

## Chapitre 9

# Interactions des rayonnements avec la matière: photons (2/2) et neutrons.

Dr. Jean-François ADAM

# Objectifs pédagogiques du cours

- Connaître les probabilités d'interaction des photons avec la matière
  - Section efficace
  - Coefficient linéique d'atténuation
  - Coefficients massiques d'atténuation
  - Variation avec E et Z
- Connaître les principaux modes d'interactions des neutrons avec la matière

# Probabilité d'interaction: section efficace et coefficient d'atténuation

- La probabilité d'interaction dépend de la surface apparente de la cible

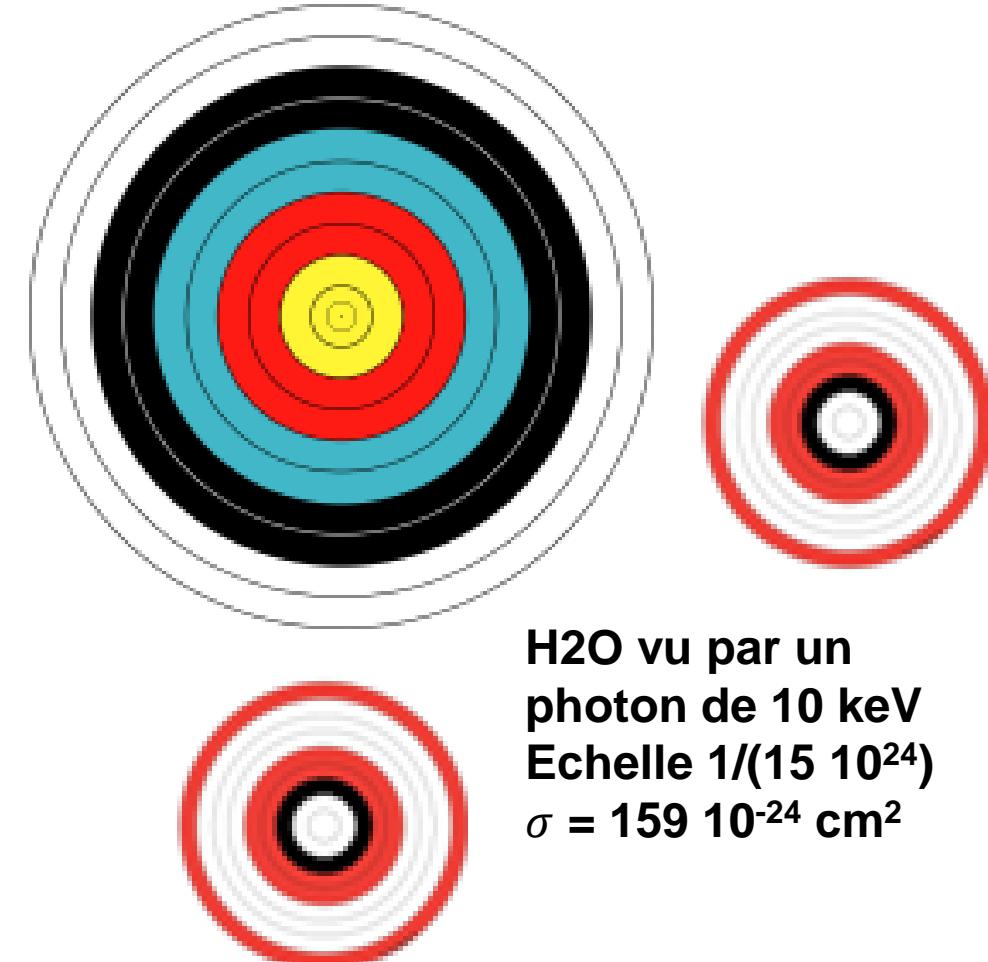


H<sub>2</sub>O vu par un photon de 1 MeV

Echelle 1/ (15 10<sup>24</sup>)

$$\sigma = 2,1 \cdot 10^{-24} \text{ cm}^2$$

La surface apparente d'une cible pour un type de projectile donné s'appelle la **section efficace**, elle se note  $\sigma$ . Elle dépend de l'énergie de la particule et du numéro atomique de la cible  
La section efficace s'exprime en  $\text{cm}^2$ , ou en barn ( $10^{-24} \text{ cm}^2$ ).



H<sub>2</sub>O vu par un photon de 10 keV  
Echelle 1/(15 10<sup>24</sup>)  
 $\sigma = 159 \cdot 10^{-24} \text{ cm}^2$

# Probabilité d'interaction: section efficace et coefficient d'atténuation

- La probabilité d'interaction dépend de la surface apparente de la cible

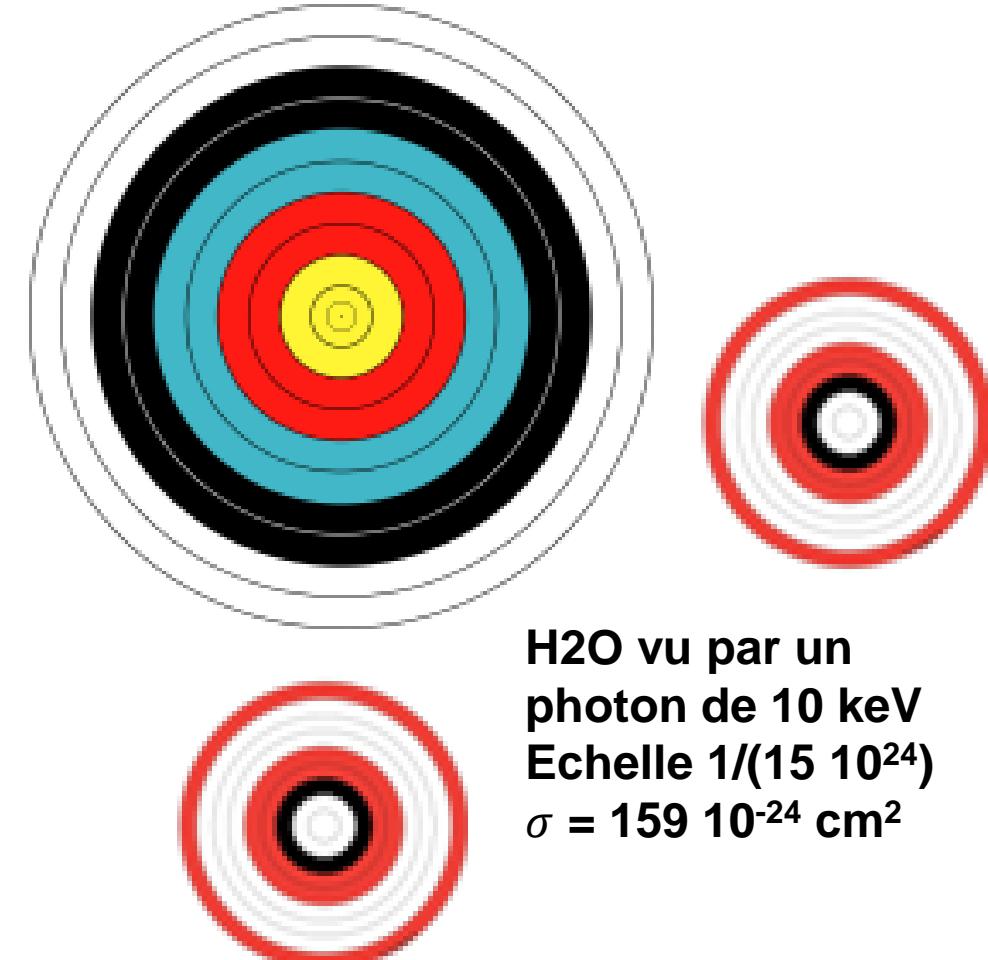


H<sub>2</sub>O vu par un photon de 1 MeV

Echelle 1/ (15 10<sup>24</sup>)

$$\sigma = 2,1 \cdot 10^{-24} \text{ cm}^2$$

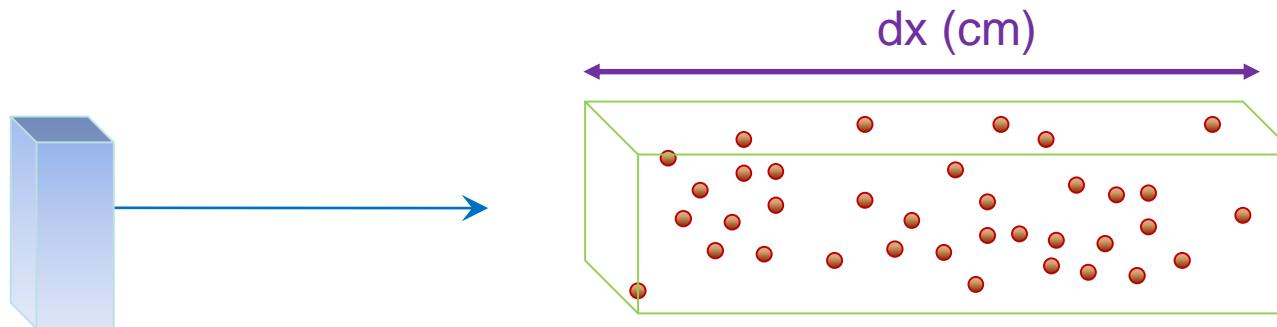
La surface apparente d'une cible pour un type de projectile donné s'appelle la **section efficace**, elle se note  $\sigma$ . Elle dépend de l'énergie de la particule et du numéro atomique de la cible  
La section efficace s'exprime en  $\text{cm}^2$ , ou en barn ( $10^{-24} \text{ cm}^2$ ).



H<sub>2</sub>O vu par un photon de 10 keV  
Echelle 1/(15 10<sup>24</sup>)  
 $\sigma = 159 \cdot 10^{-24} \text{ cm}^2$

# Probabilité d'interaction: section efficace et coefficient d'atténuation

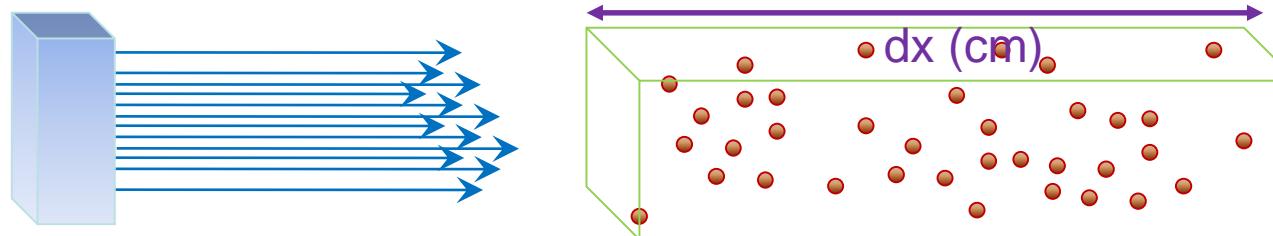
- La probabilité d'interaction dépend de la densité de cibles ( $\text{at}/\text{cm}^3$  ou  $\text{cm}^{-3}$ )



Probabilité d'interaction par unité de longueur pour un photon  
 $=N_{cibles}/\text{cm}^3 \times \sigma$  est appelé le coefficient linéique d'atténuation et noté

$$\mu (\text{cm}^{-1}) = n (\text{cm}^{-3}) \times \sigma (\text{cm}^2)$$

- Quelle est la probabilité pour N photons d'interagir sur une distance  $dx$ ?

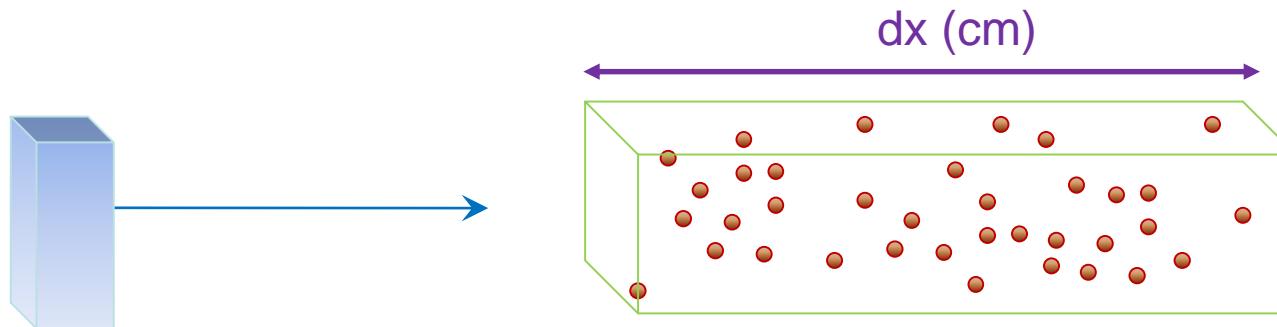


$$N_{\text{photons}} \times n_{\text{cibles}}/\text{cm}^3 \times \sigma \times dx$$
$$= N_{\text{photons}} \mu(Z, \rho, E) dx$$

Crédits Y Arnoud , UGA

# Probabilité d'interaction: section efficace et coefficient d'atténuation

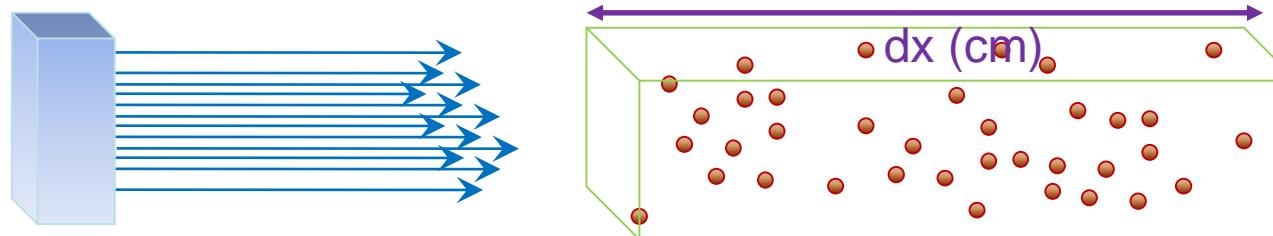
- La probabilité d'interaction dépend de la densité de cibles ( $\text{at}/\text{cm}^3$  ou  $\text{cm}^{-3}$ )



Probabilité d'interaction par unité de longueur pour un photon  
 $=N_{cibles}/\text{cm}^3 \times \sigma$  est appelé le coefficient linéique d'atténuation et noté

$$\mu (\text{cm}^{-1}) = n (\text{cm}^{-3}) \times \sigma (\text{cm}^2)$$

- Quelle est la probabilité pour N photons d'interagir sur une distance  $dx$ ?



$$N_{\text{photons}} \times n_{\text{cibles}}/\text{cm}^3 \times \sigma \times dx$$
$$= N_{\text{photons}} \mu(Z, \rho, E) dx$$

Crédits Y Arnoud , UGA

# Loi d'atténuation

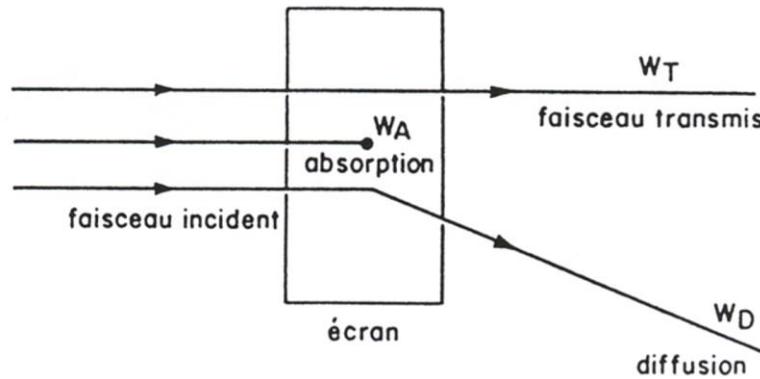
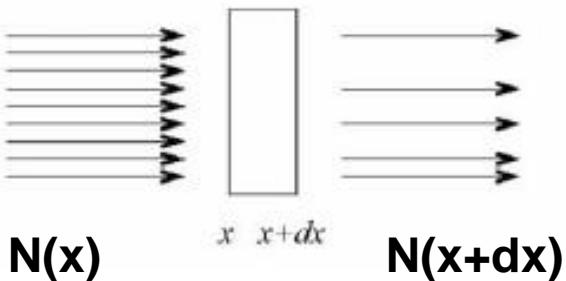


Figure 14-7 Atténuation d'un faisceau de photons



- $dN = N(x+dx) - N(x) = -\mu N(x)dx$
- $dN/N = -\mu dx$
- D'où :  $N(x) = N_0 \cdot e^{-\mu x}$

Le photon incident peut soit ne pas interagir (transmission), soit être absorbé (effet photoélectrique, création de paire), soit être dévié de sa trajectoire (Diffusion Compton ou Rayleigh).

# Loi d'atténuation

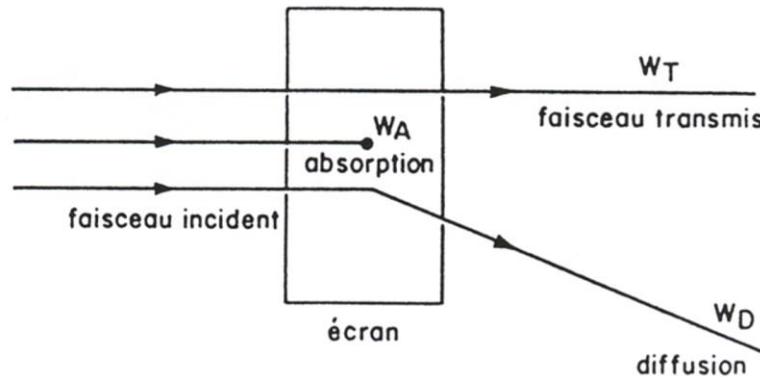
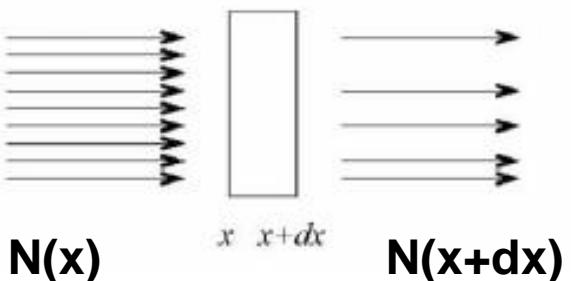


Figure 14-7 Atténuation d'un faisceau de photons



- $dN = N(x+dx) - N(x) = -\mu N(x)dx$   
Car le nombre de photons ayant interagi est égal à  $\mu N dx$
- $dN/N = -\mu dx$
- D'où :  $N(x) = N_0 \cdot e^{-\mu x}$

# Loi d'atténuation couche de demi atténuation

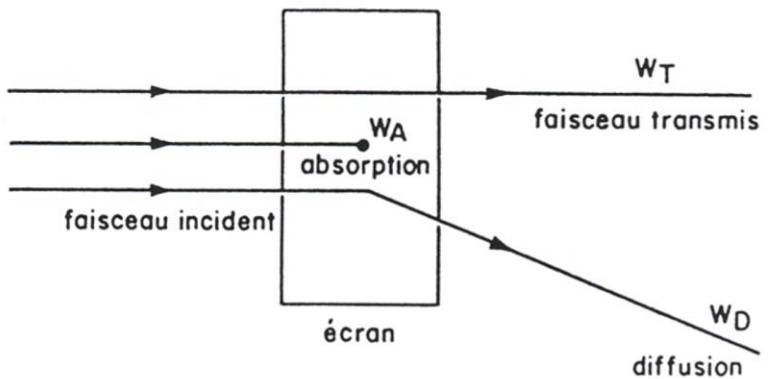


Figure 14-7 Atténuation d'un faisceau de photons

**Les photons transmis sont ceux qui n'ont pas interagi**

$$CDA = \ln(2)/\mu$$

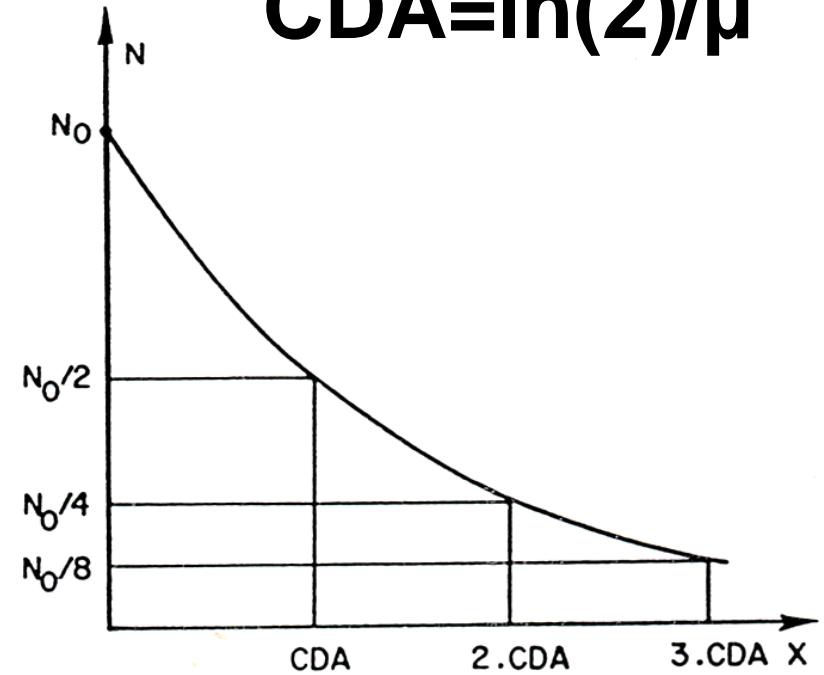


Figure 14-8 Variations du nombre de photons qui traversent un écran sans interaction en fonction de l'épaisseur  $x$  de l'écran  
Le nombre de photons transmis décroît de manière exponentielle mais ne s'annule pas.

# Loi d'atténuation couche de demi atténuation

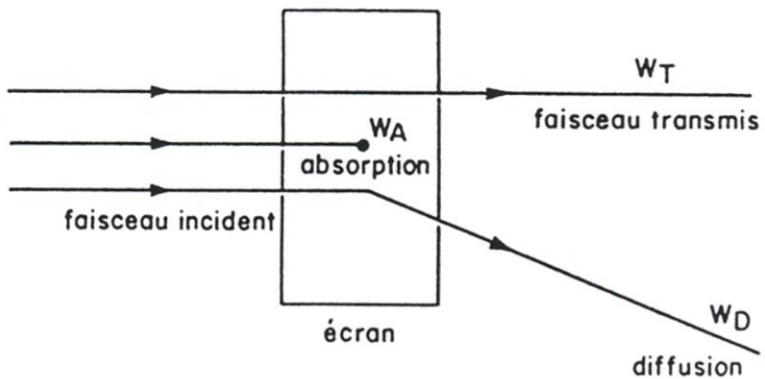


Figure 14-7 Atténuation d'un faisceau de photons

**Les photons transmis sont ceux qui n'ont pas interagi**

$$CDA = \ln(2)/\mu$$

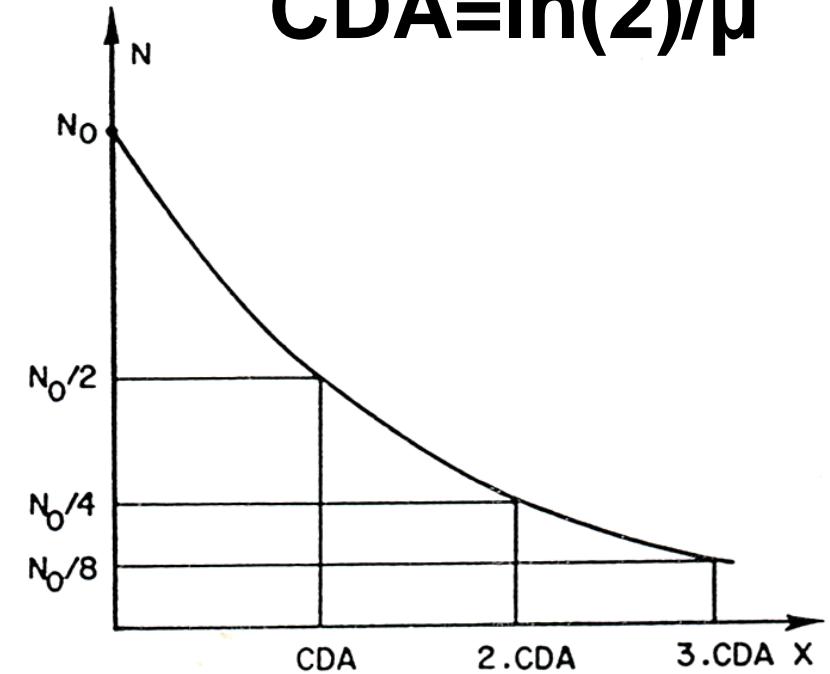


Figure 14-8 Variations du nombre de photons qui traversent un écran sans interaction en fonction de l'épaisseur  $x$  de l'écran  
Le nombre de photons transmis décroît de manière exponentielle mais ne s'annule pas.

# Coefficients d'atténuation

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

- **Le nombre de photons transmis décroît de manière exponentielle mais ne s'annule pas.**
- **Coefficient linéique/linéaire d'atténuation :  $\mu$  ( $\text{cm}^{-1}$ )**
  - Dépend de E, Z et de la masse volumique du matériau
- **Coefficient massique d'atténuation :  $\mu/\rho$  ( $\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ )**
  - >>Tabulé et ne dépend que de E et Z
- **Il faut distinguer :**
  - Energie incidente, énergie transmise, énergie absorbée, énergie diffusée.
  - Atténuation et absorption

# Coefficients d'atténuation

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

- **Le nombre de photons transmis décroît de manière exponentielle mais ne s'annule pas.**
- **Coefficient linéique/linéaire d'atténuation :  $\mu$  ( $\text{cm}^{-1}$ )**
  - Dépend de E, Z et de la masse volumique du matériau
- **Coefficient massique d'atténuation :  $\mu/\rho$  ( $\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ )**
  - >>Tabulé et ne dépend que de E et Z
- **Il faut distinguer :**
  - Energie incidente, énergie transmise, énergie absorbée, énergie diffusée.
  - Atténuation et absorption

# Importance relative des interactions des photons avec la matière

- $N(x) = N_0 \cdot e^{-\mu x} = N_0 \cdot e^{-\tau x} \cdot e^{-\sigma_c x} \cdot e^{-\sigma_R x} \cdot e^{-\pi x}$
- $\mu = \tau + \sigma_R + \sigma_C + \pi \quad \mu/\rho = \tau/\rho + \sigma_R/\rho + \sigma_C/\rho + \pi/\rho$
- Dans l'eau (donc les milieux biologiques) :
  - ⇒ Effet prédominant
  - Photoélectrique pour les photons < 30 keV (Mammographie)
  - COMPTON pour les photons de 50 keV à 20 MeV (Radiologie, Médecine Nucléaire, Radiothérapie)
  - (création de paires au delà de 20 MeV)

# Importance relative des interactions des photons avec la matière

- $N(x) = N_0 \cdot e^{-\mu x} = N_0 \cdot e^{-\tau x} \cdot e^{-\sigma_c x} \cdot e^{-\sigma_R x} \cdot e^{-\pi x}$
- $\mu = \tau + \sigma_R + \sigma_C + \pi \quad \mu/\rho = \tau/\rho + \sigma_R/\rho + \sigma_C/\rho + \pi/\rho$
- Dans l'eau (donc les milieux biologiques) :
  - ⇒ Effet prédominant
  - Photoélectrique pour les photons < 30 keV (Mammographie)
  - COMPTON pour les photons de 50 keV à 20 MeV (Radiologie, Médecine Nucléaire, Radiothérapie)
  - (création de paires au delà de 20 MeV)

# Coefficients d'atténuation massiques effet photoélectrique

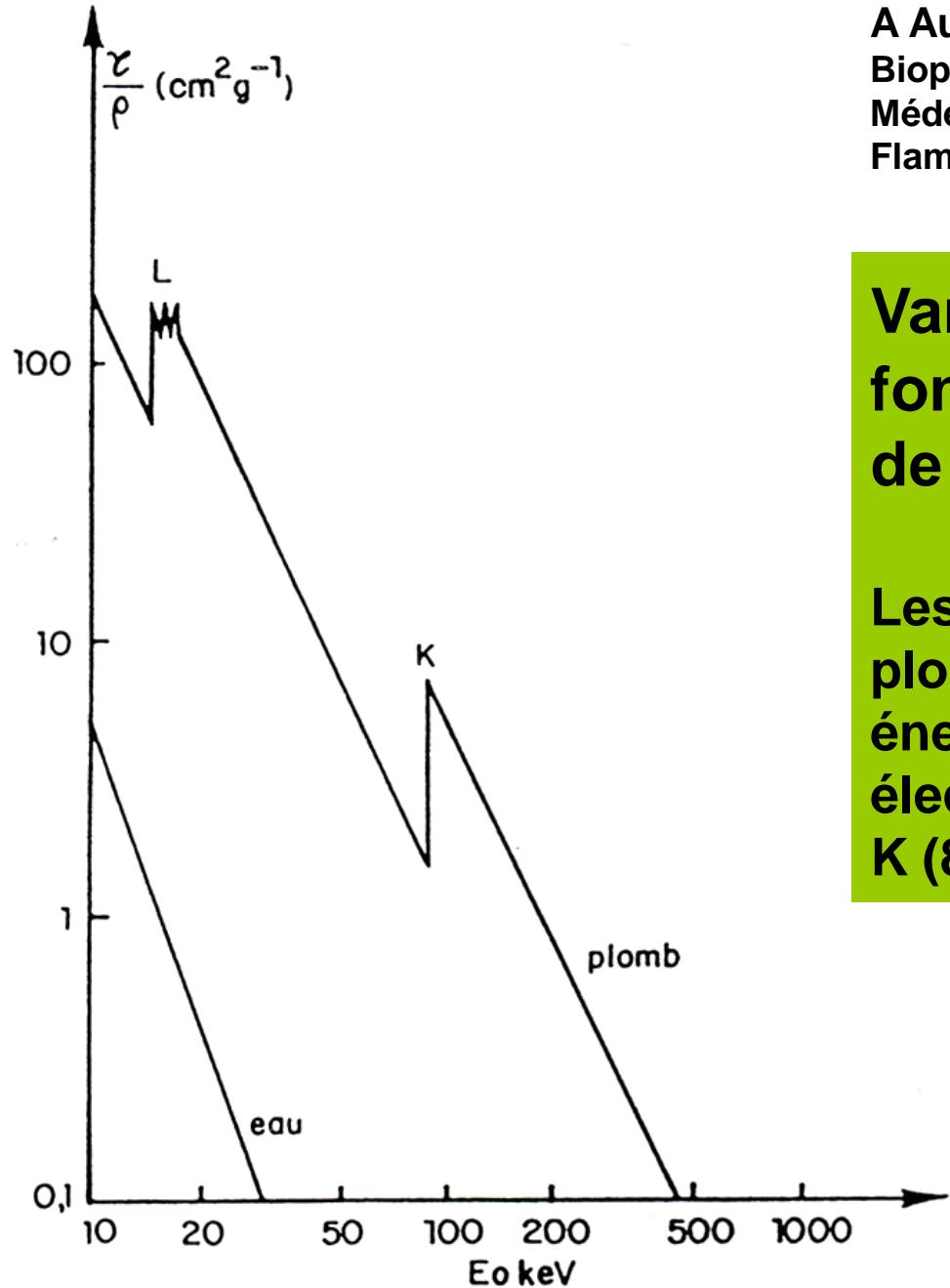
$$\frac{\tau}{\rho} \approx k \frac{Z^3}{E^3}$$

- **Photoélectron** :  $E_c = E - E_L$
- **Réarrangements** : photons X de fluorescence (énergie perdue par rayonnement) ou électron Auger (énergie absorbée)

# Coefficients d'atténuation massiques effet photoélectrique

$$\frac{\tau}{\rho} \approx k \frac{Z^3}{E^3}$$

- **Photoélectron** :  $E_c = E - E_L$
- **Réarrangements** : photons X de fluorescence (énergie perdue par rayonnement) ou électron Auger (énergie absorbée)



Variations de  $\tau/\rho$  en fonction de  $E$  dans le cas de l'eau et du plomb

Les discontinuités pour le plomb correspondent aux énergies de liaison des électrons des couches K (88 keV) et L (»15 keV)

# Coefficients d'atténuation

## Diffusion Rayleigh

$$\frac{\sigma_R}{\rho}$$

- **Coefficient d'atténuation massique pour la diffusion Rayleigh :**

- dépend du milieu (en Z)
- Décroît rapidement quand l'énergie E du photon incident augmente (varie comme  $1/E^2$ )

# Coefficients d'atténuation

## Effet Compton

- **Coefficient d'atténuation massique pour la diffusion Compton :**

$$\frac{\sigma_c}{\rho}$$

- » indépendant du milieu (donc de Z)
- Décroît lentement quand l'énergie E du photon incident augmente (varie à peu près comme  $1/E$ )

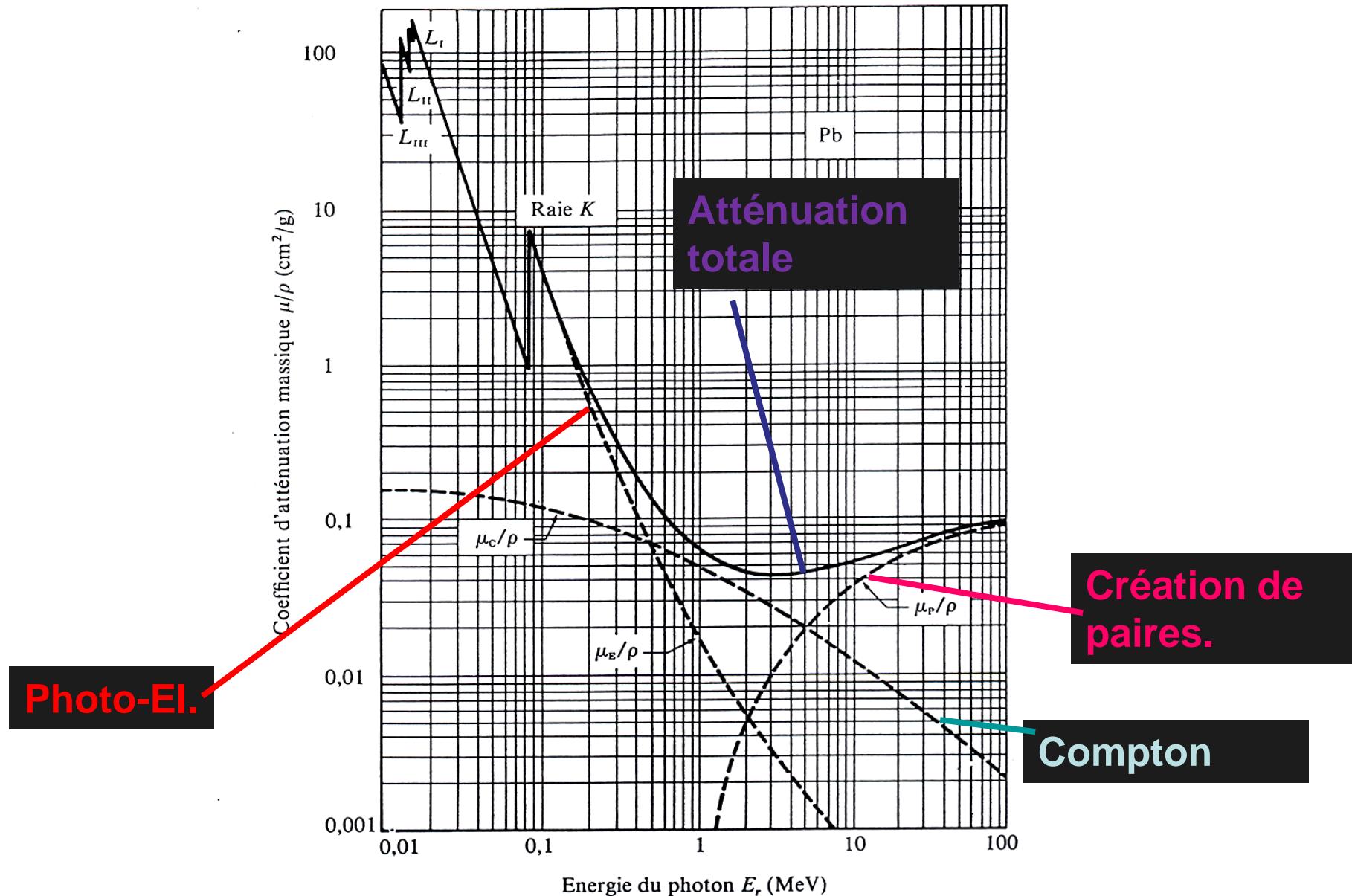
# Coefficients d'atténuation

## Création de paires

$$\frac{\pi}{\rho}$$

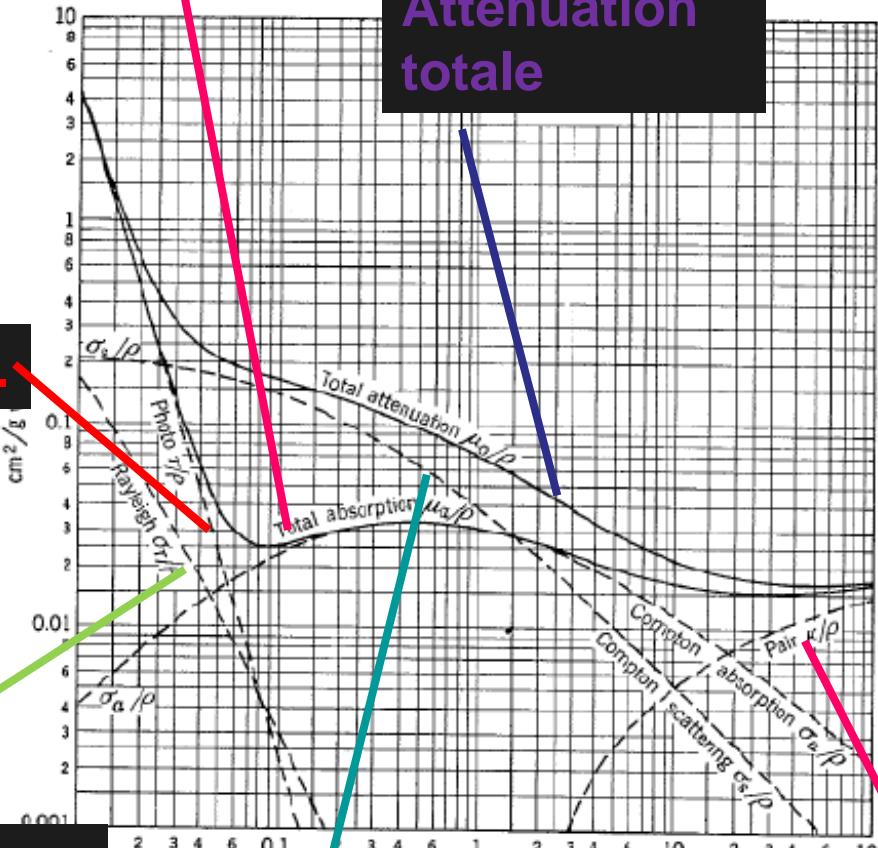
- **Coefficient massique d'atténuation par pour la création de paire:**
  - Dépend du milieu ( $Z^2$ )
  - Augmente avec l'énergie en  $\ln(E)$

**FIGURE 3.16** Le coefficient d'atténuation massique pour des rayons gamma dans le plomb en fonction de l'énergie du rayonnement gamma. Les coefficients pour l'effet photoélectrique ( $\mu_E/\rho$ ), l'effet Compton ( $\mu_C/\rho$ ), et l'effet de paires ( $\mu_P/\rho$ ) sont indiqués séparément. Pour obtenir les coefficients en  $\text{cm}^{-1}$ , multiplier par la masse volumique du Pb = 11,35 g/cm<sup>3</sup>. (Avec l'autorisation de Evans, 1955.)



# Importance relative des interactions des photons avec la matière

Absorption



Atténuation totale

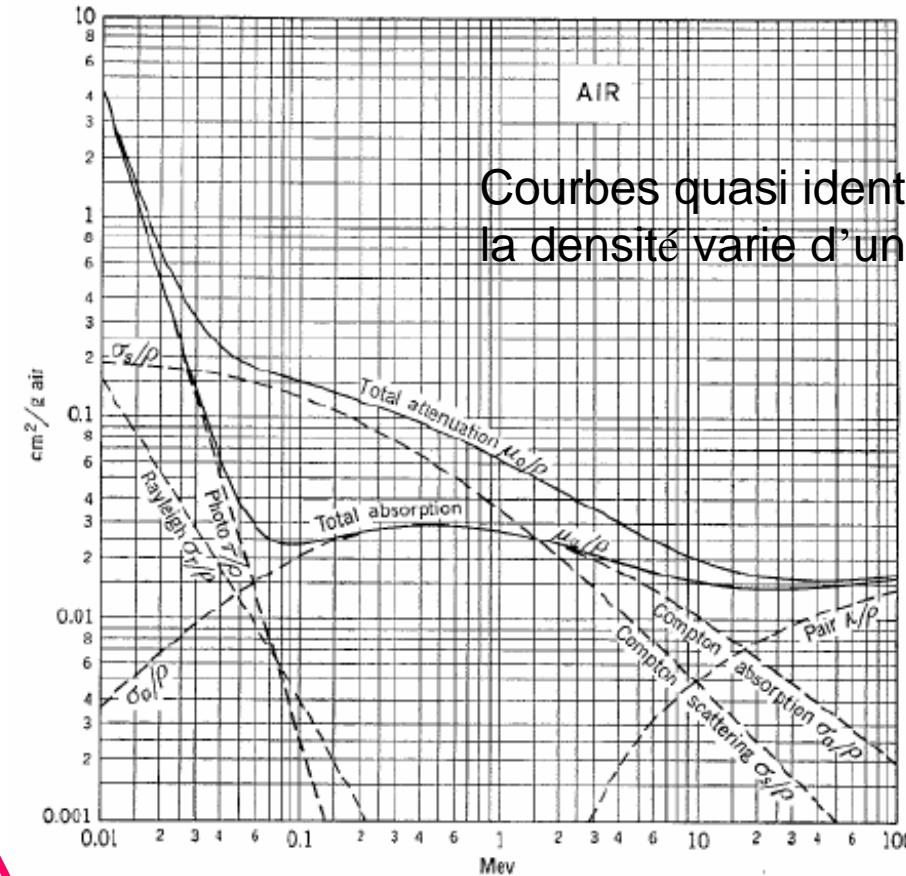
Photo-El.

Rayleigh

Compton

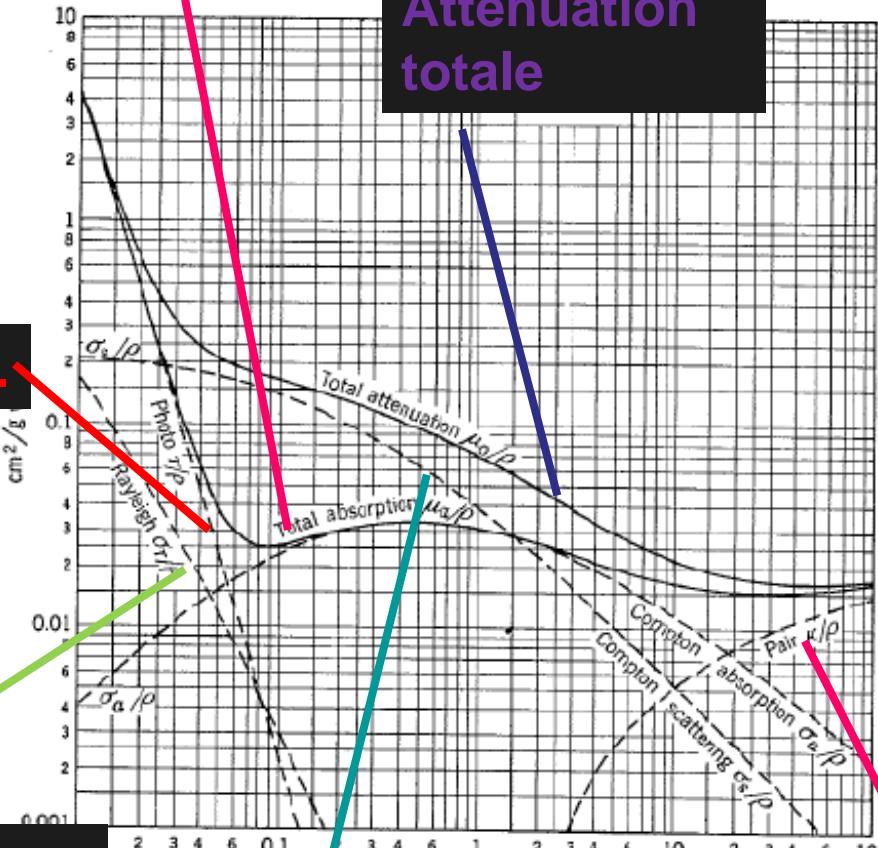
Création de paires.

Courbes quasi identiques alors que la densité varie d'un facteur  $\sim 1000$



# Importance relative des interactions des photons avec la matière

Absorption



Atténuation totale

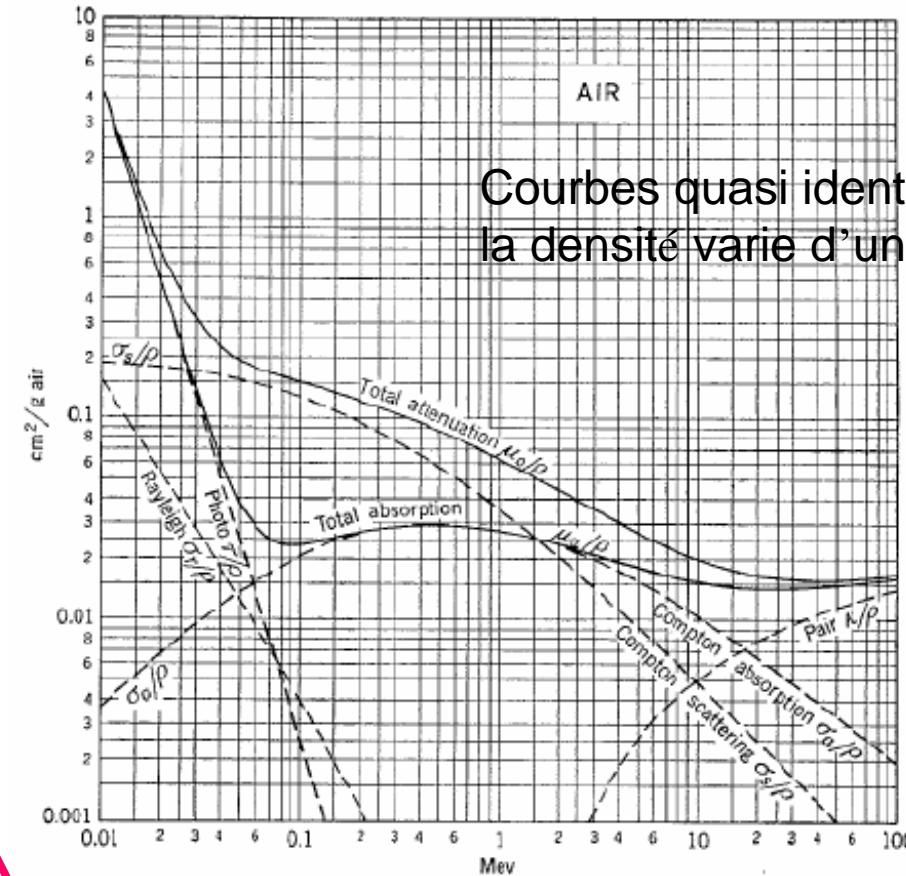
Photo-El.

Rayleigh

Compton

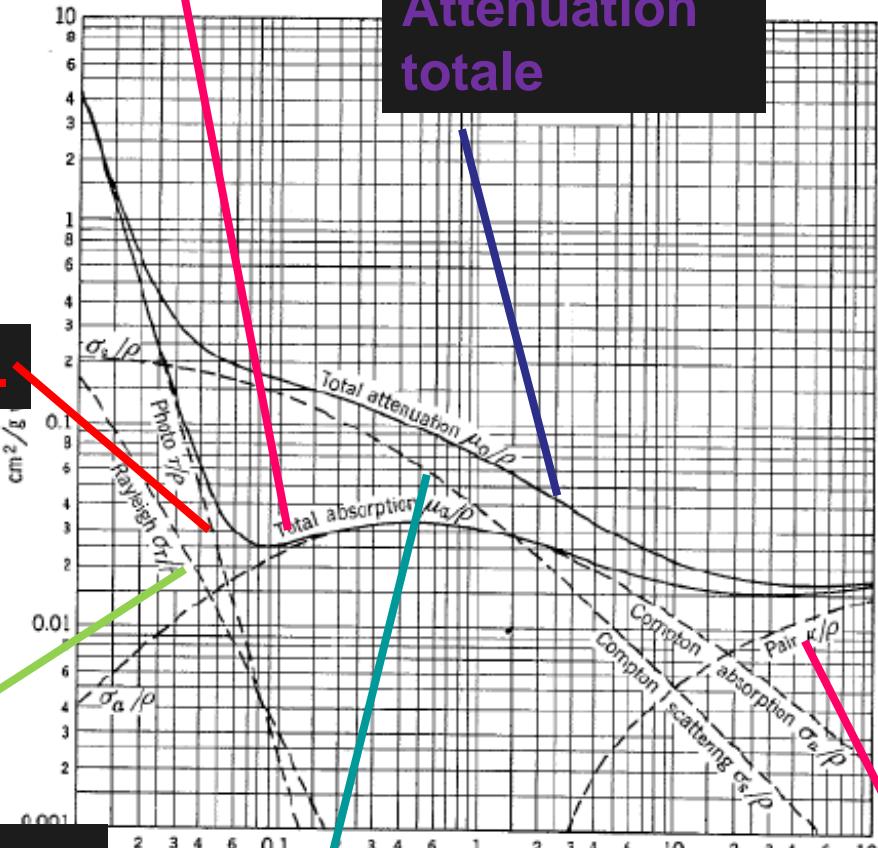
Création de paires.

Courbes quasi identiques alors que la densité varie d'un facteur  $\sim 1000$



# Importance relative des interactions des photons avec la matière

Absorption



Atténuation totale

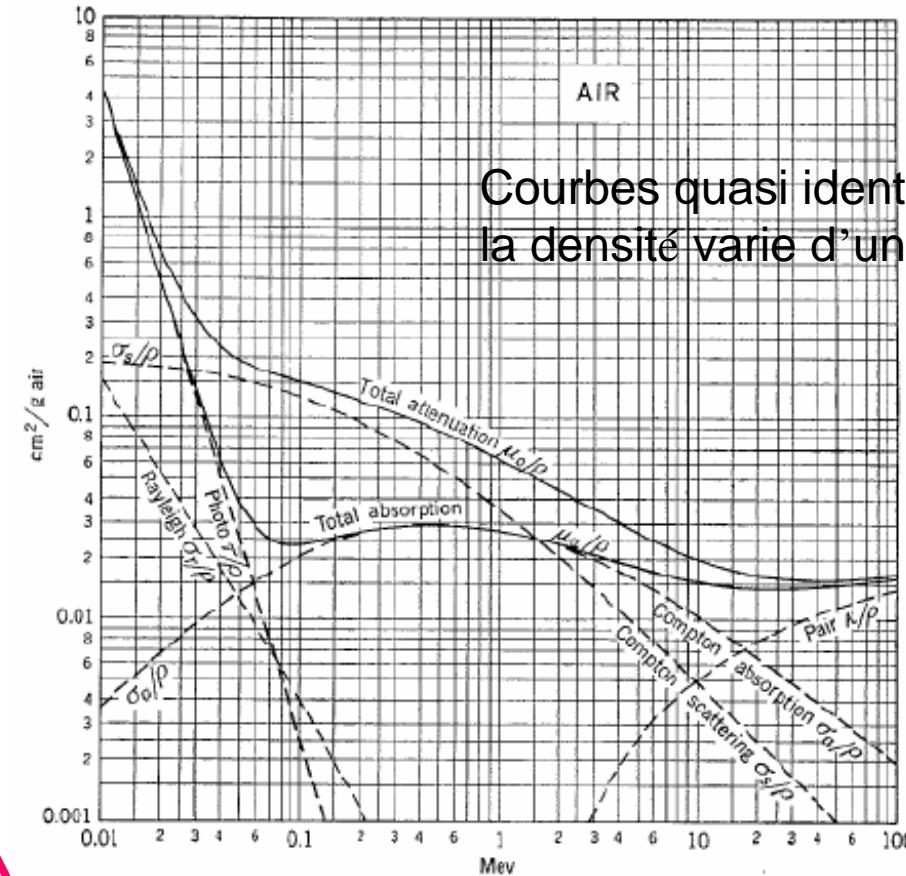
Photo-El.

Rayleigh

Compton

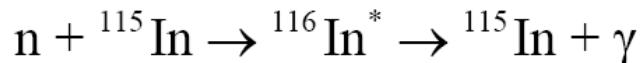
Création de paires.

Courbes quasi identiques alors que la densité varie d'un facteur  $\sim 1000$



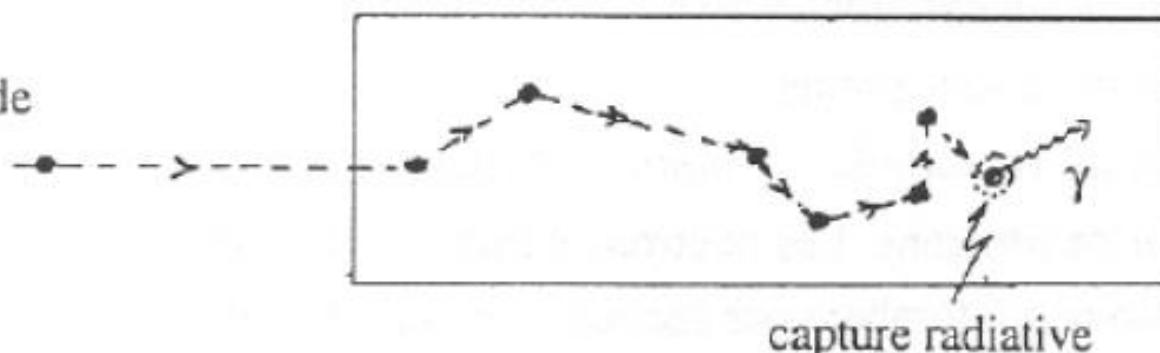
# Interactions neutrons

- Pas de charge. Ionisations primaires négligeables. Perte d'énergie par collision avec les noyaux.
- Les deux principaux types d'interaction sont :
  - Diffusion (élastique ou inélastique si excitation du noyau): neutrons déviés de leur trajectoire initiale: processus dominant pour les neutrons rapides (~MeV).
  - Absorption par réaction nucléaire: le neutron disparaît: processus est dominant pour les neutrons lents ou thermiques (<0,5 eV).
- Le ralentissement des neutrons rapides est d'autant plus efficace que les atomes cibles sont légers
- L'absorption des neutrons lents se fait essentiellement par capture radiative ( $n, \gamma$ ).



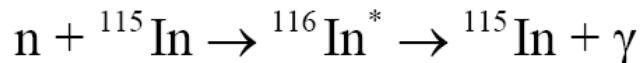
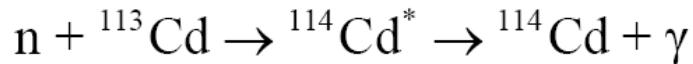
Autre avec alpha...

$$\Delta E_{\max} = \frac{4 \cdot A \cdot E_0}{(A+1)^2}$$



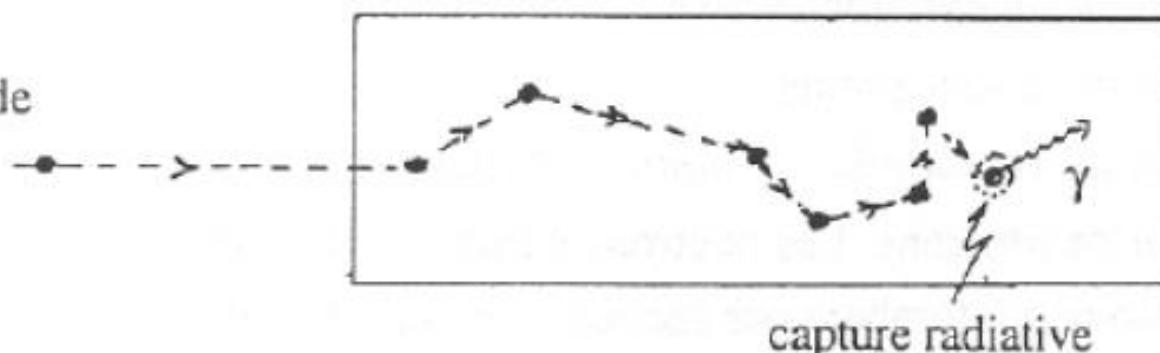
# Interactions neutrons

- Pas de charge. Ionisations primaires négligeables. Perte d'énergie par collision avec les noyaux.
- Les deux principaux types d'interaction sont :
  - Diffusion (élastique ou inélastique si excitation du noyau): neutrons déviés de leur trajectoire initiale: processus dominant pour les neutrons rapides (~MeV).
  - Absorption par réaction nucléaire: le neutron disparaît: processus est dominant pour les neutrons lents ou thermiques (<0,5 eV).
- Le ralentissement des neutrons rapides est d'autant plus efficace que les atomes cibles sont légers
- L'absorption des neutrons lents se fait essentiellement par capture radiative ( $n, \gamma$ ).



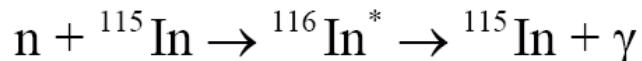
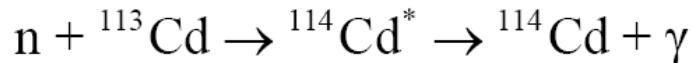
Autre avec alpha...

$$\Delta E_{\max} = \frac{4 \cdot A \cdot E_0}{(A+1)^2}$$



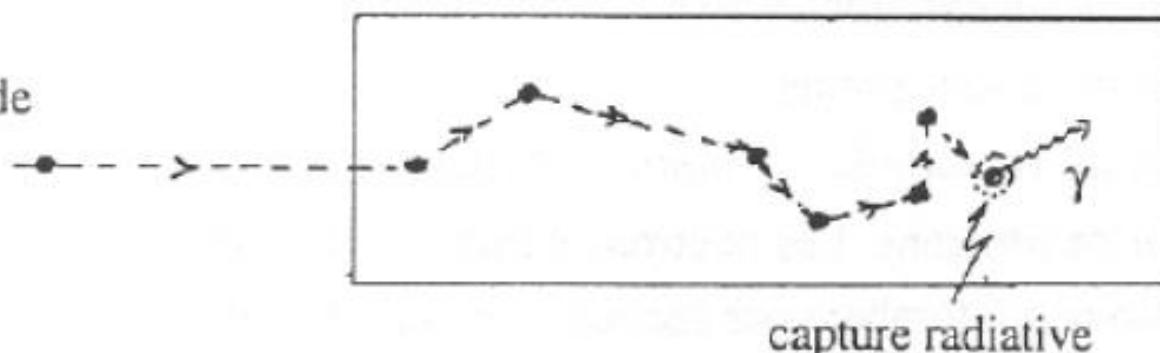
# Interactions neutrons

- Pas de charge. Ionisations primaires négligeables. Perte d'énergie par collision avec les noyaux.
- Les deux principaux types d'interaction sont :
  - Diffusion (élastique ou inélastique si excitation du noyau): neutrons déviés de leur trajectoire initiale: processus dominant pour les neutrons rapides (~MeV).
  - Absorption par réaction nucléaire: le neutron disparaît: processus est dominant pour les neutrons lents ou thermiques (<0,5 eV).
- Le ralentissement des neutrons rapides est d'autant plus efficace que les atomes cibles sont légers
- L'absorption des neutrons lents se fait essentiellement par capture radiative ( $n, \gamma$ ).



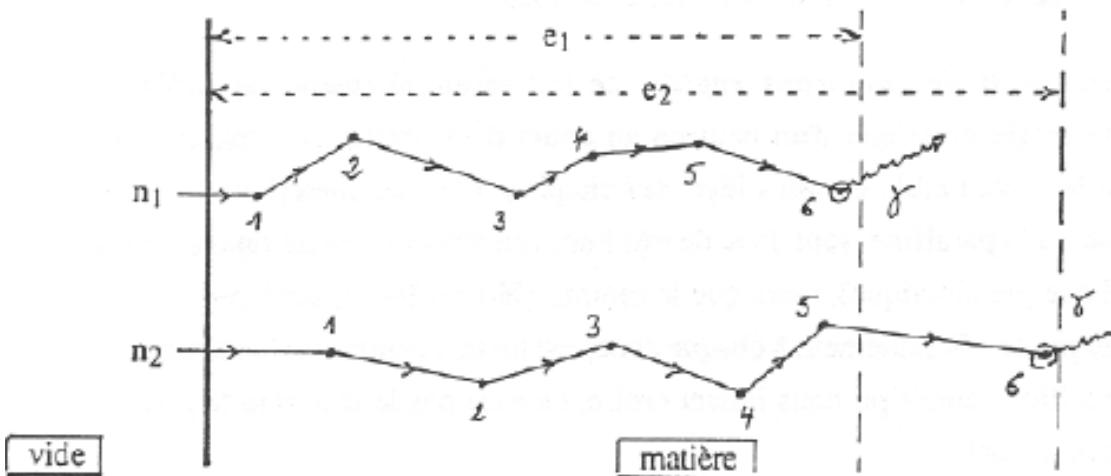
Autre avec alpha...

$$\Delta E_{\max} = \frac{4 \cdot A \cdot E_0}{(A+1)^2}$$



# Interactions neutrons

- On ne peut pas définir précisément le parcours d'un neutron donné, car sa probabilité d'interaction dans la matière est relativement faible, ce qui entraîne une grande dispersion des longueurs parcourues.



- On définit comme pour les photons, une loi d'atténuation qui décrit le comportement moyen d'un grand nombre de neutrons

$$\frac{1}{\lambda} = N \cdot \sigma_{tot} = \frac{N_A \cdot \rho}{A} \sigma_{tot} \quad N = N_0 \cdot \exp(-x/\lambda)$$

# Messages essentiels du cours

- La section efficace est une grandeur qui permet de rendre compte de la probabilité d'interaction et qui a une unité de surface.
- Le coefficient linéique/linéaire d'atténuation est la probabilité d'interaction par unité de longueur. Il dépend de l'énergie des photons, du numéro atomique et de la masse volumique de la cible . On utilise le coefficient massique d'atténuation pour s'affranchir de la variation du coefficient linéique d'atténuation avec la masse volumique
- La loi d'atténuation est une mono-exponentielle décroissante. Le coefficient d'atténuation est la somme des coefficients d'atténuation des interactions prises individuellement. Il ne faut pas confondre atténuation et absorption.
- Les neutrons interagissent par diffusion puis capture neutronique.

# Et au prochain cours ...

- Déetecter les rayonnements ionisants par leurs interactions
  - Différents types de détecteurs (à gaz, semiconducteurs, à scintillation, chimiques)
  - Chambres d'ionisation

# Mentions légales

---

L'ensemble de ce document relève des législations française et internationale sur le droit d'auteur et la propriété intellectuelle. Tous les droits de reproduction de tout ou partie sont réservés pour les textes ainsi que pour l'ensemble des documents iconographiques, photographiques, vidéos et sonores.

Ce document est interdit à la vente ou à la location. Sa diffusion, duplication, mise à disposition du public (sous quelque forme ou support que ce soit), mise en réseau, partielles ou totales, sont strictement réservées à l'Université Grenoble Alpes (UGA).

L'utilisation de ce document est strictement réservée à l'usage privé des étudiants inscrits à l'Université Grenoble Alpes (UGA), et non destinée à une utilisation collective, gratuite ou payante.