

# Chapitre 4

## Interaction rayonnement-matière

### 1 Interaction Particule-Matière

1.1 Généralités et définitions

1.2 Cas des particules lourdes

1.3 Cas des particules légères

1.4 Rayonnement de freinage (Bremsstrahlung)

1.5 Cas des neutrons

### 2 Interaction rayonnement-matière

2.1 Généralités

2.2 L'effet photoélectrique

2.3 L'effet Compton

2.4 L'effet de matérialisation

2.5 Comparaison des 3 interactions

2.6 loi d'atténuation

# 1 - Interaction particule-matière

## 1-1 Généralités et Définitions

particule + matière  $\Rightarrow$  collision

énergie cinétique + absorbant  $\Rightarrow$  transfert d'énergie

✚ transfert d'énergie dépend :

- de la charge des particules
- du rapport des masses
- de leur énergie initiale

✚ Que devient l'énergie déposée ?

- excitation ou ionisation des at. ou mol.
- absorption nucléaire (plus rare)
- énergie cinétique

# Définitions

## + Les types d'interaction :

Chocs élastiques → pas de transfert d'énergie  
(déviation de trajectoire)

Chocs inélastiques → transfert d'énergie

## + Le parcours $R$ :

= trajet total d'une particule cédant toute son énergie  $E_0$

$$\int_0^R -\frac{dE}{dx} = E_0$$

## + Le parcours moyen $\bar{R}$ :

= l'épaisseur de milieu nécessaire pour atténuer de moitié l'énergie  $E_0$

## ✚ L'ionisation spécifique, $I_s$

- nbre de paires (ion/é) créées par unité de longueur -

$$I_s = \frac{dI}{dx}$$

ionisation totale :

$$I_t = \int_0^{\bar{R}} I_s \cdot dx$$

---

### REMARQUES :

- $I_t$  est proportionnelle à  $E_0$
- s'écrit aussi : Densité Linéique d'Ionisation, **DLI**  
: Densité d'Ionisation Linéaire, **DIL**

---

### EXEMPLES :

- dans l'eau
- 1 é (1MeV)  $\rightarrow I_s = 7$  paires/ $\mu\text{m}$
- 1 p (1MeV)  $\rightarrow I_s = 700$  paires/ $\mu\text{m}$

## + Energie moyenne d'ionisation $\bar{\omega}$ :

= énergie moyenne pour créer une paire électron-ion

$$\bar{\omega} = \frac{E_0}{I_t}$$

## + Transfert Linéaire d'Energie (TLE)

= énergie cédée par unité de longueur par 1 particule

$$\text{T.L.E.} = \frac{dE}{dx} = \bar{\omega} \cdot I_s$$

Le T.L.E. reflète directement la nuisance biologique d'un rayonnement donné

## REMARQUES :

- le T.L.E. est proportionnel à la masse volumique

## EXEMPLES : - dans l'eau

- 1 **é** de 0.5 à 5 MeV → T.L.E. = 0.2 keV/ $\mu$ m

- 1 **p** de 1 MeV → T.L.E. = 20 keV/ $\mu$ m

## 1.2 Interaction des particules lourdes avec la matière ( $\alpha$ ou p)

### + CARACTERISTIQUES :

$I_s$  importante  $\rightarrow$  beaucoup d'interactions

énergie cinétique grande  $\rightarrow$  transfert d'énergie faible

énergie cinétique faible  $\rightarrow$  transfert d'énergie grand

transfert d'énergie  $\rightarrow$  aux  $\dot{e}$  essentiellement

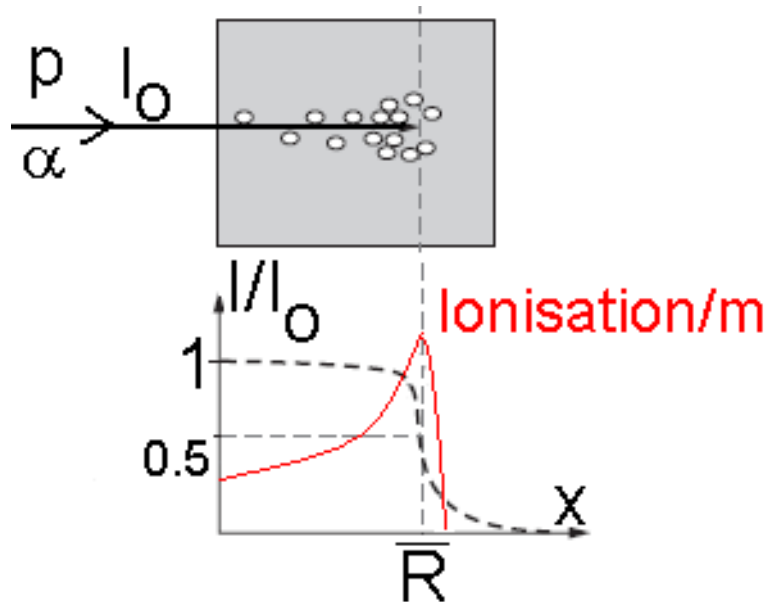
si ionisation  $\rightarrow \dot{e} =$  source secondaire  
( rayonnement  $\delta$ )

Le  $\bar{R}$  dépend de la **masse** et du **Z** de la particule :

$$\bar{R} = k \frac{m}{Z^2}$$

-----

## + CONSEQUENCES :



- trajectoire peu déviée
- ionisation maximale en fin de course
- parcours total proche du parcours moyen

Les tissus "mous" (peau) sont comparables à l'eau  
Épaisseur de l'épiderme  $\approx 70 \mu\text{m}$

### Exemple 1:

le T.L.E.d'1  $\mathbf{p}$  dans l'eau :  $20 \text{ keV} \cdot \mu\text{m}^{-1}$

→ 1 proton de 1 MeV parcourt :  $50 \mu\text{m}$

### Exemple 2:

le T.L.E.d'1  $\mathbf{\alpha}$  dans l'eau :  $130 \text{ keV} \cdot \mu\text{m}^{-1}$

→ 1 particule  $\mathbf{\alpha}$  de 5,3 MeV parcourt :  $40 \mu\text{m}$

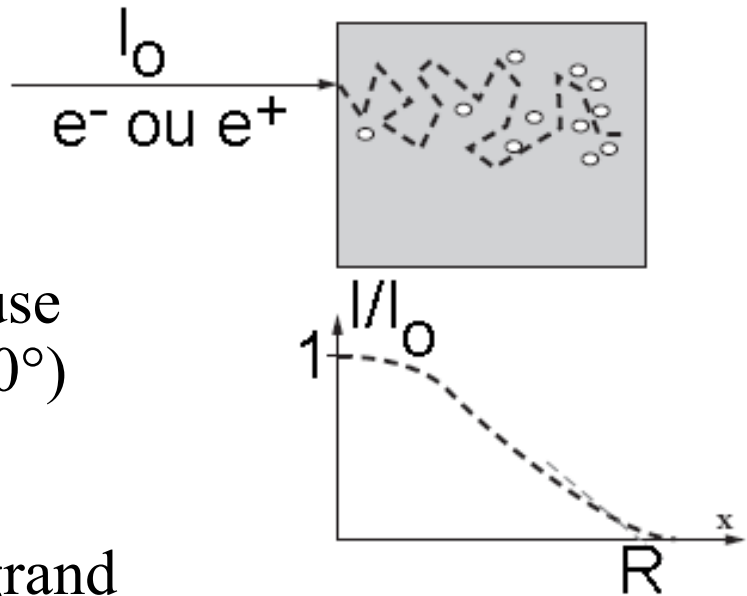
⇒ rayonnement **externe** peu dangereux

⇒ rayonnement **interne** très dangereux (TLE élevé)

# 1.3 Interaction des particules légères avec la matière ( $\beta$ )

## ♦ CARACTERISTIQUES :

- masse plus faible  
→ trajectoire très sinueuse (déviation jusqu'à  $180^\circ$ )
- énergie cinétique faible  
→ transfert d'énergie grand  
⇒ ionisation maximale en fin de course



---

transfert d'énergie → aux  $e$  essentiellement  
→ freinage électrostatique (RX)  
(interaction avec le noyau)

---

- Notion de parcours ambiguë → "portée"

Exemple : dans l'air →  $L(cm) = 350.E(MeV)$

dans l'eau →  $L(cm) = \frac{E (MeV)}{2} (= \bar{R})$   
⇒ rayonnement externe **d**angereux

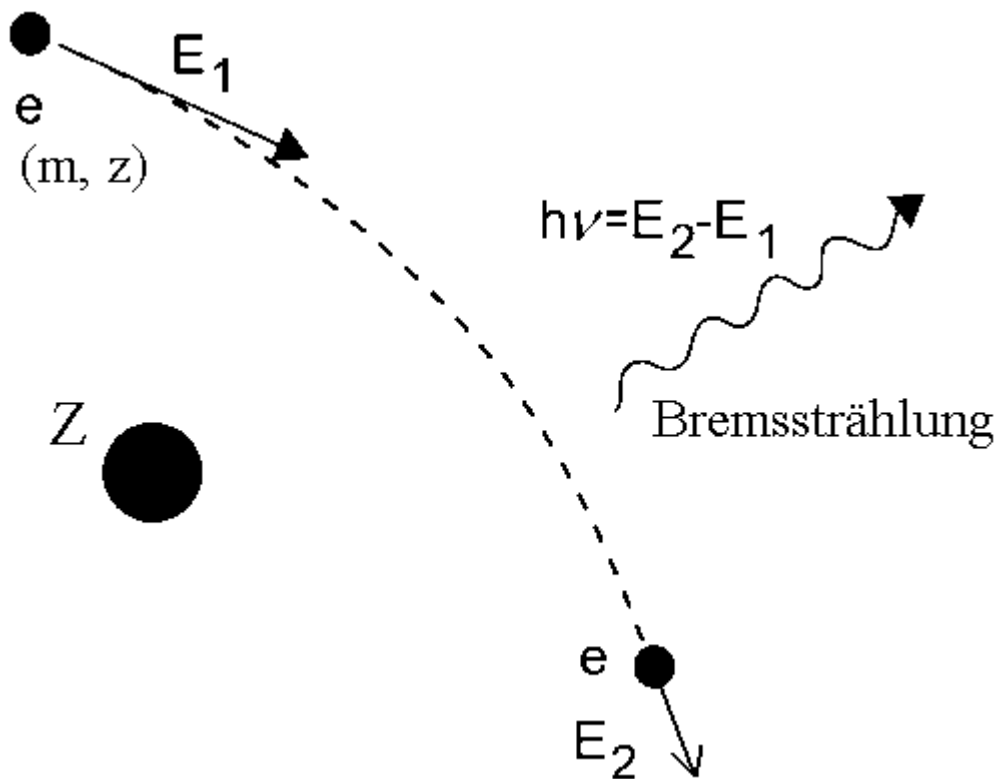
# 1.4 Rayonnement de freinage (Bremsstrahlung)

- 1 particule chargée ( $m, z$ ) se déplace dans un milieu
- au voisinage d'un noyau ( $Z$ )  $\rightarrow$  déviation, freinage
- énergie perdue proportionnelle à la (décélération)<sup>2</sup> :

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{z.Ze^2}{mr^2}$$

- Donc inversement proportionnelle à la (masse)<sup>2</sup>

$\Rightarrow$  pour 1  $\dot{e}$  ralenti, le rayonnement est 1 photon  $X$

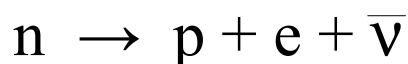


# 1.5 Interaction des neutrons avec la matière

- neutrons rapides :  $E > 0,8\text{MeV}$ 
  - ⇒ pénétration plus "profonde" (noyau)
  - ⇒ provoque plus de dégâts
  - ⇒ perte d'énergie par collisions avec les noyaux (H de préférence)
- neutrons thermiques ou lents :  $E < 1\text{ eV}$ 
  - $\lambda$  comparable aux dimensions atomiques
  - ⇒ absorption par les noyaux → émission  $\gamma$
  - ⇒ production de radioéléments
- neutrons épithermiques :  $1\text{ eV} < E < 0,8\text{ MeV}$

---

désintégration en proton + électron :



# 2 - Interaction des rayons X et $\gamma$ avec la matière

## 2-1 Généralités

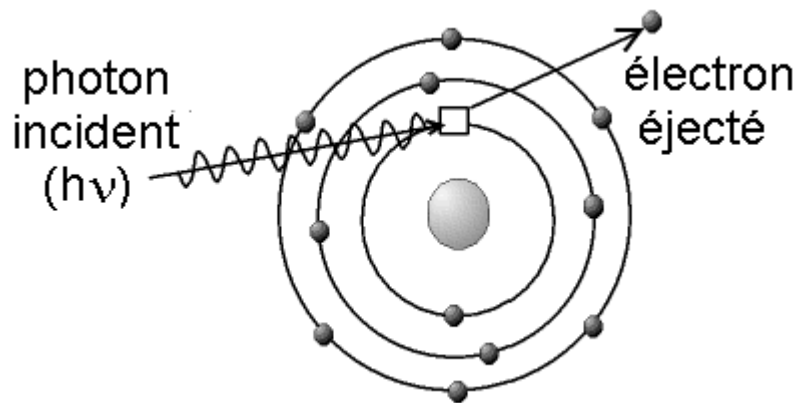
- On ne considère ici que les rayons X et les rayons  $\gamma$

### + Comparaisons

- interaction particule-matière
  - perte d'énergie de chaque particule
- interaction rayon-matière
  - diminution du nombre total de photons
    - = absorption vraie
    - = diffusion (création d'1 autre photon)
- 3 types d'interaction particule-matière
  - effet photoélectrique
  - effet Compton
  - Création de paires

## 2-2 Effet photoélectrique

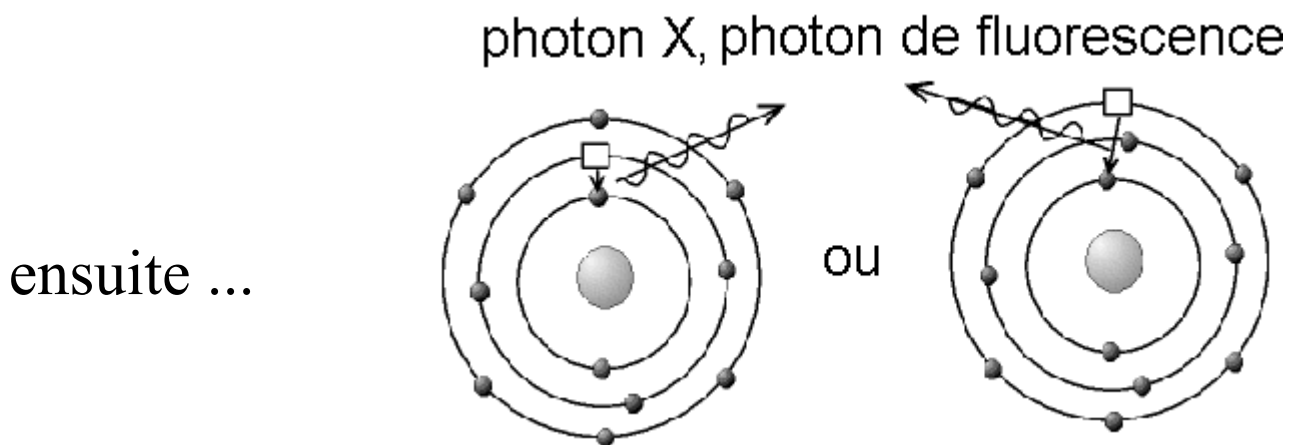
Interaction entre 1 photon  $\gamma$  et 1  $e^-$  atomique très lié



$$E = W + E_c$$

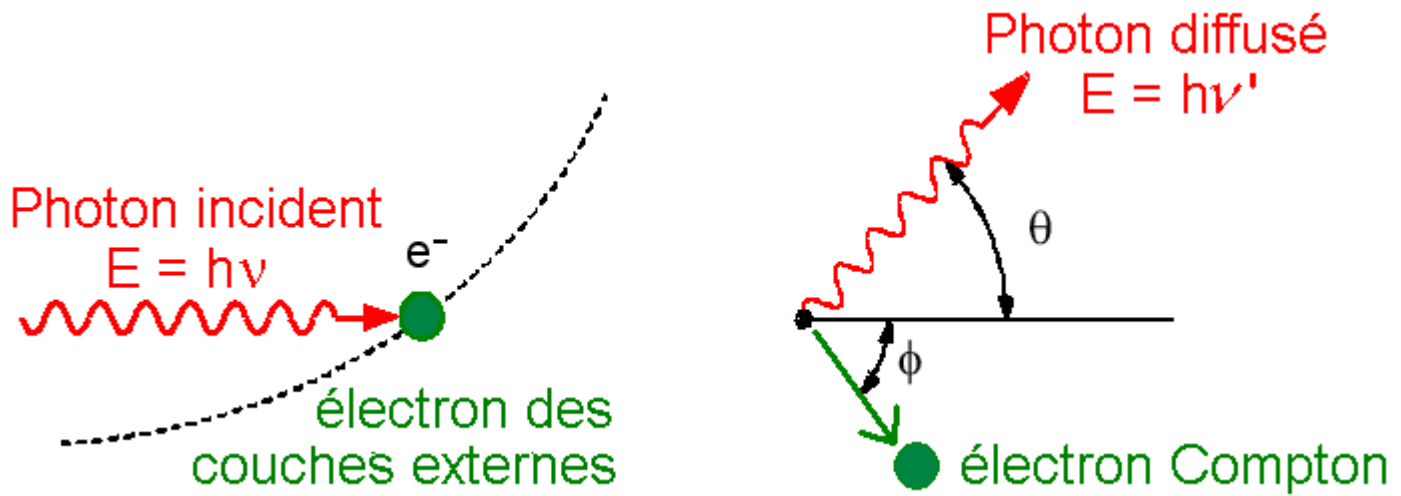
énergie du photon = énergie d'ionisation + énergie cinétique de l' $e^-$

- absorption totale du photon
- existence seuil d'ionisation
- se produit sur les niveaux K, L
- forte probabilité quand  $E \approx W$



## 2-3 Effet Compton

Interaction entre 1 photon  $\gamma$  et 1  $e^-$  atomique peu lié  
(ou libre)



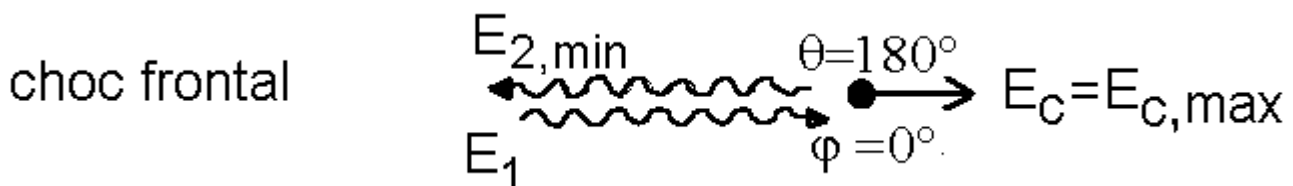
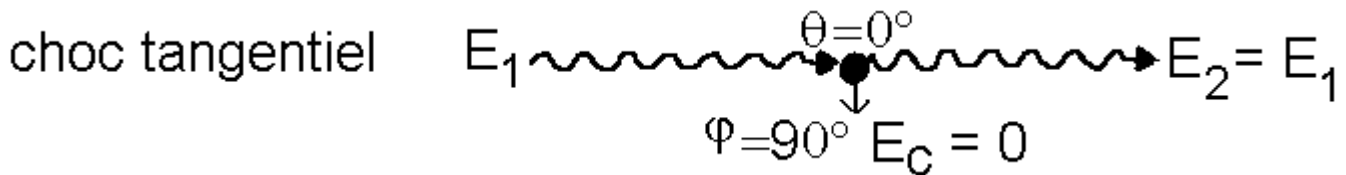
$$E = W + E_c + h\nu'$$

énergie du photon    énergie d'ionisation    énergie cinétique de l' $e^-$     énergie du photon diffusé

angle de diffusion du photon  $\theta$  et son énergie  $h\nu'$   
sont liés par :

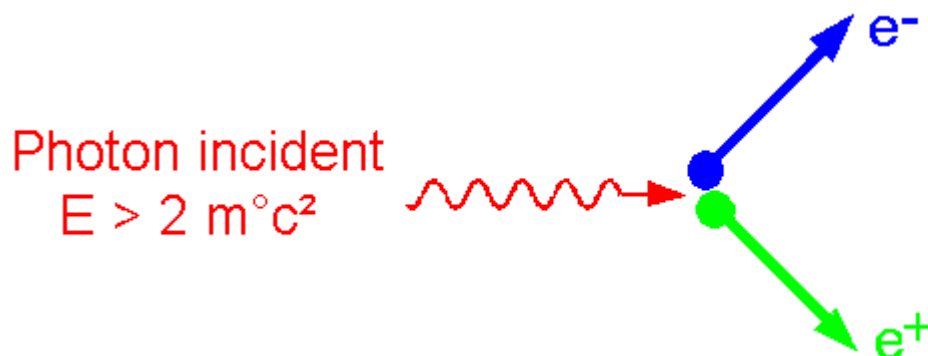
$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \lambda_C \cdot (1 - \cos\theta)$$

$\lambda_C =$  longueur d'onde de Compton  $= h/m_e c$



## 2-4 Création de paires

matérialisation d'un photon en paire  
particule/antiparticule



→ se produit à proximité d'un noyau

→ énergie du photon incident  $> 2 \times 511 \text{ keV}$

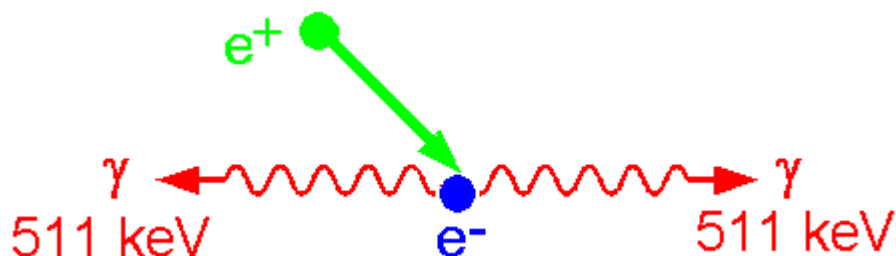
---

ensuite ...

... les 2 particules perdent leur énergie par collisions...

... l'électron finit par s'attacher ...

... et le positon s'annihile avec un  $e^-$  libre ou peu lié



# 2-5 Comparaison des 3 interactions

Par rapport au faisceau incident :

Effet photoélectrique → absorption totale

Effet Compton → absorption partielle et diffusion

Création de paires → absorption totale

---

Par rapport à la cible :

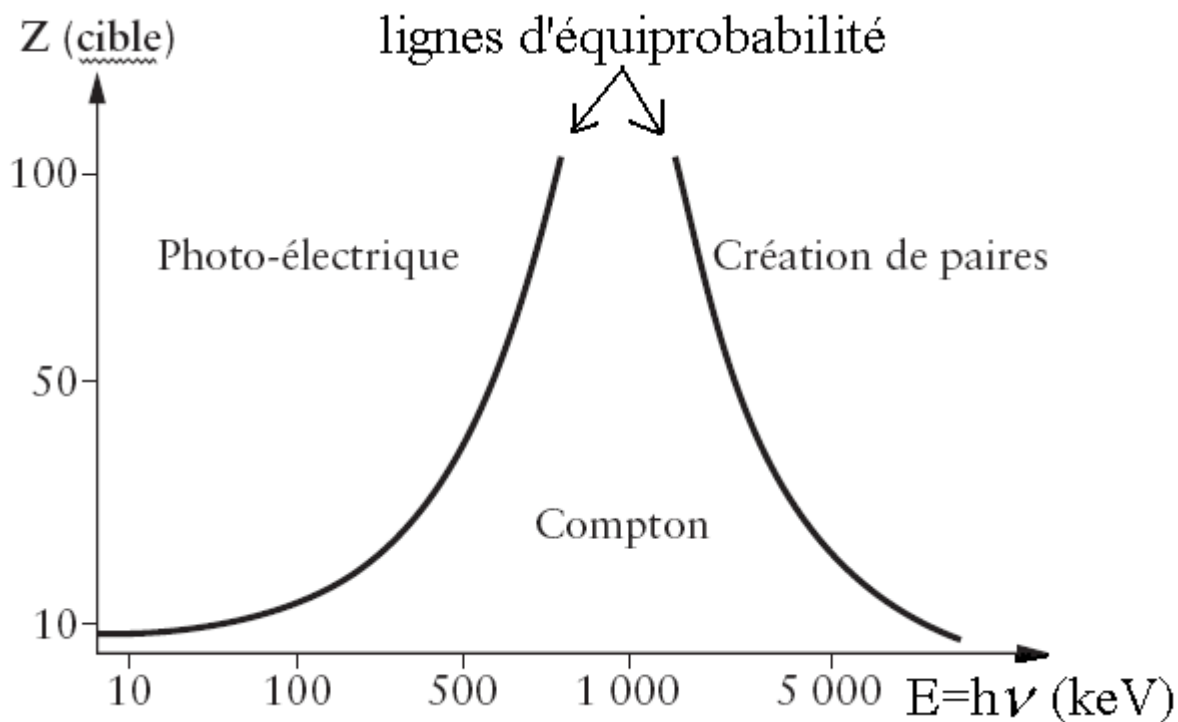
Effet photoélectrique → électrons K ou L

Effet Compton → électrons périphériques

Création de paires → noyau

---

domaine d'énergie



## 2-6 Loi d'atténuation des photons

interaction photon-matière → phénomène aléatoire

la probabilité est proportionnelle :

- à l'épaisseur du milieu traversé  $dx$
- au nombre  $N(x)$  de photons

$$dN(x) = -\mu N(x).dx$$

coefficient  
linéique  
d'atténuation ( $m^{-1}$ )

Si  $N_0$  est le nombre de photons en  $x = 0$  :

$$N(x) = N_0 \cdot e^{-\mu x}$$

$\mu$  = la probabilité d'interaction (en  $m^{-1}$ )

---

On peut utiliser l'intensité du faisceau  $I(x)$  :  
(proportionnel à  $N(x)$ )

$$I(x) = I_0 \cdot e^{-\mu x}$$

## **+ Demi-atténuation et parcours moyen**

Comme on a défini la période et la vie moyenne, on définit :

- la couche de demi-atténuation  $CDA$

$$CDA = \frac{\text{Log}2}{\mu}$$

Exemples de valeurs de demi-atténuation en cm

<b>E (MeV)</b>	<b>Eau (d = 1)</b>	<b>Tissus humains (d <math>\cong</math> 1)</b>	<b>Verre (d = 2,7)</b>	<b>Plomb (= 10,8)</b>
<b>0,1</b>	<b>4,1</b>	<b>4,2</b>	<b>1,5</b>	<b>0,12</b>
<b>1</b>	<b>10</b>	<b>10</b>	<b>4</b>	<b>0,94</b>
<b>2</b>	<b>14</b>	<b>14</b>	<b>6</b>	<b>1,4</b>

- le parcours moyen  $p$

$$p = \frac{1}{\mu} = \frac{CDA}{\text{Log}2}$$

## **+ Section efficace**

section efficace  $\sigma$  = section « apparente » d'1 élément  
( $\sigma_a$  pour l'atome,  $\sigma_e$  pour l'électron ...)

Le calcul de  $\mu$  se fait à partir de la section efficace :

$$\mu = n\sigma$$

( $n$  = densité d'éléments de section efficace  $\sigma$ )

## **+ Coefficient global d'atténuation**

1 coefficient par type d'interaction :

- l'effet photoélectrique  $\rightarrow$  ( $\tau$ )
- l'effet Compton  $\rightarrow$  ( $\sigma$ )
- l'effet de matérialisation  $\rightarrow$  ( $\varepsilon$ )

Le coefficient global d'atténuation s'écrit :

$$\mu = \tau + \sigma + \varepsilon$$

**FINI POUR AUJOURD'HUI!**