

# Interactions des RI avec la matière

Hello tout le monde ! Voici la première fiche sur la biophysique des rayonnements : les RI !

Ce cours est assez important puisqu'il y a de nombreux QCM chaque année à l'examen. Il peut paraître un peu long et barbare au début mais quand vous l'aurez vu 2-3 fois ça passera tout seul ! Sur ce, bon courage ; ne lâchez rien !!

## 1) INTRODUCTION AUX RI

**RI = rayonnement ionisant** : c'est un rayonnement électromagnétique (une onde) ou particulaire (neutron, proton...), qui est capable d'interagir directement ou indirectement (en créant des ionisations) avec les atomes de la matière qu'il traverse.

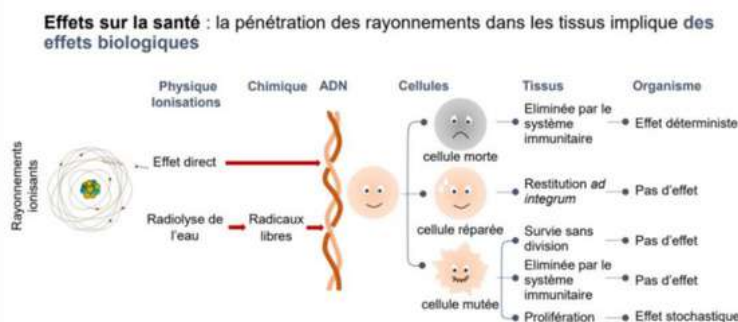
On peut se représenter un atome avec des électrons autour de son noyau, et puis un rayonnement (REM ou particulaire). Celui-ci est dit ionisant s'il est capable d'arracher un des électrons de l'atome. L'atome va alors devenir un **ion** puisqu'il a perdu un électron.

→ Un RI est donc un rayonnement capable de créer des ions c'est-à-dire de modifier les atomes.

Ces RI vont avoir des **effets chimiques** sur la santé, en effet la pénétration de ces RI dans les tissus va impliquer des **effets biologiques** ; notamment sur l'ADN. (nous reverrons cette notion dans le cours de radiothérapie)

On distingue différents effets sur cette molécule:

- La cellule peut être tuée
- La cellule peut être réparée
- Mais elle peut également être mutée, et ces mutations peuvent avoir des conséquences sur les tissus et l'organisme.



## Les intérêts de ces RI :

Ces RI vont être indispensables dans deux aspects qui nous concernent:

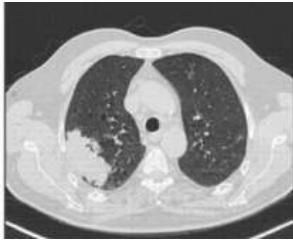
- Les **explorations diagnostiques**, avec la détection des rayonnements avec la création d'une image. Comme exemple on peut citer le scanner et la tomographie par émission de positons (TEP). Et avec ces techniques, on va pouvoir détecter différentes pathologies comme des tumeurs et des métastases.

- La **santé**, on va pouvoir choisir des effets biologiques que l'on va créer à la demande en utilisant le phénomène physique de base des RI, tout ça dans un but thérapeutique, on appelle ça la radiothérapie (notamment pour détruire des cellules cancéreuses). On va pouvoir également se protéger de ces effets biologiques, c'est ce qu'on appelle la radioprotection.

### Cas clinique pour illustrer Pas à apprendre dans le détail

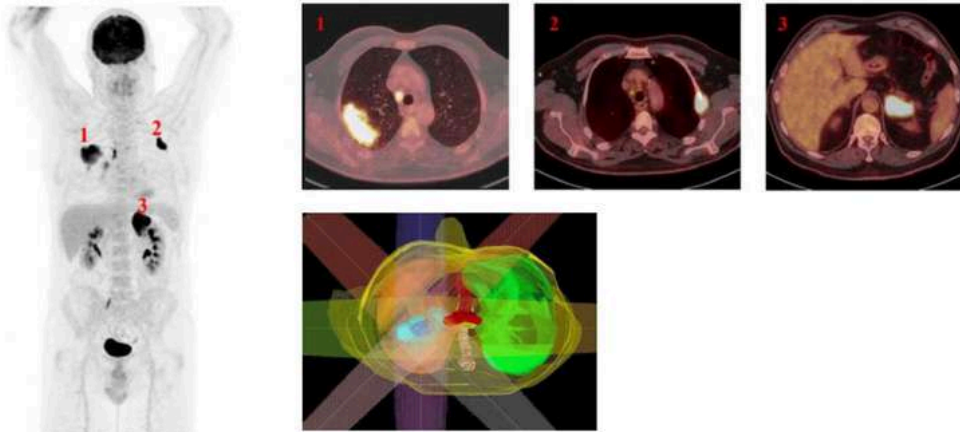
- Homme
- 52 ans
- tabagique
- symptômes: douleurs thoraciques et toux

On va l'interroger, l'examiner, l'ausculter et on va lui faire passer des examens (un scanner (=tomodensitométrie) qui utilise des rayons X).



Voici le scanner de ce patient. On peut observer une zone de densité plus claire au niveau du poumon droit (*attention sur la photo c'est à gauche, parce qu'en scanner on regarde le patient par-dessous par les pieds*), qui correspond à une anomalie, probablement un cancer.

Ensuite on va lui faire passer une tomographie par émission de positons (TEP) pour vérifier l'extension de la maladie. Cette TEP utilise un produit radioactif que l'on appelle le  $^{18}\text{F-FDG}$  (*18 fluorodésoxyglucose*), une molécule de glucose à laquelle on a attaché un atome radioactif de fluor 18, émetteur de **radioactivité  $\beta^+$**



Les fixations sont normales au niveau du cerveau car celui-ci tire son énergie du glucose. Les autres tâches noires, à part celles qui sont liées aux reins et à la vessie, sont anormales. Elles témoignent de cancers, qui pour proliférer ont besoin de capter plus de glucose pour produire plus d'ATP et avoir plus d'énergie :

- La tumeur pulmonaire avec une lésion d'un ganglion du médiastin (entre les poumons)
- Une métastase osseuse costale
- Une métastase au niveau de la surrénale gauche

On peut alors décider du traitement le plus adapté : une radiothérapie : c'est l'utilisation de rayons de haute énergie qui vont servir à traiter le patient.

On voit donc ici que le RI peuvent alors servir pour le **diagnostic** et le **traitement** des patients.

## Phénomène physique de base des RI :

Les RI proviennent de l'atome mais pas forcément du même niveau, on va avoir:

- Les **rayons X** qui proviennent de l'extérieur du noyau
- La **radioactivité**, qui elle provient du noyau lui même, ce sont des phénomènes nucléaires.

On va essayer de maîtriser ces rayonnements en comprenant les principes physiques de leurs interactions avec la matière.

## 2) MÉCANISMES GÉNÉRAUX DES INTERACTIONS DES RI AVEC LA MATIÈRE :

Un rayonnement (électromagnétique ou particulaire) qui traverse la matière lui transfert une partie de son énergie. On distingue 3 manières différentes:

- Par **simple échauffement** (sous forme de chaleur) (on ne va pas étudier ce transfert là)
- Par **excitation**
- Par **ionisation**

Les rayonnements (électromagnétiques ou particulaires/corpusculaires) qui traversent un milieu entrent en collision avec les éléments du milieu, essentiellement avec les électrons des atomes.

Pour essayer de comprendre, on va prendre l'exemple d'un rayonnement électromagnétique que l'on appelle **photon** (on aurait pu prendre une particule, ça donne la même chose).

### Le photon et les conventions d'écriture :

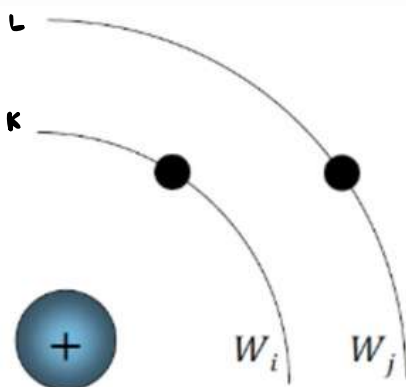
Le photon est porteur d'une certaine énergie, que l'on appelle **hv**.

Il est figuré par ce petit symbole: 

Attention c'est un "nu" (à ne pas confondre avec v, la vitesse)

$$\text{photon } E = h\nu$$

$h$  = constante de Planck  
 $\nu$  = fréquence de vibration de ce rayonnement électromagnétique



On décrit l'atome selon le **modèle de Bohr** (ci-contre), ce modèle est une description simple de l'atome, avec des électrons qui sont répartis sur différentes couches électroniques (K, L, M, N ou i, j, k... selon cet exemple)

Chaque électron, positionné sur l'une de ces couches possède une **certaine liaison avec le noyau de l'atome** auquel il appartient. Cette liaison est source d'une *énergie* de l'électron (exprimée négativement), et d'une **énergie de liaison**, qui est la valeur absolue de cette énergie de l'électron (donc positive mais c'est la même valeur).

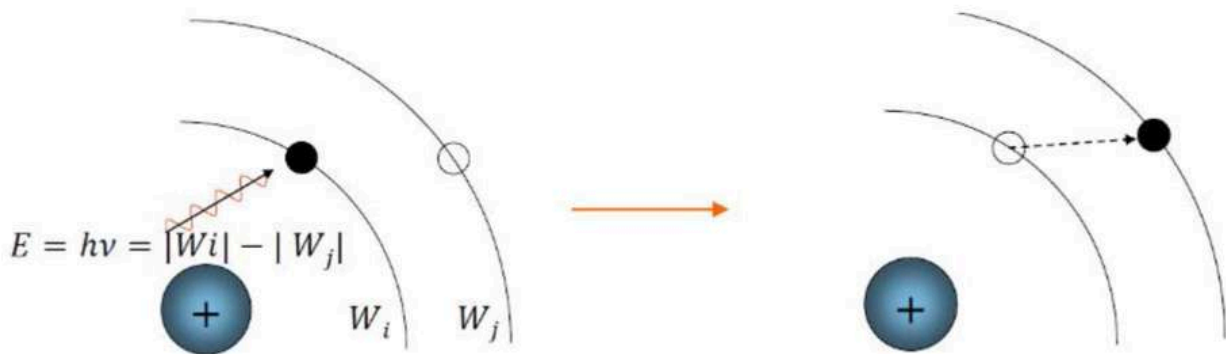
→ Énergie de l'électron =  $W_i$   
 → Énergie de liaison de l'électron =  $|W_i|$   
 Énergie qu'il faut fournir à l'électron pour l'arracher++++

3) INTERACTIONS ELEMENTAIRES : Très théorique, il faut juste comprendre le mécanisme (schémas ++)

### Interaction par **excitation** :

- L'atome peut absorber l'énergie apportée par un photon incident.
- Si l'énergie du photon  $E = h\nu$  est inférieure à l'énergie de liaison de l'électron:  $E < |W_i| - |W_j|$ ; le photon ne pourra pas arracher l'électron.
- Si cette énergie correspond **EXACTEMENT** à l'écart entre deux énergies de liaison:  
 $E = |W_i| - |W_j|$ ; alors l'électron pourra absorber cette énergie (celle du photon) en passant de la couche **i** à la couche **j**. L'électron change d'orbite : il va libérer ce qu'on appelle une case quantique (une place libre sur la couche d'origine).
- On parle alors d'*excitation*, l'atome est passé de son état fondamental (stable) à un état excité (moins stable) grâce à l'énergie fournie.
- On lui a transféré de l'énergie donc dans cet état excité, il a un **excès d'énergie**, qui lui est égal à la différence d'énergie entre les 2 couches concernées:  

$$E = |W_i| - |W_j|$$
- Cette énergie absorbée par l'atome est **quantifiée** : elle ne peut pas prendre n'importe quelle valeur, mais uniquement des *valeurs qui sont bien définies* par les différences des énergies de liaison des électrons sur chacune des couches.



(On voit donc sur ce petit schéma, que l'énergie du photon incident est bien égale à la différence d'énergie de *liaison* des électrons sur la couche **i** et **j**. Donc l'électron va être excité et va passer de la couche **i** à la couche **j**).

**ATTENTION** : Cet état est pas DU TOUT stable, donc on va avoir différents réarrangements pour retourner à l'état fondamental (stable). C'est d'ailleurs majoritairement ça qui fera l'objet de QCM.

### Interaction par *ionisation* :

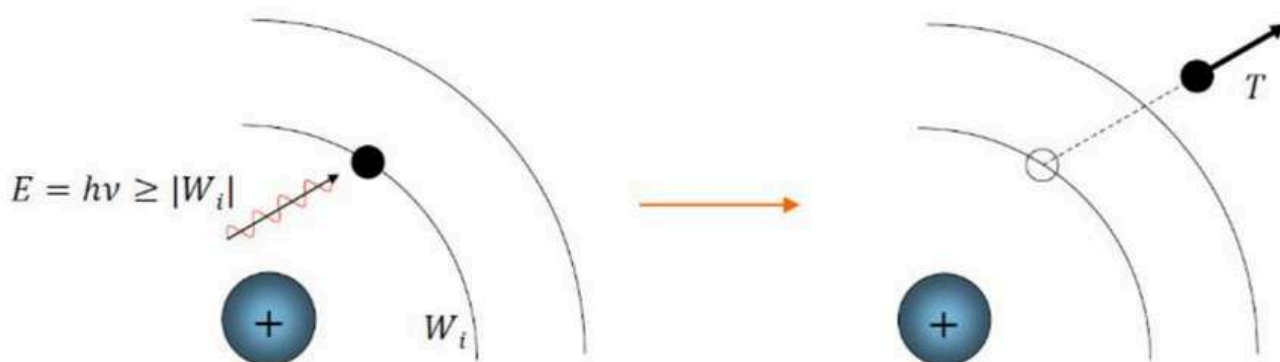
L'interaction par ionisation ressemble un peu à l'excitation qu'on vient tout juste de voir. Ce qu'il va changer c'est juste la *valeur* de l'énergie apportée par le photon.

- L'interaction par ionisation survient dans le cas où le rayonnement incident (toujours un photon dans notre cas), a une énergie  $E = h\nu$  qui est **supérieure ou égale** à l'énergie de liaison  $|W_i|$  d'un électron:  $E = h\nu \geq |W_i|$
- Il va alors expulser l'électron en dehors de sa couche électronique et de son orbite. On parle d'ionisation quand **l'atome perd un électron**. (on forme un ion)
- Là aussi, l'atome passe d'un état fondamental à un état excité. Lui aussi possède un excès d'énergie, égal à  $|W_i|$ , c'est-à-dire l'énergie de liaison de l'électron expulsé (dit plus simplement:  $|W_i|$  c'est l'énergie transmis par le photon à cet électron).
- De plus il va rester de l'énergie qui sera emportée par l'électron expulsé sous forme **d'énergie cinétique  $T$** . Cette énergie cinétique est égale à l'énergie du photon incident qui l'a expulsé (le total) **moins** l'énergie qui a été consommé pour arracher l'électron:

$$E = h\nu = |W_i| + T \quad \text{et} \quad T = h\nu - |W_i|$$

Énergie cinétique  $T$  emportée par l'électron  
 Énergie de liaison de l'électron  
 Énergie du photon incident

Dans cette situation, l'énergie  $T$  **n'est pas quantifiée**. À partir du moment où l'énergie incidente du photon est supérieure à  $|W_i|$ , toutes les valeurs à partir de ce minimum sont possibles.



(On voit bien que l'énergie du photon incident est bien supérieure à l'énergie de liaison de l'électron sur la couche  $i$ . Donc l'électron va être *ionisé (expulsé)* et va complètement partir de sa couche électronique, avec une énergie cinétique  $T$ ).

**ENCORE ATTENTION** : Cet état n'est toujours PAS stable, donc on va encore une fois avoir différents réarrangements pour retourner à l'état fondamental (stable). On voit ça dans quelques pages !

#### 4) CARACTERE IONISANT OU NON IONISANT D'UN RAYONNEMENT :

Le caractère ionisant ou non d'un rayonnement est important, car comme nous l'avons dit plus tôt, cela conditionne la présence ou non d'effets biologiques.

À partir de quel **seuil**, pouvons-nous dire qu'un rayonnement est ionisant? Cela dépend de la matière traversée. En matière de biologie, cela va dépendre de l'énergie de liaison moyenne des électrons dans les atomes qui constituent cette matière. Il faut que:  $h\nu \geq |W_n|$ .

On considère finalement comme limite l'énergie moyenne de liaison d'un électron d'une molécule d'eau :

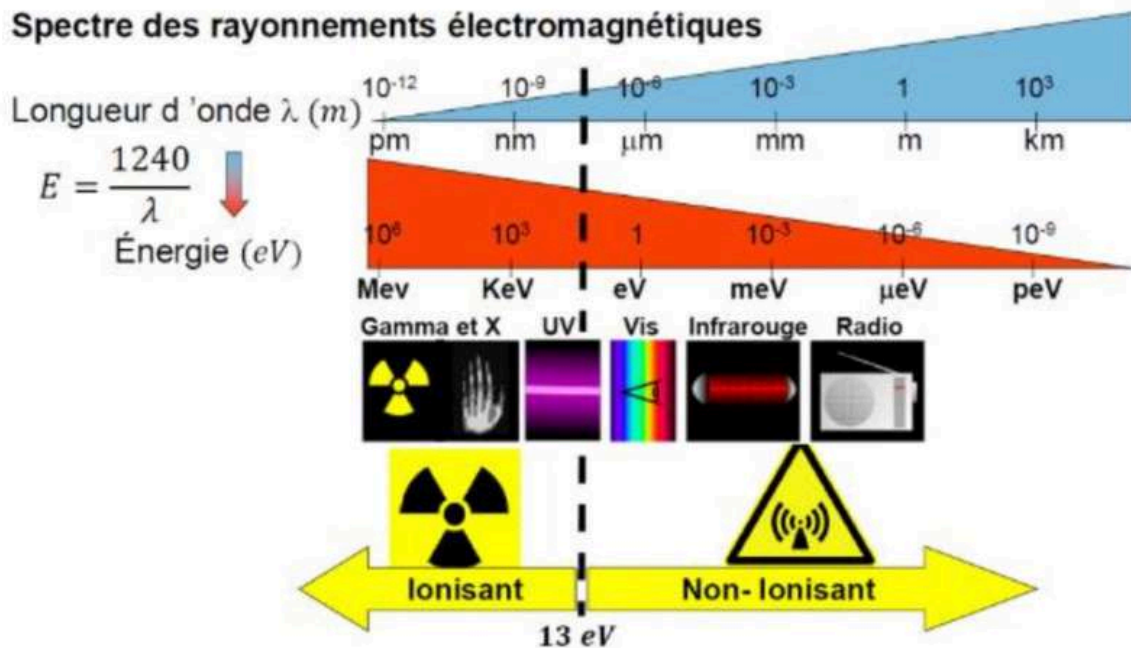
$$W_{H_2O} \approx 13,6 \text{ eV}$$

C'est donc cette valeur qui va constituer pour nous la **frontière** entre les rayonnements ionisants et non ionisants.

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

Ainsi:

- Si  $E \geq 13,6 \text{ eV}$  -> **REM ionisant**
- Si  $E \leq 13,6 \text{ eV}$  -> **REM non ionisant**



On retient donc que :

*Plus un REM à une petite longueur d'onde, plus il aura une énergie importante.*

On peut passer de ces longueurs d'onde à ces énergies par la relation de **Duane et Hunt**:

$$E = \frac{1240}{\lambda}$$

On voit que notre frontière de 13,6 eV se situe au niveau des UV, donc tout ce qui est à gauche est ionisant et ce qui est à droite ne l'est pas:

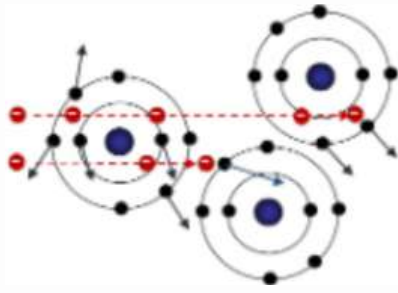
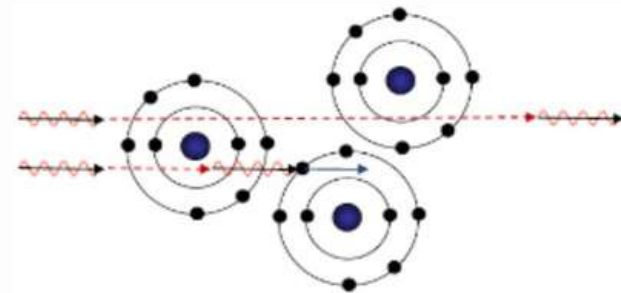
- Les rayons gamma, les rayons X et une partie des UV sont **ionisants**.
- L'autre partie des UV, le visible, les ondes infrarouge et radio sont **non-ionisants**.

Si on veut passer un scanner, on utilise des rayons X, qui sont donc ionisants, et pour les IRM, on utilise des ondes radio qui ne sont pas ionisantes (on remarque donc qu'il vaut mieux passer des IRM que des scanners).

### Rayonnements **directement** ou **indirectement** ionisants

Les rayonnements ionisants (électromagnétiques ou corpusculaires/particulaires) sont capables de produire directement ou indirectement des ions. Qui eux sont à la base de la **détection des rayonnements** (systèmes d'imagerie, compteurs, dosimètres...) et des **effets biologiques** (directs ou indirects sur l'ADN).

Ce tableau est super important donc on l'apprend bien ++ raisonnez comme si c'était des aimants, tout est logique vous verrez !

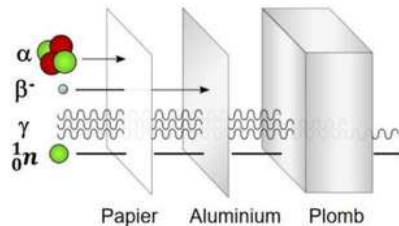
<p style="text-align: center;"><b><u>LES PARTICULES CHARGÉES :</u></b></p> <p style="text-align: center;"><math>\alpha^+ ; \beta^- ; \beta^+ ; e^- ; p^+</math></p>	<p style="text-align: center;"><b><u>LES REM ET LES PARTICULES NEUTRES :</u></b></p> <p style="text-align: center;"><math>\gamma ; X ; {}^1_0n</math></p>
<p style="text-align: center;">Sont <b>directement</b> ionisantes.</p>	<p style="text-align: center;">Sont <b>indirectement</b> ionisants.</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Interactions <b>obligatoires</b> avec la matière: car celle-ci est elle-même chargée.</li> <li>• <b>Interactions coulombiennes</b> (électrostatiques) qui se font même à distance de la trajectoire.</li> <li>• Quelle que soit leur trajectoire dans la matière, leur charge va les faire interagir avec les électrons.</li> <li>• Si elles sont chargées positivement, elles vont <i>attirer</i> les électrons, et si elles sont chargées négativement elles vont <i>repousser</i> les électrons.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Interactions <b>non obligatoires</b> avec la matière.</li> <li>• <b>Interactions balistiques</b> (statistiques)</li> <li>• Cela signifie qu'elles vont interagir avec les électrons à condition que leurs trajectoires se rencontrent.</li> <li>• Elles sont dites «indirectement ionisantes» par les électrons mis en mouvement (avec les photons <math>\gamma</math> et X) ou par les protons secondaires <math>{}^1_0n</math>.</li> <li>• C'est important parce que cela détermine les parcours dans la matière.</li> </ul>
	

REM = rayonnement électromagnétique

Les rayonnements *particulaires* ont une forte probabilité d'interagir avec la matière, ils sont rapidement arrêtés : (c'est normal ils sont plus gros et plus chargés)

- Une **particule  $\alpha$**  est arrêtée par une feuille de papier, car très chargée positivement donc il n'y a aucune chance qu'elle n'interagisse pas.
- Une **particule  $\beta$**  va interagir partiellement avec la feuille de papier, mais sera arrêtée par une feuille d'aluminium.
- Un **rayonnement électromagnétique** passera facilement la feuille de papier et la feuille d'aluminium, et interagira partiellement avec le plomb, certains rayonnements seront arrêtés mais pas tous.

(On voit que plus une particule est chargée, plus elle sera arrêtée facilement par les matériaux).



C'est donc très important en radioprotection (qu'on reverra mieux plus tard) mais aussi très important médicalement parce que le *parcours* dans les tissus est à la base de l'utilisation des rayonnements et de la radioactivité pour le diagnostic et le traitement (On reverra plus tard). Pour **traiter une tumeur**, par exemple, le but c'est que le rayonnement dépose son énergie dans la tumeur, alors qu'en imagerie le but c'est que le RI au contraire sorte du patient. C'est pour ça que les rayonnements particuliers sont particulièrement utilisés dans le traitement (dans le but d'être arrêtés), et les rayonnements électromagnétiques en imagerie médicale (dans le but de traverser les tissus avec moins de dommages possibles).

#### Pause récap!

- Les rayonnements *particulaires* sont directement ionisants (pour la plupart) et déposent rapidement leur énergie dans les tissus -> **effets biologiques importants** (traitements).
- Les rayonnements *électromagnétiques* sont indirectement ionisants et déposent peu leur énergie dans les tissus -> **peu d'effets biologiques** (explorations)

### 5) LES CONSEQUENCES DE CES INTERACTIONS AVEC LA MATIERE :

Encore une fois, cette partie est vraiment importante à comprendre ; c'est majoritairement de la visualisation. Je posterai des documents d'aide sur le forum pour que vous compreniez bien !

#### Emission d'un photon de fluorescence :

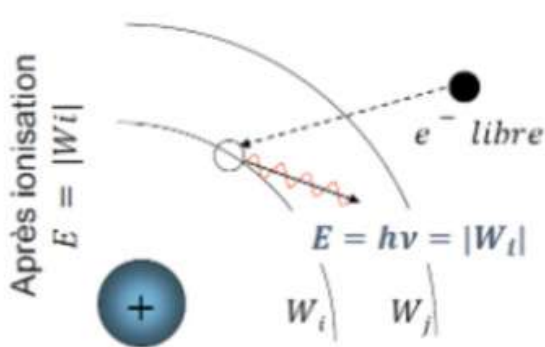
On a vu plus haut que la matière traversée par un RI, a un **excès d'énergie**, et va avoir tendance à le **restituer** (pour redevenir stable). Du coup l'atome tend à retourner à son état fondamental pour *retrouver son architecture initiale et restituer l'excès d'énergie*. Il va pouvoir le faire par l'émission de ce qu'on appelle un **photon de fluorescence**.

Pas de panique vous allez comprendre !

Le photon de fluorescence :

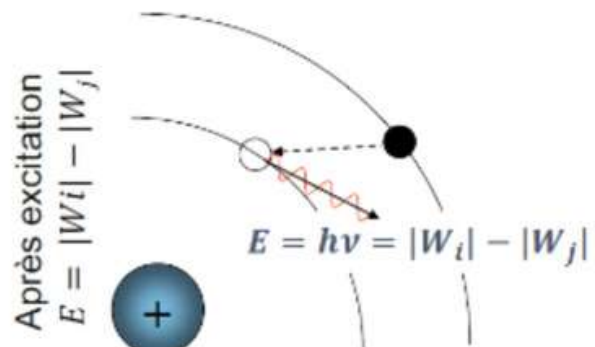
- Quand on a une ionisation ou une excitation ; on a un **excès d'énergie et une case vacante laissée vide**, donc:
  - Un *électron* va venir combler la case quantique laissée vacante par l'ionisation ou l'excitation.
  - Lorsque ce mouvement d'électron se fait, il y a une **émission d'un photon de fluorescence**, qui emporte une certaine énergie  $E = h\nu$ ,  $E$  étant égale à l'excès d'énergie qui est libéré. (Normal, on veut revenir au niveau d'énergie initial)
- La matière reprend son architecture et libère son excès d'énergie sous forme d'un photon de fluorescence, c'est un mécanisme général.

Après une **ionisation**, il manque un électron dans l'atome donc on aura besoin d'un électron libre du milieu extérieur, alors qu'après une **excitation** on a le bon nombre d'électrons dans l'atome il s'agit d'un simple réarrangement de leurs positions.



Ionisation avec retour à l'état fondamental de manière directe :

Après ionisation d'un électron d'une couche **i** il y a une place laissée vacante sur la couche **i** qui peut venir être comblée par un électron libre qui vient de l'extérieur. En venant, il va générer un **photon de fluorescence d'énergie  $E = |W_i|$**  qui correspond l'énergie de liaison de l'électron sur la couche **i** (qui correspond à l'excès d'énergie qu'avait l'atome ionisé)

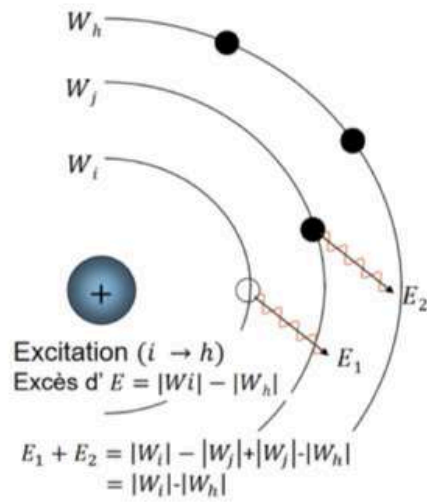
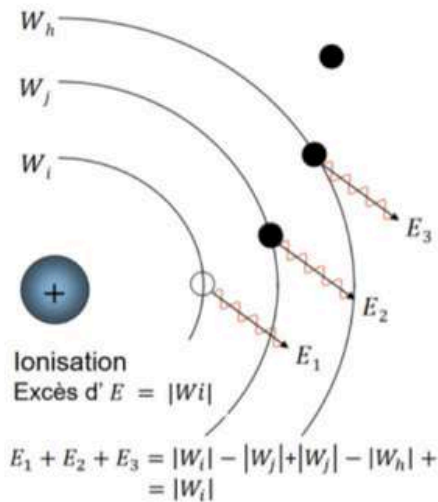


Excitation avec retour à l'état fondamental de manière directe :

Après excitation où l'atome a un excès d'énergie égal à  $|W_i| - |W_j|$ , l'électron qui a été positionné sur une couche plus périphérique (excité) peut revenir sur cette vacance électronique de la couche **i**. Il va émettre un **photon de fluorescence qui sera égal à  $|W_i| - |W_j|$**   
L'atome va restituer son excès d'énergie sous la forme de son photon de fluorescence.

Le retour à l'état fondamental peut se faire de manière **directe** (c'est ce qu'on vient de voir) ou via une **cascade de réarrangement** (de manière indirecte).

*Okay on rentre maintenant dans le cœur du sujet avec tous types de réarrangements, généralement ce sont plutôt des QCM de calcul plutôt que des QCM de cours.. Il y aura des aides sur le forum mais si jamais vous ne comprenez pas, n'hésitez surtout pas à poser des questions ! J'essaierai de le réexpliquer d'une autre façon.*



Ionisation avec retour a l'état fondamental de maniere indirect :

Un électron de la couche **j** peut combler la case vacante sur **i** et donner un photon de fluorescence **E1** : une nouvelle case vacante se formera sur la couche **j**. Cette case vacante peut être comblée par un électron de la couche **h** et produire un photon **E2**. La nouvelle case vacante sur la couche **h** peut être comblée par un électron libre qui produira un troisième photon de fluorescence **E3**.

La somme des énergies de tous les photons émis reste égale à l'excès d'énergie qu'avait l'atome après son ionisation.

Excitation d'un électron de la couche i a la couche h avec retour a l'état fondamental de maniere indirecte :

La case peut être comblée par un électron de la couche **j** qui produit un premier photon de fluorescence **E1**. Cette case vacante sur la couche **j** peut être comblée par un électron de la couche **h** qui produit un deuxième photon de fluorescence **E2**.

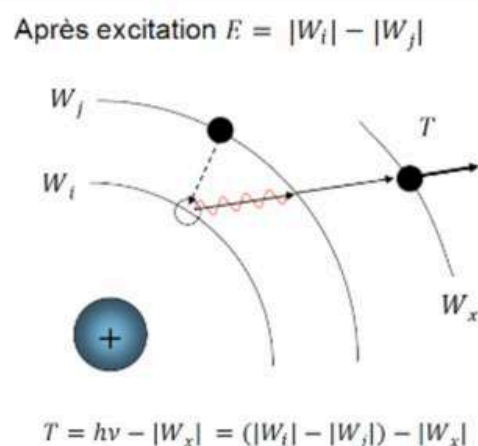
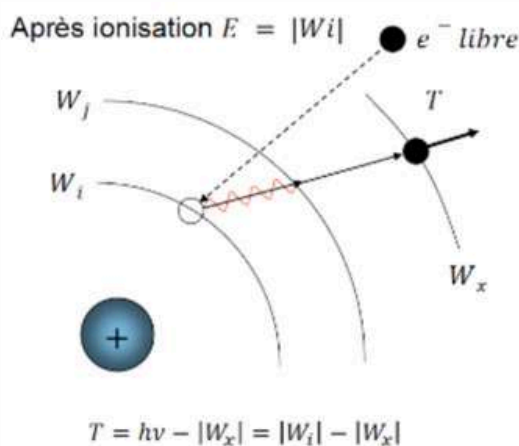
Encore une fois, la somme des énergies de tous les photons émis est égale à l'excès d'énergie qu'avait l'atome après son excitation.

Emission d'un électron D'Auger :

Un *photon de fluorescence* (qui est rayonnement énergétique) peut lui-même expulser un électron de l'atome qui lui a donné naissance, c'est ce qu'on appelle: **un électron d'Auger**. C'est en général un électron d'une couche plus périphérique.

Cet électron est émis avec une certaine énergie cinétique **T = excès d'énergie de l'atome - |W<sub>x</sub>|**

*Surtout n'apprenez pas ça par cœur, j'insiste mais l'important est de comprendre !*



Après l'ionisation:

Un atome a subi une ionisation d'un électron de la couche **i**. Admettons que cette vacance soit directement comblée par un électron libre, ce qui va **produire un photon de fluorescence dont l'énergie sera égale à  $|W_i|$** . Ce photon de fluorescence ne va pas être directement émis hors de l'atome, mais va produire le déplacement d'un autre électron plus périphérique, sur une couche que l'on va appeler **x**. L'énergie cinétique de cet électron *Auger* sera  $T = hv - |W_x| = |W_i| - |W_x|$ .

Après l'excitation:

L'atome a un excès d'énergie  $E = |W_i| - |W_j|$ . La restitution d'énergie peut se faire par le retour d'un électron de la couche **j** à la couche **i**. Il va y avoir **émission d'un photon de fluorescence**, va transférer son énergie à un électron plus périphérique qui sera arraché. Cet électron *Auger* sera arraché avec une énergie cinétique:  $T = hv - |W_x| = (|W_i| - |W_j|) - |W_x|$ .

Pause récap !

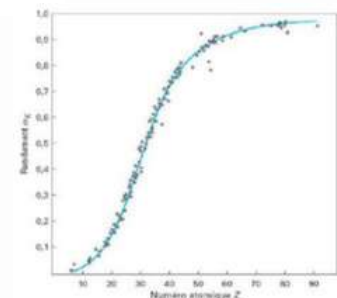
Un atome ionisé ou excité peut retourner à son état fondamental :

- Soit par émission d'un **photon de fluorescence**
- Soit par émission d'un **électron Auger**

La compétition entre ces 2 phénomènes est caractérisée par le *rendement* de fluorescence  $\omega_i$  qui dépend du Z de l'atome.

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

On voit que plus le **Z augmente** plus le rendement de fluorescence augmente, et donc la probabilité d'émettre un photon de fluorescence est importante.



Rendement de fluorescence pour la couche K

L'émission Auger est donc plus probable pour les atomes légers, avec un **Z faible**.

6) INTERACTIONS DES PHOTONS AVEC LA MATIERE :**Atténuation des photons** dans la matière:

Lorsqu'un flux de photons va traverser un échantillon de matière, chaque photon peut avoir un devenir différent. Il peut soit être:

- **Absorbé** ; il ne franchit pas au-delà de la matière
- **Diffusé** ; il va être dévié
- **Transmis** ; il va traverser la matière sans interagir.

Il est important de connaître la proportion de ces photons qui sont transmis: c'est ce qu'on appelle **la loi d'atténuation**, le nombre de photons qui va pouvoir traverser un échantillon donné.

### La loi d'atténuation (photons transmis):

Toutes ces formules super compliquées sont pas vraiment à apprendre ; il faut juste comprendre le principe général.

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

$$N - dN \text{ avec } -dN = \mu N dx$$

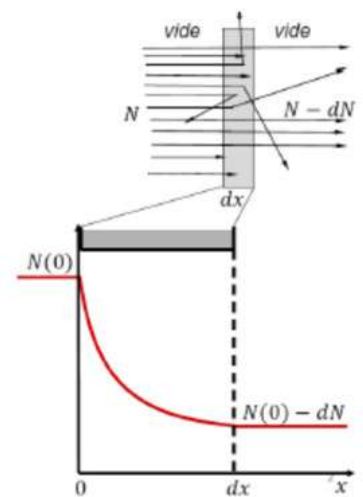
Le nombre de photons transmis est donc proportionnel à l'épaisseur  $x$ , au nombre  $N$  de photons et à  $\mu$ , la *probabilité* d'interaction par unité de longueur. **Plus cette probabilité est élevée et plus un grand nombre de photons va être atténué**, donc moins il y aura de photons transmis.

D'une manière général, le nombre de photons transmis s'écrit:

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

Avec  $N(0)$  le nombre de photons atteignant l'échantillon de matière,  $\mu$  cette probabilité d'interaction et  $x$  l'épaisseur traversée.

**L'atténuation des photons se fait donc de façon exponentielle. +++**



### Les différentes expressions de $\mu$ :

$\mu$  (**mu**) **correspond au coefficient linéique d'atténuation** : C'est une probabilité d'interaction par unité de longueur. Il a donc pour dimension l'inverse d'une longueur [L-1] (par exemple le  $\text{cm}^{-1}$ ). Ce coefficient est spécifique du milieu et de son état (compression, densité...) et de l'énergie des photons. On a donc notre expression du nombre de photons transmis :

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

Le problème étant que l'épaisseur  $x$  peut être difficile à mesurer. On peut donc utiliser  $\mu/\rho$  qui correspond au coefficient massique d'atténuation. L'expression du nombre de photons transmis selon le coefficient massique d'atténuation devient alors :

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

On n'a donc plus besoin de mesurer l'épaisseur  $x$  mais la masse surfacique  $\rho x$  ce qui est plus facile :

$$\rho x = \frac{m}{\text{vol}} \times x = \frac{m \cdot x}{s \cdot x} = \frac{m}{s}$$

Ce coefficient massique d'atténuation ne dépend pas de l'état du milieu (compression, densité ...). Il a pour dimension une longueur au carré par unité de masse [L<sup>2</sup>.M<sup>-1</sup>] (par exemple des cm<sup>2</sup>.g<sup>-1</sup>).

### Petit récap :

$\mu$  (**coefficient linéique d'atténuation**) : probabilité d'interaction par unité de longueur, dépend du type de milieu et de son état, de l'énergie des photons considéré.

$\mu/\rho$  (**coefficient massique d'atténuation**) : dépend du coefficient linéique, plus facile à calculer et ne dépend pas du milieu.

### Couche de demi atténuation :

La couche de demi-atténuation ou CDA correspond à l'**épaisseur x qui diminue le flux de photon incident d'un facteur 2**.

On peut donc écrire :  $CDA = \ln 2 / \mu$

On peut alors exprimer d'une autre façon la loi d'atténuation des photons, en fonction de la CDA :

$$N(k. CDA) = N(0)e^{-\mu.k.CDA} = N(0) \left(\frac{1}{2}\right)^k = \frac{N(0)}{2^k}$$

Ce qu'il faut comprendre c'est que k correspond au nombre de CDA. Si k=3 il y a 3 CDA donc le nombre de photon est divisé par  $2*2*2=8$

En modifiant un peu l'équation, on obtient directement la proportion de photons transmis :

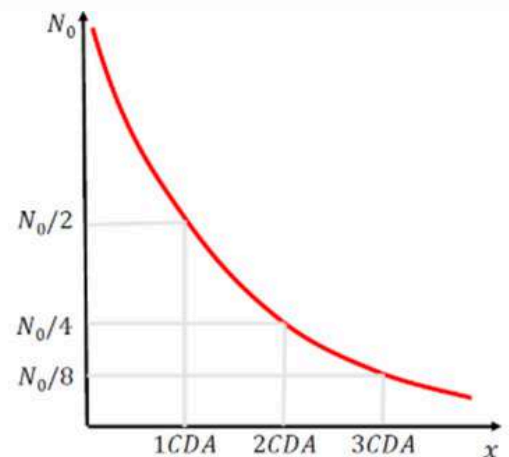
$$\frac{N(k. CDA)}{N(0)} = \left(\frac{1}{2}\right)^k$$

Les deux formules au dessus sont pas à apprendre, la seule qu'il faut connaître c'est celle là :  $CDA = \ln 2 / \mu$

Voici le tableau associé à cette formule ainsi que le graphique qui permet de bien comprendre tout ça :

Exemple :  
D'après le tableau, après 3 CDA, on a 12,5 % des photons qui sont transmis (qui passent).

x	$N(x)/N(0)$	%
$1 \times CDA$	$1/2$	50
$2 \times CDA$	$(1/2)^2$	25
$3 \times CDA$	$(1/2)^3$	12,5
$n \times CDA$	$(1/2)^n$	
$10 \times CDA$	$1/1024$	0,1



De plus, **l'absorption d'un faisceau de photons n'est jamais totale**, cependant on considère que le nombre de photons transmis après **10 CDA est négligeable**.

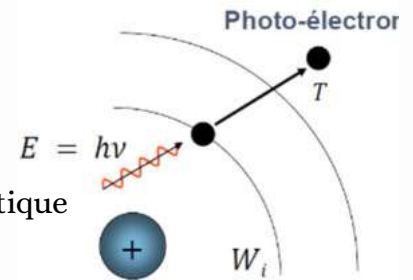
Donc dans les calculs, si on trouve 12 CDA, on considère qu'aucun photon ne passe.

### Les mécanismes d'interactions des photons :

Cette partie est vraiment super importante

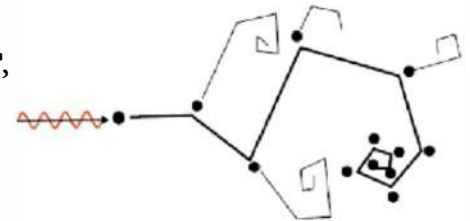
#### L'effet photo-électrique:

Cela correspond à un transfert de la **TOTALITE** de l'énergie du photon incident à un électron dans la matière. Admettons que nous avons un photon incident  $E = h\nu$  dont l'énergie est suffisante pour expulser un électron qui va devenir un photo-électron, émis avec une énergie cinétique  $T = h\nu - |W_i|$ .

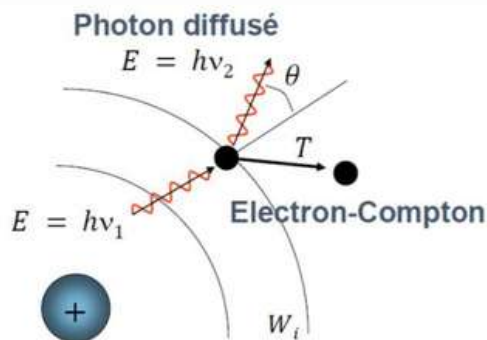


Les conséquences:

- **Pour l'atome**, une **case vacante** va être créée et il y aura un **excès d'énergie** (ionisation de toute à l'heure). Il va y avoir un réarrangement de cet atome qui peut se faire soit par émission de photons de fluorescence, soit par émission d'un ou de plusieurs électrons d'Auger (soit par les deux).
- **Pour l'électron ionisé**, puisqu'il possède une **énergie cinétique T**, il va avoir un parcours dans la matière et lui-même aura des interactions (coulombiennes (petit rappel de toute à l'heure)) et **produira des ionisations jusqu'à épuiser toute son énergie**.
- **Pour le rayonnement / photon**, il va **disparaître** puisqu'il a transféré la totalité de son énergie au photon-électron.



#### L'effet Compton:

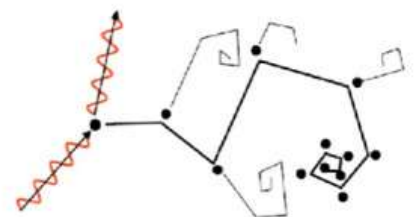


Cela correspond à un **transfert PARTIEL** de l'énergie du photon incident à un **électron dans la matière** (électron faiblement lié). L'énergie incidente se répartit alors entre **l'énergie cinétique de l'électron-Compton émis**, **l'énergie consommée pour l'arracher** (énergie de liaison), et **l'énergie du photon diffusé** (dévié) :

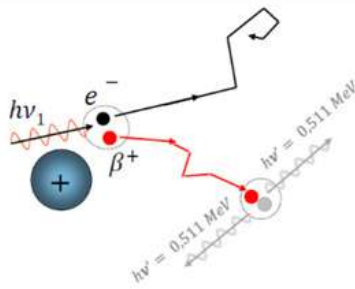
$$h\nu_1 = T + h\nu_2 + |W_i|$$

Les conséquences sont :

- **Pour l'atome** : réarrangement par photons de fluorescence et e-Auger
- **Pour l'électron ionisé** : perte de son énergie  $T$  par ionisations successives, cette énergie correspond à l'énergie absorbée  $E_a$  (ou transférée)
- **Pour le photon** : une partie du rayonnement est diffusée, avec l'énergie diffusée  $E_d$  ( $h\nu_2$ )



### La création de paire :



Cela concerne un **photon très énergétique** passant à proximité d'un noyau, il voit son énergie transformée en **2 particules**.

Les deux particules formées (un **électron** et une particule  $\beta^+$  qui a la même masse qu'un électron mais qui chargée positivement) étant des équivalents d'électrons, il faut que cette **énergie** soit équivalent à la masse de **deux fois** celle d'un électron ( $9,1 \cdot 10^{-31}$  kg, soit  $0,511 \text{ MeV}/c^2$  avec l'équivalence masse-énergie).

Si  $h\nu \geq 1022 \text{ keV}$ , l'énergie peut se transformer en ces **2 particules**.  
ou  $1,022 \text{ MeV}$

### Les probabilités des différents mécanismes d'interactions :

Cette partie est compliquée et pas très importante, les graphiques sont explicites ; jetez-y un œil.

#### La probabilité de l'effet photo-électrique :

La probabilité qu'un photon d'interagir par effet photo-électrique est notée  $\tau$  et représente le *coefficient linéique d'atténuation* par un effet photo-électrique pur.

On peut donc écrire:  $N(x) = N(0)e^{-\tau x}$

On peut réécrire la loi d'atténuation en ne tenant compte que de  $\tau$  si on ne considère que l'effet photo-électrique:

$$\tau = k\rho \frac{Z^3}{(h\nu)^3} \quad \frac{\tau}{\rho} = k \frac{Z^3}{(h\nu)^3}$$

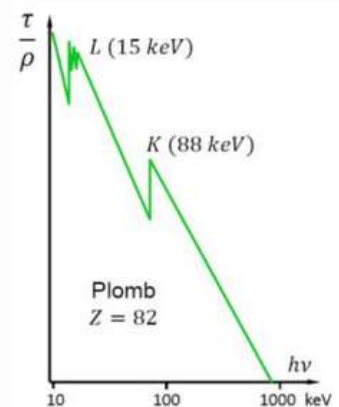
Ce qu'il faut *retenir*, c'est que la **probabilité d'interaction par cet effet est élevée** pour :

- Les éléments **lourds** avec un Z élevé ( $Z^3$  au numérateur)
- Les photons de **faible** énergie ( $(h\nu)^3$  au dénominateur)

Les maxima (pics) sur le graphique correspondent aux *énergies exactes* des énergies de liaison des différentes couches de l'atome.

Cette **propriété (probabilité d'effet photo-électrique) est utilisée dans le**

**cadre des rayons X** : Les atomes du vivant (H, C, N, O) ont une *faible* probabilité d'interaction par effet photo-électrique, à la différence du calcium ou des produits de *contraste radiologique* utilisés avec un Z élevé, d'où les contrastes observés sur les radios.



	H	C	N	O	Ca	I	Ba
Z	1	6	7	8	20	53	56

→ Produits de contraste radiologique

#### La probabilité de l'effet Compton :

La probabilité qu'un photon d'interagir par effet Compton est notée  $\sigma$  et représente le coefficient linéique d'atténuation par un effet Compton. On peut donc écrire:  $N(x) = N(0)e^{-\sigma x}$

On peut réécrire la loi d'atténuation en ne tenant compte que de  $\sigma$  si on ne considère que l'effet Compton:

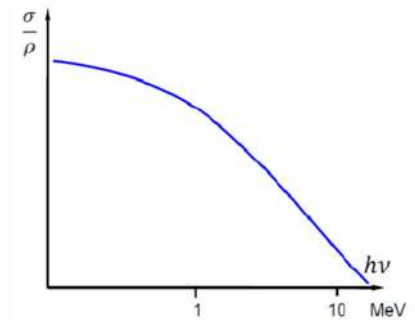
$$\sigma = k\rho \frac{1}{h\nu} \quad \frac{\sigma}{\rho} = k \frac{1}{h\nu}$$

La probabilité d'interaction pour l'effet Compton est pratiquement **INDÉPENDANTE** de la *nature* de la matière, comme le montre cette comparaison entre l'eau et le plomb :

- Eau  $\sigma/\rho = 0,15 \text{ cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$
- Plomb  $\sigma/\rho = 0,13 \text{ cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$

De plus, **cette probabilité diminue quand l'énergie du photon augmente** ( $h\nu$  au dénominateur).

Il y a donc une **probabilité d'interaction par effet Compton élevée** pour les photons d'énergie ( $h\nu$ ) faible. La probabilité d'interaction par effet Compton est pratiquement indépendante de la nature de la matière ( $Z$ ).

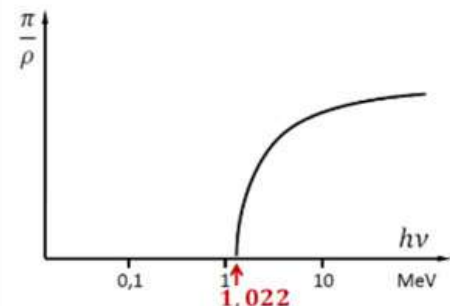


### La probabilité de l'effet de création de paire :

La probabilité qu'un photon d'interagir par effet de création de paire est notée  $\pi$  et est régie principalement par un **effet de seuil** puisque l'on a vu qu'il fallait que le photon ait une énergie qui soit équivalente à 2 fois la masse d'un électron.

Il y a donc une *impossibilité de création de paire tant que les photons n'ont pas atteint et dépassé cette énergie de 1,022 MeV*, et est ensuite croissante en fonction de l'énergie des photons incidents.

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

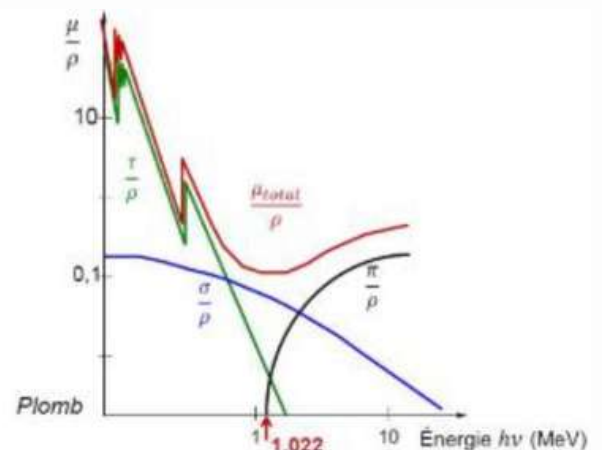


### Les importances relatives :

#### En fonction de l'énergie du photon :

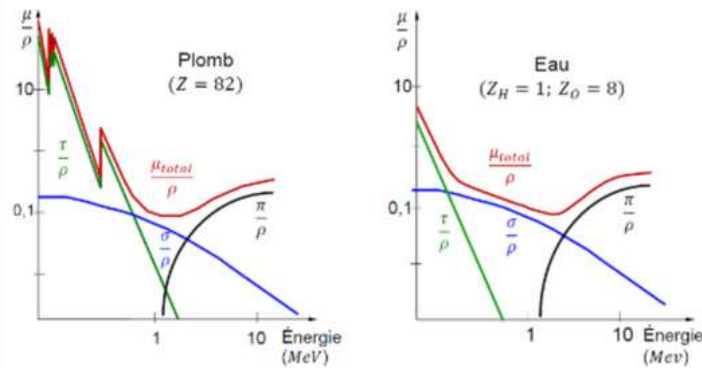
Pour les **photons à énergie faible**, l'effet photo électrique (vert) est le plus probable, mais l'effet Compton (bleue) est également possible.

Et plus l'énergie augmente, plus les probabilités d'effet photo-électrique et d'effet Compton *diminuent* (moins rapidement pour l'effet Compton). Encore une fois, la création de paires (noire) ne peut se faire qu'au-delà de 1,022 MeV.



### En fonction du milieu :

Seule la probabilité d'interaction par effet *photo-électrique* dépend du  $Z$  du milieu, on voit ici **qu'elle augmente avec le  $Z$**  (la probabilité pour le plomb est plus importante que pour l'eau). Les autres probabilités d'interactions ne sont pas significativement modifiées.



## 7) INTERACTIONS DES PARTICULES AVEC LA MATIERE :

### Les interactions des **neutrons** :

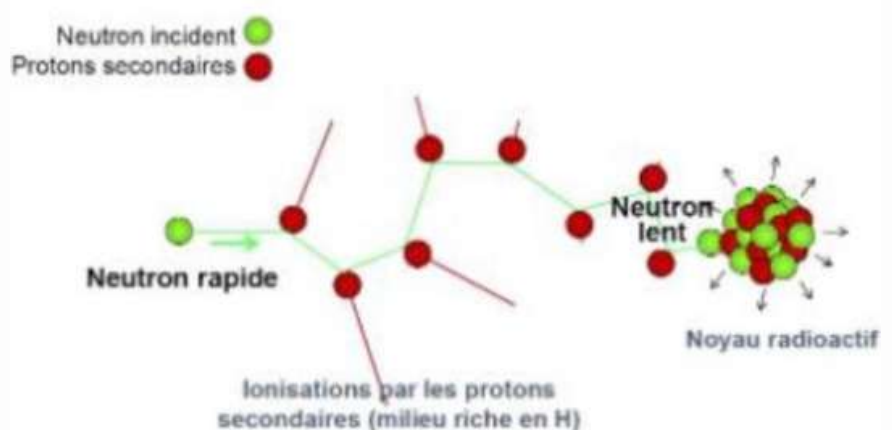
Les neutrons étant **non-chargés**, ils sont dits « indirectement ionisants » et ont des **interactions balistiques** avec les noyaux des atomes par choc direct.

La **probabilité d'interactions est donc faible** du fait du faible diamètre du noyau par rapport à l'atome. Les neutrons sont donc dit « **très pénétrants** » (= interagissent très peu).

On va alors distinguer :

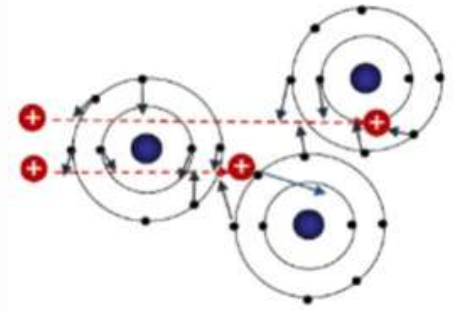
- Les **neutrons rapides** (d'énergie cinétique élevée) :
  - Dans les milieux riches en *hydrogène* (où la masse du *noyau* est proche de celle du neutron) : transfert d' $E$  maximal. Le noyau Hydrogène (composé d'un unique proton) percuté est alors expulsé avec une  $E$  cinétique, on parle alors de **proton secondaire**, qui peut alors provoquer des ionisations (les neutrons sont donc indirectement ionisants car le neutron n'est pas ionisant mais va percuter le proton qui lui va être ionisant).
  - 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 (cela correspond à la *capture* nucléaire à l'origine de transformations radioactives («capture radiative») que vous verrez dans les cours de MargO<sub>2</sub>).

Ces propriétés expliquent l'utilisation d'eau dans les réacteurs nucléaires, afin de créer beaucoup d'interactions et de ralentir les *neutrons* du réacteur. Cela explique aussi l'utilisation de bombes à neutrons, qui vont respecter les infrastructures (diffusion des noyaux lourds), tout en affectant principalement les organismes (milieu riche en *hydrogène*).

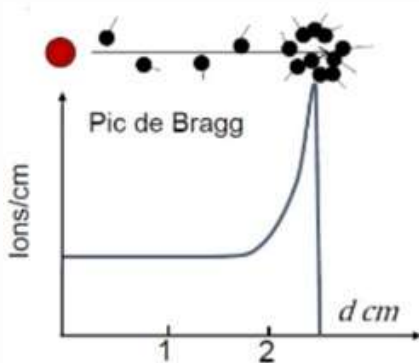


## Les interactions des *particules chargées*

On parle ici des **protons et des particules  $\alpha$**  qui vont avoir des interactions *coulombiennes* avec les électrons de la matière. Elles vont avoir une influence extrêmement importante sur les électrons puisque même si leur trajectoire passe à distance, elles vont interagir par le biais coulombien (de leur charge). Ce sont des **particules directement ionisantes**, dont la masse est largement *supérieure* à celle de l'électron. Cela implique donc une trajectoire avec peu de fluctuations (rectiligne), et de très nombreuses ionisations, et des ionisations secondaires.



Il est important de parler de la distribution particulière des ionisations provoquées par ces particules. En effet elles ont un parcours relativement COURT comparé à un électron de même énergie, et elles provoquent des effets biologiques importants.



On voit ainsi sur ce schéma le nombre d'ionisations effectuées selon la distance, et on voit qu'il existe un **Pic de Bragg**, qui correspond à une augmentation brutale de la concentration des ionisations au moment où la vitesse diminue, avec une *chute* brutale des ionisations à partir d'une certaine distance, lorsque la totalité de l'énergie de la particule a été consommée.

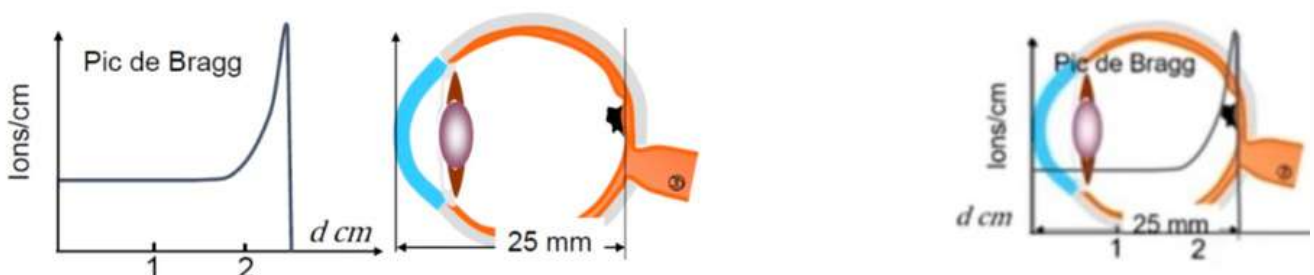
### Exemple de la protonthérapie ++ :

Là on prend l'exemple des protons mais y a aussi un pic de Braag pour les particules alpha

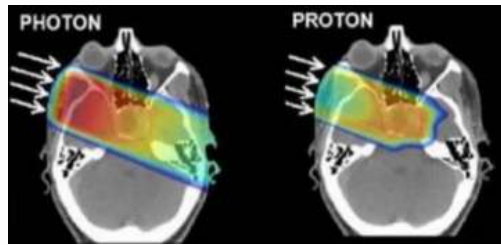
Cela a un intérêt thérapeutique, avec la **protonthérapie** par exemple. Cette méthode consiste à diriger un faisceau de protons sur une *tumeur* afin de la détruire, principalement pour des tumeurs superficielles.

Le trajet rectiligne de ces particules permet une certaine précision pour ne pas endommager les tissus environnants, et la propriété du **Pic de Bragg** permet de déterminer l'énergie nécessaire pour avoir un *maximum* d'ionisations à la distance de la tumeur, en *préservant* les tissus sous-jacents notamment.

On voit ici l'exemple de la protonthérapie dans le cadre du traitement des mélanomes de la choroïde. Avec des photons de **65 MeV**, le Pic de Bragg est à la même distance que la rétine, ce qui permet d'avoir peu d'ionisations dans la partie antérieure de l'œil, un dépôt *maximal* d'énergie au niveau de la tumeur, et pas du tout d'effet au-delà de celle-ci, donc aucune atteinte du *nerf optique*.



Autre exemple avec la protonthérapie de haute énergie, avec des protons de 230 MeV pour le traitement de tumeurs plus profondes. On voit la comparaison avec d'un côté les photons qui ont un dépôt d'énergie trop large, avec des dépôts également en avant et en arrière de la tumeur, et de l'autre côté les protons qui sont plus ciblés, avec un faible dépôt en avant de la tumeur et aucun dépôt en arrière, ce qui permet de mieux *préserv*er les tissus sains.



### Les interactions des **électrons** :

Les électrons (directement ionisants) vont pouvoir interagir avec la matière des différentes façons: avec d'autres électrons et avec les noyaux.

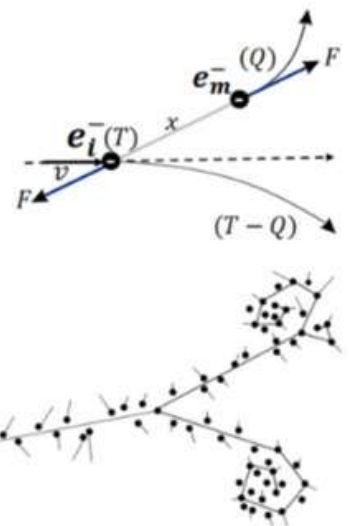
#### Les interactions électron-électron: interaction dite « par collision » :

Un électron est chargé *négativement* et va interagir avec un autre électron évidemment chargé négativement lui aussi. Ce ne sont pas des interactions (chocs) physiques mais des interactions coulombiennes par deux charges qui vont se repousser.

Les conséquences pour la matière : on considère  $T$  comme l'énergie cinétique d'un électron incident dans de la matière et  $|W_i|$  l'énergie de liaison d'un électron d'une matière cible :

- Si  $T < |W_i|$  ou  $\neq \Delta |W_i|$ , il ne va pas y avoir de déplacement des électrons mais simplement des phénomènes de *vibration* et des dépôts de chaleur.
- Si  $T = \Delta |W_i|$ , il y a *excitation*.
- Si  $T \geq |W_i|$ , il y a *ionisation* avec expulsion d'un électron.

S'il y a ionisation ou excitation, l'atome va revenir à son état fondamental par les mécanismes généraux, en particulier par l'émission de photons de fluorescence. Ces photons de fluorescence émis après l'intervention d'électrons sont les **rayons X** caractéristiques de la cible (on y reviendra dans un prochain cours). Dans ce cas, l'énergie des photons qui sont produits est dite quantifiée parce qu'elle est liée aux valeurs *précise* des énergies de liaison des électrons de la matière traversée (spectre de raies).



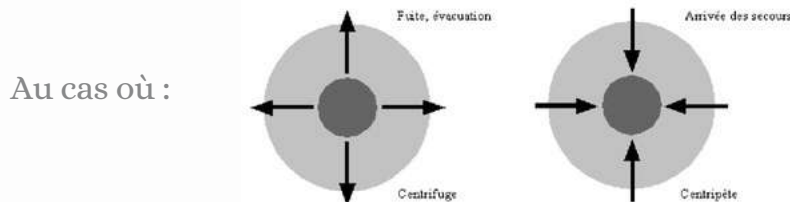
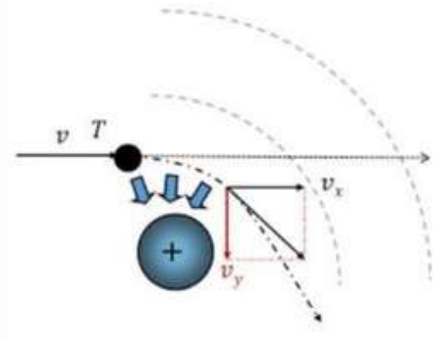
Les conséquences pour l'électron incident c'est qu'il va donc interagir avec les électrons de la cible à distance puisque ce sont des interactions coulombiennes. Lors de la première interaction, l'énergie initiale ( $T$ ) se répartit entre l'électron incident ( $T-Q$ ) et l'électron mis en mouvement ( $Q$ ). Cet électron incident a toujours une énergie cinétique donc il va pouvoir produire d'autres interactions *successives* avec d'autres électrons tant que l'énergie  $T-Q$  dont il dispose sera suffisante pour le faire.

De même l'électron qui a été mis en mouvement au départ avec une énergie  $Q$  va aussi mener un certain nombre d'interactions *secondaires* tant que son énergie le lui permettra. On va avoir des ionisations successives de différents électrons qui vont émettre différents photons caractéristiques lorsque les atomes concernés vont se réarranger. Le parcours de ces électrons va être extrêmement dévié en fonction des différentes interactions.

### Les interactions **électron-noyau**: interaction dite « par freinage » :

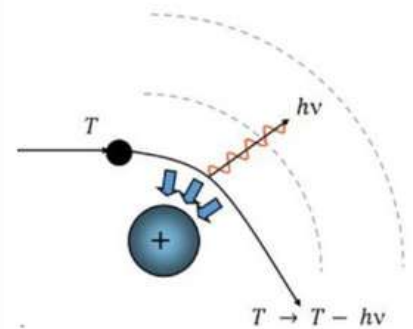
Le mécanisme est différent : il est lié à l'interaction entre un électron incident et les noyaux des atomes de la matière traversée. En effet, dans cette situation, la différence de masse entre la particule incident (l'électron) et le noyau est *considérable*. Le passage d'un électron à proximité de ce noyau va influencer l'électron mais ne va pas produire d'effets significatifs au niveau du noyau.

L'électron étant chargé négativement et le noyau chargé positivement, il va y avoir une **attraction coulombienne** de l'électron par le noyau. Du fait de cette attraction coulombienne, l'électron va être *dévié* et subir une accélération *centripète* ( $v_y$ ). Cette accélération va générer une énergie manifestée sous forme d'un rayonnement électromagnétique : **des photons X** (rayons X c'est la même chose). La diminution de sa vitesse va causer un freinage ( $v_x$ ) en même temps.



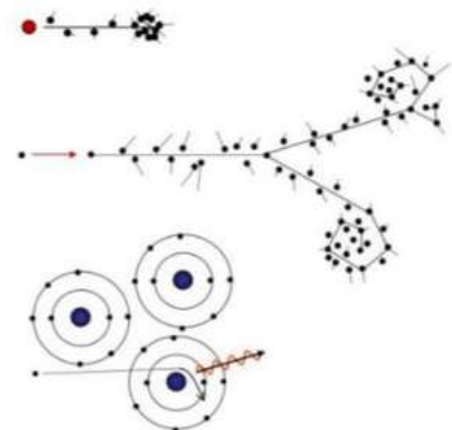
L'importance de cette énergie emportée par le rayonnement est **d'autant plus forte que l'électron va passer à proximité du noyau**. La valeur de l'énergie des photons générés  $h\nu$  n'est pas quantifiée, elle peut prendre toutes les valeurs entre 0 et  $T$  (spectre *continu*).

Les conséquences pour la matière c'est que cette attraction par le noyau de l'électron va générer un rayonnement électromagnétique qui appartient aussi aux photons X. Les conséquences pour l'électron incident c'est qu'il est dévié et perd de *l'énergie* puisqu'une partie va être perdue par ce rayonnement produit par son passage à proximité du noyau ( $T \rightarrow T - h\nu$  d'où le nom de « rayonnement de freinage »).

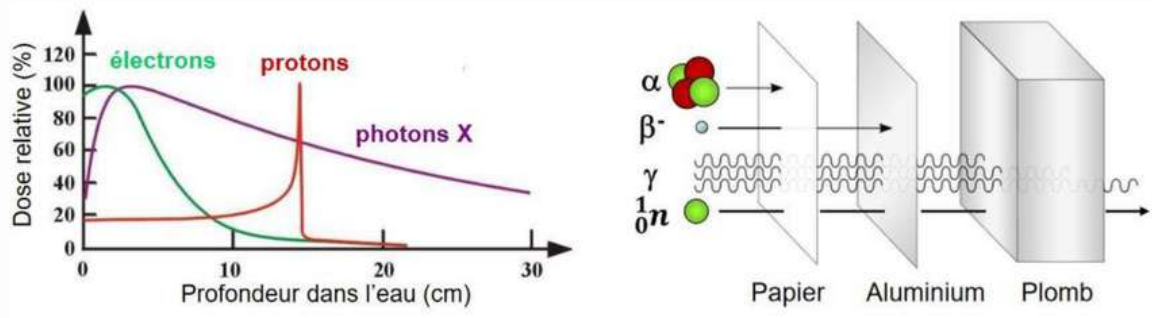


### 8) CONCLUSION:

Lorsque des particules traversent la matière, elles vont perdre progressivement leur énergie en produisant des ionisations. Cette distribution des ionisations dépend beaucoup du *type* de particule, de son *énergie* et des *milieux* traversés.



On peut constater que la distribution de l'énergie déposée, dépend du type de rayonnement.  
L'importance des interactions (le pouvoir d'arrêt) dépend alors de l'énergie et de la matière traversé.



Terminé 🥳!!

Déjà dédié à toi qui vient de terminer cette loongue fiche, tu as bien mérité une pause !

Dédicis à tous les tuteurs et CT qui bossent dur durant leurs vacances

Dédicis à ma petite famille bien évidemment qui m'a beaucoup aidé durant cette année difficile

Dédicis à mes potes de P1 qui sont tous devenus tuteurs aussi (on représente 10% du tut 😊) : Matisse, Mathis, Tom, Virgile et Antonin

Dédicis à toutes les nouvelles rencontres de la TTR, l'ambiance est folle

Dédicis spéciale à Manon