

# BIOPHYSIQUE DES RADIATIONS

## Tut' rentrée - Cours I



### I. Particules, ondes et atomes

#### A. Masse, énergie et unité de mesure

##### 1. Les unités de masse

Le SI (g, Kg) peut être utilisé pour les grandes populations d'atomes (chimie), mais peu ou pas pour les atomes isolés et les particules élémentaires (physique) : les unités du SI ne sont pas adaptées à des particules infiniment petites.

##### Le gramme (g)

Il est utilisé pour mesurer la masse d'une mole d'atomes appelée **la masse molaire** ou **la masse atomique**. La masse atomique est la masse de  $N$  atomes avec :

$N$	Le nombre d'Avogadro = <b><math>6,02 \cdot 10^{23}</math></b>
	C'est le nombre d'atomes dans 1 mole.
	On choisit $N$ pour que, dans le système des masses atomiques, la masse d'une mole d'atome de Carbone 12 soit de 12g.

$$\text{Masse atomique (g)} = N \times \text{masse d'un atome (g)}$$

##### L'unité de masse atomique (u)

C'est une unité particulière (hors SI) adaptée à l'échelle des atomes, définie comme le  $1/12^{\text{ème}}$  de la masse d'un atome de carbone 12, ce qui correspond à l'inverse de la constante d'Avogadro :

$$1 \text{ u} = \frac{1}{N} = \frac{2 \times 10^{-23}}{12} = 1,66 \cdot 10^{-24} \text{ g}$$

Masse	Hydrogène	Carbone	Oxygène
D'un atome en g	$0,17 \cdot 10^{-23}$	$2 \cdot 10^{-23}$	$2,65 \cdot 10^{-23}$
D'une mole d'atome en g (masse molaire)	1,007	12	15,994
D'un atome en unité de masse atomique	1,007	12	15,994
A nombre de masse (nombre de nucléons)	1	12	16

♥ La masse **d'un atome** en unité de masse atomique, s'exprime par le même nombre que la masse **d'une mole d'atome** en gramme. ♥

☞ Un atome de  $^{12}\text{C}$  pèse 12u et 1mole ( $N$  atomes) de  $^{12}\text{C}$  pèse 12g.

*Les unités doivent être cohérentes entre elles et la nomenclature des nuclides*

$\begin{matrix} A \\ Z \end{matrix} X$	A	<b>Nombre de masse</b> ou nombre de nucléons Il est égal : <ul style="list-style-type: none"> <li>à l'entier le plus proche de la masse molaire atomique exprimée en g.</li> <li>à l'entier le plus proche de la masse d'un atome exprimée en u.</li> </ul>
	Z	<b>Le numéro atomique</b> ou nombres de protons Il correspond au <u>nombre d'électrons</u> lorsque l'élément est neutre (=non ionisé).

*Exemple : la masse molaire de l'oxygène est 15,994g, un atome d'oxygène pèse 15,994u, l'oxygène a donc 16 nucléons.*

☛ Ne pas confondre

- la **masse d'un atome** exprimée en u
- la **masse atomique** qui est la masse d'une mole d'atome exprimée en grammes.

## 2. Énergie de masse

D'après, la relation d'Einstein, la masse est une forme d'énergie :  $E = mc^2$

### L'énergie d'une particule au repos

Soit  $m_0$  la masse d'une particule au repos. On déduit :  $E_0 = m_0 c^2$

### L'énergie d'une particule en mouvement

Tout objet matériel voit sa masse varier selon sa vitesse.

On parle alors de **masse relativiste**, elle se calcule selon la formule :

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

**m** : la masse relativiste (Kg)

**$m_0$**  : la masse initiale (Kg)

**v** : la vitesse de la particule ( $m.s^{-1}$ )

**c** : la célérité de la lumière dans le vide  $3.10^8 m.s^{-1}$

On remarquera que si la vitesse de l'objet est faible devant la vitesse de la lumière,  $m \approx m_0$ .

L'énergie totale d'une particule en mouvement :

$$E_T = E_0 + E_C$$

$$E_C = E_T - E_0$$

$$E_C = E_T - m_0 c^2$$

$$E_C = \Delta m \cdot c^2$$

$E_C$  est liée à l'augmentation de la masse relativiste de la particule.

## B. Les particules matérielles

### 1. L'électron (e<sup>-</sup>)

On distingue deux particules ayant les mêmes caractéristiques mais pas la même origine :

- \* **L'électron** ou électron négatif qui provient du cortège électronique de l'atome
- \* **Le négaton** ou particule  $\beta^-$  provenant du noyau atomique

Masse au repos	Masse relativiste	Charge
$m_e = 9,109 \cdot 10^{-28} \text{ g}$ $= 0,00055 \text{ u}$ $\approx \frac{1}{2000} \text{ u}$	Pour $v = 0,5 \text{ c}$ $m_e = 1,15 m_0$	$-e = -1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C (Coulombs)}$

### L'électronvolt : unité d'énergie

**L'électronvolt (eV)** : unité particulière pour exprimer l'énergie qui est adaptée aux énergies mises en jeu dans l'atome.

**Définition:** Énergie cinétique acquise par un électron sans vitesse initiale, sous l'effet d'une différence de potentiel de 1 volt.

$$1 \text{ eV} = E_c = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

Sous l'effet d'une différence de potentiel de 1 Volt, l'électron sans vitesse initiale acquiert une énergie cinétique de  **$1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$**  (Joules). Prise comme référence, cette valeur donne une unité d'énergie : l'électronvolt (eV).

L'eV c'est donc l'énergie cinétique acquise par un électron sans vitesse initiale sous une différence de potentiel de 1 V ! Les multiples sont aussi à connaître :

$$\heartsuit 1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J} \heartsuit$$

- \*  $10^3 \text{ eV} = \text{keV}$
- \*  $10^6 \text{ eV} = \text{MeV}$
- \*  $10^9 \text{ eV} = \text{GeV}$

Donc d'après la relation d'Einstein citée précédemment on peut avoir une équivalence masse énergie :

$$\heartsuit 1 \text{ u} = 931 \text{ MeV}/c^2 \heartsuit$$

Équivalence masse -énergie:

$$1 \text{ u} = \frac{0,166 \cdot 10^{-26} \times (2,9979 \cdot 10^8)^2}{1,602 \cdot 10^{-19}} = 931 \text{ MeV}/c^2$$

Diagramme d'annotation :  
 - Une flèche pointe de  $c^2$  vers le dénominateur  $1,602 \cdot 10^{-19}$ .  
 - Une flèche pointe de  $0,166 \cdot 10^{-26}$  vers 'm en kg'.  
 - Une flèche pointe de  $(2,9979 \cdot 10^8)^2$  vers '1 eV en J'.

### 2. Le proton (p<sup>+</sup>)

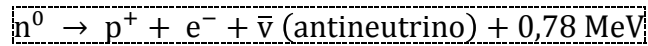
Masse au repos	Masse relativiste	Charge
$m_p = 1,007 \text{ u}$	Non relativiste	$+e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C (Coulombs)}$

C'est une particule dite stable.

### 3. Le neutron

Masse au repos	Masse relativiste	Charge
$m_n = 1,009 \text{ u}$	Non relativiste	Pas de charge

Il est stable dans le noyau, mais instable en dehors de celui-ci et se transforme selon l'équation suivante :



### 4. Autres particules

#### Le positon

Le **positon** ou particule  $\beta^+$  : c'est l'antiparticule de l'e, même masse mais de charge opposée a celui-ci, il est produit lors de transformations radioactives.

#### Le neutrino

Il explique la radioactivité  $\beta$

Masse au repos	Charge
Quasi nulle	Nulle

#### La particule alpha ( $\alpha$ )

La particule  $\alpha$  est formée de 4 nucléons (2p, 2n), c'est le noyau de l'atome d'Hélium ou  $\text{He}^{++}$  ou  $\alpha$  ou  $\alpha^{++}$ .

Masse au repos	Charge
4,0015 u ( $< 2m_p + 2m_n$ )	$= 3,204 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ ( $= 2 \times e^+$ )

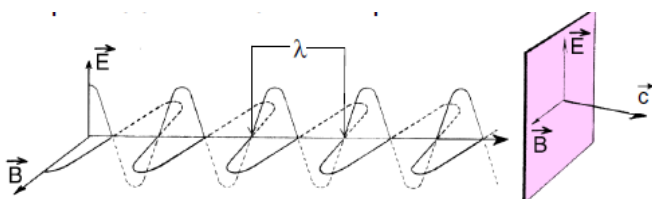
## C. Les rayonnements électromagnétiques ou photons

### 1. Représentation ondulatoire classique

Les REM sont également appelés photons. Ce sont en fait des perturbations du champ électromagnétique qui se propagent dans le vide à la vitesse de la lumière ( $3 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$ ).

Ces perturbations découlent de la propagation d'un champ électrique et d'un champ magnétique qui vibrent en phase et qui se propagent perpendiculairement l'un par rapport a l'autre et par rapport a la direction de propagation. **Un rayonnement EM est un mode de transport de l'énergie.**

Entre deux points dans un même état vibratoire, on identifie la plus petite distance qui les séparent : **la longueur d'onde** ( $\lambda$  en m).

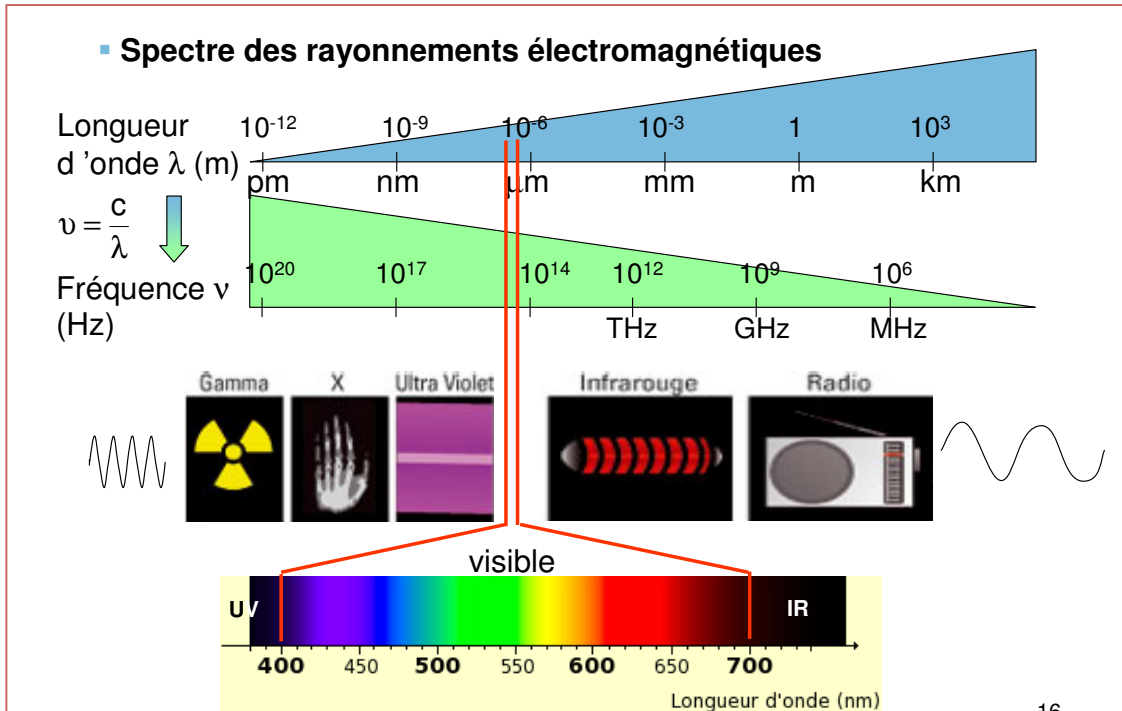


Ainsi, à intervalle régulier, chaque point retrouvera son état vibratoire initial, le nombre de fois que le motif se répète en une seconde est appelé **la fréquence** ( $\nu$  en Hz ou  $\text{s}^{-1}$ ).

En considérant que le milieu où se déplacent les REM

est le vide :

$$\nu [\text{Hz}] = \frac{c [\text{m.s}^{-1}]}{\lambda [\text{m}]}$$



## 2. Représentation quantique

Ces rayonnements particuliers transportent de l'énergie selon des quantités discontinues et multiples entiers d'un nombre élémentaire : **h**, la constante de Planck (modèle quantique).

$$E = h\nu$$

On peut alors écrire :  $E [J] = \frac{hc}{\lambda [m]}$

Avec **h** = la **constante de Planck** =  $6,62 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$

Enfin, il existe une relation calculatoirement plus facile mais ATTENTION sortant du système MKSA : la relation de **Duane et Hunt** :  $E [eV] = \frac{1240}{\lambda [nm]}$

On remarque alors que :

- \* La fréquence  $\nu$  est inversement proportionnelle à la longueur d'onde  $\lambda$
- \* L'énergie  $E$  est proportionnelle à la fréquence  $\nu$  !

## D. La dualité ondes-particules

### 1. Les ondes EM sont considérées comme des corpuscules

« Les ondes électromagnétiques peuvent être considérées comme de nature corpusculaire: les photons » (Einstein 1905)

Einstein rapproche :

- \*  $E = mc^2$  pour une particule de masse  $m$
- \*  $E = h\nu = hc / \lambda$  du quantum de Planck

Les **photons** ont une masse exclusivement dynamique :

$m$  : la masse en **Kg**

$h$  : la constante de Planck  $6,62 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$

$\lambda$  : la longueur d'onde en **m**

$$m = \frac{h}{\lambda c}$$

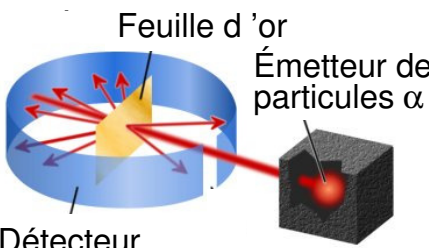
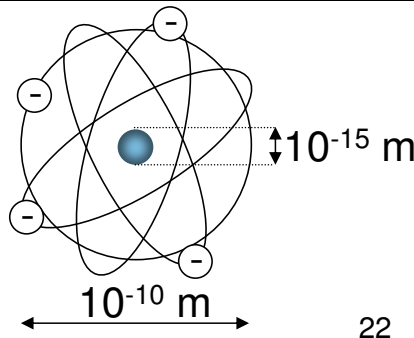
## 2. À chaque particule peut être associée une représentation ondulatoire.

C'est ainsi que **Louis De Broglie** montre que la relation d'Einstein pour les ondes EM vaut aussi pour toutes les particules : "*l'électron est aussi une onde*". A toute particule de **masse m** et de **vitesse v** on associe une onde de :

$$\lambda = \frac{h}{m v}$$

## E. Structure électronique de l'atome

### 1. Le modèle planétaire de Rutherford (1911)

	<p>Un émetteur envoie des <u>particules alpha</u> sur une feuille d'or et la quasi-totalité des particules la traversent et finissent sur le détecteur.</p>
	<p>Donc <u>la matière est pleine de vide</u>. Selon ce modèle, le diamètre vaut :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>* <b>Noyau</b> : <math>10^{-15}</math> m → masse concentrée chargée positivement</li> <li>* <b>Atome</b> : <math>10^{-10}</math> m → électrons chargés négativement refoulés à la périphérie du vide péri-nucléaire</li> </ul>

### 2. Le modèle de Bohr

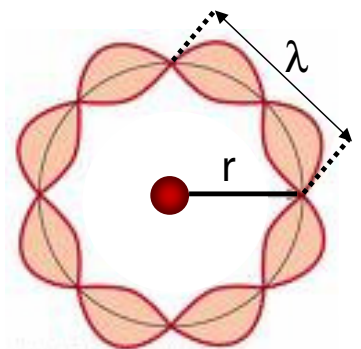
Il associe **l'électron** à une particule qui tourne sur une orbite de rayon r autour du noyau. Une orbite est un espace fermé circulaire. Le caractère ondulatoire de l'électron lui associe une onde stationnaire : l'orbite doit être compatible avec la nature ondulatoire de l'électron.

La circonférence de l'orbite (l) doit être un multiple entier (n) de la longueur d'onde ( $\lambda$ ).

Donc :

- \*  $l = 2\pi r$  selon la formule du périmètre d'un cercle (=l'orbite)
- \*  $l = n\lambda$  avec n = entier naturel
- \* on déduit  $2\pi r = n\lambda \rightarrow r$  est donc **quantifié** (+++)

☞ Les électrons sont situés sur des orbites discrètes (r le rayon de l'orbite ne peut pas prendre n'importe quelle valeur). **L'orbite de l'électron définit son énergie et son intensité de liaison au noyau.**



### Conséquence sur l'énergie de l'électron

Plus la couche est profonde, plus  $n$  est petit plus l'énergie de l'électron sera négative.

Exemple de l'atome d'hydrogène  ${}_1H$  et l'orbite  $n$  :

$$W_n [\text{eV}] = -13,6 \frac{1}{n^2}$$

### L'énergie de liaison de l'électron

C'est l'énergie qu'il faut apporter pour arracher cet électron à l'édifice atomique et l'emporter hors de l'influence du noyau.

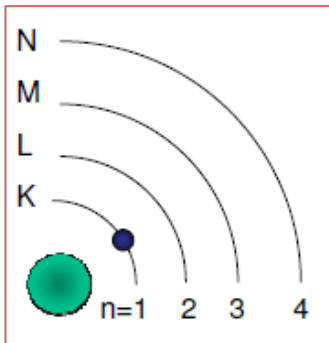
$$E_L = |W_n|$$

☞ Plus la couche est profonde, plus l'électron sera attaché à l'atome car il y'a:

- ☞ Une force d'attraction (le noyau + attire les électrons -)
- ☞ Une force répulsive entre les électrons chargés - qui se repoussent et ne peuvent sortir de l'édifice atomique.

**$E_L$  et  $W_n$  sont quantifiées et varient de façon discontinue en fonction de  $n$ .**

Les numéros de couches peuvent être assimilés à des lettres :  $n=1$  (couche K),  $n=2$  (L),  $n=3$  (M).



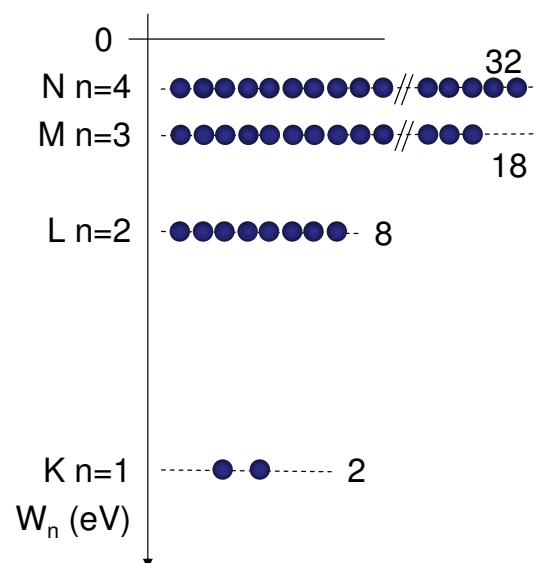
À l'état fondamental, les électrons occupent toujours les couches les plus basses avant les autres. Pour passer d'une couche à l'autre l'électron a besoin d'un **quantum d'énergie** : il augmentera son énergie mais diminuera son énergie de liaison  $E_L$ .

Les électrons les plus externes de l'édifice atomique subiront des forces plus grandes que leurs confrères électrons se situant entre eux et le noyau, ils seront repoussés. On appelle cela **l'effet écran**. L'énergie de l'électron dans l'atome devient donc :

$$W_n = -13,6 \frac{(Z - \sigma)^2}{n^2} \text{ eV}$$

Avec  $\sigma$  « la constante d'écran ».

☞ Le remplissage des couches se fait par  **$2n^2$**  électrons au maximum !



### Conclusion

- \* Les électrons K sont plus fortement liés, mais leur énergie varie beaucoup selon les atomes (selon  $Z^2$ , à  $\sigma^2$  près) :  $W_K$  varie beaucoup d'un atome à l'autre.
- \* Les électrons externes sont moins fortement liés mais leur énergie varie peu selon les atomes :  $W_{\text{ext}}$  peu selon les atomes car elle dépend peu de  $Z$ .
- \* Lorsque les couches les plus basses sont complètes : l'atome est dans son état fondamental.

## II. Interaction d'un rayonnement ionisant avec la matière

### A. Interaction élémentaire

#### 1. Absorption d'énergie par l'atome

Un rayonnement interagit le plus souvent avec les électrons de l'atome de la matière. Le rayonnement transporte de l'énergie, une partie de celle-ci sera absorbée par l'atome entraînant un déplacement des électrons : une **ionisation** ou une **excitation** de l'atome. Cet excès d'énergie sera restitué par l'atome par émission. Si le rayonnement est trop faible pour déplacer les électrons, on aura un dégagement de chaleur. L'exemple utilisé sera celui du photon principalement.

#### Absorption par excitation

L'énergie  $E$  du photon (ou rayonnement) incident est inférieure à l'énergie de liaison  $|W_i|$  de l'électron sur son orbitale mais est strictement égale à la différence des énergies de liaison des électrons de 2 orbitales différentes :

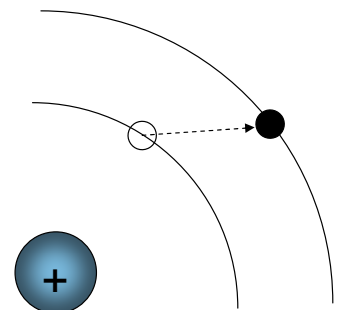
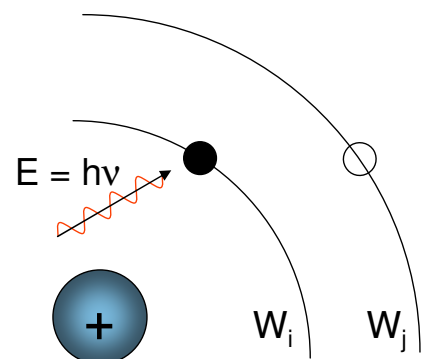
$$E = h\nu = |W_i| - |W_j|$$

L'électron ne peut pas être expulsé de l'atome, il ne peut que passer sur une orbitale plus éloignée (ici celle de la couche J) sur une case quantique libre grâce à l'énergie du rayonnement incident.

L'atome passe de son état fondamental à un excès d'énergie :

$$E = |W_i| - |W_j|$$

L'énergie absorbée est dite quantifiée.





### Absorption par ionisation

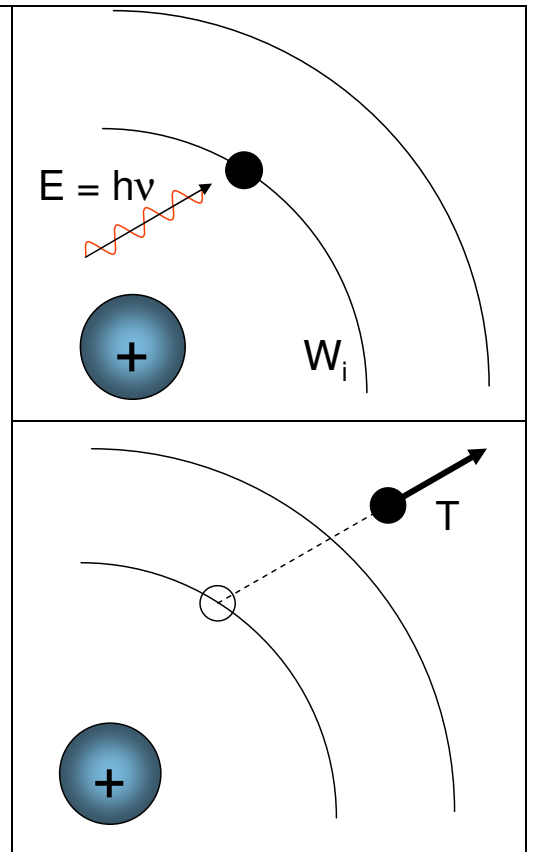
L'énergie du photon incident  $E$  est supérieure ou égale à l'énergie de liaison  $|W_i|$  de l'électron sur son orbitale. Il est alors expulsé de la structure électronique de l'atome.

L'énergie absorbée n'est pas quantifiée

$$E = h\nu \geq |W_i|$$

L'atome qui a perdu un électron est alors ionisé. L'électron expulsé part avec une énergie cinétique  $T$  :

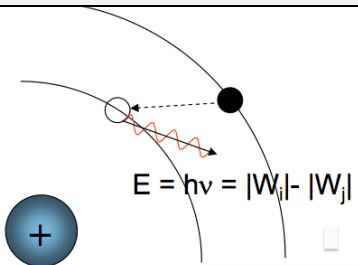
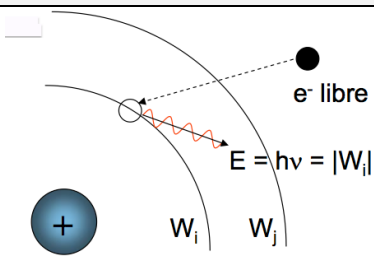
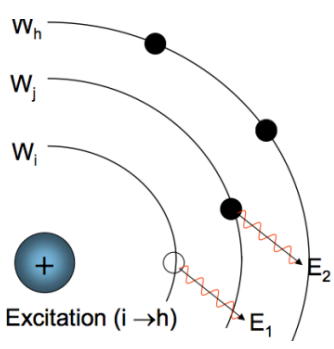
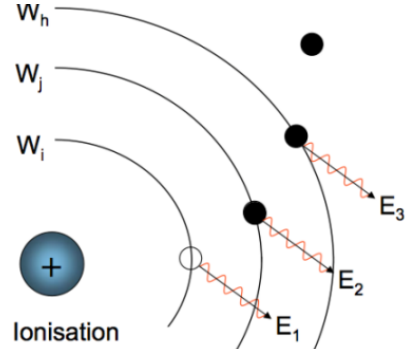
$$T = E - |W_i|$$



## 2. Émission d'énergie

Pour retrouver leur état fondamental, les atomes restituent leur énergie par émission de fluorescence ou par émission d'électrons Auger.

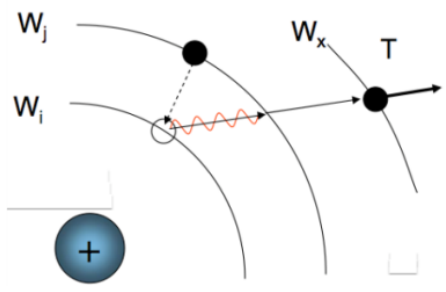
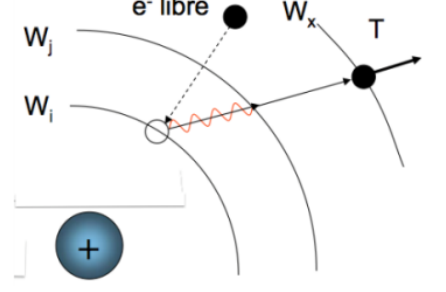
## Émission de fluorescence

Après une excitation	Après une ionisation
Un seul réarrangement	
 <p style="text-align: center;"><math>E = h\nu =  W_i  -  W_j </math></p>	 <p style="text-align: center;"><math>E = h\nu =  W_i </math></p>
<p>Un électron d'une orbitale plus lointaine va venir combler la case quantique laissée vacante par l'électron qui est passé sur une orbitale plus éloignée.</p> <p><b>Un photon de fluorescence</b> est émis d'énergie égale à la différence d'énergie entre les deux orbitales.</p>	<p>Un électron libre va venir combler l'espace laissé par l'électron expulsé (espace appelé case quantique vacante). Un <b>photon de fluorescence</b> est alors émis. Son énergie est égale à l'énergie de l'orbitale où se trouvait la case vacante comblée par l'électron libre. On obtient alors une <u>raie de fluorescence</u>.</p>
Réarrangements successifs	
 <p style="text-align: center;">Excitation (<math>i \rightarrow h</math>)</p>	 <p style="text-align: center;">Ionisation</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>* Un électron de l'orbitale j va venir combler la case vacante de l'orbitale i en émettant un photon d'énergie : <math>E_1 =  W_i  -  W_j </math></li> <li>* Une case est alors vacante sur l'orbitale j et va alors être comblée par un électron de l'orbitale h en émettant un photon d'énergie : <math>E_2 =  W_j  -  W_h </math></li> </ul> <p>On remarque que l'énergie restituée par l'émission de photons de fluorescence (<math>E = E_1 + E_2</math>) est égale à l'excès d'énergie que possédait l'atome et qui avait permis l'excitation (<math>E =  W_i  -  W_h </math>)</p> <p>En effet : <math>E_1 + E_2 =  W_i  -  W_j  +  W_j  -  W_h </math></p> <p>Les <u>désexcitations</u> peuvent ainsi se succéder.</p> <p>On obtient alors un <u>spectre de raie de fluorescence</u>.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Un électron de l'orbitale j va venir combler la case quantique laissée vacante par l'expulsion d'un électron de l'orbitale i. Un photon de fluorescence d'énergie <math>E_1 =  W_i  -  W_j </math> est émis.</li> <li>* Un électron de l'orbitale h va venir combler la case quantique laissée vacante par le premier réarrangement en émettant un photon de fluorescence d'énergie <math>E_2 =  W_j  -  W_h </math></li> <li>* Enfin, un électron libre va venir combler la case quantique laissée vacante sur l'orbitale h par le 2<sup>e</sup> réarrangement. Un photon de fluorescence d'énergie <math>E_3 =  W_h </math> est émis.</li> </ul> <p>L'énergie restituée (<math>E = E_1 + E_2 + E_3</math>) est égale à l'excès d'énergie après l'ionisation (<math>E =  W_i </math>)</p> <p>En effet : <math>E_1 + E_2 + E_3 =  W_i  -  W_j  +  W_j  -  W_h  +  W_h </math></p> <p>On obtient un <u>spectre de raie de fluorescence</u>.</p>

### Émission d'un électron Auger

Après réarrangement de l'atome il y a émission de photon de fluorescence. À ce moment là 2 choix :

1. Le photon emporte son énergie hors de l'atome. (cf au dessus)
2. Le photon peut à son tour interagir avec les électrons de l'atome, on l'appellera alors électron Auger.

Après une excitation	Après une ionisation
	
<ul style="list-style-type: none"> <li>* Un électron de la couche j vient combler la case laissée vacante par l'excitation de la couche i en émettant un photon de fluorescence d'énergie <math>E = h\nu =  W_i  -  W_j </math></li> <li>* Ce photon d'énergie bien supérieure à l'énergie de liaison des orbitales périphériques expulse un électron de la couche x. Cet électron (Auger) va partir avec <u>une énergie cinétique T</u> :</li> </ul> $T = E -  W_x  = h\nu -  W_x  =  W_i  -  W_j  -  W_x $	<ul style="list-style-type: none"> <li>* L'atome ionisé possède un excès d'énergie <math> W_i </math>. Un électron libre vient combler la case quantique laissée vacante par l'ionisation d'un électron de la couche i. Un photon de fluorescence d'énergie <math>E = h\nu =  W_i </math> est émis.</li> <li>* Ce photon de fluorescence expulse un électron d'une orbitale périphérique (dont l'énergie de liaison est bien inférieure). Cet électron possède alors une <u>énergie cinétique T</u> :</li> </ul> $T = E -  W_x  = h\nu -  W_x  =  W_i  -  W_x $

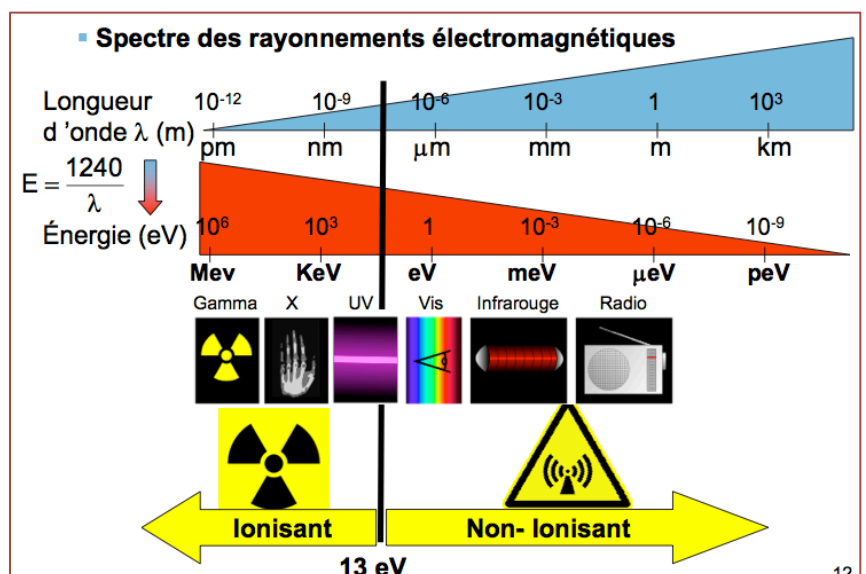
Cette émission d'un électron Auger concerne plutôt les **e- périphériques** et les **atomes légers**.  
La nouvelle ionisation induit une nouvelle désexcitation.

### 3. Rayonnement ionisant (RI)

**Définition :** « Rayonnements électromagnétiques ou corpusculaires capable de produire directement ou indirectement des ions, lors de leur passage à travers les atomes et les molécules ».

**Intérêt :** savoir si un rayonnement est ionisant permet d'éviter leurs effets délétères sur les matières biologiques comme l'ADN.

**Le reconnaître ?** Son énergie doit être supérieure à **13,6 eV** environ (donc les Gamma, X et UV)



## B. Interaction des photons

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

#### Expression de la loi

On considère  $N(0)$  photons mono-énergétiques (ils ont tous la même énergie) qui traversent une épaisseur  $x$  de matériau. Le but de cette loi est de savoir de façon probabiliste :

- \* le nombre de photons qui vont traverser la matière sans interagir avec les atomes qui la constituent
- \* le nombre de photons qui seront absorbés par cette dernière.

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

$N(x)$  : nombre de photons transmis

$N(0)$  : nombre de photons initial

$\mu$  : coefficient linéique d'atténuation [ $m^{-1}$ ], il représente la probabilité d'interaction et dépend de l'état du milieu.

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

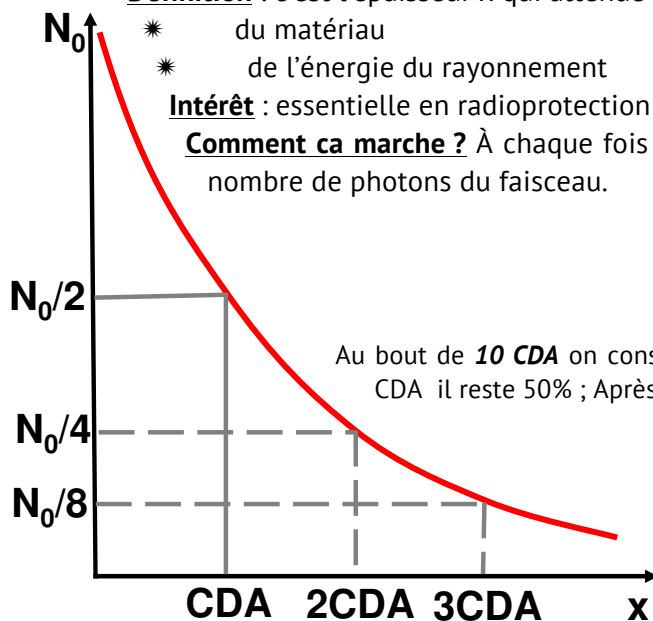
**Définition** : c'est l'épaisseur  $x$  qui atténue la moitié des photons ! Elle dépend :

- \* du matériau
- \* de l'énergie du rayonnement

**Intérêt** : essentielle en radioprotection

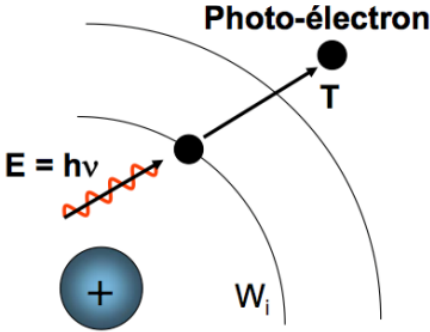
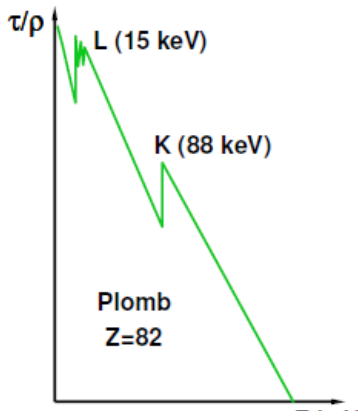
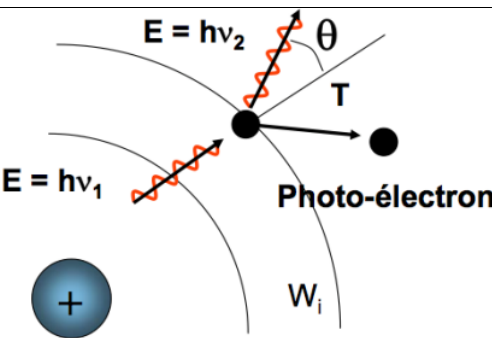
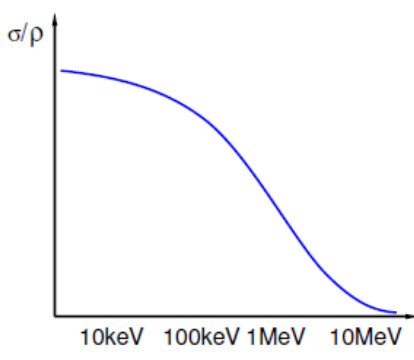
**Comment ça marche ?** À chaque fois que l'on rajoute une CDA de matière, on divise par 2 le nombre de photons du faisceau.

$$N(k. CDA) = \frac{N(0)}{2^k}$$

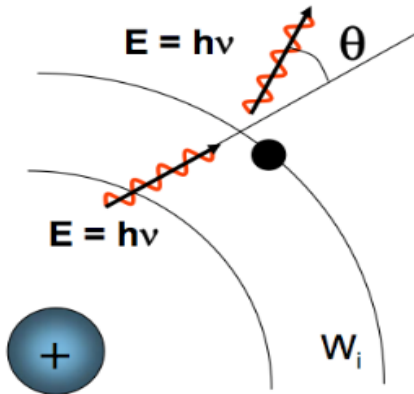
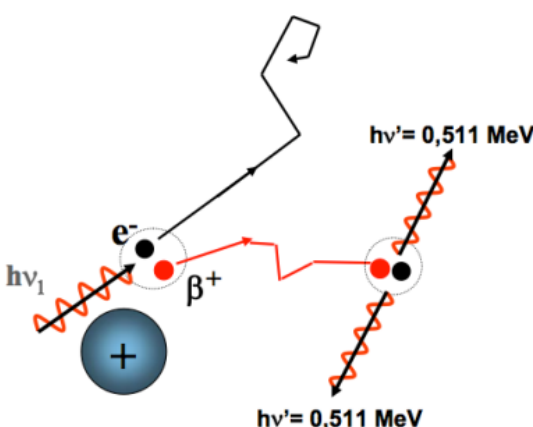
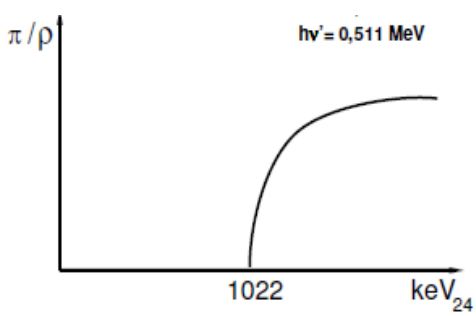


Au bout de **10 CDA** on considère que **la totalité** du faisceau est atténué ! Donc : Après 1 CDA il reste 50% ; Après 2 CDA il reste 25% ; Après 3 CDA il reste 12,5%

## 2. Les mécanismes d'atténuation

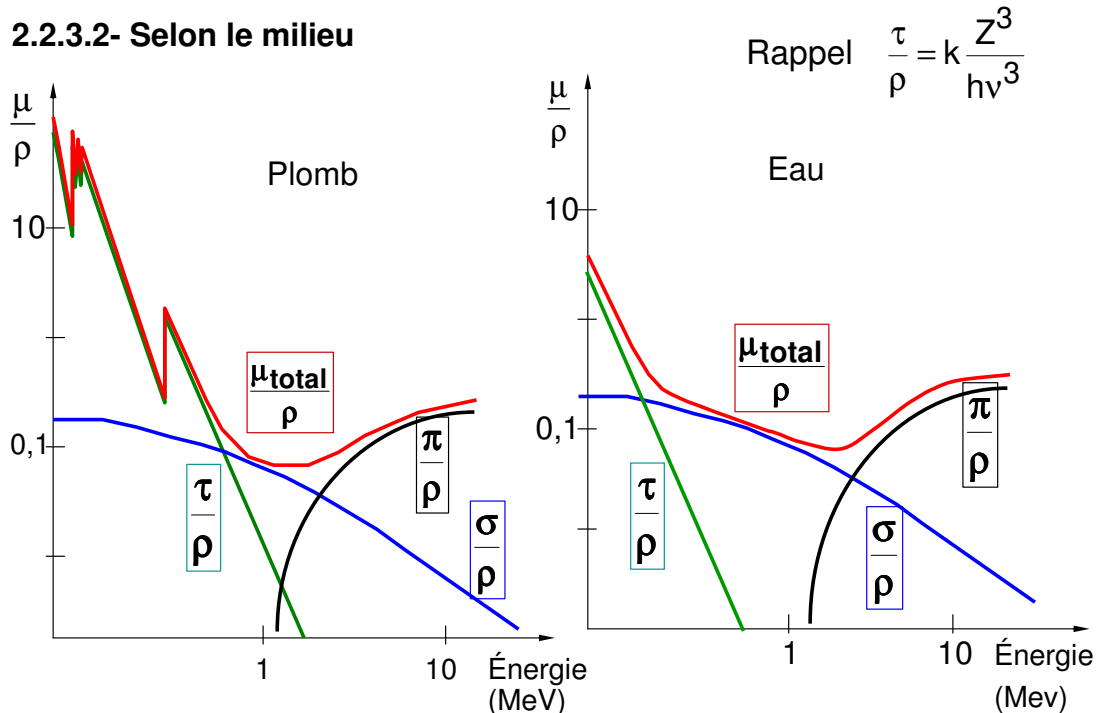
	PRINCIPE	PROBABILITÉ
Effet photoélectrique	<p>La <b>TOTALITE</b> de l'énergie du rayon de photon incident est transmise à un électron (le plus souvent profond) qui est expulsé. C'est un <b>photoélectron</b>.</p> <p>L'atome de la matière est alors <b>ionisé</b> et va pouvoir subir divers réarrangements (photons de fluorescence et électron Auger). La matière absorbe <u>toute</u> l'énergie incidente.</p> <p>Le <b>photoélectron</b> part avec une <u>énergie cinétique</u> :  <math>T = h\nu -  W_i </math> qui va se dissiper au contact des autres atomes en les ionisant.</p> 	$\frac{\tau}{\rho} = k \times \frac{Z^3}{(h\nu)^3}$ <p>La probabilité d'effet photo-électrique est maximum pour les photons d'<u>E faible</u> et les <u>éléments lourds</u> (Z élevé).</p> 
Effet Compton	<p>Une <b>PARTIE</b> de l'énergie du faisceau incident est transmise à un électron faiblement lié qui est expulsé, c'est un <b>photoélectron</b> avec une <u>énergie cinétique</u> <math>T = h\nu_1 -  W_i  - h\nu_2</math>. Une autre partie de cette énergie est diffusée via un <b>photon de fluorescence</b> (<math>E = h\nu_2</math>)</p> <p>L'atome alors ionisé subit des réarrangements successifs. Le photo-e<sup>-</sup> perd peu à peu de son énergie cinétique par ionisations successives.</p> <p><b>Lois de Compton</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>* <b>T est maximum</b> si le <u>choc est frontal</u> (c'est comme en voiture, si vous percuetez quelqu'un de plein fouet, vous l'envoyez très loin)</li> <li>* <b>T est faible</b> si le <u>choc est tangentiel</u> (toujours en voiture, si vous effleurez quelqu'un il ne va pas loin)</li> </ul> 	$\frac{\sigma}{\rho} = k \times \frac{1}{h\nu}$ <p>la probabilité ↗ quand <math>E = h\nu</math> ↘          Cette probabilité est indépendante de la nature de la matière.</p> 

### 3. Autre type d'interaction

Diffusion de Thomson-Rayleigh	<p><b>AUCUN</b> transfert d'énergie à la matière. Le faisceau incident ne fait que changer de direction (sans changer d'énergie et donc de longueur d'onde).</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>* <b>Important</b> pour les <u>photons peu énergétiques</u> : IR, UV, visible</li> <li>* <b>Négligeable</b> pour les <u>photons très énergétiques</u> : γ et X.</li> </ul>
Création de paire	<p>Lorsqu'un <b>faisceau de photon</b> d'énergie supérieure à <b>1022keV</b> passe à proximité d'un noyau, il voit son énergie transformée en <b>2 particules</b> (particule <b>e<sup>-</sup></b> et antiparticule <b>β<sup>+</sup> = positon</b>). Ces 2 particules se désintègrent rapidement en 2 <b>photons</b> chacun d'énergie égale à <b>511keV</b> (=0,511MeV).</p> <p><i>Remarque : la réaction contraire s'appelle une annihilation.</i></p> 	<p style="text-align: center;"><math>\frac{\pi}{\rho}</math></p> <p>Existante seulement à partir d'une énergie <b>E &gt; 1022keV</b> Ce seuil correspond à <u>la masse des 2 particules formées.</u></p> 

#### 4. Probabilité et matière traversée

##### 2.2.3.2- Selon le milieu



La variation essentielle concerne **l'effet photo électrique** puisque celui-ci varie avec Z pour l'eau il est donc moins prévalent que l'effet Compton.

### C. Interaction des rayonnements particulaires

#### 1. Interactions des neutrons

Les **neutrons** interagissent avec les **noyaux**. Du fait du diamètre très faible par rapport à l'atome, cette interaction a une probabilité faible. Les **neutrons** sont donc **très pénétrants**. On en distingue 2 types :

\* **Les neutrons rapides** : d'énergie cinétique élevée

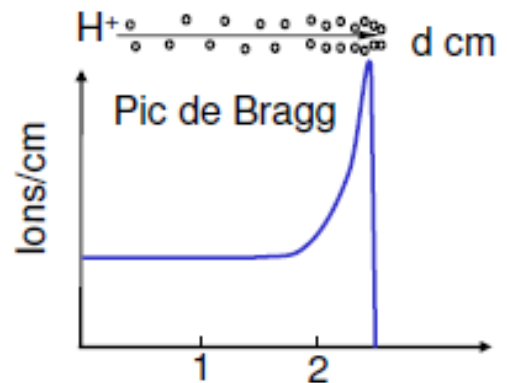
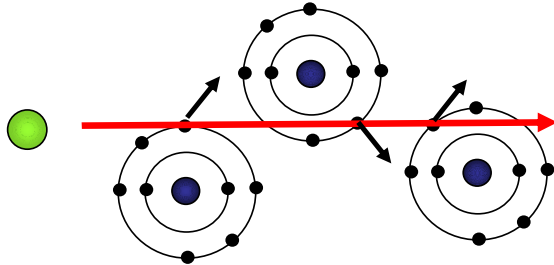
↳ Dans les milieux riches en hydrogène (la masse du noyau est proche de celle du neutron): le transfert d'E est maximal. Ce noyau H<sup>+</sup> percuté est expulsé = proton secondaire qui donnera des **ionisations** (les neutrons sont indirectement ionisants).

↳ Dans les milieux composés de noyaux lourds, les neutrons « rebondissent » sans perdre beaucoup d'énergie.

\* **Les neutrons lents** : d'énergie cinétique faible ou neutrons « thermiques » sont absorbés par les noyaux: capture nucléaire à l'origine de transformations radioactives (« capture radiative »).

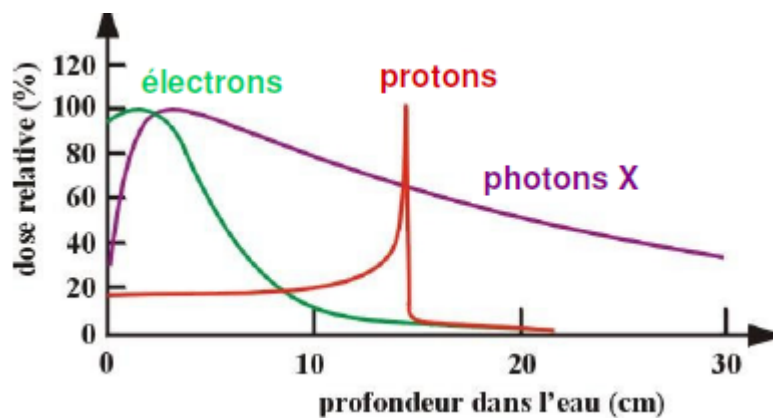
## 2. Interactions des particules chargées

Les particules chargées ont une trajectoire rectiligne, de part leur **charge** elles sont très ionisantes. Elles provoquent un maximum d'ionisation en fin de parcours appelé **pic de Bragg** : il n'y a plus d'ionisation après ce pic. Le transfert d'énergie par ionisation se fait donc à une distance particulière.



### Application médicale : la radiothérapie

Le rayonnement envoyé sur le patient peu importe sa nature (électrons, protons) formera un **Pic de Bragg** à une distance particulière. On peut donc obtenir un maximum d'ionisations au cœur d'une tumeur par exemple tout en préservant les tissus environnants.





## Les électrons

Interaction électron-électron	Interaction électron-noyau
<p>Aussi appelée « <b>arrêt par collision</b> ». C'est une interaction entre deux particules chargées de même charge. Elles vont alors se repousser « violemment » comme un « choc physique » (essayez de rapprocher deux aimants de même charge et vous aurez une petite idée de ce phénomène).</p> <p><b>L'interaction électron-électron</b> va dépendre de l'énergie cinétique de l'électron incident qui arrive sur l'électron tranquillement installé sur son orbitale atomique avec son <u>énergie de liaison</u> <math>W_i</math>.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>* si <math>E_c &lt;  W_i  -  W_j </math> : l'électron de l'orbitale ne sent quasiment rien car l'énergie cinétique est insuffisante pour le déloger. Il reste alors sur son orbitale atomique. On observe tout de même une <b>vibration et l'émission de chaleur</b>.</li> <li>* si <math>E_c =  W_i  -  W_j </math> : l'énergie est suffisante pour faire passer l'électron de l'orbitale sur une autre orbitale : <b>excitation</b></li> <li>* si <math>E_c &gt; W_i</math> : l'électron de l'orbitale atomique est expulsé : <b>ionisation</b></li> </ul> <p>Lors du retour à l'état fondamental après une ionisation ou une excitation, un photon de fluorescence est produit selon <b>un spectre de raie</b>.</p> <p>C'est ce que l'on appelle <b>un rayon X</b> dont l'énergie est <u>quantifiée</u> et dépend de la cible (des énergies de liaison des électrons du cortège électronique des atomes de la cible)</p>	<p>Aussi appelé « <b>arrêt par freinage</b> ». L'électron incident (d'énergie cinétique <math>E_c</math>) se retrouve face au noyau qui est chargé positivement (car composé de protons) et d'une masse bien supérieure à celle de l'électron. L'électron est alors dévié par ce gros noyau et subit <u>une accélération centripète</u>.</p> <p><b>Un rayonnement <math>h\nu</math></b> est produit (un <b>photon</b>) à partir de l'énergie cinétique de l'électron incident, avec une <u>énergie comprise entre 0 et <math>E_c</math></u> mais qui n'est pas quantifiée.</p> <p>Le <b>spectre d'émission est donc continu</b> (plusieurs valeurs possibles qui créent une courbe continue)</p>

Les photons produits lorsque les électrons interagissent avec une cible formée d'un matériau Z sont appelés **rayons X** et sont de 2 types :

- \* **les photons produits par collision** : ils sont quantifiés car produits lors d'une excitation ou une ionisation d'un atome de la cible. Ils sont à l'origine du spectre de raie des rayons X.
- \* **les photons produits par freinage** : leur énergie est comprise entre 0 et  $E_c$ , ils sont à l'origine du spectre continu des RX.

