

---

# INTERACTIONS RI/MATIERE



TUT'FLIX – JANVIER 2022

*Bastisotope*

- 1- Introduction aux rayonnements ionisants
  - 2- Mécanismes généraux des interactions des rayonnements avec la matière
  - 3- Interactions des photons avec la matière
  - 4- Interactions des particules avec la matière
- Conclusion

BIOPHYSIQUE  ELITE

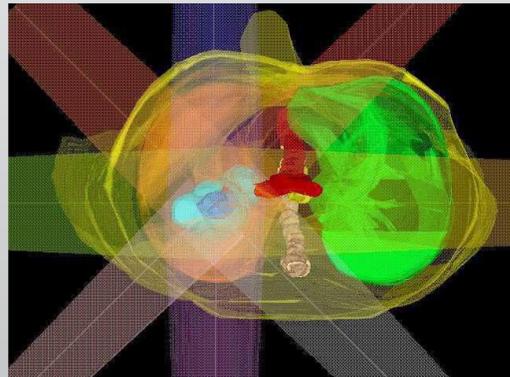
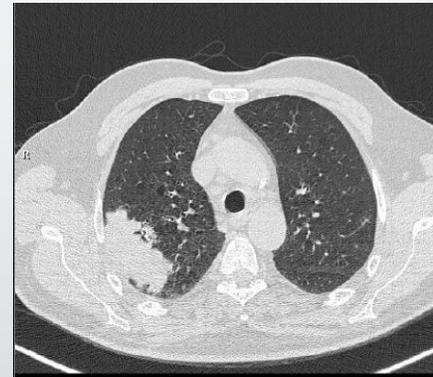


# 1- Introduction aux RI

- Un rayonnement ionisant (RI) est un rayonnement électromagnétique (REM) ou particulaire capable de **produire directement ou indirectement des ionisations d'atomes** lors de sa traversée de la matière.

- Ces RI présentent différents intérêts en santé :

- **Effets biologiques**
- **Exploration diagnostique**
- **Traitements**



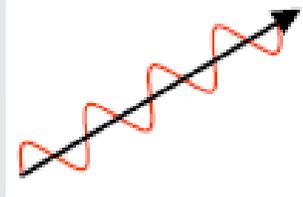
## 2- Mécanismes généraux des interactions des rayonnements avec la matière

- Un rayonnement qui traverse la matière lui transfère une partie de son énergie par :
  - **Échauffement**
  - **Excitation**
  - **Ionisation**
- **Interaction = transfert d'énergie rayonnement → matière**, que l'on décrira sous trois aspects :
  - L'interaction élémentaire
  - Les conséquences pour le rayonnement
  - Les conséquences pour la matière

## 2- Mécanismes généraux des interactions des rayonnements avec la matière

- Conventions d'écriture :

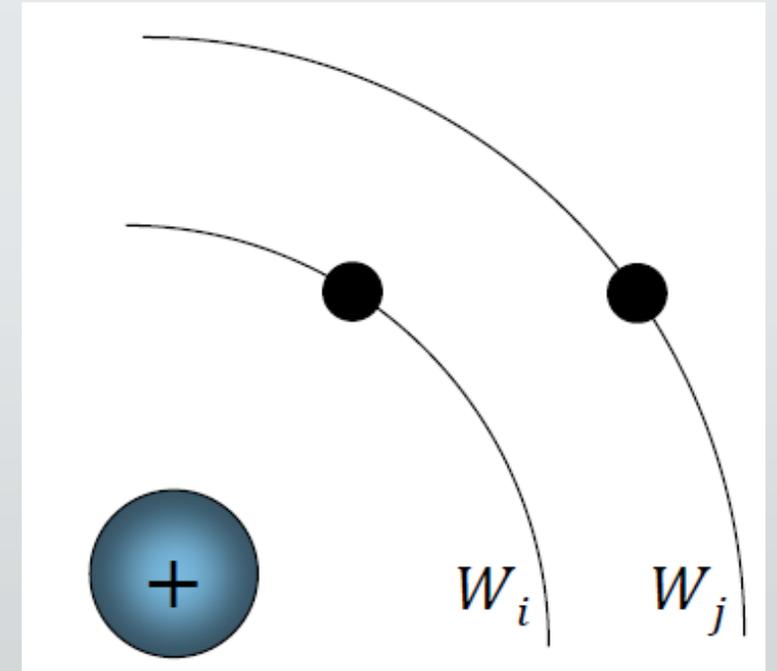
- Photon  $E = h\nu$



- Atomes de la matière selon le modèle de Bohr (K, L, M...)

- Energie de l'électron =  $W_i$

- Energie de liaison de l'électron =  $|W_i|$

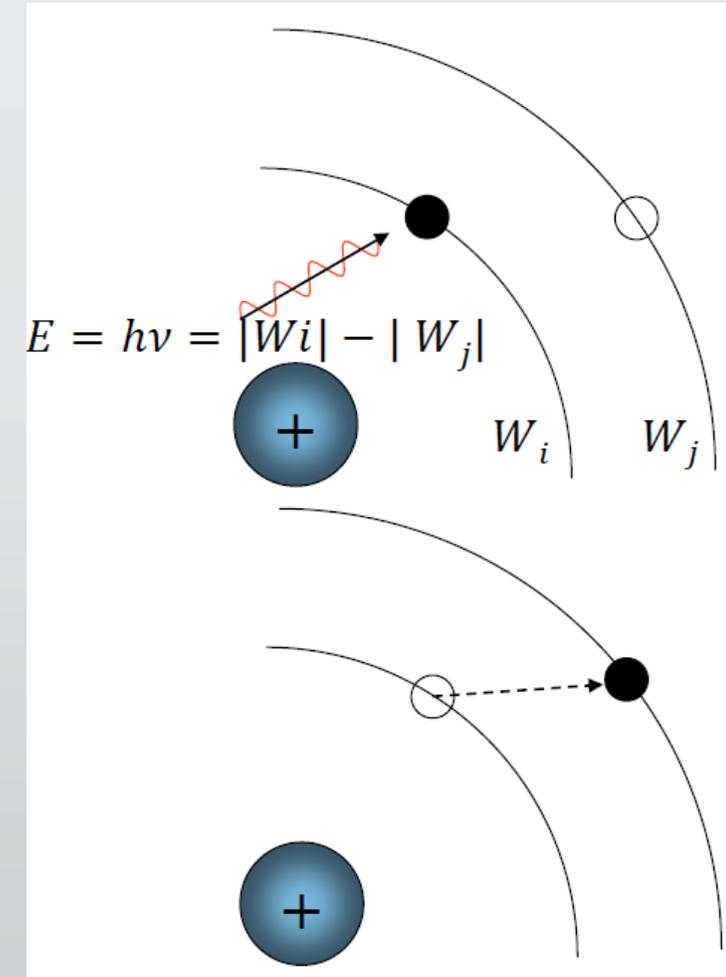


# 2- Mécanismes généraux des interactions des rayonnements avec la matière

## Interactions élémentaires

- Interaction par excitation :

- Si  $E = h\nu$  est inférieure à l'énergie de liaison de l'électron ( $E < |W_i|$ ) et correspond exactement à l'écart entre deux énergies de liaison ( $E = |W_i| - |W_j|$ ), l'électron change d'orbite (sur une case quantique libre).
- Etat fondamental  $\rightarrow$  Excès d'énergie  $E = |W_i| - |W_j|$
- L'énergie absorbée est quantifiée

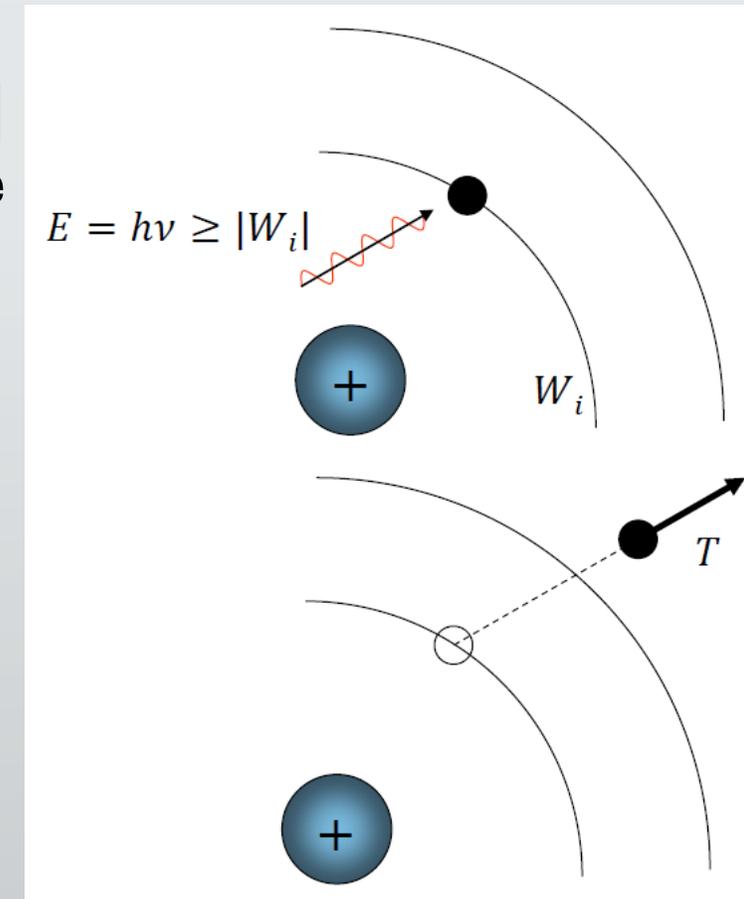


# 2- Mécanismes généraux des interactions des rayonnements avec la matière

## Interactions élémentaires

### - Interaction par ionisation :

- Si  $E = h\nu$  est **supérieure ou égale** à l'énergie de liaison  $|W_i|$  d'un électron, celui-ci est **expulsé**, il y a alors **ionisation de l'atome**.
- Etat fondamental  $\rightarrow$  Excès d'énergie  $E = |W_i|$
- Electron expulsé avec une énergie cinétique  $T = h\nu - |W_i|$
- L'énergie absorbée **n'est pas quantifiée**

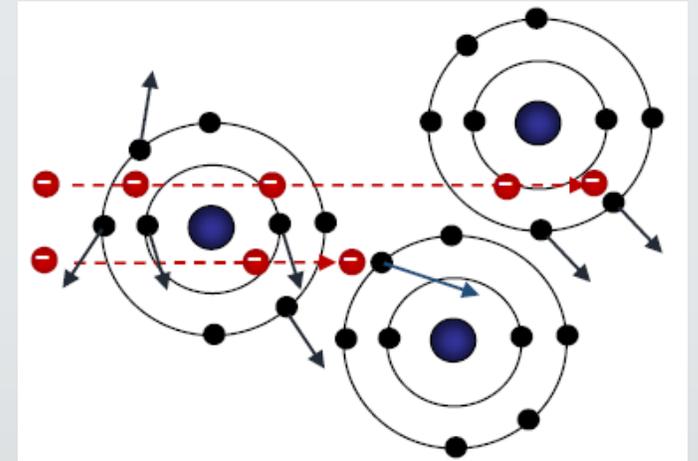


# 2- Mécanismes généraux des interactions des rayonnements avec la matière

## Caractère ionisant ou non d'un rayonnement

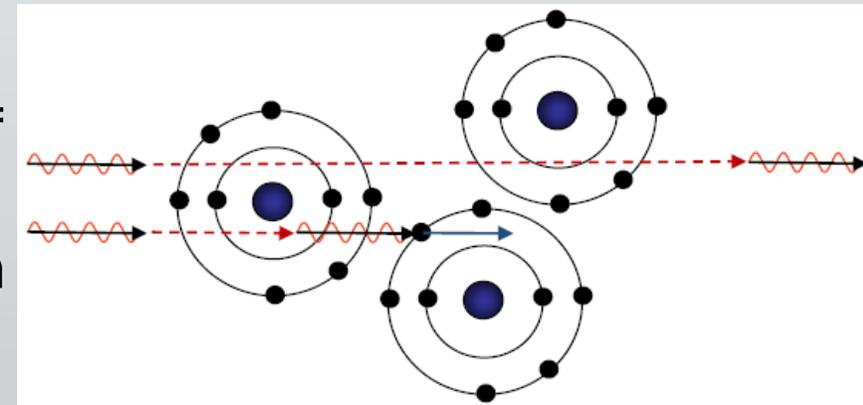
- **Particules chargées :**

- Interactions **coulombiennes** (électrostatiques) **obligatoires** avec la matière
- Peuvent avoir lieu même à **distance**
- Exemples de particules chargées :  $\alpha^{2+}$  ;  $\beta^{-}$  ;  $\beta^{+}$  ;  $e^{-}$  ;  $p^{+}$
- Ces particules sont **directement ionisantes**



- **Particules neutres et REM :**

- Interactions **non obligatoires** = **balistiques** = **statistiques**
- **Indirectement ionisants** par les électrons mis en mouvement ou les protons secondaires



# 2- Mécanismes généraux des interactions des rayonnements avec la matière

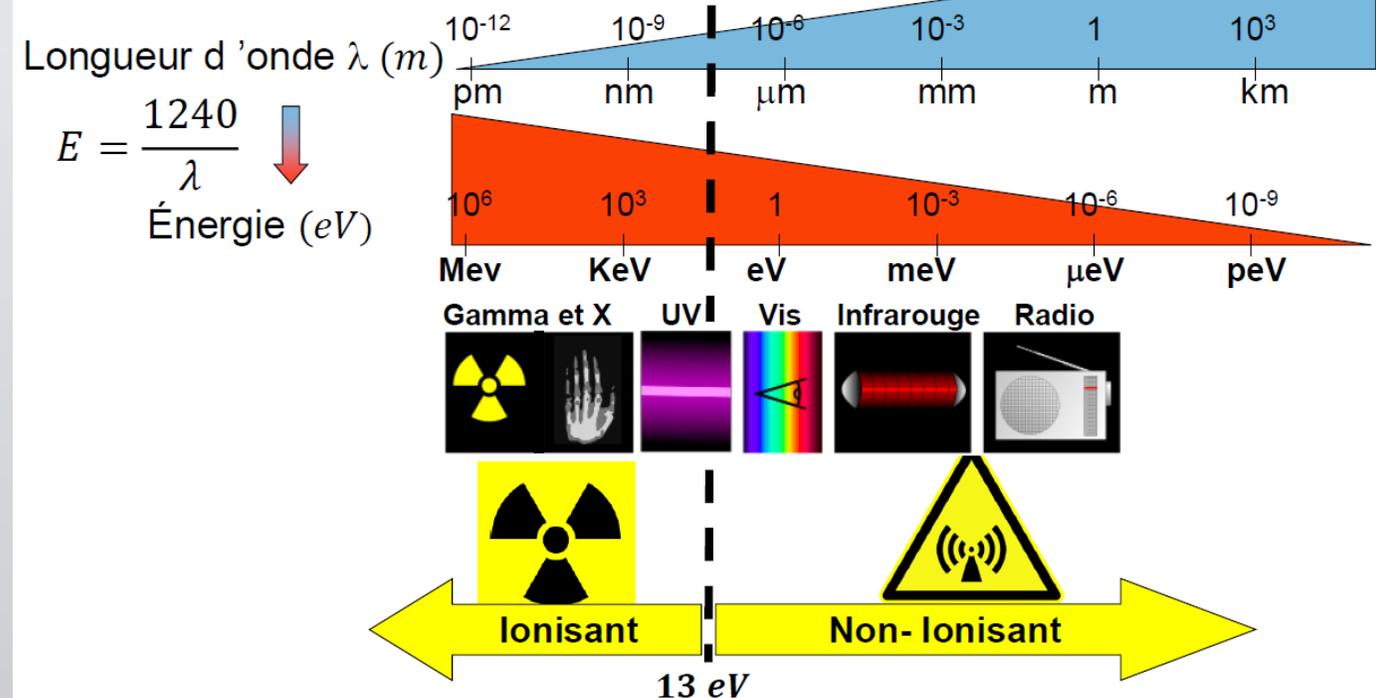
## Caractère ionisant ou non d'un rayonnement

Concernant les REM :

- $|WH2O| \cong 13,6 \text{ eV}$
- Si  $E \geq 13,6 \text{ eV} \rightarrow$  REM ionisant
- Si  $E < 13,6 \text{ eV} \rightarrow$  REM non ionisant

Atome	$ W $ (eV)
<i>C</i>	11,24
<i>H</i>	13,54
<i>O</i>	13,57
<i>N</i>	14,24

### Spectre des rayonnements électromagnétiques

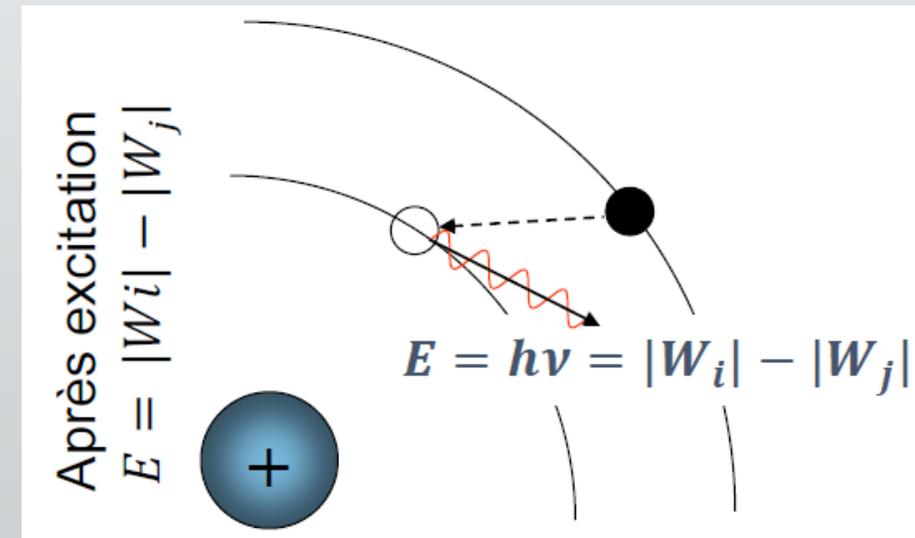
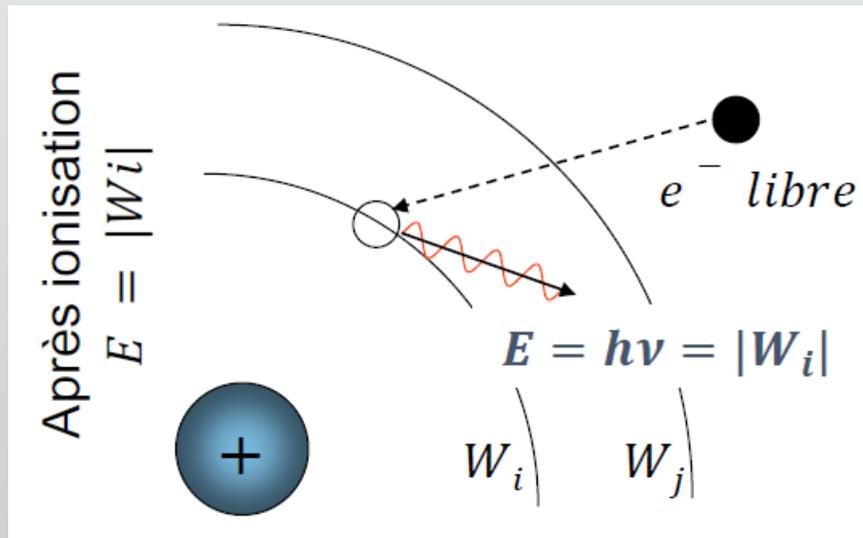


# 2- Mécanismes généraux des interactions des rayonnements avec la matière

## Conséquences pour la matière

- Emission d'un photon de fluorescence

Un atome excité ou ionisé n'est plus dans son état fondamental et possède un excès d'énergie, il est donc instable. Il tend à retourner à son état fondamental pour **restituer l'excès d'énergie** et retrouver son **architecture initiale**.

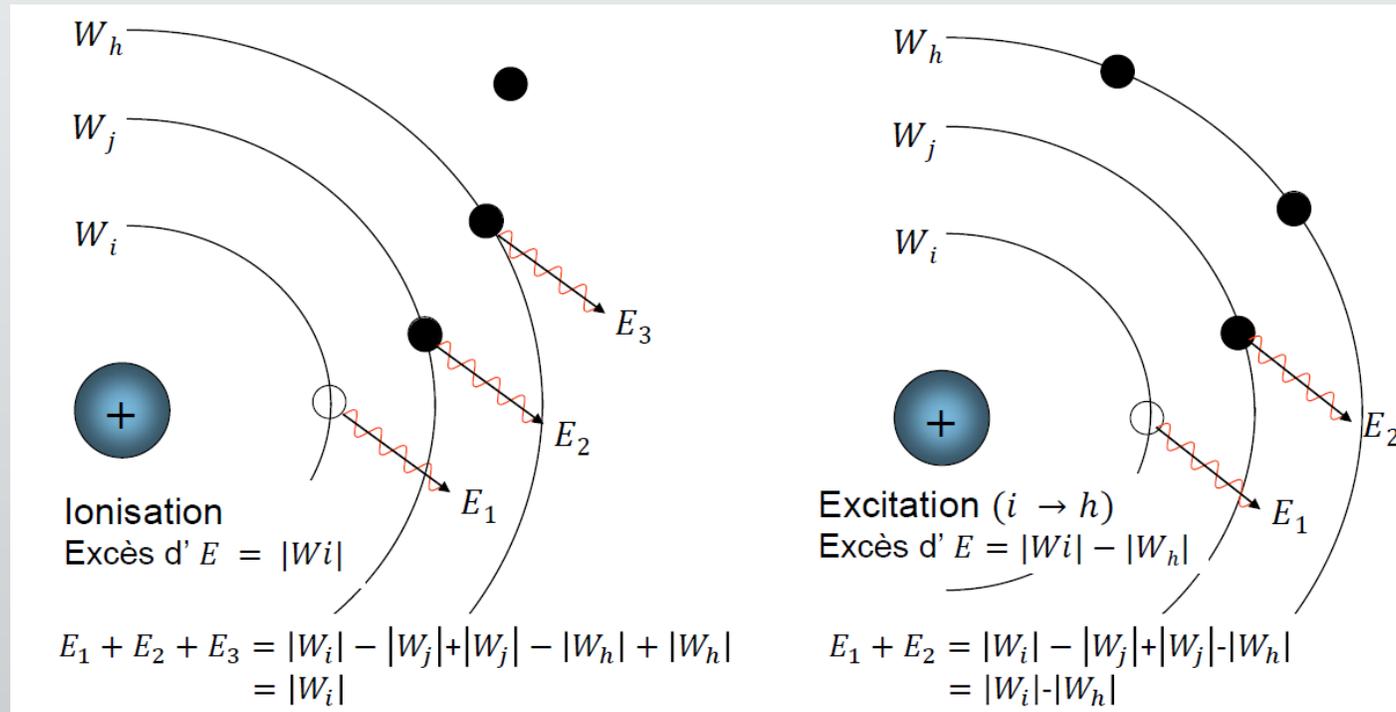


# 2- Mécanismes généraux des interactions des rayonnements avec la matière

## Conséquences pour la matière

- Emission d'un photon de fluorescence

On peut également assister à une **cascade de réarrangements** :

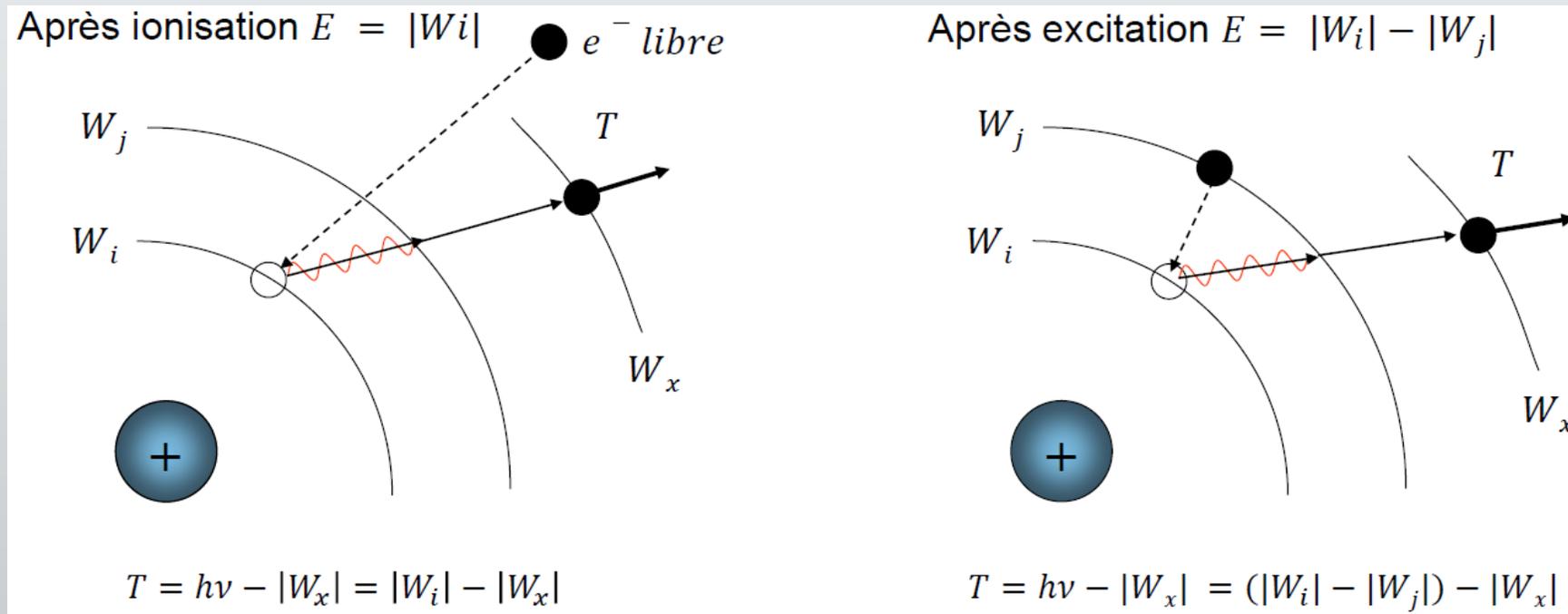


# 2- Mécanismes généraux des interactions des rayonnements avec la matière

## Conséquences pour la matière

### - Emission d'un électron Auger

Notre photon de fluorescence peut lui-même expulser un électron de l'atome qui lui a donné naissance : c'est l'**électron Auger**.



# 2- Mécanismes généraux des interactions des rayonnements avec la matière

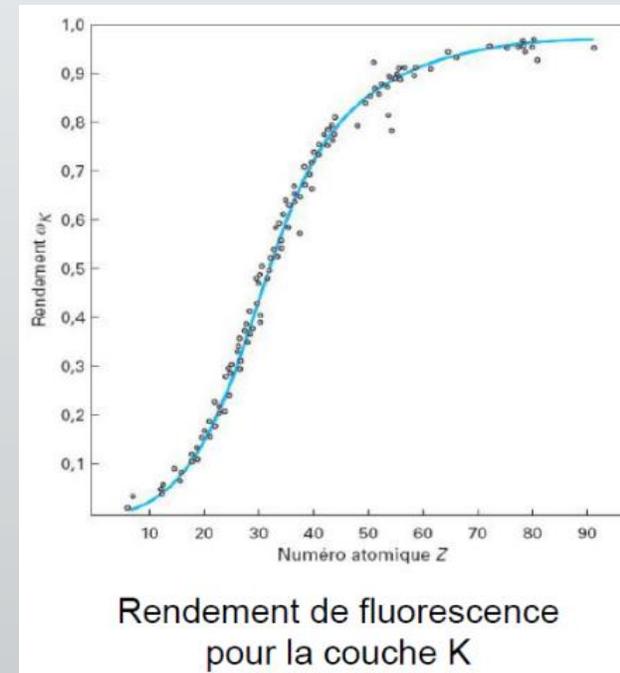
## Conséquences pour la matière

Un atome ionisé ou excité peut donc retourner à son état fondamental de deux manières, par émission d'un **photon de fluorescence** ou d'un **électron Auger**.

La compétition entre ces deux phénomènes est caractérisées par le **rendement de fluorescence  $\omega_i$**  qui **dépend du  $Z$**  de l'atome.

$$\omega_i = \frac{\textit{Proba Fluorescence}}{\textit{Proba Auger}}$$

- $Z$  élevé : photon de fluorescence
- $Z$  faible : électron Auger



# 3- Interactions des photons avec la matière

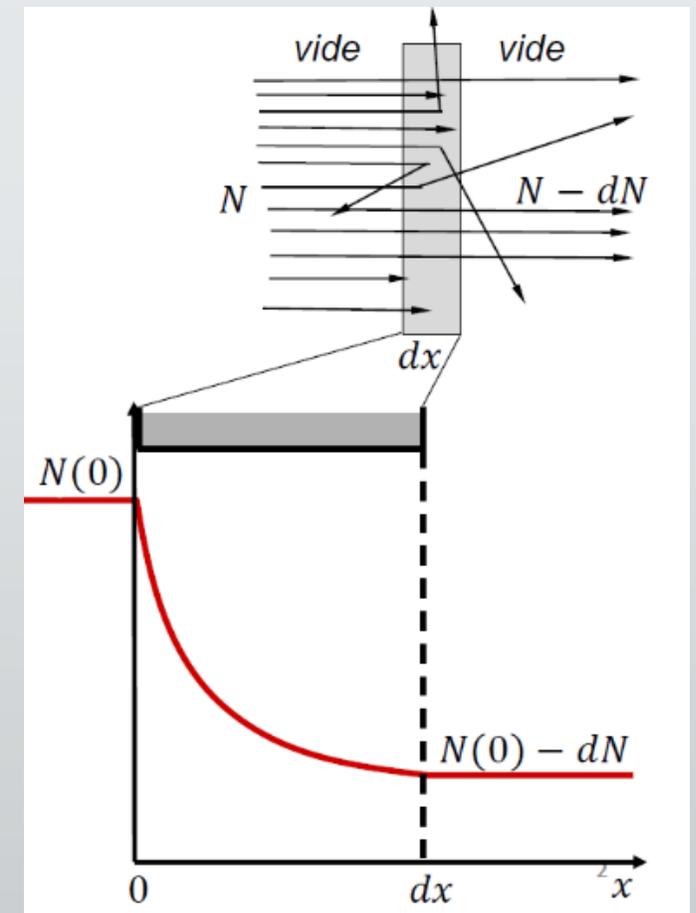
## Atténuation des photons dans la matière

Les photons dans la matière vont pouvoir être : **absorbés / diffusés / transmis**

Nombre de photons transmis :  $N - dN$  avec  $-dN = \mu N dx$

$\mu$  = probabilité d'interaction par unité de longueur

$N(x) = N(0).e^{-\mu x} \rightarrow$  atténuation des photons **exponentielle**



# 3- Interactions des photons avec la matière

## Atténuation des photons dans la matière

- $\mu$  correspond au coefficient **linéique** d'atténuation :
  - Probabilité d'interaction par unité de longueur [ $L^{-1}$ ]
  - Spécifique du milieu et de l'énergie des photons, dépend de l'état de ce milieu
  - $N(x) = N(0).e^{-\mu x}$

Epaisseur  $x$  difficile à mesurer

- $\mu/\rho$  correspond au coefficient **massique** d'atténuation
  - Longueur au carré par unité de masse [ $L^2.M^{-1}$ ]
  - Ne dépend pas de l'état du milieu
  - $N(x) = N(0).e^{-(\mu/\rho).\rho x}$
  - On n'a donc plus besoin de mesurer l'épaisseur mais la masse surfacique (plus facile)

$$\rho x = \frac{m}{vol} \times x = \frac{m.x}{s.x} = \frac{m}{s}$$



# 3- Interactions des photons avec la matière

## Atténuation des photons dans la matière

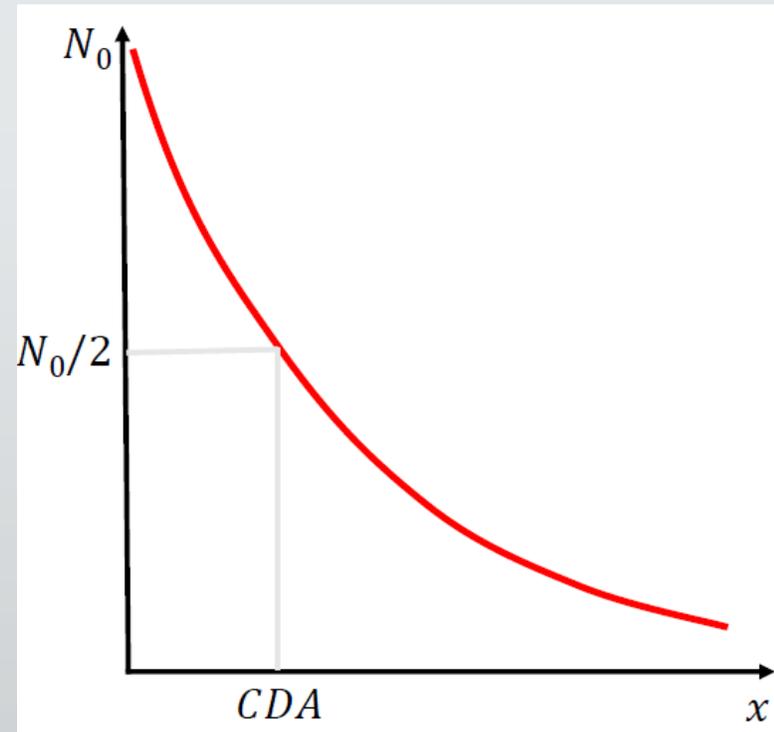
**Couche de Demi-Atténuation (CDA)** : épaisseur  $x$  qui diminue le flux de photon d'un facteur 2

$$\frac{N(0)}{2} = N(0)e^{-\mu \cdot CDA}$$

D'où : 
$$CDA = \frac{\ln 2}{\mu}$$

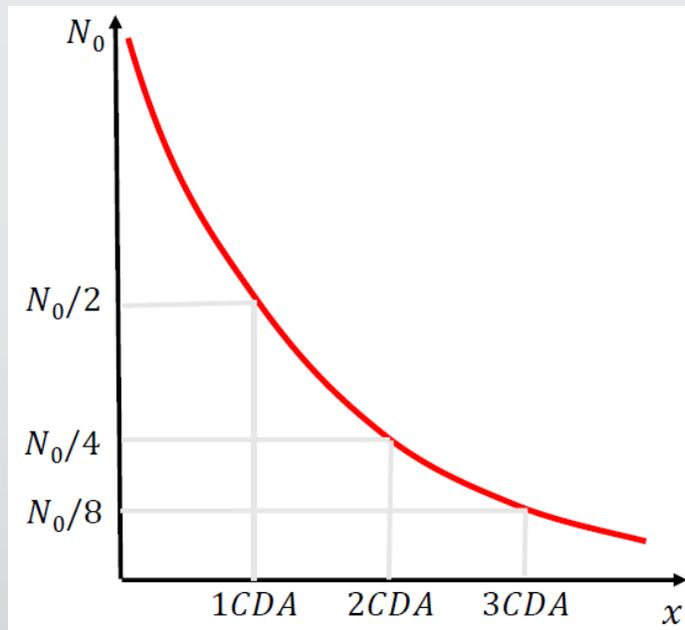
$$N(k \cdot CDA) = N(0)e^{-\mu \cdot k \cdot CDA} = N(0) \left(\frac{1}{2}\right)^k = \frac{N(0)}{2^k}$$

$$\frac{N(k \cdot CDA)}{N(0)} = \left(\frac{1}{2}\right)^k$$



# 3- Interactions des photons avec la matière

## Atténuation des photons dans la matière



$x$	$N(x)/N(0)$	%
$1 \times CDA$	$1/2$	50
$2 \times CDA$	$(1/2)^2$	25
$3 \times CDA$	$(1/2)^3$	12,5
$n \times CDA$	$(1/2)^n$	
$10 \times CDA$	$1/1024$	0,1

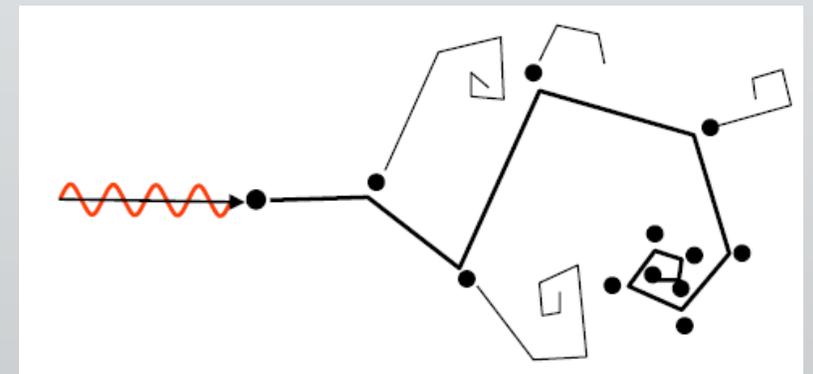
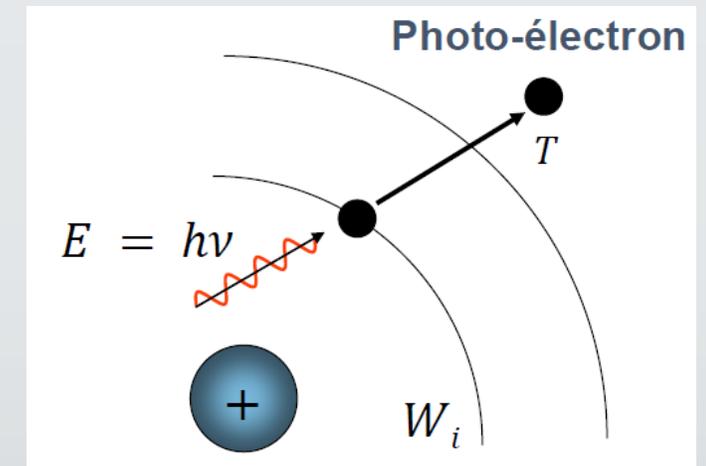
L'absorption d'un faisceau de photon n'est **jamais totale**, cependant on considère que le nombre de photons transmis après **10 CDA** est **négligeable**.

# 3- Interactions des photons avec la matière

## Mécanismes d'interaction des photons

### - L'effet photo-électrique :

- Transfert de la **totalité** de l'énergie du photon incident à un électron des atomes de la matière
- Energie cinétique du photo-électron :  $T = h\nu - |W_i|$
- Conséquences pour la matière :
  - Atome : **réarrangement** par photons de fluorescence et e- Auger
  - Electron ionisé : perte de son  $E_c$  par ionisations successives
  - Rayonnement : **disparition**

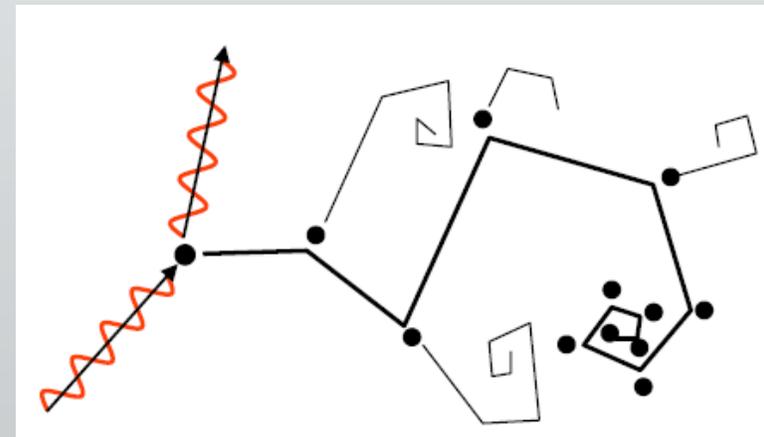
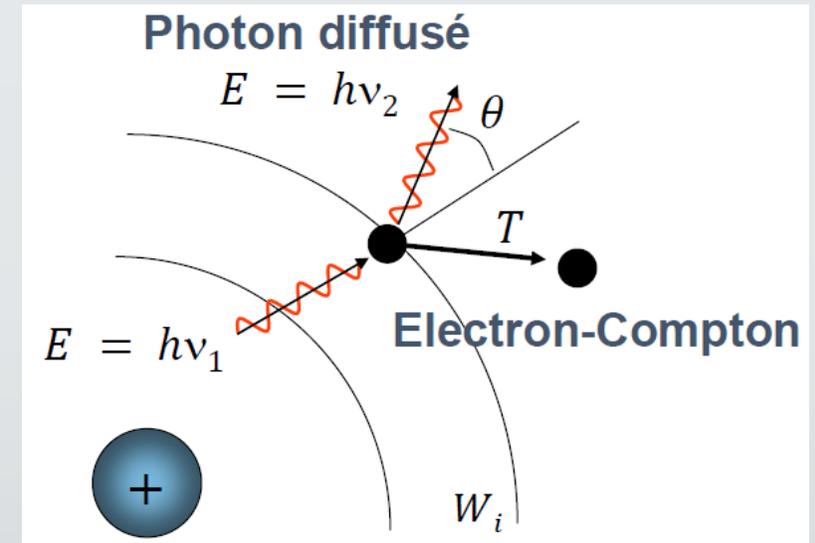


# 3- Interactions des photons avec la matière

## Mécanismes d'interaction des photons

### - L'effet Compton :

- Transfert **partiel** de l'énergie du photon incident à un électron des atomes de la matière
- Energie incidente répartie :
- Conséquences pour la matière :
  - Atome : **réarrangement** par photons de fluorescence et e- Auger
  - Electron ionisé : perte de son  $E_c$  par ionisations successives
  - Rayonnement : **une partie est diffusée**

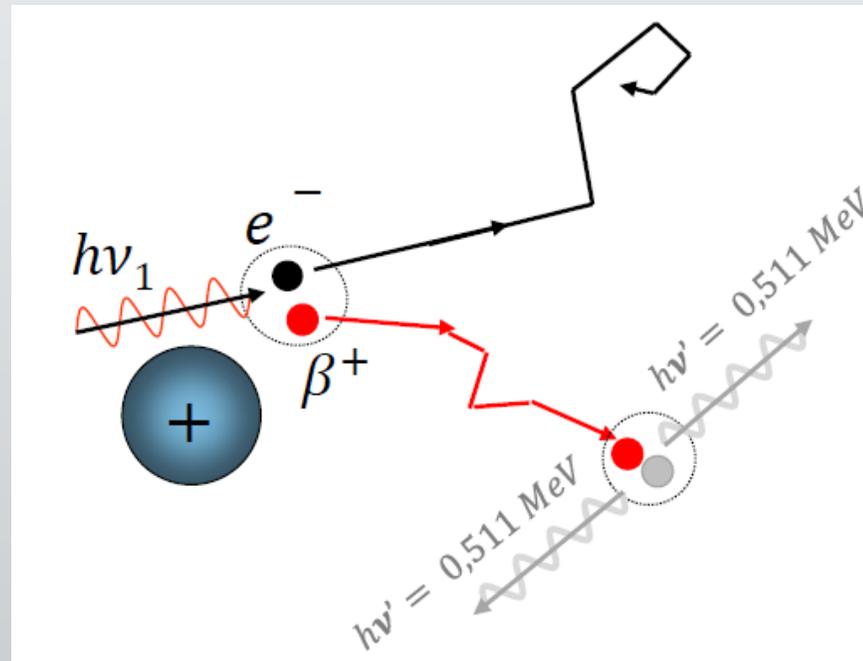


# 3- Interactions des photons avec la matière

## Mécanismes d'interaction des photons

- La création de paires :

- Un photon très énergétique passant à proximité d'un noyau voit son énergie transformée en 2 particules.
- **Seuil de 1022 keV (1,022 MeV)+++**



# 3- Interactions des photons avec la matière

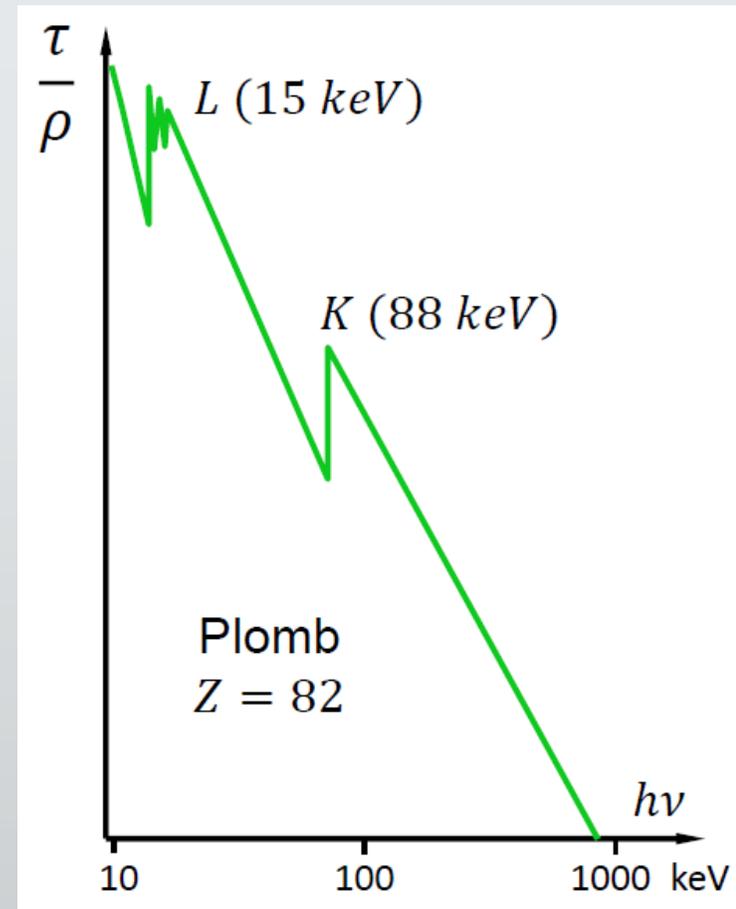
## Probabilités des différents mécanismes

- L'effet photo-électrique :

• Notée  $\tau$  :  $N(x) = N(0)e^{-\tau x}$

$$\tau = k\rho \frac{Z^3}{(h\nu)^3} \quad \frac{\tau}{\rho} = k \frac{Z^3}{(h\nu)^3}$$

- Probabilité élevée pour :
  - Les éléments lourds avec un Z élevé
  - Les photons de faible énergie



# 3- Interactions des photons avec la matière

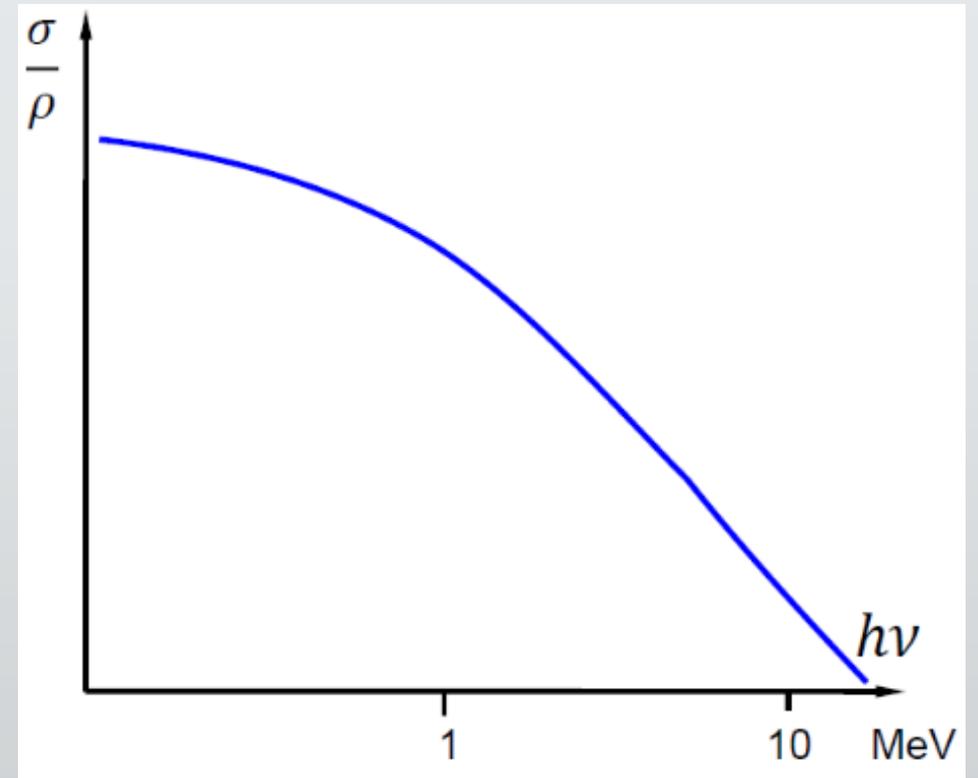
## Probabilités des différents mécanismes

- L'effet Compton :

• Notée  $\sigma$  :  $N(x) = N(0)e^{-\sigma x}$

$$\sigma = k\rho \frac{1}{h\nu} \quad \frac{\sigma}{\rho} = k \frac{1}{h\nu}$$

- Probabilité :
  - Pratiquement indépendante de la nature de la matière
  - Diminue quand l'énergie du photon augmente

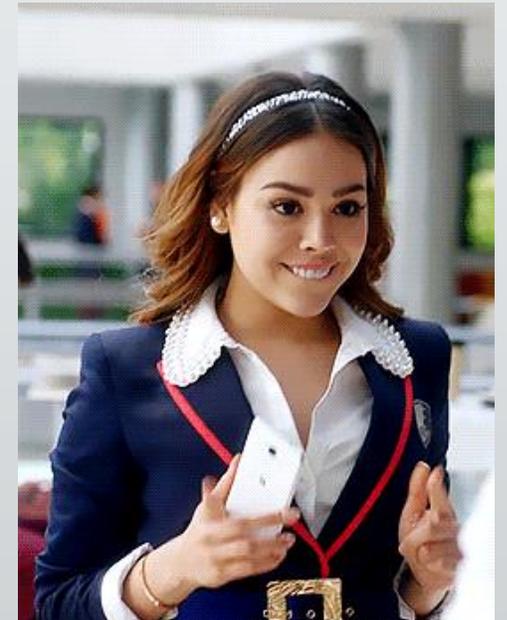
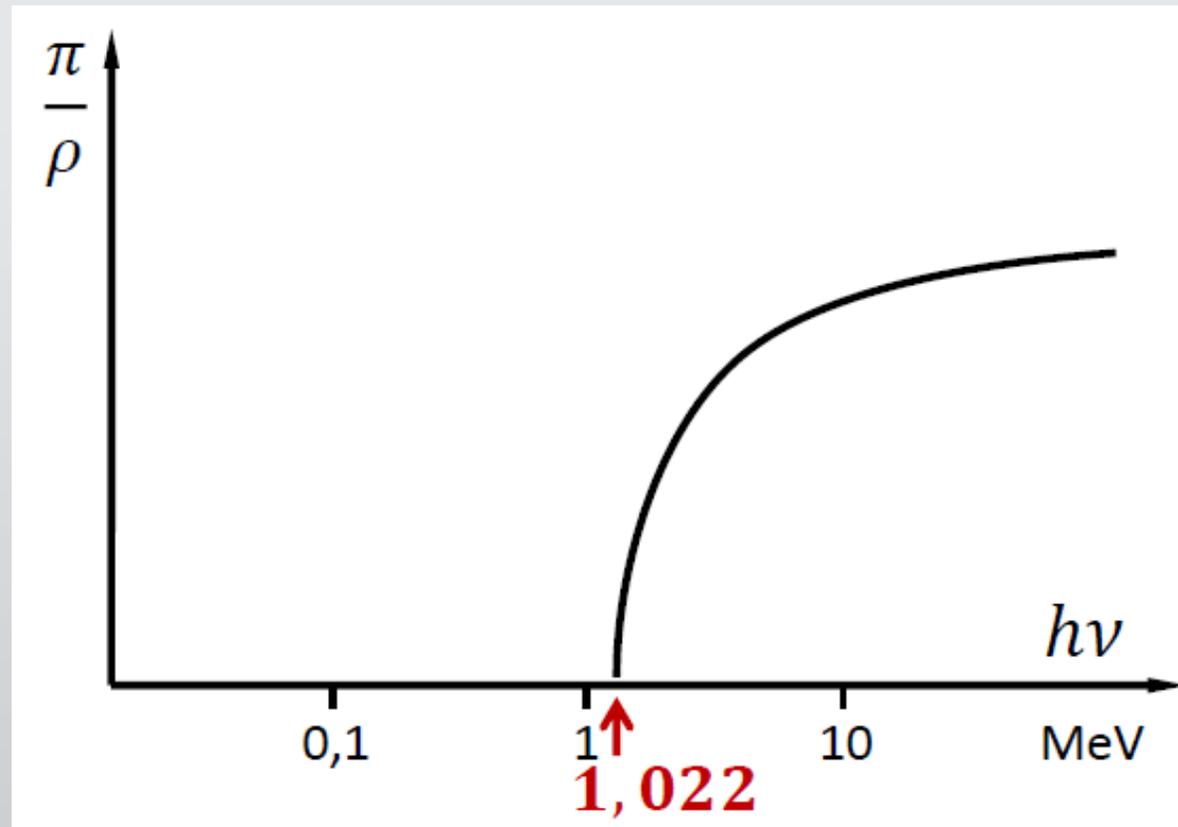


# 3- Interactions des photons avec la matière

## Probabilités des différents mécanismes

- La création de paires :

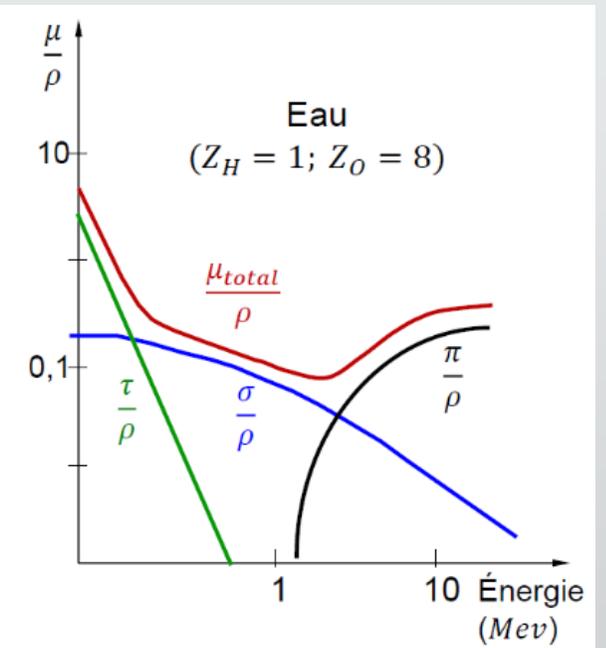
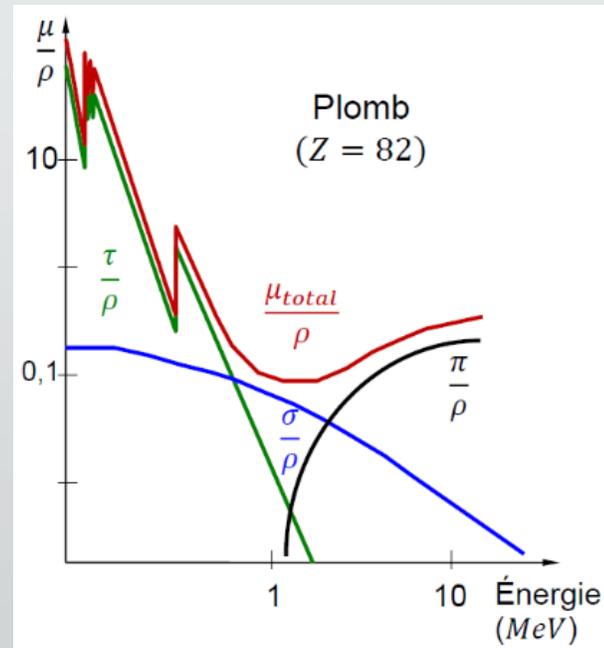
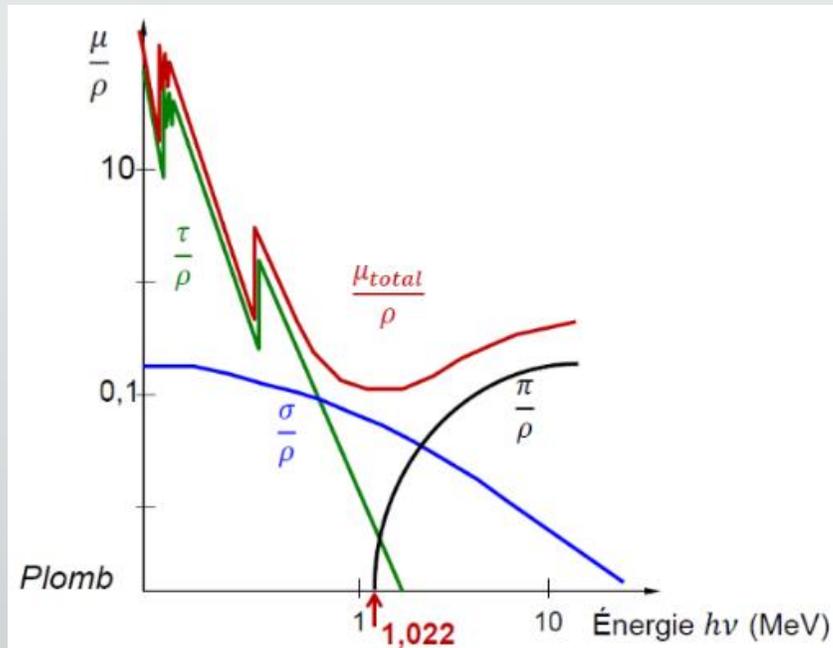
• Notée  $\pi$



# 3- Interactions des photons avec la matière

## Probabilités des différents mécanismes

- Importances relatives :



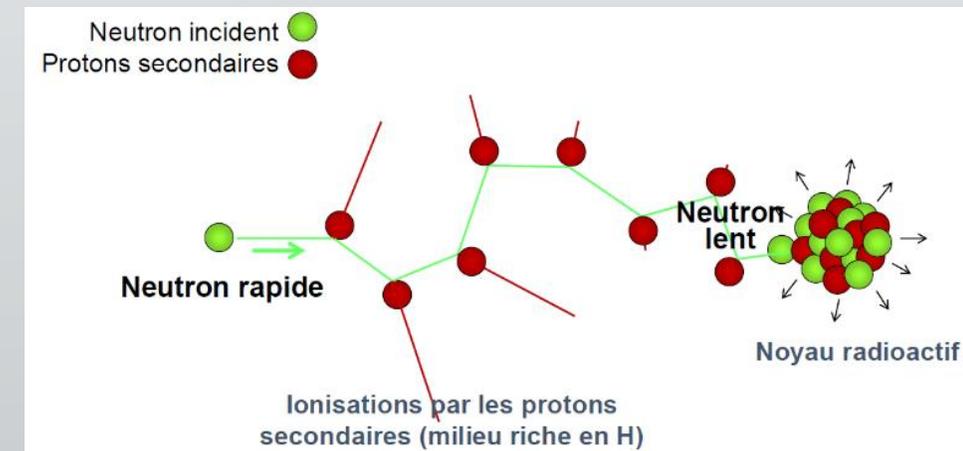
# 4- Interactions des particules avec la matière

## Interactions des neutrons

Neutrons → neutres → interactions balistiques avec les noyaux → **très pénétrants**

On distingue :

- Les neutrons **rapides** :
  - Dans les milieux riches en H → transfert d'E maximal → proton secondaire
  - Dans les milieux composés de noyaux lourds → diffusion
- Les neutrons **lents** : absorbés par les noyaux



# 4- Interactions des particules avec la matière

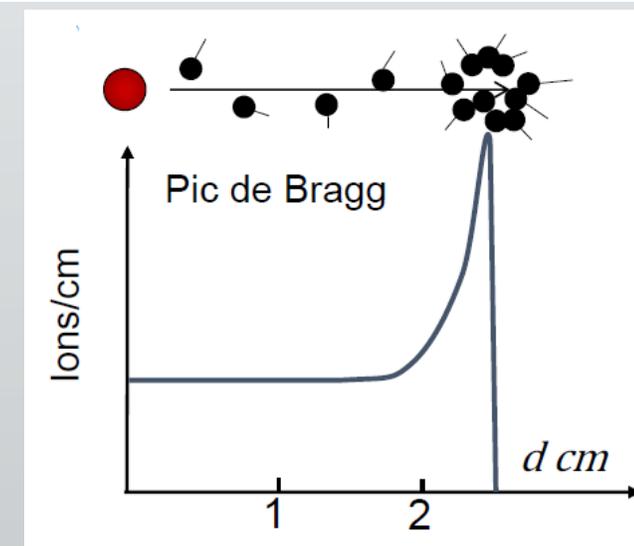
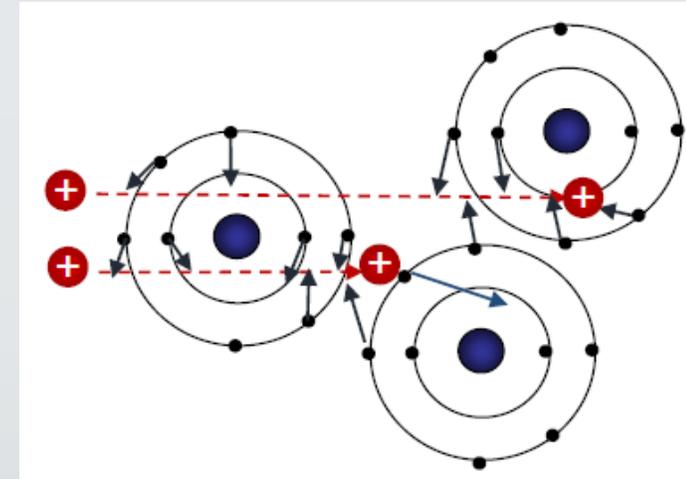
## Interactions des particules chargées positivement

On parle des **protons** ou des **particules  $\alpha$**  qui vont avoir des **interactions coulombiennes** avec les électrons de la matière.

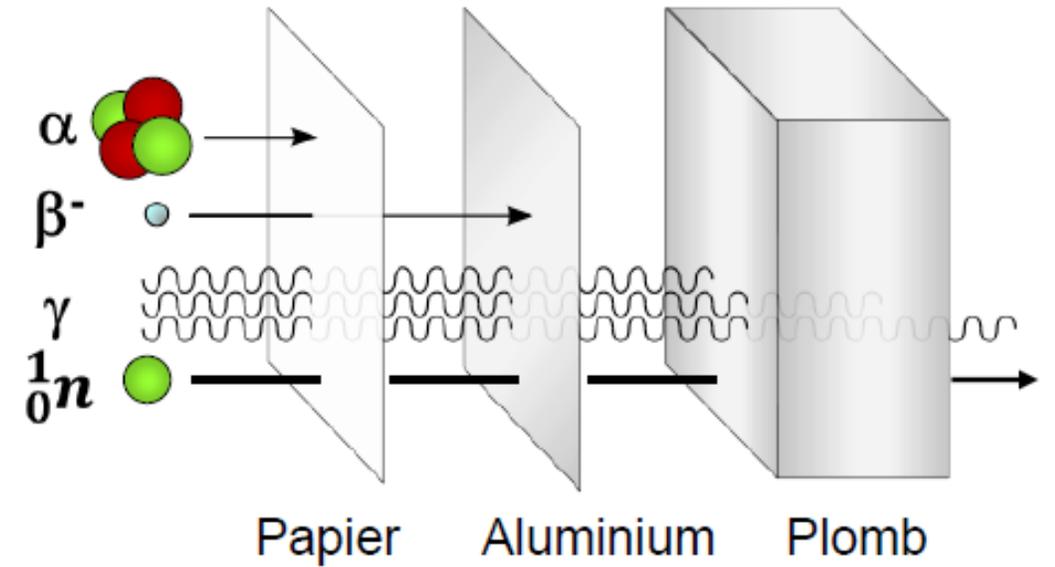
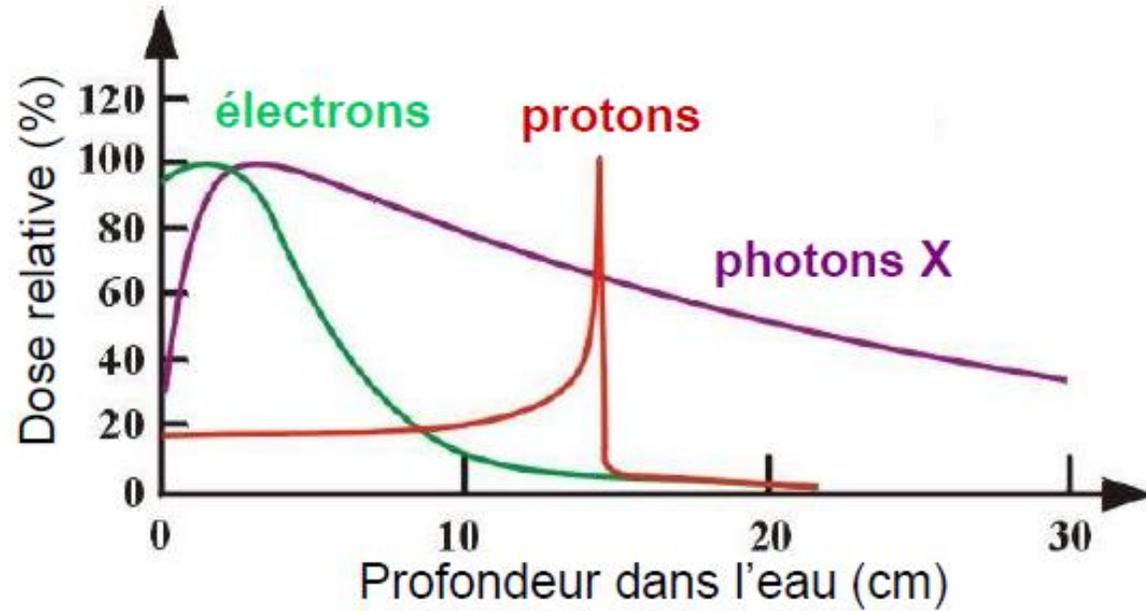
Ce sont des particules **directement ionisantes** avec une masse  $>$  masse de l'électron

Trajectoire **rectiligne**, parcours **court**

**Pic de Bragg** = augmentation brutale de la concentration des ionisations au moment où la vitesse diminue, avec une chute brutale des ionisations à partir d'une certaine distance



# Conclusion



---

# FIN



*Hésitez pas à aller poser vos questions sur le forum !!*



BIOPHYSIQUE  ELITE

