

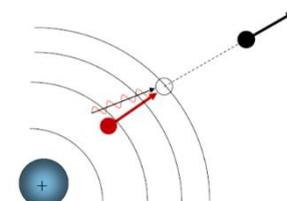
# Interaction des rayonnements ionisants avec la matière



## I. Rayonnements ionisants

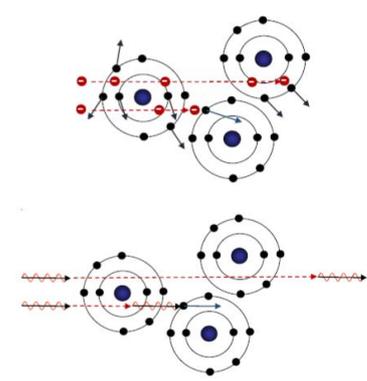
### 1. Définition

- Rayonnement électromagnétique ou corpusculaire capable de produire directement ou non des **ions**.
- 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*)



### 2. Rayonnements directement et indirectement ionisants

- ❖ Les particules chargées ( $\alpha^{2+}, \beta^-, \beta^+, e^-, p^+$ )
  - interagissent **obligatoirement** avec la matière
  - sont **directement ionisantes**
- ❖ Les rayonnements et les particules neutres ( $\gamma, X, {}^1_0n$ )
  - interagissent de façon **non obligatoire** (statistique, stochastique)
  - sont **indirectement ionisants**
    - par les électrons mis en mouvement
    - par les protons secondaires



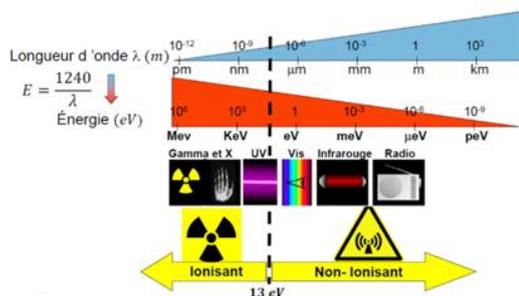
### 3. Caractère ionisant des rayonnements électromagnétiques

- Pour qu'un rayonnement électromagnétique soit **ionisant**, il faut que l'énergie du photon  $E=h\nu$  soit **supérieure** à l'énergie de liaison de l'électron pour pouvoir l'expulser de l'atome auquel il est lié.
- Energie de liaison des principaux atomes biologiques :

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

De manière arbitraire on fixe le **seuil de 13,6eV** car c'est l'énergie moyenne des atomes composant l'eau, molécule la plus abondante. Ainsi :

- Un rayonnement d'énergie < 13,6eV est **non ionisant**
- Un rayonnement d'énergie > 13,6eV est **ionisant**



Sur le spectre électromagnétique, si on se place à la limite des 13eV sur le spectre des rayonnements électromagnétiques on peut séparer

- Rayonnements ionisants : rayons X, rayons gamma et une partie des UV
- Rayonnements non ionisants : rayons visibles, infrarouge et radio

## II. Interactions élémentaires

Lorsqu'un rayonnement traverse un milieu, il entre en collision avec les éléments de ce milieu, notamment les électrons. Cette interaction consiste en un **transfert d'énergie** entre le rayonnement incident et la matière traversée.

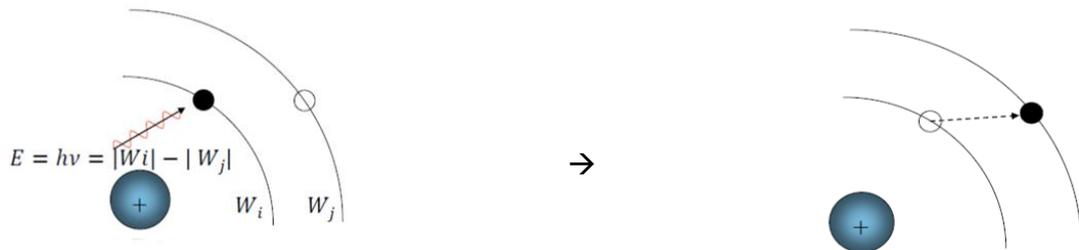
### 1. Interaction par excitation

Soit un photon incident entrant en collision avec un atome. Si l'énergie du photon ( $E = h\nu$ ) est **inférieure** à l'énergie de liaison  $|W_i|$  d'un électron **MAIS** correspond exactement à l'**écart d'énergie entre 2 couches** de l'atome alors :

→ l'électron **change d'orbitale**

→ l'atome est **excité** et passe de son état fondamental à un excès d'énergie :  $E = |W_i| - |W_j|$

→ l'énergie absorbée est **quantifiée** car elle correspond exactement à un écart entre 2 énergies de liaison de l'atome



### 2. Interaction par ionisation

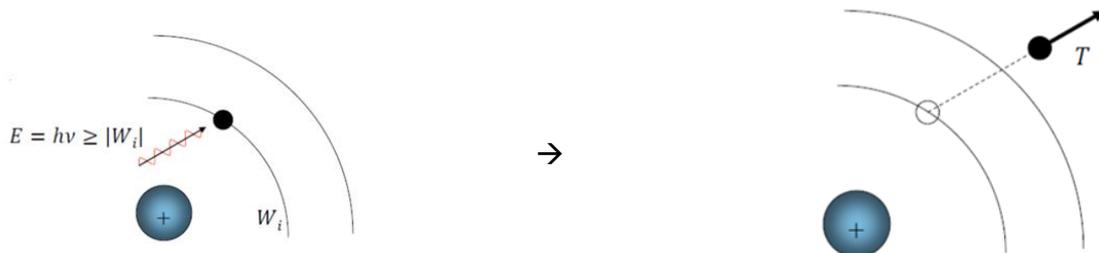
Soit un photon incident entrant en collision avec un atome. Si l'énergie du photon ( $E = h\nu$ ) est **supérieure** à l'énergie de liaison  $|W_i|$  d'un électron alors :

→ l'électron est **expulsé** avec une énergie cinétique T

→ l'atome est **ionisé** et passe de son état fondamental à un excès d'énergie :  $E = |W_i|$

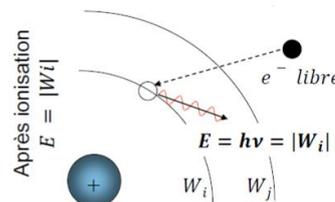
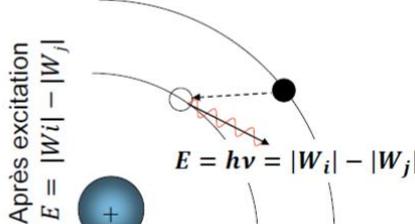
→ l'énergie absorbée n'est **pas quantifiée** car il suffit qu'elle soit supérieure à  $|W_i|$

**NB** : l'énergie  $h\nu$  du photon incident se partage entre l'énergie cinétique de l'électron expulsé (T) et l'énergie nécessaire pour expulser l'électron ( $|W_i|$ ) →  $E = h\nu = |W_i| + T$



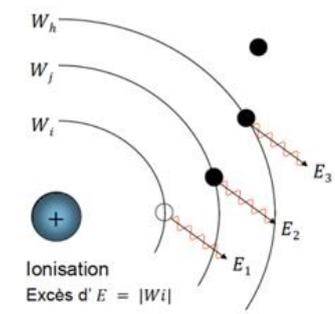
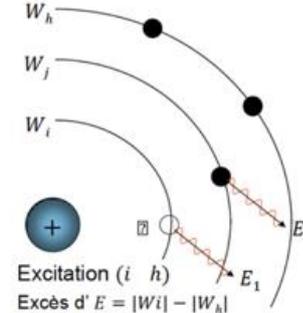
### 3. Emission d'un photon de fluorescence

L'atome excité ou ionisé n'est plus dans son état fondamental : il est **instable**. Il tend alors à se désexciter pour retrouver son architecture initiale et restituer l'excès d'énergie.

Après une ionisation	Après une excitation
<p>Un électron libre de la matière peut venir combler la vacance électronique</p>	<p>Un électron d'une couche plus périphérique va venir combler la vacance électronique</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>➔ Retour de l'atome à l'état fondamental</li> <li>➔ Restitution de l'excès d'énergie sous forme d'un photon de fluorescence d'énergie <math>E = hv =  W_i </math> (énergie acquise lors de l'ionisation)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➔ Retour de l'atome à l'état fondamental</li> <li>➔ Restitution de l'excès d'énergie sous forme d'un photon de fluorescence d'énergie <math>E = hv =  W_i  -  W_j </math> (énergie acquise lors de l'ionisation)</li> </ul>
	

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

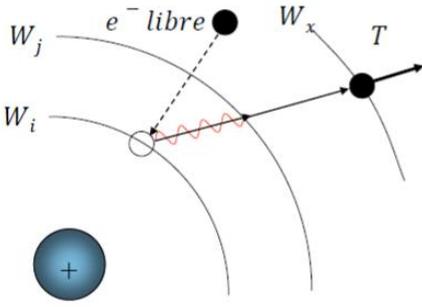
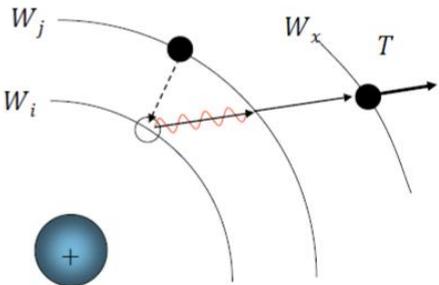
Exemple :

 <p>Ionisation Excès d' <math>E =  W_i </math></p> $E_1 + E_2 + E_3 =  W_j  -  W_j  +  W_j  -  W_h  +  W_h  =  W_i $	 <p>Excitation (<math>i \rightarrow h</math>) Excès d' <math>E =  W_i  -  W_h </math></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 <math>E =  W_i </math>. 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 <math>E_1 =  W_i  -  W_j </math>. 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 <math>E_2 =  W_j  -  W_h </math>. Enfin, un <math>e^-</math> libre vient combler la case vacante de la couche h avec émission d'un photon de fluorescence d'énergie <math>E_3 =  W_h </math>.</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 <math>E =  W_i  -  W_h </math>. Un électron intermédiaire de la couche j vient combler la case vacante et générer un photon de fluorescence d'énergie <math>E_1 =  W_i  -  W_j </math>. 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 <math>E_2 =  W_j  -  W_h </math>.</p>

CCL : 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.

## 4. Emission d'un électron Auger

Le retour à l'état fondamental d'un atome qui a un excès d'énergie (ionisé ou excité) est accompagné d'une émission d'un photon de fluorescence qui peut alors **lui-même expulser un électron de l'atome qui lui a donné naissance** : c'est un **électron Auger**.

Après une ionisation	Après une excitation
<p>Un atome a été ionisé sur sa couche <math>i</math> et se retrouve avec un excès d'énergie <math>E =  W_i </math>. Un électron libre vient combler la vacance sur la couche <math>i</math> et cela génère un photon de fluorescence d'énergie <math>E =  W_i </math>. Si ce photon rencontre sur son passage un électron d'une couche plus périphérique, il pourra l'expulser : c'est un électron Auger avec une énergie cinétique <math>T =  W_i  -  W_x </math></p>	<p>Un atome est excité sur sa couche <math>i</math>. Un électron d'une couche plus périphérique vient combler la vacance électronique en générant un photon d'énergie <math>E =  W_i  -  W_j </math>. Ce photon peut alors expulser un électron d'une couche plus périphérique (électron Auger) qui part avec une énergie cinétique <math>T = hv -  W_x  =  W_i  -  W_j  -  W_x </math>.</p>
 <p data-bbox="261 1099 572 1133"><math>T = hv -  W_x  =  W_i  -  W_x </math></p>	 <p data-bbox="847 1133 1321 1171"><math>T = hv -  W_x  = ( W_i  -  W_j ) -  W_x </math></p>

## 5. Conclusion sur les conséquences pour la matière

Un atome excité ou ionisé peut retourner à son état fondamental de 2 façons : par émission d'un **photon de fluorescence** et par émission d'un **électron Auger**.

La compétition entre ces deux phénomènes est caractérisée par le **rendement de fluorescence  $w_i$**  qui dépend du nombre d'électrons, donc du numéro atomique  $Z$  :

$$w_i = \frac{\text{proba fluorescence}}{\text{proba Auger}}$$

Donc :

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

### III. Interactions des photons

#### 1. Loi d'atténuation des photons dans la matière

##### 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  $\mu =$  **probabilité d'interaction par unité de longueur**
- ❖ D'une manière générale, le nombre de photons présents à l'épaisseur x est :

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

##### Différentes expressions de $\mu$

- ❖  $\mu$  = coefficient **linéique** d'atténuation
  - ➔ probabilité d'interaction par unité de longueur
  - ➔ dimension  $[L^{-1}]$  (longueur)
  - ➔ spécifique du milieu et de l'énergie des photons
  - ➔ dépend de l'état du milieu (compression, densité...)
- ❖  $\frac{\mu}{\sigma}$  = coefficient **massique** d'atténuation
  - ➔ ne dépend pas de l'état du milieu
  - ➔ dimension  $[L^2.M^{-1}]$  (surface par unité de masse → plus facile à mesurer)

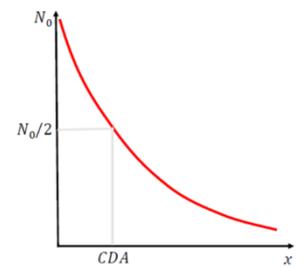
##### Couche de demi-atténuation (CDA)

- ❖ **Couche de demi atténuation CDA = épaisseur x qui diminue le flux de photons d'un facteur 2**

On a  $\frac{N(0)}{2} = N(0) e^{-\mu \cdot CDA}$  avec  $N(0)$  = nombre de photons initiaux

Soit :

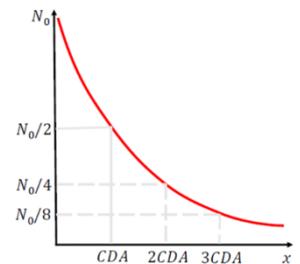
$$CDA = \frac{\ln 2}{\mu}$$



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

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

x	N(x)/N(0)	%
CDA	1/2	50
2 × CDA	(1/2) <sup>2</sup>	25
3 × CDA	(1/2) <sup>3</sup>	12,5
n × CDA	(1/2) <sup>n</sup>	
10 × CDA	1/1024	0,1



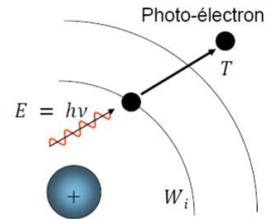
- L'absorption d'un faisceau de photons n'est jamais totale
- Le nombre de photons transmis après 10 CDA est négligeable

## 2. Mécanismes d'atténuation

Ce sont les mécanismes qui vont diminuer le nombre de photons transmis lorsqu'un faisceau de photons traverse une certaine épaisseur de matière. On retrouve l'**effet photo-électrique**, l'**effet Compton**, la **diffusion de Thomson-Rayleigh** et la **création de paire**.

### a) Effet photo-électrique

- Transfert de la **totalité** de l'énergie du photon incident à un électron des atomes de la matière.
- Le photon a un énergie  $E=hf$  **supérieure** à l'**énergie de liaison** de l'électron considéré, et dans ces conditions le photo-électron part avec une énergie cinétique  $T = hf - |W_i|$ .



- Conséquences

→ Pour l'atome : réarrangement par photons de fluorescence et électron Auger

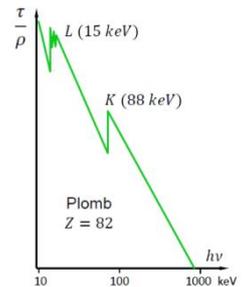
→ Pour l'électron expulsé : perte de son énergie T par ionisations successives

- Probabilité d'interaction avec l'**effet photo-électrique** notée  $\tau$

$$N(x) = N(0)e^{-\tau x} \quad \text{avec } \tau = k\rho \frac{Z^3}{(hf)^3} \leftrightarrow \frac{\tau}{\rho} = k \cdot \frac{Z^3}{(hf)^3}$$

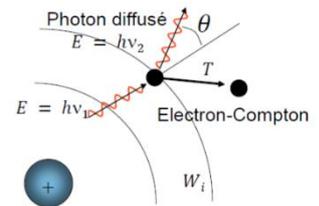
→ Probabilité élevée pour les **éléments lourds** (Z élevé) et les **photons d'énergie faible**

→ Les maxima (pics) correspondent à  $hf = |W_k|, |W_l|$



### b) Effet Compton

- Transfert **partiel** de l'énergie du photon incident à un électron des atomes de la matière qui est éjecté avec une énergie cinétique T
- L'autre partie de l'énergie du photon incident est **diffusée** via un photon de fluorescence



- Conséquences

→ 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 de l'énergie **absorbée** (notée  $E_a$ ) ou **transférée**

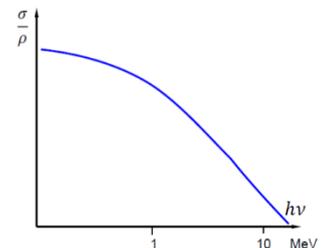
Nb : une partie de l'énergie est **diffusée** :  $E_d = hf_2$

- Probabilité d'interaction avec l'**effet Compton** notée  $\sigma$

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

→ Probabilité **indépendante** de la nature de l'atome (ne dépend pas de Z)

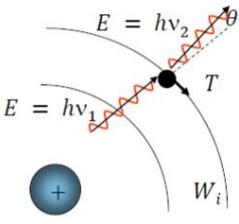
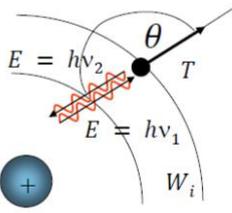
→  $\sigma$  augmente lorsque E diminue



- Formules de Compton et rapport  $E_a/E_d$

$$\frac{E_{\text{absorbée}}}{E_{\text{diffusée}}} = \frac{T}{hf_2} = \frac{hf_1(1 - \cos \theta)}{mc^2}$$

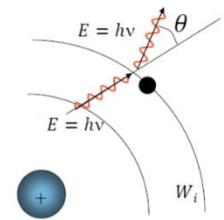
→ Effet de l'angle  $\theta$

<p><b><math>\theta</math> faible</b></p> <p>Le rapport <math>E_a/E_d</math> est faible          A l'extrême : choc tangentiel avec  <math>\theta = 0 \leftrightarrow \cos \theta = 1</math></p>  <p style="text-align: center;"><math>E_a/E_d \approx 0</math></p>	<p><b><math>\theta</math> élevé</b></p> <p>Le rapport <math>E_a/E_d</math> est élevé          A l'extrême : choc frontal avec  <math>\theta = \pi \leftrightarrow \cos \theta = -1</math></p>  <p style="text-align: center;"><math>E_a/E_d = \frac{2hv_1}{mc^2}</math>          et T est maximum</p>
---	---

→ Effet de l'énergie  $hv_1$  : plus  $hv_1$  est élevé, plus  $E_a/E_d$  est élevé

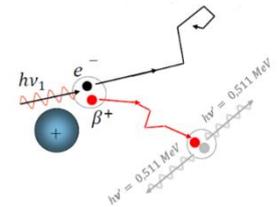
c) Diffusion de Thomson – Rayleigh

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



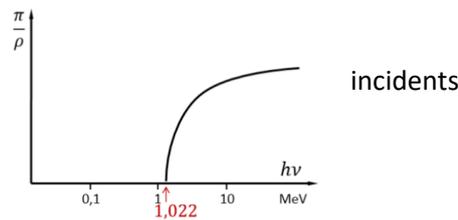
d) Création de paire ou matérialisation

- Un photon très énergétique passant à proximité du noyau voit son **énergie transformée en 2 particules** (un électron et un positon)
- Probabilité de **création de paire** notée  $\pi$



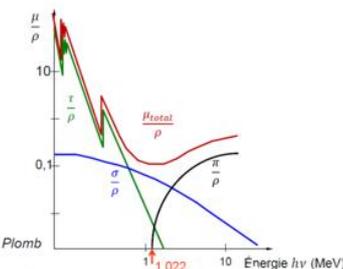
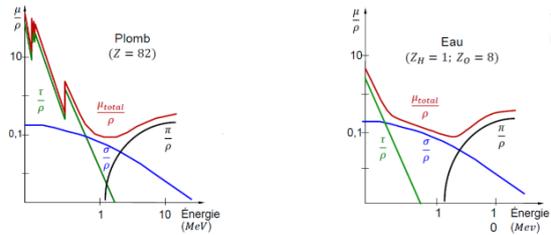
$N(x) = N(0)e^{-\pi x}$

Elle augmente avec l'énergie des photons



- **Seuil de 1,022MeV** correspondant à l'énergie équivalente à la masse des deux particules

### 3. Importance relative des mécanismes d'atténuation

<p style="text-align: center;">Selon l'énergie</p>  <p style="text-align: center;"><i>Au début l'effet photo-électrique prédomine, puis l'effet Compton prend le relais et pour les photons très énergétiques, c'est la création de paire qui prend de l'importance</i></p>	<p style="text-align: center;">Selon le milieu</p>  <p style="text-align: center;"><i>En comparant le plomb et l'eau, la seule chose qui change est l'effet photo-électrique, qui dépend de <math>Z^3</math>.</i></p>
--	---

## IV. Interactions des particules

### 1. Interaction des neutrons avec la matière

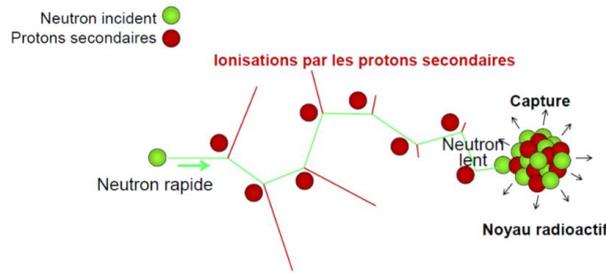
- Interaction par choc direct avec les noyaux
- Probabilité d'interaction **faible**, les neutrons sont donc **très pénétrants**

#### a) Neutrons rapides (E cinétique élevée)

- Dans un milieu riche en hydrogène la masse du neutron  $\approx$  masse du noyau  $\rightarrow$  transfert d'énergie **maximal**. Le noyau  $H^+$  percuté est expulsé avec une certaine énergie cinétique : c'est un proton secondaire mis en mouvement par le neutron. Chargé positivement, le noyau va provoquer des ionisations : on dit que les neutrons sont **indirectement ionisants**.
- Dans un milieu composé de noyaux **lourds**, un neutron qui percute un noyau est simplement dévié sans perdre beaucoup d'énergie, il « rebondit ».

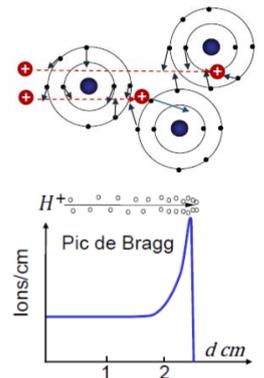
#### b) Neutrons lents = neutrons thermiques (E cinétique faible)

Lorsqu'ils percute un noyau, du fait de leur faible énergie, ils vont être **capturés** et **absorbés** par ce noyau. Le nouveau noyau obtenu est en général **instable** et devient **radioactif**. Il provoque une émission radiative secondaire. On appelle ça la **capture radiative**.

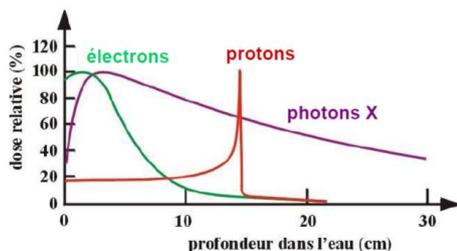


### 2. Interaction des particules chargées positivement avec la matière

- Elles interagissent avec les électrons de la matière et sont **directement ionisantes**
- Leur masse est **supérieure** à celle de l'électron donc
  - $\rightarrow$  Transfert d'énergie faible
  - $\rightarrow$  Peu de déviation et peu de fluctuation des trajectoires
- Elles ont un pouvoir d'arrêt **très élevé**
  - $\rightarrow$  Parcours court
  - $\rightarrow$  Effets biologiques importants
  - $\rightarrow$  Pic de Bragg (maximum d'ionisations en fin de parcours)



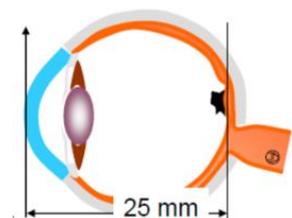
#### - Application à la radiothérapie externe



On 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 à traiter. Les protons sont intéressants car l'essentiel de leur énergie est déposé à une distance à peu près définie.

#### Exemple : protonthérapie des mélanomes de la choroïde

Pour irradier cette tumeur sans toucher le nerf optique, sachant que la profondeur de l'œil est de 25mm, on utilise des protons dont le pic de Bragg est à 25mm. 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



### 3. Interaction des électrons avec la matière

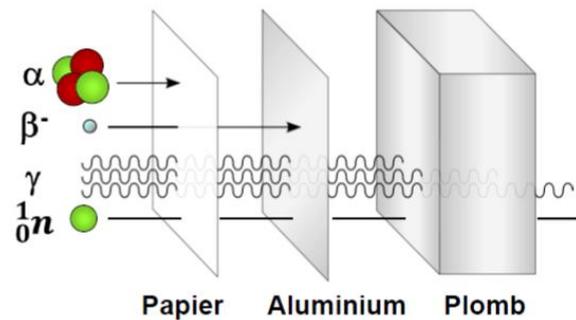
- Les électrons interagissent avec les **autres électrons** de la matière par des **interactions coulombiennes** et dans ce cas ils sont **directement ionisants**.

- Ils peuvent aussi interagir avec les **noyaux** de la matière qui sont chargés positivement.

(Revu en détail dans le cours sur les rayons X)

### Conclusion

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



À Fanny