

TUT'ENTRÉE – COURS 2

INTERACTIONS DES RAYONNEMENTS IONISANTS AVEC LA MATIÈRE

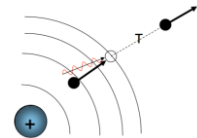


- Cette interaction se traduit par un **transfert d'énergie** du **rayonnement** vers la **matière**.
- Une **interaction** est nécessaire pour **détecter un rayonnement** : intérêt des interactions **rayonnement-détecteur** pour **l'imagerie**.
- Les interactions sont la **1e étape de l'action biologique des rayonnements** : intérêt en **radiothérapie** et en **radioprotection**.

I. RAYONNEMENTS IONISANTS

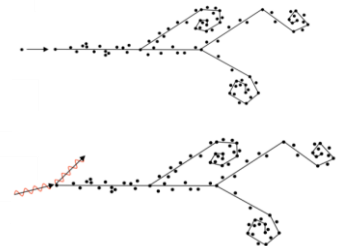
A. Définitions des rayonnements ionisants

- « Rayonnements **électromagnétiques** ou **corpusculaires** capables de **produire directement ou indirectement** des **ions**, lors de leur passage à travers les atomes et les molécules ».
- Les ions créés sont à la base :
 - de la **détection des rayonnements** (*systèmes d'imagerie, compteurs de particules, dosimètres...*)
 - des **effets biologiques** (*directs ou indirects sur l'ADN...*)



B. Rayonnements directement et indirectement ionisants

- Les particules chargées (α^2+ , β^- , β^+ , e^- , p^+) :
 - **interagissent obligatoirement avec la matière** (elle-même chargée)
 - sont **directement ionisantes**
- Les rayonnements et les particules neutres (γ , X , 1_0n) :
 - **interagissent de façon non-obligatoire** (*statistique, stochastique*)
 - sont **indirectement ionisants** :
 - par les **électrons mis en mouvement** (γ , X)
 - par les **protons secondaires** (1_0n)



C. Caractère ionisant des rayonnements électromagnétiques

- Pour qu'un **rayonnement électromagnétique** soit **ionisant**, il faut que **l'énergie $h\nu$ du photon** soit **supérieure** à une **énergie de liaison d'un électron** (pour pouvoir l'expulser et donc créer un ion) : **$h\nu > |W_n|$**
- Energies de liaison des électrons des principaux **atomes biologiques** :

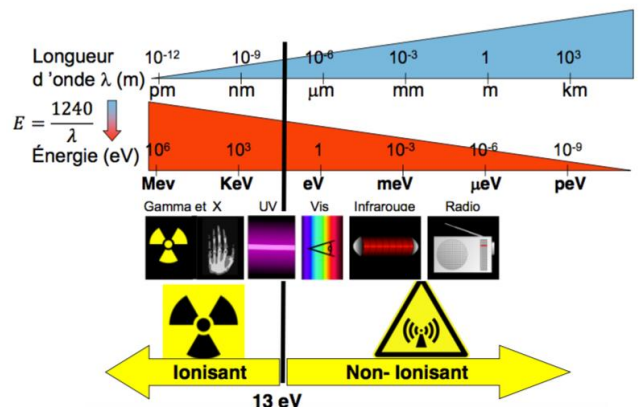
| Atome | W _n (eV) |
|-------|---------------------|
| C | 11,24 |
| H | 13,54 |
| O | 13,57 |
| N | 14,24 |

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

La **molécule la plus abondante** est **l'eau**, et **l'énergie moyenne des électrons** de cette molécule est d'environ **13,6 eV**. Donc statistiquement, dans le milieu biologique :
 → un **rayonnement d'énergie < 13 eV** ne provoque **pas** d'ionisation
 → un **rayonnement d'énergie > 13 eV** est **capable d'expulser des électrons**

Donc, en plaçant la **limite des 13 eV**, on peut séparer :

- les rayonnements électromagnétiques **non ionisants** ($E < 13 \text{ eV}$)
- des rayonnements **ionisants** ($E > 13$)



II. INTERACTIONS ÉLÉMENTAIRES

- Les **rayonnements qui traversent un milieu** entrent en **collision** avec les **éléments de ce milieu**, essentiellement les **électrons des atomes**.
- Au cours de ces collisions, **une partie de l'énergie** des rayonnements est **consommée** pour **déplacer ces électrons** : il y a **transfert d'énergie** du rayonnement **aux atomes** de la matière (**absorption d'énergie**). **Selon l'importance de l'énergie** mise en jeu, on observera soit une **ionisation** soit une **excitation** des atomes concernés.
- Dans tous les cas, **l'énergie absorbée** par l'atome **sera restituée** (**émission d'énergie**).

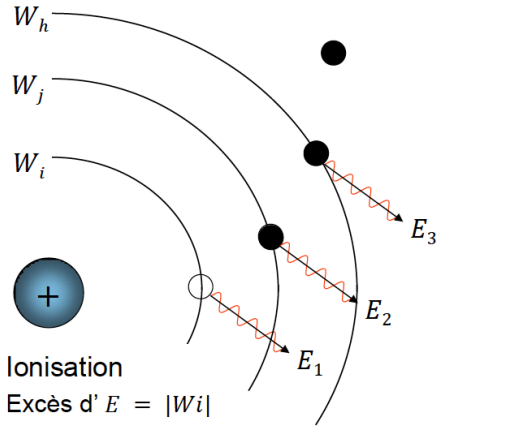
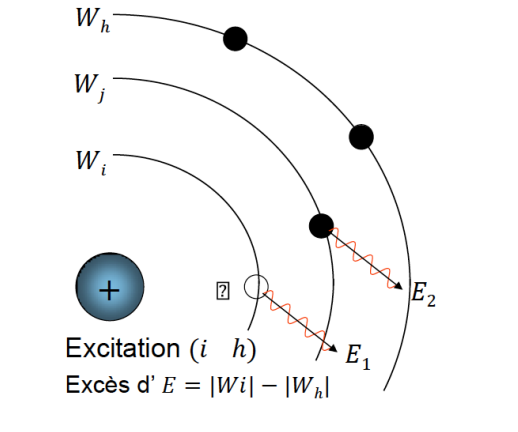
| A. Absorption par excitation | B. Absorption par ionisation |
|---|--|
| L'atome peut absorber de l'énergie apportée par un photon incident . | |
| <p>Si l'énergie du photon ($E = h\nu$) est inférieure à l'énergie de liaison d'un électron ($E < W_i$), mais correspond à l'écart entre 2 énergies de liaison ($E = W_i - W_j$) :</p> <ul style="list-style-type: none"> → l'électron change d'orbitale (sur une case quantique libre) → il y a excitation de l'atome → l'atome passe de son état fondamental à un excès d'énergie : $E = W_i - W_j $ <p>⇒ L'énergie absorbée est quantifiée</p> | <p>Si l'énergie du photon ($E = h\nu$) est supérieure à l'énergie de liaison W_i d'un électron :</p> <ul style="list-style-type: none"> → celui-ci est expulsé → il y a ionisation de l'atome → l'atome passe de son état fondamental à un excès d'énergie W_i → l'électron part avec une énergie cinétique T $ W_i + T = E = h\nu \text{ et } T = h\nu - W_i $ <p>⇒ L'énergie absorbée n'est pas quantifiée</p> |
| | |

C. Émission d'un photon de fluorescence

- **L'atome excité ou ionisé** n'est plus dans son état fondamental (il est **instable**). Il possède un **excès d'énergie**. Il tend à **retourner à son état fondamental** (se désexciter) pour :
 - retrouver son **architecture initiale**
 - et **restituer l'excès d'énergie**
- **Un électron** vient **combler la case quantique laissée vacante**.
- **Un photon** dit de **fluorescence** $E = h\nu$ est **émis**.

| Après ionisation $E = W_i $ | Après excitation $E = W_i - W_j $ |
|--|--|
| | |
| <p>Un électron libre vient combler la case vacante de la couche ayant perdu l'électron expulsé, et ce retour à l'architecture de départ est accompagné de l'émission d'un photon de fluorescence d'énergie égale à celle qui avait été acquise lors de l'ionisation $E = h\nu = W_i$.</p> | <p>Un électron d'une couche supérieure vient combler la vacance électronique de la couche inférieure, et l'énergie correspondant à celle absorbée initialement par l'atome va être libérée sous la forme d'un photon de fluorescence d'énergie $E = h\nu = W_i - W_j$ avec un retour à l'architecture normale de l'atome.</p> |

➤ Le retour à l'état fondamental peut aussi se faire en **plusieurs étapes** par une **cascade de réarrangements électroniques**

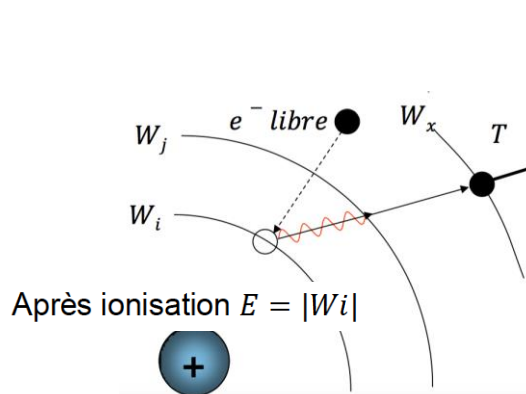
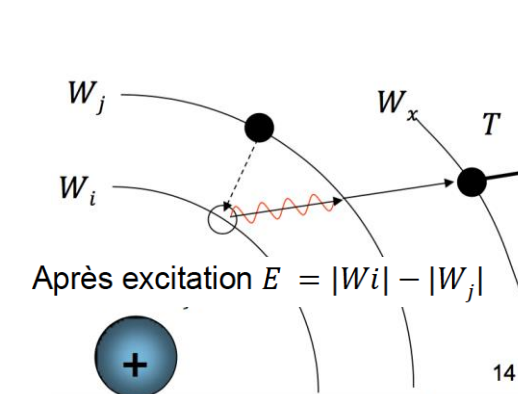
| | |
|---|---|
|  <p>Ionisation Excès d' $E = W_i$</p> $E_1 + E_2 + E_3 = W_i - W_j + W_j - W_h + W_h = W_i $ |  <p>Excitation (i → h) Excès d' $E = W_i - W_h$</p> $E_1 + E_2 = W_i - W_j + W_j - W_h = W_i - W_h $ |
| <p>L'atome a été ionisé sur sa couche i, donc il a un excès d'énergie $E = W_i$. Le comblement de la case vacante vient d'un électron de la couche j et il y a émission d'un photon de fluorescence d'énergie $E_1 = W_i - W_j$. La case vacante alors créée sur la couche j est comblée par un électron de la couche h avec émission d'un photon de fluorescence d'énergie $E_2 = W_j - W_h$. Enfin, un électron libre vient combler la case vacante de la couche h avec émission d'un photon de fluorescence d'énergie $E_3 = W_h$.</p> | <p>L'atome a été excité et un électron est passé de la couche i à la couche h, donc cet atome a un excès d'énergie $E = W_i - W_h$. Un électron intermédiaire de la couche j vient combler la case vacante et générer un photon de fluorescence d'énergie $E_1 = W_i - W_j$. La vacance électronique créée sur la couche j est alors comblée par un électron de la couche h, lui-même provoquant une émission d'un photon de fluorescence d'énergie $E_2 = W_j - W_h$.</p> |
| <p><i>Si on fait la somme des énergies de ces photons de fluorescence émis en cascade, on trouve qu'elle est bien égale à l'énergie en excès que possédait l'atome avant la désexcitation.</i></p> | |

D.Émission d'un électron Auger

Un photon de fluorescence peut lui-même **expulser un électron** de l'atome qui lui a donné naissance.

Cela concerne plutôt les **e- périphériques** et les **atomes légers**.

La **nouvelle ionisation** induit une **nouvelle désexcitation**.

| | |
|---|--|
|  <p>Après ionisation $E = W_i$</p> |  <p>Après excitation $E = W_i - W_j$</p> |
| <p>On a une vacance électronique sur la couche i, donc l'atome a un excès d'énergie $E = W_i$. Un électron libre vient combler cette case vacante et génère un photon de fluorescence d'énergie $E = W_i$. Si la trajectoire de ce photon passe par la position d'un électron d'une couche plus périphérique de l'atome, il va pouvoir, si son énergie est suffisante, interagir avec cet électron, l'expulser et créer une ionisation. L'électron Auger va alors partir avec une énergie cinétique $T = h\nu - W_x = W_i - W_x$</p> | <p>Un électron de la couche j vient combler la case vacante sur la couche i et génère un photon de fluorescence d'énergie $E = W_i - W_j$. Si ce photon croise sur sa trajectoire un électron plus périphérique de l'atome, il va pouvoir interagir avec lui et l'expulser. Cet électron Auger va alors partir avec une énergie cinétique $T = h\nu - W_x = (W_i - W_j) - W_x$</p> |

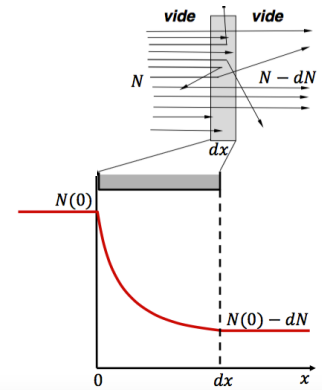
III. INTERACTIONS DES PHOTONS AVEC LA MATIÈRE

A. Loi d'atténuation des photons dans la matière

1) Expression de la loi :

- Soit un faisceau étroit de N photons mono-énergétiques qui traversent une épaisseur dx de matière, le nombre de photons persistant après cette traversée est : **$N - dN$** avec **$-dN = \mu N dx$**
avec **μ = probabilité d'interaction par unité de longueur**
- D'une manière générale, le nombre de photons présents à l'épaisseur x est :

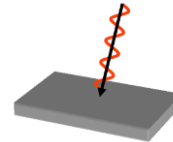
$$N(x) = N(0) e^{-\mu x}$$



2) Différentes expressions de μ :

- μ = coefficient **linéique** d'atténuation
 - probabilité d'interaction par unité de longueur
 - dimension $[L^{-1}]$ (par exemple cm^{-1})
 - spécifique du milieu et de l'énergie des photons
 - dépend de l'état du milieu (compression, densité...).

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



x = épaisseur difficile à mesurer {

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

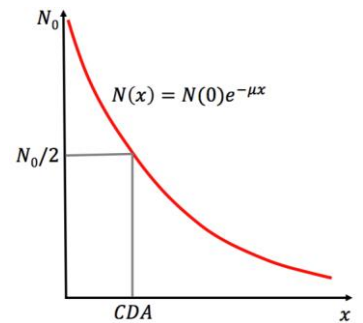
- $\frac{\mu}{\rho}$ = coefficient **massique** d'atténuation
 - ne dépend pas de l'état du milieu (compression, densité...)
 - dimension $L^2 \cdot M^{-1}$ (par exemple $cm^2 \cdot g^{-1}$)
 - masse surfacique : $\frac{m}{s} = \rho x$, plus facile à mesurer que l'épaisseur x
 - $\rho = \frac{m}{vol} = \frac{m}{sx} \Rightarrow \rho x = \frac{m}{s}$

3) Couche de demi atténuation

- **Couche de Demi Atténuation CDA** = épaisseur x qui diminue le flux de photons d'un facteur 2

$$\frac{N(0)}{2} = N(0) e^{-\mu \cdot CDA}$$

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

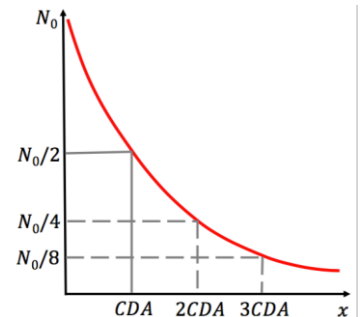


- **Autre façon d'écrire la loi d'atténuation en fonction de la CDA :**

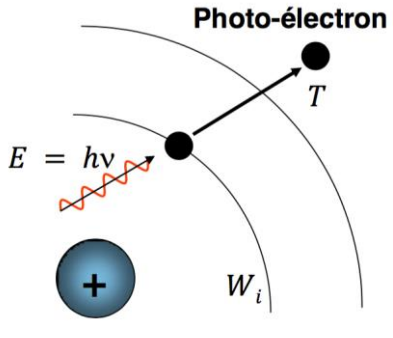
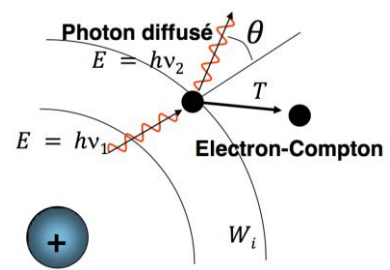
$$N(k \cdot CDA) = N(0) \left(\frac{1}{2}\right)^k = \frac{N(0)}{2^k}$$

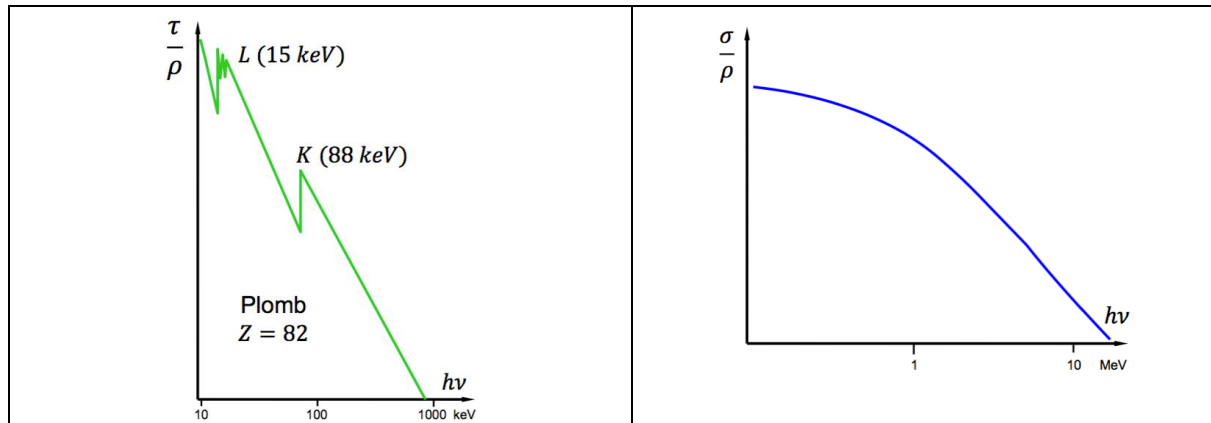
| x | $N(x)/N(0)$ | % |
|-----------------|--------------------------|-------------|
| CDA | 1/2 | 50 |
| 2 × CDA | (1/2)² | 25 |
| 3 × CDA | (1/2)³ | 12,5 |
| 10 × CDA | 1/1024 | 0,1 |
| n × CDA | (1/2)ⁿ | |

L'absorption d'un faisceau de photons n'est jamais totale, mais on considère que le nombre de photons restants après 10xCDA est négligeable.



B. Mécanismes d'atténuation

| <i>Effet photo-électrique</i> | <i>Effet Compton</i> |
|---|--|
| PRINCIPE | |
| <p>Transfert de la totalité de l'énergie du photon incident à un électron des atomes de la matière. Le photon a une énergie $E = h\nu$ supérieure à l'énergie de liaison de l'électron considéré, et dans ces conditions le photo-électron part avec une énergie cinétique $T = h\nu - W_i$.</p>  | <p>Transfert partiel de l'énergie du photon incident à un électron (faiblement lié) qui est expulsé avec une énergie cinétique T. L'autre partie de l'énergie du photon incident est diffusée via un photon de fluorescence.</p> $h\nu_1 = T + h\nu_2 + W_i $ <p style="text-align: center;">Electron Compton + photon diffusé</p> <p>L'énergie du photon incident $E_1 = h\nu_1$ va être répartie entre l'énergie cinétique T de l'électron Compton, l'énergie du photon diffusé $E_2 = h\nu_2$ et l'énergie de liaison de l'électron Compton arraché W_i (négligée en pratique).</p>  |
| CONSÉQUENCES | |
| <ul style="list-style-type: none"> • Pour l'atome : réarrangement par photons de fluorescence et électron Auger • Pour l'électron expulsé : perte de son énergie T par ionisations successives (indirectes) <p>Toute l'énergie est absorbée.</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Pour l'atome : réarrangement par photons de fluorescence et électron Auger • Pour l'électron expulsé : perte de son énergie T par ionisations successives, c'est l'énergie absorbée E_a (ou transférée) <p>Une partie de l'énergie est diffusée $E_d (h\nu_2)$.</p> |
| PROBABILITÉ D'INTERACTION PAR CET EFFET | |
| $N(x) = N(0)e^{-\tau x}$ <p>Probabilité $\tau = k\rho \frac{Z^3}{(h\nu)^3}$ $\frac{\tau}{\rho} = k \frac{Z^3}{(h\nu)^3}$</p> <p>Probabilité élevée pour :</p> <ul style="list-style-type: none"> - les éléments lourds (Z élevé) - les photons d'énergie $h\nu$ faible <p>Maxima (pics) correspondant aux énergies de liaisons W_K , W_L ... du plomb par exemple :</p> | $N(x) = N(0)e^{-\sigma x}$ <p>Probabilité $\sigma = k\rho \frac{1}{h\nu}$ $\frac{\sigma}{\rho} = k \frac{1}{h\nu}$</p> <p>Pratiquement indépendante de la nature de la matière. La probabilité augmente quand l'énergie du photon diminue.</p> |



Proportion des énergies absorbée et diffusée dans l'effet Compton

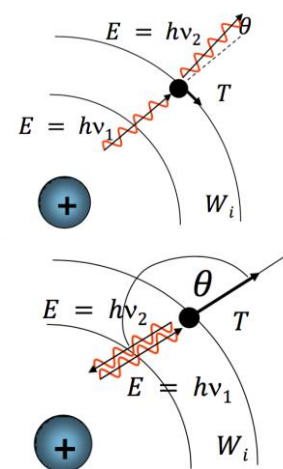
Formules de Compton et rapport E_a/E_d :

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

➤ **Effet de l'angle Θ :**

- Lorsque Θ est faible : E_a/E_d est faible
 → Choc « tangentiel », $\Theta = 0$ et $\cos \Theta = 1$ $E_a/E_d \cong 0$
- Lorsque Θ est grand : E_a/E_d est élevé
 → Choc « frontal », $\Theta = \pi$ et $\cos \Theta = -1$ $\frac{E_a}{E_d} = \frac{2hv_1}{mc^2}$
 et T est maximum

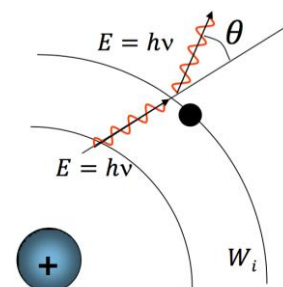
➤ **Effet de l'énergie hv_1 :** plus hv_1 est élevée, plus E_a/E_d est élevé.



Autres types d'interaction :

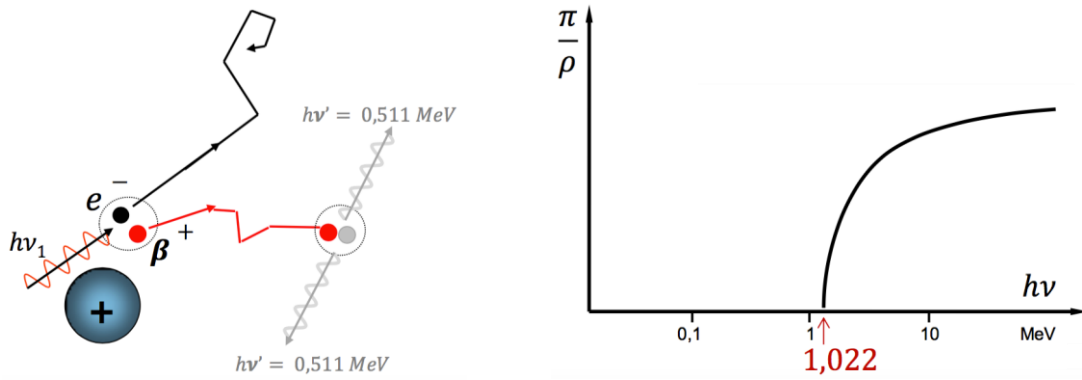
➤ **Diffusion de Thomson-Rayleigh**

- Simple **changement de direction** sans changement d'énergie (de longueur d'onde)
- **Important** pour les **photons peu énergétiques** (IR, visible, UV)
- **Négligeable** pour les **photons X et γ**



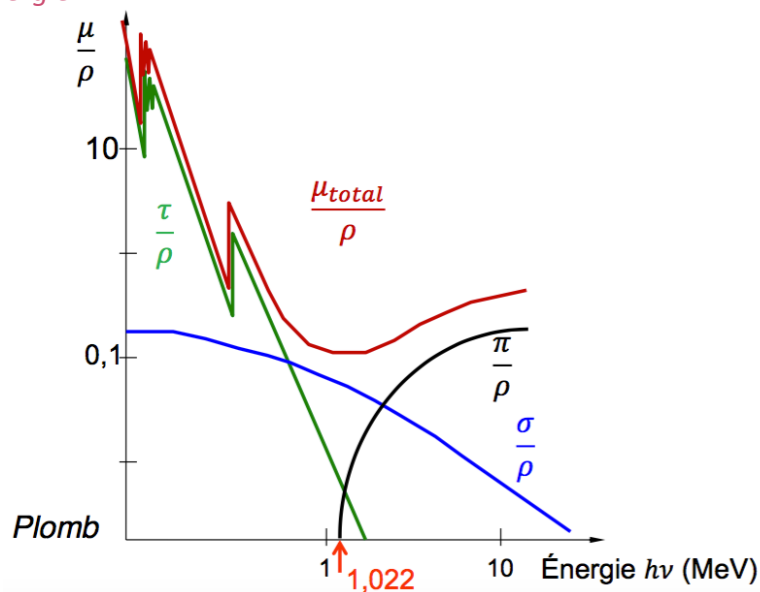
➤ **Création de paire ou matérialisation**

- Un **photon très énergétique** passant à **proximité d'un noyau** voit son **énergie transformée en 2 particules** (un électron et un positon).
- La probabilité de création de paire π : $N(x) = N(0)e^{-\pi x}$
- **Seuil de 1,022 MeV** (=énergie minimale du photon) correspondant à l'énergie équivalente à la masse des deux particules. Quand **l'énergie du photon augmente** au-delà de ce seuil, la **probabilité augmente** également.



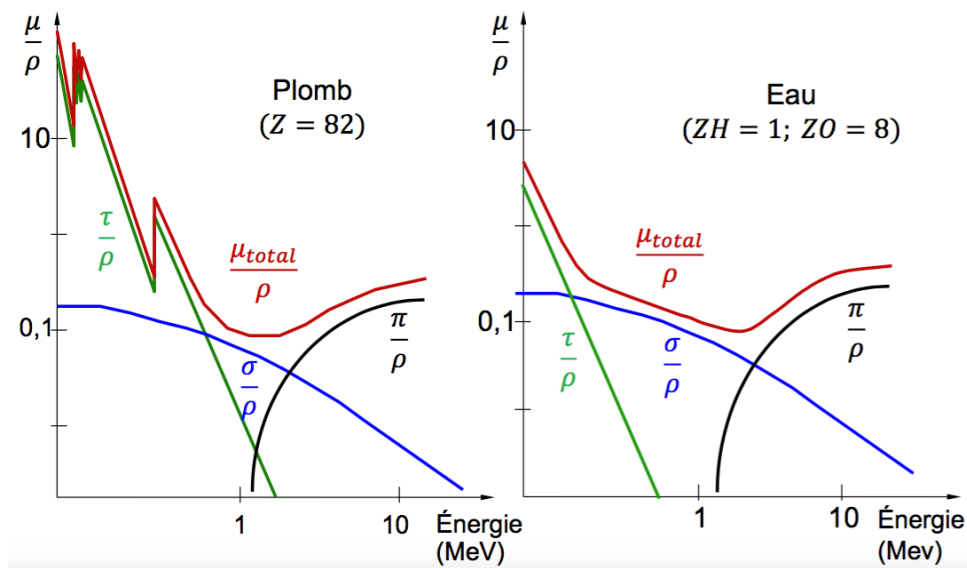
C. Importance relative des mécanismes d'interactions

1) Selon l'énergie



Au départ, la probabilité d'atténuation globale est principalement représentée par l'effet photo-électrique, et sur la fin c'est la création de paire qui prend de l'importance. Il y a aussi beaucoup d'effet compton sur une grande partie du spectre énergétique.

2) Selon le milieu



En comparant le plomb et l'eau, la seule chose qui change est l'effet photo-électrique, qui dépend de Z^3 .

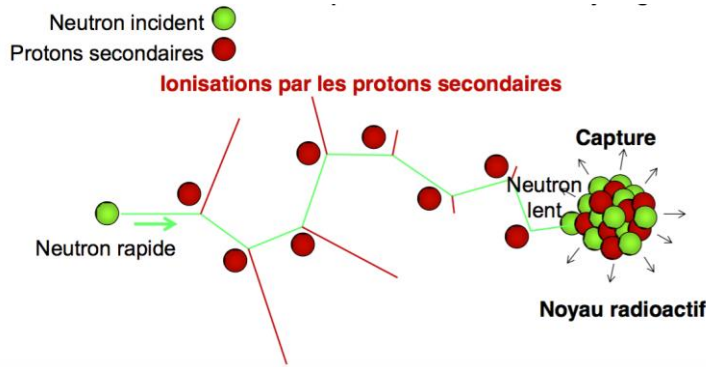
IV. INTERACTIONS DES PARTICULES

A. Interactions des neutrons avec la matière

Les neutrons (non chargés) interagissent par **choc direct** avec les **noyaux**. La **probabilité d'interaction** est **faible** car le diamètre d'un noyau par rapport à l'atome est très faible. Les neutrons sont donc très **pénétrants** (interagissent peu).

- **Les neutrons rapides (d'énergie cinétique élevée)**
 - Dans les **milieux riches en hydrogène** (la masse du noyau est proche de celle du neutron), le **transfert d'énergie** est **maximal**. Le **noyau H⁺** percuté est **expulsé** avec une énergie cinétique : c'est un **proton secondaire** qui va alors provoquer des ionisations (les neutrons sont **indirectement ionisants**).
 - Dans les **milieux composés de noyaux lourds**, les neutrons « rebondissent » sans perdre beaucoup d'énergie (**diffusion**).
- **Les neutrons lents (d'énergie cinétique faible ou neutrons « thermiques »)**

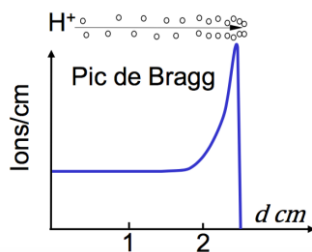
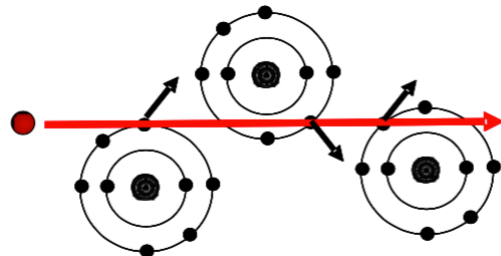
Ils sont absorbés par les noyaux : capture nucléaire à l'origine de transformations radioactives (« capture radiative »).



Un neutron rapide donne naissance à des protons secondaires dans les milieux riches en hydrogène puis perd son énergie jusqu'à devenir un neutron lent.

B. Interactions des particules chargées positivement avec la matière

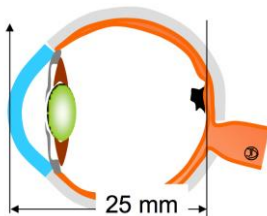
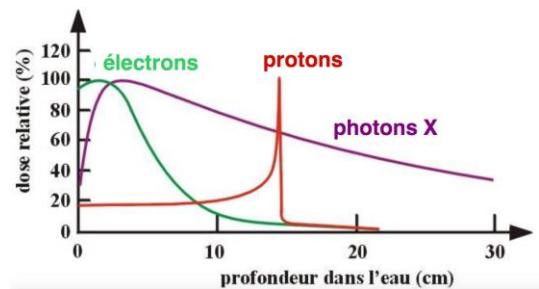
- Elles interagissent avec les électrons de la matière et sont **directement ionisantes**.
- Leur **masse est supérieure** à celle de l'électron donc :
 - transfert d'énergie faible
 - peu de déviation : **trajectoire rectiligne**
 - peu de fluctuations des trajectoires
- Elles ont un **pouvoir d'arrêt** ($S_x = \frac{\Delta T}{\Delta x} = k \frac{Z^2}{v^2}$) **très élevé**



- Leur **parcours est court** (à énergie égale par rapport aux électrons)
- Les **effets biologiques** sont importants (beaucoup d'ionisations)
- Elles provoquent un maximum d'ionisations en fin de parcours appelé **pic de Bragg** (quand leur vitesse diminue, leur pouvoir d'arrêt augmente fortement). Après ce pic de Bragg, elles s'arrêtent complètement et il n'y a plus d'ionisations.

Application à la radiothérapie externe

Utilise les ionisations des rayonnements pour traiter les cancers. Le choix du type de rayonnement se fera en fonction de la profondeur de la tumeur traiter. Les protons sont particulièrement intéressants car l'essentiel de leur énergie est déposé à une distance à peu près définie.



Ex : protonthérapie des mélanomes de la choroïde :
 Pour irradier cette tumeur sans toucher le nerf optique, sachant que la profondeur de l'œil est de 25 mm, on utilise des protons tels que le pic de Bragg est à 25 mm. L'essentiel de l'énergie va se déposer sur la tumeur à détruire et il n'y aura pas d'effet sur le nerf optique.

C. Interactions des électrons avec la matière *(revu avec les rayonsX)*

Les électrons interagissent avec les autres électrons de la matière par des **interactions coulombiennes** et dans ce cas, sont **directement ionisants**. Mais ils peuvent aussi interagir avec les **noyaux**, chargés positivement.

CONCLUSION

- Lorsqu'ils traversent la matière, les rayonnements ionisants perdent progressivement leur énergie en y provoquant des ionisations.
- L'importance de ce transfert d'énergie dépend du type de rayonnement ionisant, de son énergie et des milieux traversés.

