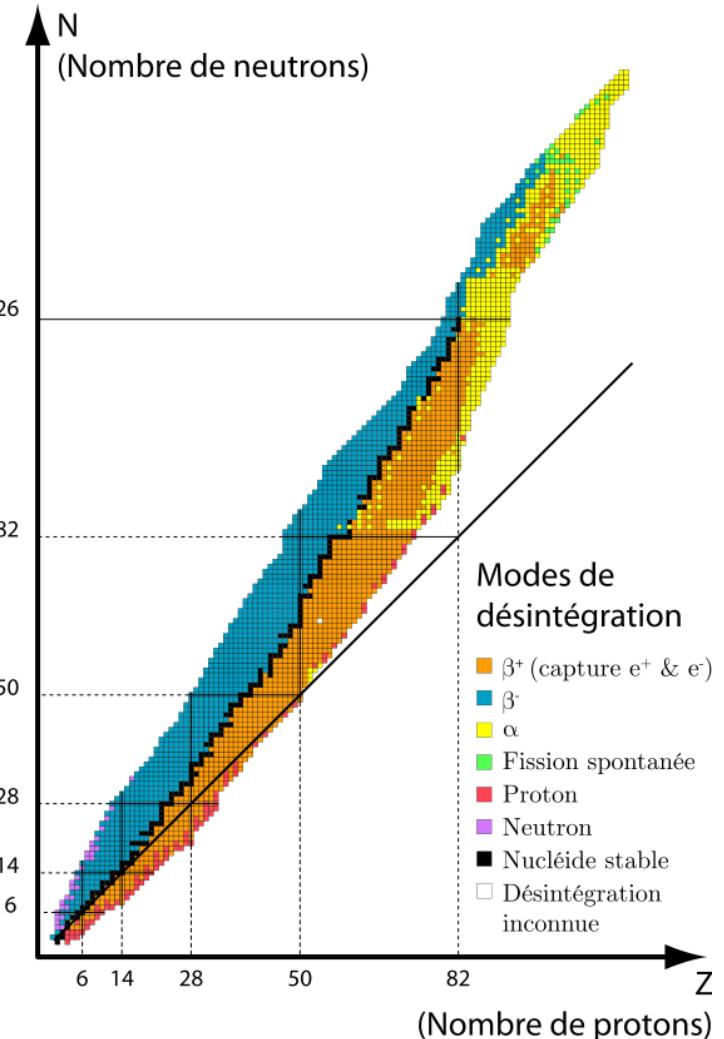
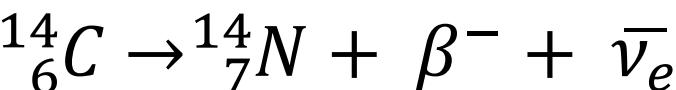
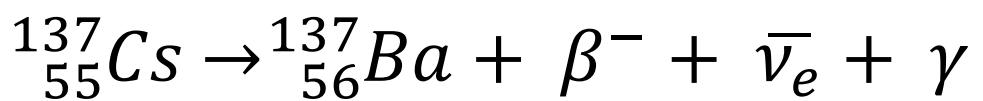
- Excess of neutrons in the nucleus  $\Rightarrow$  conversion neutron  $\rightarrow$  proton



- Equation of the disintegration:



- Examples:



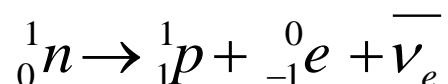
**$\beta^-$  energy range :**  
 $\sim 10 \text{ keV à } 3 \text{ MeV}$

## Origins of ionizing radiations?

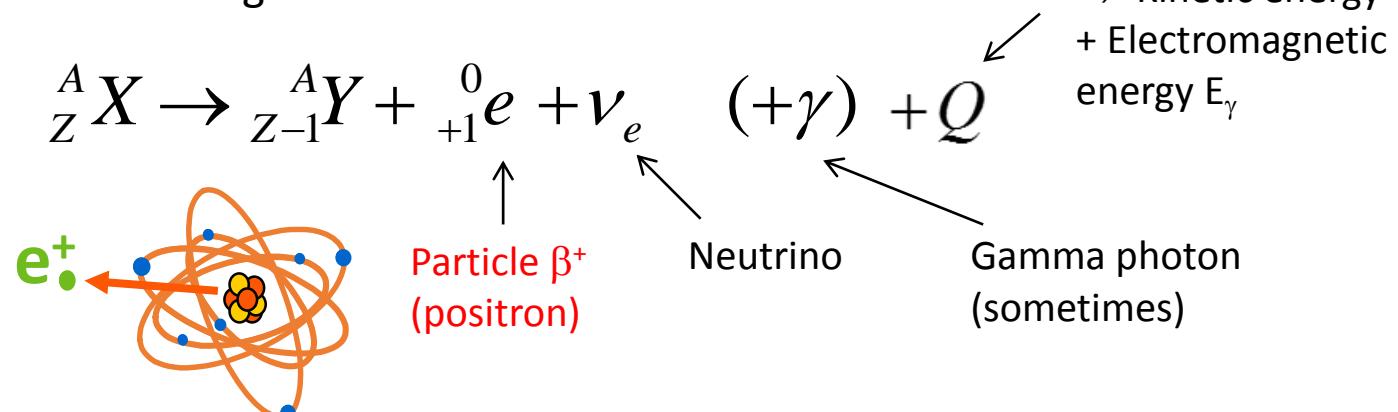
### ➤ Fast Electrons

#### ➤ Désintégration bêta plus ( $\beta^+$ ) :

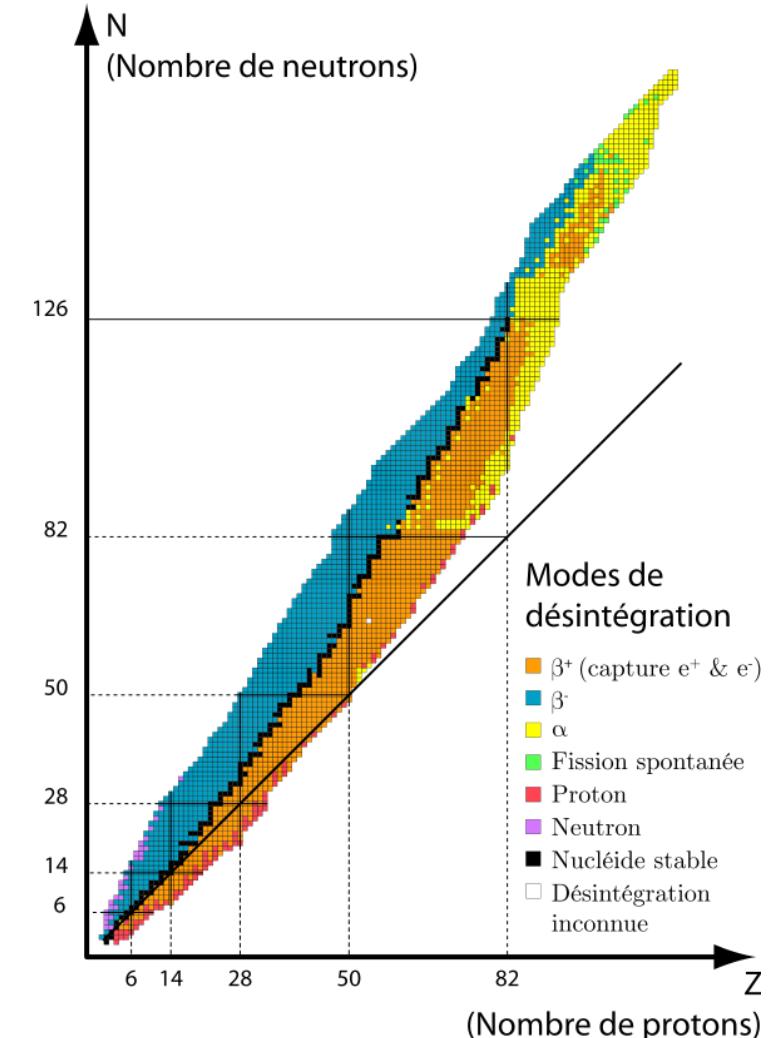
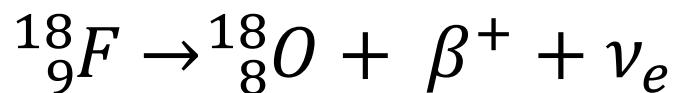
- Excess of protons in the nucleus  $\Rightarrow$  conversion proton  $\rightarrow$  neutron



- Equation of the disintegration:



- Example:



## Origin of gamma and X rays?

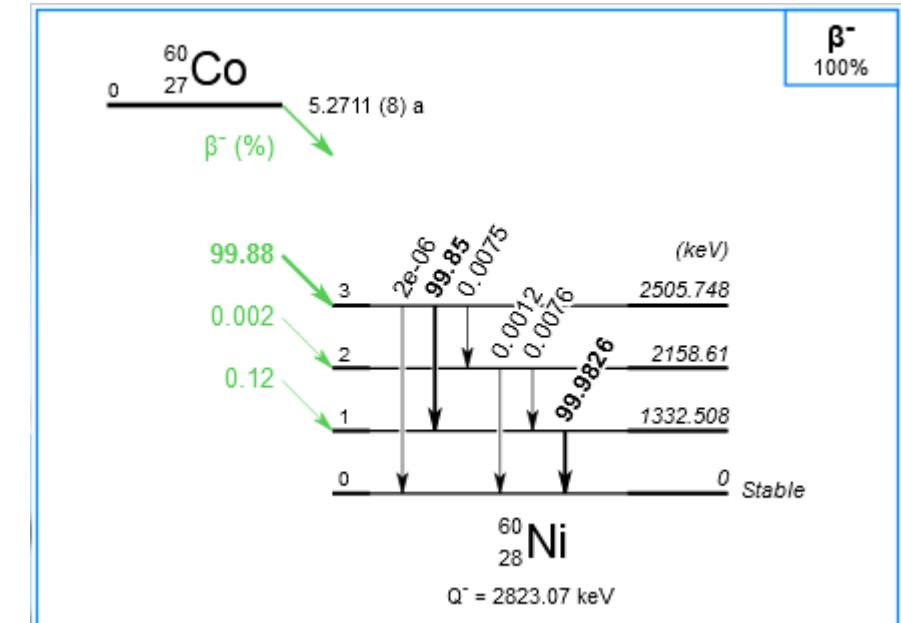
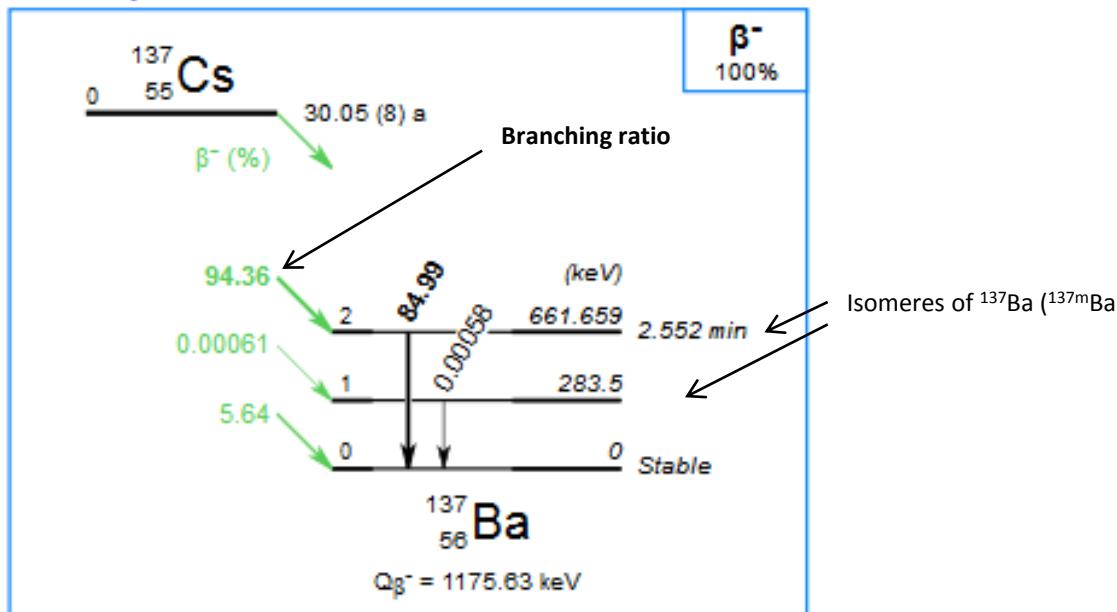
### ➤ Sources of electromagnetic radiations (photons)

#### ➤ Photons gamma ( $\gamma$ ) :

- Following the radioactive decay of a nucleus, the daughter nucleus can be in an excited state (called isomere)
- ⇒ **De-excitation of the nucleus is accompanied by the emission of photons, called gamma rays**

Discrete energies, characteristic of the nucleus  
Energies < 2.8 MeV

Decay scheme



## Origin of gamma and X rays?

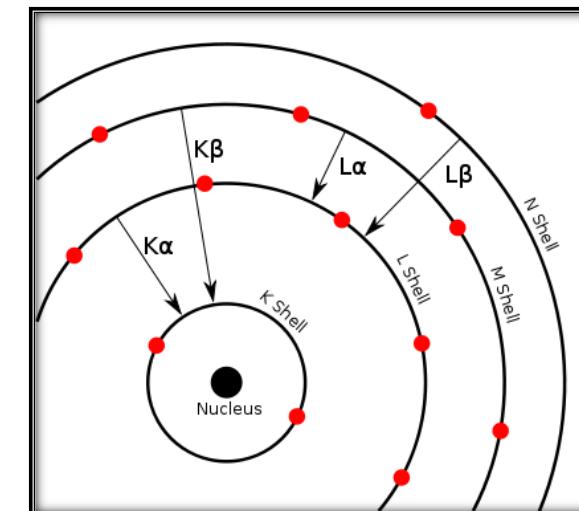
### ➤ Sources of electromagnetic radiations (photons)

#### ➤ X-rays :

- If electrons from atomic orbitals are excited to other orbitals, or ejected from the atom, by interactions with other particles or by radioactive decay of the nucleus, the atom finds itself in an excited state and its electronic structure will be re-arranged to go back to its fundamental state

⇒ emission of photons X-rays (photons) that are characteristic of the element (X-ray fluorescence)

- Vacancy in the K shell : photons  $K_{\alpha}$ ,  $K_{\beta}$ , ...
- Vacancy in the L shell : photons  $L_{\alpha}$ ,  $L_{\beta}$ , ...
- **The energy of X-rays increases with the atomic number Z of the element (heavy atoms can emit X-rays with higher energies)**

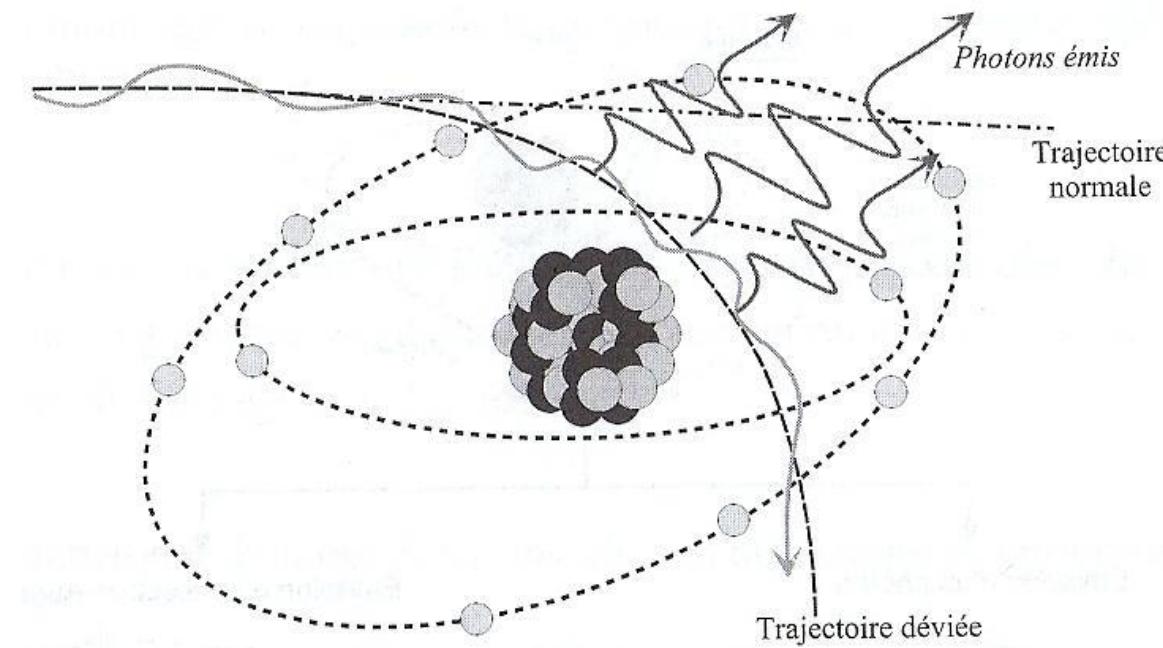


## Origin of gamma and X rays?

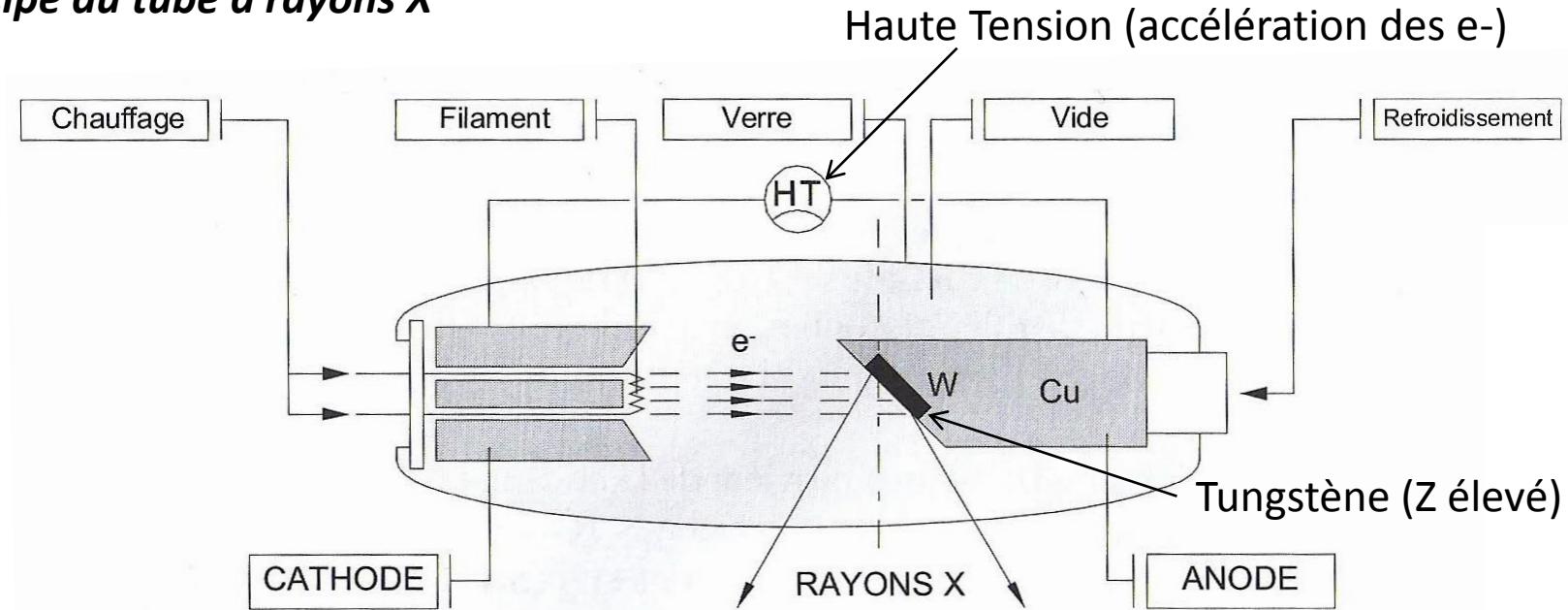
### ➤ Sources of electromagnetic radiations (photons)

#### ➤ X-rays from Bremsstrahlung (rayonnement de freinage)

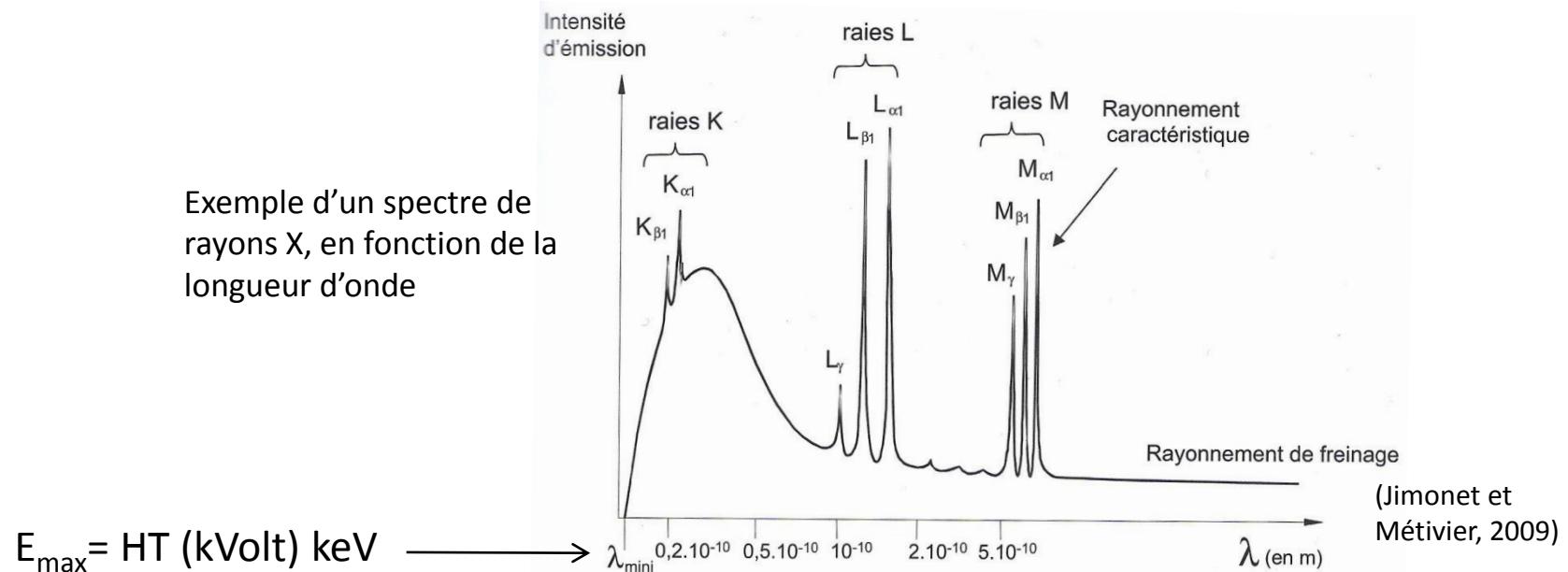
- When fast electrons are deviated by Coulomb interactions with a nucleus, they emit electromagnetic radiations (X-rays)



## Principe du tube à rayons X



Exemple d'un spectre de rayons X, en fonction de la longueur d'onde



## Origin of gamma and X rays?

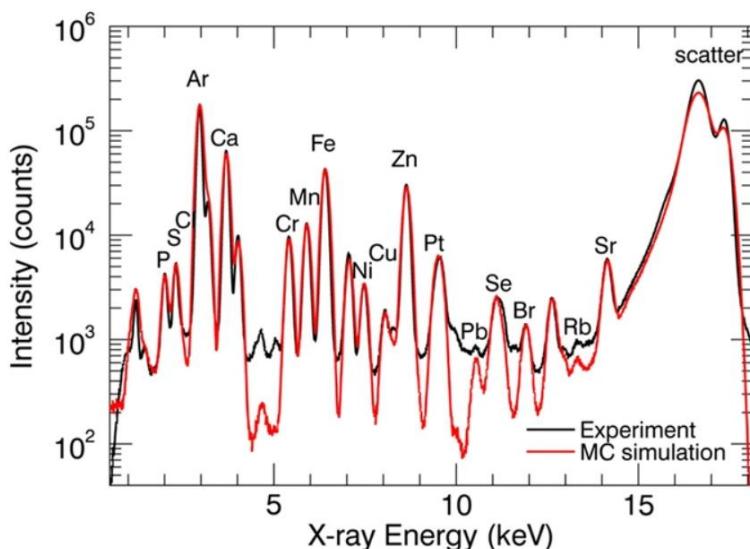
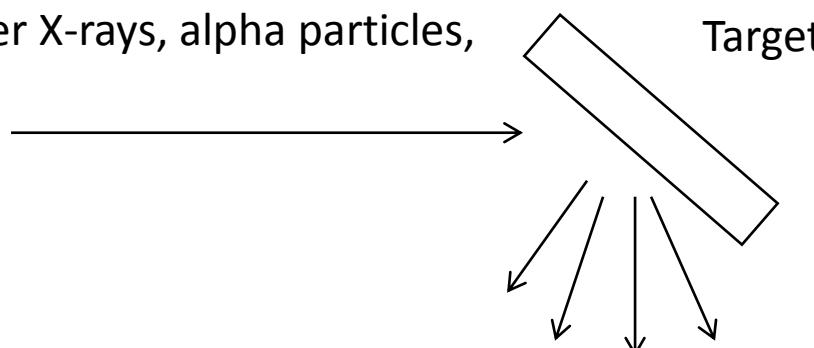
### ➤ Sources of electromagnetic radiations (photons)

Pas liés à la radioactivité !

#### ➤ X-rays :

Excitation by external radiations

(fast electrons, other X-rays, alpha particles, protons, gamma...)



Emission of X-rays characteristic of the chemical elements present in the target  
 → Their energy depends on its composition  
 (high Z ⇒ energy ↑)  
 (+ Bremsstrahlung if external source = fast electrons)

⇒ Often used to measure the chemical composition of materials :  
 - XRF : X-ray fluorescence (excitation source = X-rays)  
 - PIXE : Particle-Induced X-ray Emission (excitation source = particles)

## Other sources of ionizing radiations

Accelerators of particles (electrons, positrons, protons, alpha, ...) : linear accelerators, Van de Graaff, cyclotrons, synrocyclotrons, synchrotrons + Astrophysical accelerators or high-energy photon emission processes

### External beam radiation therapy

- **X-ray beam** radiation therapy
- **Electron beam** therapy (for superficial tumors)
- Hadron therapy (**protons**)



Radiation dose intensity

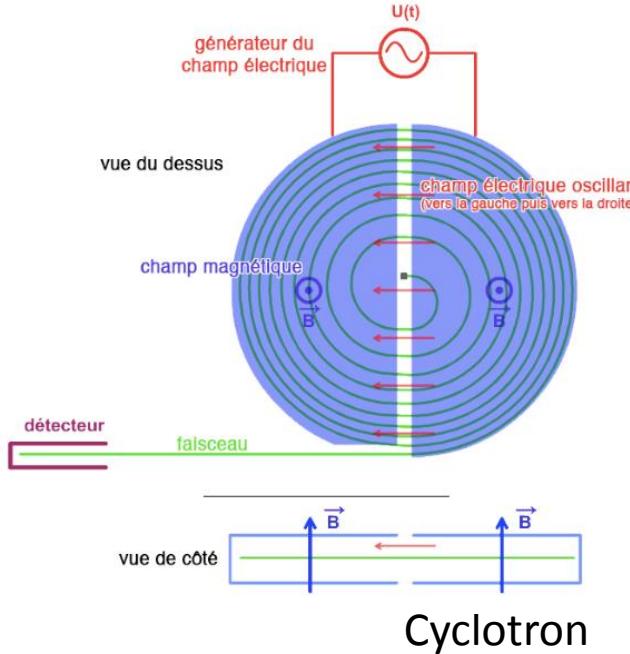


Proton beam therapy

Linear accelerator machine to deliver radiation therapy to the site of a patient's cancerous tumour (Credit : ROS)

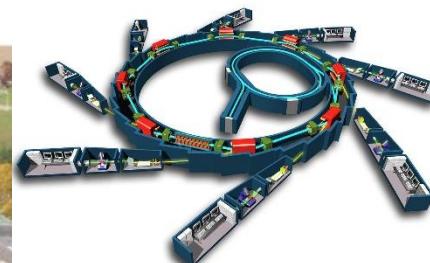
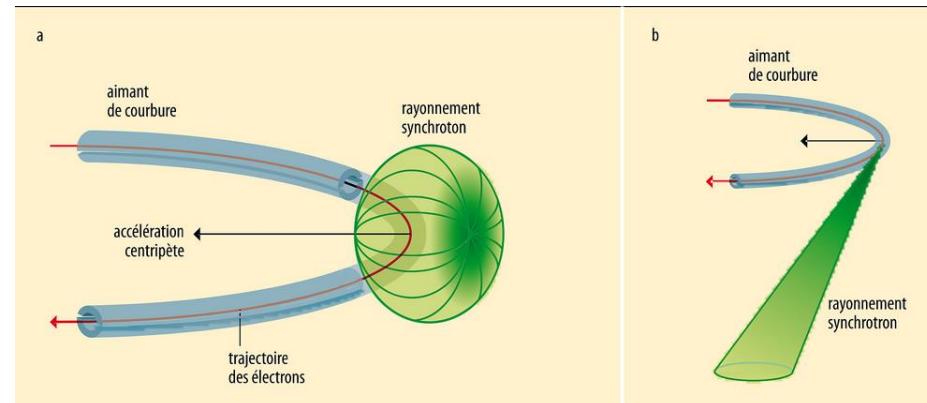
## Other sources of ionizing radiations

Accelerators of particles (electrons, positrons, protons, alpha, ...) : linear accelerators, Van de Graaff, cyclotrons, synrocyclotrons, synchrotrons + Astrophysical accelerators or high-energy photon emission processes



Cyclotron Arronax in Nantes (protons, alpha)

Synchrotrons that accelerate electrons can produce synchrotron electromagnetic radiations (from MeV to GeV)



Synchrotron Soleil in Saclay

## Other sources of ionizing radiations

Accelerators of particles (electrons, positrons, protons, alpha, ...) : linear accelerators, Van de Graaff, cyclotrons, synrocyclotrons, synchrotrons + Astrophysical accelerators or high-energy photon emission processes



Crab Nebula : X-ray intensity from Chandra Observatory (blue) + Hubble optical imagery (red)

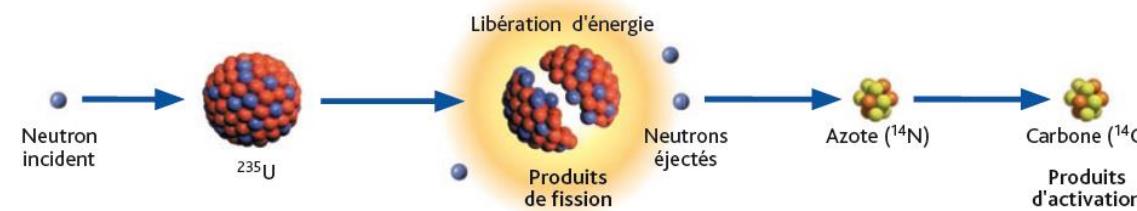
X-rays are emitted by synchrotron radiation from relativistic electrons spinning around the magnetic field of the central pulsar (neutron star)

## Other sources of ionizing radiations

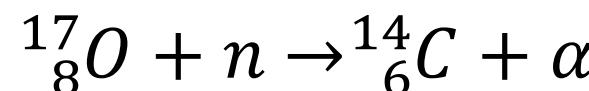
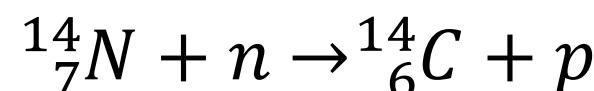
➤ Nuclear reactions : many types ! Just a few examples :

➤ Induced fission (e.g., in nuclear reactors)

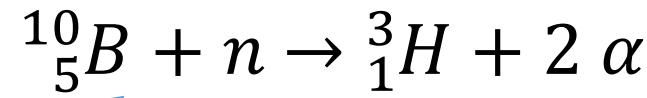
$${}_{Z}^{A}X (+ \gamma, n, p, \alpha, \dots) \rightarrow {}_{Z-j}^{A-i}Y + {}_{j}^{i}Z (+ \gamma, n, p, \alpha, \dots) + Q \quad (\approx 200 \text{ MeV})$$



➤ Production of  ${}^{14}\text{C}$  :



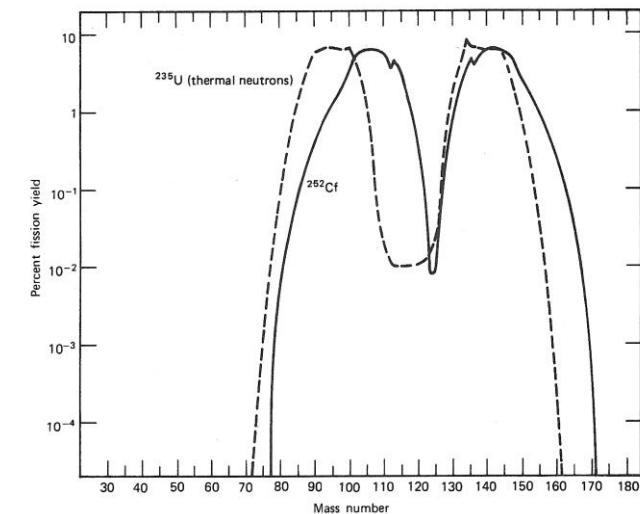
➤ Production of tritium ( ${}^3\text{H}$ ) (examples relevant to nuclear reactors in nuclear plants) :



Present in the water of primary circuits of nuclear reactors

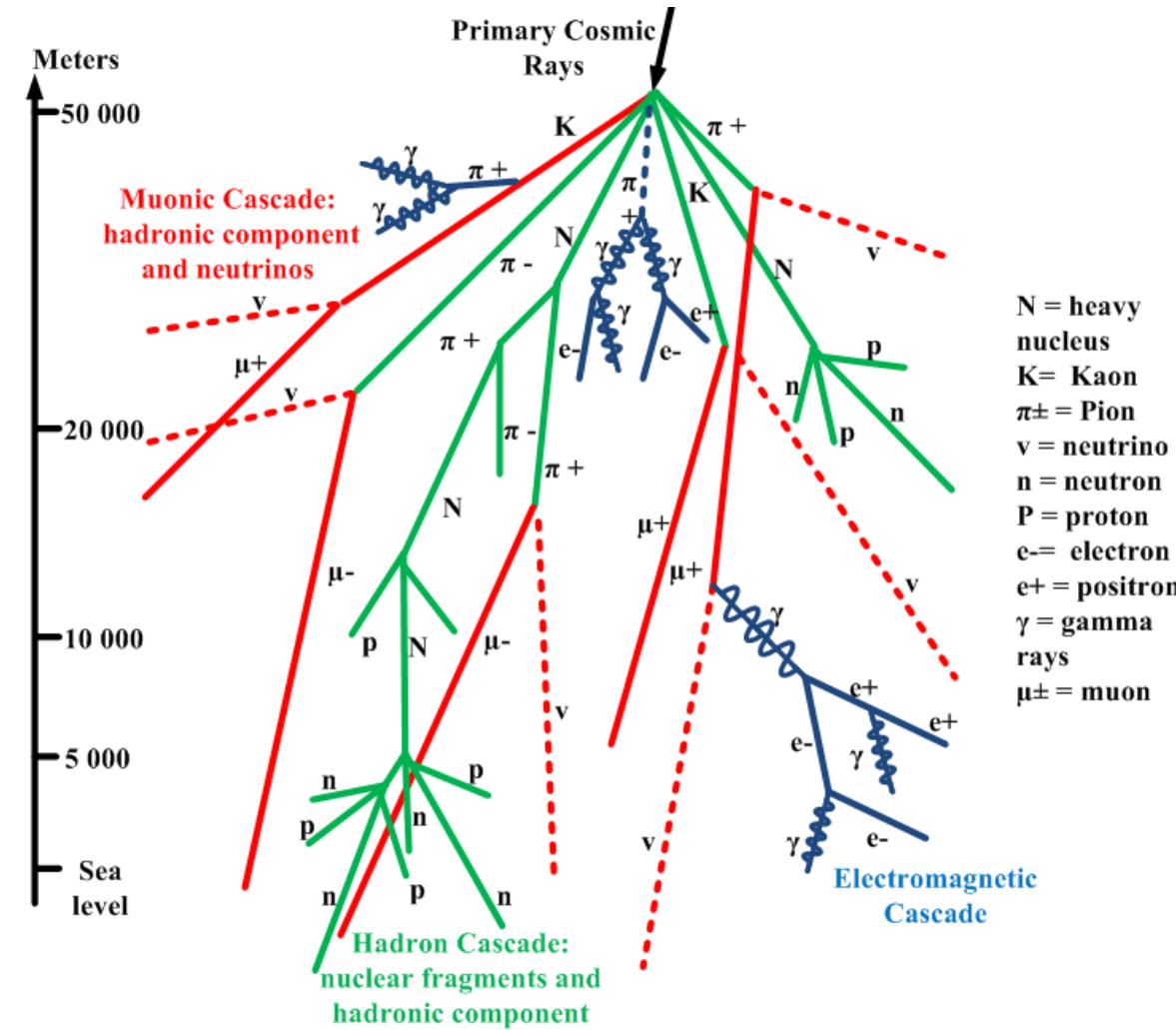
Pas liés à la radioactivité !

Distribution isotopique des PF de l' ${}^{235}\text{U}$  (induite)



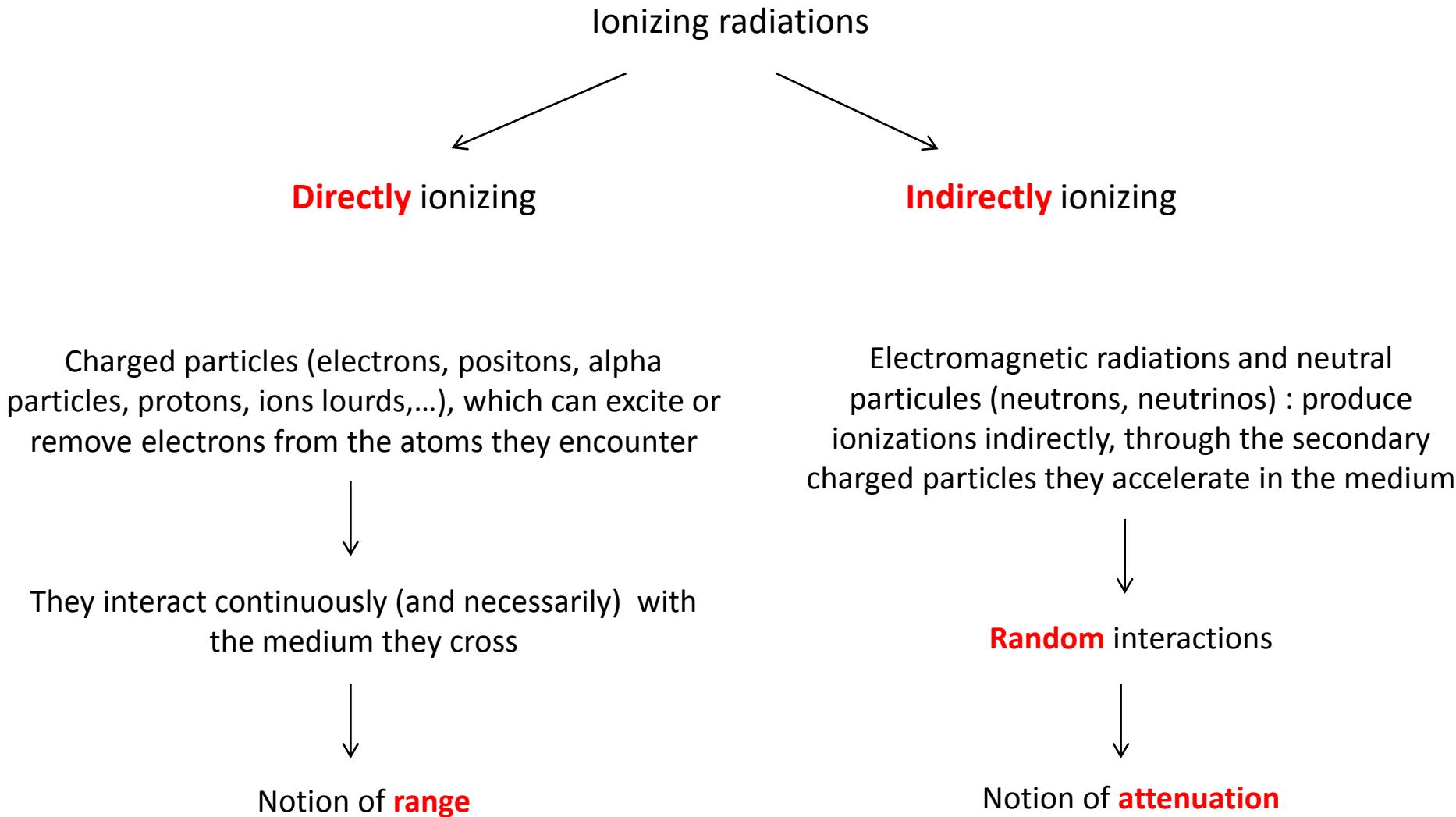
## Other sources of ionizing radiations

### Nuclear reactions in the atmosphere and showers of secondary particles

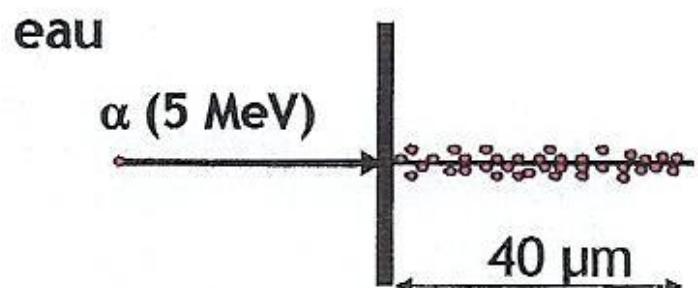
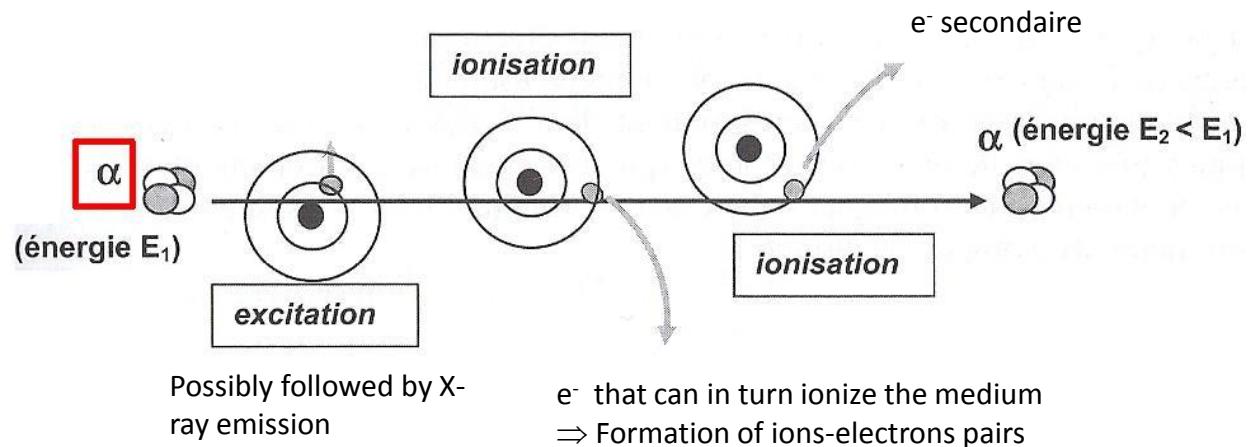


- At the top of the atmosphere : 89% protons, 10% alpha, 1% ions lourds
- Only ~0,05% of cosmic rays reach sea level
- Nuclear reactions with atmospheric constituents create radioactive species:
  - **tritium** by spallation :  $^{14}\text{N}(\text{n}, \text{H})^{12}\text{C}$
  - **carbone-14** by neutron activation:  $^{14}\text{N}(\text{n}, \text{p})^{14}\text{C}$
  - beryllium-10, beryllium-7, krypton-85, ...

## Interactions between ionizing radiations and matter

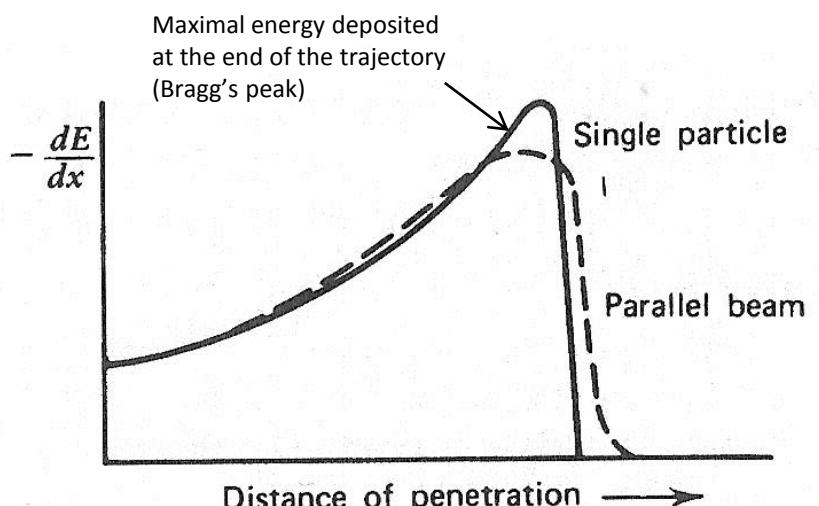
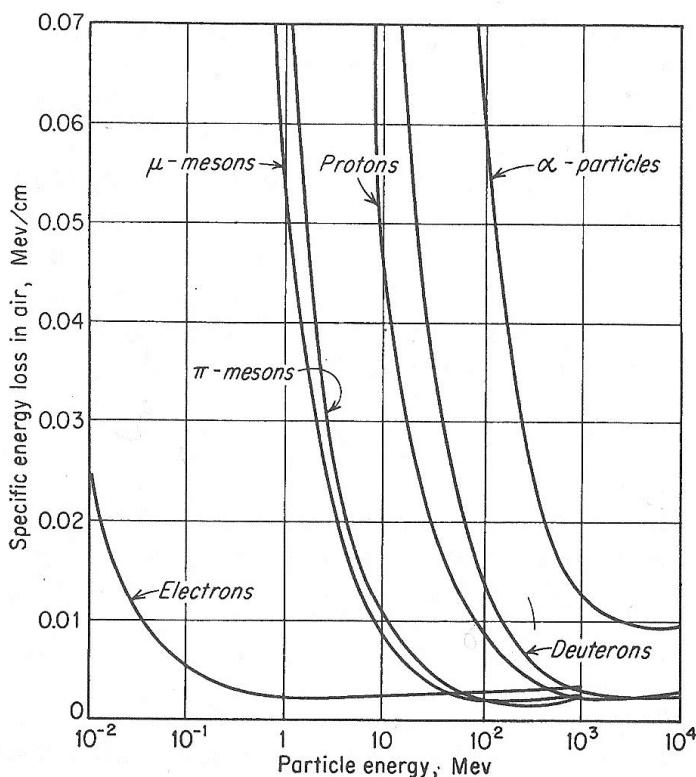


➤ Alpha and heavy charged particles :



$$S = \frac{-dE}{dx}$$

Stopping power of several charged particles in air, as a function of energy

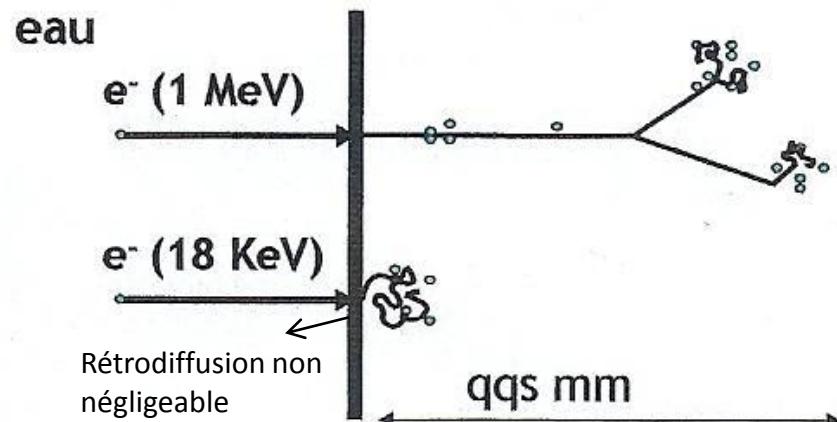
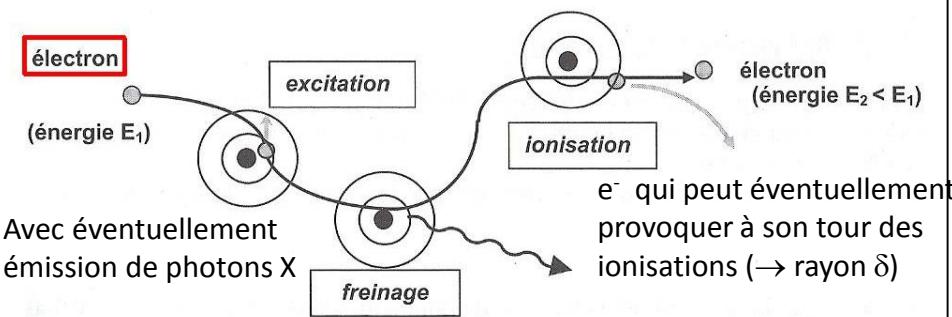


Stopping power of an alpha particle as a function of penetration depth (Bragg's curve)

### 3. Interactions between ionizing radiations and matter

#### ➤ Electrons and positrons:

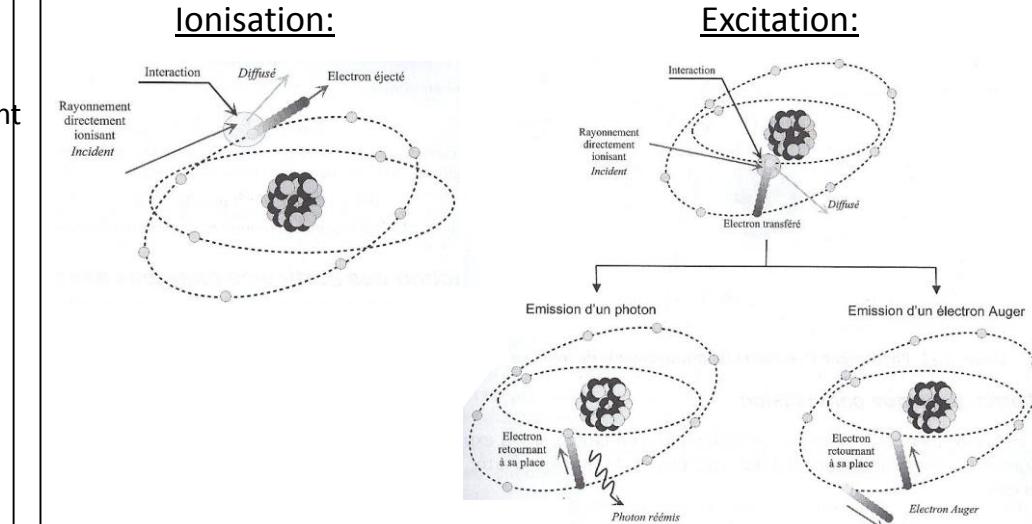
##### Trajectoire :



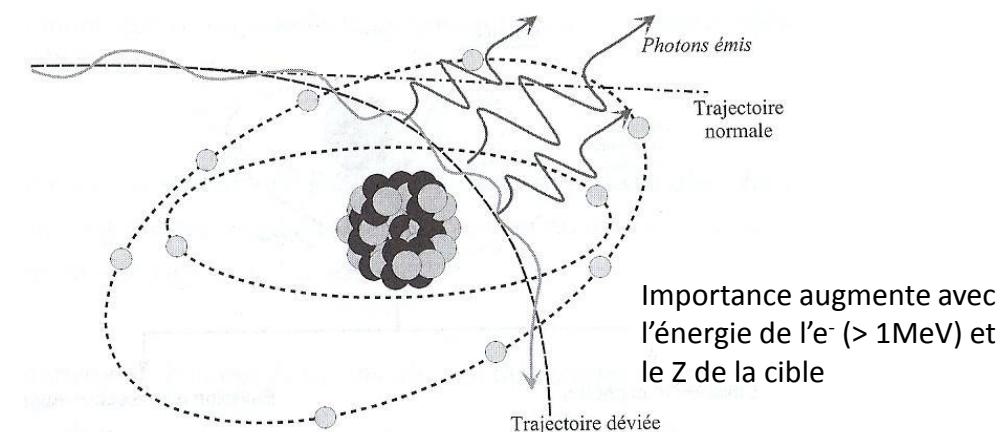
Transferts diffus. Trajectoire longue et très sinuose (p/r aux particules alpha), car déviation importante à chaque interaction (à basse énergie). Rétrodiffusion importante à basse énergie.

##### Mécanismes de perte d'énergie :

###### ➤ Par collision :

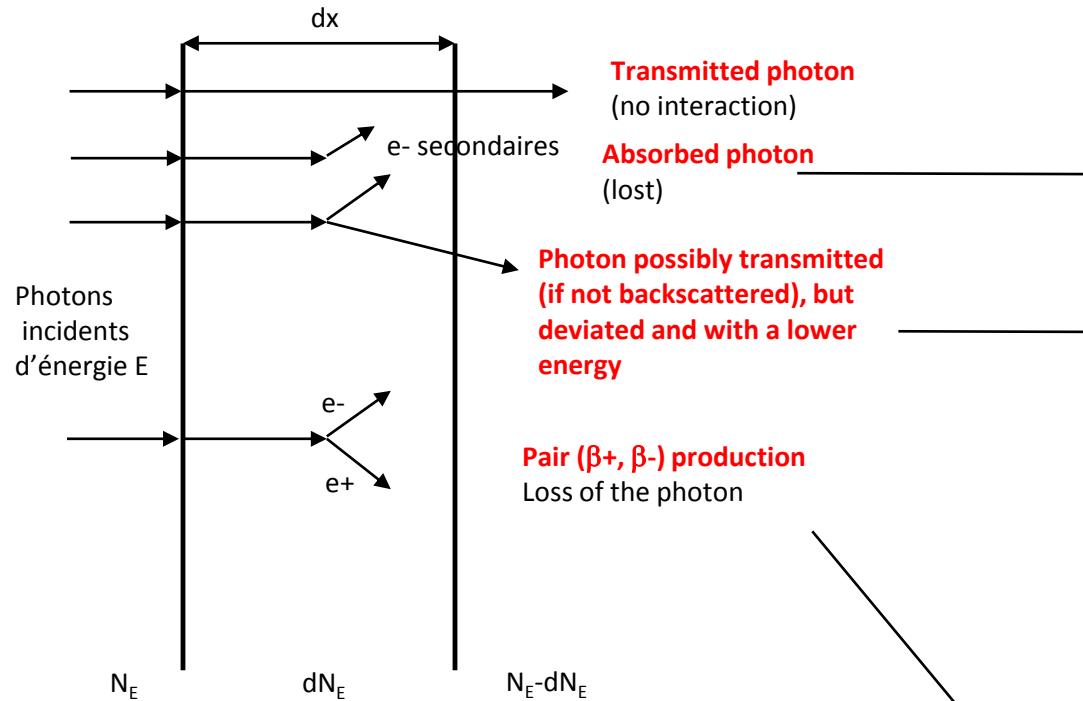


###### ➤ Par rayonnement de freinage (interaction avec le noyau) :



### 3. Interactions between ionizing radiations and matter

#### ■ Interaction of photons ( $X, \gamma$ ) with matter :

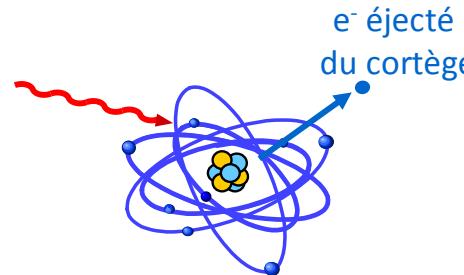


$$d\Phi_E = -\mu_E \Phi_E dx \Rightarrow \Phi_E(x) = \Phi_E(0) \exp(-\mu_E x)$$

with  $\mu_E = \mu_{\text{photoelec.}}(E) + \mu_{\text{compton}}(E) + \mu_{\text{paire}}(E)$

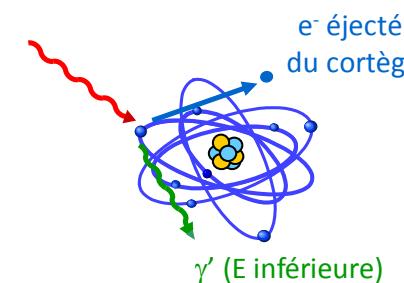
$\mu_E$  = attenuation coefficient ( $\text{cm}^{-1}$ ) = probability of interaction per unit length

#### Photoelectric effect (photo-absorption)

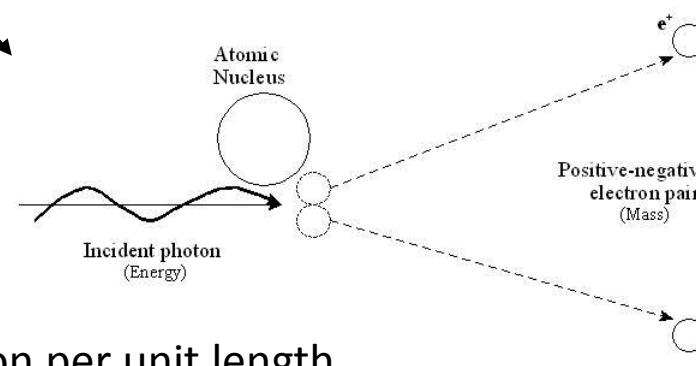


- Important at low energies ( $< 100 \text{ keV}$ )
- Important in high  $Z$  material (lead)

#### Compton diffusion

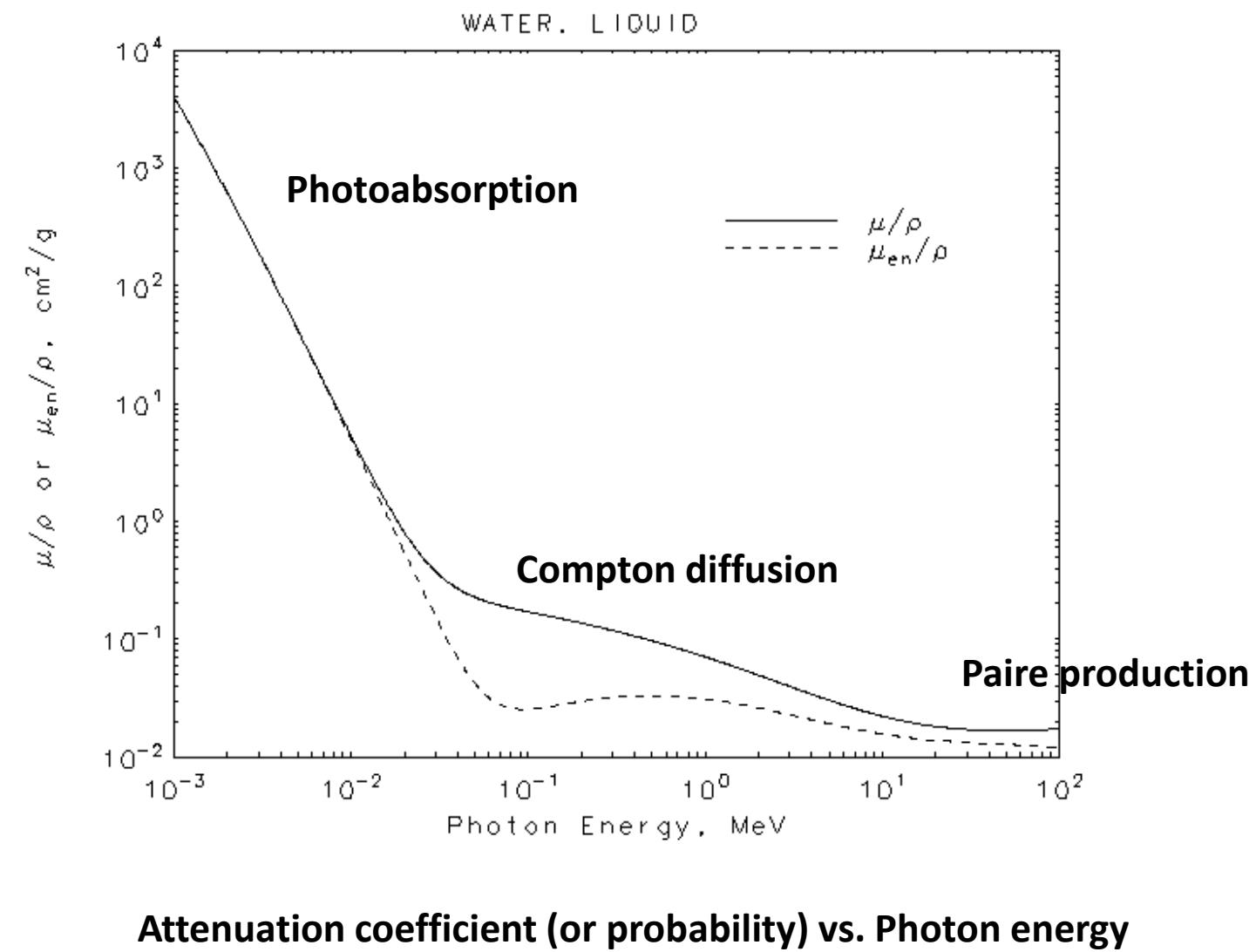
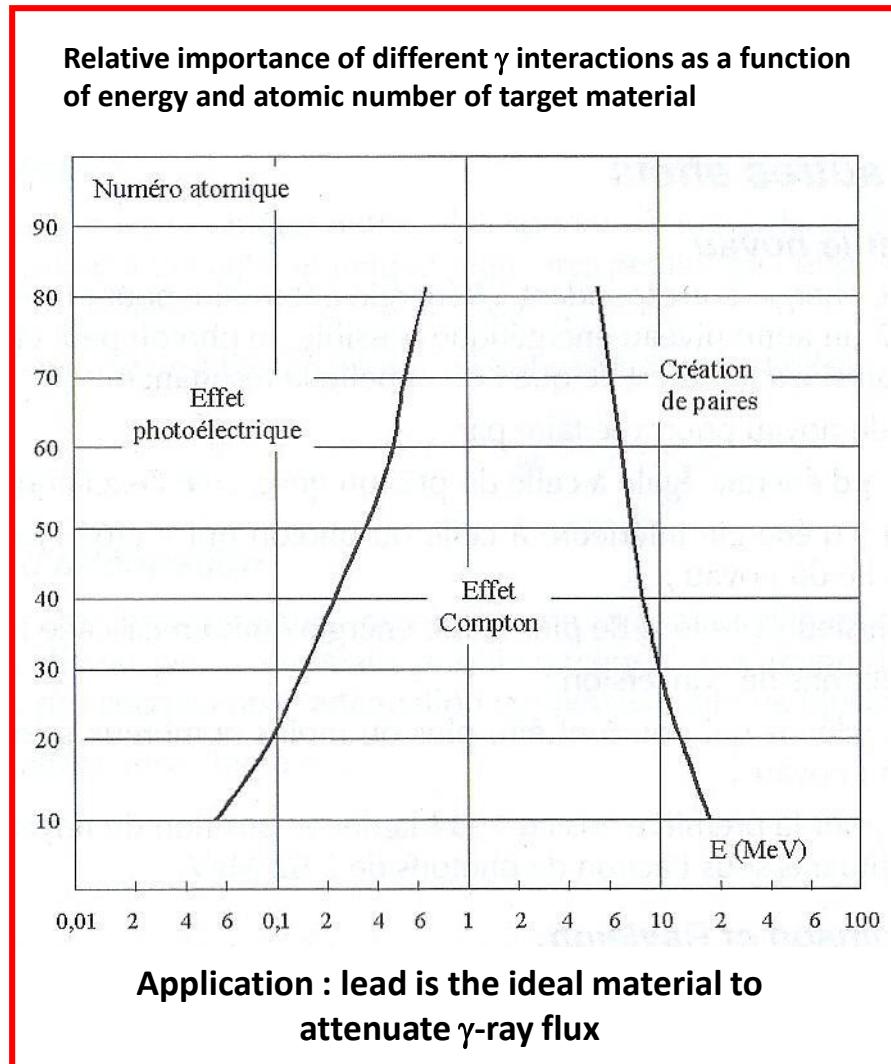


- Important at intermediate energies ( $100 \text{ keV} < E < \text{few MeV}$ )
- Important in low  $Z$  material



- Important at high energies only ( $> \text{few MeV}$ )

### 3. Interactions between ionizing radiations and matter



## 4. Radionuclides found in the environment

Substances	Activité
Poisson	100 Bq/kg
Pomme de terre	100 à 150 Bq/kg
Huile de table	180 Bq/l
Lait	50 Bq/l ( $^{40}\text{K}$ )
	80 Bq/l (radioactivité naturelle totale)
Eau minérale	1 Bq/l ( $^{226}\text{Ra}$ )
	2 Bq/l ( $^{238}\text{U}$ )
Eau de pluie	0,3 à 1 Bq/l
Eau de l'Isère	0,3 Bq/l
Eau de mer	10 Bq/l
Sol sédimentaire	400 Bq/kg
Sédiments de l'Isère ( $^{40}\text{K}$ )	1 000 Bq/kg
Sol granitique	8 000 Bq/kg

Tableau 3 Activité naturelle de quelques substances

Variation de la dose efficace due à l'exposition cosmique en France



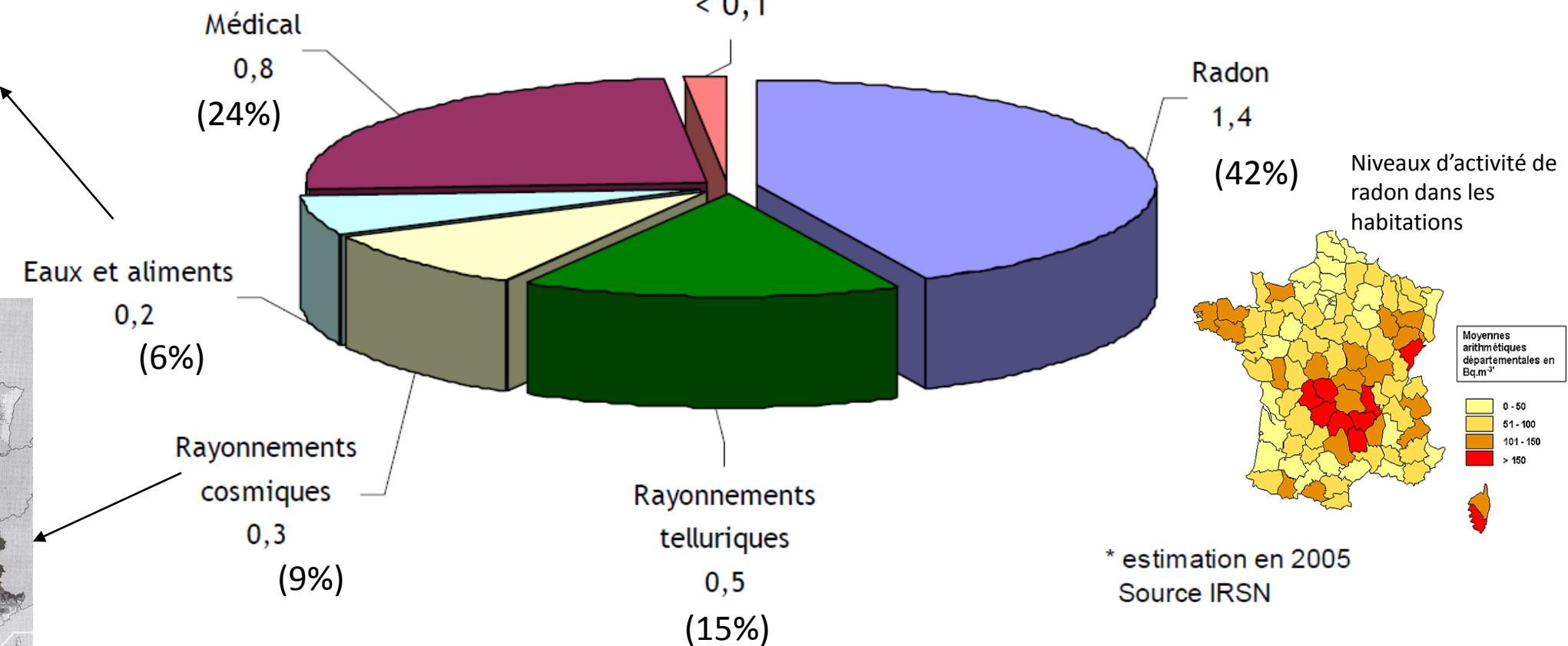
## Origins of ionizing radiations contributing to the annual dose we receive

### Exposition aux rayonnements ionisants de la population en France \*

Doses annuelles (mSv/an) - total : 3,3 mSv/an par personne en moyenne

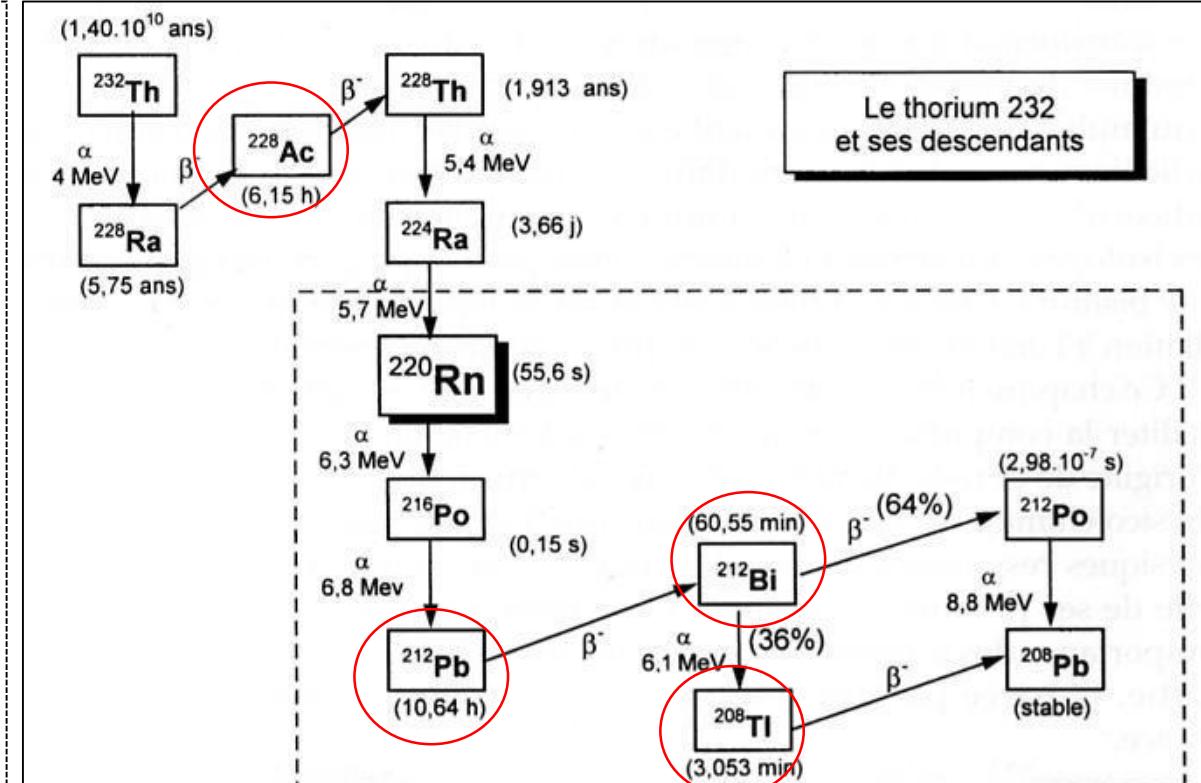
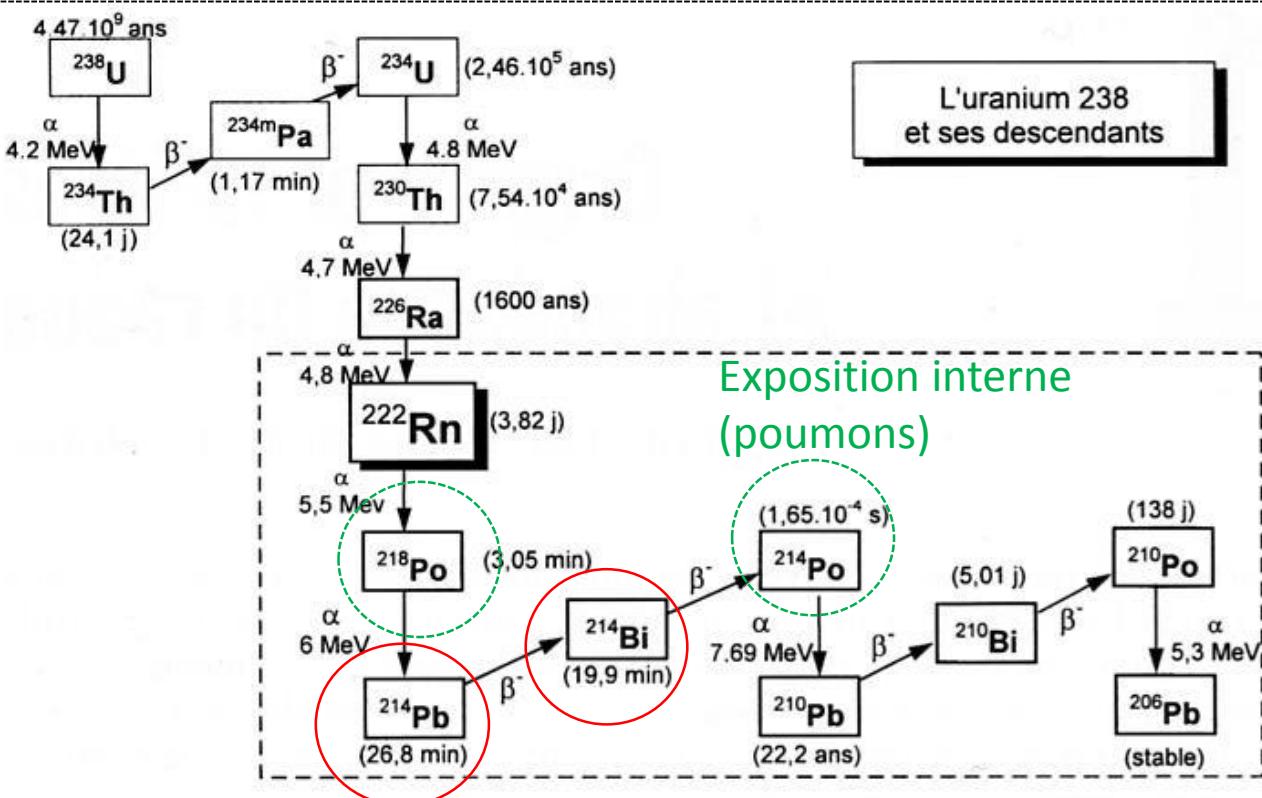
Autres (rejets d'installations, retombées des tirs, ...)

< 0,1



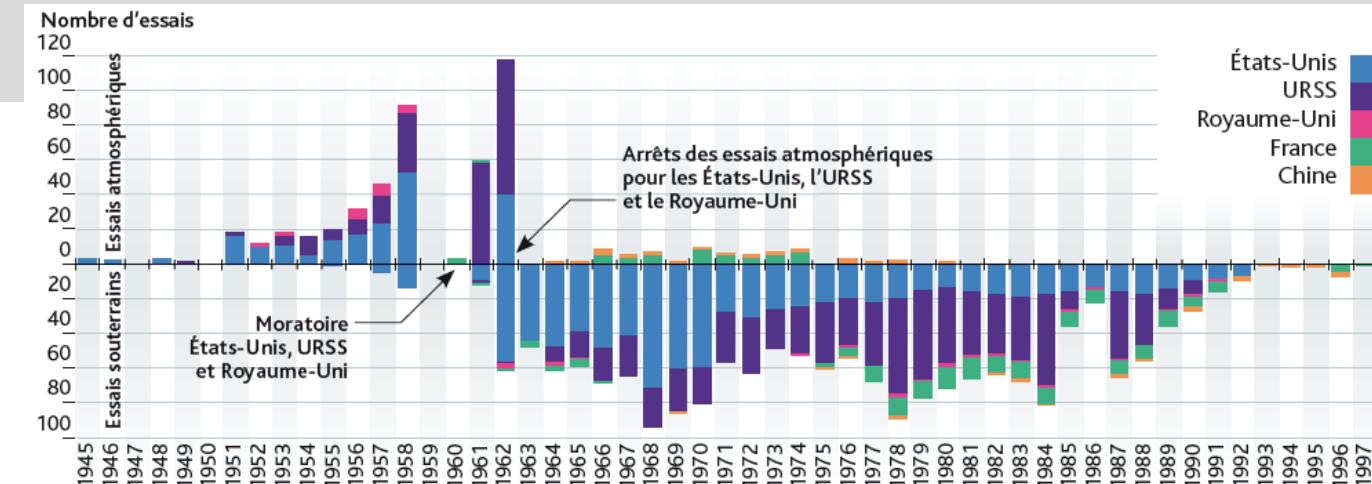
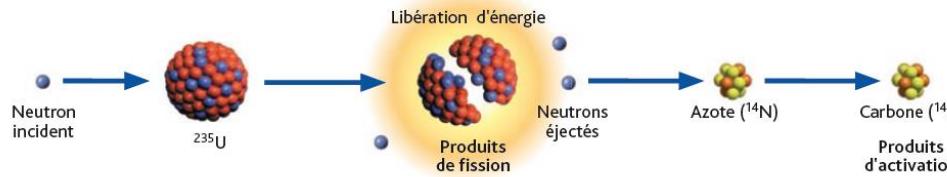
Which radionuclides are present in our environment ?

**Telluric radiations (from radioactivity contained in rocks, soils, materials)**



## 4. Radionuclides found in the environment

### Radionuclides produced by atmospheric nuclear tests (543 tests, mostly in the 1950-1960s):



Iode 131	$^{131}\text{I}$	8 jours
Baryum 140	$^{140}\text{Ba}$	13 jours
Cérium 141	$^{141}\text{Ce}$	33 jours
Ruthénium 103	$^{103}\text{Ru}$	39 jours
Strontium 89	$^{89}\text{Sr}$	51 jours
Yttrium 91	$^{91}\text{Y}$	59 jours
Zirconium 95	$^{95}\text{Zr}$	64 jours
Cérium 144	$^{144}\text{Ce}$	280 jours
Manganèse 54	$^{54}\text{Mn}$	310 jours
Ruthénium 106	$^{106}\text{Ru}$	370 jours

Fer 55	$^{55}\text{Fe}$	2,7 ans
Antimoine 125	$^{125}\text{Sb}$	2,8 ans
Tritium	$^3\text{H}$	12 ans
Plutonium 241	$^{241}\text{Pu}$	14 ans
Strontium 90	$^{90}\text{Sr}$	29 ans
Césium 137	$^{137}\text{Cs}$	30 ans
Américium 241	$^{241}\text{Am}$	433 ans
Carbone 14	$^{14}\text{C}$	5 700 ans
Plutonium 240	$^{240}\text{Pu}$	6 600 ans
Plutonium 239	$^{239}\text{Pu}$	24 000 ans



Produits de fission



Produits d'activation

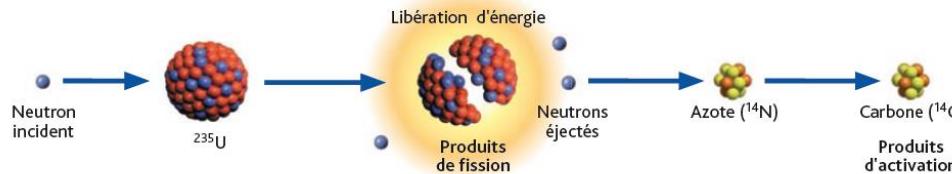


Transuraniens (> U-235, produits par capture neutronique)

Still present in  
the environment

## 4. Radionuclides found in the environment

### Radionuclides produced by atmospheric nuclear tests (543 tests, mostly in the 1950-1960s):



Iode 131	$^{131}\text{I}$	8 jours
Baryum 140	$^{140}\text{Ba}$	13 jours
Cérium 141	$^{141}\text{Ce}$	33 jours
Ruthénium 103	$^{103}\text{Ru}$	39 jours
Strontium 89	$^{89}\text{Sr}$	51 jours
Yttrium 91	$^{91}\text{Y}$	59 jours
Zirconium 95	$^{95}\text{Zr}$	64 jours
Cérium 144	$^{144}\text{Ce}$	280 jours
Manganèse 54	$^{54}\text{Mn}$	310 jours
Ruthénium 106	$^{106}\text{Ru}$	370 jours

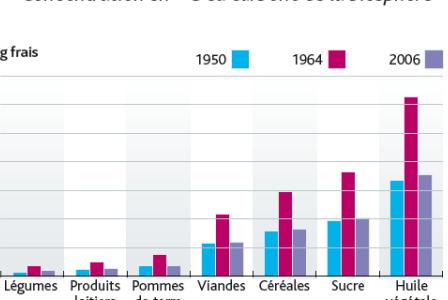
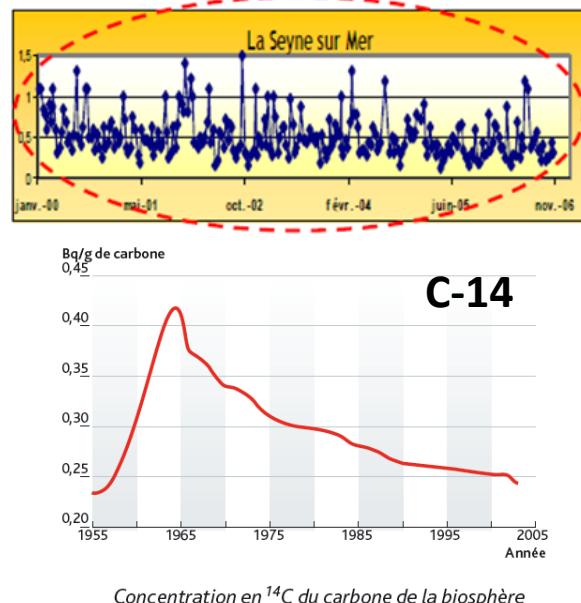
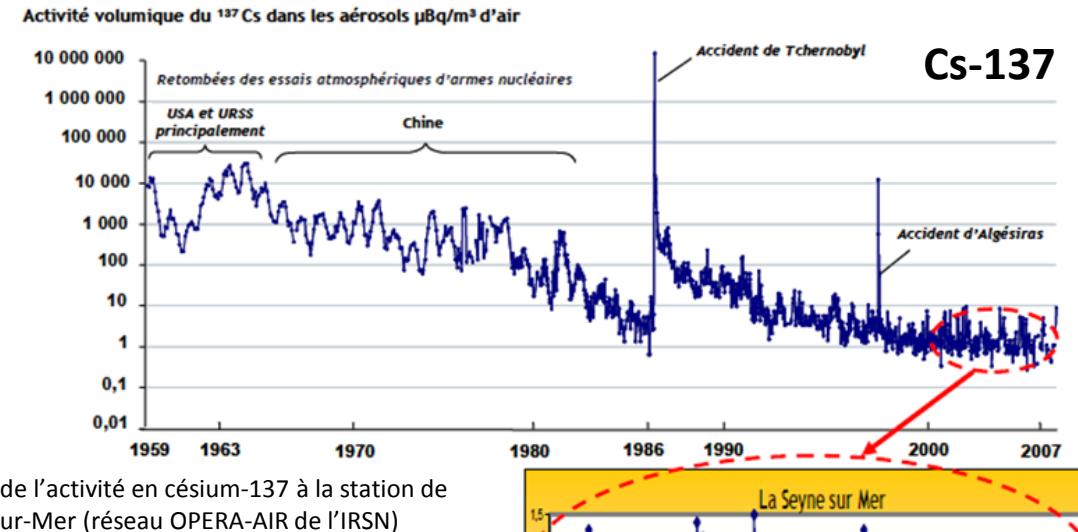
Produits de fission

Produits d'activation

Transuraniens (> U-235, produits par capture neutronique)

Fer 55	$^{55}\text{Fe}$	2,7 ans
Antimoine 125	$^{125}\text{Sb}$	2,8 ans
Tritium	$^3\text{H}$	12 ans
Plutonium 241	$^{241}\text{Pu}$	14 ans
Strontium 90	$^{90}\text{Sr}$	29 ans
Césium 137	$^{137}\text{Cs}$	30 ans
Américium 241	$^{241}\text{Am}$	433 ans
Carbone 14	$^{14}\text{C}$	5 700 ans
Plutonium 240	$^{240}\text{Pu}$	6 600 ans
Plutonium 239	$^{239}\text{Pu}$	24 000 ans

Still present in the environment



Contamination en  $^{14}\text{C}$  des denrées alimentaires

## Main artificial radionuclides currently present in our environment in France, with their origins

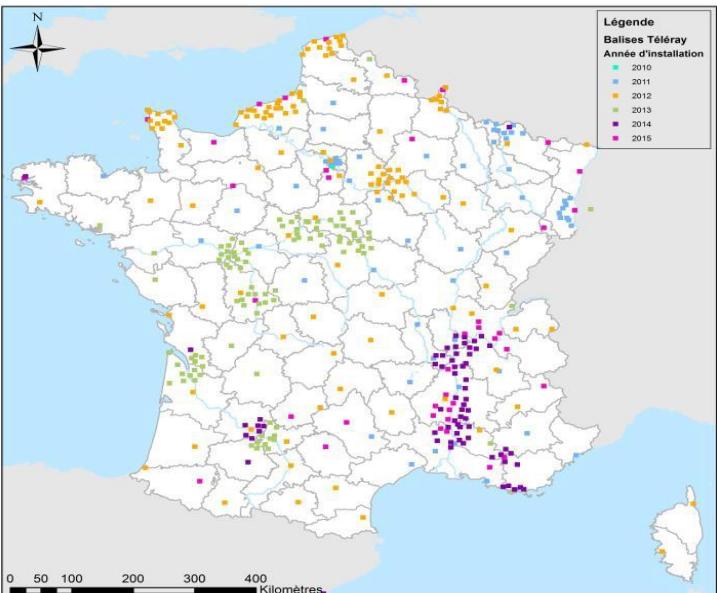
Radionucléide	Période radioactive	Emissions principales	Principal descendant	Origines principales
<sup>3</sup> H	12,32 ans	bêta	<sup>3</sup> He	cosmique, essais nucléaires, rejets de l'industrie nucléaire et horlogère
<sup>14</sup> C	5730 ans	bêta	<sup>14</sup> N	cosmique, essais nucléaires, rejets de l'industrie nucléaire et de la recherche
<sup>60</sup> Co	5,27 ans	Bêta, gamma	<sup>60</sup> Ni	Rejets de l'industrie nucléaire
<sup>90</sup> Sr	28,78 ans	bêta	<sup>90</sup> Y	essais nucléaires, rejets de l'industrie nucléaire
<sup>131</sup> I	8 jours	Bêta, gamma	<sup>131</sup> Xe	rejets de l'industrie nucléaire et des services de médecine nucléaire
<sup>137</sup> Cs	30,07 ans	Bêta, gamma	<sup>137</sup> Ba	essais nucléaires, accident de Tchernobyl, rejets de l'industrie nucléaire
<sup>238</sup> Pu	87,7 ans	alpha	<sup>234</sup> U	essais nucléaires, rejets de l'industrie nucléaire
<sup>239+240</sup> Pu	24100 et 6560 ans	alpha	<sup>235+236</sup> U	essais nucléaires, rejets de l'industrie nucléaire

## Measurement of ionizing radiations: Applications (examples)

### ➤ Monitoring of environmental radioactivity for radiological protection

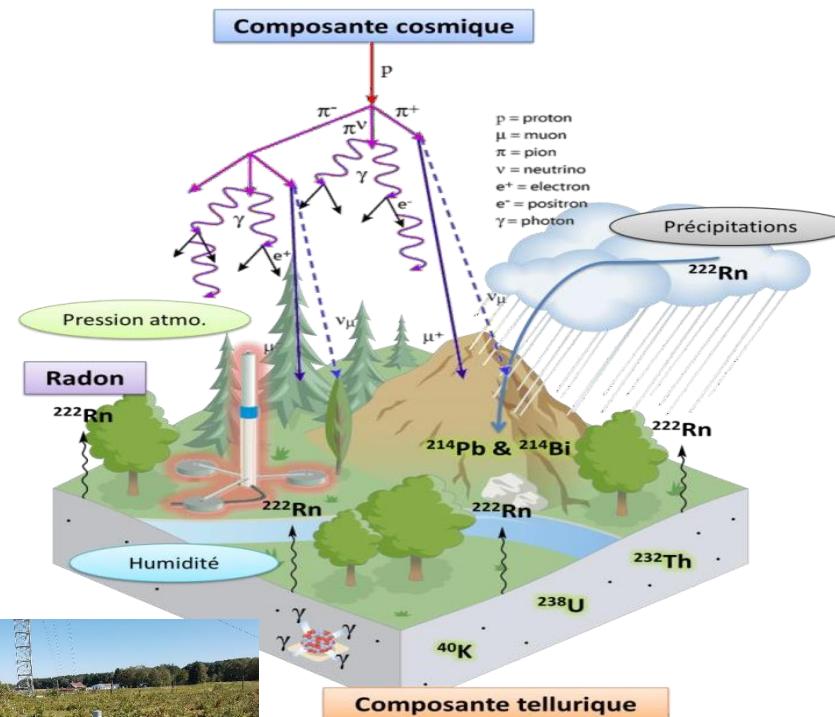
#### DOSE AMBIANTE (TOUS COMPARTIMENTS)

##### ▪ Gamma ambient de l'air : le réseau TELERAY de l'IRSN

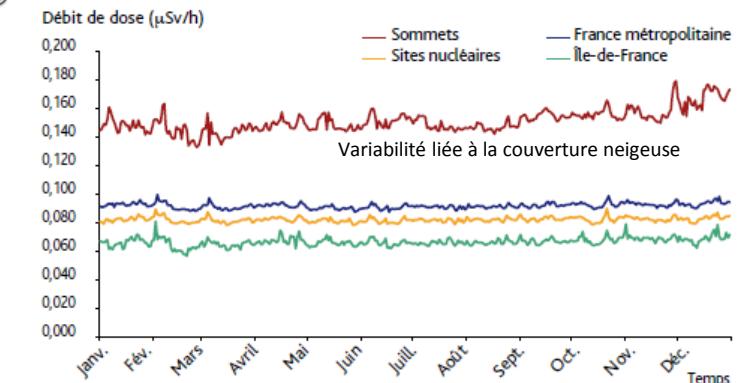
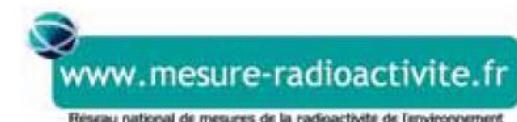


Teleray Network

Ambiant dose measured by ionizing chamber (Proportional counter)



Réseau National de Mesures de la radioactivité de l'environnement (RNM)



Variations de la dose en fonction des sites (données IRSN)

## Measurement of ionizing radiations: Applications (examples)

### ➤ Monitoring of environmental radioactivity for radiological protection

#### LE COMPARTIMENT ATMOSPHERIQUE

##### ▪ Les aérosols atmosphériques : le réseau OPERA-AIR de l'IRSN (Observatoire permanent de la radioactivité dans l'air)

→ Quantifient les radionucléides naturels (plomb-210, beryllium-7) et le bruit de fond ambiant pour des radionucléides présents en très faible quantité dans l'air, comme le  $^{137}\text{Cs}$ , par prélèvements sur filtres



⇒ Réseau qui nécessite le prélèvement régulier des filtres (tous les jours ou 10 jours) et leur analyse en laboratoire  
⇒ Détection d'un événement radiologique a posteriori



Station AS (« Air au niveau du Sol »)



Station TGD (Très Grand Débit)

Réseau National de  
Mesures de la  
radioactivité de  
l'environnement (RNM)



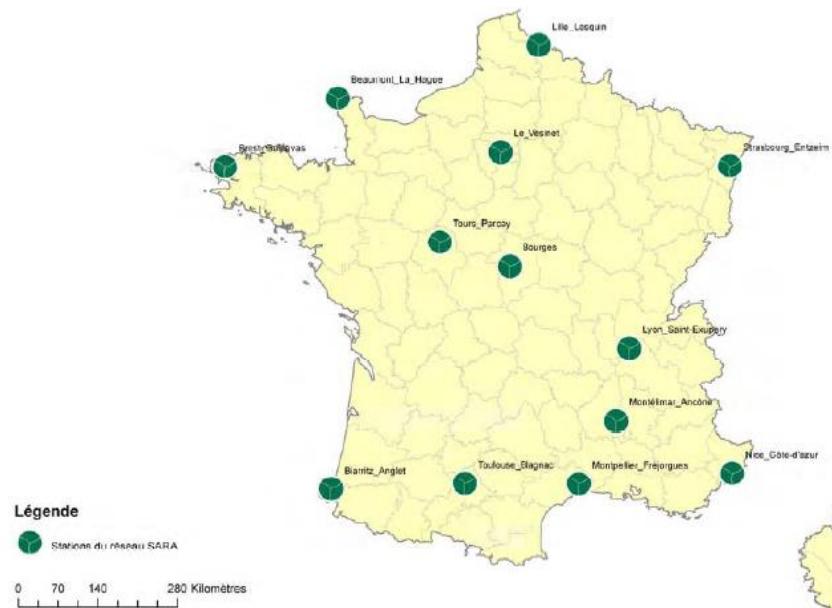
## Measurement of ionizing radiations: Applications (examples)

### ➤ Monitoring of environmental radioactivity for radiological protection

#### LE COMPARTIMENT ATMOSPHERIQUE

##### ▪ Les aérosols atmosphériques : le réseau SARA (télésurveillance) de l'IRSN

- Stations dédiées à la « Surveillance Automatisée de la Radioactivité des Aérosols » (SARA) : **mesure automatique de la présence d'éventuels radionucléides artificiels émetteurs alpha et bêta et quantification des descendants du radon**



Station SARA

Réseau National de Mesures de la radioactivité de l'environnement (RNM)



## Measurement of ionizing radiations: Applications (examples)

### ➤ Monitoring of environmental radioactivity for radiological protection

#### LE COMPARTIMENT ATMOSPHERIQUE

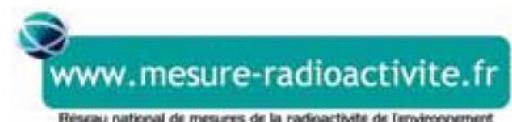
##### ▪ Les eaux de pluie :

Stations qui permettent de déterminer la part de radionucléides lessivée lors des précipitations (mesures mensuelles).

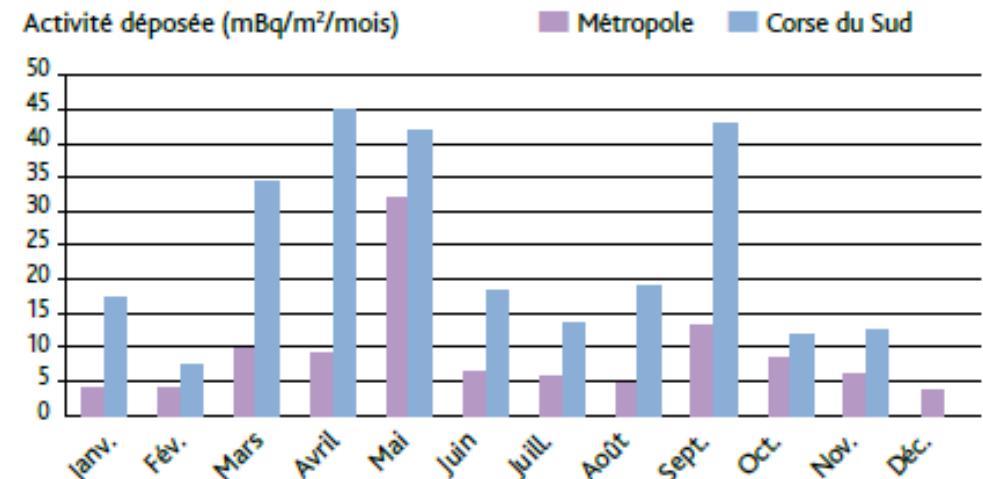


Collecteur d'eau de pluie

Réseau National de Mesures de la radioactivité de l'environnement (RNM)



#### Dépôts surfaciques en $^{137}\text{Cs}$ (moyenne sur la période 2008-2009)



## Measurement of ionizing radiations: Applications (examples)

### ➤ Monitoring of environmental radioactivity for radiological protection

#### LE MILIEU CONTINENTAL

- Surveillance radiologique des principaux cours d'eau français, en aval de toute installation nucléaire.
- Mesure par spectrométrie gamma (avec détecteur NaI(Tl)) + mesures alpha et beta de l'eau



Réseau National de  
Mesures de la  
radioactivité de  
l'environnement (RNM)



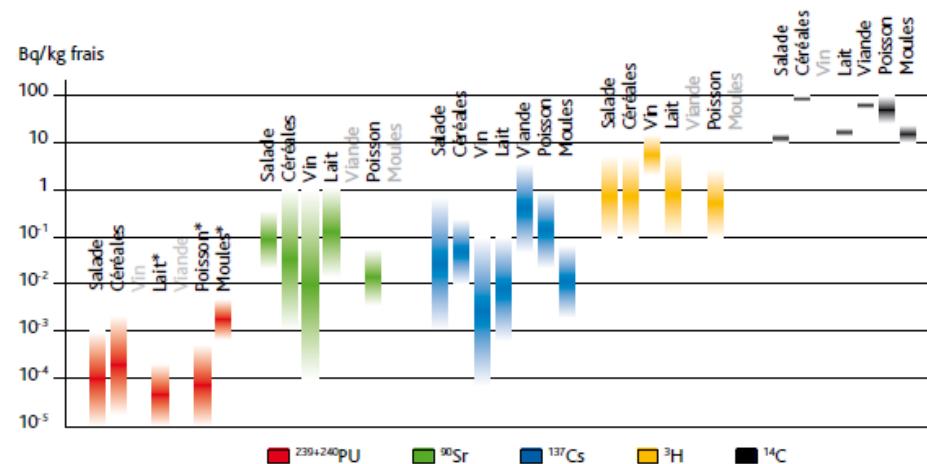
## Measurement of Ionizing radiations: Applications (examples)

### ➤ Monitoring of environmental radioactivity for radiological protection

#### LE MILIEU CONTINENTAL

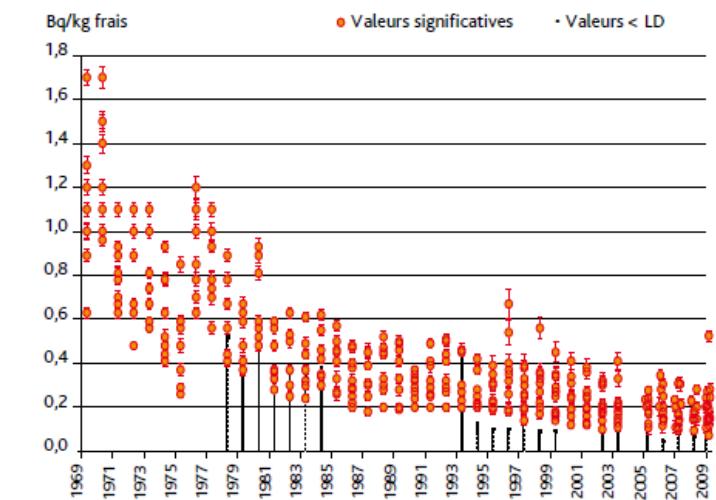
##### ▪ Le milieu terrestre :

- Prélèvements réguliers de sols, végétaux, productions d'origine animale et végétale réalisés à proximité et en dehors des zones d'influence des Installations Nucléaires de Base (INB), ceux effectués en dehors permettant de caractériser l'état radiologique « naturel » (rémanences artificielles incluses) d'une zone géographique donnée.
- Au niveau des aliments, deux types de productions sont particulièrement suivies : le lait et les céréales.



Gammes des activités actuelles des radionucléides artificiels les plus couramment observés dans sept denrées radiologiquement représentatives de la chaîne alimentaire.

Réseau National de Mesures de la radioactivité de l'environnement (RNM)

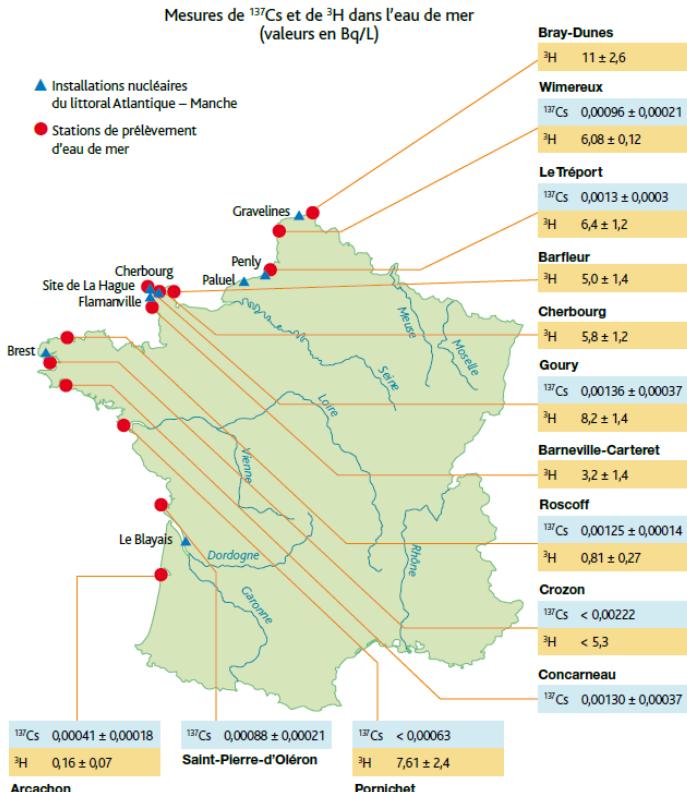


## Measurement of ionizing radiations: Applications (examples)

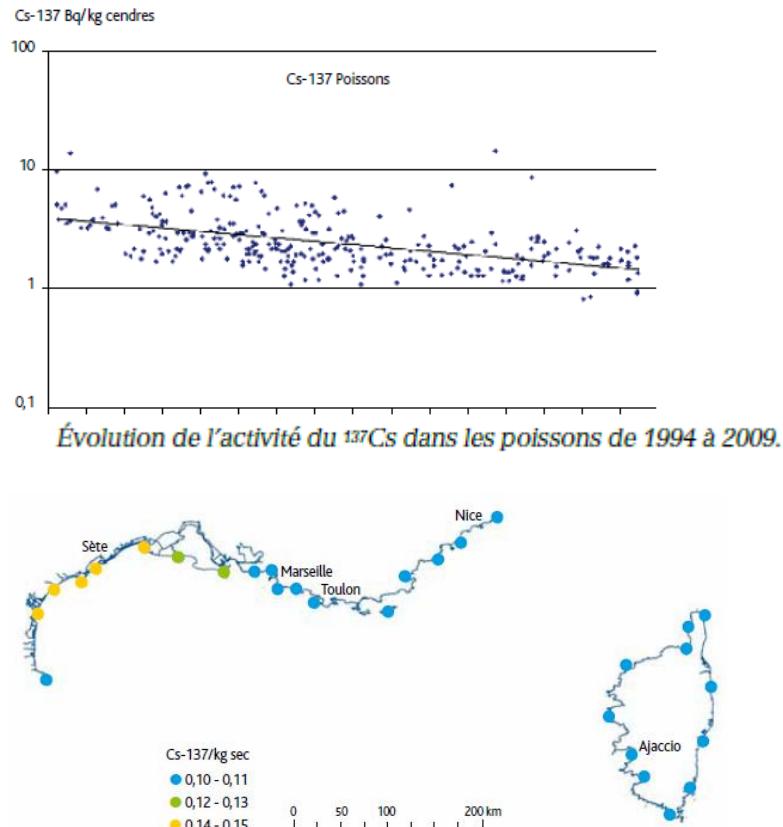
### ➤ Monitoring of environmental radioactivity for radiological protection

#### LE LITTORAL

- Stations de prélèvements réparties sur tout le littoral pour contrôler les rejets, en particulier sur le littoral de la Manche et à proximité de l'embouchure du Rhône.
- Prélèvements d'eau de mer, de sédiments, de bio-indicateurs (algues, mollusques, poissons et crustacés)



Activités en  $^{3}\text{H}$  et  $^{137}\text{Cs}$  mesurées en 2009 dans l'eau de mer prélevée sur le littoral.



Réseau National de Mesures de la radioactivité de l'environnement (RNM)



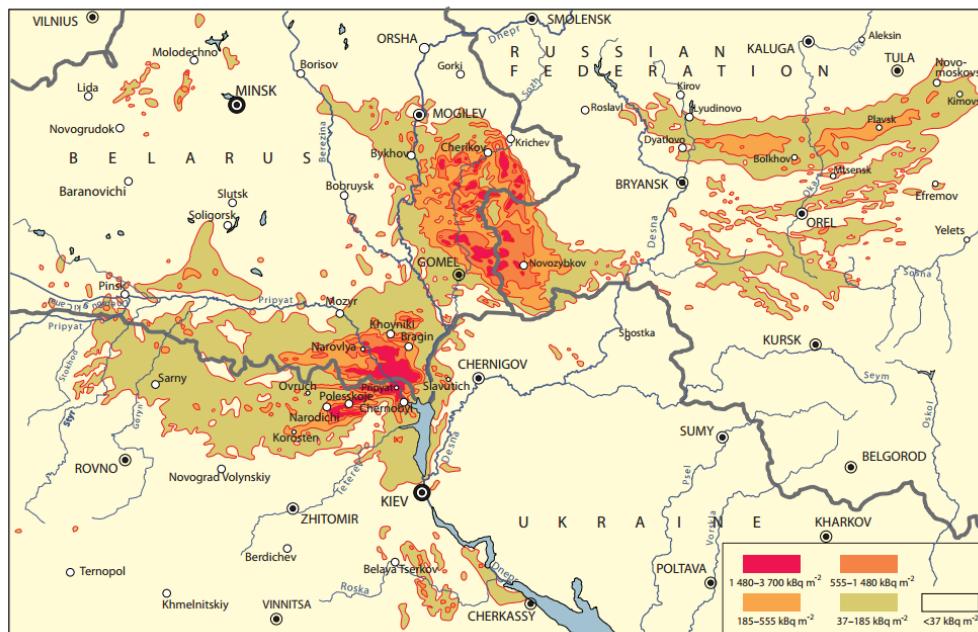
## Measurement of Ionizing radiations: Applications (examples)

### ➤ Monitoring of radioactivity following nuclear accidents

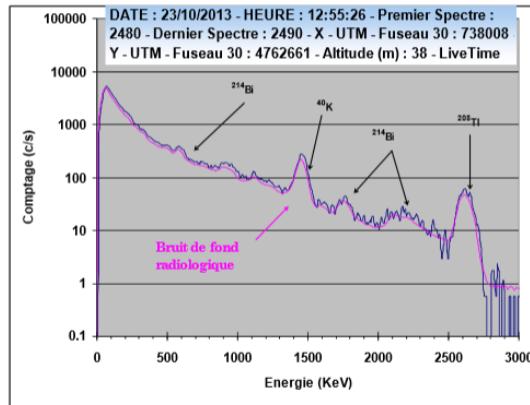


Gamma-ray spectrometry using large inorganic scintillators (NaI(Tl))

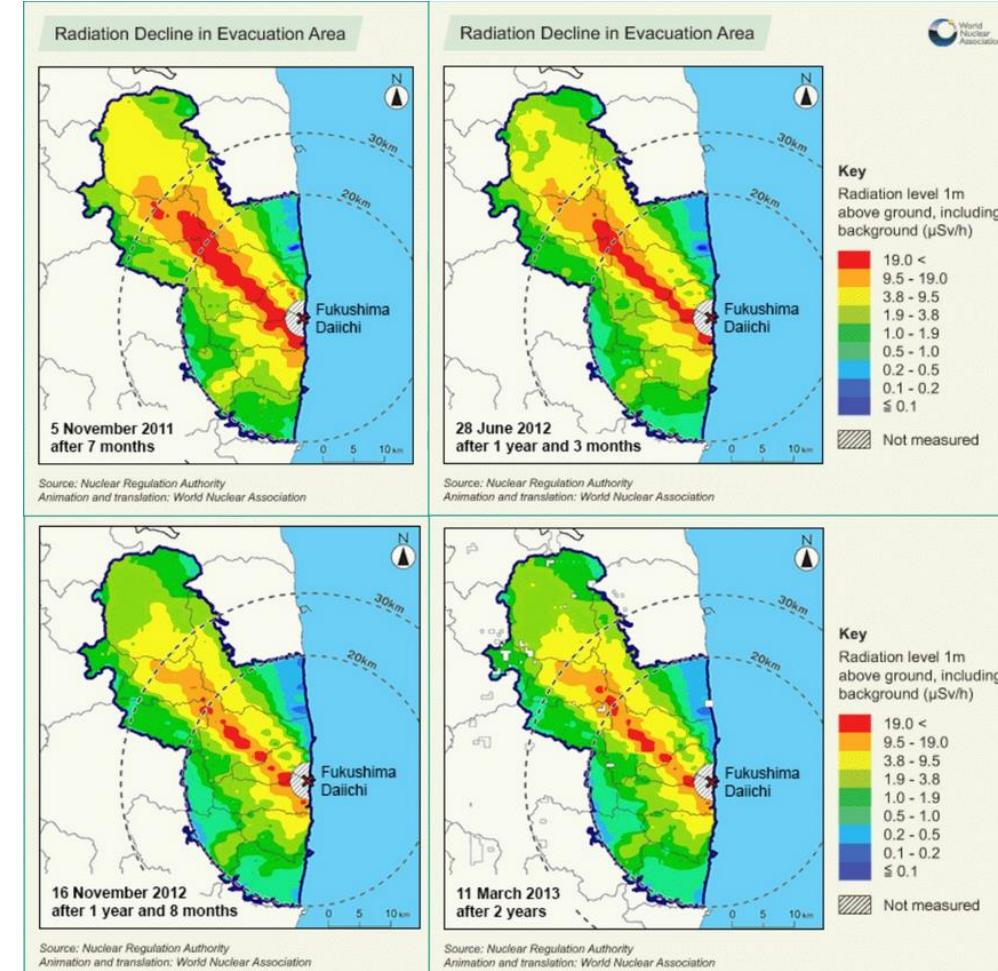
Figure II. Map of  $^{137}\text{Cs}$  deposition levels in Belarus, the Russian Federation and Ukraine as of December 1989 [I28]



Airborne Survey of the Tchernobyl region



Airborne Survey of the Fukushima region



## Measurement of Ionizing radiations: Applications (examples)

### ➤ Monitoring of uranium, thorium and potassium for Geological Survey and for Uranium exploration

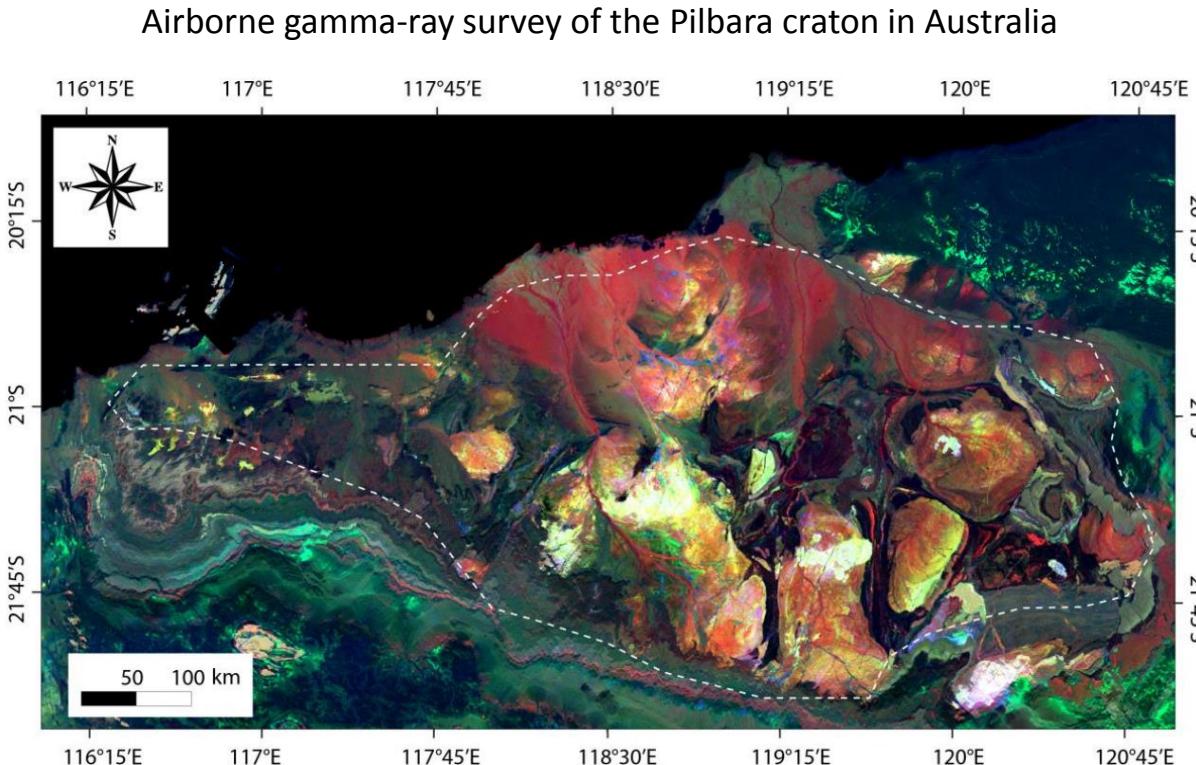


Figure 3 - RGB representation of HPE concentrations over the Northern part of the Pilbara Craton, Western Australia, extracted from the radiometric map of Australia (Minty et al., 2008). Red = Potassium (0 to 5wt%), Green = Thorium (0 to 40 ppm), Blue = Uranium (0 to 7 ppm). Concentrations within the dotted white line, encompassing most of the archean greenstones and granitoids, are extracted for the estimation of the distributions.

(Baratoux et al., 2021)

**Unmanned Aerial Vehicle systems are also being developed**

Wooley Mine in Arizona

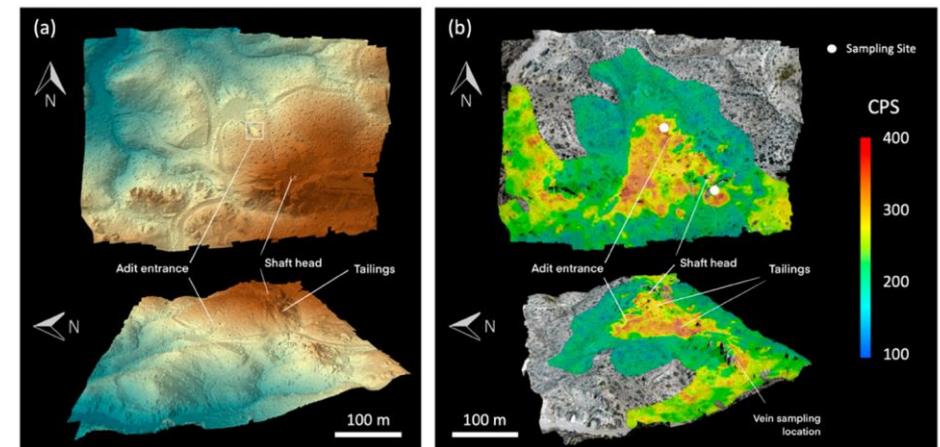


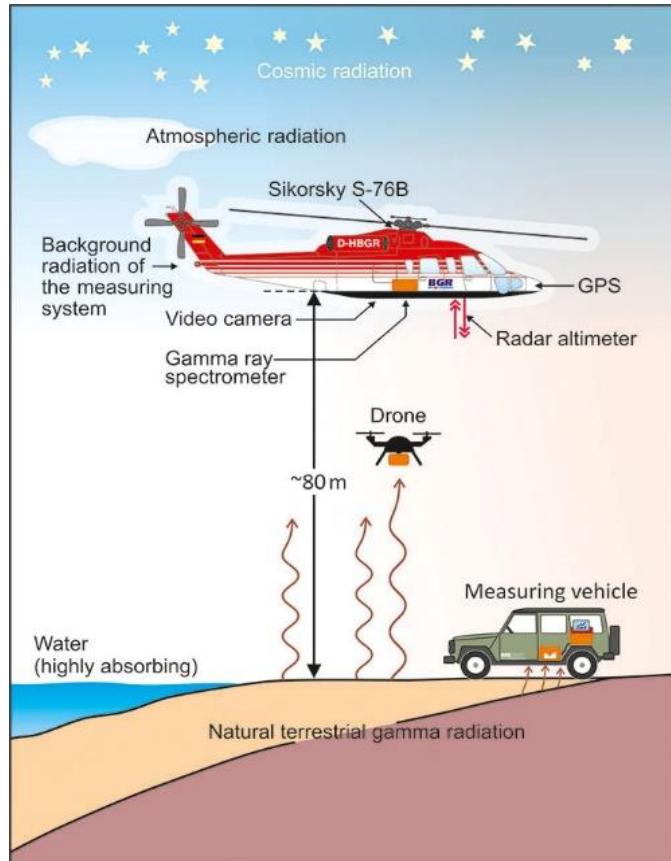
Figure 3. (a) 3-dimensional photogrammetry reconstruction of the Wooley Mine site and survey area detailing the localized topographic features. (b) Photogrammetry model of the site (from (a)) rendered with the aerially derived radiation mapping results shown in Figure 2. The locations at which ore samples were obtained for subsequent mineralogical analysis are shown in (b).

(Martin et al., 2020)

CPS = counts/sec

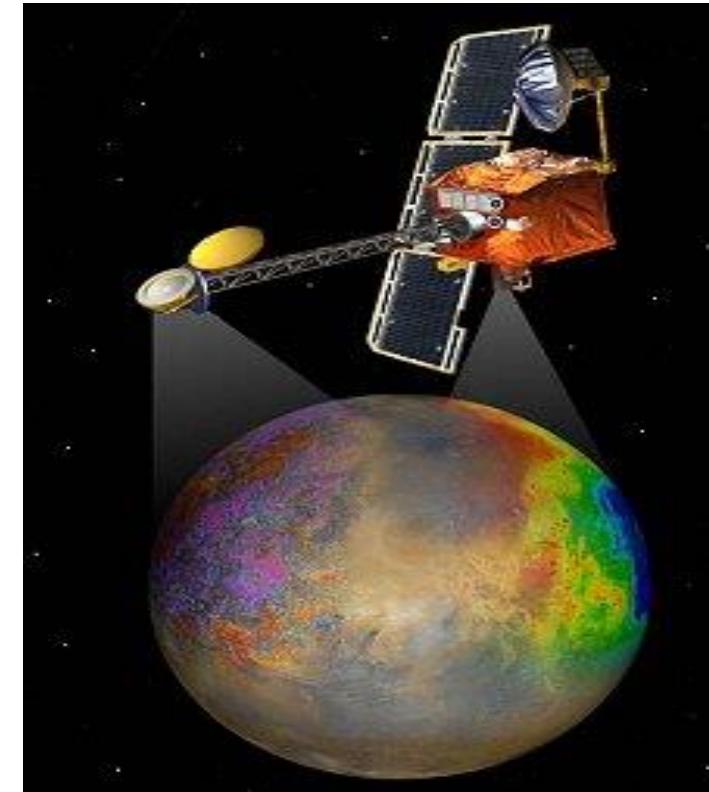
## Measurement of Ionizing radiations: Applications (examples)

### ➤ Remote mapping of the chemical composition of planetary surfaces



**Airborne gamma-ray spectrometry**

High spatial resolution (~50 m), small areal coverage

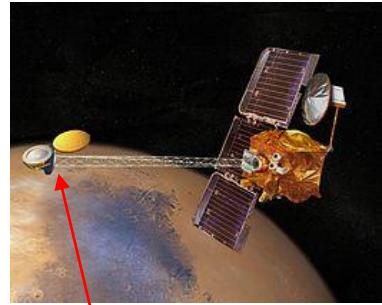


**Gamma-ray spectrometry from the orbit  
(around airless bodies or planets with tenuous atmospheres)**

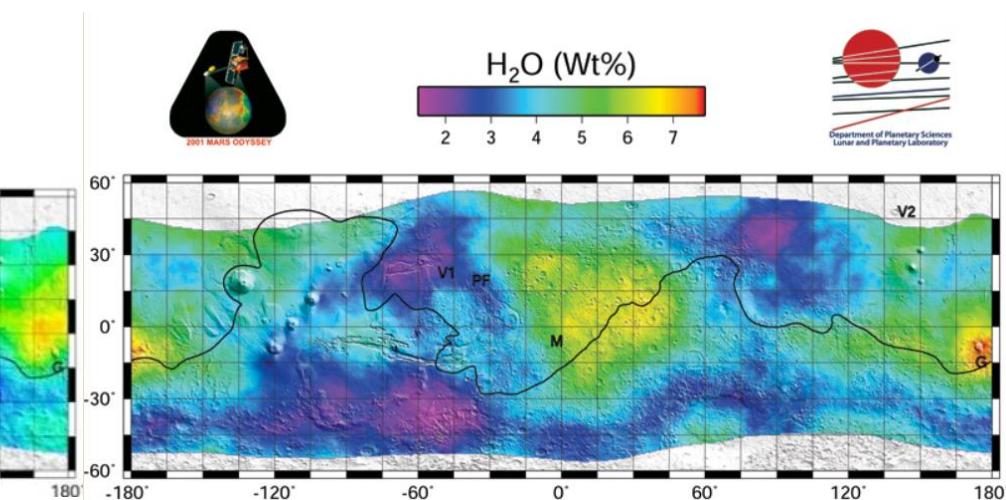
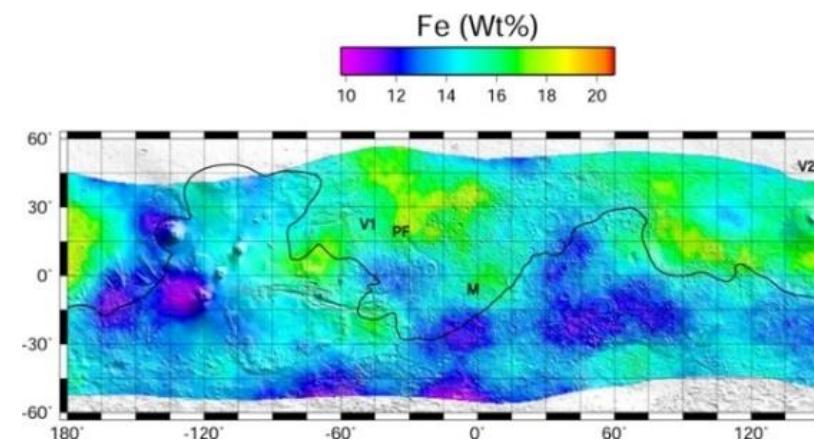
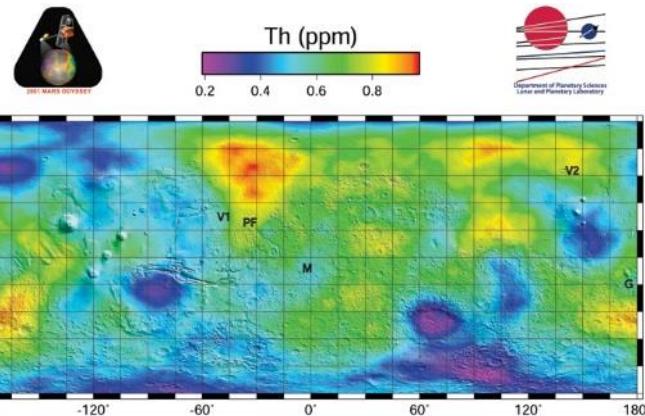
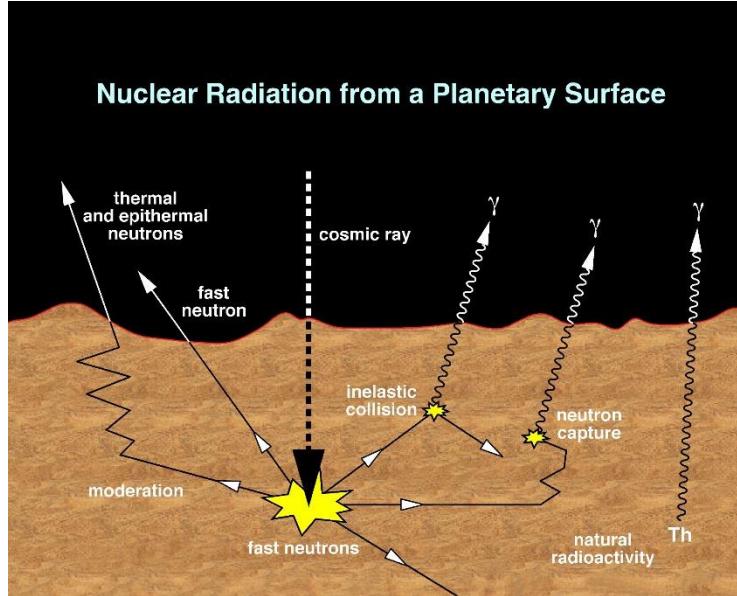
Global coverage, poor spatial resolution (300 km)

## Measurement of Ionizing radiations: Applications (examples)

### ➤ Remote mapping of the chemical composition of planetary surfaces



**Mars Odyssey (2001 - )**  
**Gamma-Ray Suite (GRS) :**  
**Gamma (HPGe) + Neutrons**



- Can measure :
  - major and minor elements (Si, Fe, Ca, Al)
  - radioactive (K, Th, U) : important to understand the thermal history of a planet
  - volatiles (H, Cl, S)
- Probing depth : few tens of cm

## Measurement of Ionizing radiations: Applications (examples)

### ➤ Remote mapping of radioactive tracers in the atmosphere

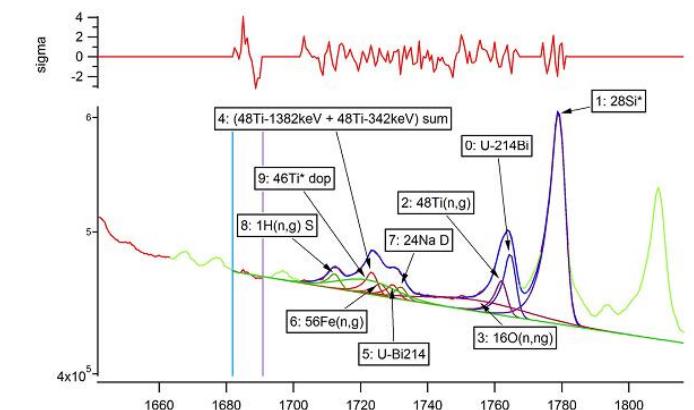
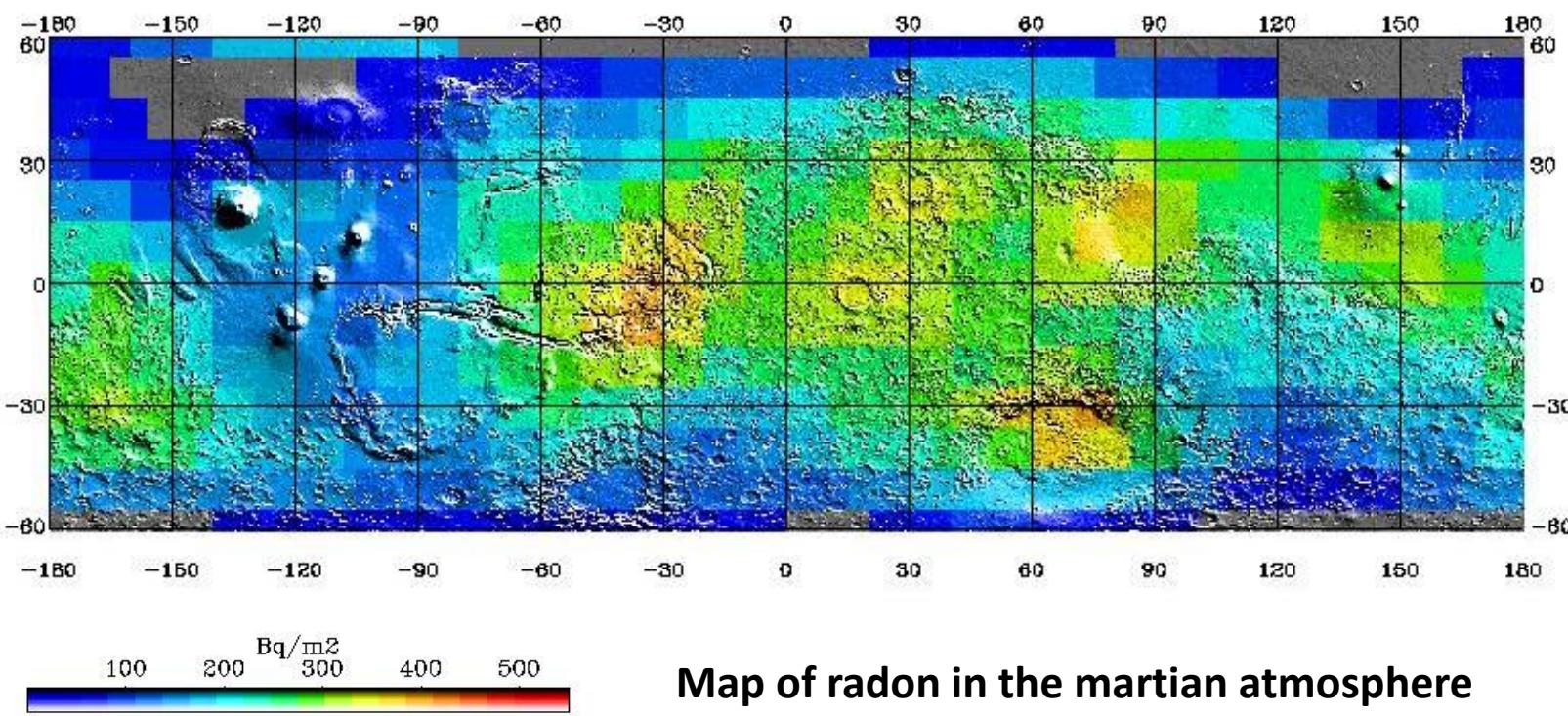


Fig. 1: Peak fitting of the  $\text{Th}^{208}\text{Ti}$  (861 keV) and  $\text{U}^{214}\text{Bi}$  (1730 and 1765 keV) lines

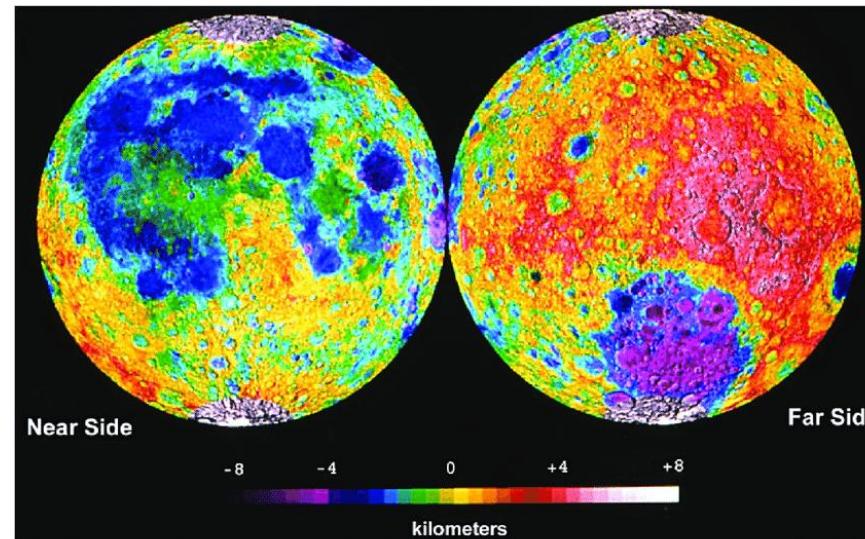
Close-up on a spectral region of the gamma-ray spectrum measured by Mars Odyssey GRS

## Measurement of Ionizing radiations: Applications (examples)

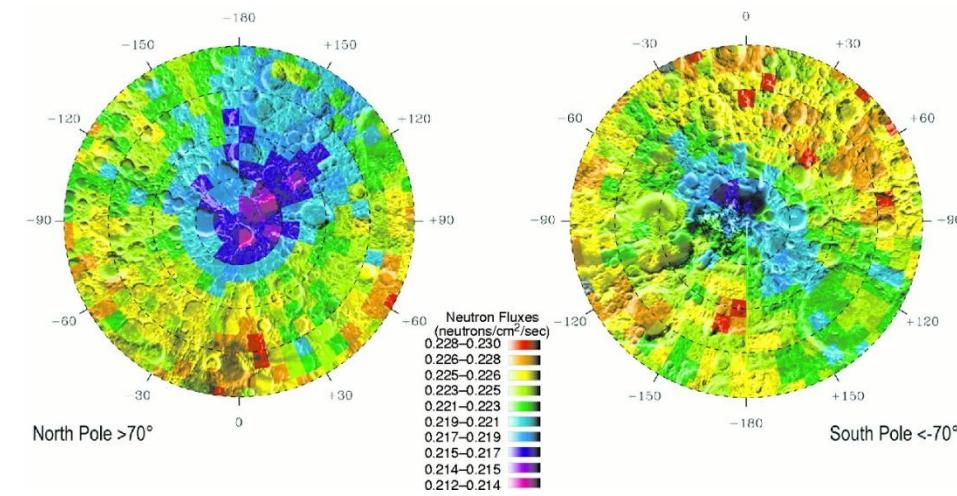
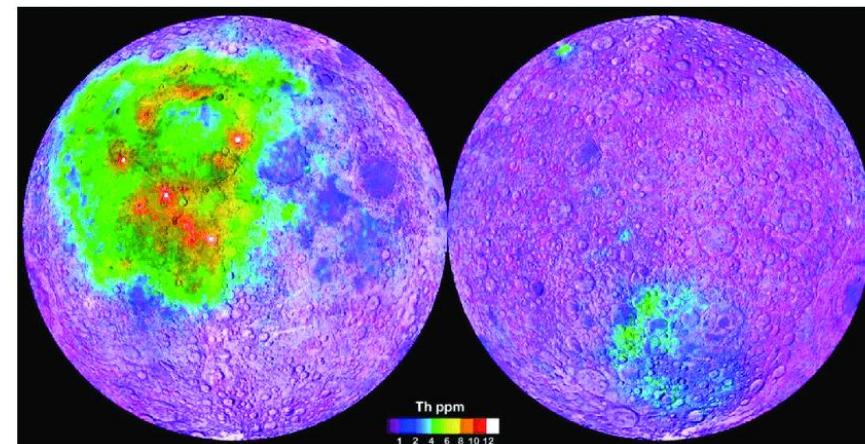
### ➤ Remote mapping of the chemical composition of planetary surfaces



Lunar Prospector (1998-1999)



+ Mercury surface  
composition by NASA  
MESSENGER spacecraft

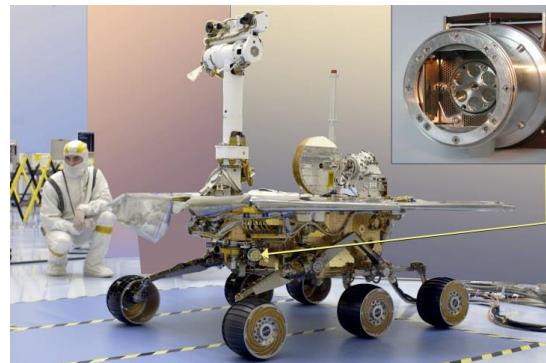


Detection and mapping of lunar polar ice  
(Feldman et al., 1998)

Mapping of the KREEP regions  
(enriched in K, Rare Earth Elements, P)

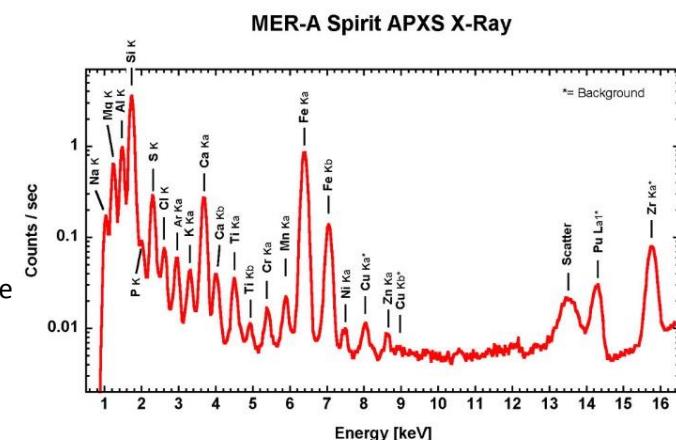
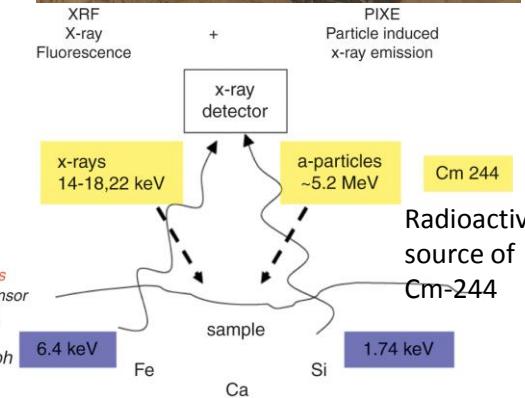
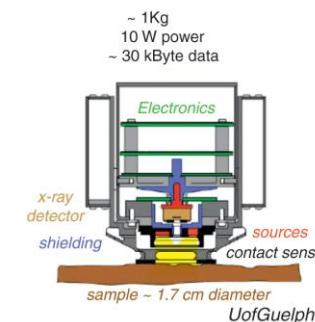
## Measurement of Ionizing radiations: Applications (examples)

### ➤ In situ measurement of the chemical composition of rocks



### Alpha-Particle X-ray Spectrometer (APXS)

- Fluorescence X (PIXE avec source  $^{244}\text{Cm}$ ) + Alpha Particle Rutherford Backscattering
- Elements  $Z \geq \text{Na}$
- Echelle d'analyse  $\sim 5\text{-}10 \text{ cm}^2$ , au contact
- **Viking 1 et 2, Pathfinder, Spirit & Opportunity, MSL**



## Measurement of Ionizing radiations: Applications (examples)

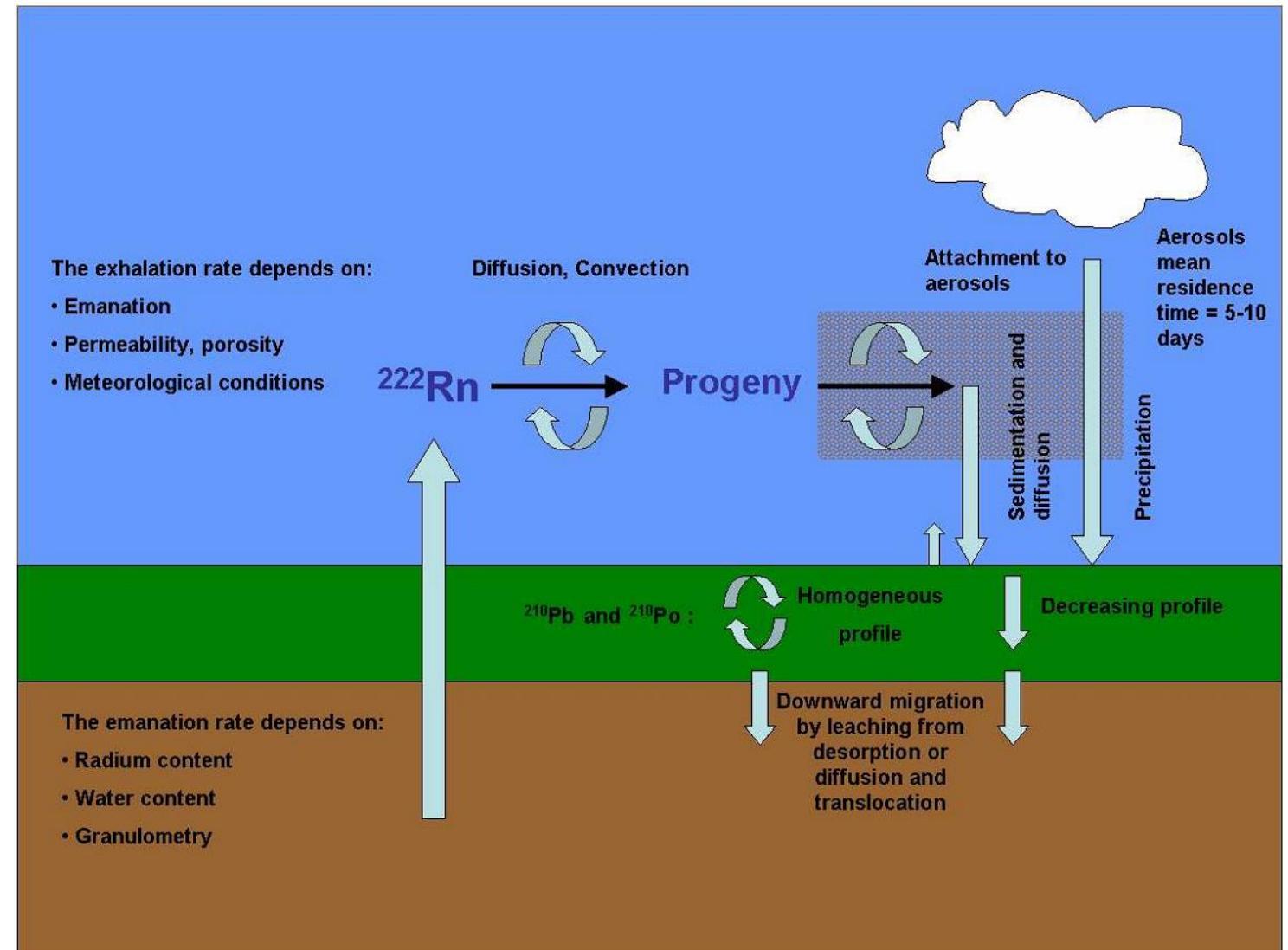
### ➤ Applications in Geosciences

- Radionuclides = chronometers  $\Rightarrow$  **DATING**
- Radionuclides = tracers  $\Rightarrow$  **STUDY OF TRANSPORT AND EXCHANGE PROCESSES** between different compartments

## Measurement of Ionizing radiations: Applications (examples)

### Radon and its decay products

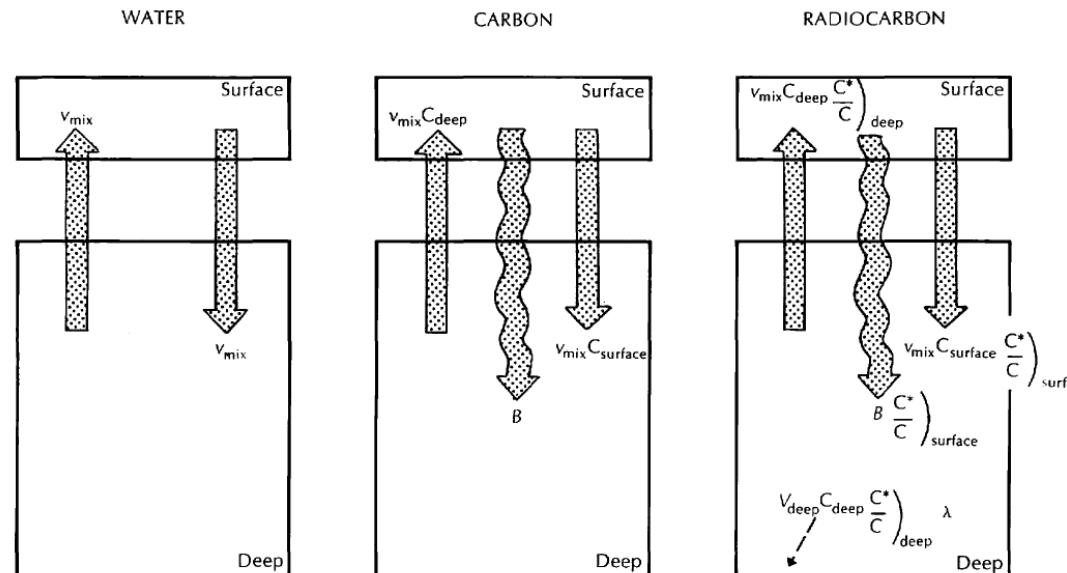
- Subsurface – atmosphere exchanges
- Atmospheric transport of gases (radon) and aerosols (decay products)
- Aerosols dry and wet deposition (decay products)
- Soil reworking
- Radionuclides migration in the soils



## Measurement of Ionizing radiations: Applications (examples)

### Carbon-14 ( $T = 5730$ y, atmospheric origin)

#### Residence time of water in deep ocean



$$B + v_{mix} C_{surface} = v_{mix} C_{deep}$$

$$B = v_{mix} (C_{deep} - C_{surface})$$

$$v_{mix} C_{surface} \frac{C^*}{C}_{surface} + B \frac{C^*}{C}_{surface}$$

$$= v_{mix} C_{deep} \frac{C^*}{C}_{deep} + v_{deep} C_{deep} \frac{C^*}{C}_{deep} \lambda$$

A l'équilibre, on montre que :

$$= V_{deep}$$

$$v_{mix} = \frac{\lambda h A_{ocean}}{\frac{C^*/C}{C^*/C}_{surface} - 1}$$

$v_{mix}$  = taux d'échange d'eau entre les deux réservoirs ( $m^3/s$ )

$V_{deep}$  = volume des eaux océaniques profondes

$h$  = profondeur moyenne des océans = 3 000 m

$A_0$  = surface totale des océans

$\lambda$  = constante radioactive du  $^{14}C$  ( $C^*$ )

$$\frac{v_{mix}}{A_{ocean}} = \frac{\frac{1}{8.2 \times 10^3} \times 3.0 \times 10^5}{1.12 - 1} = 300 \text{ cm/yr} \rightarrow$$

Temps de résidence moyen  $\sim (3000 \text{ m})/(3 \text{ m/an}) = 1000 \text{ ans}$

Measurement of Ionizing radiations: Applications (examples)

Carbon-14 (T = 5730 y, atmospheric origin)

Deep circulation  
("Conveyor belt")

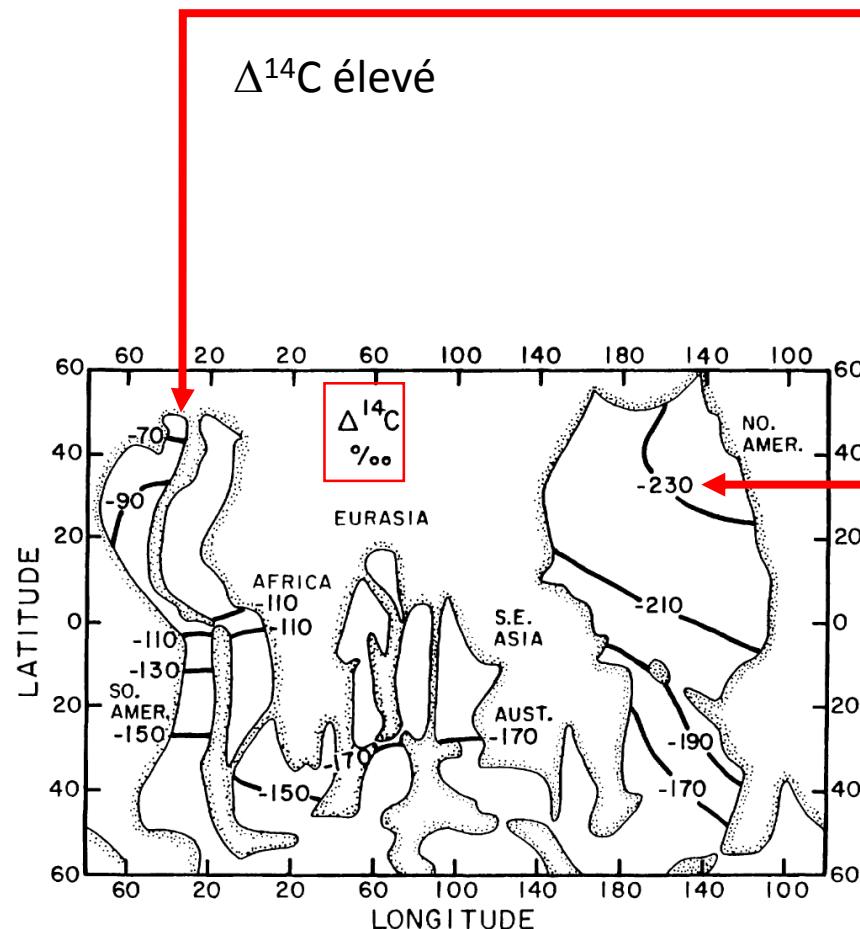
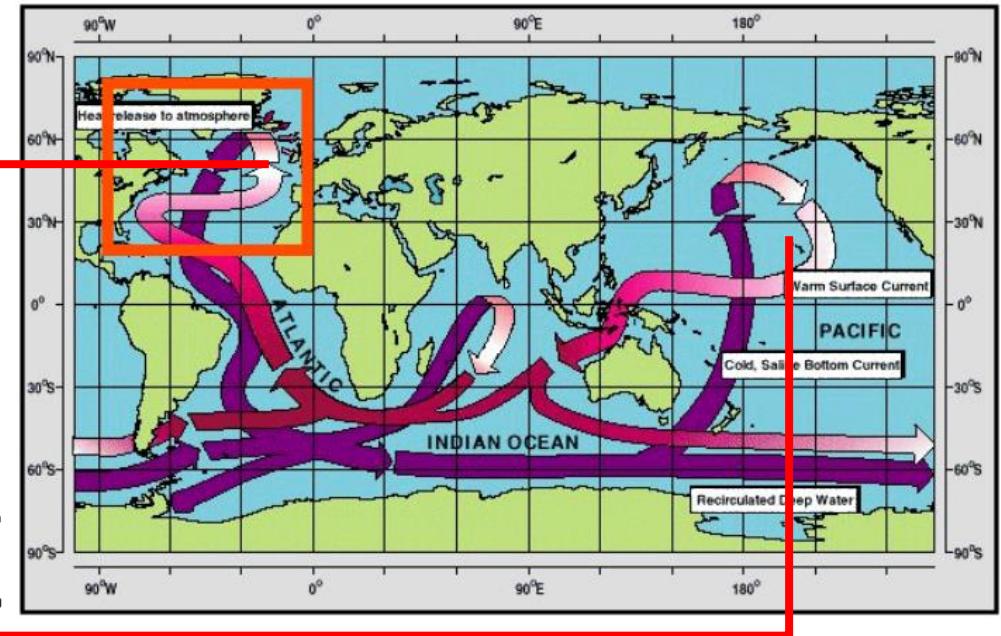


Figure 5-4. Map showing the distribution of  $^{14}\text{C/C}$  ratios (expressed as  $\Delta^{14}\text{C}$ ) at a depth of 4000 meters in the main basins of the world ocean. Based on results obtained by Stuiver and by Ostlund as part of the GEOSECS program (21,22,23).



$\Delta^{14}\text{C}$  faible  
(décroissance du  $^{14}\text{C}$  pendant  $\sim 1000$  ans)

(Broecker & Peng, 1982)

## Measurement of Ionizing radiations: Applications (examples)

### Study of sedimentation rates

Mélange à l'interface eau-sédiment = **Bioturbation**

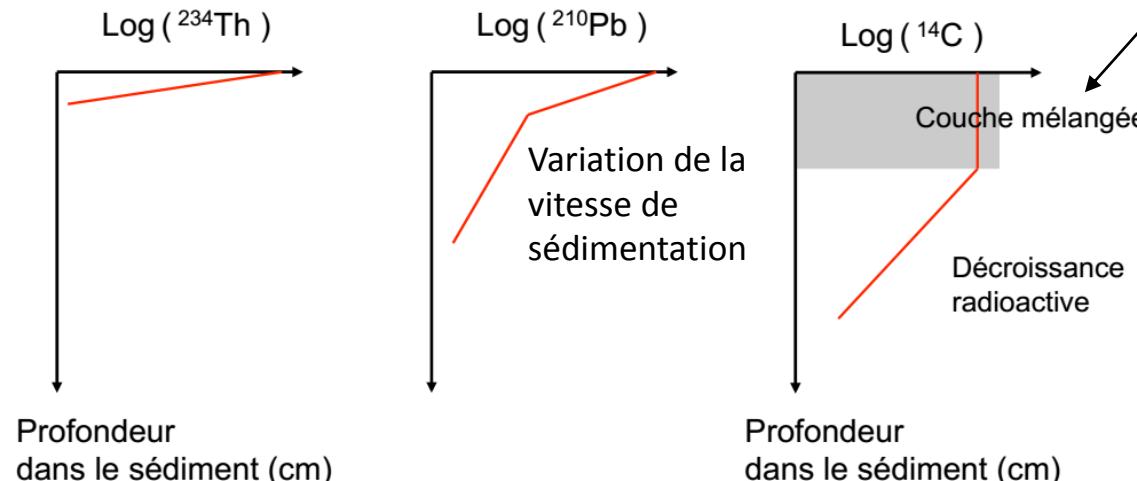
### Examples of different radionuclides' profiles in the sedimentary column :

Time scales explored

24 jours

22.4 ans

5730 ans

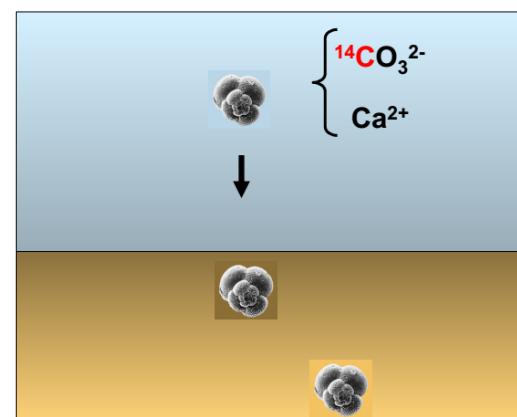


## Carbon-14 (T = 5730 y, atmospheric origin)

### Dating of drill core of marine sediments and sedimentation rates

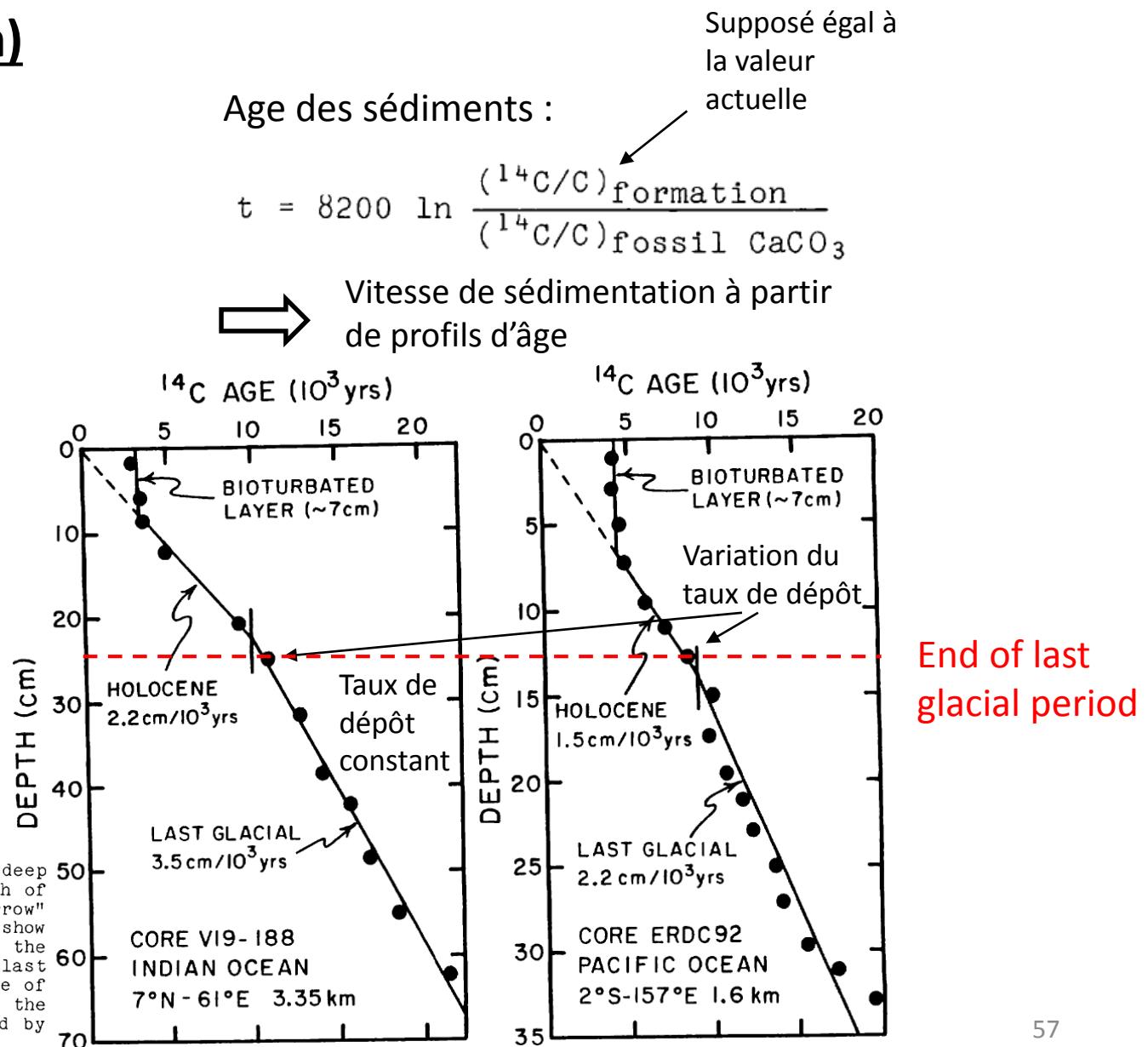


*Reconstitutions paléocéanographiques*



**0 - 50 000 ans**

**Figure 5-13.** Radiocarbon ages as a function of depth in two deep sea cores. The near constancy of these ages down to a depth of about 7 cm bears witness to the action of organisms which "burrow" into the sediment. Below this zone of bioturbation the ages show the expected regular increase. The changes in the slope of the age versus depth line at the time close to the end of the last glacial period (i.e., ~10,000 years ago) reflects the influence of climate on the rate at which the various materials making up the sediment rain onto the sea floor. These results were obtained by Peng of the Lamont-Doherty Geological Observatory (197, 199).

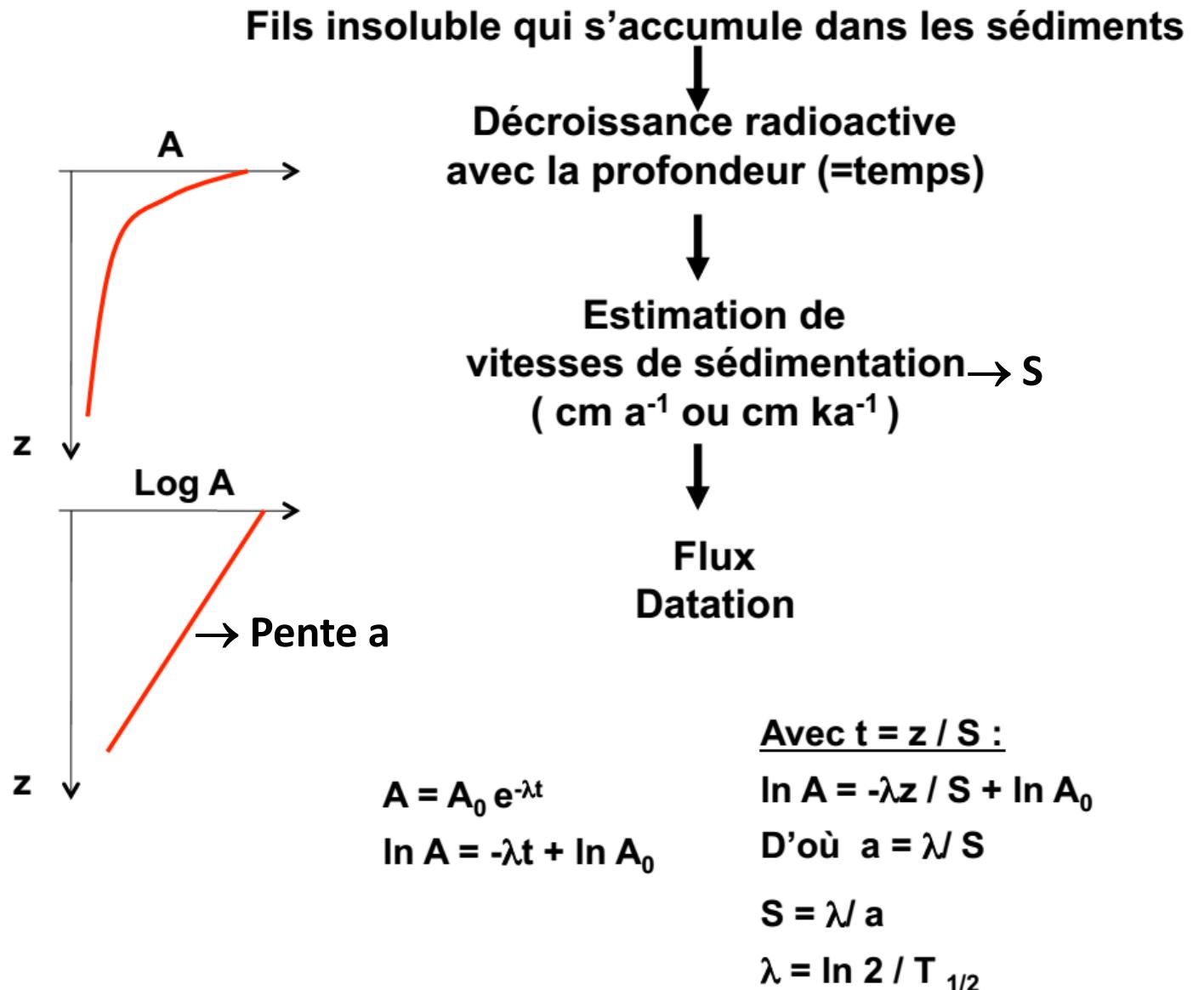


## Measurement of Ionizing radiations: Applications (examples)

### Study of sedimentation rates :

#### Analytical model :

(See Case Study with Marc Souhaut)



### High-resolution historical records from Pettaquamscutt River basin sediments: 1. $^{210}\text{Pb}$ and varve chronologies validate record of $^{137}\text{Cs}$ released by the Chernobyl accident

ANA LÚCIA LIMA,<sup>1,\*</sup> J. BRADFORD HUBENY,<sup>2</sup> CHRISTOPHER M. REDDY,<sup>1</sup> JOHN W. KING,<sup>2</sup> KONRAD A. HUGHEN,<sup>1</sup> AND TIMOTHY I. EGLINTON<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Marine Chemistry and Geochemistry, Woods Hole Oceanographic Institution, Woods Hole, MA 02543, USA

<sup>2</sup>Graduate School of Oceanography, University of Rhode Island, Narragansett, RI 02882, USA

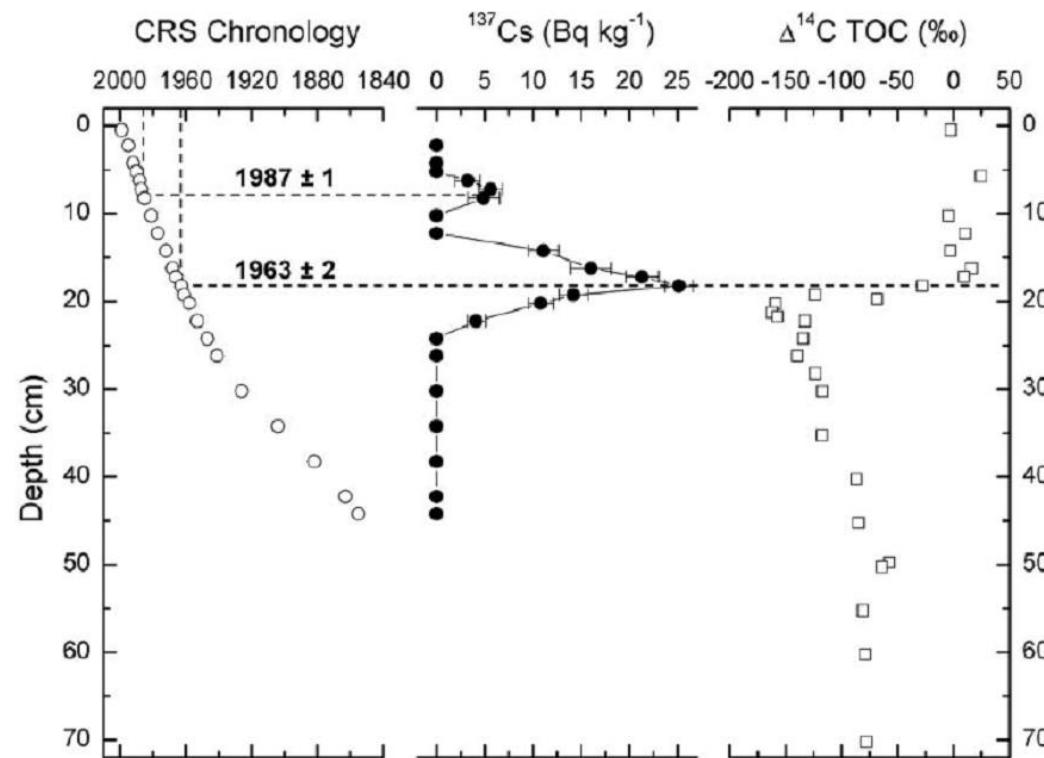
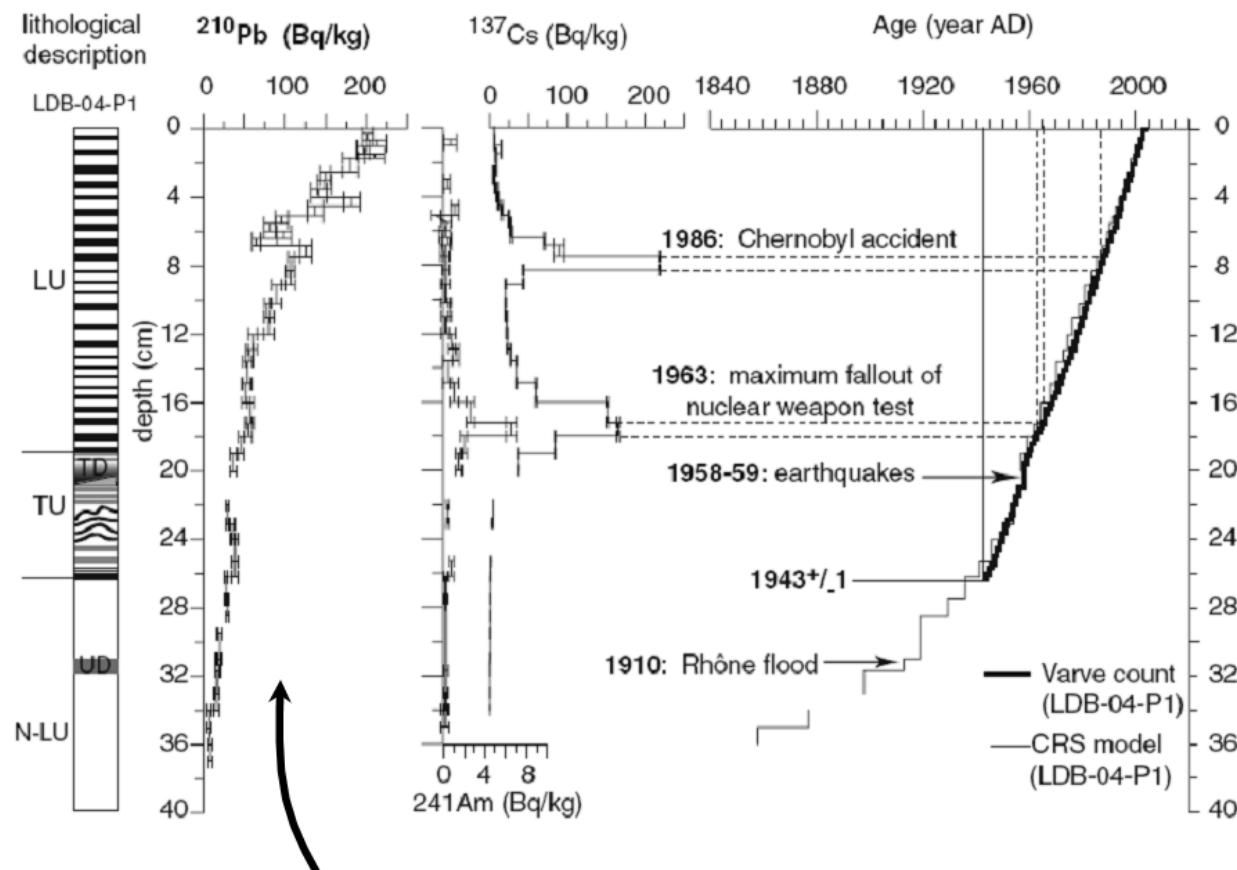


Fig. 5. Radioactivity released by nuclear bomb testing in the 1960s was preserved in the Pettaquamscutt River sedimentary record in the form of a sharp  $^{137}\text{Cs}$  peak and increased amounts of radiocarbon in the total organic carbon ( $\Delta^{14}\text{C}$  TOC). A smaller and more surficial peak in  $^{137}\text{Cs}$  activity dated of 1987 is consistent with fallout resulting from the Chernobyl accident.

**Sedimentological and geochemical records of past trophic state and hypolimnetic anoxia in large, hard-water Lake Bourget, French Alps**

Charline Giguet-Covex · Fabien Arnaud ·  
Jérôme Poulenard · Dirk Enters · Jean-Louis Reyss ·  
Laurent Millet · Jérôme Lazzaroto · Olivier Vidal

J Paleolimnol (2010) 43:171–190  
DOI 10.1007/s10933-009-9324-9



**Fig. 3** Independent age-depth model of LDB-04-P1 from radionuclides ( $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{241}\text{Am}$  and  $^{210}\text{Pb}$ ), varve counting and stratigraphic markers (UD and TD deposits)

*Décroissance du  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  avec la profondeur = datation*

# Quelques bases d'instrumentation nucléaire

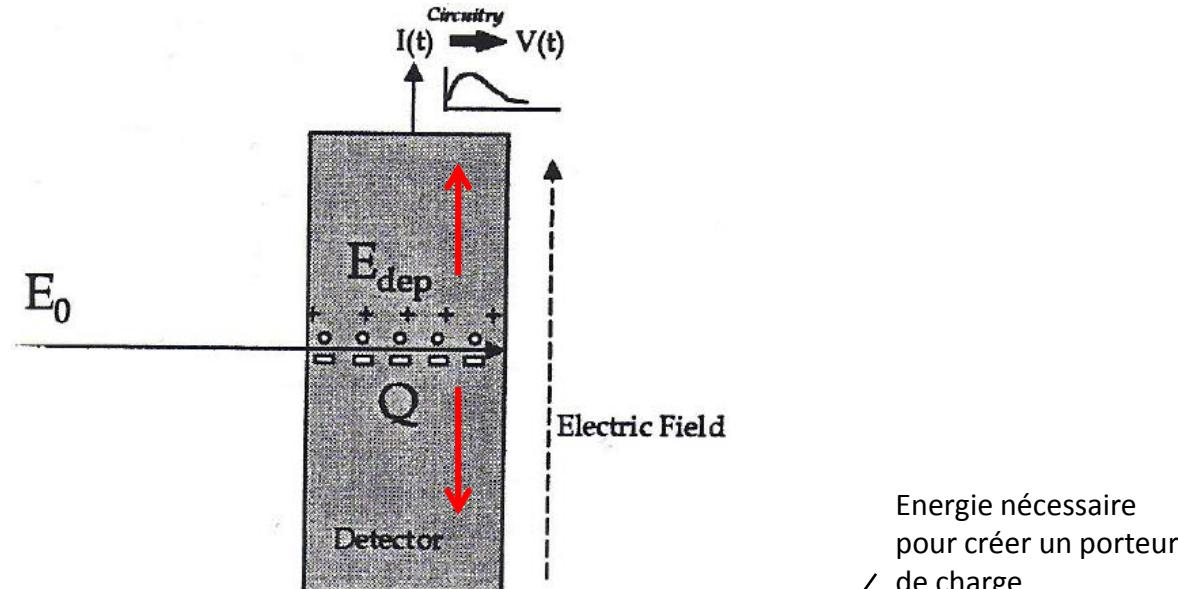
EUR TESS

Pierre-Yves Meslin

Institut de Recherche en Astrophysique et Planétologie (IRAP) – Toulouse

[pmeslin@irap.omp.eu](mailto:pmeslin@irap.omp.eu)

# Principe de la mesure des rayonnements ionisants



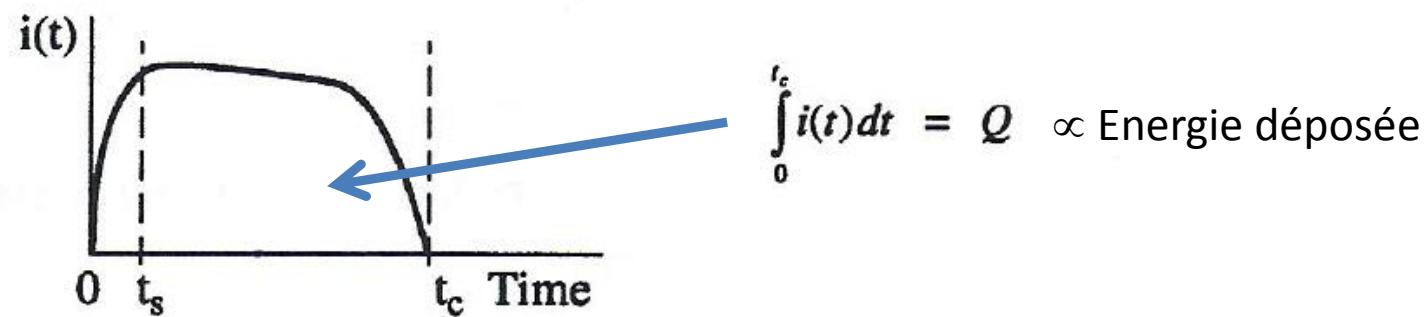
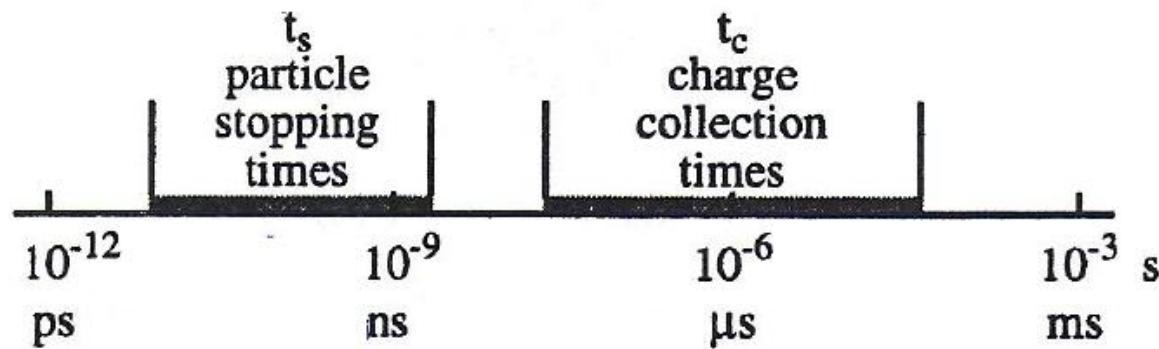
Idées clés :

- Energie déposée dans le détecteur
  - $\propto$  nombre de porteurs de charge créés ( $\Rightarrow$  charge  $Q = q E_{dep}/W$ )
  - $\propto$  courant  $I$  intégré ( $i = dQ/dt$ )
  - $\propto$  Tension maximale  $V_{max}$  de l'impulsion électrique créée à l'aide d'un condensateur (préamplificateur)

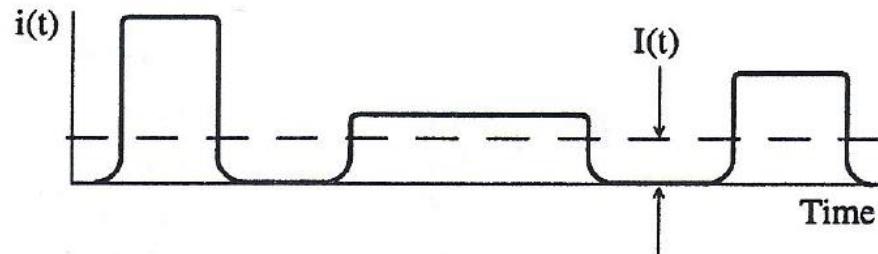
$\Rightarrow$  Energie déposée  $\propto V_{max}$  ou  $I_{tot}$  mesurée

- Energie mesurée = énergie déposée dans le détecteur  $\Rightarrow$  si l'épaisseur du détecteur est suffisante et que la particule cède toute son énergie dans le détecteur, l'énergie mesurée est celle de la particule incidente

## Temps de réponse du détecteur



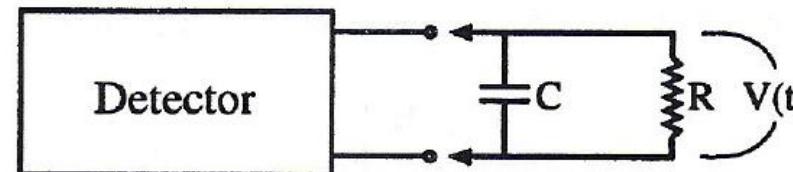
## Mode Courant



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

On mesure le courant moyen  $\langle I \rangle$   
 ⇒ Permet seulement de détecter s'il y a des rayonnements

## Mode Impulsions

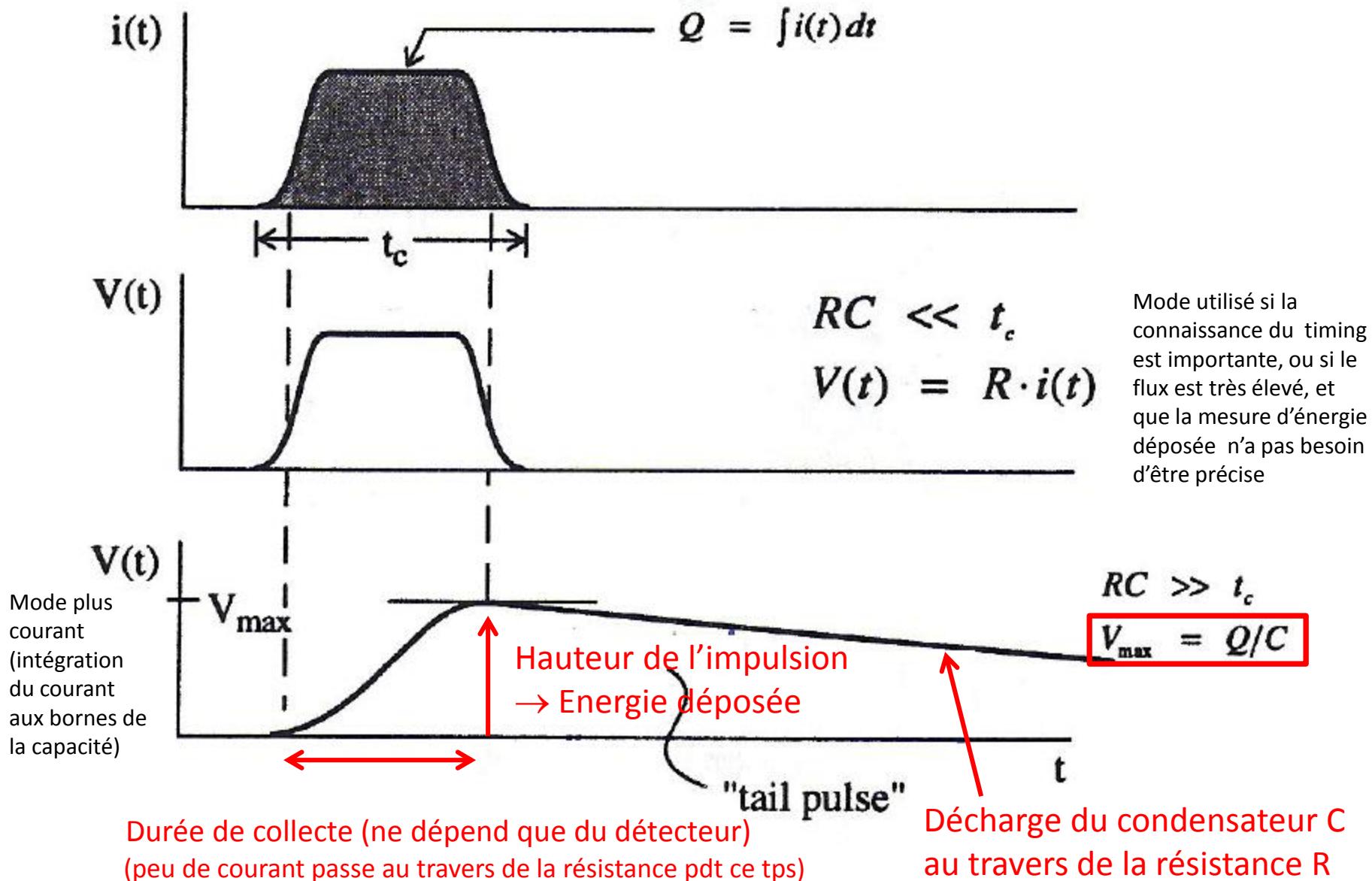


Constante de temps =  $RC$   
 $R$  = résistance d'entrée du circuit  
 $C$  = capacité équivalente du détecteur et du circuit de mesure (câble et préampli)

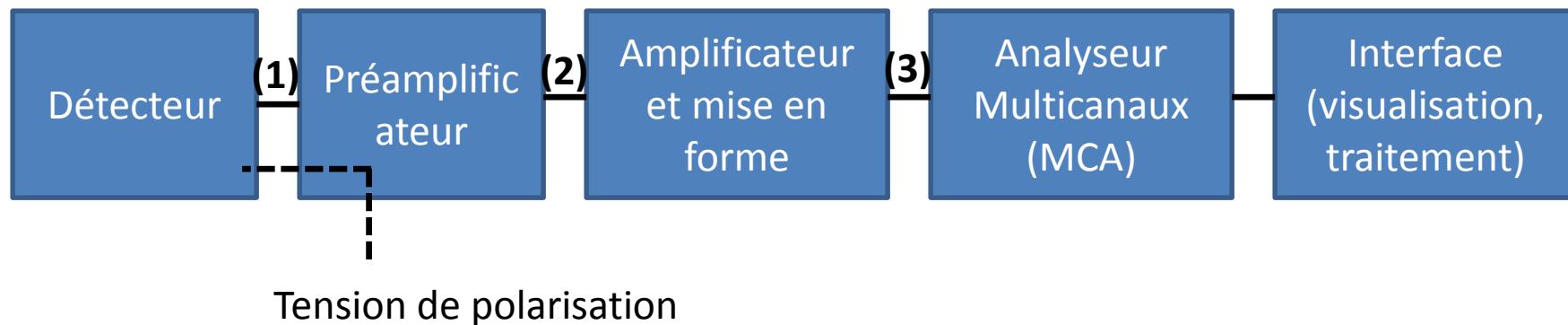
Chaque particule interagissant avec le détecteur donne naissance à une impulsion de tension électrique qui est enregistrée

⇒ Comptage et éventuellement spectroscopie et identification des particules

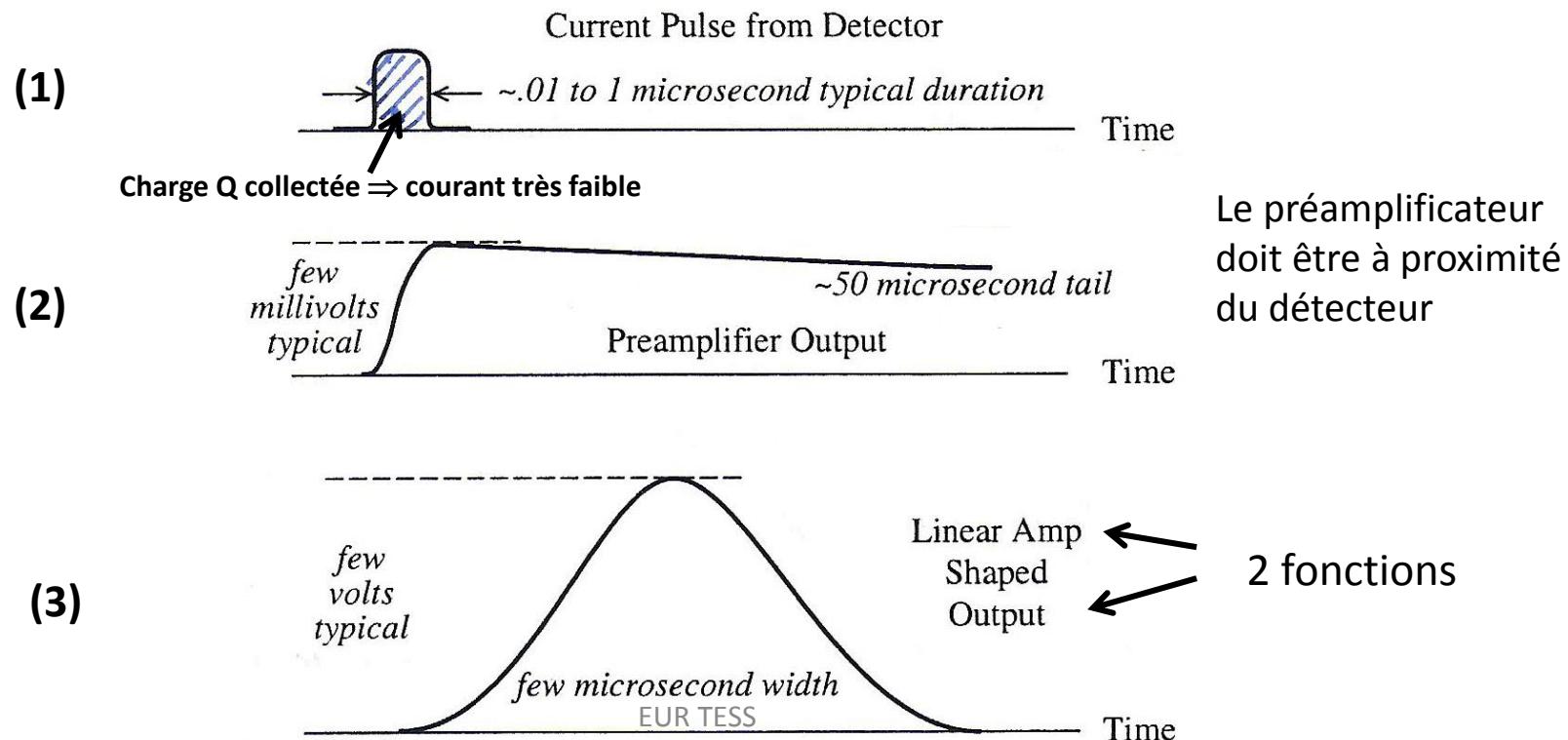
# Effet du produit RC du préamplificateur



## Chaîne d'acquisition pour la spectroscopie (dans le détail, dépend des applications)

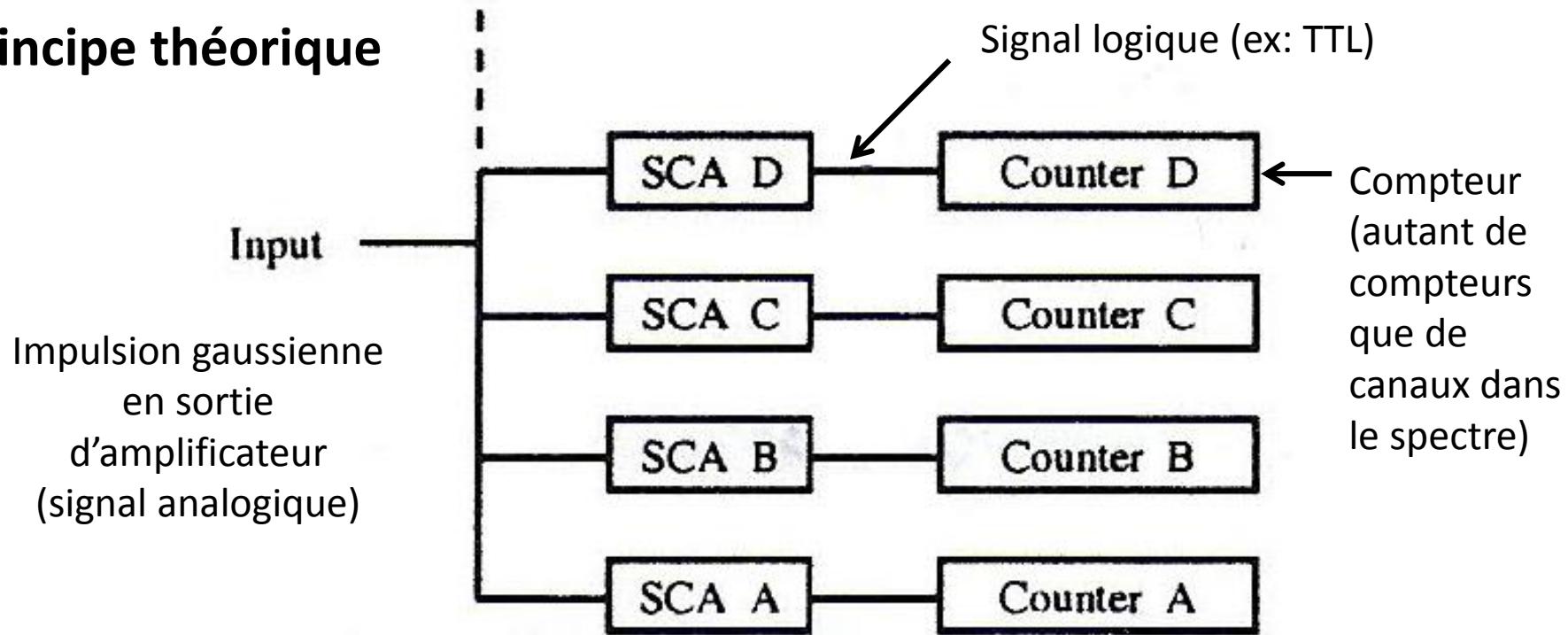


### Etapes dans le processing des impulsions



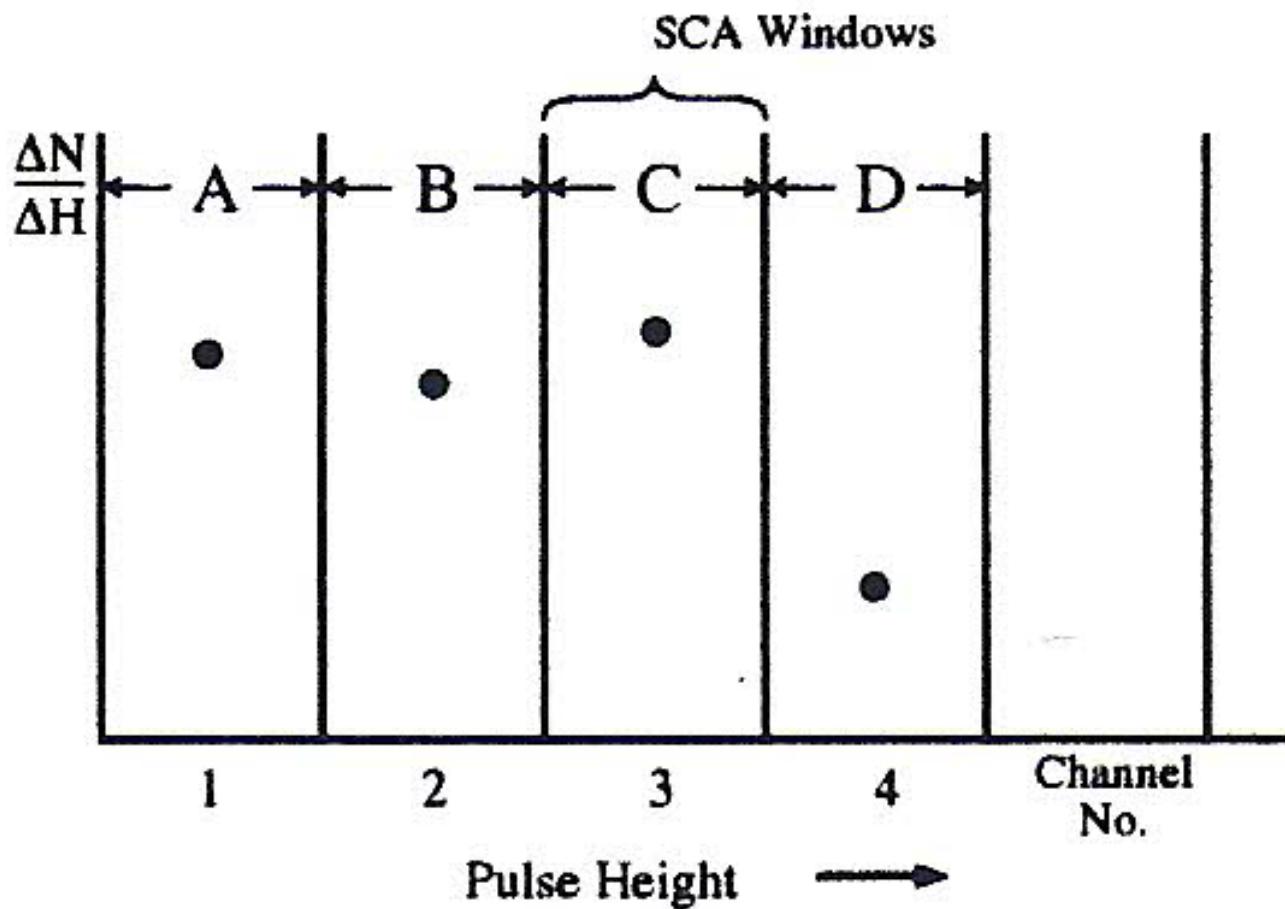
# L' Analyseur Multi-Canaux (MCA): mesure de la hauteur, digitalisation et comptage par canaux

## Principe théorique



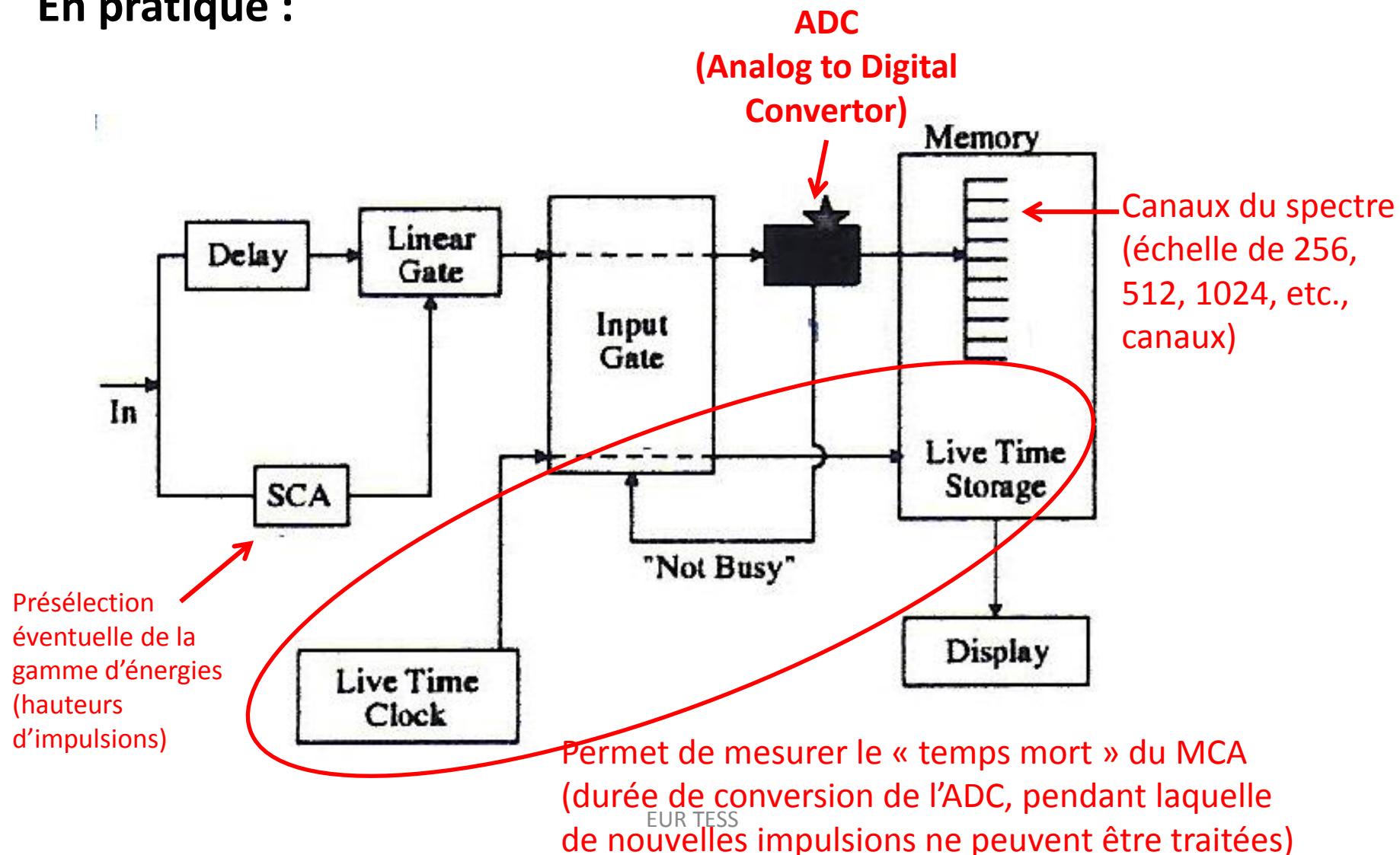
« Echelle » de « Single Channel Analyzers » (SCA, ou analyseur mono-canal) avec des fenêtres en amplitude différentes (fournissent un signal logique si la hauteur d'impulsion en entrée est comprise dans cette fenêtre)

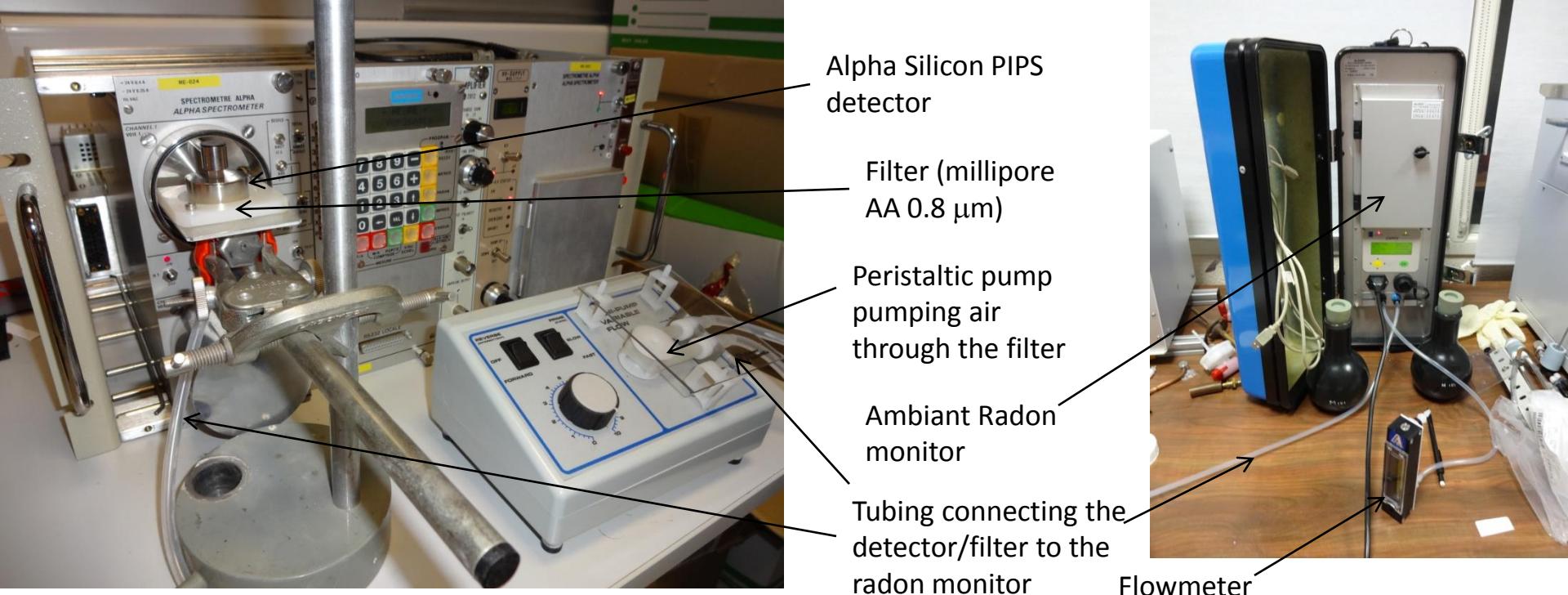
# L' Analyseur Multi-Canaux (MCA): mesure de la hauteur, digitalisation et comptage par canaux



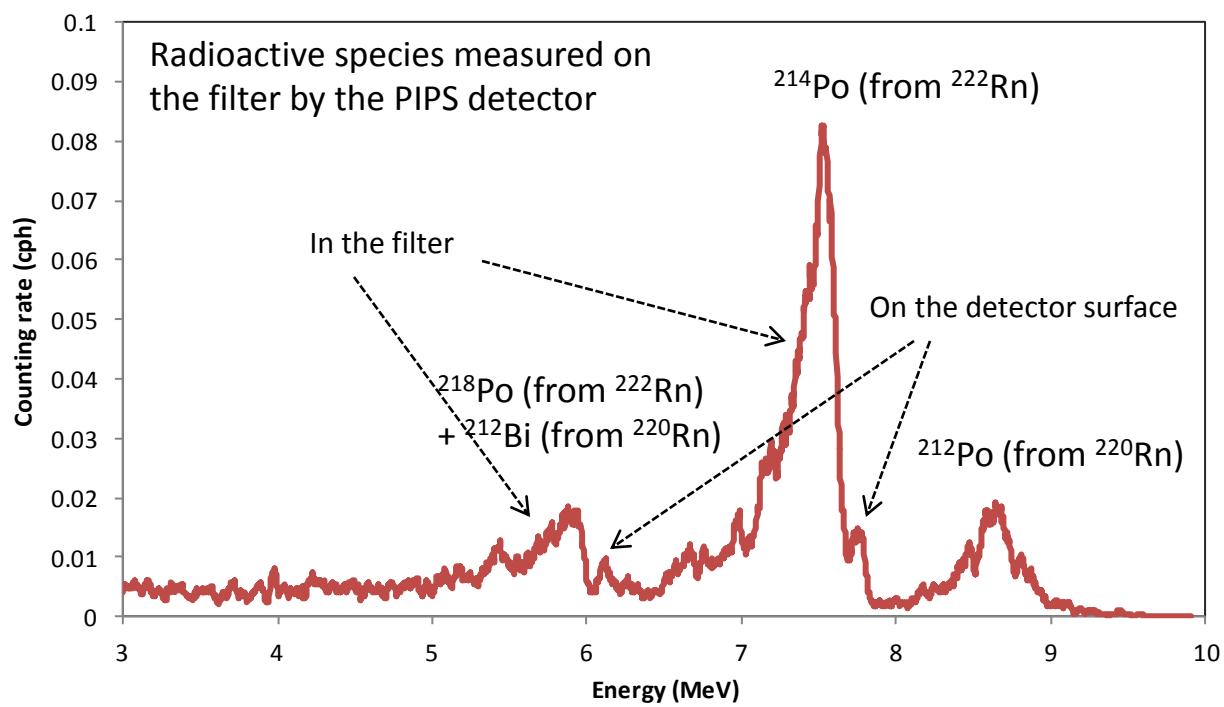
# L' Analyseur Multi-Canaux (MCA):

En pratique :





Radon ambient activity	$\sim 25 \text{ Bq.m}^{-3}$
Pump flow rate	30 mL/min

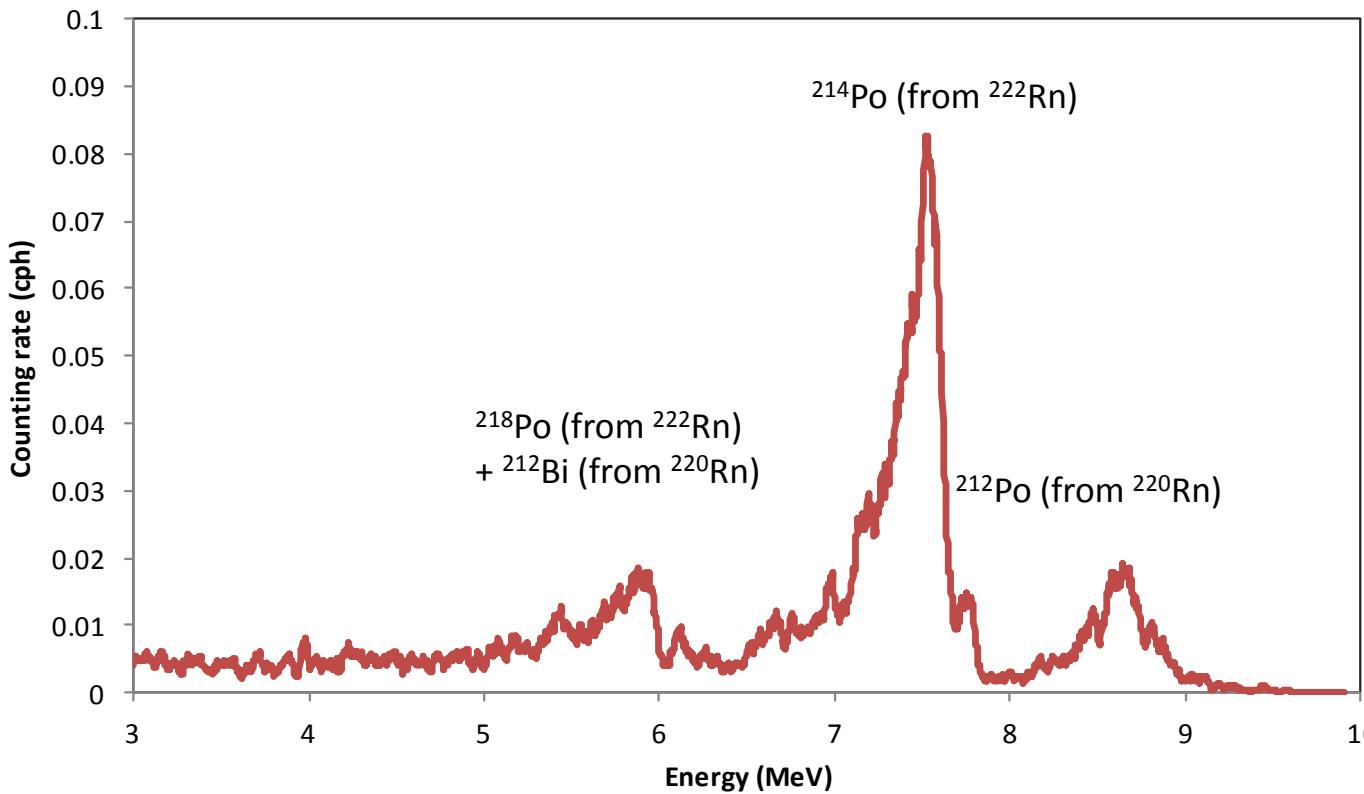


# Spectrométrie = mesure du nombre de particules incidentes par incrément d'énergie

⇒ Permet la mesure des activités et l'identification des radionucléides

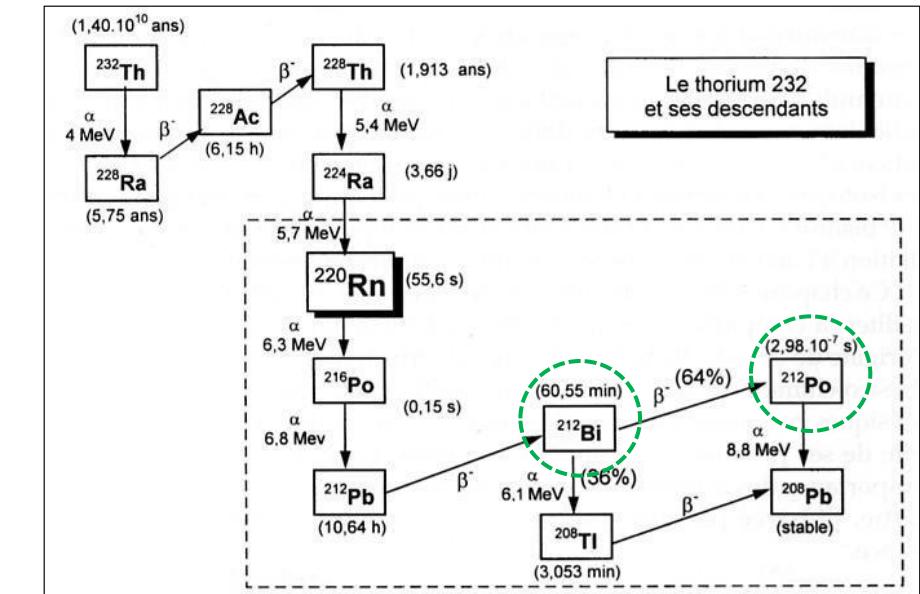
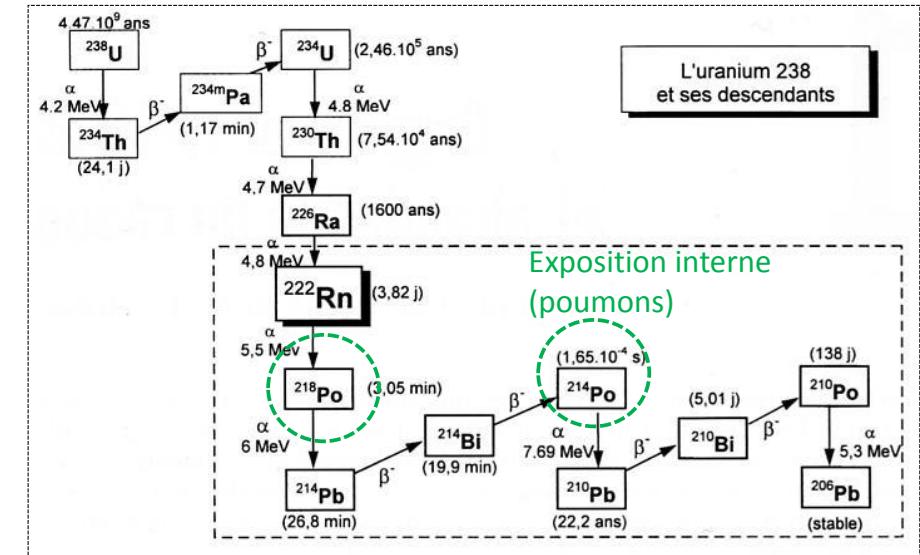
Taux de comptage

(Nombre d'impulsions par créneau d'énergie =  $dN/dE$ , ici par unité de temps)

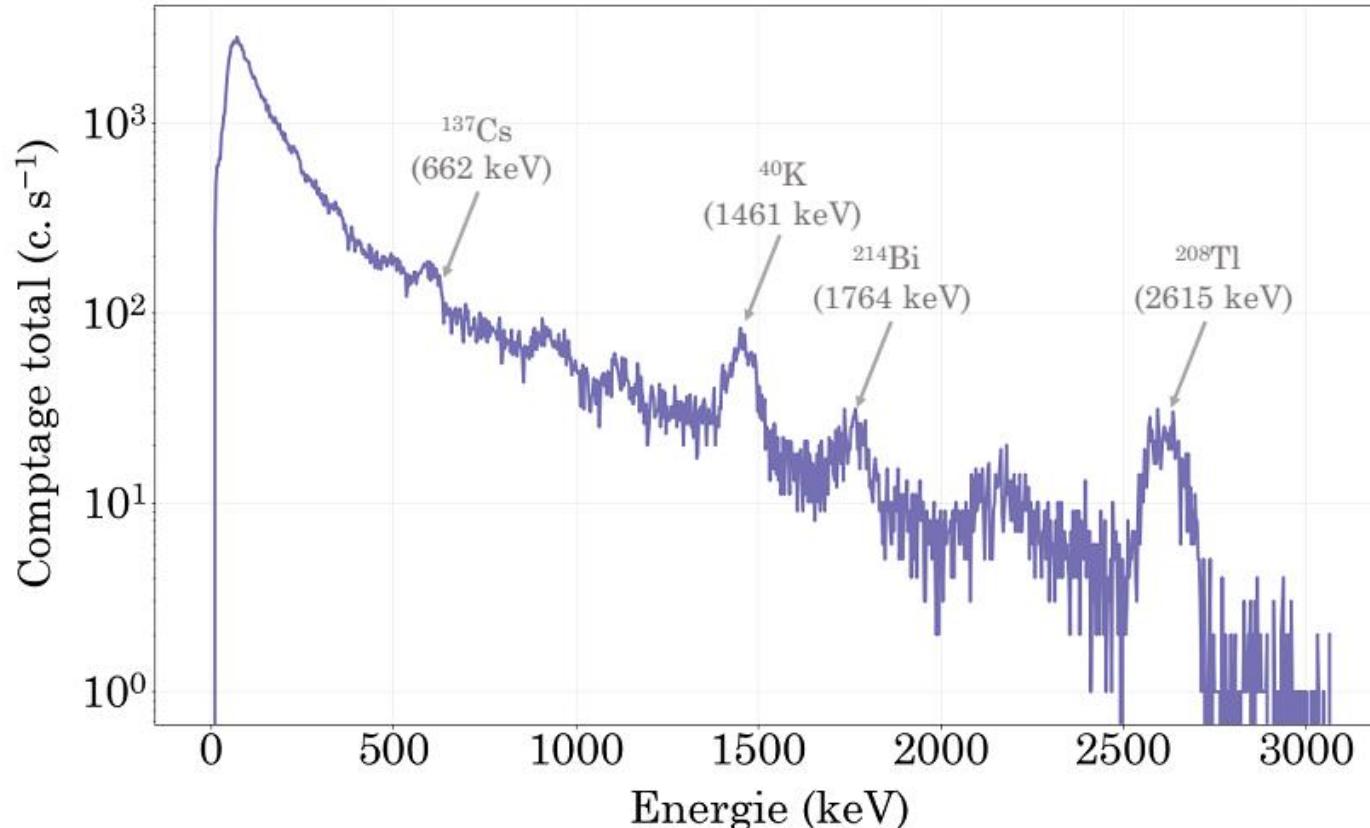


Spectre de particules alpha

EUR TESS

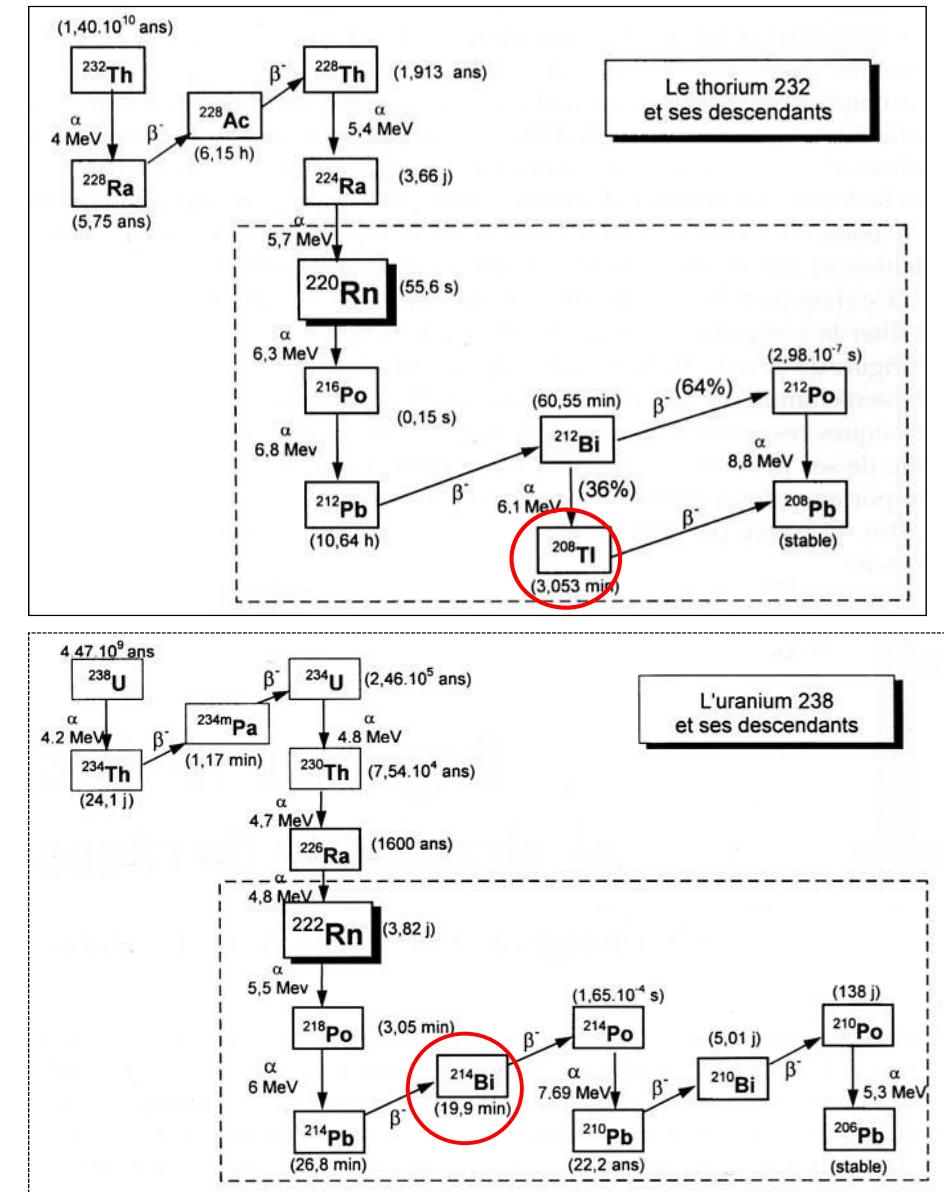


Spectrométrie = mesure du nombre de particules incidentes par incrément d'énergie  
 ⇒ Permet la mesure des activités et l'identification des radionucléides



Spectre de photons gamma

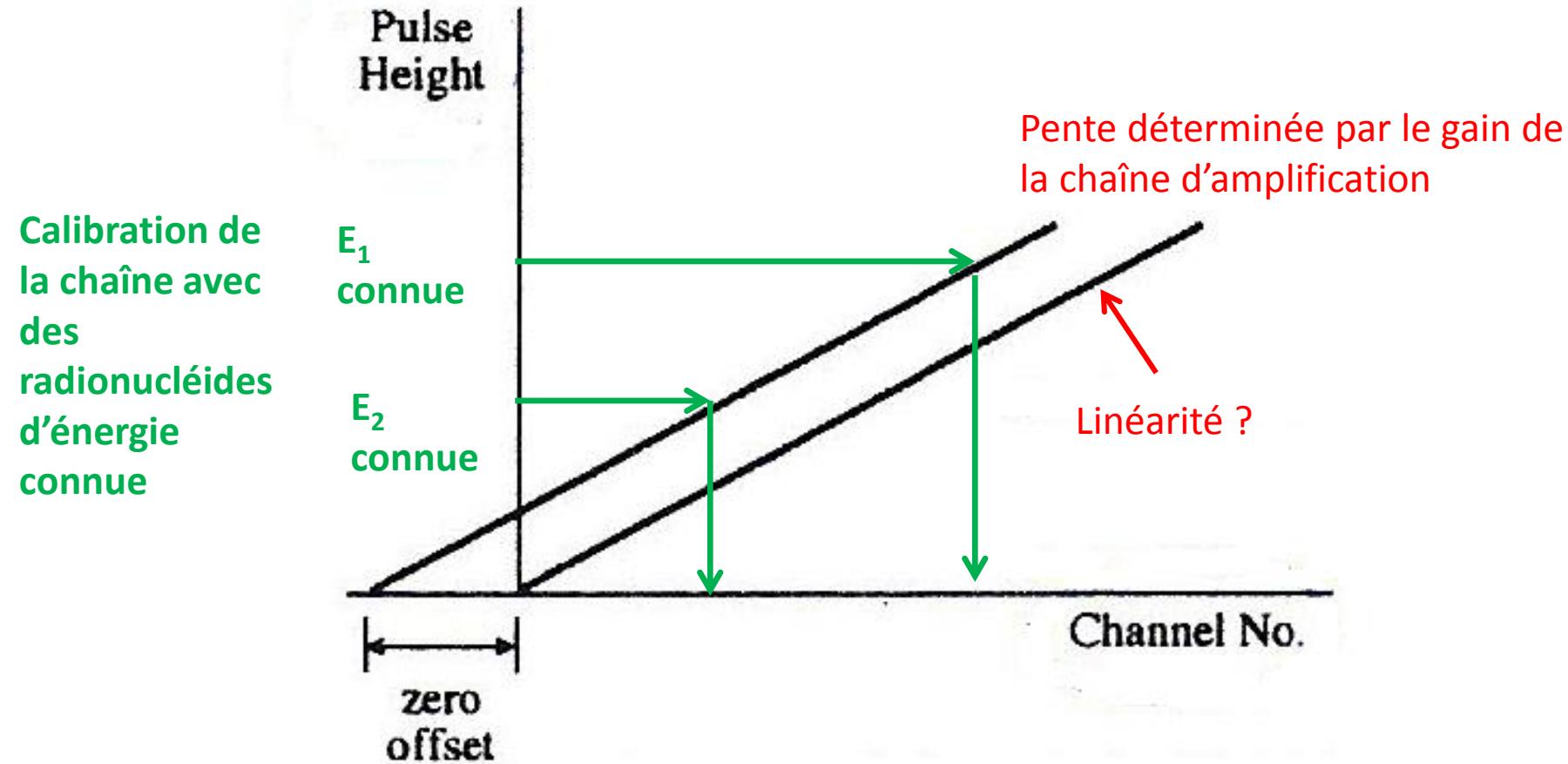
EUR TESS



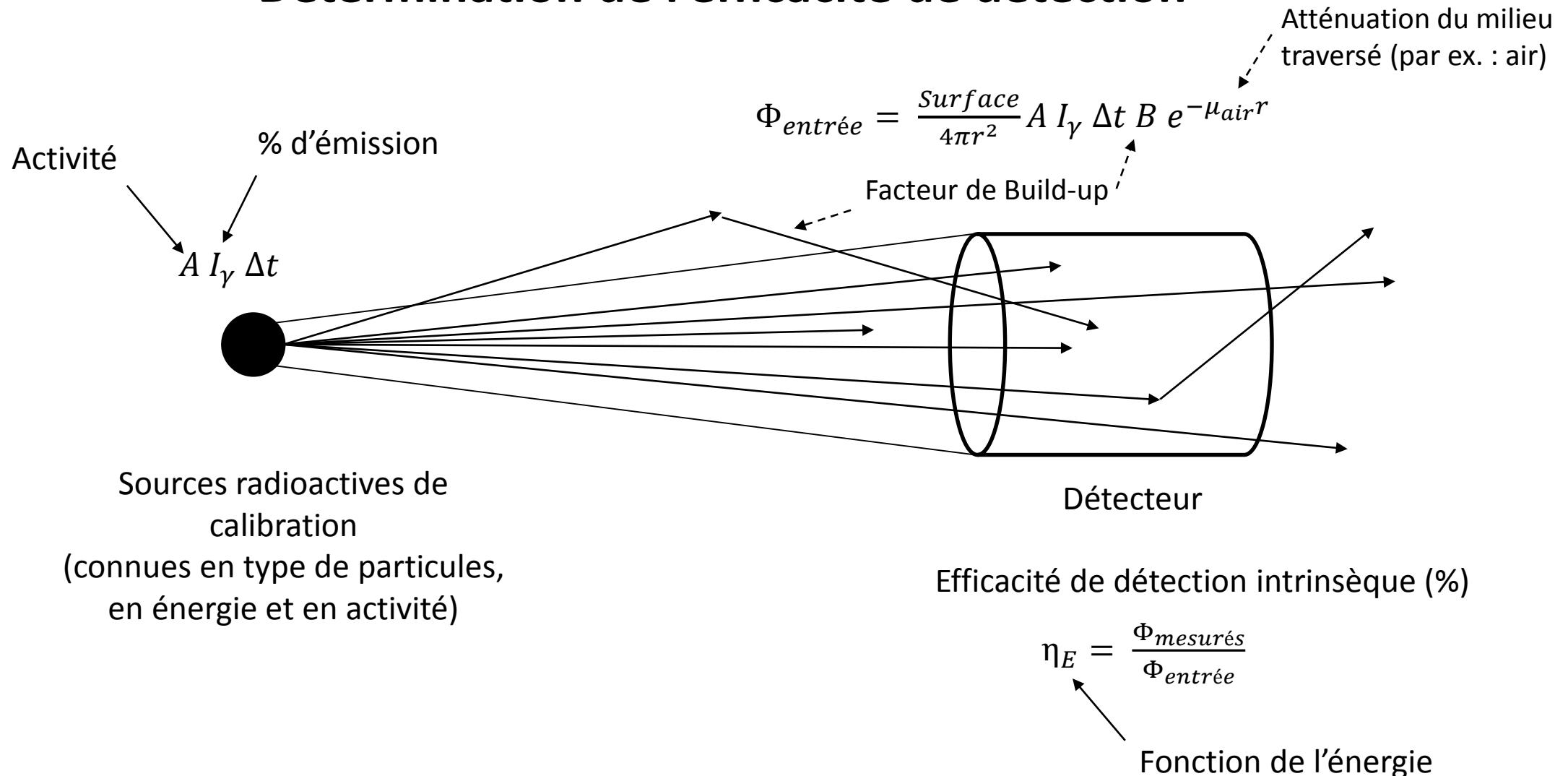
## Caractérisations des détecteurs et chaînes d'acquisition à effectuer

- Calibration en énergie
- Détermination de l'efficacité de détection (géométrique et intrinsèque), en fonction de l'énergie
- Caractérisation de la résolution en énergie
- Mesure du bruit de fond (ou mouvement propre)

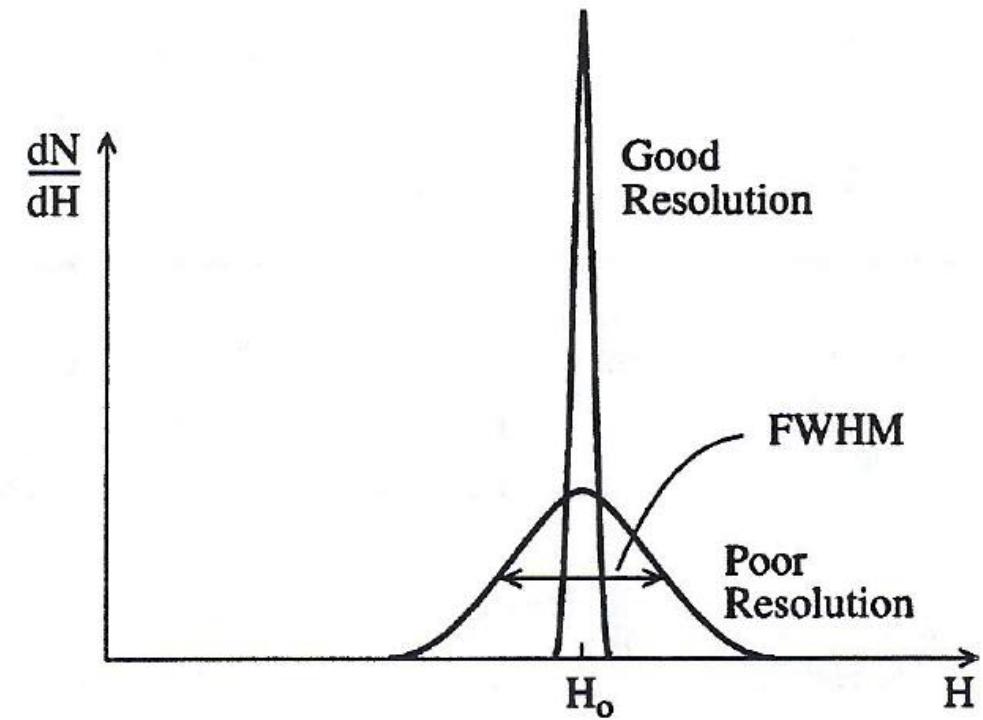
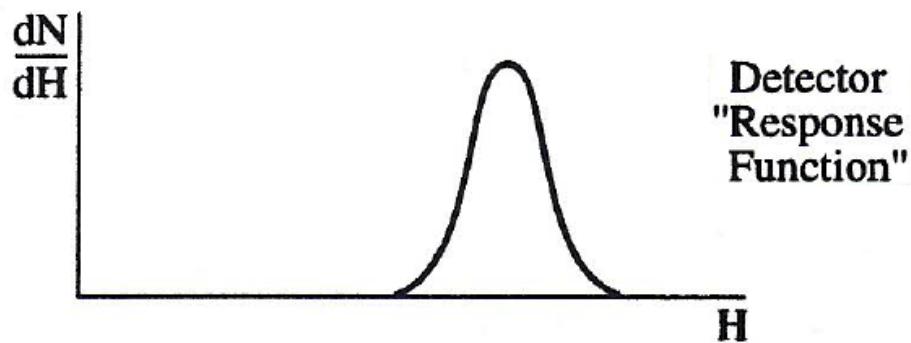
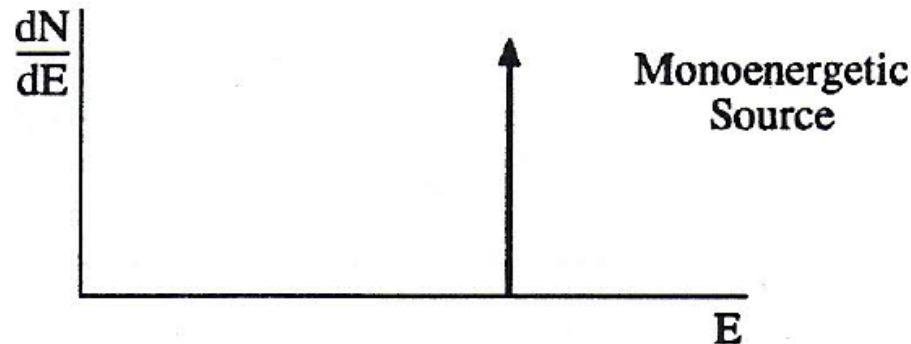
# Calibration en énergie : Relation Energie – Canal de l'Analyseur Multi-Canaux



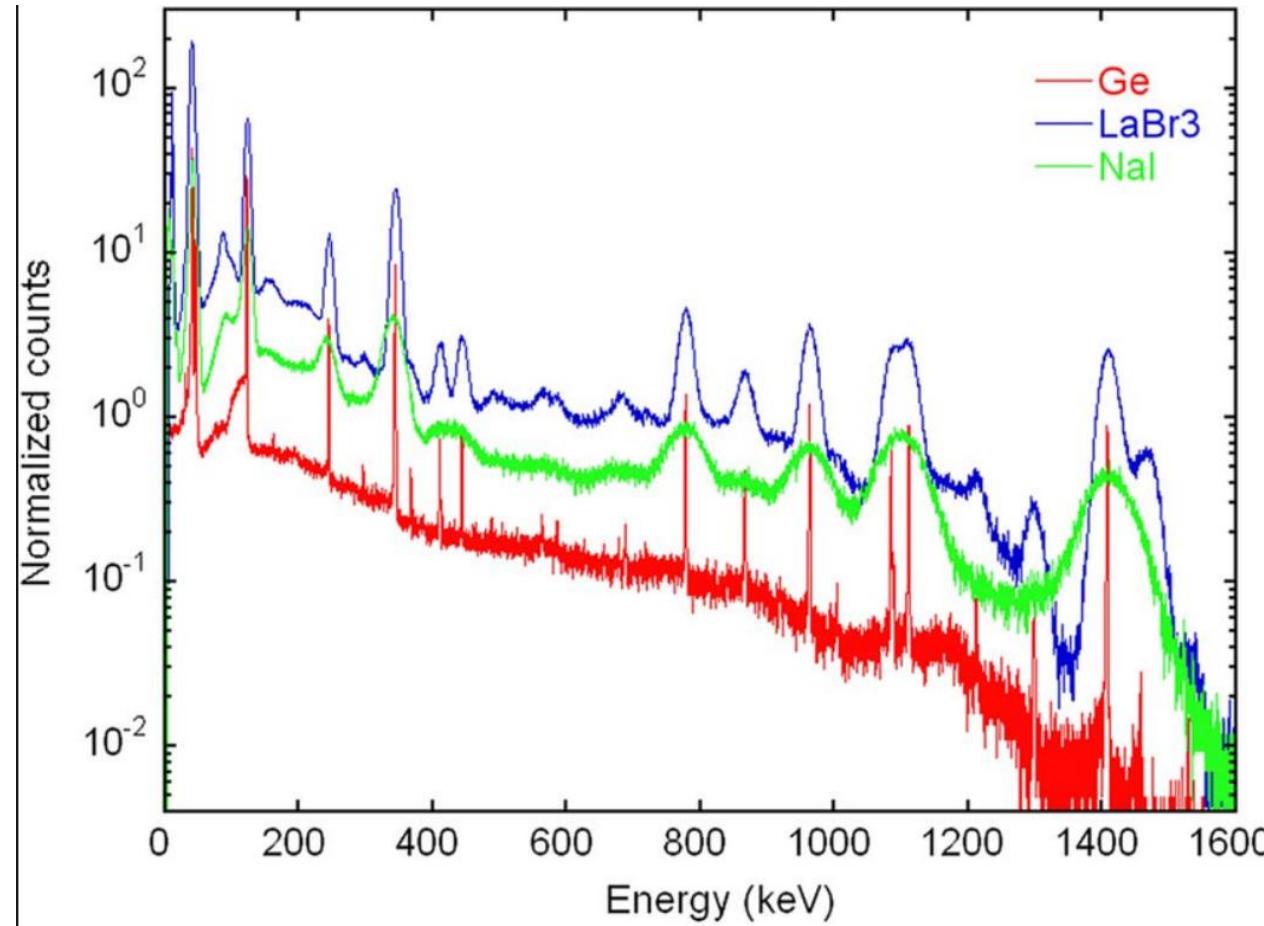
# Détermination de l'efficacité de détection



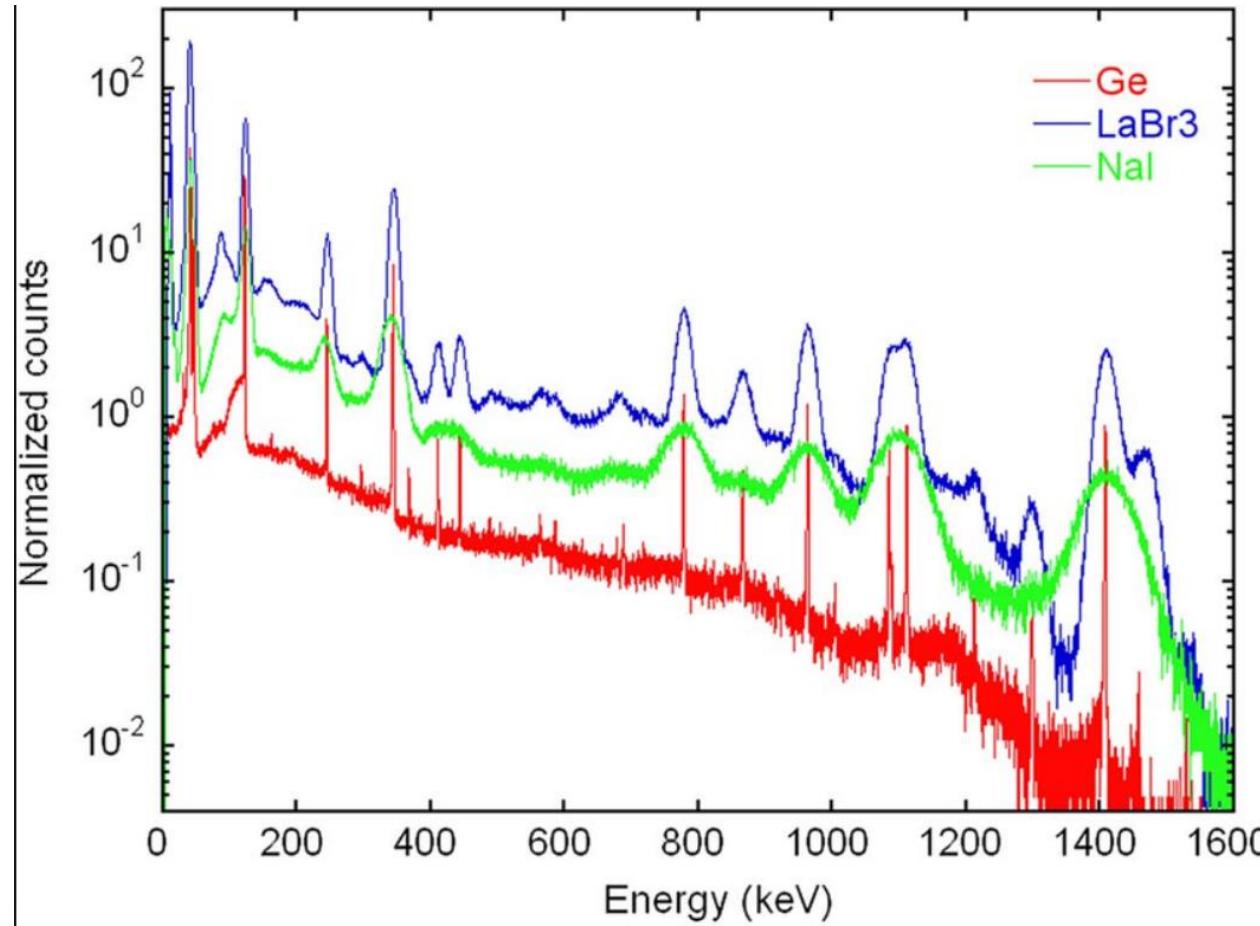
# Résolution en énergie



# Problèmes associés à une faible résolution en énergie ?

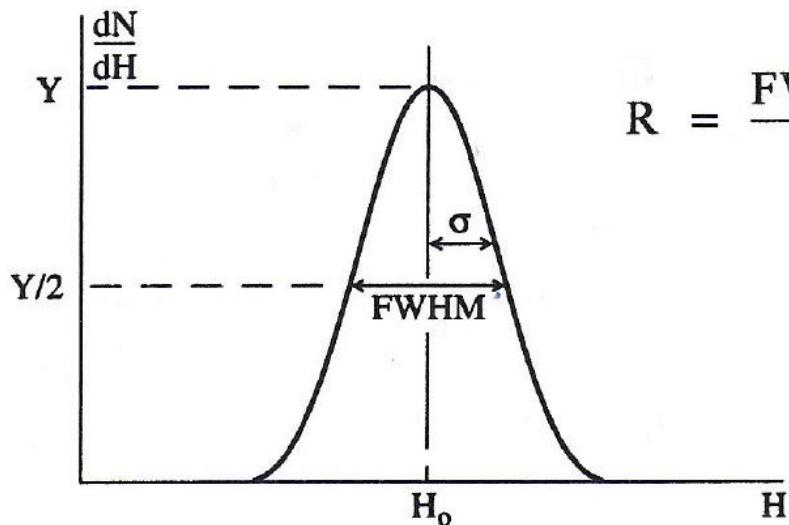


# Problèmes associés à une faible résolution en énergie ?



- Ambiguité sur l'identification des raies si interférences entre plusieurs pics
- Rapport Signal/Bruit dégradé

# Résolution en énergie (fonction de l'énergie)



$$R = \frac{\text{FWHM}}{H_0}$$

Gaussian:

$$y(H) = Y \cdot \exp\left[-\frac{(H-H_0)^2}{2\sigma^2}\right]$$

$$\text{FWHM} = 2.35\sigma$$

Exemples :

Si detector for  
5.49 MeV  $\alpha$

NaI(Tl) detector for  
0.662 MeV  $\gamma$

FWHM  
20 keV

45 keV

R  
0.36%

6.8%

Bonne  
résolution

Faible  
résolution

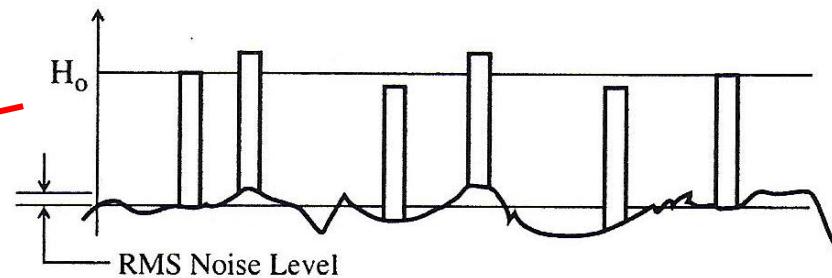
**FWHM = Full-Width at Half-Maximum**  
(Largeur à mi-hauteur)

$$(FWHM)^2 = (FWHM)_{drift}^2 +$$

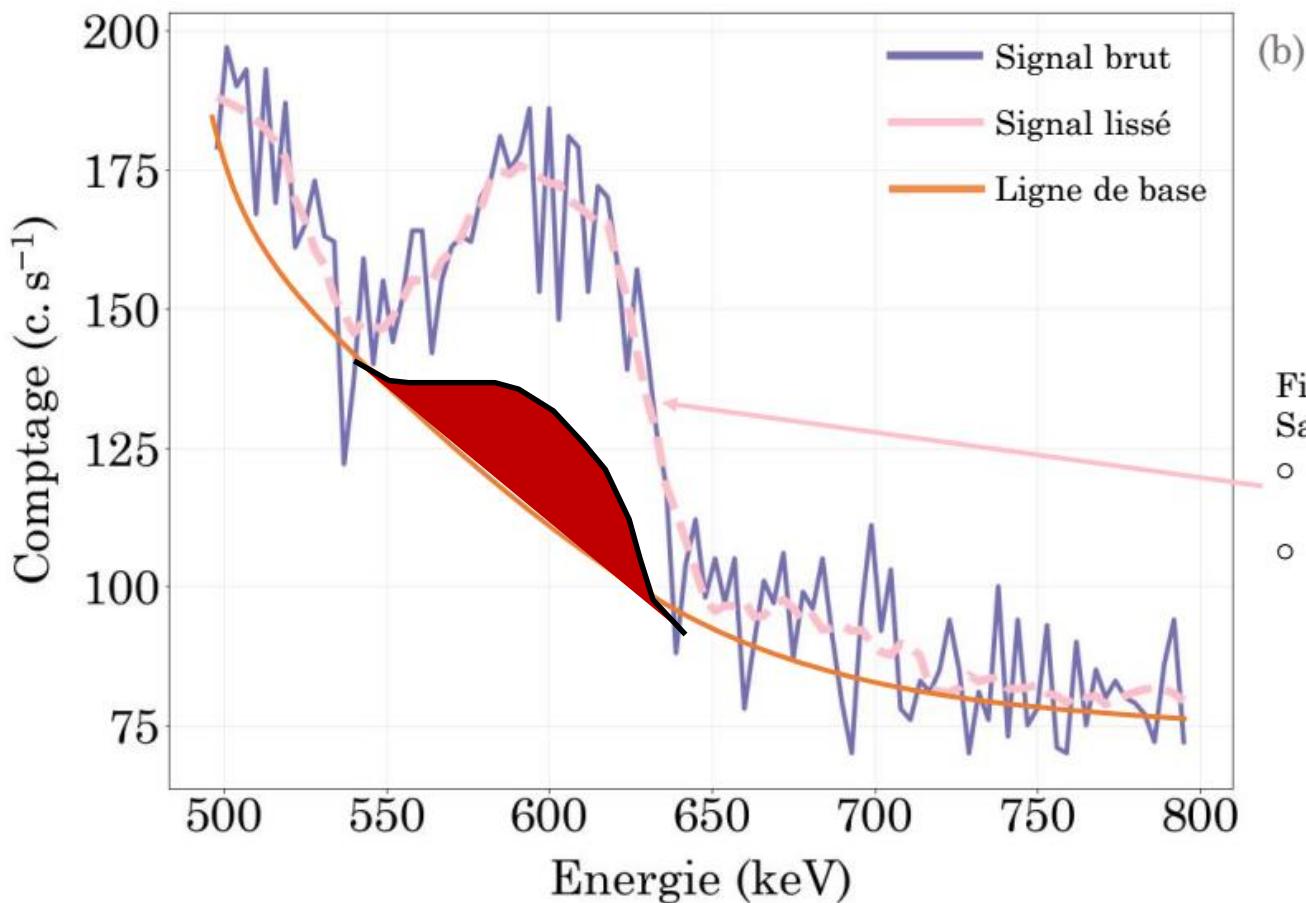
$$(FWHM)_{noise}^2 +$$

$$(FWHM)_{stat}^2 + \dots$$

Intrinsèque au type de détecteur  
(énergie nécessaire pour créer  
des porteurs de charge dans le  
détecteur)



# Mesure du bruit de fond (à soustraire)

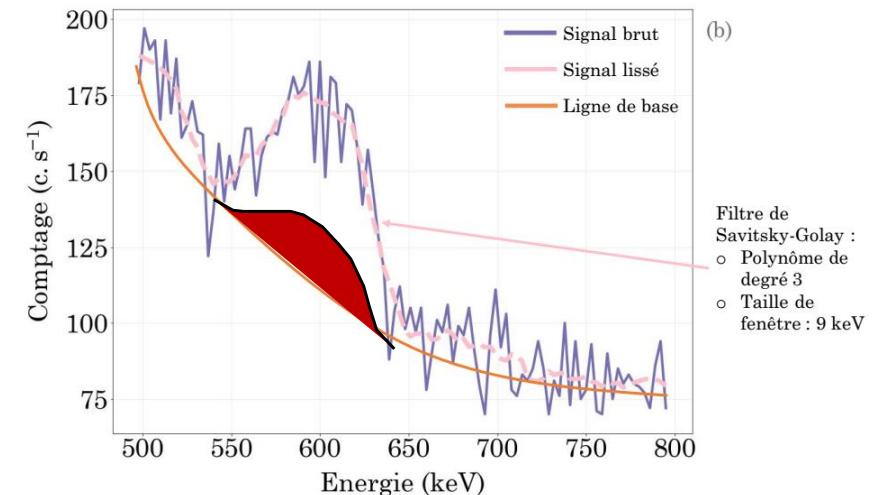
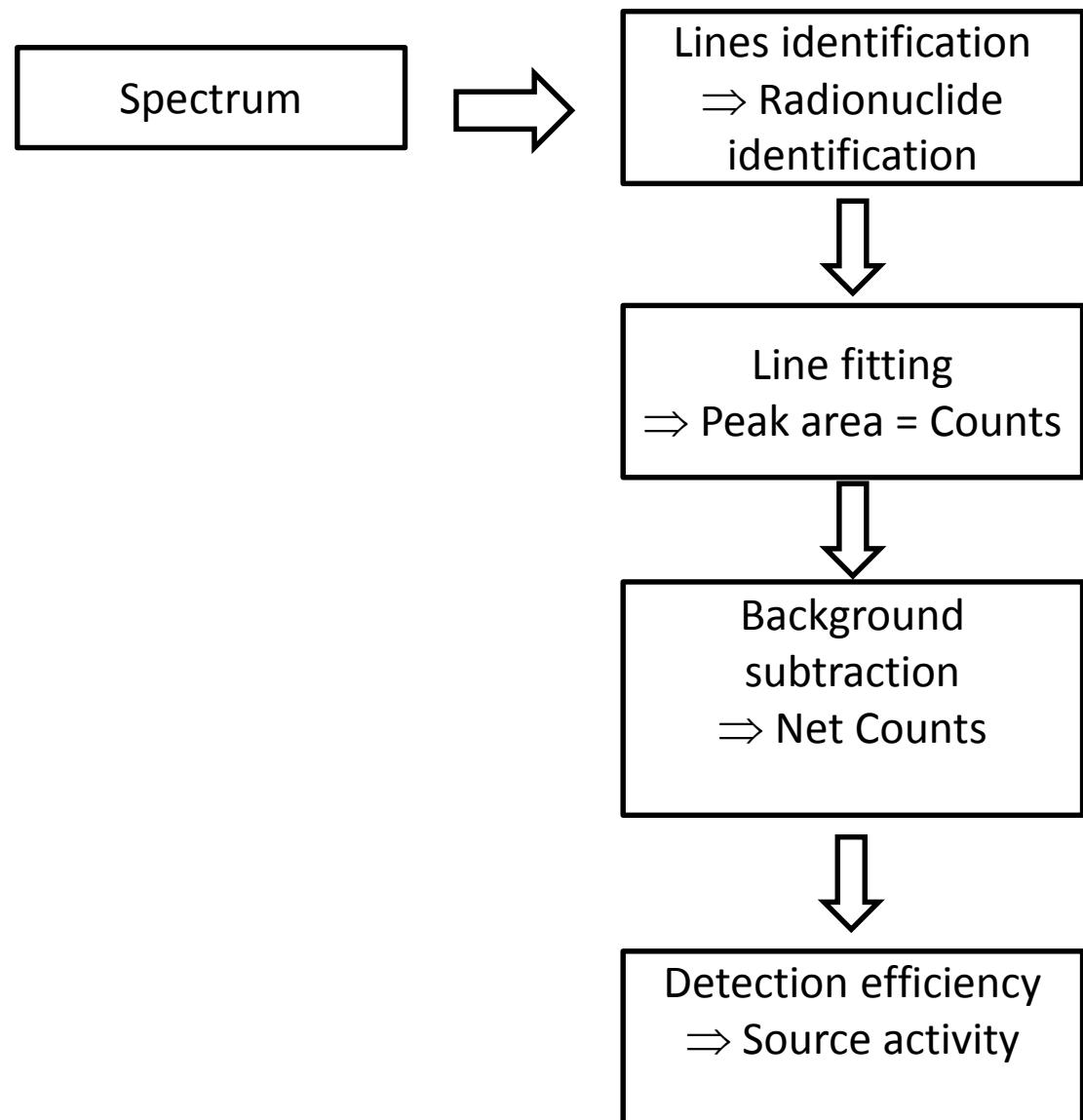


- Soustraction de la ligne de base
- ↓
- Peut être réduit par mesures souterraines (muons ↘)
- Soustraction du bruit de fond lié à la présence du même radionucléide dans l'environnement de mesure (≠ échantillons à mesurer)
- ↓

Peut être réduit par château de plomb



# Signal Processing



Comptage brut =  $N$  impulsions  
Incertitude  $\sigma_{\text{brut}} = \sqrt{N}$

(si loi de Poisson vérifiée)

Comptage net =  $N - N_B$   
Incertitude  $\sigma_{\text{net}} = \sqrt{N + N_B}$

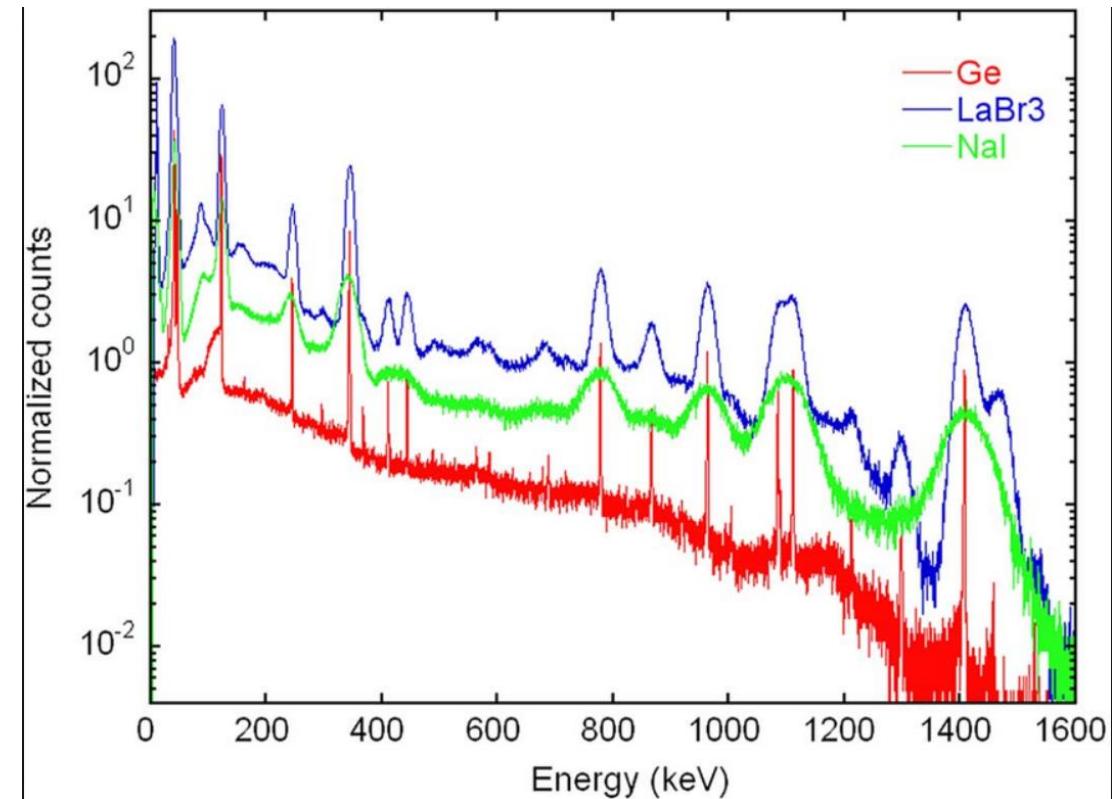
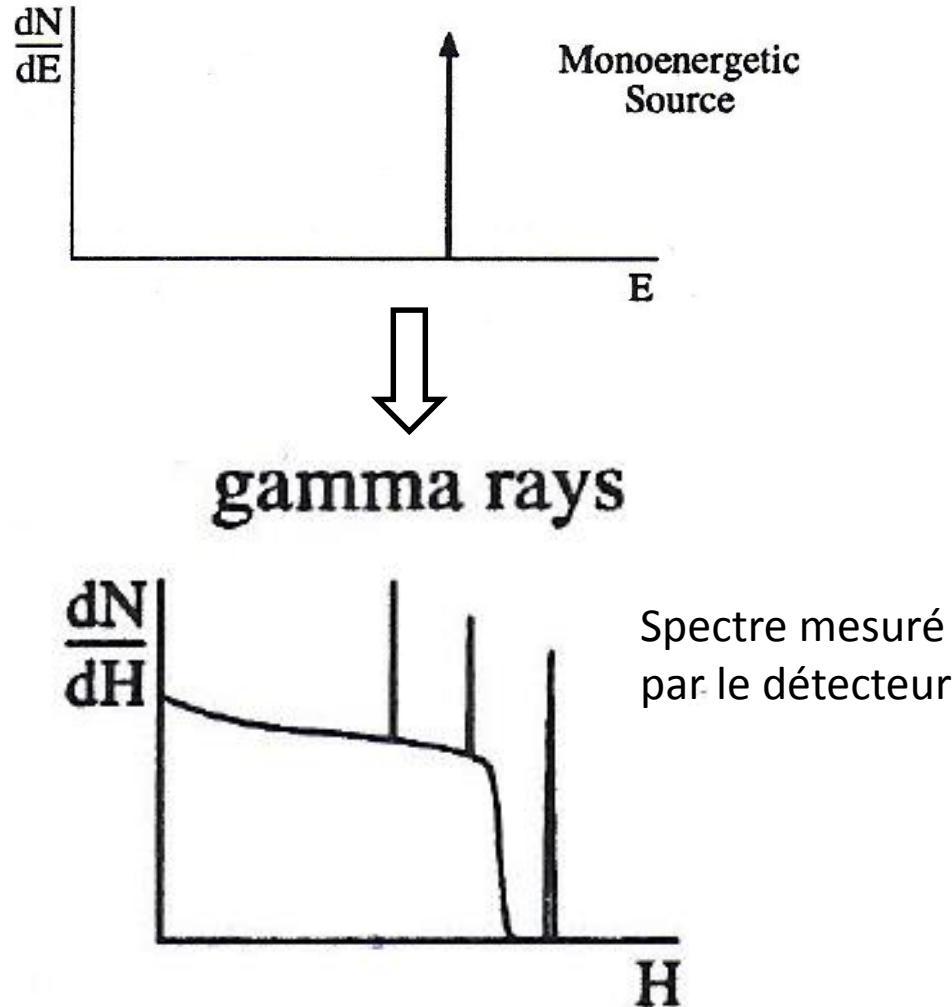
La désintégration nucléaire se modélise statistiquement par une loi de Poisson si la probabilité  $dp = \lambda dt$  pour qu'un nucléide se désintègre dans un intervalle de temps  $dt$  est :

- 1<sup>e</sup>) indépendante du temps  $t$  (non vieillissement des nucléides)
- 2<sup>e</sup>) indépendante des désintégrations des autres noyaux
- 3<sup>e</sup>) la même pour tous les noyaux.

Et 4<sup>e</sup>) si le nombre  $m$  de désintégrations produites pendant la durée  $\Delta t$  est très inférieur au nombre de radionucléides  $N_0$  initialement présents

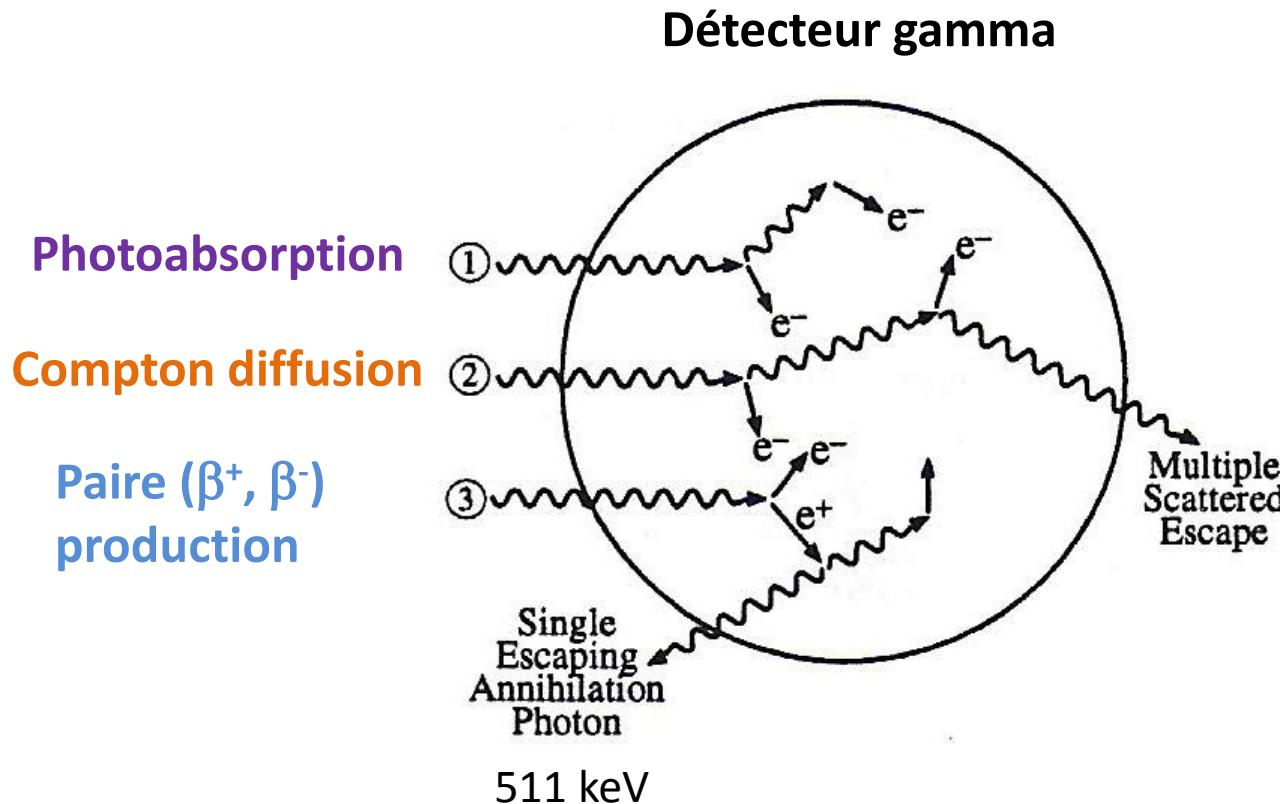
# Réponses instrumentales typiques (liées à la physique de l'interaction au sein du détecteur)

Energie mesurée = Energie déposée dans le détecteur  
(pas toujours = Energie de la particule)



# Réponses instrumentales typiques (liées à la physique de l'interaction au sein du détecteur)

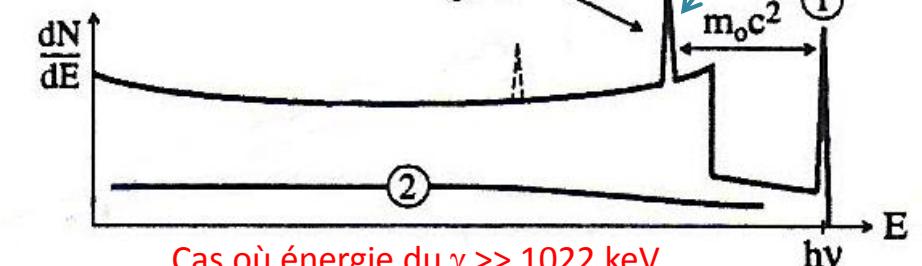
Rappel : Photons X, gamma = Rayonnements indirectement ionisants  $\Rightarrow$  Interactions aléatoires



Energie déposée  $\neq$   
Energie du photon

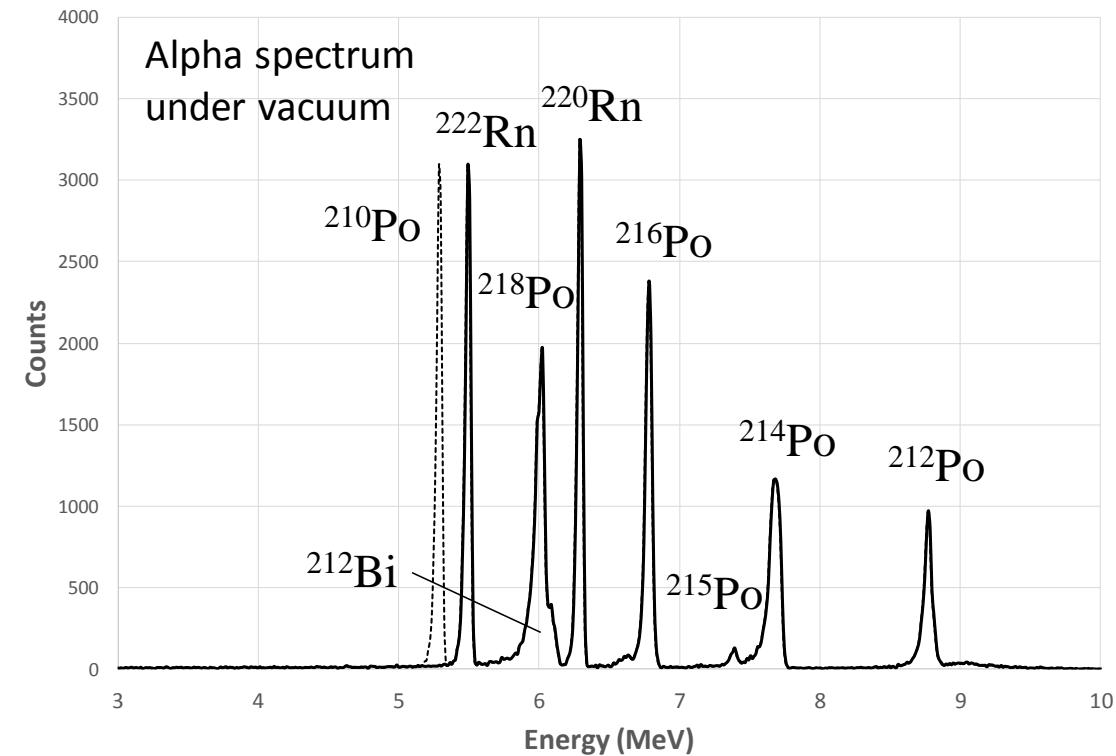
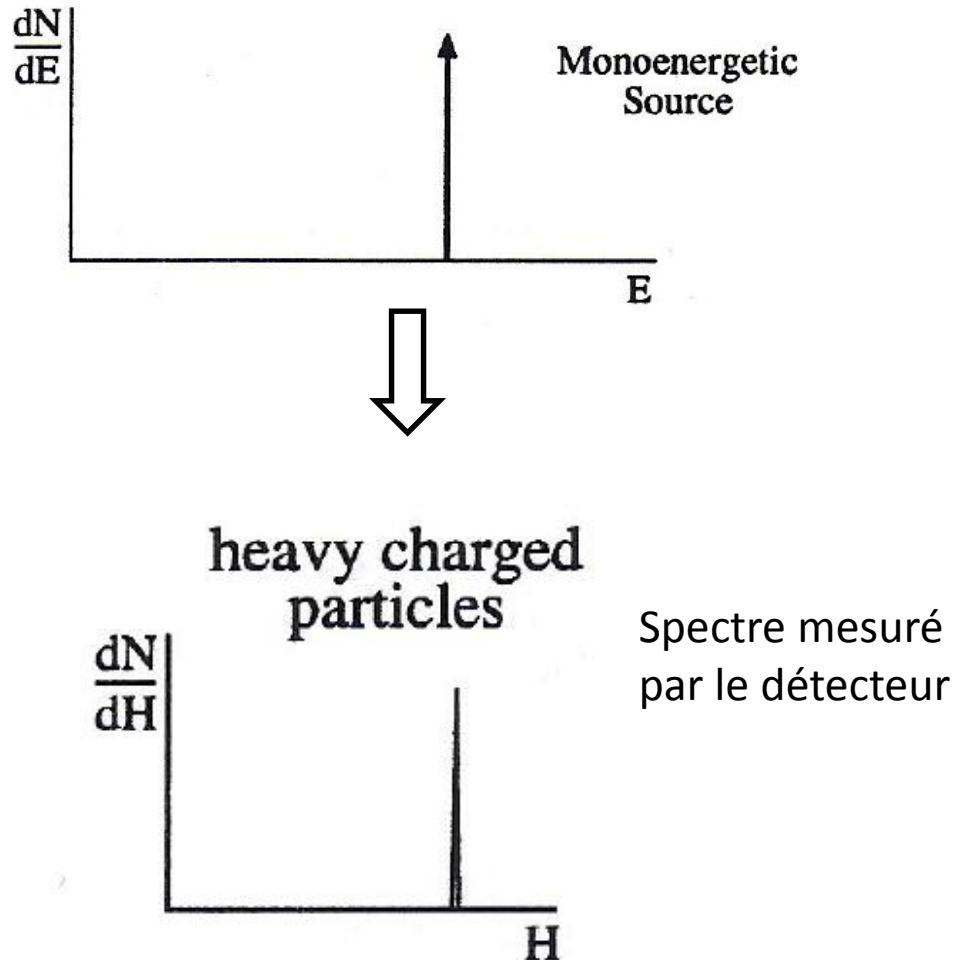
Energie déposée =  
Energie du photon

Energie déposée  $\neq$   
Energie du photon

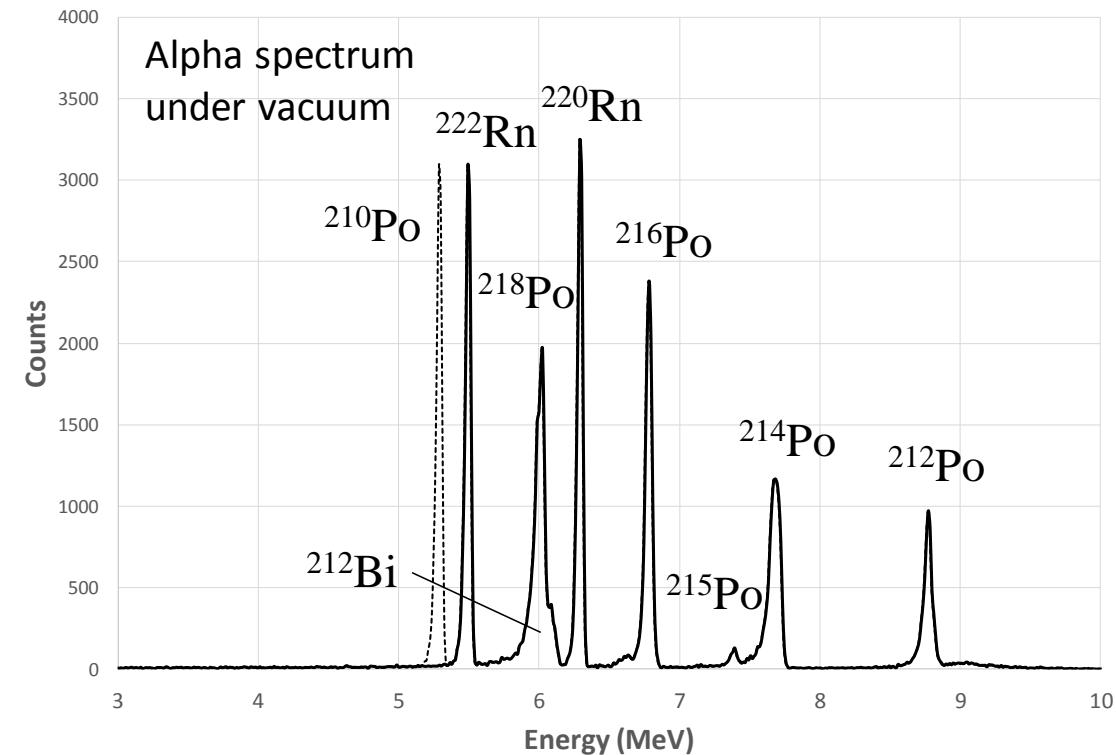
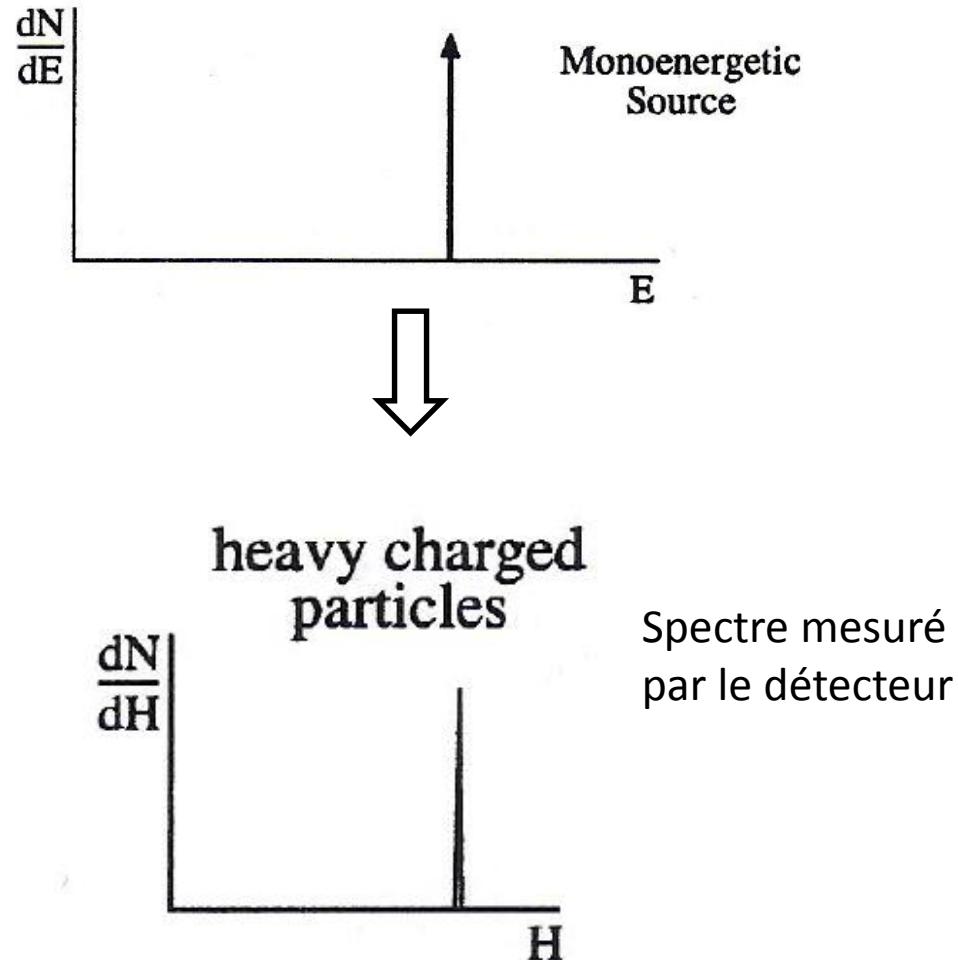


Spectre de photon haute énergie

# Réponses instrumentales typiques (liées à la physique de l'interaction au sein du détecteur)

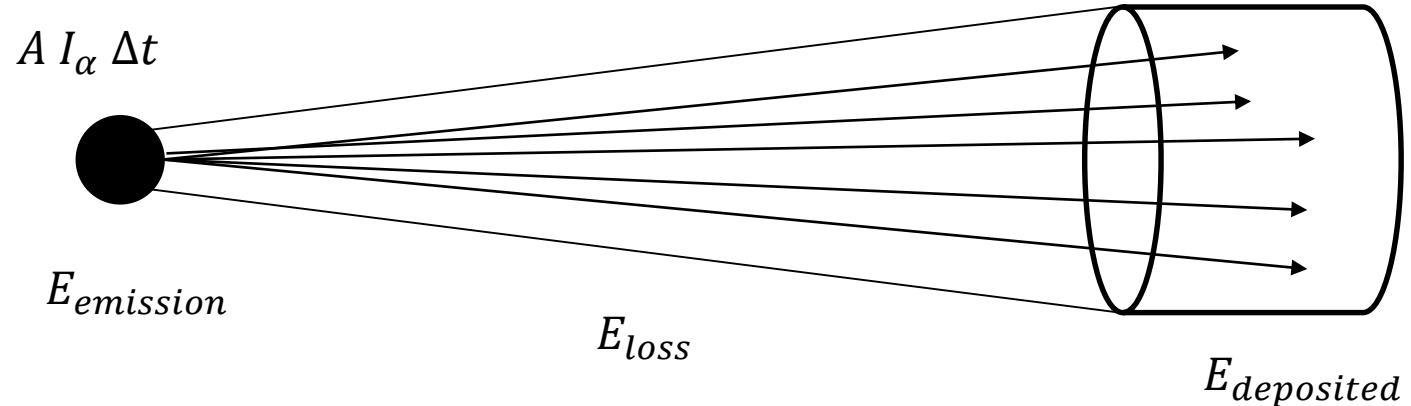
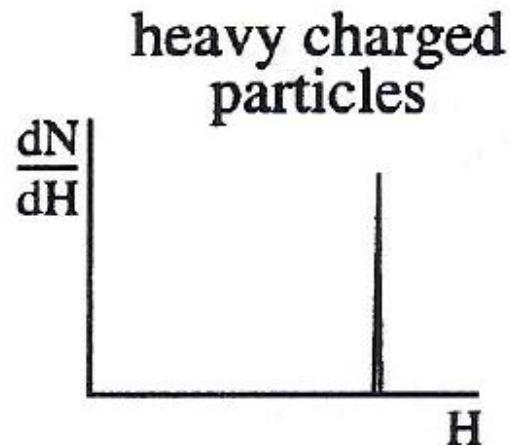


# Réponses instrumentales typiques (liées à la physique de l'interaction au sein du détecteur)



# Réponses instrumentales typiques (liées à la physique de l'interaction au sein du détecteur)

Rappel : Particules chargées = Rayonnements directement ionisants  $\Rightarrow$  Interactions à coup sûr



Energie mesurée = Energie déposée dans le détecteur  
= (Energie d'émission – Energie cédée au milieu traversé) si  
détecteur suffisamment épais

# Principales catégories de détecteurs de RI

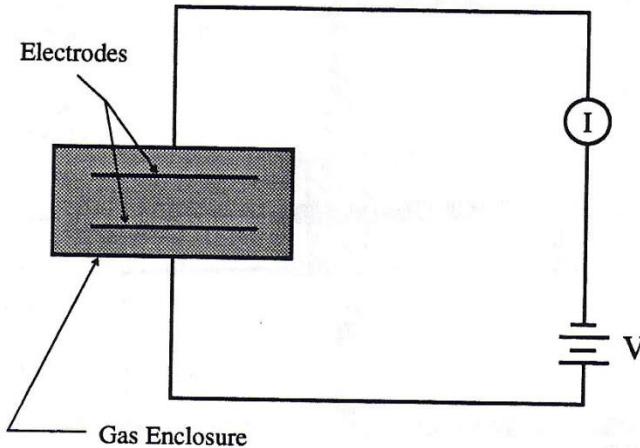
- (1) DéTECTEURS à gaz
- (2) Scintillateurs
- (3) Semiconducteurs

# (1) DéTECTEURS à gaz

- Chambres d'ionisation (→ inspection)
- Compteurs proportionnels (→ spectrométrie)
- Compteurs Geiger-Müller (→ inspection)

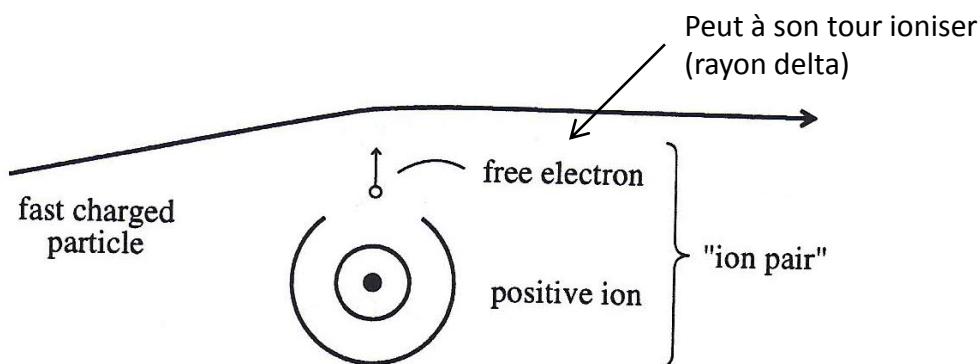
# Chambres d'ionisation

## ■ Principe :



Le plus souvent utilisées  
en mode « courant »

## ■ Processus d'ionisation :



Valeurs de  $W$  typiques (eV/paire)  
(faible dépendance du gaz et du RI)

	electrons	protons	alphas
Air	33.8	35.2	35.1
Ar	26.4	26.7	26.3
CO <sub>2</sub>	33.0	34.4	34.2

$W$  = Energie moyenne perdue par la particule pour créer une paire électron-ion  
( $\neq$  énergie d'ionisation du gaz, car d'autres processus d'excitation existent)  
(plus  $W$  est petit, plus il y a de porteurs de charge produits) UR TESS

1 MeV  $\rightarrow \sim 30000$  paires 29

# Chambres d'ionisation

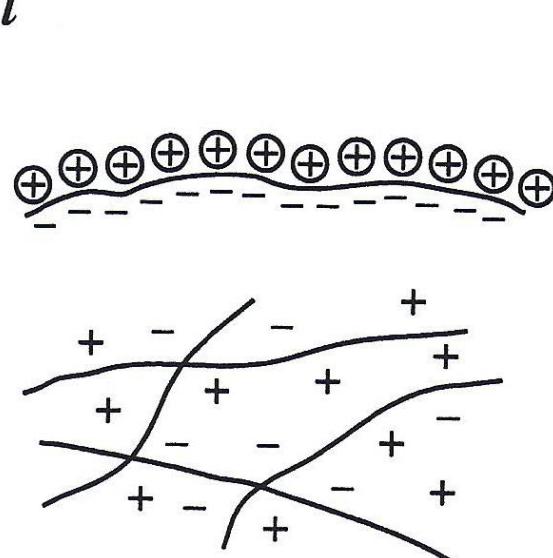
- Migrations, collecte des charges, recombinaisons

Taux de recombinaisons :

$$\frac{dn}{dt} = -\alpha \cdot n^+ \cdot n^-$$

COLUMNAR:  
(along individual particle track)

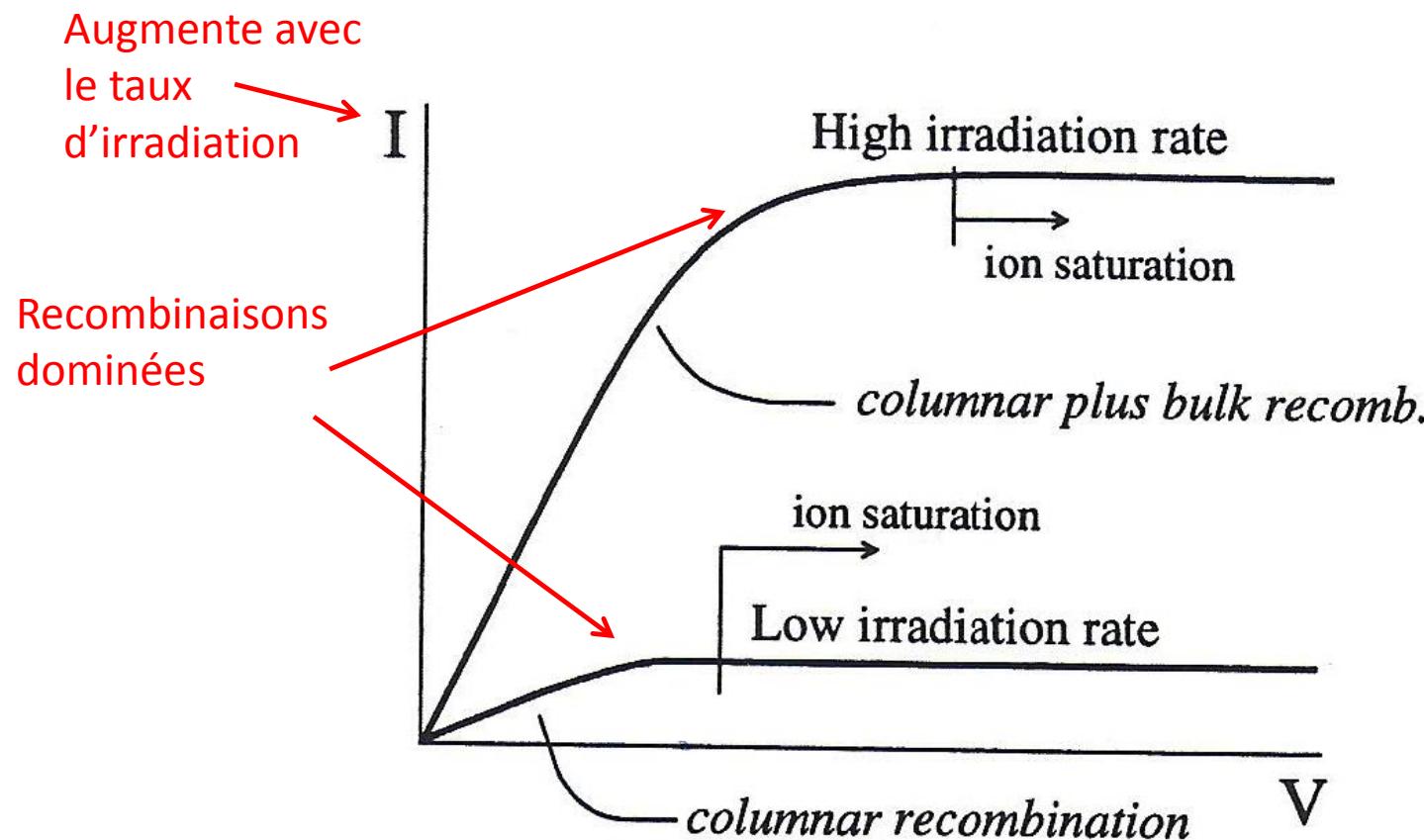
BULK:  
(ions and/or electrons from independent tracks)



Pour collecter les charges et vaincre les recombinaisons, on applique un champ électrique

# Chambres d'ionisation

- Courbe Caractéristique Courant (collecté) – Tension (champ électrique appliqué) :



# Compteurs proportionnels

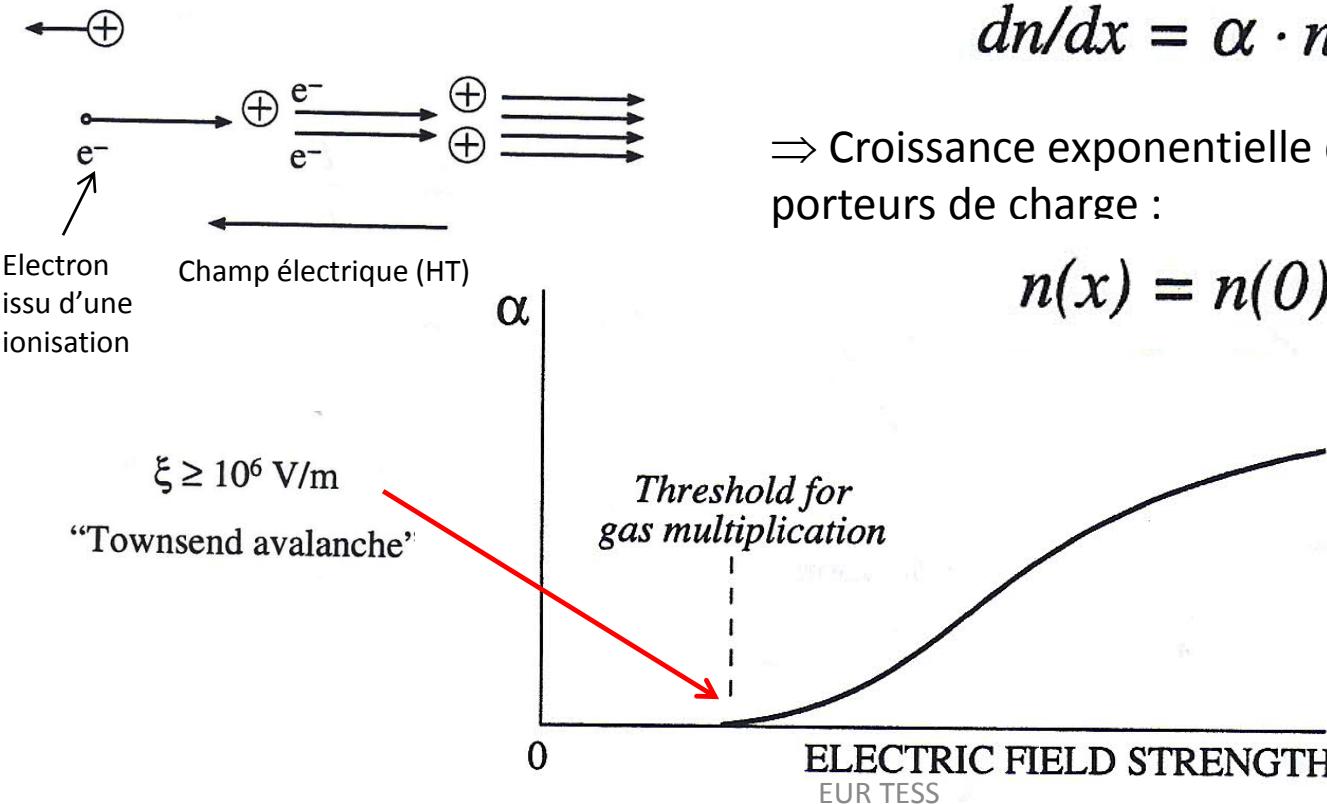
- Processus de multiplication des charges par application d'une haute tension et avalanche de Townsend  $\Rightarrow$  nombre de porteurs de charge  $\gg$  chambres d'ionisation  $\Rightarrow$  pulses de plus grande amplitude  $\Rightarrow$  mode impulsionnel plus aisé
- Utilisation fréquente pour spectro rayons X de faible énergie et détection de neutrons.

Equation d'amplification de Townsend :

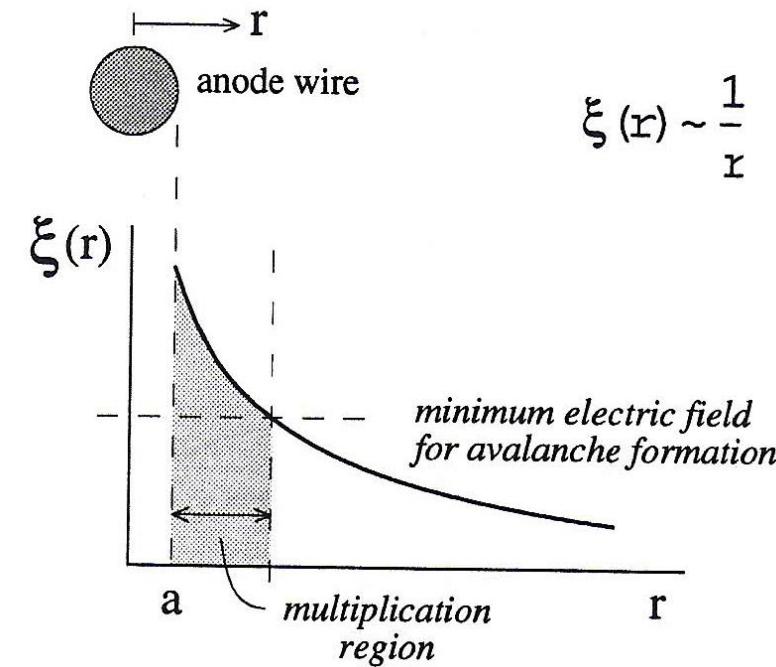
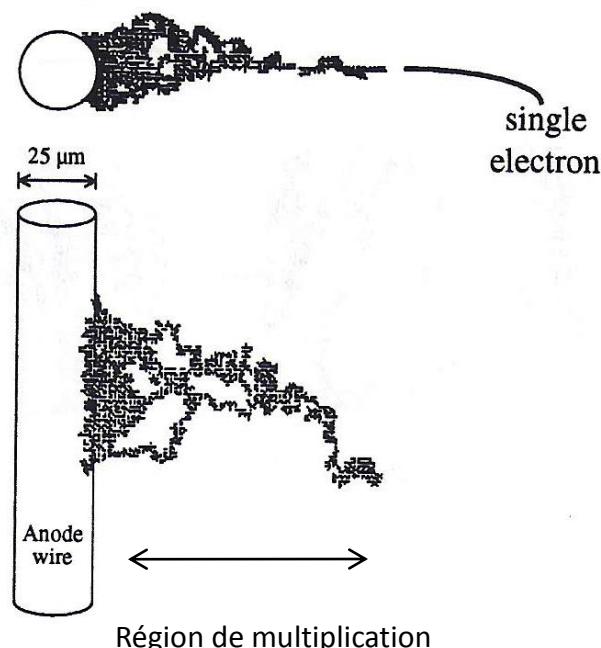
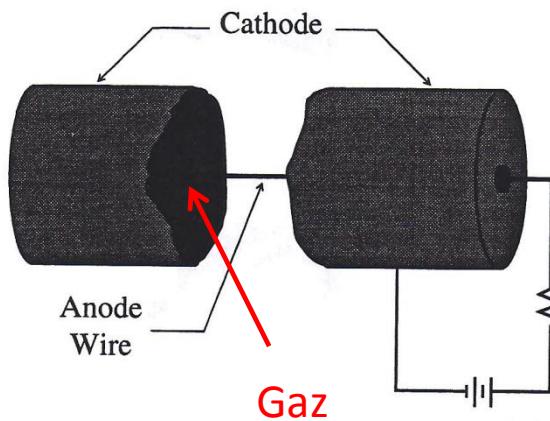
$$dn/dx = \alpha \cdot n$$

$\Rightarrow$  Croissance exponentielle du nombre de porteurs de charge :

$$n(x) = n(0) e^{\alpha x}$$



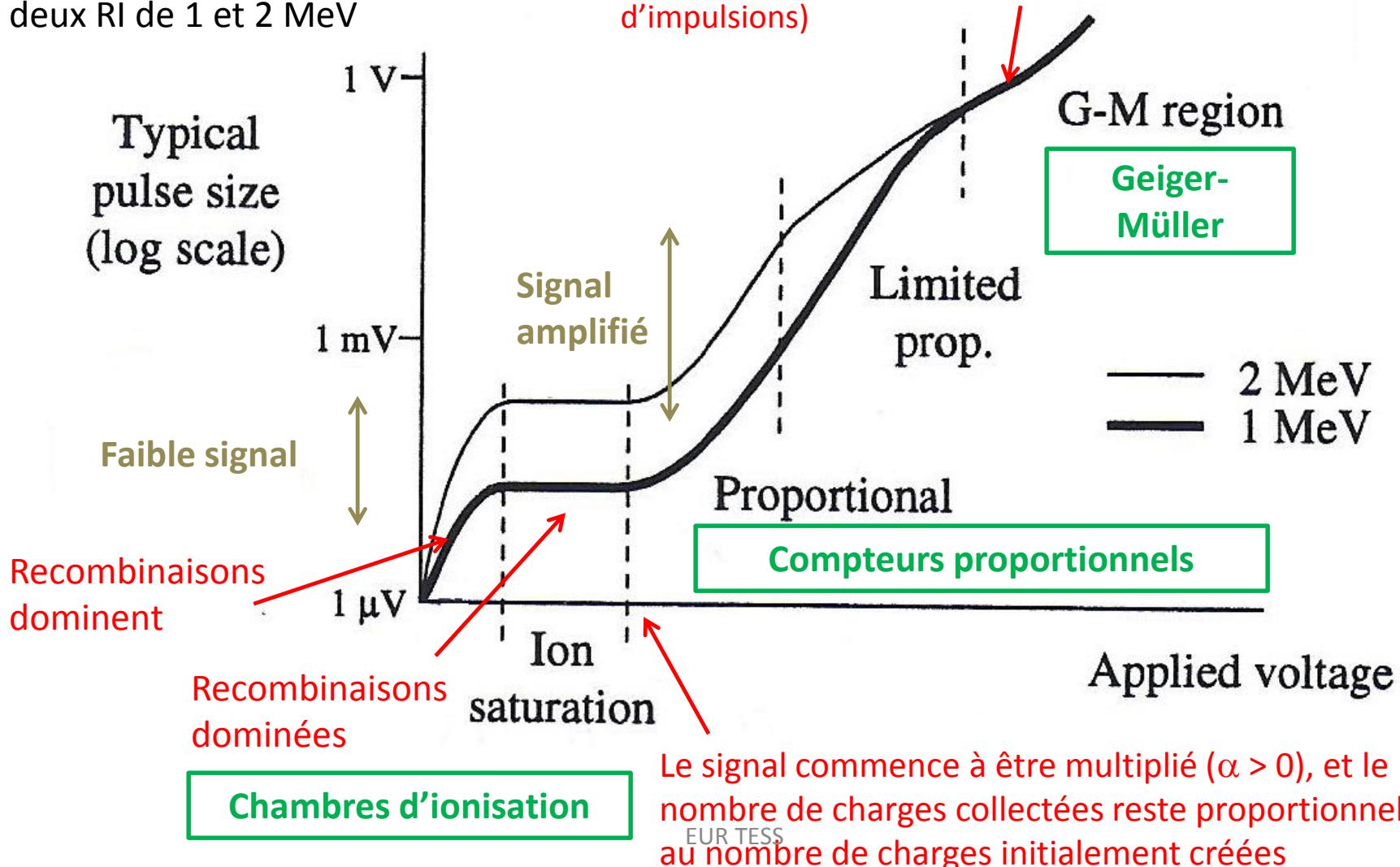
# Compteurs proportionnels



# Compteurs proportionnels : mode impulsif

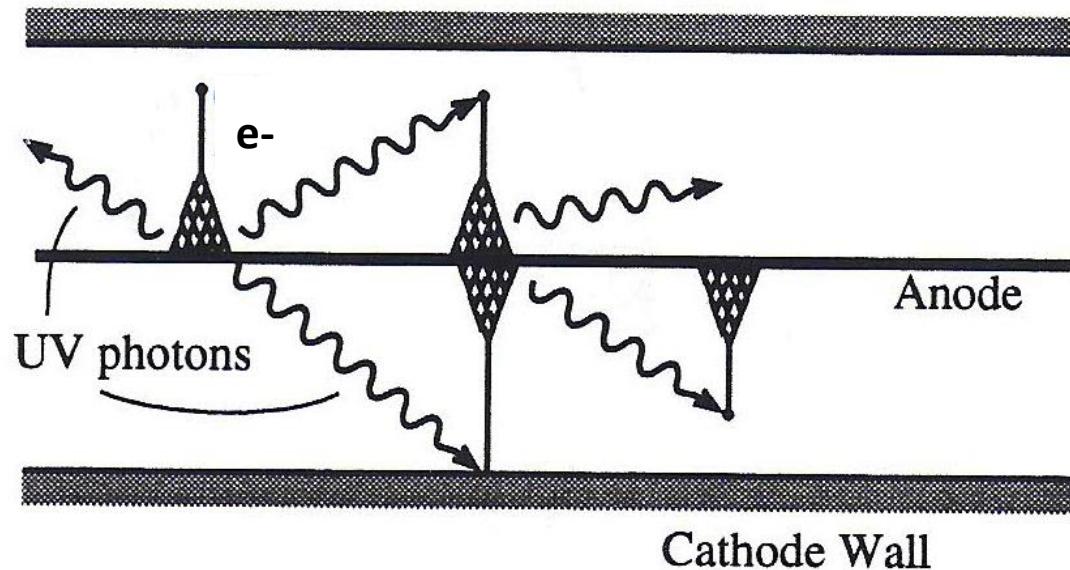
Courbe Hauteur d'impulsion  
vs. Tension appliquée pour  
deux RI de 1 et 2 MeV

Effets de saturation  $\Rightarrow$  la hauteur de l'impulsion devient  
indépendante du nombre de porteurs de charges initial  $n(0)$   
 $\Rightarrow$  Pas adapté à la spectroscopie (juste pour du comptage  
d'impulsions)



# Compteurs Geiger-Müller : comptage d'impulsions (tension appliquée plus élevée)

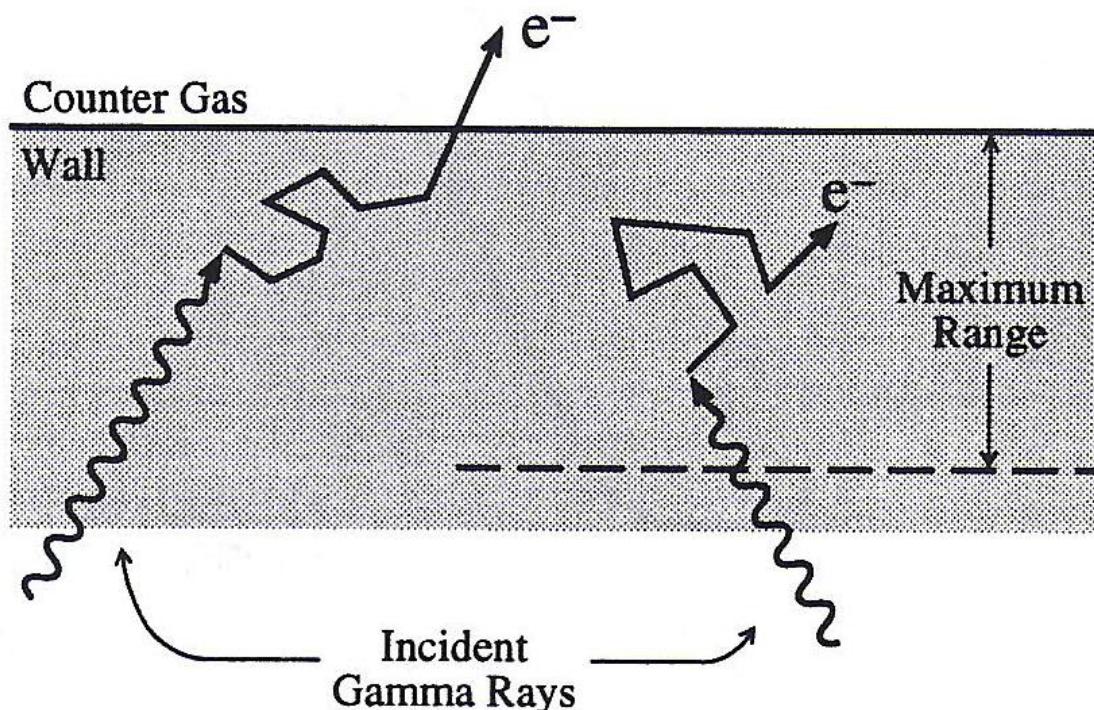
Propagation de l'avalanche par les photons UV tout le long de l'anode



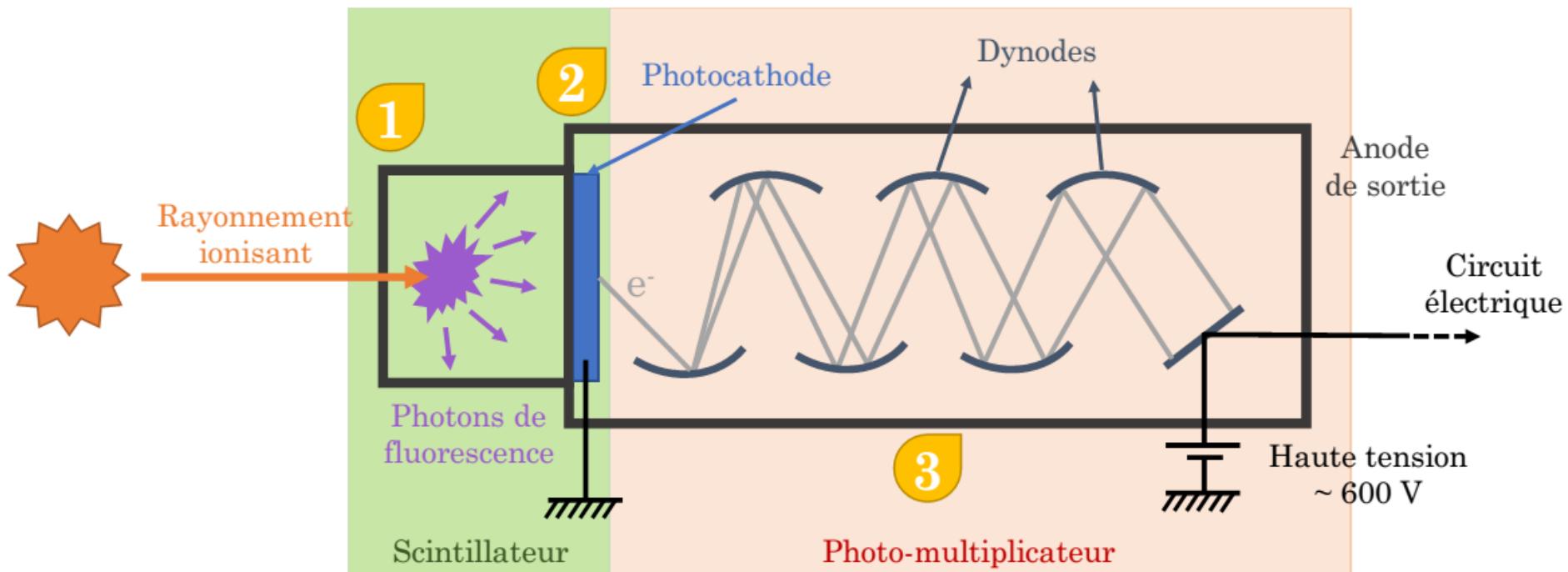
L'avalanche se termine lorsque trop d'ions positifs (de mobilité plus faible que les  $e^-$ ) se sont accumulés près de l'anode, baissant ainsi le champ électrique. Quel que soit le nombre d' $e^-$  initialement formés  $n(0)$  par le rayonnement incident, c'est l'atteinte de cette limite qui arrête l'avalanche  $\Rightarrow$  le nombre de charges collectées ne dépend plus de  $n(0)$ , ni donc de l'énergie déposée  $\Rightarrow$  **un G-M ne peut donc être utilisé pour faire de la spectroscopie**, mais juste pour mesurer un flux de rayonnements.

# Compteurs Geiger-Müller : détection de rayon gamma

On utilise les parois du tube pour faire interagir les gamma  
(importance du choix du matériau et de son épaisseur)



## (2) Scintillateurs



- 1 Scintillation : les rayonnements ionisants incidents et/ou les électrons secondaires produits dans le détecteur excitent les électrons du matériau qui se désexcitent en émettant des photons
- 2 Effet photoélectrique : un photon arrache un électron de la photocathode
- 3 Multiplication des électrons puis recueil du signal électrique

## (2) Scintillateurs

Catégories principales :

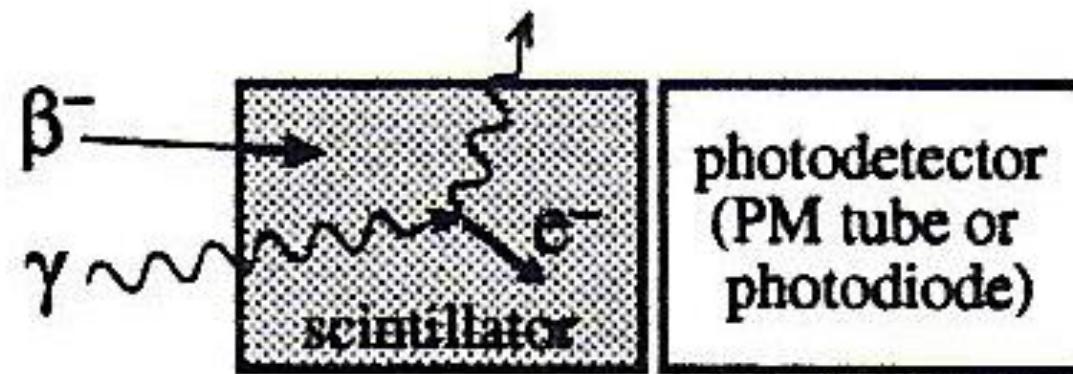
- Scintillateurs organiques (composés de molécules organiques ...C-H...)
  - Cristaux organiques
  - Solutions organiques liquides
  - Scintillateurs plastiques
- Scintillateurs inorganiques (matériau minéral sous forme de cristaux)
  - Cristaux d'halogénures alcalins (Alkali-Halide crystals): **NaI(Tl)**, **CsI(Tl)**, **CsI(Na)**
  - Sulfure de Zinc : ZnS(Ag) → particules alpha
  - Germanate de Bismuth (BGO) → Z le plus élevé
  - Fluorure de baryum (Barium Fluoride) (BaF<sub>2</sub>) → fast timing
  - Verre → détection neutrons

## (2) Scintillateurs

Principe de fonctionnement :

- 1<sup>ère</sup> étape :

Le rayonnement incident interagit dans le scintillateur et dépose tout ou partie de son énergie (directement ou indirectement).



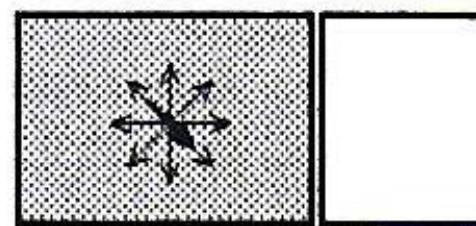
→ Caractérisée par l'efficacité de détection du détecteur (augmente avec densité et Z)

## (2) Scintillateurs

Principe de fonctionnement :

- 2<sup>ème</sup> étape :

Le matériau excité constituant le scintillateur émet de la lumière UV ou visible en se désexcitant. Ces photons de scintillation sont émis dans toutes les directions



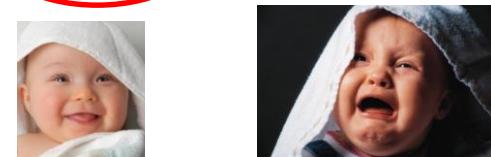
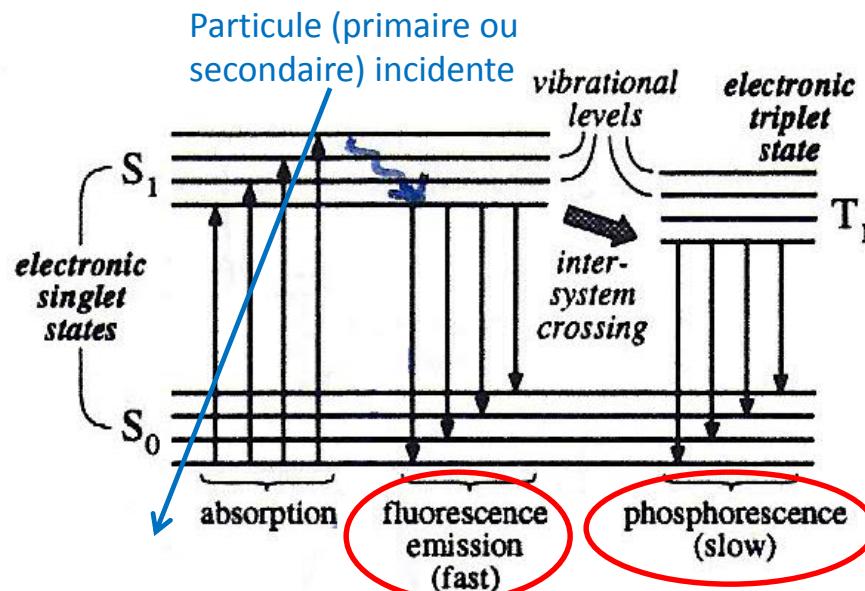
Time scale" 10<sup>-9</sup> to 10<sup>-6</sup> seconds → Etape limitante au niveau temporel

## (2) Scintillateurs

Principe de fonctionnement :

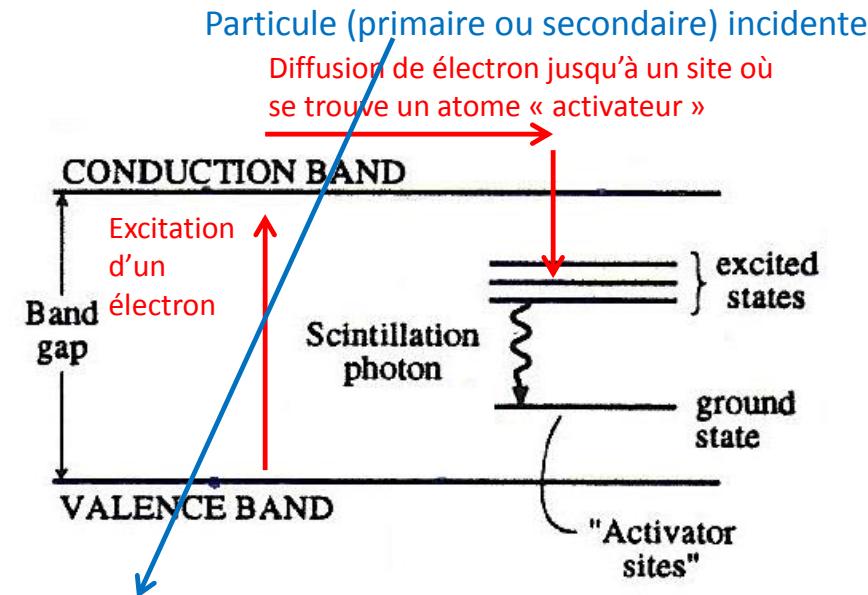
- 2<sup>ème</sup> étape :

Scintillateurs organiques



Processus indépendant de l'état physique de la molécule (gaz, liquide, solide)

Scintillateurs inorganiques



Ex: NaI(Tl)  
Cristal      Activateur

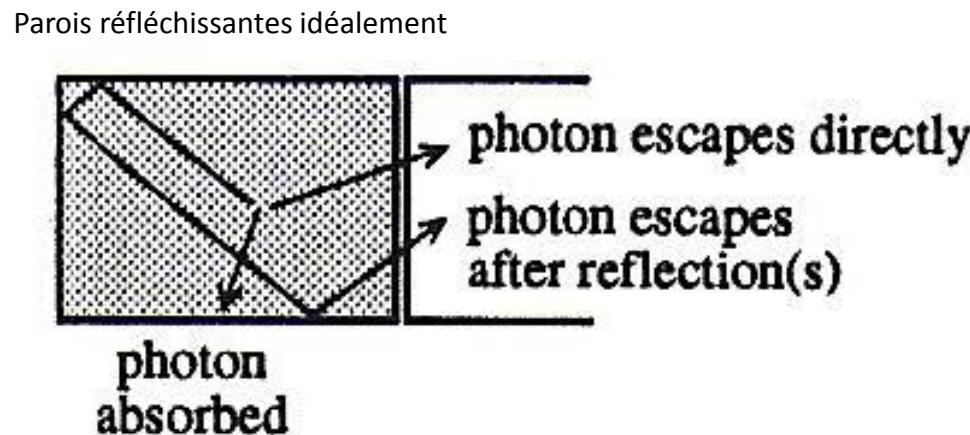
Importance de la structure cristalline

## (2) Scintillateurs

Principe de fonctionnement :

- 3<sup>ème</sup> étape :

Les photons de scintillation sont réfléchis et diffusés jusqu'à ce qu'ils soient absorbés ou qu'ils s'échappent du scintillateur au niveau de la photocathode/photodiode.



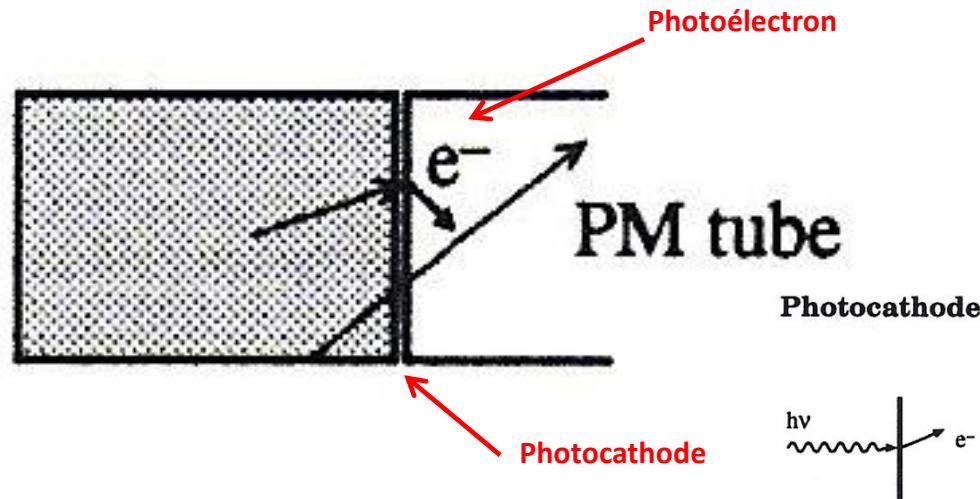
→ Caractérisée par l'efficacité de collecte de la lumière

## (2) Scintillateurs

Principe de fonctionnement :

- 4<sup>ème</sup> étape :

Une fraction des photons de scintillation qui atteignent la photocathode sont convertis en photoélectrons (ou en paires électrons-trous dans une photodiode)



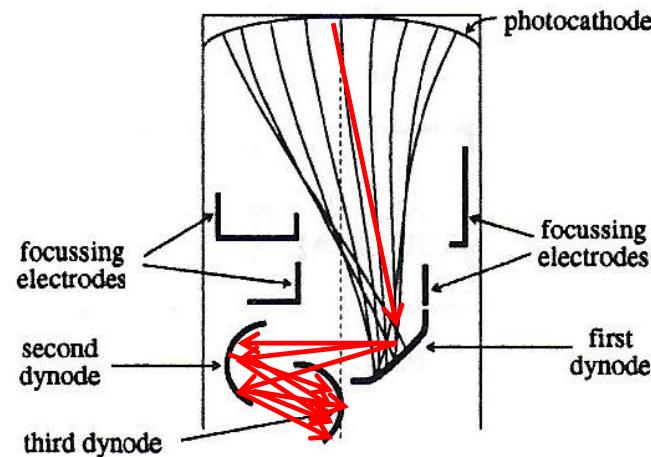
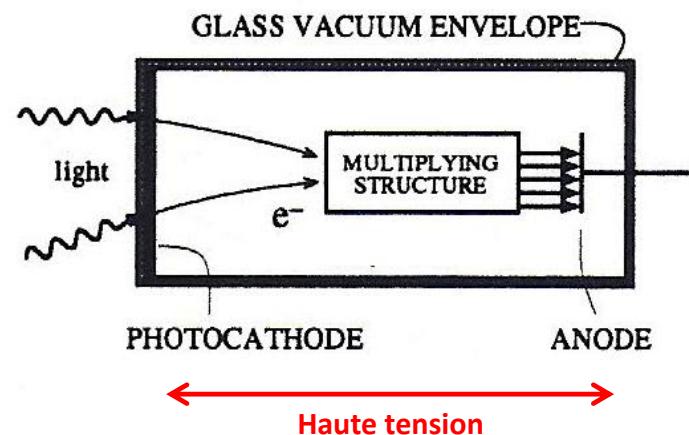
→ Caractérisée par l'efficacité quantique (fraction de photons convertis en photoélectrons)

## (2) Scintillateurs

Principe de fonctionnement :

- 5<sup>ème</sup> étape :

Dans le cas d'un design avec photocathode-photomultiplicateur (PM), les photoélectrons arrachés de la photocathode sont accélérés par une haute tension, amplifiés en nombre à chaque impact avec les dynodes du PM (création d'électrons secondaires eux-mêmes accélérés), de façon à obtenir une impulsion mesurable.



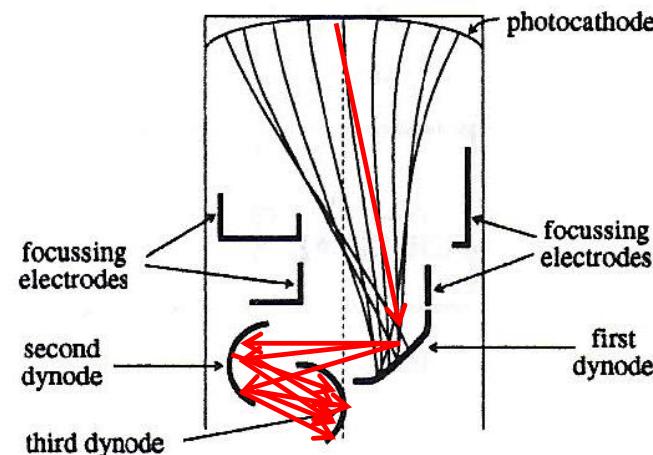
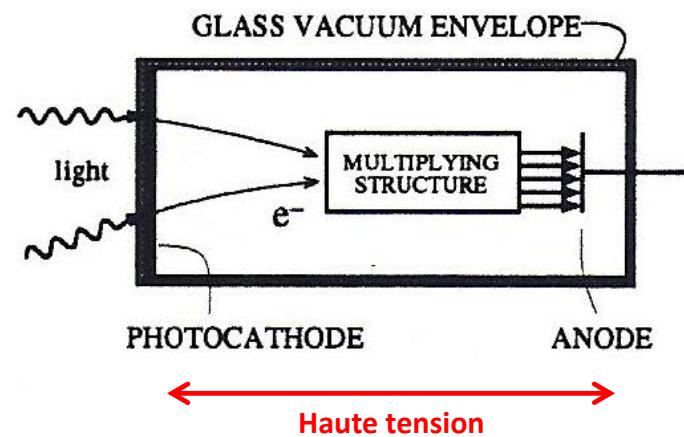
→ Caractérisée par le facteur de multiplication du PM

## (2) Scintillateurs

Principe de fonctionnement :

- 5<sup>ème</sup> étape :

Dans le cas d'un design avec photocathode-photomultiplicateur (PM), les photoélectrons arrachés de la photocathode sont accélérés par une haute tension, amplifiés en nombre à chaque impact avec les dynodes du PM (création d'électrons secondaires eux-mêmes accélérés), de façon à obtenir une impulsion mesurable.



**Ne pas exposer le PM sous tension à la lumière ambiante !**

## (2) Scintillateurs

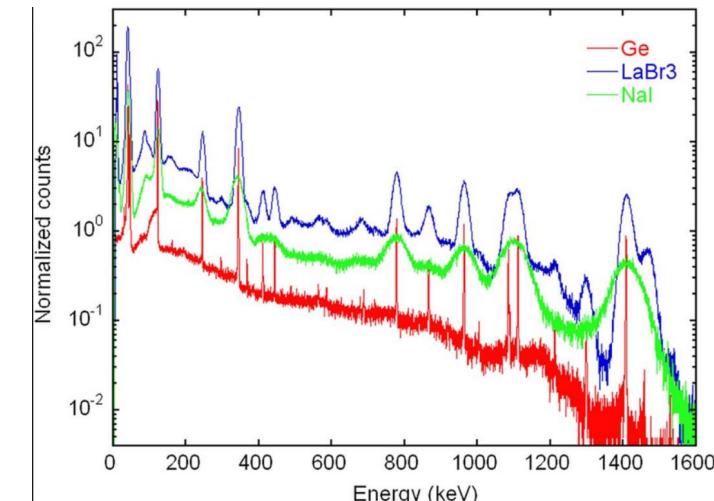
Scintillateurs organiques vs. inorganiques :

- **Organiques (plastiques, liquides, polycristallins) :**

- faible Z
- faible efficacité de scintillation (3%)
- relation énergie lumineuse – énergie incidente : linéaire pour électrons, mais pas pour toutes les particules chargées
- rapides (décroissance  $\approx$  ns)
- Peu coûteux, grands volumes

- **Inorganiques :**

- Z modéré à élevé
- Efficacité de scintillation élevée (jusqu'à 65000 photons/MeV)
- relation énergie lumineuse – énergie incidente linéaire
- généralement assez lents (decay time =  $\mu$ s), même si certains peuvent être rapides (ns)

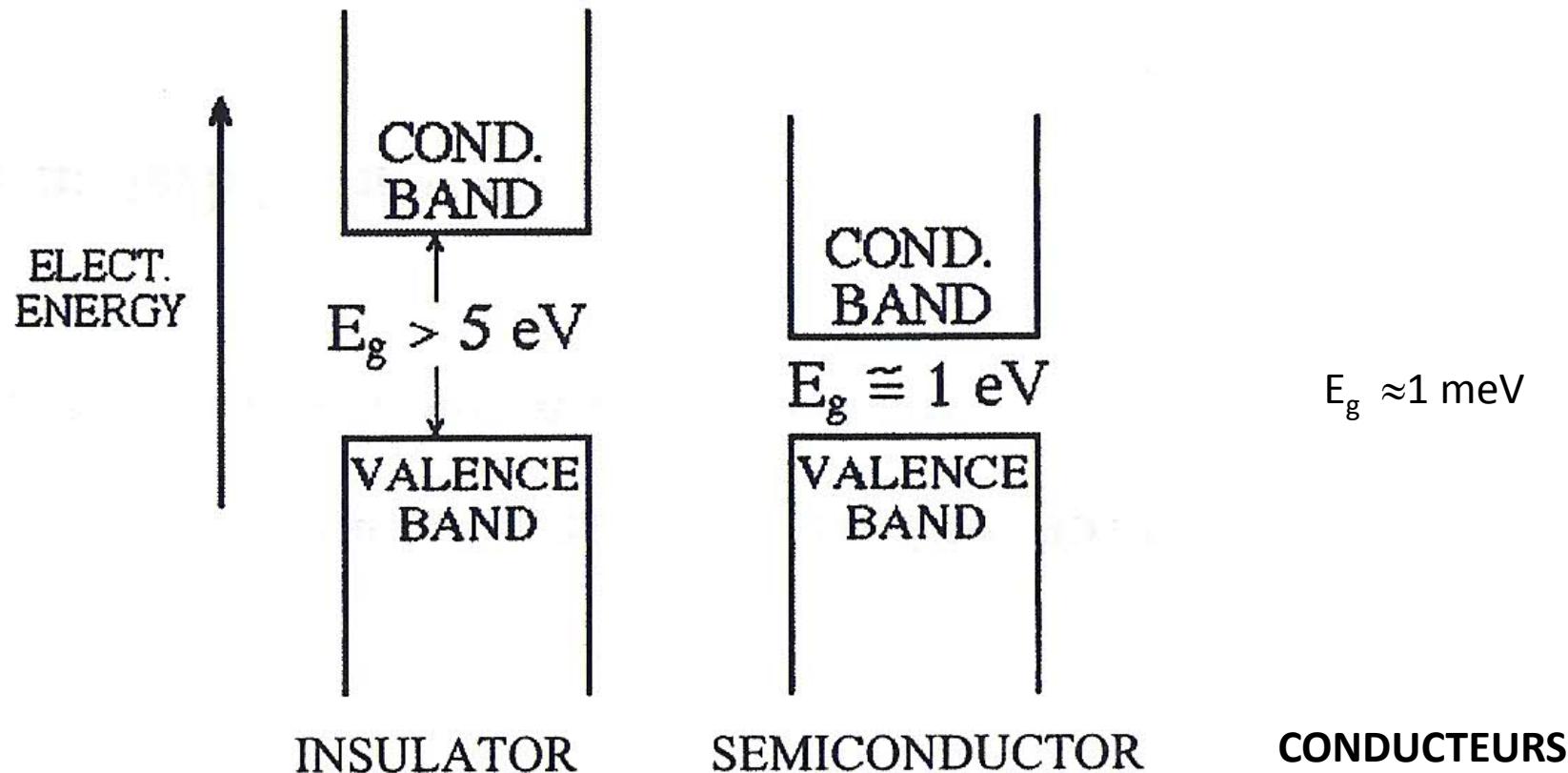


## (3) Semiconducteurs

**Différentes applications :**

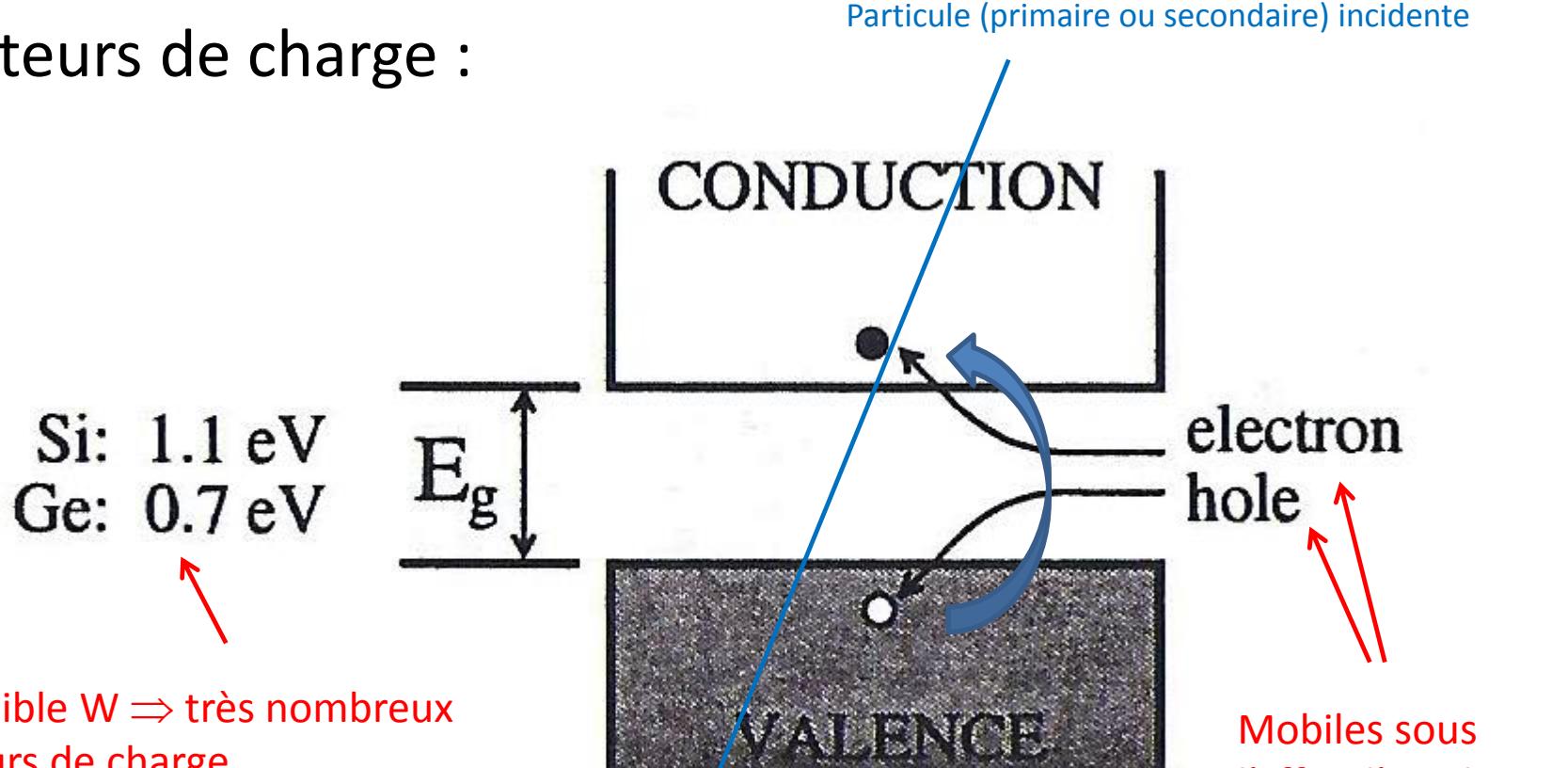
- **DéTECTEURS à jonction, barrière de surface, et implantation d'ions (DéTECTEURS Silicium)**  
→ spectroscopie particules chargées
- **DéTECTEURS Germanium (HPGe = High-Purity Ge)**  
→ spectroscopie gamma
- **Lithium-drifted silicon Si(Li) detectors**  
→ spectroscopie X

### (3) Semiconducteurs



### (3) Semiconducteurs

Porteurs de charge :



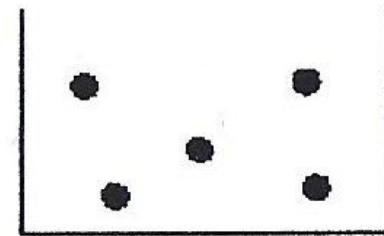
Très faible  $W \Rightarrow$  très nombreux porteurs de charge  
⇒ très bonne résolution en énergie  
(pour comparaison : scintillateurs  $\sim$  100 eV; gaz  $\sim$  30 eV)

Energie réelle pour former une paire électron-trou :

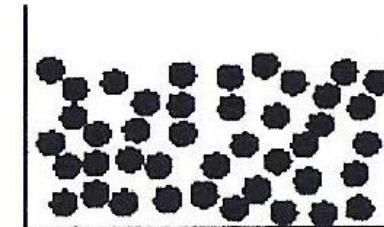
- $W$  (Si @ 300 K) = 3.62 eV
- $W$  (Ge @ 77 K) = 2.96 eV

## (3) Semiconducteurs

Si



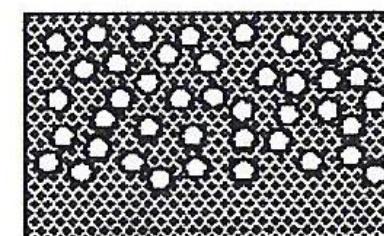
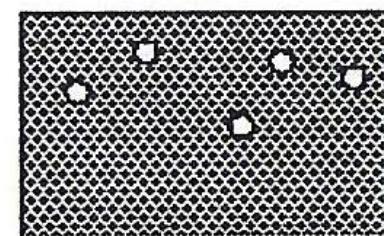
Ge



$$E_g = 1.1 \text{ eV} > 0.7 \text{ eV}$$

(at R.T.)

À température ambiante



“intrinsic”

carrier density:

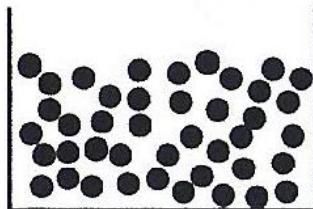
$$1.5 \times 10^{10} \ll 2.4 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$$

### (3) Semiconducteurs

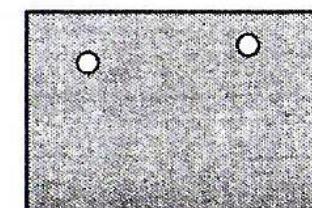
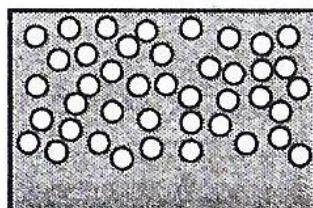
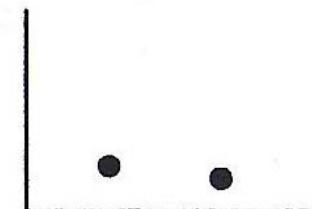
Effet de la température : exemple du Germanium (nécessité d'opérer à 77K, sinon bruit  $\uparrow$  et endommagement de l'électronique (FET))

$T =$

293 K



77 K



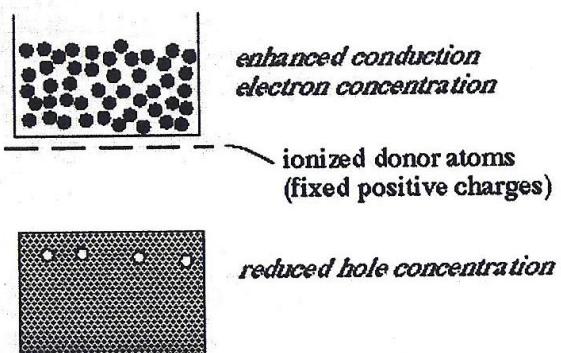
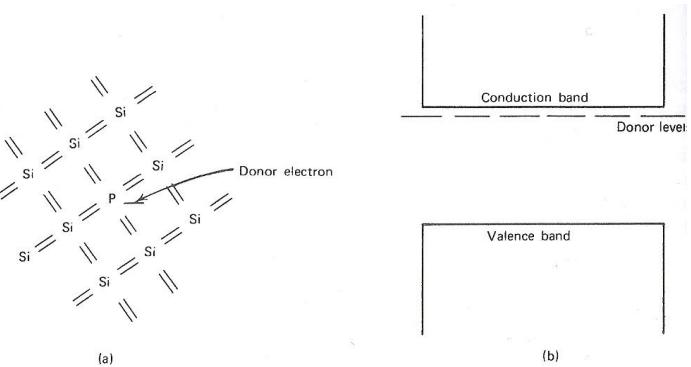
“intrinsic”

carrier  
density:

$2.4 \times 10^{13}$

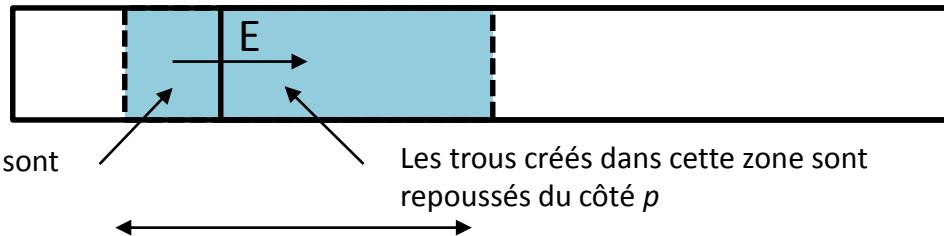
$< 10^{-5} \text{ cm}^{-3}$

# (3) Semiconducteurs : jonction $p-n$



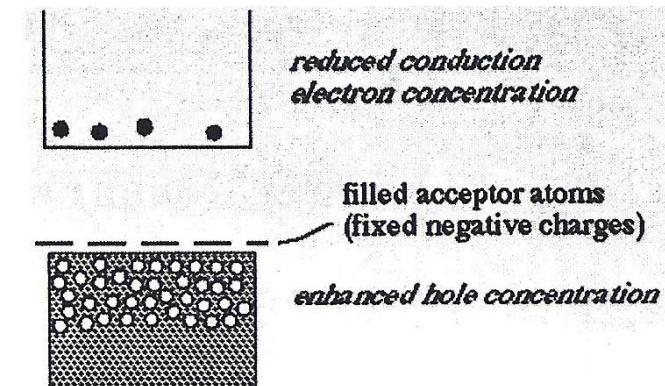
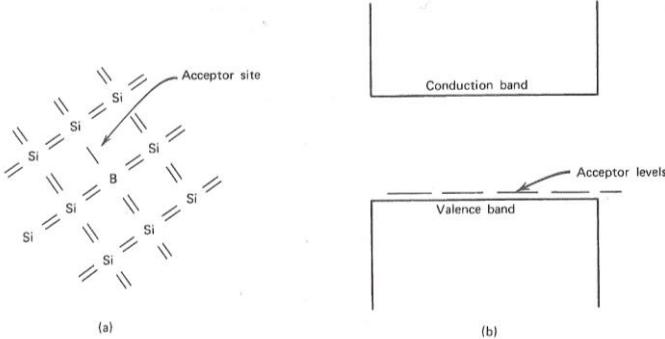
P libère e-  $\Rightarrow$  Création d'électrons de conduction

Les e- créés dans cette zone sont repoussés du côté  $n$



Zone appauvrie (*depleted zone*)  
(concentration d'e- et de trous fortement diminuée)

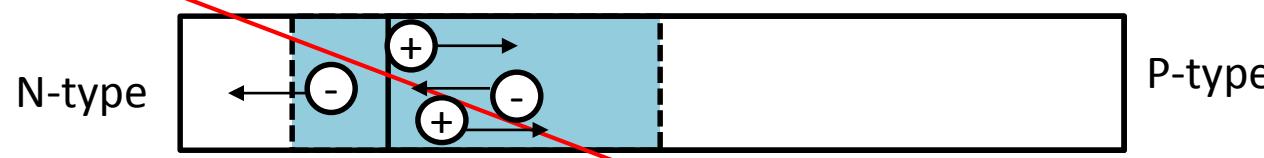
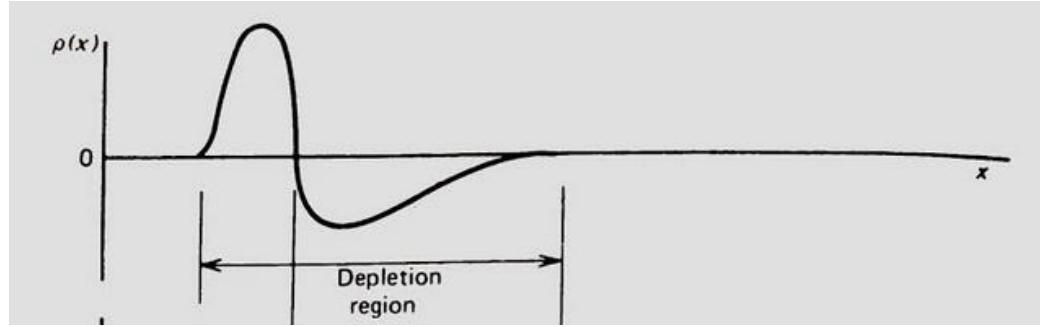
Distribution du champ électrique



B capture e- de valence  
 $\Rightarrow$  création de trous

### (3) Semiconducteurs : jonction $p$ - $n$

Distribution de charge d'espace au travers de la jonction



Zone appauvrie (*depleted zone*)

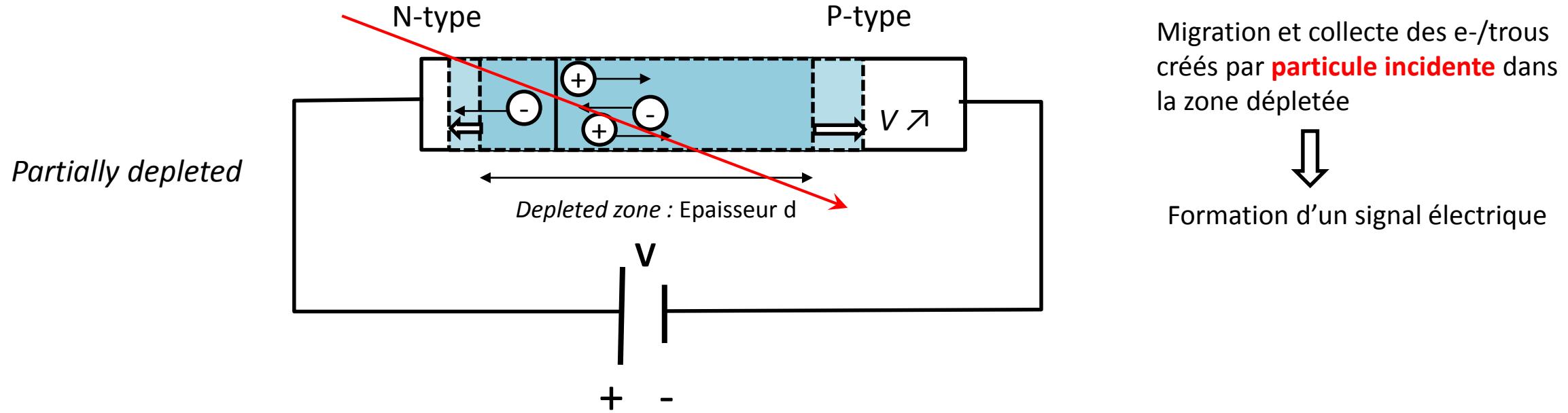
Migration et collecte des e-/trous créés par **particule incidente** dans la zone dépletée



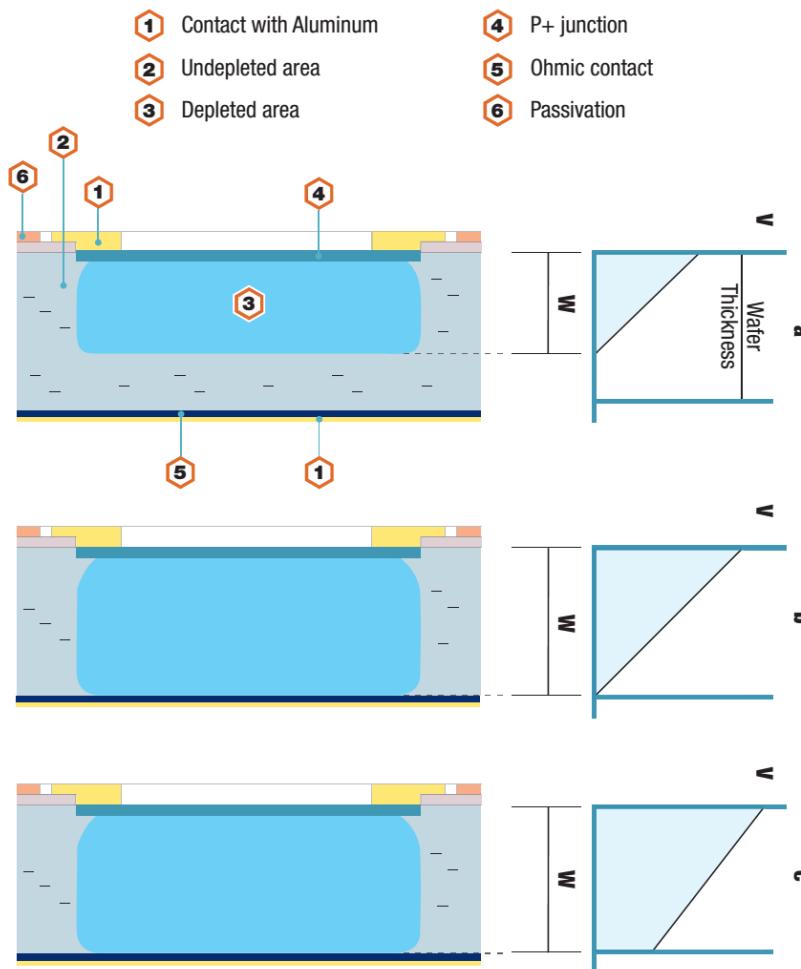
Formation d'un signal électrique

### (3) Semiconducteurs : jonction *p-n*

Jonction *p-n* en polarisation inverse (*reverse biasing*) :



# Exemple : Passivated Implanted Planar Silicon (PIPS) Detectors



**Figure 1**  
Thickness  $W$  of the depletion layer as a function of applied bias  
a. partially depleted mode  
b. fully depleted mode  
c. fully depleted mode with overvoltage



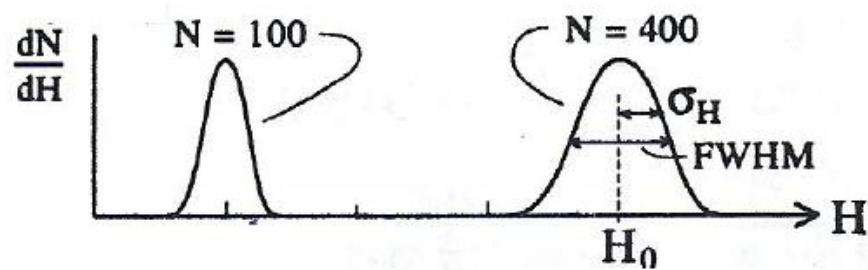
# BACKUP

# Résolution en énergie : limite statistique

Hauteur d'impulsion moyenne :

$$H_o = K \cdot N$$

Nombre de porteurs de charge

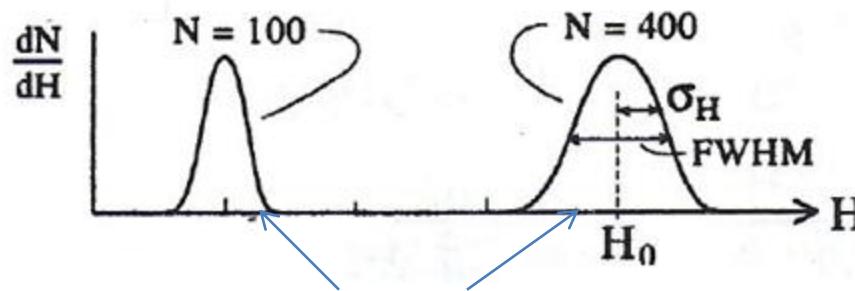


Fluctuations statistiques du nombre N:  $\sigma_N = \sqrt{N} \Rightarrow \sigma_{H_o} = K\sqrt{N}$

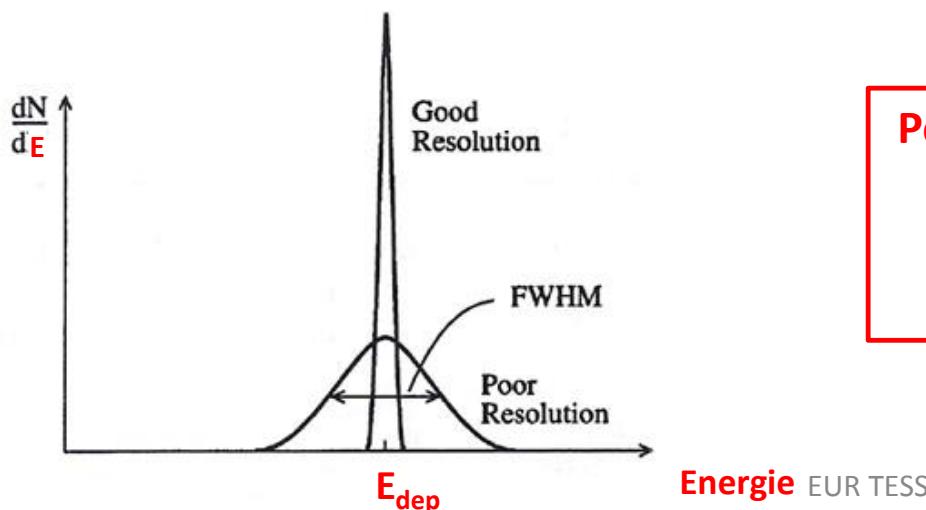
$$\begin{aligned} R]_{Poisson\ Limit} &= \frac{FWHM}{H_o} = \frac{2.35\sigma_{H_o}}{H_o} \\ &= \frac{2.35 \cdot K\sqrt{N}}{K \cdot N} = \frac{2.35}{\sqrt{N}} \end{aligned}$$

# Résolution en énergie

Si maintenant on compare deux détecteurs différents : pour une énergie déposée donnée, plus le nombre de porteurs de charges  $N$  est grand, meilleure est la résolution, car les variations statistiques sont relativement plus faibles.



Distribution d'impulsions générées par deux détecteurs pour une même énergie déposée  $E_{\text{dep}}$  ( $N_1 < N_2$ )



Pour une énergie donnée, plus le nombre de porteurs de charges est élevé (donc plus  $W$  est faible), meilleure est la résolution en énergie