

# PASS

## Parcours d'Accès Santé Spécifique

Biophysique

UE 11

Cours 4

Pr François Rouzet



# Interaction des rayonnements ionisants avec la matière

François Rouzet

Service de Médecine Nucléaire et Biophysique  
GH Bichat-Claude Bernard

# Interaction rayonnements / matière

- Double intérêt :
  - Détection des rayonnements (imagerie)
  - Effets biologiques = radiobiologie / radioprotection
- Rayonnements ionisants
  - Électromagnétiques : photons
    - X,  $\gamma$ , freinage, annihilation
  - Particulaires
    - Chargés :  $\alpha$ ,  $\beta^-$ ,  $\beta^+$ , protons
    - Neutres : neutrons

# Interaction rayonnements / matière

Rayonnements ionisants (seuil > 13,6 eV) :

- Directement : les particules incidentes chargées, provoquent directement (interactions coulombiennes = obligatoires) une série d'ionisations
  - $\alpha$ ,  $\beta^-$ ,  $\beta^+$ , protons
- Indirectement : le rayonnement incident produit (interaction aléatoire) un rayonnement secondaire de particules chargées qui vont à leur tour provoquer une série d'ionisations
  - Neutrons, Photons

# Energie rayonnée

Répartition spatiale de l'énergie rayonnée (source ponctuelle)

**Flux énergétique** (puissance) : quantité d'énergie émise par unité de temps

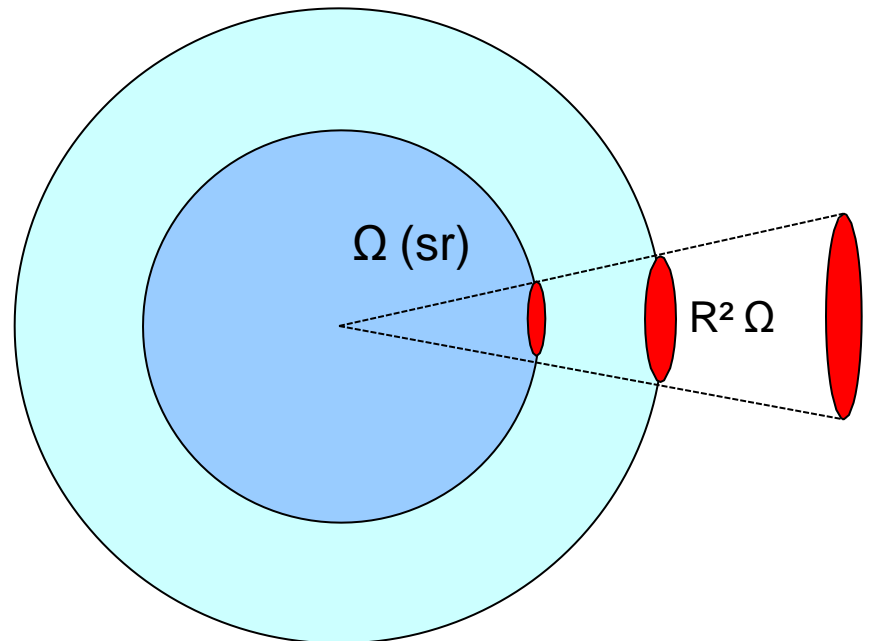
$$\Phi = dE/dt \text{ (W [J/s])}$$

**Intensité** (puissance angulaire) : flux d'énergie dans un angle solide  $\Omega$

$$J = d\Phi/d\Omega \text{ (W/sr)}$$

$\Omega$  : angle solide exprimé en stéradian (sr), correspond au rapport entre la surface de la calotte sphérique ( $S$ ) et le carré du rayon.

$$S = R^2 \Omega$$

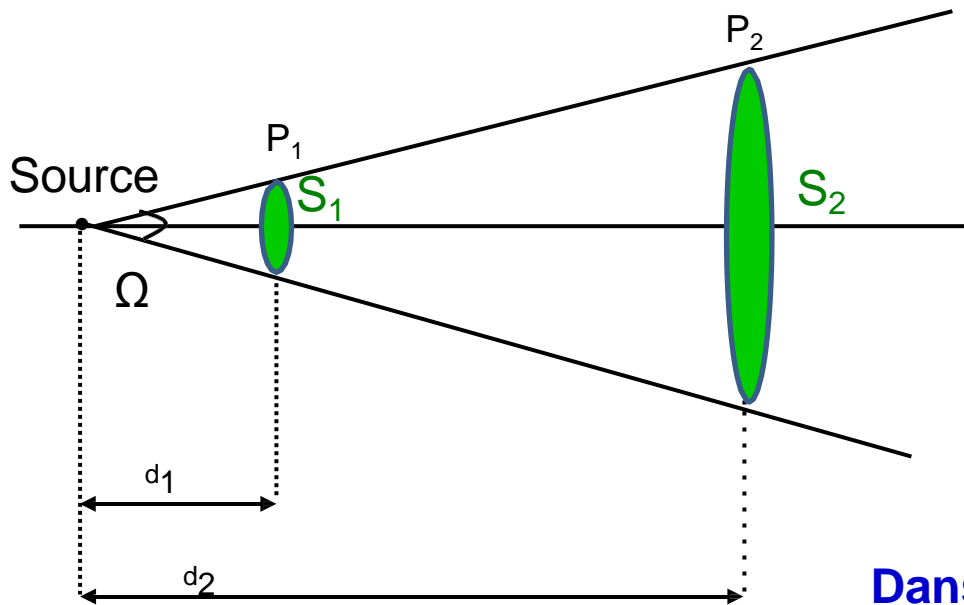


# Energie rayonnée

Répartition spatiale de l'énergie rayonnée (source ponctuelle)

**Fluence énergétique** : quantité d'énergie par unité de surface

$$F = dE/dS \text{ (J/m}^2\text{)}$$



$$F_1 = dE/dS_1 \text{ et } F_2 = dE/dS_2$$

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{S_2}{S_1} = \frac{d_2^2 \Omega}{d_1^2 \Omega} = \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^2$$

**Dans le vide, la fluence énergétique décroît comme le carré de la distance à la source**

# INTERACTION DES PHOTONS AVEC LA MATIÈRE

# Interactions élémentaires

## – Électrons atomiques

- Effet photoélectrique
- Diffusion Compton

## – Noyau

- Création de paires (matérialisation)
- Réaction photonucléaire  
=> négligeable pour des  $E (h\nu) < 10 \text{ MeV}$

## – Ensemble de l'atome

- Diffusion Thomson-Rayleigh  
=> négligeable pour des  $E (h\nu) > 45 \text{ keV}$

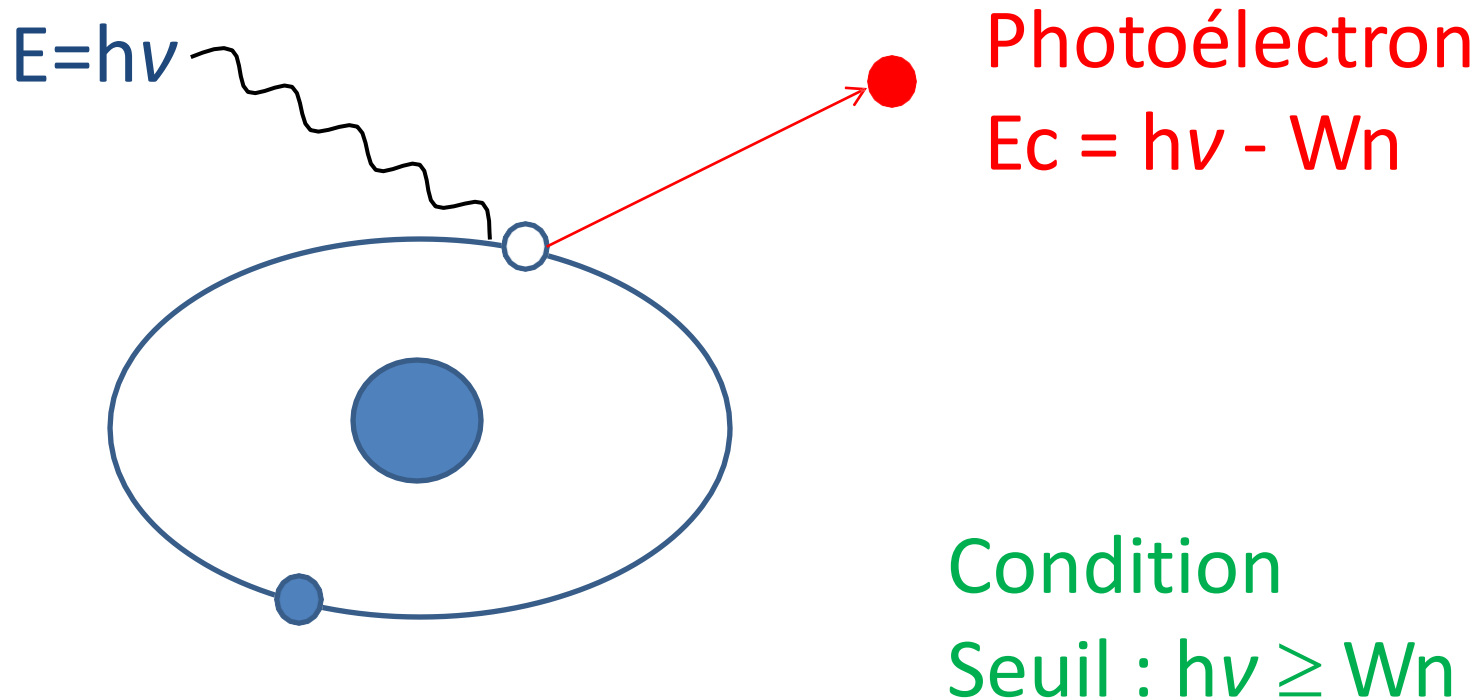


# Effet photoélectrique

Mécanisme : interaction d'un photon incident avec un électron atomique d'une couche profonde

- Éjection de l'électron du cortège électronique, qui devient un photoélectron (ionisation)
- Transfert de la totalité de l'énergie du photon au photoélectron
- Absorption totale du photon (disparition)

# Effet photoélectrique



$E=hf$  : énergie du photon incident

$W_n$  : énergie de liaison de l'électron sur la couche  $n$

# Effet photoélectrique

## Conséquences

- Excédent d'énergie conféré au photoélectron sous forme d'énergie cinétique
- Source secondaire d'ionisations et d'excitations du milieu
- Désexcitation du milieu par émission
  - d'un rayonnement de fluorescence (spectre de raies)
  - d'électrons Auger

# Effet photoélectrique

Probabilité d'interaction par effet photoélectrique :  $\tau$

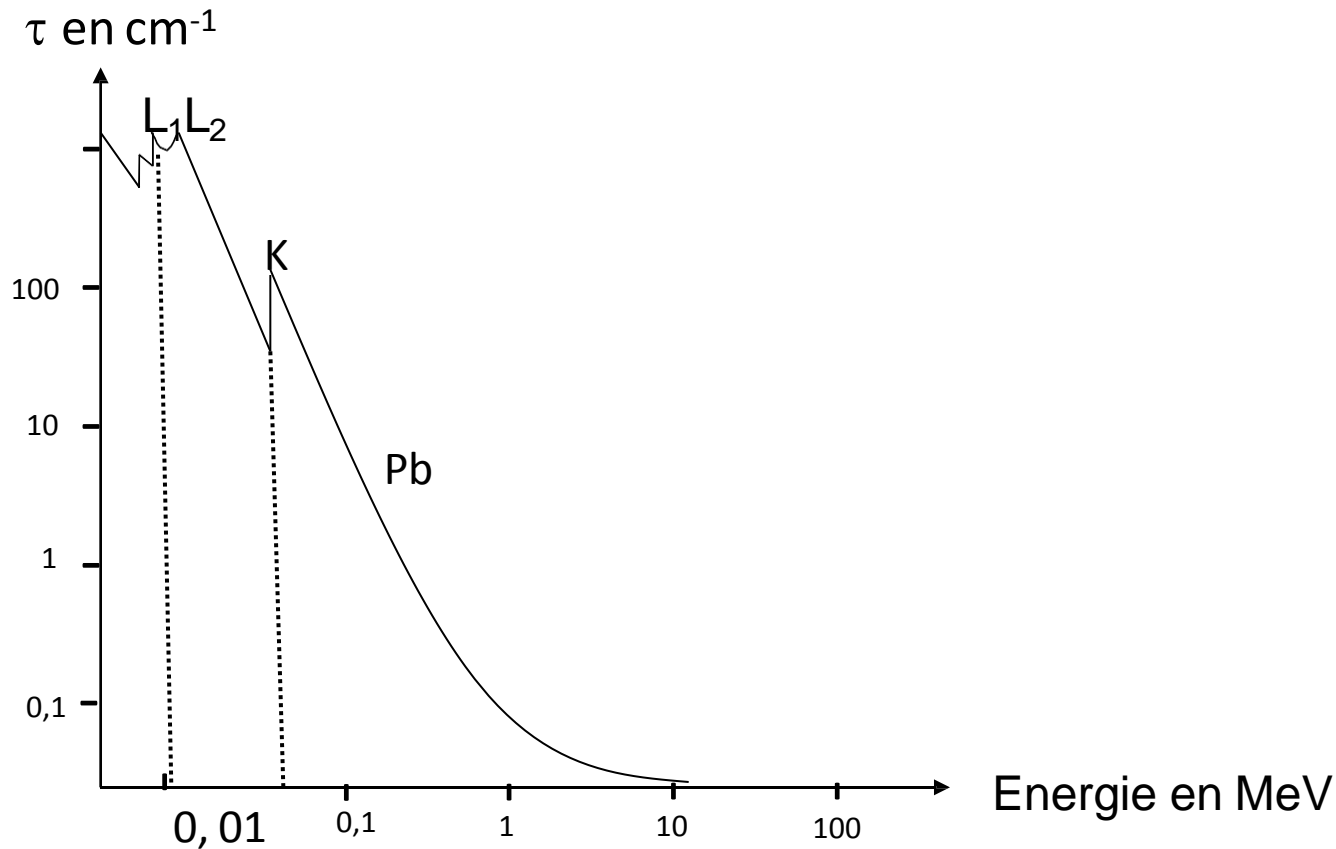
- Augmente avec le numéro atomique  $Z$  du milieu
- Diminue lorsque l'énergie du rayonnement augmente
- Est proportionnelle à la masse volumique du milieu

$$\tau = C_i \cdot \rho \cdot \frac{Z^3}{E^3} \quad (\text{Unité : cm}^{-1})$$

**$C_i$**  : constante caractéristique de la couche électronique sur laquelle se trouve l'électron

# Effet photoélectrique

Valeur de  $\tau$  en fonction de l'énergie du faisceau incident

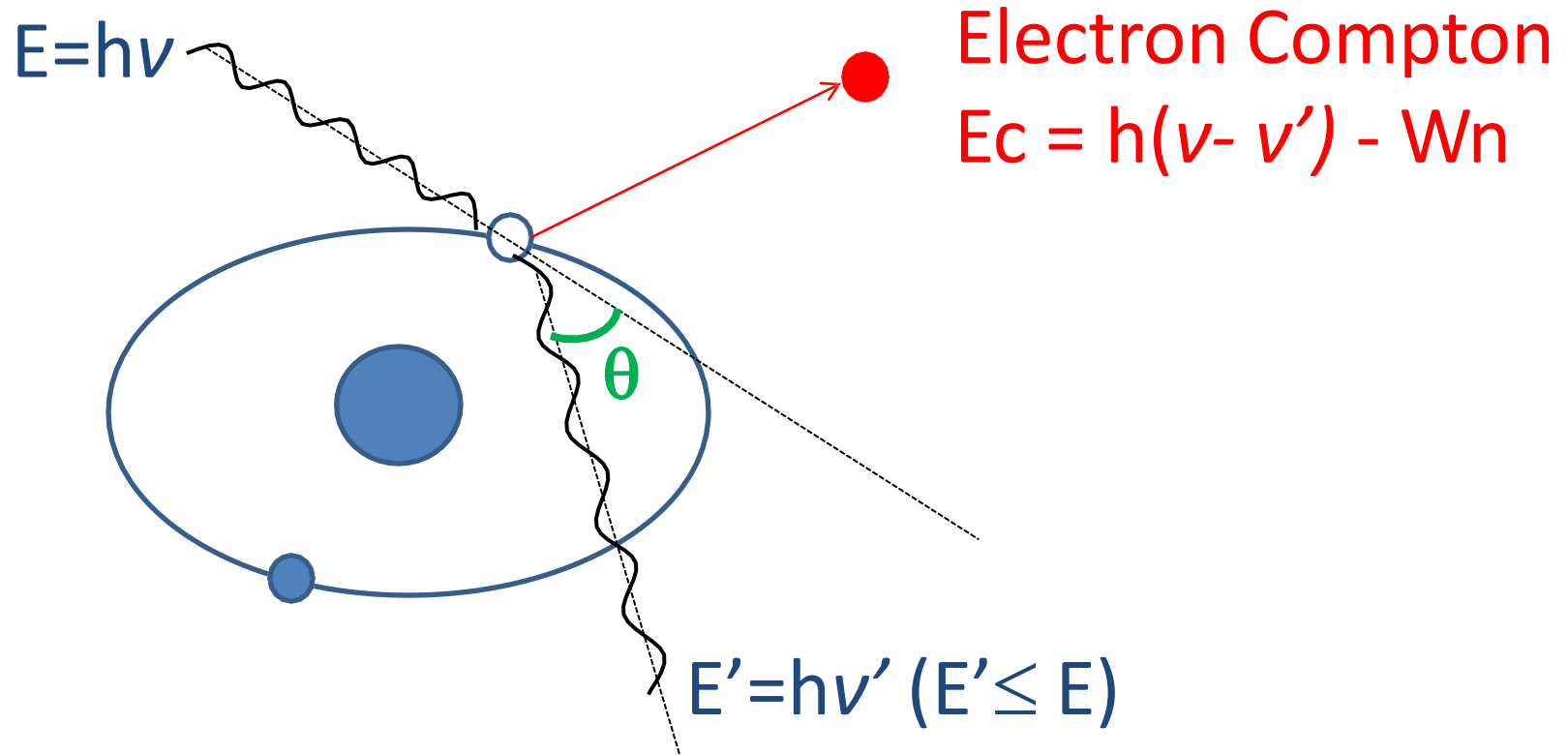


# Effet Compton

Mécanisme : interaction d'un photon incident avec un électron peu lié ou libre.

- Le photon incident est diffusé dans une direction différente de la direction initiale et avec une énergie inférieure à l'énergie initiale
- Le transfert d'énergie est partiel, et variable
- L'électron est chassé de son orbite (électron Compton ou électron de recul)

# Effet Compton



$E = h\nu$  : énergie du photon incident ;  $E' = h\nu'$  : énergie du photon diffusé

$W_n$  : énergie de liaison de l'électron sur la couche  $n$

# Effet Compton

La conservation de l'énergie et de la quantité de mouvement permettent de déterminer la relation entre la direction ( $\theta$ ) et l'énergie ( $E'$ ) du photon diffusé :

$$\frac{1}{E'} - \frac{1}{E} = \frac{1}{m_0 c^2} (1 - \cos \theta)$$

Plus l'énergie du photon incident augmente, plus le photon diffusé sera dirigé vers l'avant

$m_0 c^2$  : masse de l'électron au repos (511 keV)

$\theta$  : angle séparant la direction du photon incident et celle du photon diffusé



# Effet Compton

Énergie du *photon diffusé* :

$$E' = \frac{E}{1 + \frac{E}{m_0 c^2} (1 - \cos \theta)}$$

Énergie de *l'électron Compton* ( $E_c = E - E'$ ) :

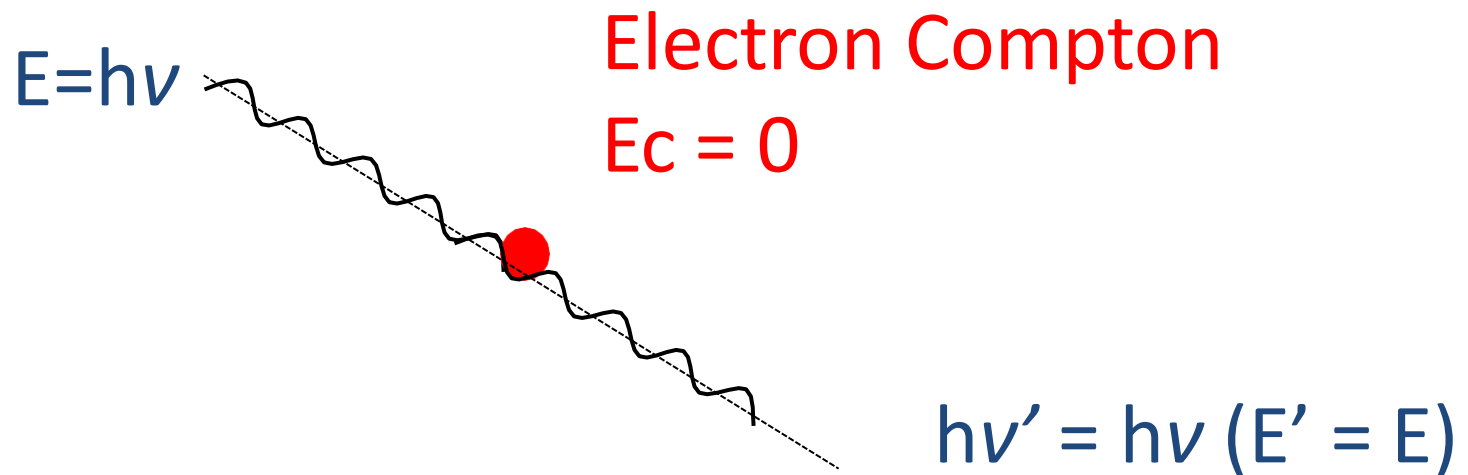
$$E_c = E - \frac{E}{1 + \frac{E}{m_0 c^2} (1 - \cos \theta)}$$

$m_0 c^2$  : masse de l'électron au repos (511 keV)

$\theta$  : angle séparant la direction du photon incident et celle du photon diffusé

# Effet Compton

Cas particulier : choc tangentiel ( $\theta = 0$ )



$E = h\nu$  : énergie du photon incident ;  $E' = h\nu'$  : énergie du photon diffusé  
 $\theta$  : angle séparant la direction du photon incident et celle du photon diffusé

# Effet Compton

Cas particulier : choc frontal ( $\theta = 180^\circ$ )

$$E = h\nu$$



Electron Compton

$E'$  = Photon rétrodiffusé

$$E' = \frac{E}{1 + \frac{2 \cdot E}{m_0 c^2}}$$

$$E_c = E - \frac{E}{1 + \frac{2 \cdot E}{m_0 c^2}}$$

$E = h\nu$  : énergie du photon incident ;  $E' = h\nu'$  : énergie du photon rétrodiffusé  
 $\theta$  : angle séparant la direction du photon incident et celle du photon diffusé  
 $m_0 c^2$  : masse de l'électron au repos (511 keV)

# Effet Compton

## Conséquences

- Les photons diffusés et les électrons Compton ne sont pas mono-énergétiques (spectre continu)
- Les électrons Compton, toujours dirigés vers l'avant, épuisent leur énergie cinétique dans le milieu (ionisations + excitations)
- Désexcitation du milieu par émission
  - d'un rayonnement de fluorescence (spectre de raies)
  - d'électrons Auger

# Effet Compton

Probabilité d'interaction par effet Compton :  $\sigma$

- Est proportionnel au numéro atomique (Z) du milieu
- Diminue lorsque l'énergie (E) du rayonnement augmente

$$\sigma = B \cdot \frac{Z}{E} \quad (\text{Unité : cm}^{-1})$$

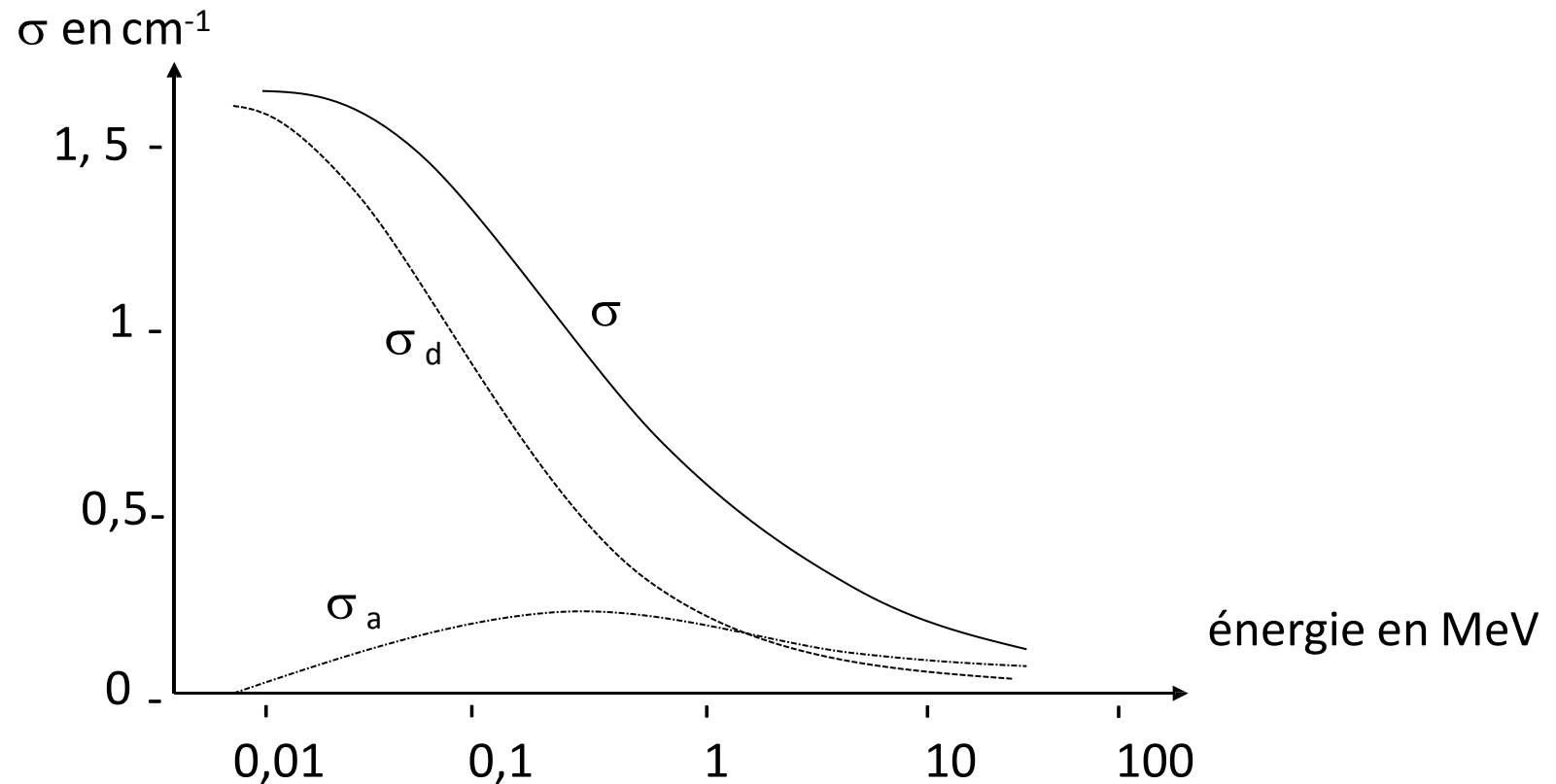
**B** : constante

Le coefficient d'atténuation par effet Compton est la somme de 2 composantes :

- Énergie (des photons) **diffusée** hors du milieu :  $\sigma_d$
- Énergie (des électrons) **absorbée** dans le milieu :  $\sigma_a$

# Effet Compton

Valeur de  $\sigma$  en fonction de l'énergie du faisceau incident



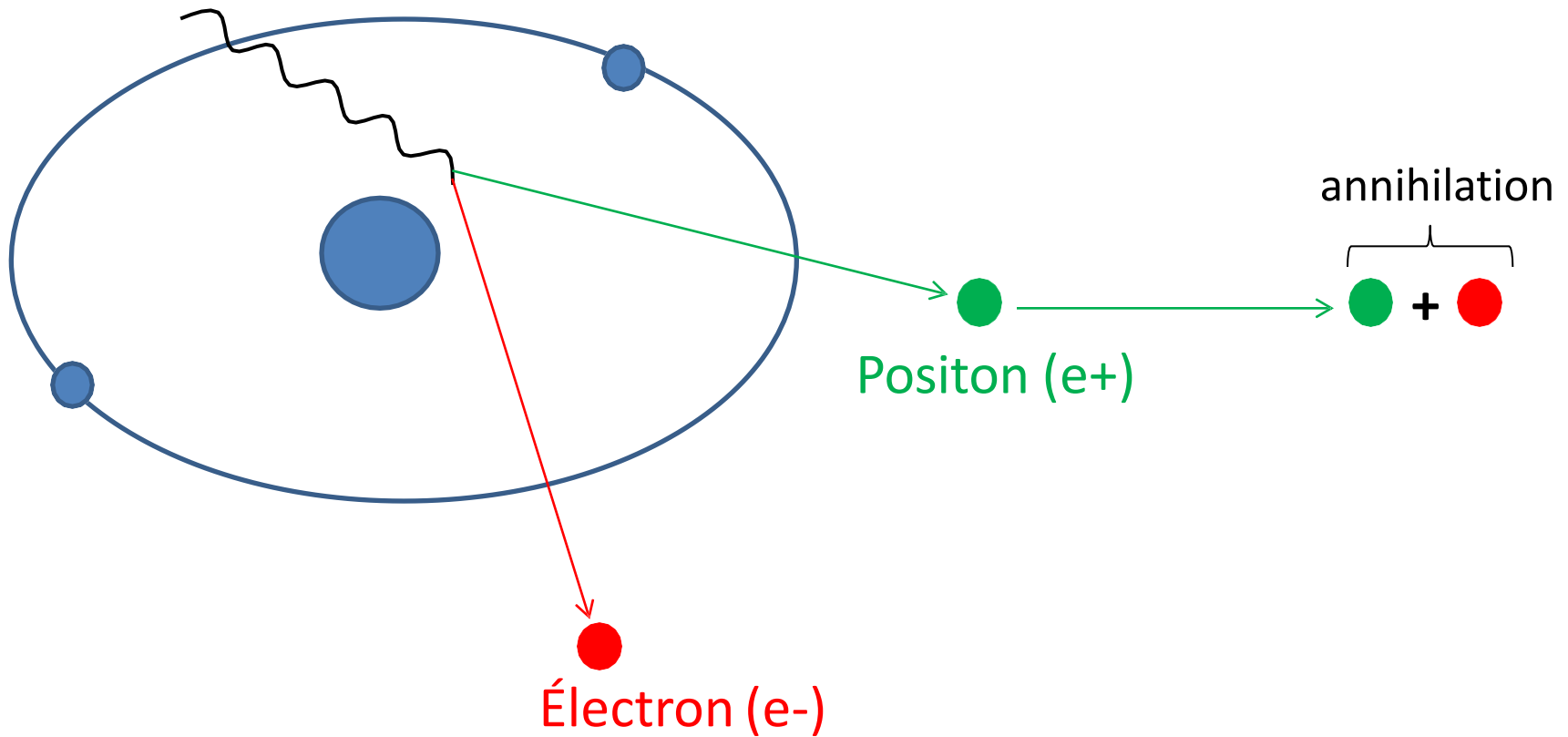
# Création de paires

Mécanisme : interaction d'un photon avec le champ électrostatique d'un noyau, aboutissant à sa matérialisation en 1 électron + 1 positon

- Seuil : l'énergie du photon incident doit être au moins équivalente à la masse au repos de 2 électrons (1,022 MeV)
- L'excédent d'énergie est partagé entre l'électron et le positon sous forme d'énergie cinétique

# Création de paires

$$E = h\nu (\geq 1,022 \text{ MeV})$$





# Création de paires

## Conséquences

- L'électron et le positon épuisent leur énergie dans le milieu (ionisations + excitations)
- Désexcitation du milieu par émission d'un rayonnement de fluorescence (spectre de raies) et d'électrons Auger
- **Réaction d'annihilation**
  - lorsque l'énergie cinétique du positon tend vers 0
  - Émission à  $180^\circ$  de 2 photons d'annihilation ( $511 \text{ keV} =$  masse au repos des 2 particules)

# Création de paires

Probabilité d'interaction par création de paires :  $\pi$

- Est nulle pour des valeurs d'énergie ( $E$ )  $< 1,022$  MeV
- Est proportionnelle au numéro atomique ( $Z$ ) du milieu

$$\pi = C \cdot Z \quad (\text{Unité : cm}^{-1})$$

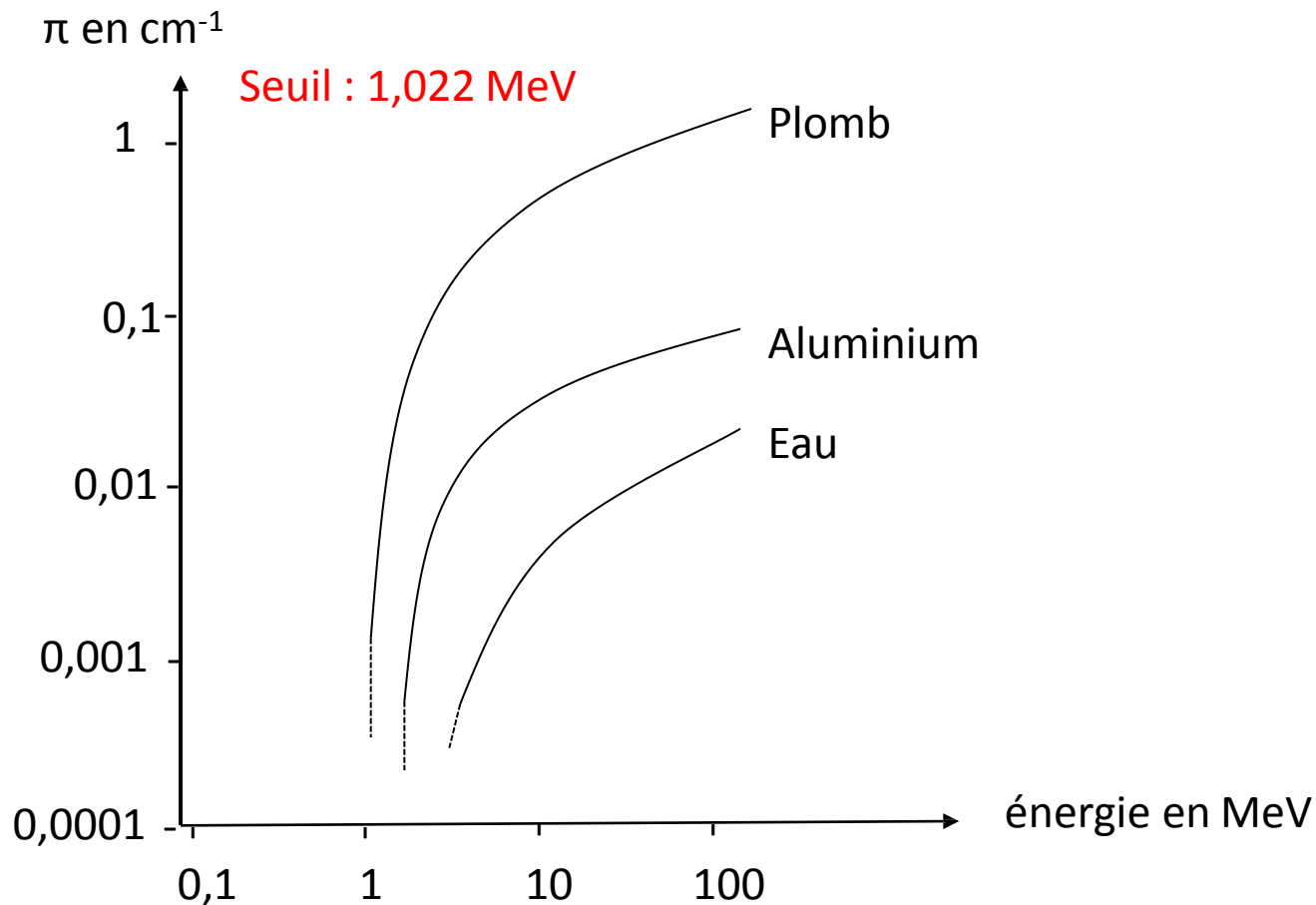
$C$  : constante

Le coefficient d'atténuation par création de paires est la somme de 2 composantes :

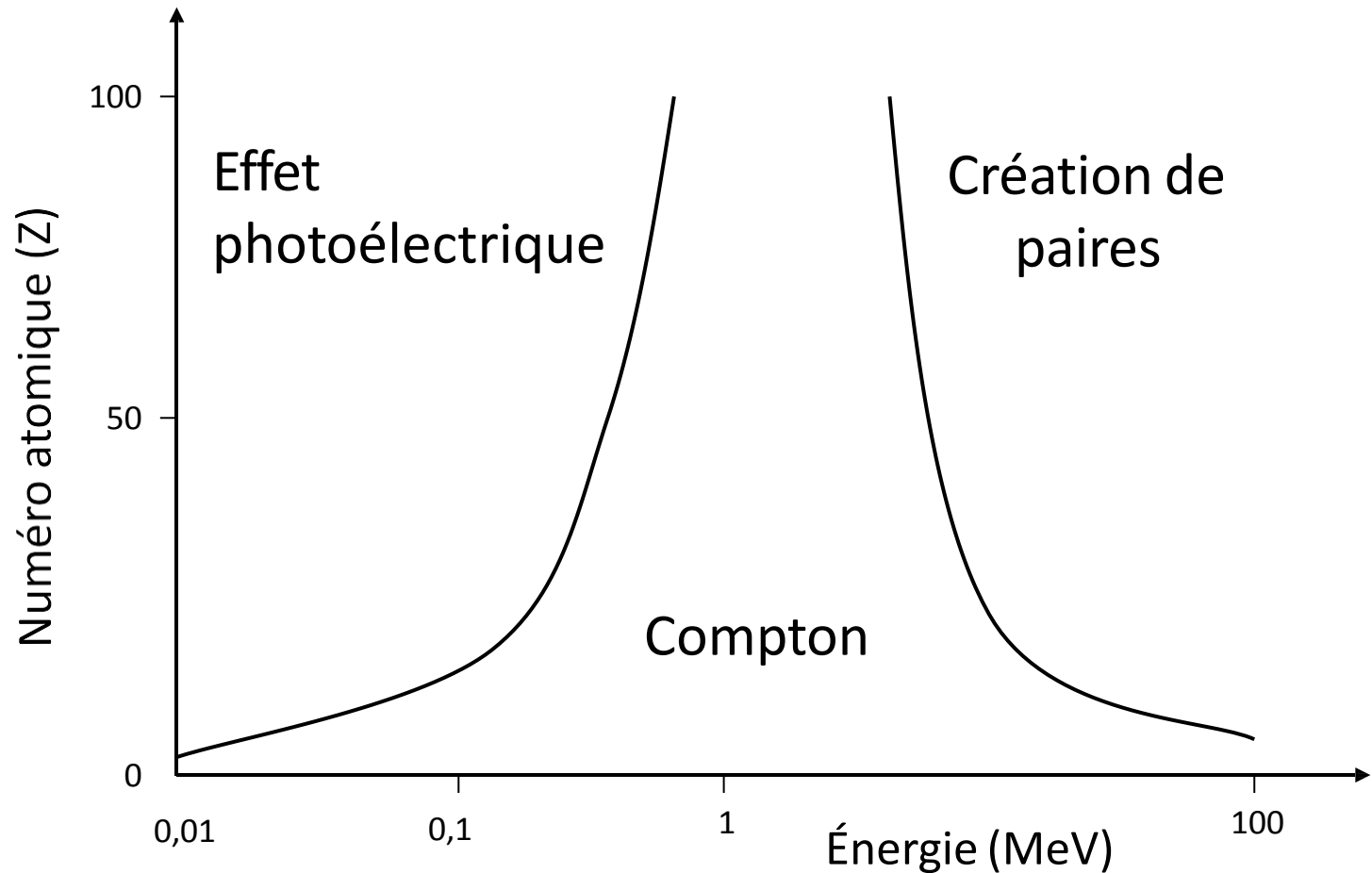
- Énergie (des photons) **diffusée** hors du milieu :  $\pi_d$
- Énergie (des électrons) **absorbée** dans le milieu :  $\pi_a$

# Création de paires

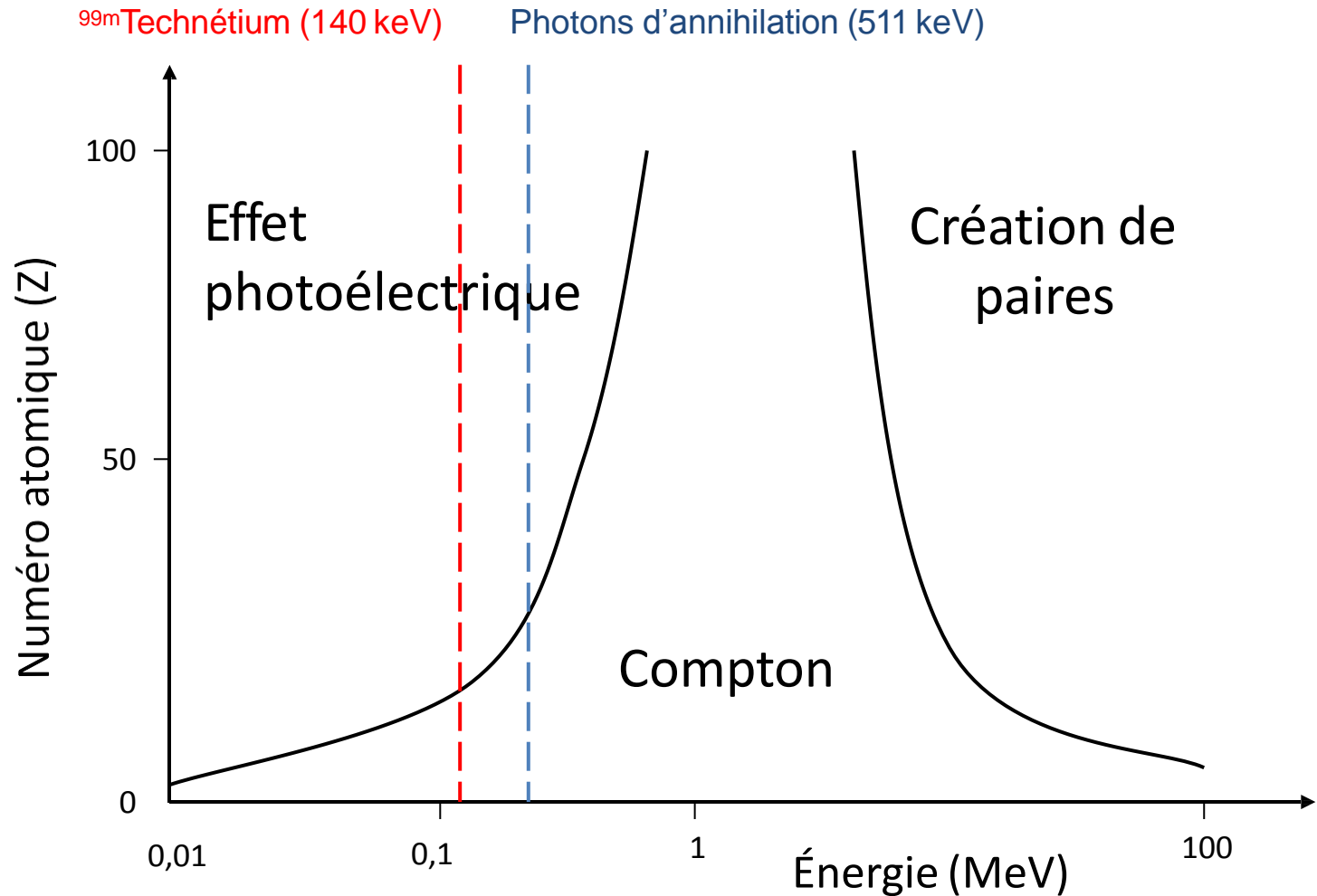
Valeur de  $\pi$  en fonction de l'énergie du faisceau incident



# Effet prédominant en fonction de Z et E



# Effet prédominant en fonction de Z et E

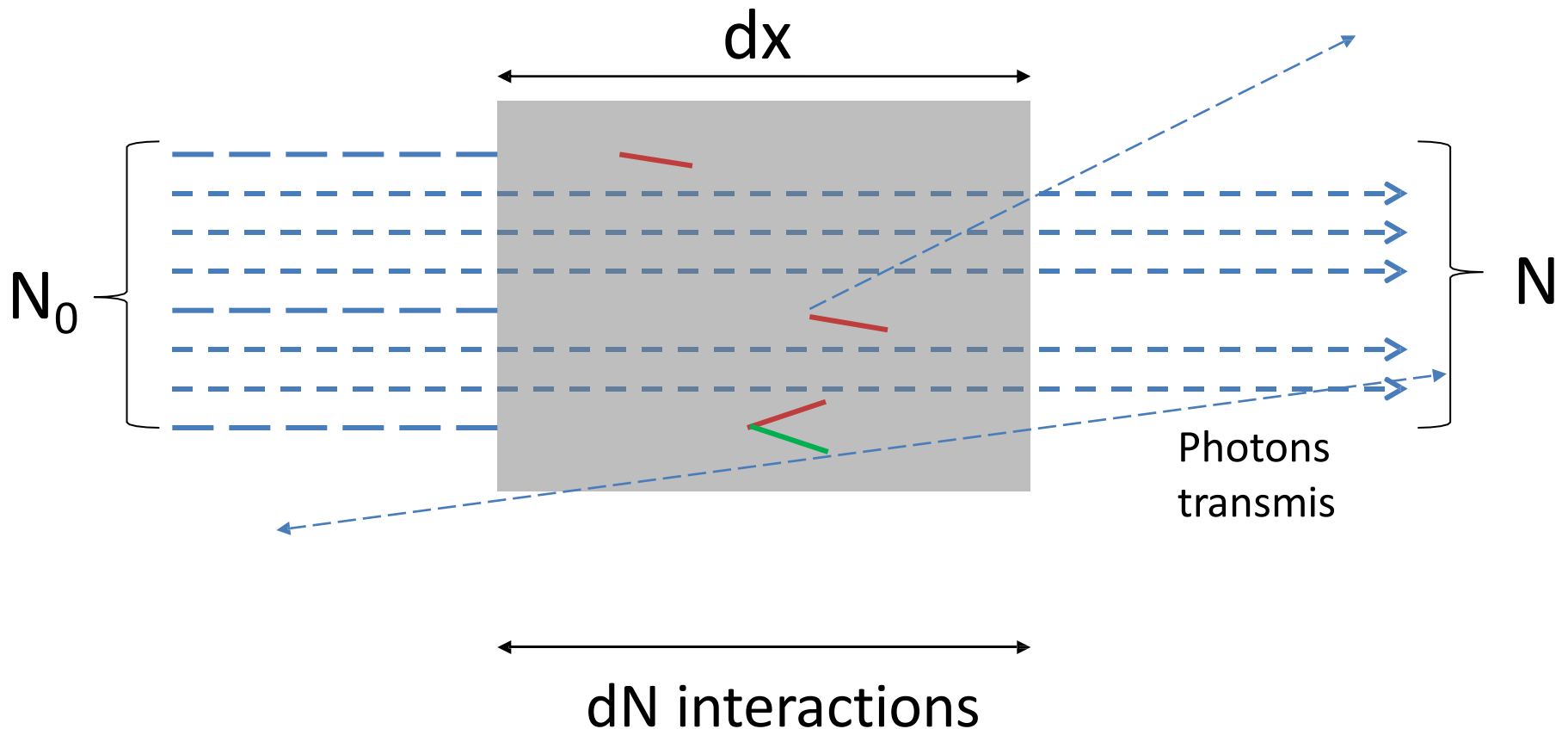


# Effet prédominant en fonction de Z et E

- Effet photoélectrique : Effet predominant dans les systèmes de detection des photons (Z élevé). Responsable du contraste des images radiographiques et scintigraphiques
- Effet Compton : Effet predominant dans l'eau et les tissus biologiques. Dégrade la qualité des images ("flou")
- Création de paires : marginal car nécessite des énergies qui ne sont que rarement utilisées dans le domaine de l'imagerie

# Approche globale

## Atténuation d'un faisceau de photons



# Atténuation d'un faisceau de photons

## Coefficient linéique d'atténuation ( $\mu$ , en $\text{cm}^{-1}$ )

Pour un flux de photons monoénergétiques

$N_0$  : nombre de photons incidents

$N_x$  : nombre de photons transmis

$dN$  : nombre de photons ayant interagi au cours de la traversée de l'épaisseur  $dx$  ( $dN = N_0 - N_x$ )

$$\mu = \frac{\frac{-dN}{N_0}}{dx} \quad \text{et} \quad N_x = N_0 e^{-\mu x}$$



# Atténuation d'un faisceau de photons

Coefficient linéique d'atténuation ( $\mu$ ) : probabilité d'interaction d'un photon par unité de longueur ( $\text{cm}^{-1}$ )

Il dépend :

- de l'énergie du rayonnement électromagnétique ( $h\nu$ )
- du matériau ( $Z$ )

**Coefficient linéique d'atténuation (total) :**

**En pratique :  $\mu = \tau + \sigma + \pi$**

$$\Rightarrow N_x = N_0 \cdot e^{-\mu x} = N_0 \cdot e^{-\tau x} \cdot e^{-\sigma x} \cdot e^{-\pi x}$$

# Atténuation d'un faisceau de photons

Fraction d'énergie **absorbée** par le milieu ( $\mu_a = \tau + \sigma_a + \pi_a$ )  
 $\Rightarrow (1 - N_a/N_0) = 1 - e^{-\mu_a x} = 1 - (e^{-\tau x} \cdot e^{-\sigma_a x} \cdot e^{-\pi_a x})$

Fraction d'énergie **diffusée** ( $\mu_d = \sigma_d + \pi_d$ )  
 $\Rightarrow (1 - N_d/N_0) = 1 - e^{-\mu_d x} = 1 - (e^{-\sigma_d x} \cdot e^{-\pi_d x})$

# Coefficient massique d'atténuation

## Coefficient massique d'atténuation ( $\mu/\rho$ , en $\text{cm}^2/\text{g}$ )

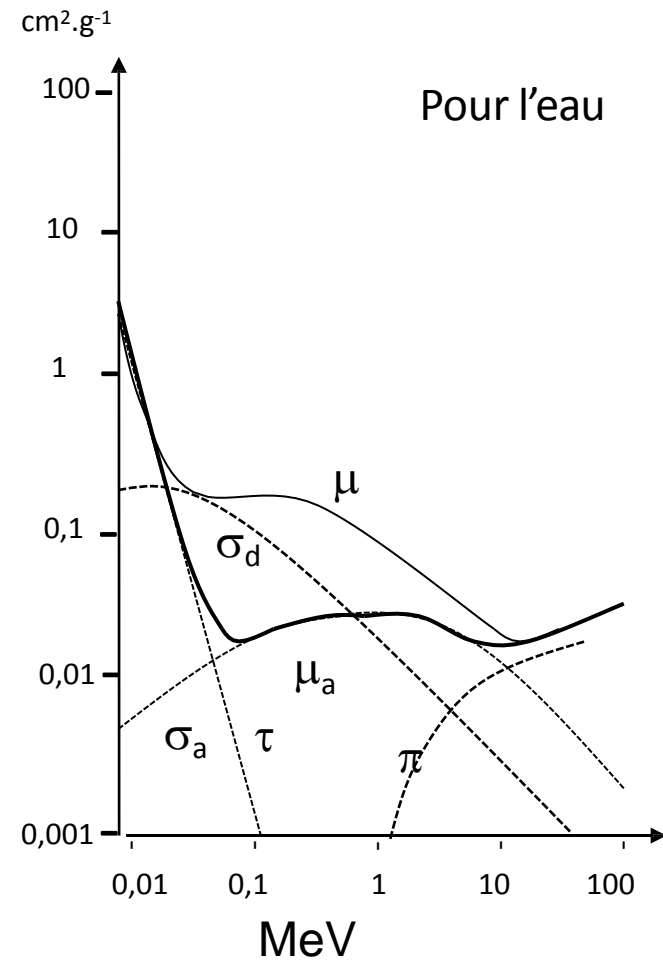
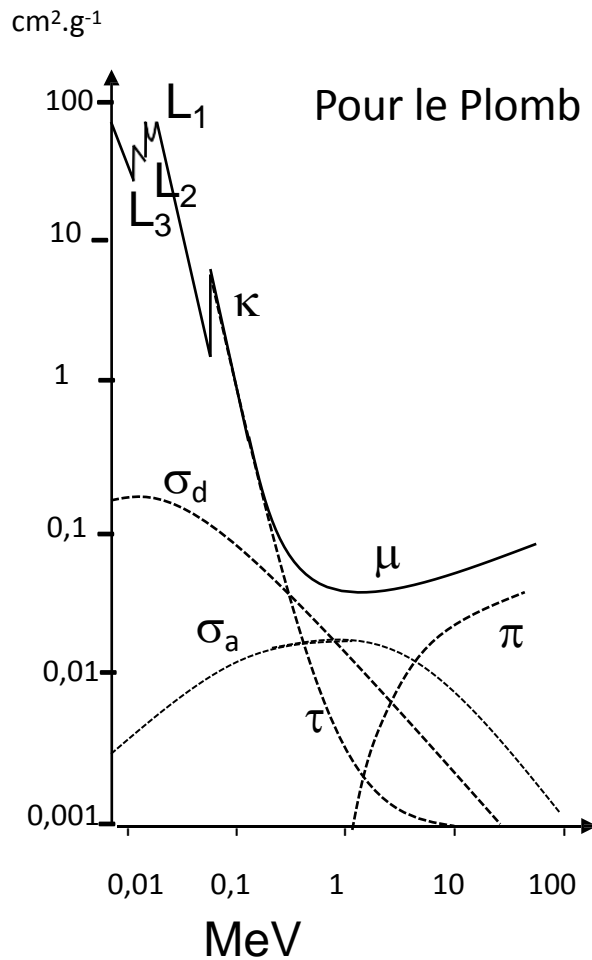
$\mu$  dépend de l'état du milieu atténuant (solide, liquide ou gazeux)

Les coefficients d'atténuation sont généralement exprimés par le coefficient massique :  $\mu/\rho$

La décroissance de l'intensité d'un faisceau de photons devient alors :

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

# Coefficient massique d'atténuation



# Atténuation d'un faisceau de photons

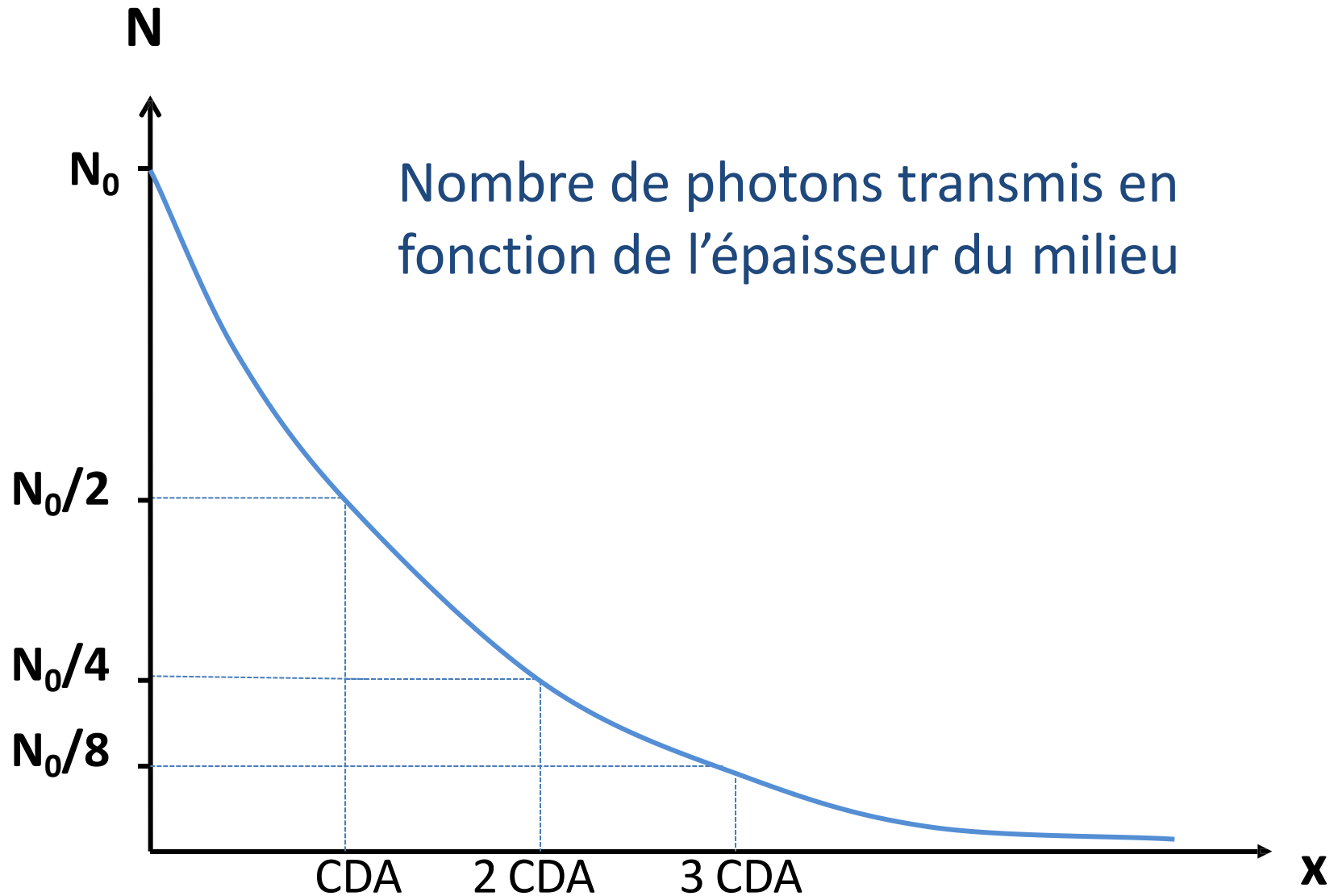
## Couche de demi-atténuation (CDA)

- Épaisseur de matériau nécessaire pour atténuer la moitié des photons incidents ( $N/N_0 = 1/2$ )
- Unités de longueur (mètre ou cm)
- Pour  $x = \text{CDA}$ , on a :

$$N_0 e^{-\mu \cdot \text{CDA}} = \frac{N_0}{2} \quad \text{d'où}$$

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

# Atténuation d'un faisceau de photons



# Atténuation d'un faisceau de photons

Couche de demi-atténuation (CDA)

Pour  $x = n$  (entier) CDA

$$\text{On peut écrire : } N = \frac{N_0}{2^n}$$

Donc pour atténuer un faisceau d'un facteur  $\approx 1000$  ( $1024 = 2^{10}$ ), il faut interposer une épaisseur du milieu correspondant à 10 CDA