

U.E 2.11  
PHYSIQUE FONDAMENTALE

SEMESTRE 1

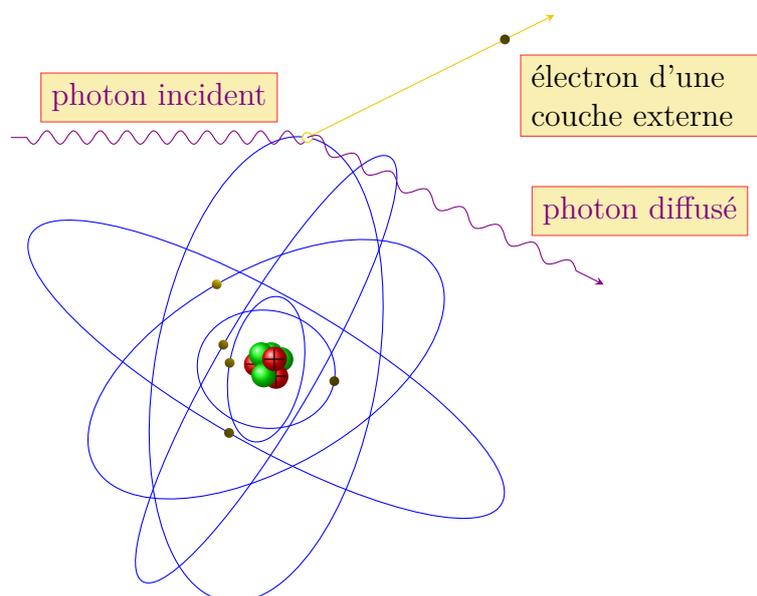
---

Chapitre 3 :  
Interactions photons - matière

---

David ALBERTO  
*david.alberto@ac-normandie.fr*

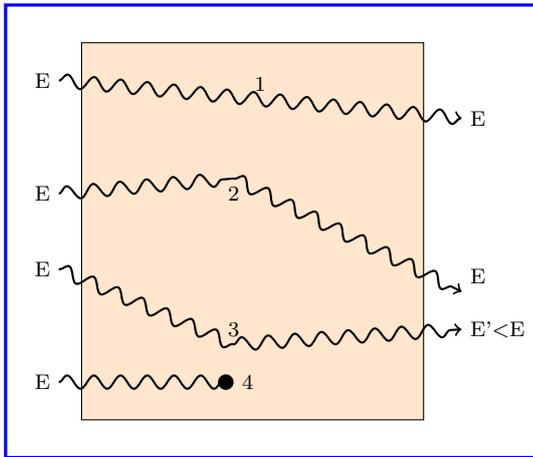
*DTS I.M.R.T*  
2020 / 2021



# Dans ce chapitre . . .

I.	Modes d'interaction des photons avec la matière . . . . .	1
I.1	○ Diffusion Rayleigh (ou diffusion Thomson) . . . . .	1
I.2	○ Effet photoélectrique . . . . .	1
I.3	○ Effet Compton . . . . .	2
I.4	○ Effet de matérialisation : création de paires $e^+/e^-$ . . . . .	4
II.	Absorption d'un faisceau de photons . . . . .	6
II.1	○ Coefficients d'absorption . . . . .	6
II.2	○ Evolution des coefficients partiels selon l'énergie des photons . . . . .	8
II.3	○ Evolution du coefficient global d'absorption selon l'énergie . . . . .	9

## I. MODES D'INTERACTION DES PHOTONS AVEC LA MATIÈRE



Un photon qui traverse la matière peut :

- ne subir aucune interaction, et être transmis sans modification : le milieu est **transparent** au rayonnement
- subir une **dévi**ation (ou réfraction, diffusion) sans communiquer d'énergie au milieu
- subir une **dévi**ation accompagnée d'un **transfert d'énergie** au milieu
- être **absorbé** en cédant l'intégralité de son énergie au milieu

### I.1 ○ Diffusion Rayleigh (ou diffusion Thomson)

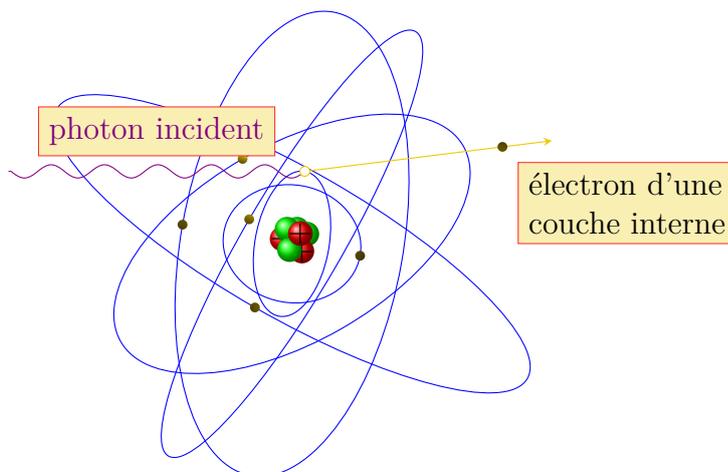
C'est une interaction avec un électron : après un choc sur un électron, le photon incident est **dévié sans transmettre d'énergie** au milieu. Comme son énergie est inchangée, sa longueur d'onde reste identique.

La diffusion Rayleigh correspond au cas (2) ci-dessus. Ce phénomène se produit avec des **photons de très faible** énergie (I.R., visible).

*Ce phénomène est responsable de la couleur bleue du ciel.*

### I.2 ○ Effet photoélectrique

a. Description du phénomène



L'effet photoélectrique est **l'expulsion d'un électron** d'un atome, sous l'action d'un photon.

L'électron éjecté est en général **un électron fortement lié**, K ou L.

L'effet photoélectrique correspond au cas (4) : **le photon disparaît** en transférant la totalité de son énergie à l'atome, qui émet alors un électron.

FIGURE 1 – Effet photoélectrique

Comme l'électron éjecté était d'une couche interne, il laisse une lacune qui se trouve ensuite comblée par un autre électron, plus périphérique. Il y a alors émission d'un **photon de fluores-**

**cence.** L'énergie de ce photon secondaire dépend de l'écart énergétique des niveaux concernés, dans le diagramme de l'atome.

L'effet photoélectrique est prépondérant pour des photons ionisants d'énergie de 1 à 100 keV environ, et concerne surtout **les matériaux lourds** (constitués d'atomes de numéro atomique élevé), comme le plomb ou l'aluminium.

b. *Bilan énergétique de l'effet photoélectrique*

$$E_{\text{photon}} = E_{\text{liaison}} + E_{\text{c électron}}$$

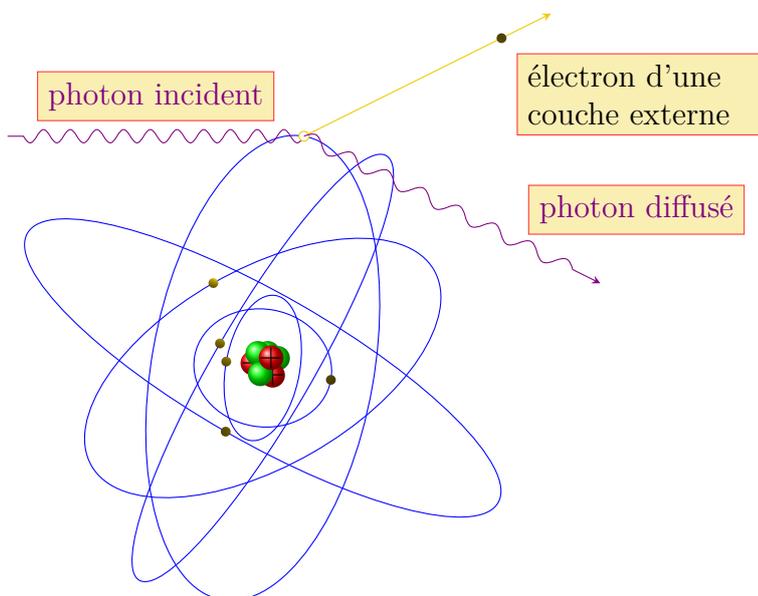
c. *Caractéristiques*

*Exemple : un électron a pour énergie de liaison  $E_l = 12 \text{ eV}$ .*

1. *Quelle condition doit satisfaire un photon pour provoquer l'effet photoélectrique avec cet électron ?*
2. *Calculer la longueur d'onde correspondante.*
3. *En déduire la condition que doit satisfaire la longueur d'onde d'un photon, pour provoquer l'effet photoélectrique.*

### I.3 ○ Effet Compton

a. *Description du phénomène*



C'est un choc entre le photon incident et un électron du milieu :

Le photon est dévié (= diffusé), en cédant **une partie de son énergie** à l'électron. Ce dernier reçoit de l'énergie sous forme **cinétique**.

Ce phénomène correspond au cas (3) de l'introduction. Le photon diffusé possède une énergie  $E'$  inférieure à celle du photon incident.

L'effet Compton concerne la plupart des électrons atomiques (très ou peu liés).

FIGURE 2 – Diffusion Compton

Le photon diffusé poursuit son parcours dans la matière, et peut lui-même interagir (effet Compton, ou photoélectrique).

L'angle de diffusion  $\theta$  du photon peut varier entre 0 et 180 °.

L'électron Compton est toujours projeté vers l'avant (angle  $\phi$  compris entre 0 et 90 °).

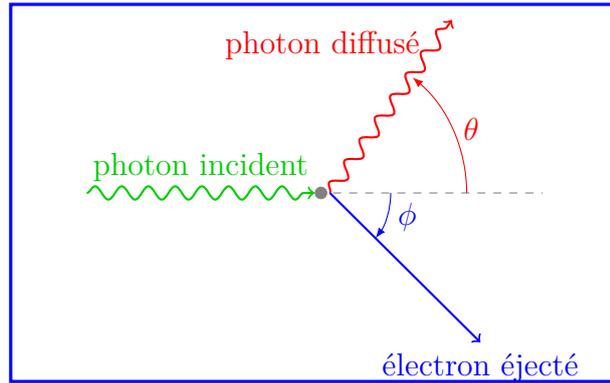


FIGURE 3 – Effet Compton - définition des angles

b. Bilan énergétique de l'effet Compton

$$E_{\text{photon}} = E_{\text{liaison}} + E_c \text{ électron} + E'_{\text{photon}}$$

Comme cet effet concerne des photons assez énergétiques, on néglige généralement l'énergie de liaison de l'électron, devant les autres termes du bilan :

$$E_{\text{photon}} = E_{\text{liaison}} + E_c \text{ électron}$$

c. Caractéristiques

Il existe une relation entre les longueurs d'onde des photons incident et diffusé (*elle n'est pas à retenir*) :

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{m_e \times c} \times (1 - \cos \theta)$$

Formule de Compton - Debye

photon diffusé (pm)

photon incident (pm)

angle de diffusion

$\frac{h}{m_e \times c}$  : constante fondamentale, homogène à une longueur d'onde :  $\simeq 2,426 \text{ pm}$ .

L'effet Compton est en compétition avec l'effet photoélectrique. Il devient prépondérant pour des photons incidents d'énergie suffisante, le seuil dépendant de l'atome cible (C : 20 keV, Cu : 120 keV, Pb : 600 keV).

*Application numérique :*

Un photon incident de longueur d'onde  $\lambda = 15 \text{ pm}$  produit un effet Compton. Le photon diffusé forme un angle de 60 ° par rapport à la direction incidente.

Déterminer la longueur d'onde du photon diffusé, puis  $E'$ .

Résultat :  $\lambda' = 16,2 \text{ pm}$ .

## d. Etude des cas limites

Animation : <https://www.geogebra.org/m/PXPz4j9s>

- Si  $\theta = 0$  : on parle de **choc tangentiel** : pas de déviation  
d'après la formule :  $\lambda' = \lambda$  c'est-à-dire  $E' = E$  : pas de transfert d'énergie
- Si  $\theta = 180^\circ$  : on parle de **choc frontal (rétrodiffusion)** :  
 $\lambda'$  est maximale, donc  $E'$  est minimale : l'énergie transférée à l'électron est maximale.

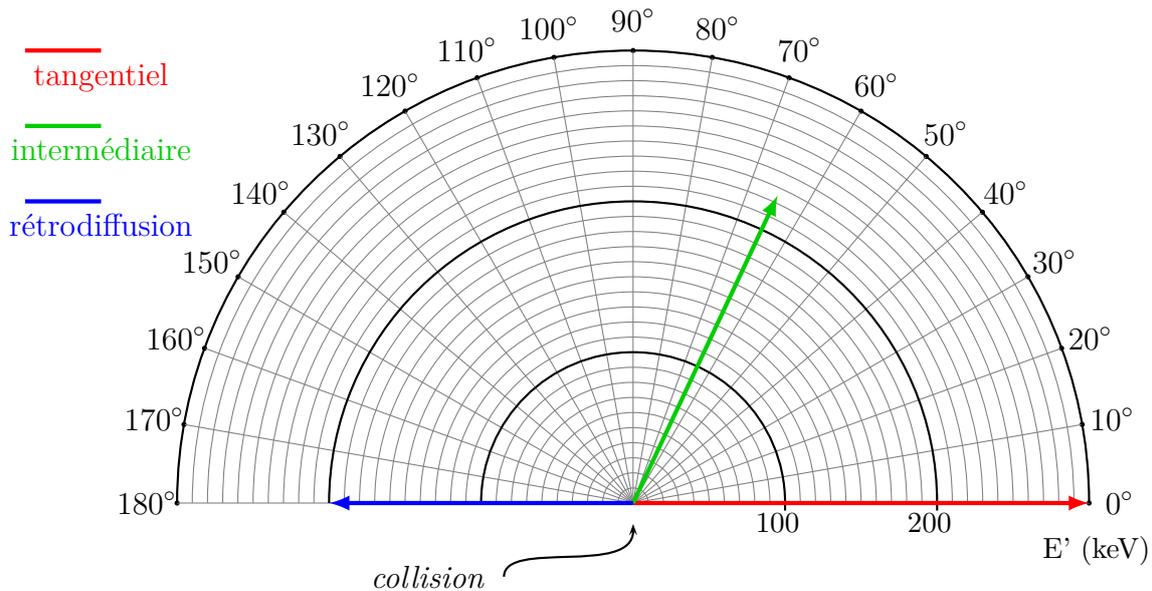


FIGURE 4 – Diagramme de l'effet Compton

#### I.4 ○ Effet de matérialisation : création de paires $e^+/e^-$

##### a. Description du phénomène

C'est une interaction du photon incident avec le **noyau d'un atome** de la matière.

Le champ électrique entourant le noyau provoque la **disparition du photon** et la création d'une paire de particules *positon/électron* ( $e^+/e^-$ ). Dans ce phénomène, l'**énergie radiative**

**du photon est transformée en énergie de masse**, la lumière devient matière.

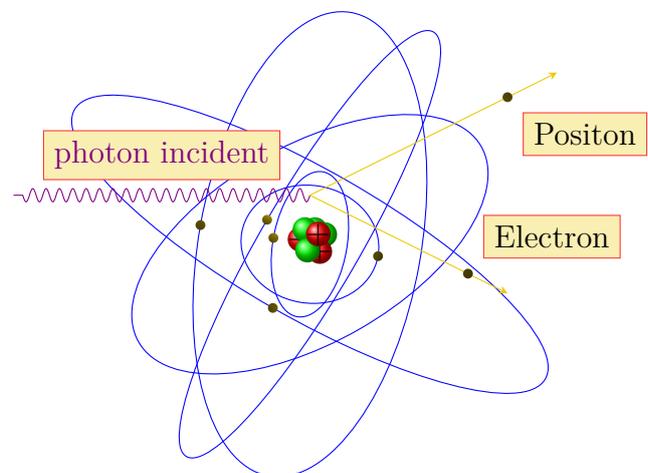


FIGURE 5 – Matérialisation

b. Bilan énergétique de la matérialisation

Le bilan énergétique s'appuie sur la disparition du photon et l'apparition de deux particules :

L'énergie de chaque particule formée est composée de **deux termes** : énergie de **masse** et énergie **cinétique** :

L'énergie de masse est donnée par :

ce qui donne :

car  $m_{\text{électron}} = m_{\text{positon}}$

pour simplifier :

$$E_{\text{photon}} = E_{\text{électron}} + E_{\text{positon}}$$

$$E_{\text{photon}} = E_{\text{masse},e^-} + E_{c,e^-} + E_{\text{masse},e^+} + E_{c,e^+}$$

$$E_{\text{masse}} = m_e \cdot c^2$$

(formule d'EINSTEIN)

$$E_{\text{photon}} = m_e \cdot c^2 + E_c + m_e \cdot c^2 + E_c$$

$$E_{\text{photon}} = 2 \cdot m_e \cdot c^2 + 2 \cdot E_c$$

Avec cette relation on peut énoncer **une condition énergétique** pour que le phénomène de matérialisation soit possible :

L'énergie minimale du photon incident est :  $E_{\text{photon}} = 2 \cdot m \cdot c^2$

Avec  $m_e \simeq 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$ ,  $c \simeq 3,0 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  et  $1 \text{ MeV} = 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ J}$  :

$$E_{\text{min}} \simeq 2 \cdot 0,511 \text{ MeV} \simeq 2 \cdot 511 \text{ keV} = 1,02 \text{ MeV}$$

(valeur à connaître et à savoir retrouver)

Par conséquent, ce phénomène ne peut se produire qu'avec des **photons de grande énergie** (photons  $X$  ou  $\gamma$ ).

De tels photons ne proviennent pas de la radioactivité, mais sont produits par un accélérateur ou présents dans le rayonnement cosmique.

## II. ABSORPTION D'UN FAISCEAU DE PHOTONS

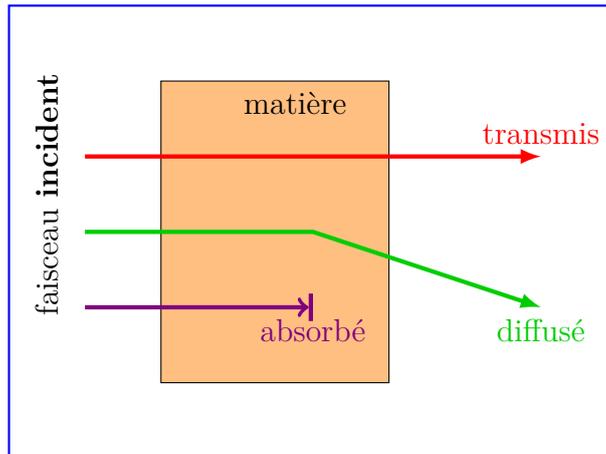


FIGURE 6 – Vocabulaire associé au rayonnement à travers la matière

### II.1 ◦ Coefficients d'absorption

#### a. Coefficient linéique d'absorption

Le flux de photons transmis  $\Phi$  dépend de l'épaisseur  $x$  de matière traversée :

$$\Phi = \Phi_0 \cdot e^{-\mu \cdot x}$$

$\mu$  est le **coefficient linéique d'absorption**. Son unité est celle de l'inverse d'une longueur, souvent donné en  $cm^{-1}$ .

Par analogie avec la loi de décroissance radioactive, la signification physique de  $\mu$  est la probabilité d'interaction d'un photon par unité de longueur de matériau traversé.

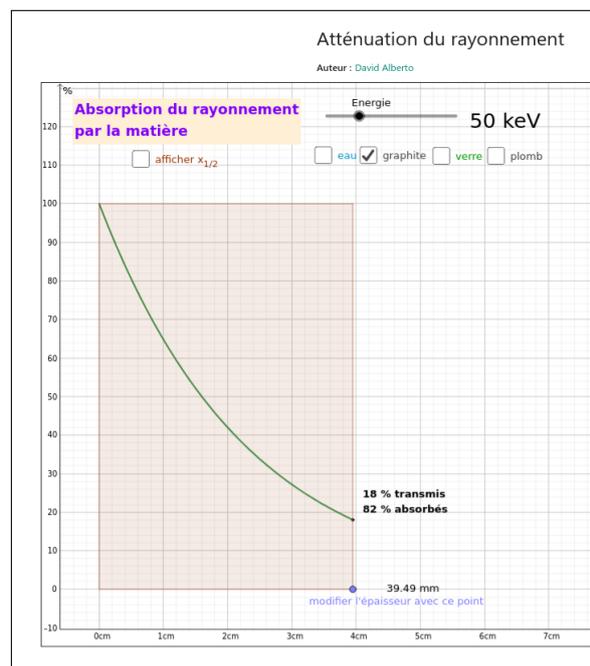
Le rapport  $\frac{\Phi}{\Phi_0}$  représente le **pourcentage de photons transmis** par le matériau.

Animation :

<https://www.geogebra.org/m/fveve9sy>

influence de l'énergie, du matériau, de l'épaisseur.

Les photons non transmis ont interagi avec la matière, via les effets vus au début du cours.



## b. Couche de demi-atténuation

**Définition**

On définit la **couche de demi-atténuation** (CDA) d'un matériau comme l'épaisseur suffisante pour diviser par deux le flux de photons.

La CDA est analogue à la période (demi-vie) dans la loi de décroissance radioactive.

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

$\swarrow$                        $\swarrow$   
 $cm$                        $cm^{-1}$

---

 $x = 1 \cdot CDA \quad : \text{ le flux est divisé par } 2^1$ 


---

$x = 2 \cdot CDA \quad : \text{ le flux est divisé par } 2^2 = 4$ 


---

$x = 3 \cdot CDA \quad : \text{ le flux est divisé par } 2^3 = 8$ 


---

$x = n \cdot CDA \quad : \text{ le flux est divisé par } 2^n$ 


---

FIGURE 7 – Divisions par deux successives

La CDA dépend :

- du **matériau** traversé (en particulier le numéro atomique)
- de l'**énergie des photons incidents**

## c. Coefficient massique d'absorption

Pour prendre en compte la densité du matériau – en plus de sa composition – on définit un **coefficient massique** d'atténuation :

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho}$$

$\longleftarrow$                        $\swarrow$                        $\searrow$   
 $cm^2 \cdot g^{-1}$                        $cm^{-1}$                        $g \cdot cm^{-3}$

## d. Coefficients partiels d'absorption

Le coefficient d'absorption représente l'effet global dû aux phénomènes d'effet photoélectrique, Compton, et de matérialisation.

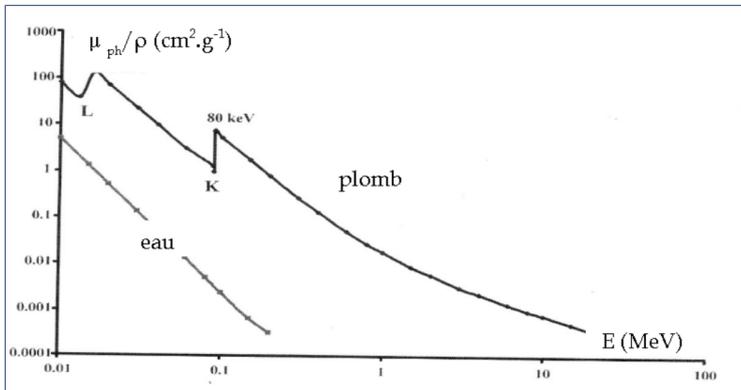
On peut **décomposer** l'influence de chaque effet, et définir les **coefficients partiels d'absorption** :

$$\mu = \mu_{photo} + \mu_{Compton} + \mu_{mater}$$

On peut ainsi comparer entre elles les contributions de chaque phénomène à l'absorption des photons.

## II.2 ○ Evolution des coefficients partiels selon l'énergie des photons

### a. Contribution de l'effet photoélectrique

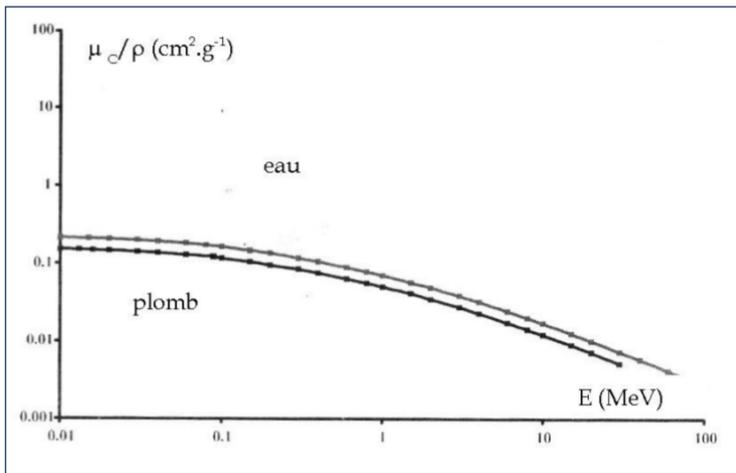


L'échelle est logarithmique.

On constate que l'atténuation est plus forte pour les photons *peu énergétiques*, et pour les *matériaux lourds* (métaux).

Des pics sont observables, lorsque l'énergie du photon est voisine de l'énergie de liaison d'une couche électronique.

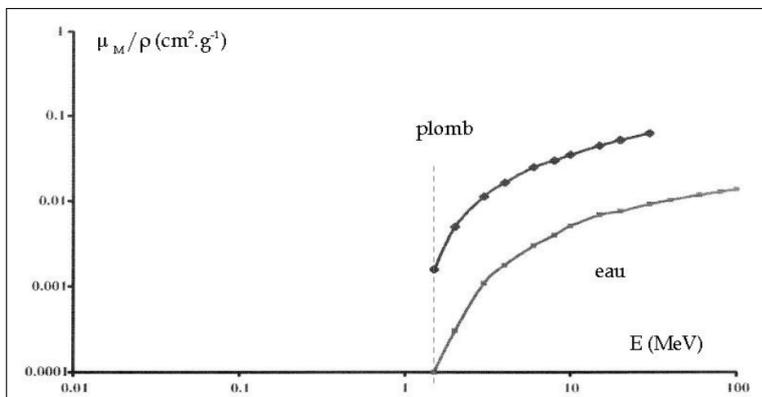
### b. Contribution de l'effet Compton



Le coefficient d'absorption dépend assez peu du matériau.

Il décroît très progressivement avec l'énergie des photons.

### c. Contribution de l'effet de matérialisation

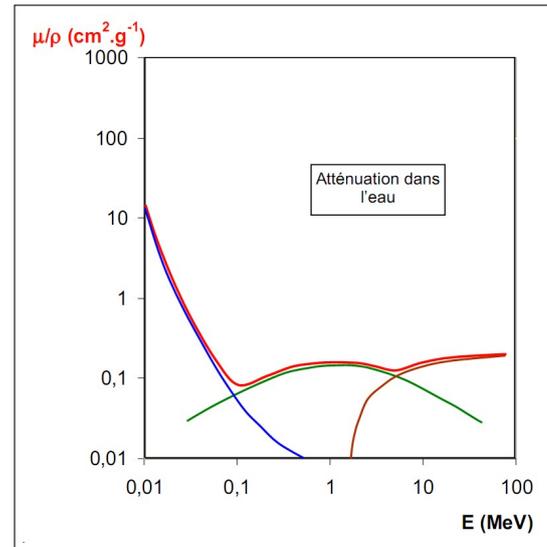
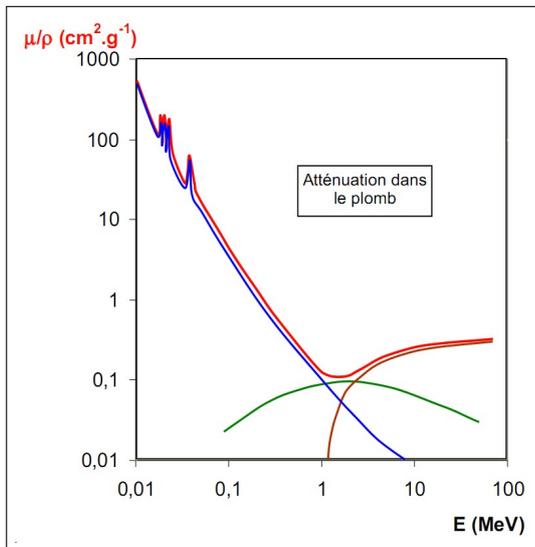


Valeur seuil d'énergie : 1,02 MeV.

**La tendance est inverse des effets précédents** : l'absorption *augmente* avec l'énergie des photons incidents.

Les matériaux lourds absorbent plus efficacement.

## II.3 ○ Evolution du coefficient global d'absorption selon l'énergie

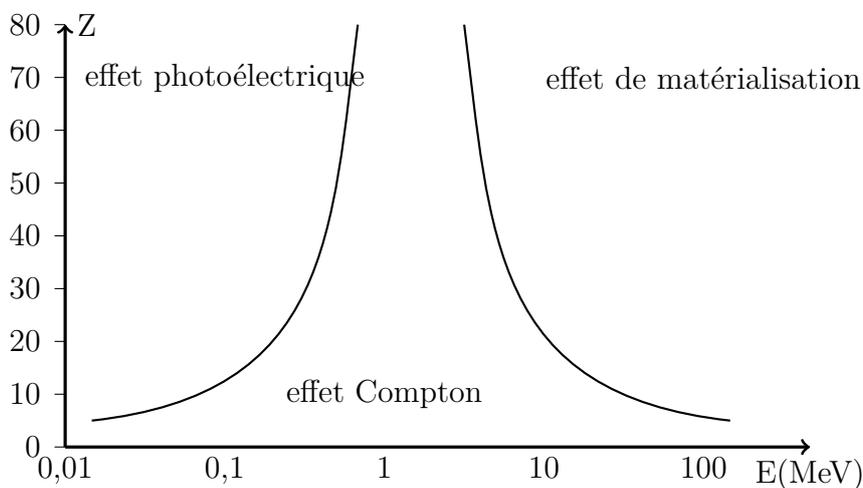


Les allures des courbes sont assez semblables. L'effet photoélectrique est plus marqué pour les métaux. L'effet Compton est plus marqué pour l'eau (et les tissus mous).

*Exemple de lecture : avec un photon de 1 MeV, quel effet prédomine dans le plomb ? l'eau ?*

L'ordre des contributions des 3 effets selon l'énergie est le même dans les deux courbes.

Ce comportement peut être généralisé aux autres milieux, avec le document suivant :



*Exemples de lecture :*

- $E = 0,1$  MeV, dans le plomb ( $Z = 82$ ) : effet photoélectrique prépondérant
- $E = 1$  MeV, dans le plomb ( $Z = 82$ ) : plutôt effet photoélectrique, mais à la limite de l'effet Compton
- $E = 10$  MeV, dans le plomb ( $Z = 82$ ) : effet de matérialisation prépondérant (et un peu d'effet Compton)
- $E = 100$  keV, dans les tissus organiques ( $Z_{moyen} \simeq 4$ ) : effet Compton prépondérant