

INTERACTIONS DES RAYONNEMENTS AVEC LA MATIERE

Un rayonnement peut-être de 2 types :

Électromagnétique	Particulaire
Soit un faisceau de photons	Soit une masse non négligeable

Lorsqu'un rayonnement traverse la matière, il lui transfère une partie de son énergie, selon 3 mécanismes :

- Échauffement de la matière
- Excitation des atomes de la matière
- Ionisation des atomes de la matière

Ces mécanismes sont utilisés pour l'exploration médicale et dans la santé (Déterminer les effets biologiques des rayonnements ionisants cf. Radioprotection et radiothérapie)

I. INTERACTIONS ELEMENTAIRES

Les interactions sont à étudiées selon 3 aspects :

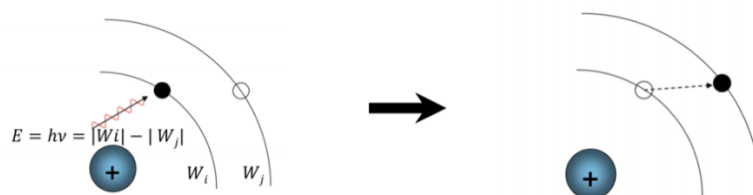
- l'interaction élémentaire, soit le mécanisme, la probabilité de survenue, ... mis en place
- les conséquences pour le rayonnement incident
- les conséquences pour la matière

A. INTERACTION PAR EXCITATION

Lorsque le photon incident :

- possède une énergie : $E = h\nu$ inférieur à l'énergie de liaison d'un électron de la cible, soit $E < W_i$,
- mais avec une énergie égale à l'écart d'énergie de liaisons entre les couches de l'atome, soit $E = |W_i| - |W_j|$,
- on a, un électron qui va changer d'orbitale et changer de case quantique.

Voyons ça :



L'énergie absorbée est quantifiée ! Car elle prend que des valeurs bien définies, elles sont déterminées par la structure des atomes de la matière traversée.

Ici, on parle d'excitation car l'atome n'est plus dans son état fondamental. Il est dans un état, dit excité et possède un excès d'énergie, égal à l'énergie apportée par le photon $E = h\nu = |W_i| - |W_j|$.

État excité : un électron, au moins, s'est déplacé pour occuper une couche plus haute.

B. INTERACTION PAR IONISATION

Lorsque le photon incident :

- Possède une énergie, $E = h\nu$ supérieur ou égale à l'énergie de liaison de l'électron, soit $E \geq W_i$, celui-ci est expulsé de son orbitale.

Le Tutorat est gratuit. La vente ou la reproduction sont interdites

L'électron est expulsé de l'atome avec une énergie $T = h\nu - |W_i|$.

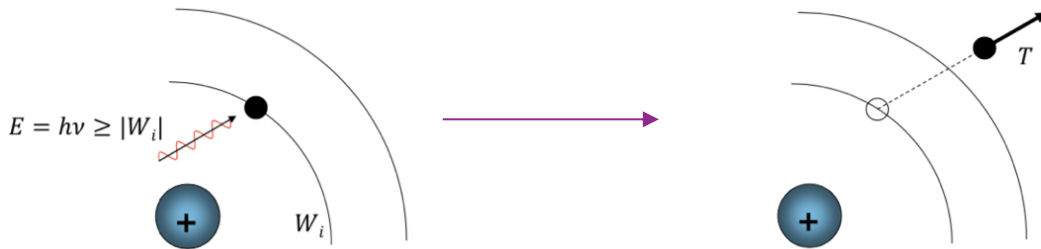
L'atome est ionisé : c'est-à-dire qu'il perd un électron et passe d'un état fondamental à un état d'excitation avec excès d'énergie.

Cette excès d'énergie est égal à l'énergie de liaison $|W_i|$.

Le photon incident va se partager entre :

- l'énergie consommé pour arracher l'électron hors de son orbitale $|W_i|$.
- l'énergie emportée par l'électron expulsé (son énergie cinétique T)

L'énergie absorbée n'est pas quantifiée, car toutes valeurs continues supérieurs à ce seuil peuvent ioniser l'atome.



II. RAYONNEMENTS IONISANTS

A. DEFINITIONS

Les rayonnements ionisants (RI) sont :

- Soit des rayonnements électromagnétiques,
- Soit des rayonnements corpusculaires,

capables de produire directement ou indirectement des ions.

Ces rayonnements doivent avoir une énergie suffisante pour arracher un électron à l'atome considéré.

Les électrons créés sont importants à considérer, car :

- ils vont permettre de détecter le rayonnement initial,
- ils sont à l'origine d'effets biologiques causés par les rayonnements (sur la cellule ou l'ADN par exemple).

B. RAYONNEMENTS DIRECTEMENT OU INDIRECTEMENT IONISANTS

	<i>Directement</i>	<i>Indirectement</i>
<u>Sont des :</u>	Particules chargées :	Rayonnements non chargés :
	α	REM (γ ou χ)
	β^+	Particules neutres (neutron)
	β^-	
<u>Ont des :</u>	Interactions obligatoires	Interactions non obligatoires, dites : Statistique ou balistique

Les particules chargées ont des interactions électrostatiques avec la matière chargée, sans rentrer directement en contact avec un électron de la matière.

Les particules non chargés, doivent heurter un électron sur leurs trajectoires.

C. CARACTERE IONISANT OU NON DES REM

Pour être ionisant, il faut que son énergie soit supérieure ou égale à l'énergie de liaison de cet électron afin que celui-ci soit expulsé.

Un rayonnement électromagnétique magnétique doit posséder quelle quantité d'énergie pour être ionisant ?

Nous sommes principalement constitué des atomes suivant :

Atome	$ W_i $ en eV
C	11,24
H	13,54
O	13,57
N	14,24

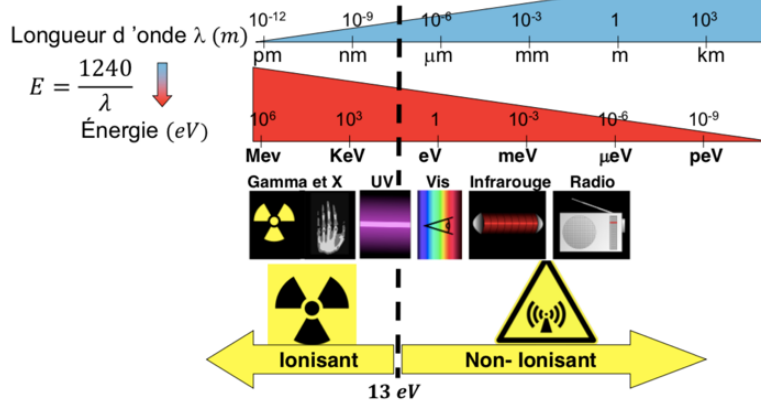
Ici, nous avons les énergies de liaison moyennes des électrons périphériques de ces atomes.

Nous pouvons donc déterminer un seuil de énergétique à partir duquel les REM sont ionisant, ce dernier étant établi par convention.

Ce seuil énergétique correspond à l'énergie de liaison des électrons de la molécule d'eau (75% des molécules de notre organisme).

Soit, $W_{H_2O} \cong 13,6 \text{ eV}$

■ Spectre des rayonnements électromagnétiques



Soit $E \geq 13,6 \text{ eV}$, le rayonnement est ionisant	Soit $E \leq 13,6 \text{ eV}$, le rayonnement est non ionisant
---	---

Notre limite d'environ 13 eV, sépare notre spectre électromagnétique en deux, soit :

- une partie gauche les REM ionisants (Rayons γ et X + une partie des UV)
- une partie droite les REM non ionisants (l'autre partie des UV, le visible, l'infrarouge, les ondes radios...)

III. CONSEQUENCE POUR LA MATIERE

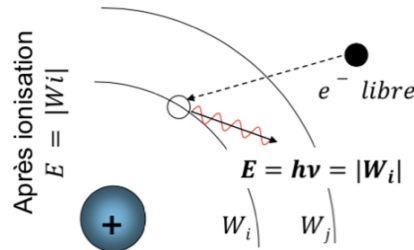
A. EMISSION D'UN PHOTON DE FLUORESCENCE

L'ionisation ou l'excitation de l'atome, laisse une case quantique vacante (=libre) sur l'atome. Cette case va être comblée par un électron, selon diverses modalités :

- **Modalités 1** : l'atome a subi l'ionisation d'un de ses électrons et se réarrange avec un électron libre.

L'électron libre vient combler la case quantique libre, l'atome retrouve son état fondamental et émet un photon de fluorescence.

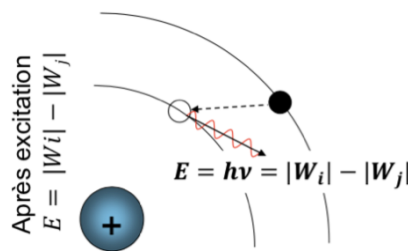
L'énergie de ce photon de fluorescence est égale à celle reçue, en excès, lors de l'ionisation, soit : $E = h\nu = |W_i|$.



- **Modalités 2** : l'atome a subi une excitation, un de ses électrons a changé de case quantique et se réarrange avec un électron périphérique.

L'électron périphérique vient combler la case quantique libre, l'atome retrouve son état fondamental et émet un photon de fluorescence.

L'énergie de ce photon de fluorescence est égale à celle reçue, en excès, lors de l'excitation, soit : $E = h\nu = |W_i| - |W_j|$.



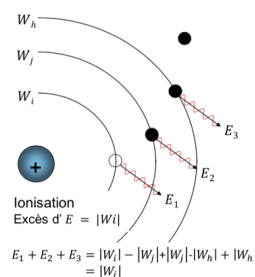
- **Modalités 3** : l'atome a subi une ionisation d'un de ses électrons et se réarrange en cascade.

Ici, un électron de la couche j peut combler la case quantique libre de la couche i, en émettant un photon de fluorescence $E = |W_i| - |W_j|$.

Puis, un électron de la couche H vient combler la case quantique vacante de la couche j (libérée lors du déplacement précédent), en émettant un photon de fluorescence $E = |W_j| - |W_h|$.

Pour finir, un électron libre vient combler la case quantique vacante de la couche h (cette dernière, libérée lors du deuxième déplacement), en émettant un photon de fluorescence $E = |W_h|$.

La somme des énergies de ces 3 photons de fluorescence est égale à celle reçue, en excès, lors de l'ionisation, soit : $E_1 + E_2 + E_3 = (|W_i| - |W_j|) + (|W_j| - |W_h|) + |W_h| = |W_i|$.



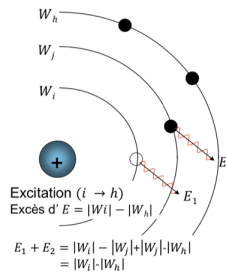
- **Modalités 4** : l'atome a subi une excitation, un de ses électrons a changé de case quantique et se réarrange avec un électron périphérique.

Ici, un électron de la couche j peut combler la case quantique libre de la couche i, en émettant un photon de fluorescence $E_1 = |W_i| - |W_j|$.

Puis, un électron de la couche h vient combler la case quantique vacante de la couche j (libérée lors du déplacement précédent), en émettant un photon de fluorescence $E_2 = |W_j| - |W_h|$.

On retrouve donc l'état fondamental de notre atome.

La somme des énergies de ces 2 photons de fluorescence est égale à celle reçue, en excès, lors de l'excitation, soit : $E_1 + E_2 = (|W_i| - |W_j|) + (|W_j| - |W_h|) = |W_i| - |W_h|$.



B. EMISSION D'UN ELECTRON AUGER

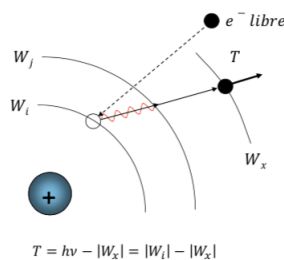
Principe :

Le photon de fluorescence émis lors du retour à l'état fondamental d'un atome peut lui-même venir expulser un électron de ce même atome, le plus souvent positionné sur une couche périphérique. L'électron expulsé prend alors le nom d'« électron Auger ».

- **Modalités 1 :** Après une ionisation, un électron libre va venir combler la vacance électronique, ce qui va libérer un photon de fluorescence d'énergie $E = h\nu = |W_i|$.

Si la trajectoire de ce photon croise la position d'un électron d'une couche x en périphérie, il va pouvoir l'expulser en lui transmettant son énergie sous forme d'énergie cinétique T :

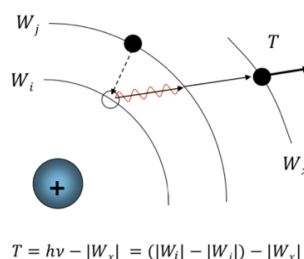
$$T = h\nu - |W_x| = |W_i| - |W_x|$$



- **Modalités 2 :** Après une excitation, un électron en périphérie va venir combler la vacance électronique, ce qui va libérer un photon de fluorescence d'énergie $E = h\nu = |W_i| - |W_j|$.

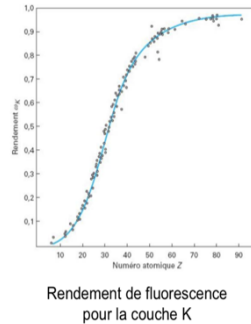
Si la trajectoire de ce photon croise la position d'un électron d'une couche x en périphérie, il va pouvoir l'expulser en lui transmettant son énergie sous forme d'énergie cinétique T :

$$T = h\nu - |W_x| = (|W_i| - |W_j|) - |W_x|$$



Que ce soit après une ionisation ou une excitation, il ne faut pas oublier de soustraire l'énergie de la couche où se trouve l'électron Auger à chaque fois ! $|W_x|$

C. CONCLUSION SUR LES CONSEQUENCES POUR LA MATIERE



Il existe deux façons pour un atome excité de retourner à son état fondamental, soit :

- soit par émission radiative (photon des fluorescence).
- soit par émission d'un électron d'Auger.

Le rendement de fluorescence ω_i , caractérise la compétition entre ces deux phénomènes.

$$\omega_i = \frac{\text{Proba Fluorescence}}{\text{Proba Auger}}$$

Ce rendement dépend du nombre d'électrons, donc du Z :

- Plus l'atome est riche en électrons (donc avec un Z élevé), plus ω_i augmente, et donc plus il est probable que la désexcitation se fasse par un rayonnement de fluorescence.
- Inversement, plus l'atome est léger (donc avec un Z faible), plus la désexcitation par émission Auger est probable.

IV. INTERACTIONS DES PHOTONS AVEC LA MATIERE

A. LOI D'ATTENUATION DES PHOTONS

Un flux de photon arrivant sur un échantillon de matière, l'interaction avec la matière se fait de façon aléatoire.

Les photons, pourront :

- être absorbés
- diffuser
- transmis

La loi d'atténuation décrit le devenir de cette population de photon. Nous pourrions déterminer combien de photon seront retrouvés après la traversée d'une certaine épaisseur de matière, soit les photons transmis.

Expression de la loi :

Soit un faisceau étroit de N photons mono-énergétiques qui traversent une épaisseur dx de matière, le nombre de photons transmis est :

$$N - dN \text{ avec } -dN = N(0)e^{-\mu x}$$

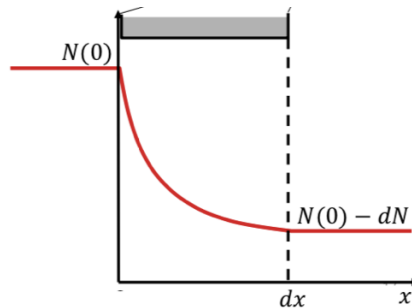
avec μ la probabilité d'interaction par unité de longueur et x l'épaisseur de matière traversée.

Ici, dN correspond au nombre de photons atténués et celui-ci sera d'autant plus important que la probabilité d'interaction μ est forte, que le nombre de photons N est élevé, et que l'épaisseur de la matière dx est importante.

Généralement, le nombre de photons transmis est :

$$N(x) = N(0)e^{-\mu x}$$

Cette atténuation des photons est donc exponentielle.



Différentes expressions de μ :

❖ μ = coefficient linéique d'atténuation

Défini la probabilité d'interaction d'un photon avec la matière par unité de longueur \rightarrow dimension $[L^{-1}]$ (ex : cm^{-1}).

Le coefficient linéique d'atténuation est spécifique :

- du milieu
- de l'énergie des photons (on atténue pas de la même façon un neutron et un rayon X)
- dépend de l'état du milieu (épaisseur)

Il faut donc connaître μ et x (= l'épaisseur), pour calculer $N(x)$.

L'épaisseur étant difficile à mesure on préfère utiliser le coefficient massique d'atténuation.

❖ $\frac{\mu}{\rho}$ = coefficient massique d'atténuation

Dimension du coefficient $\rightarrow [L^2.M^{-1}]$ (ex : $cm^2.g^{-1}$). Il ne dépend donc plus de l'état du milieu.

La masse surfacique $\frac{m}{s} = \frac{mx}{sx} = \frac{mx}{vol} = \rho x$ est plus facile à mesurer que l'épaisseur x :

On peut donc écrire la loi d'atténuation de la manière suivante :

$$N(x) = N(0)e^{-\frac{\mu}{\rho}\rho x}$$

Couche de demi-atténuation (CDA) :

La CDA est l'épaisseur x de matière qui diminue le flux de photons d'un facteur 2, soit $\frac{N(0)}{2}$

$$\frac{N(0)}{2} = N(0)e^{-\mu \times CDA} \text{ soit } CDA = \frac{\ln 2}{\mu}$$

On peut donc réécrire la loi d'atténuation en caractérisant le milieu par sa CDA,

$$N(k \times CDA) = N(0) \left(\frac{1}{2}\right)^k = \frac{N(0)}{2^k}$$

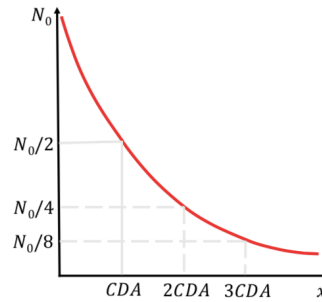
On peut conclure, que :

- 1 CDA atténue 50 % des photons incidents
- 2 CDA atténue 75 % des photons incidents
- 3 CDA atténue 87,5 % des photons incidents

- ...

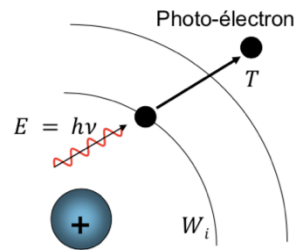
- 10 CDA atténue 99,9 % des photons incidents, nous pouvons considérer que le nombre de photons transmis est négligeable (soit < à 0,1 %).

La courbe tend vers 0 sans jamais l'atteindre, on dit donc que l'absorption d'un faisceau de photons n'est jamais totale !



B. MECANISMES D'ATTENUATIONS DES PHOTONS

a. Effet photo-électrique



Principe :

Un photon incident d'énergie $E = h\nu_1$ rencontre un électron de la matière.

Le photon lui transfère la totalité de son énergie, l'électron est donc expulsé.

Il faut l'énergie du photon incidente soit supérieur à l'énergie de liaison de l'électron $|W_i|$.

L'électron est expulsé, avec une énergie cinétique T , tel que :

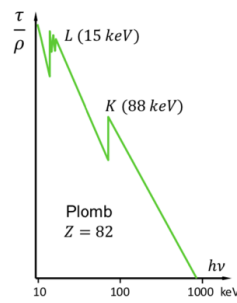
$$T = h\nu - |W_i|$$

Conséquences de l'effet :

- Pour l'atome : réarrangement électronique par émission photons de fluorescence et/ou d'électron Auger.
- Pour l'électron ionisé (=expulsé) : perte progressive de son énergie cinétique T par ionisation successives.
- Pour le rayonnement : transfert de toute son énergie à l'électron provoquant sa disparition.

Probabilité d'interaction par effet photoélectrique τ :

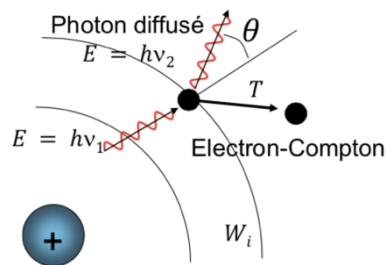
$$\text{On a : } N(x) = N(0)e^{-\tau x} \text{ avec } \tau = k\rho \frac{Z^3}{(h\nu)^3} \text{ ou } \frac{\tau}{\rho} = k \frac{Z^3}{(h\nu)^3}$$



Cette probabilité τ est d'autant plus élevée que l'atome est riche en électron c'est à dire que son Z est élevé (car Z^3 au numérateur) et est d'autant plus élevée que l'énergie du photon incident est faible (car $(hv)^3$ au dénominateur).

La diminution de la probabilité en fonction de l'énergie est irrégulière : il existe des maxima (pics du graphe) correspondant aux valeurs exactes des énergies de liaison des électrons de la matière : $|W_k|$, $|W_L|$... Ces maxima montrent que la probabilité d'avoir l'effet photo-électrique pour ces électrons est plus importante.

b. Effet Compton



Principe :

Un photon incident d'énergie $E = hv_1$ rencontre un électron de la matière.

Le photon lui transfère une partie de son énergie, l'électron est donc expulsé.

On a l'énergie cinétique T de l'électron expulsé :

$$T = hv_1 - |W_i| - hv_2$$

L'énergie restante du photon incident forme le photon diffusé hv_2 .

On a l'énergie du photon diffusé : $E = hv_2 < hv_1$

On a donc :

$$hv_1 = T + hv_2 + |W_i|$$

Conséquences de l'effet :

- Pour l'atome : réarrangement électronique par émission photons de fluorescence et/ou d'électron Auger.
- Pour l'électron ionisé (=expulsé) : perte progressive de son énergie cinétique T par ionisation successives. C'est l'énergie absorbée ou transférée $E_a = T$.
- Pour le rayonnement : une partie du rayonnement est diffusée : c'est l'énergie diffusée $E_d = hv_2$.

Pour connaître les proportions des énergies absorbée et diffusée, on utilise la formule de Compton :

$$\frac{E_{\text{absorbée}}}{E_{\text{diffusée}}} = \frac{T}{hv_2} = \frac{hv_1(1 - \cos \theta)}{mc^2}$$

❖ Effets de l'angle sur le rapport $\frac{E_{\text{absorbée}}}{E_{\text{diffusée}}}$:

	<p>Si l'angle θ, soit l'angle entre la trajectoire initiale du photon et la trajectoire du photon diffusé, est faible, la majorité de l'énergie est diffusée.</p> <p>On a un cas extrême ; le choc « tangentiel », où la totalité de l'énergie est diffusée.</p>
	<p>Si l'angle θ, soit l'angle entre la trajectoire initiale du photon et la trajectoire du photon diffusé, est élevé, la majorité de l'énergie est absorbée.</p> <p>On a un cas extrême : le choc « frontal », où l'énergie cinétique T est maximale (absorption maximale).</p>

❖ Effets de l'énergie incidente sur le rapport $\frac{E_{\text{absorbée}}}{E_{\text{diffusée}}}$:

Plus l'énergie du photon incident hv_1 est élevée, plus le rapport est élevé, donc plus l'absorption sera importante.

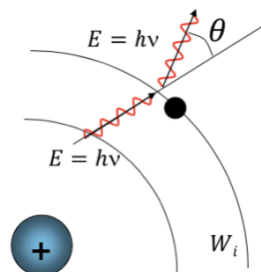
Probabilité d'interaction par effet Compton σ :

$$N(x) = N(0)e^{-\sigma x} \text{ avec } \sigma = k\rho \frac{1}{hv} \text{ ou } \frac{\sigma}{\rho} = k \frac{1}{hv}$$

Cette probabilité est inversement proportionnelle à l'énergie hv : elle est maximale pour les énergies faibles puis elle décroît en fonction de l'énergie.

Par rapport à l'effet photo-électrique, l'effet Compton est pratiquement indépendant de la nature de la matière, donc de Z !

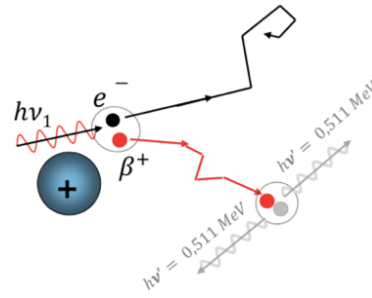
c. Diffusion de Thompson-Rayleigh



Ici, la diffusion de Thompson-Rayleigh correspond au changement de direction du photon incident sans changement d'énergie, ni de longueur d'onde.

Elle concerne principalement les photons de basse énergie comme les infra-rouges, le visible, les ultra-violets.

d. Création de paire ou matérialisation



Principe :

Un photon incident passe à proximité d'un noyau, il voit son énergie se transformer en 2 particules :

Un électron e^- et son antiparticule, le positon β^+ .

Le photon incident $h\nu$ disparaît au profit de ces deux masses (particules).

- L'électron continue son parcours dans la matière.
- L'antiparticule β^+ en rencontrant un autre électron, va se désintégrer en 2 photons d'énergie $0,511\text{ MeV}$ ($= 511\text{ keV}$) chacun, émis à 180° l'un de l'autre.

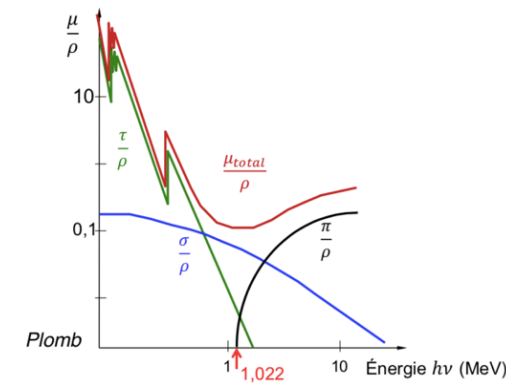
Probabilité d'interaction par création de paire π

$$N(x) = N(0)e^{-\pi x}$$

La probabilité d'interaction augmente avec l'énergie des photons incidents. Cependant, elle nécessite le franchissement d'un seuil énergétique de $1,022\text{ MeV}$ (ou 1022 keV).

C. IMPORTANCE RELATIVE DES MECANISMES D'INTERACTION

Selon l'énergie :



La courbe $\frac{\mu}{\rho}$ (la plus haute) représente la probabilité d'atténuation globale.

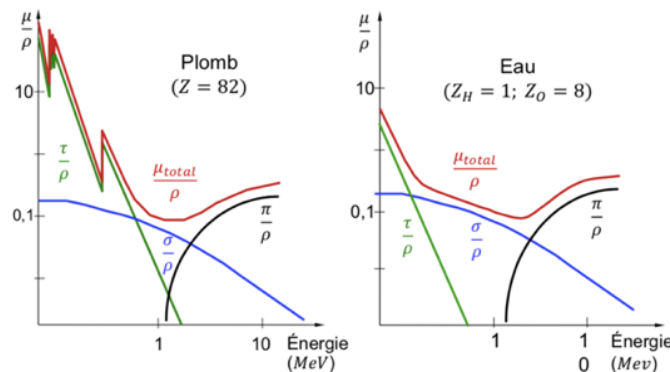
Cette courbe représente la somme des probabilités intermédiaires :

- $\frac{\tau}{\rho}$ pour l'effet photo-électrique,
- $\frac{\sigma}{\rho}$ pour l'effet Compton,
- $\frac{\pi}{\rho}$ pour la création de paire.

C'est donc le résultat de la superposition de ces 3 effets.

Au début, l'effet photo-électrique prédomine pour les faibles énergies, puis rapidement l'impact de l'effet Compton devient important et enfin quand l'énergie dépasse le seuil de 1,022 MeV la création de paire rentre en jeu et la probabilité d'atténuation globale augmente à nouveau.

Selon le milieu :

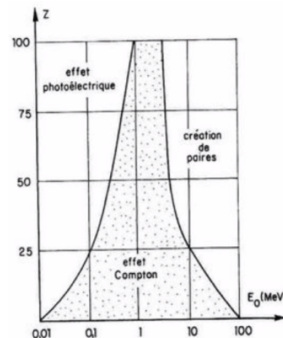


En comparant les courbes de probabilité d'atténuation entre le plomb et l'eau on remarque que seul l'effet photo-électrique change de manière significative (courbe $\frac{\tau}{\rho}$), car c'est le seul dont la probabilité dépend du Z du milieu.

Le Z est beaucoup plus faible dans l'eau que dans le plomb.

Ce qui modifie la probabilité d'atténuation globale (courbe $\frac{\mu}{\rho}$).

Les autres effets ne changent presque pas.



Sur ce graphique, on a :

- l'énergie en abscisse
- le Z en ordonnée

Ce graphique se décompose en 3 zones correspondant aux prédominances de chaque effet.

L'effet photo-électrique prédomine lorsque l'énergie est faible et plus le Z est grand.

L'effet Compton prédomine pour les énergies moyennes ou pour les faibles Z.

La création de paire prédomine une fois que le seuil énergétique de 1,022 MeV a été dépassé.

V. INTERACTION DES PARTICULES AVEC LA LUMIERE

A. INTERACTIONS DES NEUTRONS

Les neutrons sont des particules qui possèdent une masse et qui n'ont pas de charge.

N'étant pas chargés, ils vont interagir avec l'atome, uniquement, par contact direct. L'interaction des neutrons avec la matière est donc peu probable, ils sont dit très pénétrants.

Le Tutorat est gratuit. La vente ou la reproduction sont interdites

On distingue deux types de neutrons :

❖ Neutrons rapides → énergie cinétique (E_c) élevée :

Si les neutrons traversent un milieu riche en hydrogène H (1 seul proton), il possède une masse proche de celle du neutron. Par conséquent, la probabilité d'interaction entre les neutrons incidents et les noyaux sera élevée dans ce cas-là.

Le neutron va percuter un proton chargé qui va acquérir une certaine énergie cinétique, il est ainsi expulsé : on parle de proton secondaire. Du fait qu'il est chargé on retrouvera alors de nombreuses ionisations sur son trajet.

Les neutrons rapides sont donc indirectement ionisant car ils créent des protons secondaires qui sont eux responsables des ionisations

Si les neutrons traversent un milieu riche en noyaux lourds, le transfert d'énergie est minimal car les neutrons ne font que « rebondir » sur les noyaux et sont simplement déviés : on dit qu'ils diffusent.

❖ Neutrons lents ou « thermique » (E_c faible) :

Ils vont être capturés (=absorbés) par le noyau. On parle alors de capture radiative parce que le plus souvent ce neutron crée un déséquilibre du noyau qui va devenir radioactif, provoquant ainsi sa désintégration.

En général : Un neutron incident rapide va percuter et rebondir sur des protons qui vont provoquer des ionisations de leurs côtés, ainsi le neutron va perdre de son énergie cinétique et va devenir lent. Il finira par

B. INTERACTIONS DES PARTICULES CHARGÉES POSITIVEMENT

Ici, on parle principalement des protons ${}^1_1p^+$ et des particules alpha ${}^4_2He^{2+}$.

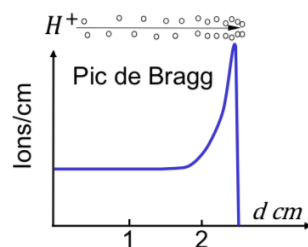
Ces molécules étant chargés, elles sont directement ionisante, même s'il ne croisent pas la position d'un électron. Elles peuvent les repousser par effet électrostatique et les expulser, ce qui crée de nombreuses ionisations.

Ces particules ont une masse bien plus importante que celle de l'électron, lors de leur interaction, les particules positives seront peu déviées et auront un parcours relativement linéaire.

Le pouvoir d'arrêt de ces particules est très élevé, leur parcours est relativement court, elles sont donc peu pénétrantes dans la matière.

$$S_x = \frac{\Delta T}{\Delta x} = k \frac{Z^2}{v^2}$$

Le pic de Bragg, décrit le dépôt d'énergie non uniforme de ces particules. La densité d'ionisation est assez constante le long du parcours de la particule, puis on observe un maximum d'ionisation, sous la forme d'un pic et enfin l'arrêt de la particule.



Le pic de Bragg, désigne la profondeur à laquelle les effets biologiques sont importants, cette propriété est exploitée en radiothérapie.

C. INTERACTIONS DES ELECTRONS

Les électrons étant des particules chargées, ces particules sont directement ionisantes.

Ils sont responsables de deux types de collisions :

	Lointaines	Proximales
Action :	Électrostatiques	
Fréquence :	Nombreuses	Rares