

COURS N°9 : INTERACTIONS DES RAYONNEMENTS IONISANTS AVEC LA MATIERE.

Généralités

Un rayonnement est une émission d'énergie à partir d'une source.

L'énergie peut être portée par :

- Des particules chargées (électrons, protons, particules α ...).
- Des particules non chargées (neutrons).
- Des photons X ou γ . Ils sont sans masse et non chargés.

La propagation du rayonnement dans le vide est rectiligne et sans perte d'énergie.

La propagation du rayonnement dans la matière permet le transfert d'une partie de leur énergie. On parle d'atténuation, possible notamment par ionisation, qui est l'éjection d'un électron hors de son atome ou de sa molécule.

Ce dernier phénomène est à l'origine des effets utilisés pour la détection des rayonnements, des effets biologiques sur les milieux vivants, de la production des rayons X pour la radiographie.

On trouve 2 sortes de rayonnements ionisants :

- Le rayonnement directement ionisant. La particule qui éjecte les électrons constitue le rayonnement incident (créant ainsi des particules chargées).
- Le rayonnement indirectement ionisant. Le rayonnement primaire constitué de particules neutres (photons, neutrons) produit un rayonnement secondaire de particules chargées (électrons ou photons qui sont ionisantes).

Un rayonnement isotrope est un rayonnement qui émet la même énergie E dans toutes les directions (la source émet une sphère d'énergie).

L'intensité I en un point P est l'énergie qui traverse radialement l'unité de surface autour de ce point P par unité de temps. On a :

$$I = \frac{dW}{dS}$$

Or :

$$dW = \frac{dE}{dt}$$

Donc :

$$I = \frac{dE}{dS \times dt}$$

Avec :

- I l'intensité en $J.m^{-2}.s^{-1}$.
- E l'énergie en J.
- S la surface en m^2 .
- t le temps en s.

Si on prend un point P_1 à une distance d_1 de la source et un point P_2 à une distance d_2 de la source ($d_1 < d_2$), on a :

$$\frac{I_1}{I_2} = \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^2$$

La distance d correspond au rayon de la sphère.

En l'absence d'atténuation, l'intensité du rayonnement dans une direction varie comme l'inverse du carré de la distance.

On ne peut mesurer une énergie par unité de surface par unité de temps pour une particule. On considère donc la fraction du nombre total N de particules au point P , soit la fraction de l'énergie totale transportée.

On définit ainsi la fluence particulaire $\frac{dN}{ds}$ et la fluence énergétique $\frac{dE}{ds}$. La fluence est l'ensemble de l'énergie par unité de surface passant par P pendant tout le temps où le faisceau existe.

On peut définir un débit de fluence énergétique au temps t pour un faisceau parallèle ou une source ponctuelle (ce qui est généralement le cas) :

$$\dot{F} = \frac{dF}{dt} = I$$

Interactions des rayonnements non chargés avec la matière

Les photons X ou γ , issus de la radioactivité des atomes et qui ont une énergie plus grande que les photons X , dont leurs énergies sont données par $E = hu$, peuvent interagir avec les électrons et les atomes du milieu, à qui ils cèdent toute ou une partie de leur énergie, sous forme d'énergie cinétique.

Ce phénomène aléatoire (probabilité) est fonction de :

- de l'épaisseur de la matière traversée.
- De la nature de la matière traversée (ρ ; Z).
- De l'énergie des photons incidents (hu). Un photon moins énergétique transfère plus d'énergie.

On distingue des phénomènes globaux et des phénomènes élémentaires.

I. Phénomènes globaux

A. Coefficient d'atténuation

Pour un faisceau de photons incidents monodirectionnel et monoénergétique, on a :

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

Avec :

- $N(x)$ le nombre de photons n'ayant pas eu d'interactions avec la matière.
- N_0 le nombre de photons incidents initiaux.
- μ le coefficient d'atténuation linéaire total en cm^{-1} , correspondant à la probabilité d'interaction par unité de grandeur. Il est caractéristique du matériau et de l'énergie de la radiation.
- x étant la taille de la matière traversée en cm.

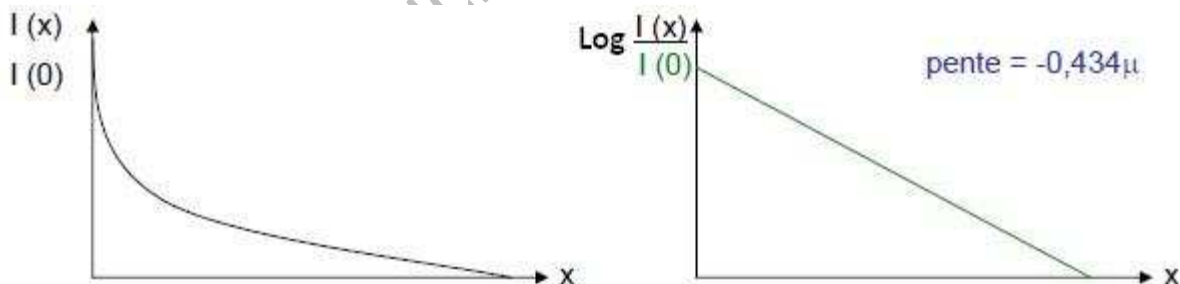
Pour les intensités, on a la même chose :

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

En pratique, on utilise surtout le coefficient d'atténuation massique $\frac{\mu}{\rho}$, donné en $\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$. On a donc :

$$N(x) = N_0 \times e^{-\left(\frac{\mu}{\rho}\right)\rho x}$$

En représentation graphique, ça donne ça :



B. couche de demi-atténuation (CDA)

La couche de demi-atténuation, ou CDA, est l'épaisseur de la matière traversée après laquelle N_0 , ou I_0 , est divisée par 2. Elle est donc donnée en cm. On a :

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

Pour $x = n \times CDA$, on a :

$$N(x) = \frac{N_0}{2^n}$$

C. atténuation et absorption

Le faisceau de photons est atténué, un certain nombre disparaît, avec transfert de leur énergie à la matière.

$$E_T = E_i - E_e$$

Avec :

- E_T l'énergie transférée par le faisceau.
- E_i l'énergie du faisceau incident.
- E_e l'énergie du faisceau émergent.

L'énergie transférée E_T n'est pas forcément l'énergie absorbée par la matière. C'est le cas seulement si les électrons secondaires perdent leur énergie dans la matière et si les photons diffusés ou secondaires y sont absorbés.

II. Phénomènes élémentaires

A. Effet photo électrique

Le photon incident transfère totalement et rapidement son énergie et permet l'éjection d'un électron. Il y a donc disparition du photon, création d'un ion et apparition d'un photo électron, qui est arraché à son orbite. C'est ce qu'on appelle le phénomène primaire.

L'électron est éjecté avec une certaine énergie cinétique donnée par :

$$E_c = W_i - E_l = h\nu - E_l$$

Avec :

- E_c l'énergie cinétique du photo électron.
- W_i l'énergie du photon incident.
- E_l l'énergie de liaison de l'électron.

Il faut bien sûr que l'énergie du photon soit supérieure à celle de l'énergie de liaison pour qu'il y ait un effet photo électrique.

De plus, l'électron secondaire crée va perdre progressivement son énergie (cinétique) par interactions avec d'autres atomes dans le milieu. Il peut ainsi créer des ionisations.

Enfin, le trou laissé par l'électron qui a été éjecté induit un réarrangement en cascade du cortège électronique, permettant ainsi l'émission de photons de fluorescence ou l'expulsion d'un électron Auger, dont l'énergie (cinétique) est rapidement absorbée par la cible. Il y a toujours compétition entre l'émission de photons de fluorescence et l'expulsion d'un électron Auger, et cette dernière prédomine pour les éléments légers.

On peut définir la probabilité τ d'interaction par effet photo électrique :

$$\tau = A \times \frac{Z^3}{(h\nu)^3}$$

Avec A constante proportionnelle à la masse volumique ρ .

On constate que τ croît très vite avec Z et diminue quand l'énergie des photons augmente. Il faut donc, pour favoriser l'effet photo électrique, prendre des photons d'énergie relativement faible et diriger le faisceau sur des éléments lourds.

B. Effet Compton

Le photon incident ne transfère pas toute son énergie mais permet l'éjection d'un électron peu lié à la matière ou libre.

Le photon est diffusé suivant une direction faisant un angle θ (allant de 0 à 180°) avec sa direction d'origine et bien sûr avec une énergie plus basse $h\nu'$.

L'électron dit « de recul » est projeté dans une direction faisant un angle ϕ (allant de 0 à 90°) avec la direction du photon incident, et avec une énergie cinétique E_c .

On a conservation de la quantité de mouvement et de l'énergie :

$$\vec{h\nu} = \vec{h\nu'} + \vec{E_c}$$

On a également :

$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + \frac{h\nu}{m_0c^2}(1 - \cos\theta)}$$

$$E_c = h\nu - \frac{h\nu}{1 + \frac{h\nu}{m_0c^2}(1 - \cos\theta)}$$

Avec m_0 la masse d'un électron.

On a 2 cas extrêmes :

- Si $\theta = 0$; $\cos \theta = 1$, $h\nu = h\nu'$ et donc $E_c = 0$.
- Si $\theta = 180^\circ$; $\cos \theta = -1$. On parle de rétrodiffusion (le photon incident « retourne d'où il vient », avec une énergie bien plus faible. on a :

$$E_{C \max} = h\nu - \frac{h\nu}{1 + \frac{2 \times h\nu}{m_0c^2}}$$

L'électron émis a un parcours court dans la matière et est absorbé localement. Les photons diffusés peuvent quitter le milieu (l'énergie ne sera pas absorbée).

On donne donc la probabilité d'atténuation par effet Compton :

$$\sigma = \sigma_d + \sigma_a$$

Avec :

- σ le coefficient total d'atténuation linéaire par effet Compton.
- σ_d le coefficient d'atténuation par diffusion Compton.
- σ_a le coefficient d'atténuation par absorption Compton.

- Si $h\nu$ est faible (< 100 keV), l'énergie des photons diffusés augmente.
- A basse énergie ($h\nu < 0,5$ MeV), on a :

$$\sigma = \mathbf{B} \times \frac{\mathbf{Z}}{h\nu}$$

La direction des photons diffusés et des électrons se rapproche de celle des photons incidents quand $h\nu$ augmente.

C. Création de paires

Si $h\nu$ est élevé, le photon peut passer près d'un noyau et disparaître pour donner une paire électron/positon ($e^- ; e^+$).

Pour cela, il faut que $h\nu > 2 m_0c^2$ (1,02 MeV).

Lorsque c'est le cas, l'énergie excédentaire est partagée en énergie cinétique entre l'électron et le positon.

Quand le positon est ralenti, il se combine à un électron de la matière pour donner 2 photons d'annihilation (sens diamétralement opposé et énergie de 511 keV chacun).

On donne la probabilité d'atténuation par création de paires :

$$\pi = \pi_a + \pi_d$$

Avec :

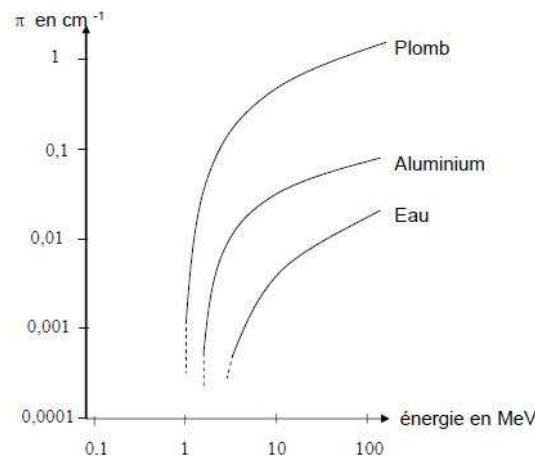
- π le coefficient total d'atténuation par création de paires.
- π_a le coefficient d'atténuation par ABSORPTION.
- π_d le coefficient d'atténuation par ANNIHILATION.

A haute énergie, on a :

$$\pi = \mathbf{C} \times \mathbf{Z}$$

Avec C une constante.

On peut donner un graphique de variation de π en fonction de l'énergie des photons incidents pour quelques matériaux :



D. Coefficient d'atténuation total

On donne :

$$\mu = \tau + \sigma + \pi$$

Pour un matériau de masse volumique :

$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{\tau}{\rho} + \frac{\sigma}{\rho} + \frac{\pi}{\rho}$$

Pour le rayonnement réellement absorbé :

$$\frac{\mu_a}{\rho} = \frac{\tau}{\rho} + \frac{\sigma_a}{\rho} + \frac{\pi_a}{\rho}$$

L'importance de ces effets dépend :

- De l'énergie des photons incidents.
- Du matériau considéré.

On peut donner des petits tableaux en pratique, en donnant le matériau et les effets prépondérants en fonction de l'énergie des photons incidents.

EAU (grosso modo le malade)	Effets prépondérants
$0 < hu < 50 \text{ keV}$	Effet photo électrique (on ne voit rien en imagerie).
$50 \text{ keV} < hu < 20 \text{ MeV}$	Effet Compton. Les photons diffusés génèrent une image.
$hu > 20 \text{ MeV}$	Création de paires. Elle est utilisée pour les thérapies.

PLOMB (système de protection)	Effets prépondérants
0 < hu < 500 keV	Effet photo électrique.
500 keV < hu < 5 MeV	Effet Compton.
hu > 5 MeV	Création de paires.

En médecine, on n'utilise pas de photons incidents de plus de 1,3 MeV.

En radiodiagnostic, les photons sont compris entre 60 et 140 keV pour qu'on ait à la fois un effet photoélectrique et un effet Compton en fonction de Z, permettant ainsi le contraste entre les tissus de différentes densités. L'effet Compton trop prédominant est source de « flou » donc on essaie de les limiter.

Pour la radiothérapie, les photons sont compris entre 200 à 250 keV.

***Ce document, ainsi que l'intégralité des cours P1, sont disponibles sur
<http://coursp1bichat-lariboisiere.weebly.com>***