

## Interactions des RI avec la matière

Salut tout le monde, bienvenue dans ma première fiche ! Aujourd'hui on va étudier les rayonnements ionisants, le cours est un peu long (j'ai beaucoup espacé) mais une fois que vous l'aurez compris ça ira. C'est un cours qui tombe beaucoup mais vous inquiétez pas c'est assez répétitif. Mes commentaires et explications seront dans cette couleur. Bon courage !!

### I) INTRODUCTION AUX RI :

Qu'est-ce qu'un RI ? Un **RI=Rayonnement ionisant** est un rayonnement électromagnétique REM (une onde) ou particulaire (neutron, proton...), qui est capable d'interagir directement ou indirectement avec les atomes de la matière qu'il traverse.

On rappelle qu'un atome c'est un noyau avec des électrons qui gravitent autour. Si un rayonnement est **ionisant**, il est capable d'arracher un des électrons de l'atome. Un atome qui a perdu un électron est appelé *ion*, d'où le nom de rayonnement **ionisant**.

**Un RI est donc un rayonnement capable de créer des ions, c'est-à-dire de modifier des 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. (Vous le verrez dans un cours dédié)

On distingue plusieurs effets sur ces cellules : (les cellules de notre corps)

- La cellule peut être tuée
- La cellule peut être réparée
- La cellule peut être mutée, et c'est ces mutations qui peuvent avoir des conséquences sur les tissus de 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**. *(encore un autre cours...)*

Cas clinique : *(n'apprenez pas par cœur mais essayez de comprendre la logique)*

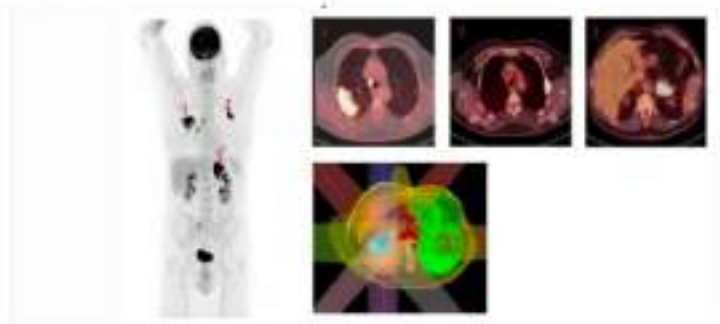
- Homme
- 52 ans
- Tabagique
- Symptômes : douleurs thoraciques et toux

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) *(on explique ça juste après)* pour vérifier l'extension de la maladie. Cette TEP utilise un produit radioactif que l'on appelle le  $^{18}\text{F}$ FDG ( $^{18}\text{Fluoro-désoxy-glucose}$ ), une molécule de glucose à laquelle on a attaché un atome radioactif de fluor, émetteur de **radioactivité  $\beta^+$** . *(En fait on a mis un atome radioactif sur du glucose. L'atome de fluor radioactif va émettre une particule  $\beta^+$  et on pourra le voir sur nos images. Donc on pourra voir à quels endroits le glucose s'est fixé, et si c'est pathologique ou non.)*



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 les RI peuvent alors servir pour le **diagnostic** et le **traitement** des patients.

*C'est terminé pour cette partie, maintenant on va passer au niveau vraiment physique, qu'est-ce qu'il se passe dans nos atomes ??*

### 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 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.

## II) MÉCANISMES GÉNÉRAUX DES INTERACTIONS DES RI AVEC LA MATIÈRE : *On arrive dans la partie intéressante*

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


- Par **simple échauffement** (sous forme de chaleur) (*on ne l'étudiera pas*)
- 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 autre particule, ça donne la même chose).

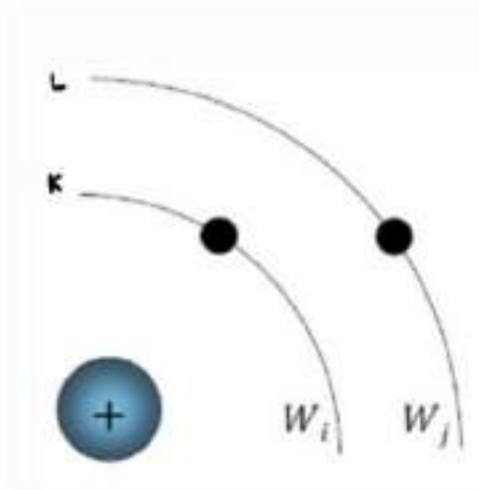
### Le photon et les conventions d'écriture :

Le photon est porteur d'une certaine énergie, que l'on appelle  $h\nu$ .

Il est figuré par ce petit symbole : 

Attention là c'est un « nu »,  
c'est pas le  $v$  de la vitesse.

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** (à gauche). 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...).

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 (donc mis en positif mais c'est la même valeur) de cette énergie de l'électron.

Donc ça nous donne :

→ 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++++

### III) INTERACTIONS ÉLÉMENTAIRES :

*Pour cette partie basez vous vraiment sur les schémas c'est le plus important*

#### 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 l'énergie 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).

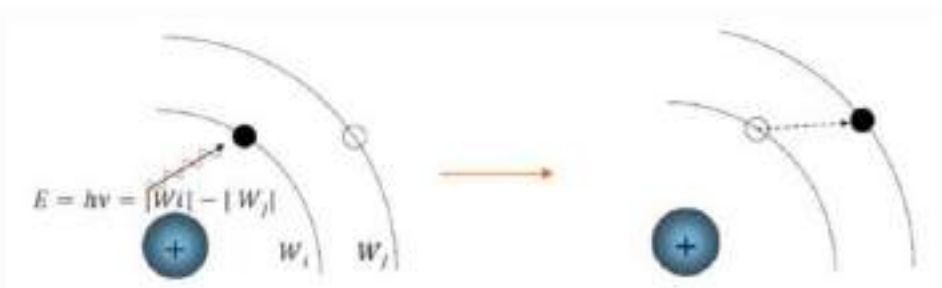
→ On parle alors d'**excitation**, l'atome est passé de son état fondamental (stable) à un état excité (moins stable) grâce à l'énergie fournie.

→ 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 :

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

(donc ici ce qu'il faut retenir c'est que quand il y a une excitation, l'électron absorbe de l'énergie ( $= |W_i| - |W_j|$ ) et que l'atome aura donc un trop plein d'énergie égal à ce que l'électron a absorbé)

→ 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.



Donc sur ce schéma on voit quoi ? L'énergie du photon incident est 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 n'est pas du tout stable, donc on va avoir différents réarrangements pour retourner à l'état fondamental (qui lui est stable). La majorité des qcms portera sur ces réarrangements.

### Interaction par ionisation :

-L'interaction par ionisation survient dans le cas où le rayonnement incident (toujours un photon dans notre cas), a une énergie  $E = hv$  qui est **supérieure ou égale** à l'énergie de liaison  $|W_i|$  d'un électron :  $E = hv \geq |W_i|$

→ Il va alors expulser l'électron en dehors de sa couche électronique et de son orbite. On parle alors d'**ionisation** quand l'atome **perd un électron**. (=on forme un ion)

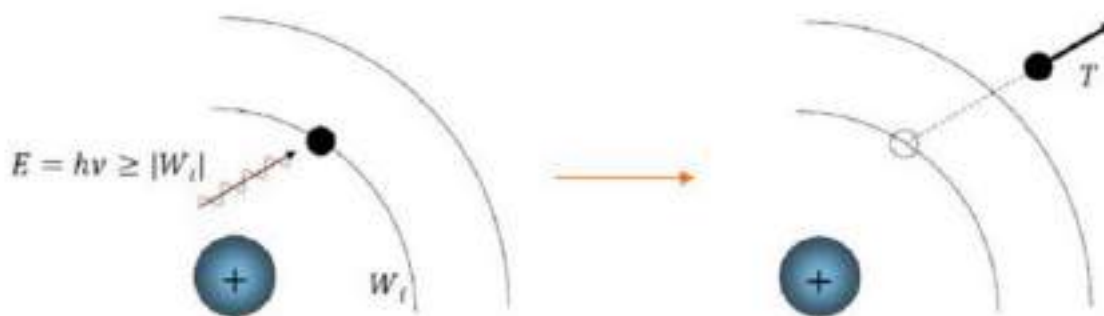
-Là aussi, l'atome passe d'un état fondamental à un état excité. Lui aussi possède un **excès d'énergie** égal à  $|W_i|$ , c'est-à-dire l'énergie de liaison de l'électron expulsé ( $|W_i|$  c'est l'énergie transmise par le photon à l'électron).

→ 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 **moins l'énergie qui a été consommée pour arracher l'électron** :

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

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

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** et va complètement partir de sa couche électronique, avec une énergie cinétique **T**).

⚠ **Attention n°2** ⚠ : Cet état n'est toujours PAS stable, donc on va devoir encore une fois avoir différents réarrangements pour retourner à l'état fondamental (stable).

## IV) CARACTÈRE 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 :

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

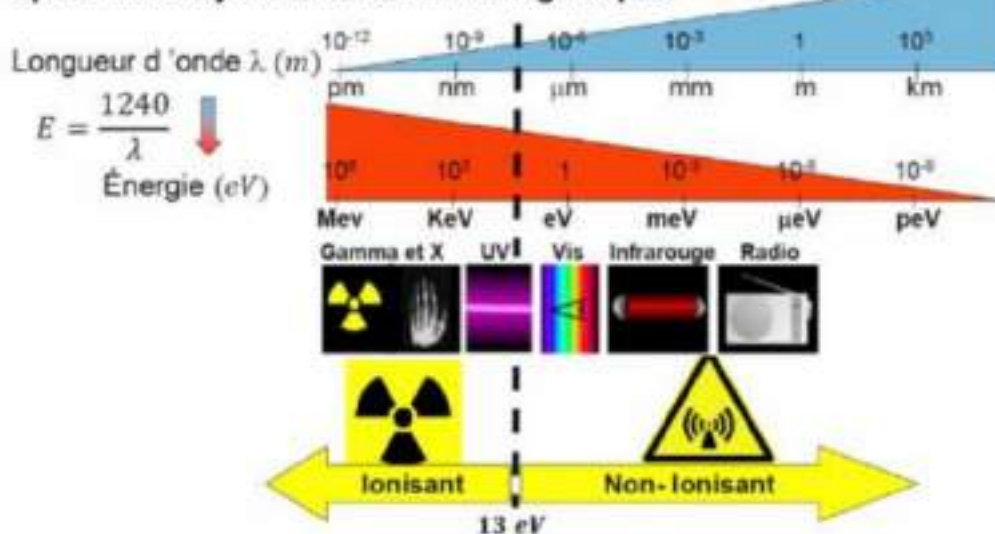
C'est donc cette valeur qui va constituer pour nous la **frontière** entre les rayonnements ionisants et non ionisants.

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

**Si  $E \geq 13,6 \text{ eV} \rightarrow$  REM ionisant**

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

### Spectre des rayonnements électromagnétiques



Ce qu'il faut retenir ici : Plus un REM a une longueur d'onde **petite**, plus il aura une énergie **importante**. *Ce serait dommage qu'on se prenne des rayonnements ionisants à chaque fois qu'on écoute la radio...*

On peut passer de ces longueurs d'ondes 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 :

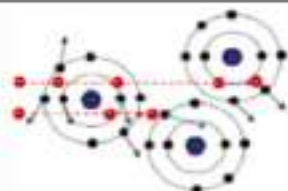
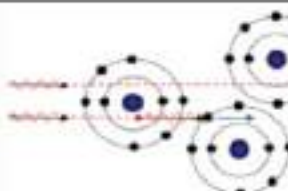
- Les **rayons gamma**, **rayons X** et une partie des **UV** sont **IONISANTS**
- L'autre partie des **UV**, le **visible**, les **ondes infrarouge** et **radio** sont **NON IONISANTS**

Si on passe 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 particulaires/corpusculaires) 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**).

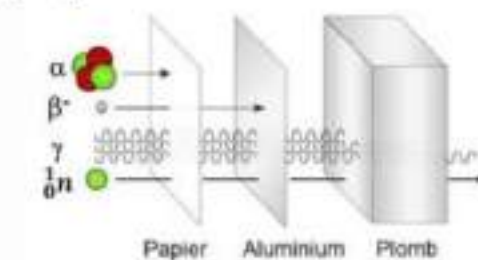
*Le tableau qui suit faut le connaître ++. Retenez le de manière logique quand même, imaginez vous une particule et son chemin, ce qu'elle va faire si elle tombe sur un électron, est ce qu'elle est chargée etc... ce sera plus facile.*

<b>LES PARTICULES CHARGÉES:</b> $\alpha^2+$ , $\beta^-$ , $\beta^+$ , $e^-$ , $p^+$	<b>LES REM ET LES PARTICULES NEUTRES:</b> $\gamma$ , $X$ , $n$
Sont directement ionisantes.	Sont indirectement ionisantes.
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Interactions 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 attirer les électrons, et si elles sont chargées négativement elles vont repousser les électrons.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Interactions 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_1H</math>.</li> <li>• C'est important parce que cela détermine les parcours dans la matière.</li> </ul>
	

Les rayonnements particuliers 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 elle est 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 celle d'aluminium, et interagira partiellement avec le plomb, certains rayonnements seront arrêtés mais pas tous.

**Plus une particule est chargée, plus elle est arrêtée facilement par les matériaux.**



C'est donc très important en radioprotection mais aussi 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. Pour traiter une **tumeur**, le but c'est que le rayonnement dépose son énergie dans la tumeur, alors qu'en **imagerie** au contraire, le but c'est que le RI 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 rayons électromagnétiques en **imagerie médicale** (dans le but de traverser les tissus avec le moins de dommages possibles).

- Les rayonnements **particulaires** sont **directement ionisants** et déposent rapidement leur énergie dans les tissus → EFFETS BIOLOGIQUES IMPORTANTS
- Les rayonnements **électromagnétiques** sont **indirectement ionisants** et déposent peu leur énergie dans les tissus → PEU D'EFFETS BIOLOGIQUES

## V) LES CONSÉQUENCES DE CES INTERACTIONS AVEC LA MATIÈRE :

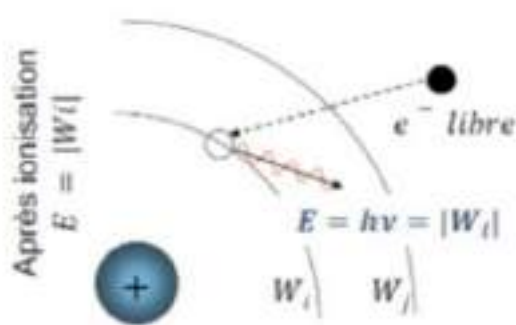
### Émission d'un photon de fluorescence :

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

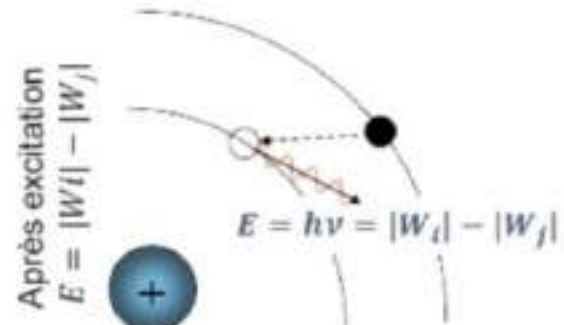
Le photon de fluorescence :

- 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 cela 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.
- 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 juste d'un **réarrangement** de leurs positions.



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

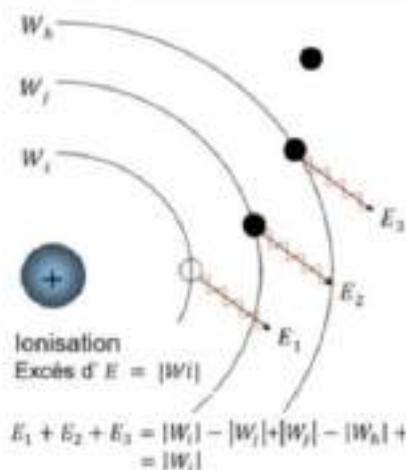


Excitation avec retour à l'état fondamental de manière directe :

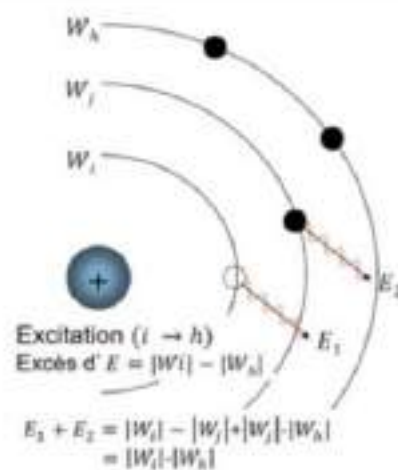
Après **ionisation** d'un électron d'une couche **i**, il y a une place laissée vacante sur la couche **i** qui peut venir être **comblée** par un électron libre qui vient de l'**extérieur**. En venant, il va générer un **photon de fluorescence d'énergie  $E = |W_i|$**  qui correspond à l'**énergie de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

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** (ce qu'on vient de voir) ou via une **cascade de réarrangements** (de manière **indirecte**).



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



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

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 de fluorescence 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.

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**.

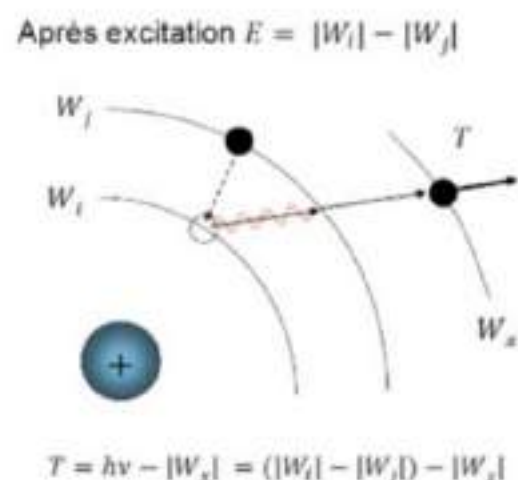
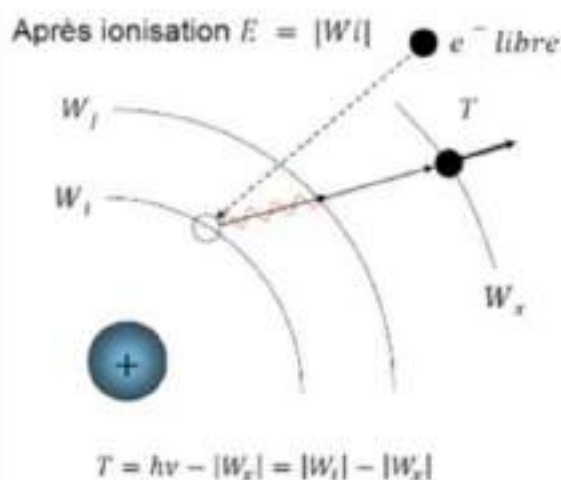
Encore une fois, la somme des énergies de tous les photons émis est égale à l'excès d'énergie qu'avait l'atome après son excitation.

### Émission d'un électron d'Auger :

Un photon de fluorescence (qui est un 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 :

$$\rightarrow T = \text{excès d'énergie de l'atome} - |W_x|$$



**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 directement sortir 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 d'Auger** sera :

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

**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**, qui va transférer son énergie à un **électron plus périphérique** qui sera arraché. Cet électron **d'Auger** sera arraché avec une énergie cinétique :

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

**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 d'Auger**

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

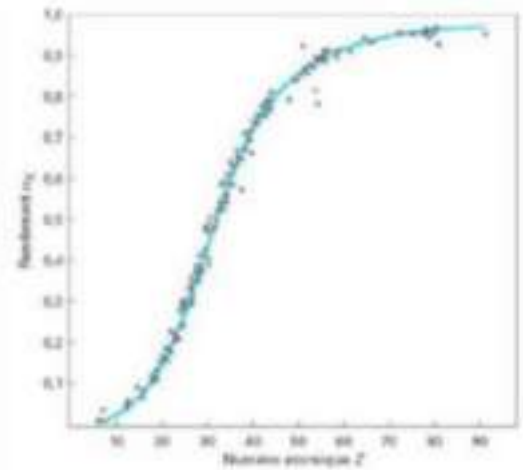
La compétition entre ces deux phénomènes est caractérisée par le **rendement de fluorescence**  $\omega_i$  qui dépend du Z de l'atome.

*Pour rappel, le Z de l'atome c'est le nombre d'électrons=le numéro atomique=nombre de charge (pas à apprendre, c'est pour votre compréhension)*

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

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**.

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



Rendement de fluorescence pour la couche K

## VI) INTERACTIONS DES PHOTONS AVEC LA MATIÈRE :

### Atténuation des photons à travers 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) :

*(Les formules qui suivent tombent pas vraiment, faut juste comprendre le principe)*

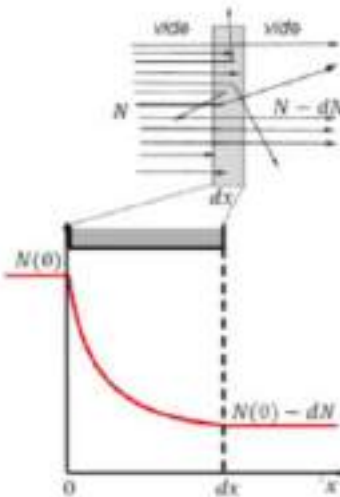
Soit un faisceau étroit de  $N$  photons mono énergétiques qui traversent une épaisseur  $dx$  de matière, le nombre de photons transmis est :  $N - dN$  avec  $-dN = \mu N dx$

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, plus un grand nombre de photons va être atténué** → donc moins de photons transmis.

De manière générale, le nombre de photons transmis s'écrit :  $N(x) = N(0) \cdot e^{-\mu x}$

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

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



On voit bien qu'au début, la courbe descend vite, le nombre de photons diminue rapidement. C'est logique en soit : on en a beaucoup au début donc forcément, ils vont rencontrer des obstacles et être atténués. Ensuite y'a moins de photons donc l'atténuation diminue. **Pas à apprendre mais si ça vous intéresse** ; la vitesse d'atténuation est donnée par la dérivée de la courbe qui donne la quantité de photons (celle à gauche). On voit que la dérivée (tangente à la courbe) diminue de plus en plus, donc la vitesse d'atténuation diminue aussi 😊

### 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<sup>-1</sup>] (par exemple le cm<sup>-1</sup>). 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 :

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

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

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

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

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

Ce **coefficient massique d'atténuation** ne dépend pas de l'état du milieu. 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>)

### 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 considérés.
- $\mu/\rho$  (**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 photons 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 :

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

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 photons est divisé par  $2 \cdot 2 \cdot 2 = 8$ . (on a divisé par 2 ; 3 fois)

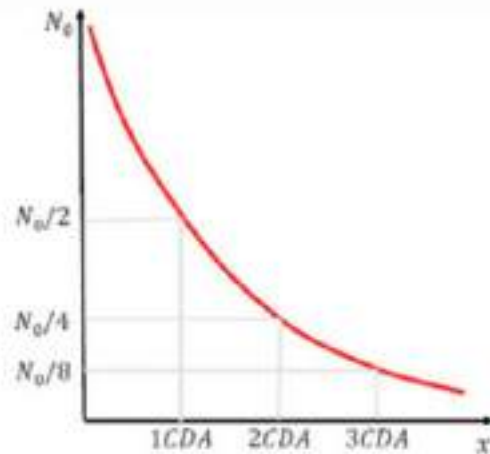
En modifiant un peu l'équation, on obtient directement la proportion de photons transmis :

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

Les deux formules sont pas à apprendre, la seule qu'il faut connaître c'est celle là :

**$CDA = \ln 2 / \mu$**  (perso je vous conseille de retenir surtout la logique avec le nombre de CDA. Si dans un qcm on vous dit qu'il y a 2 CDA, sachez qu'il y aura  $\frac{1}{2} * \frac{1}{2}$  photons transmis =  $0,25 = 1/4$ )

$x$	$N(x)/N(0)$	%
$1 \times CDA$	$1/2$	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



Ce tableau représente bien ce qu'on a expliqué en haut.

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**.

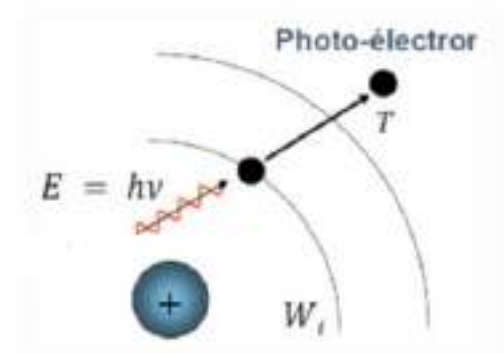
Dans les calculs, si on trouve 12 CDA, on considère qu'aucun photon ne passe.

### Les mécanismes d'interactions des photons :

(spoiler : cette partie tombe beaucoup)

#### 1) L'effet photoélectrique

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

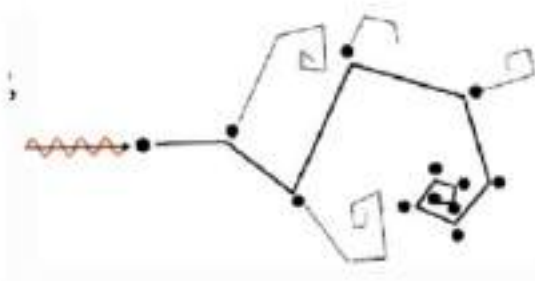


Les conséquences :

- Pour l'**atome** : Une **case vacante** va être créée et il y aura un **excès d'énergie**. (l'ionisation de tout 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 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)

et produira des **ionisations** jusqu'à épuiser toute son énergie.

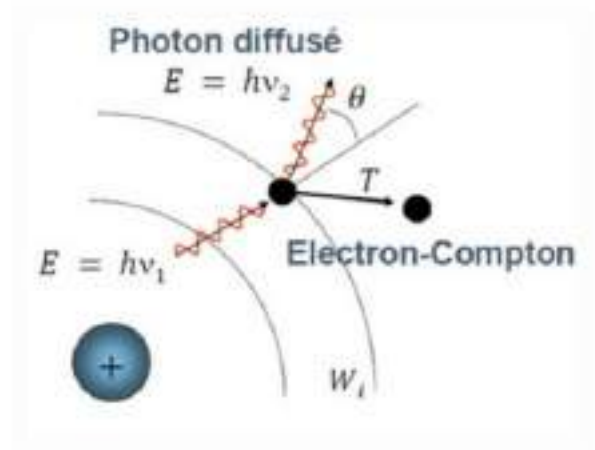
- Pour le **rayonnement/photon** : Il va **disparaître** puisqu'il a transféré la **totalité** de son énergie au **photo-électron**.



Ça c'est le trajet de l'électron ionisé qui va avoir des interactions.

## 2) l'effet Compton

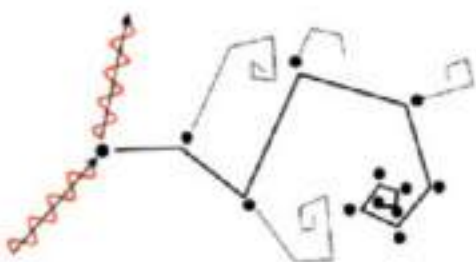
Cela correspond à un transfert **PARTIEL** de l'énergie du photon incident à un électron de la matière (électron faiblement lié). L'énergie incidente se répartit alors entre l'énergie cinétique de l'électron-Compton émis, l'énergie consommée pour l'arracher (énergie de liaison), et l'énergie du photon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



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

Les conséquences :

- Pour **l'atome** : réarrangement par photons de fluorescence et électrons d'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  $E_d (hv_2)$

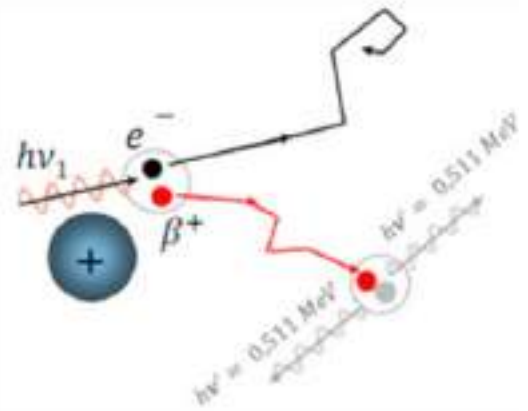


Pareil, là c'est le trajet de l'électron

### 3) 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 est chargée positivement) étant des équivalents d'électrons, il faut que cette énergie soit équivalente à la **masse de deux fois celle d'un électron** ( $=9,1.10^{-31}kg$  soit **0,511 MeV/c<sup>2</sup>** avec l'équivalence masse-énergie.

(retenez surtout que  $\rightarrow$ ) **Si  $h\nu \geq 1022keV$ , l'énergie peut se transformer en ces deux particules.**  
Ou 1,022MeV



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

#### 1) 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 :

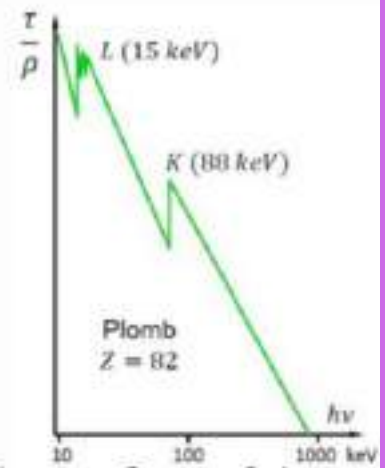
$$\tau = k\rho \frac{Z^3}{(h\nu)^3} \quad \frac{\tau}{\rho} = k \frac{Z^3}{(h\nu)^3}$$

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 maximas (pics) sur le graphique correspondent aux énergies exactes 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	Produits de contraste radiologique
Z	1	6	7	8	20	53	56	

### 1) La probabilité de l'effet Compton

La probabilité qu'a 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 :

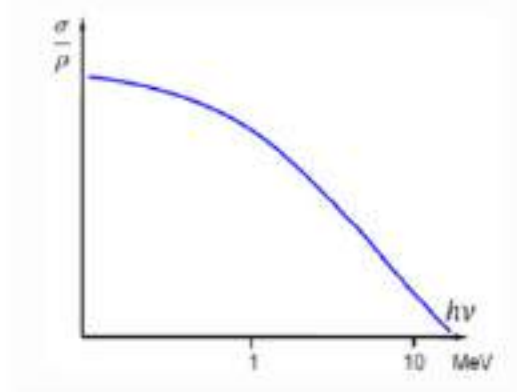
$$\sigma = k\rho \frac{1}{hv} \quad \frac{\sigma}{\rho} = k \frac{1}{hv}$$

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

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

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

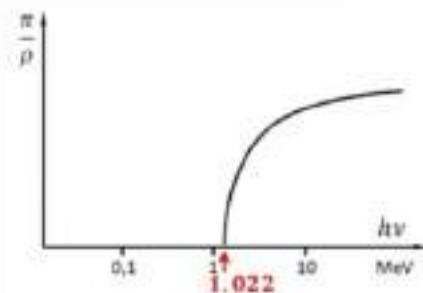


## 2) La probabilité de l'effet de création de paire

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**. La probabilité est ensuite croissante en fonction de l'énergie des photons incidents.

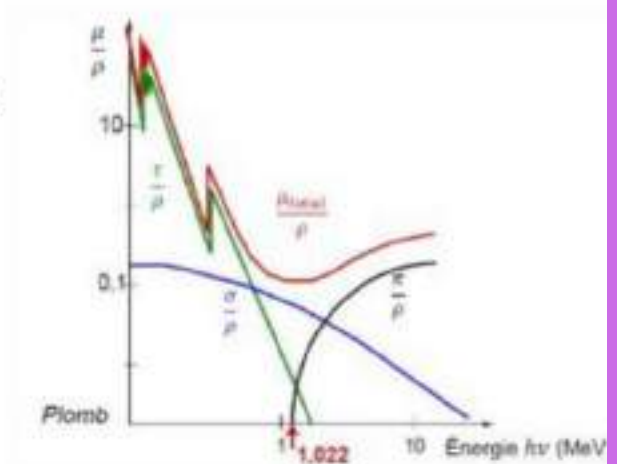
$$N(x) = N(0)e^{-\pi x}$$



### Les importances relatives :

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

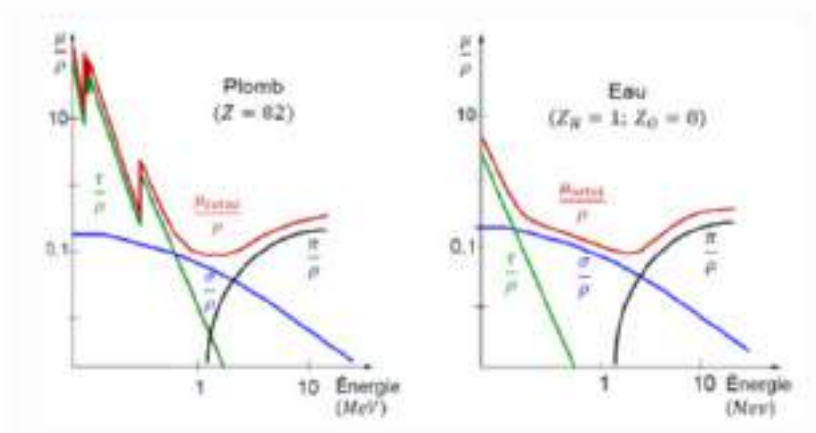
Pour les photons à **énergie faible**, l'**effet photo électrique** (vert) est le plus probable, mais l'**effet Compton** (bleu) est également possible. Et plus l'**énergie augmente**, plus les probabilités d'effet **photo-électrique** et **Compton diminuent** (moins rapidement pour l'effet Compton).



Encore une fois, la création de paire (noir) 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.



## VII) INTERACTIONS DES PARTICULES AVEC LA MATIÈRE :

### 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.

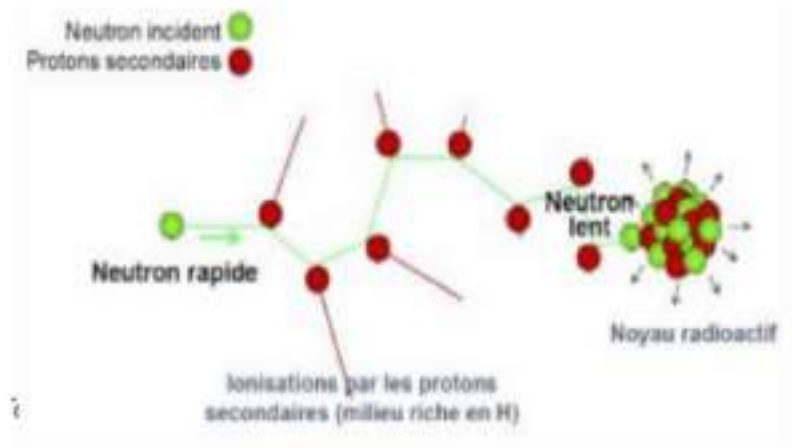
La **probabilité d'interaction est donc faible** du fait du faible diamètre du noyau par rapport à l'atome. Les neutrons sont donc dits « **très pénétrants** » (ils interagissent très peu).

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 d'hydrogène (composé d'un unique proton) percuté est alors expulsé avec une **E cinétique**. On parle de **proton secondaire**, qui peut alors provoquer des **ionisations**. (Les neutrons sont donc **indirectement** ionisants car le neutron n'est pas chargé mais va percuter le proton qui va lui être ionisant).

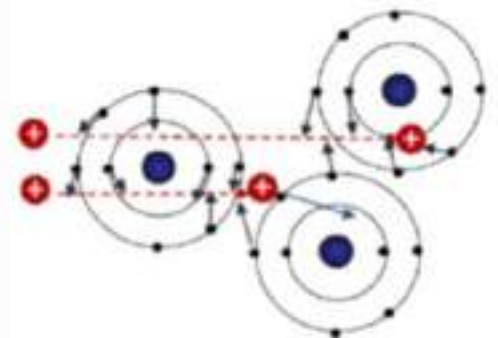
- Dans les milieux composés de noyaux lourds, les **neutrons** « **rebondissent** » sans perdre beaucoup d'énergie (diffusion).
- Les **neutrons lents** (d'énergie cinétique faible ou neutrons « thermiques ») :
  - Ils sont **absorbés** par les noyaux (cela correspond à la *capture* nucléaire à l'origine de transformations radioactives) (*on verra ça en détail dans un autre cours*)

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).

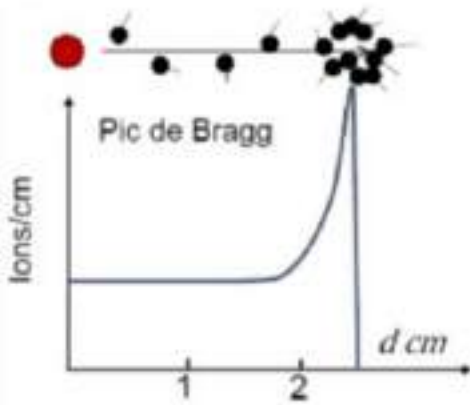


### Les interactions des particules chargées :

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 : (il y a aussi un pic de Bragg 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.

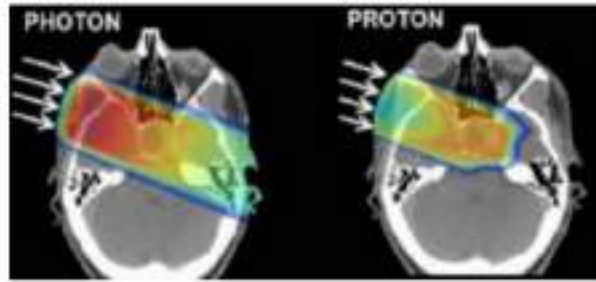
Le trajet rectiligne de ces particules permet une certaine précision pour ne pas endommager les tissus environnants, et la propriété du **pic de Bragg**, permet de déterminer l'énergie nécessaire pour avoir un maximum d'ionisations à la distance de la tumeur, en préservant les tissus sous-jacents notamment.

On voit ici l'exemple de la protonthérapie dans le cadre du traitement des mélanomes de la choroïde. Avec des protons 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 des 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 ciblés, avec un faible dépôt en avant de la tumeur et aucun dépôt en arrière, ce qui permet de mieux préserver les tissus sains.

(bon beaucoup de blabla juste pour dire qu'avec des photons on risque d'abîmer la zone autour de la tumeur, alors qu'avec des protons c'est beaucoup plus restreint sur la tumeur)



### 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.

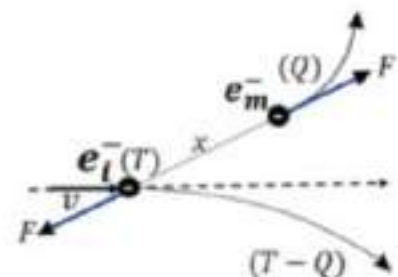
#### Les interactions électron-électron : interaction dite « par collision » :

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 la matière et  $|W_i|$  l'énergie de liaison d'un électron d'une manière cible :

- Si  $T < |W_i|$  ou  $\approx \Delta |W_i|$ , il ne va pas y avoir de déplacement des électrons mais simplement des phénomènes de vibration et des dépôts de chaleur.
- Si  $T = |W_i|$ , 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. (ce sera le sujet d'un cours)



### Introduction

Dans ce cas, l'énergie des photons qui sont produits est dite **quantifiée** parce qu'elle est liée aux valeurs précises des énergies de liaison des électrons de la matière traversée (spectre de raies).



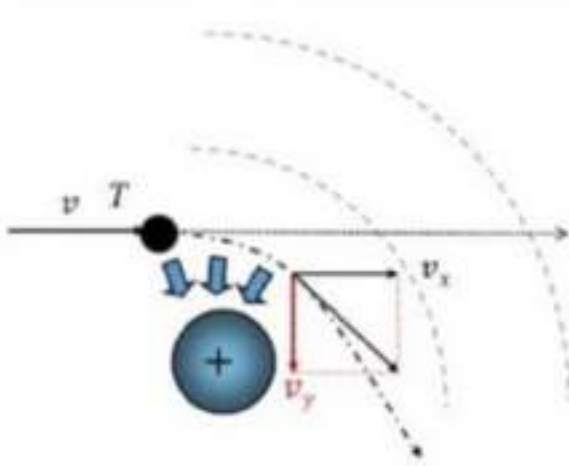
Les conséquences pour l'électron incident sont qu'il va interagir avec les électrons de la cible à distance puisque ce sont des interactions coulombiennes. Lors de la première interaction, l'énergie initiale ( $T$ ) se répartit entre l'électron incident ( $T-Q$ ) et l'électron mis en mouvement ( $Q$ ). 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 est **suffisante** pour le faire.

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

*Dernière partie c'est promis*

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 incidente (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 de ce noyau.

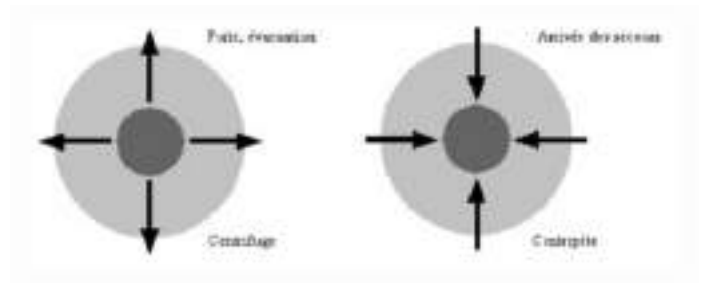
L'électron étant chargé négativement et le noyau chargé positivement, il va y avoir une **attraction coulombienne** de l'électron par le noyau. Du fait de cette attraction coulombienne, l'électron va être *dévié* et subir une accélération centripète ( $v_y$ ). Cette accélération va générer une énergie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



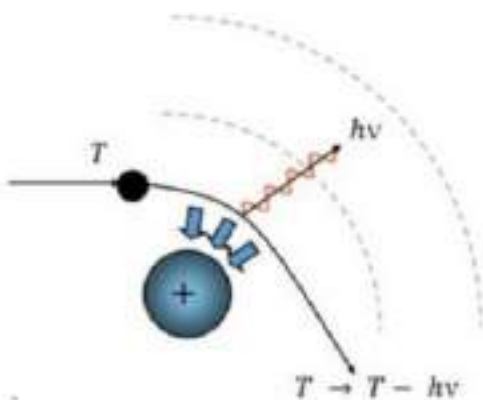
Petit rappel au cas où :

Centrifuge = vers l'extérieur

Centripète = vers l'intérieur

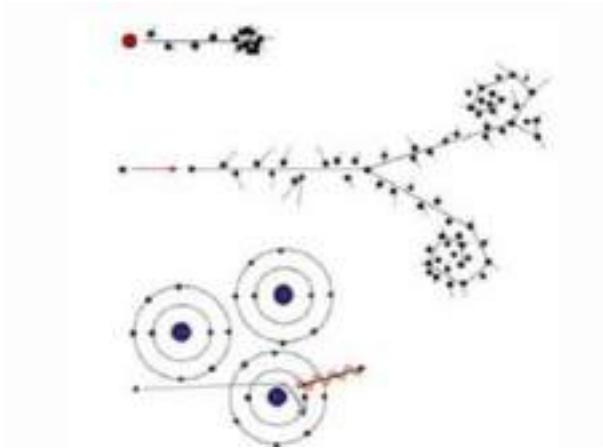


L'importance de cette énergie emportée par le rayonnement est **d'autant plus forte que l'électron va passer à proximité du noyau**. La valeur de l'énergie des photons générés  $h\nu$  n'est pas quantifiée, elle peut prendre toutes les valeurs entre 0 et  $T$  (spectre continu). Les conséquences pour la matière sont que cette attraction par le noyau de l'électron (*je pense que c'est plutôt noyau de l'atome mais je vérifierai*) va générer un rayonnement électromagnétique qui appartient aussi aux photons X. Les conséquences pour l'électron incident sont 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 »).

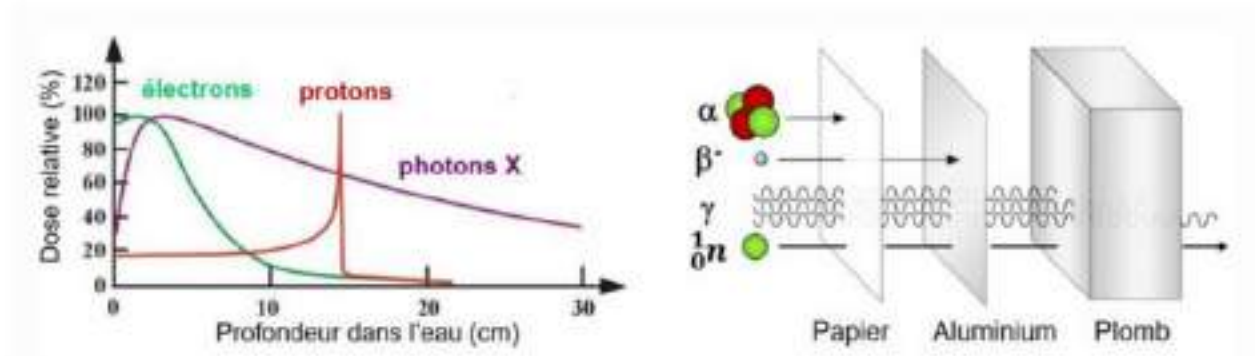


### VIII) CONCLUSION : (enfiiiiin)

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 traversée.



### Dédis :

*Dédi à mes parents et grands parents*

*Dédi à Chine (ma meilleure amie, pas le pays)*

*Dédi à Antonina ma meilleure rencontre de p1 et sans qui les TD de SV auraient été beaucoup plus longs*

*Dédi à REM (le groupe, pas les rayonnements)*

*Dédi à cette première fiche même si je me suis battue contre word*

Pas dédi à word du coup

*Dédi à vous qui commencez une année compliquée mais tellement intéressante et qui vaut le coup donc accrochez-vous et branchez-vous biophy c'est rentable à l'examen*

*Dédi à mon chat*