

# Interaction RI / Matière

Salut les petits potes, moi c'est AnIRISdie, c'est moi qui vais m'occuper de la plus grosse partie de la biophy de rayonnements. Donc ne vous inquiétez pas, même si je ne fais qu'un cours à la Tut'Rentrée, on va beaucoup se revoir par la suite :) Je sais que le fond est vert et que pour imprimer c'est chiant, mais au pire l'imprimez pas, y a la fiche complète qui va sortir dans pas longtemps et elle, elle aura un fond blanc :)

Ce cours est très intéressant et y a pas mal de qcm dessus donc on va travailler tous ensemble pour tout comprendre :) Et si quelque chose vous échappe, n'hésitez pas à mettre un post sur le forum, je vous y répondrez avec grand plaisir. Bisous les petits potes, on se revoit à la fin :)

PS: je sais que cette fiche est assez longue mais perso quand c'était trop synthétique je comprenais plus rien...

## 1) INTRODUCTION AUX RI

### Quelques explications:

Déjà pour commencer: **RI = rayonnement ionisant**, et maintenant, vous vous demandez peut-être « mais Iris, qu'est-ce que c'est qu'un rayonnement ionisant? »

C'est un **rayonnement électronique (REM) ou particulaire**, qui est capable d'interagir directement ou indirectement (en créant des ionisations) avec les atomes de la matière qu'il traverse.

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, c'est donc pour ça qu'il est super important pour nous (et pour vous) de tout bien comprendre)

Donc on va d'abord essayer de comprendre ensemble **le phénomène physique de départ**, puis les effets chimiques provoqués, et enfin les potentiels effets de ces effets chimiques sur l'ADN.

On distingue **différents effets sur l'ADN**:

- 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 topographie par émission de positions (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**. On va pouvoir également se protéger de ces effets biologiques, c'est ce qu'on appelle **la radioprotection**.

(Cette partie sera bien mieux détaillée dans la version finale avec les cas cliniques et dans les différents cours qui arriveront bien plus tard mais pour la tout rentrée on vous laisse tranquilles. On est gentils, hein??)

**Le tutorat est un service gratuit. Toute vente ou reproduction est interdite.**

### 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) MECANISMES GENERAUX DES INTERACTIONS DES RI AVEC LA MATIERE

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 va pas étudier ce transfert là dans les cours)
- Par excitation
- Par ionisation

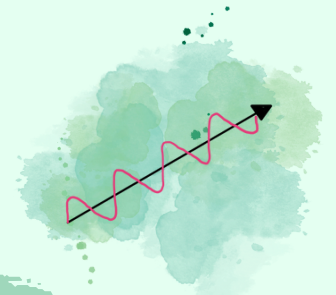
Les rayonnements (électromagnétiques ou particulaires/corpusculaires) qui traversent un milieu entrent en collision avec les éléments du milieu, essentiellement avec les électrons des atomes

Pour essayer de comprendre, on va prendre l'exemple de rayonnements électromagnétiques 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  $h\nu$ .

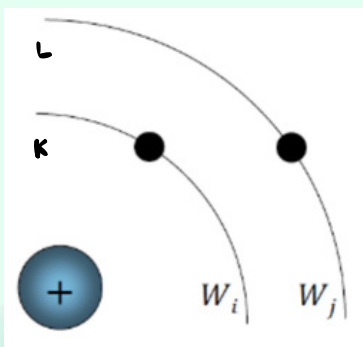
Il est figuré par ce petit symbole:



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

$h$  = constante de Planck

$\nu$  = fréquence de vibration de ce rayonnement électromagnétique



On décrit l'atome selon le modèle de Bohr (que vous verrez plus tard dans le cours « le noyau » avec GuéRein), 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... sur les exemple d'une prof)

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)

Ça c'est vraiment à savoir par cœur les petits potes +++++

-> Energie de l'électron =  $W_i$

-> Energie de liaison de l'électron =  $|W_i|$

Energie qu'il faut fournir à l'électron pour l'arracher++++++

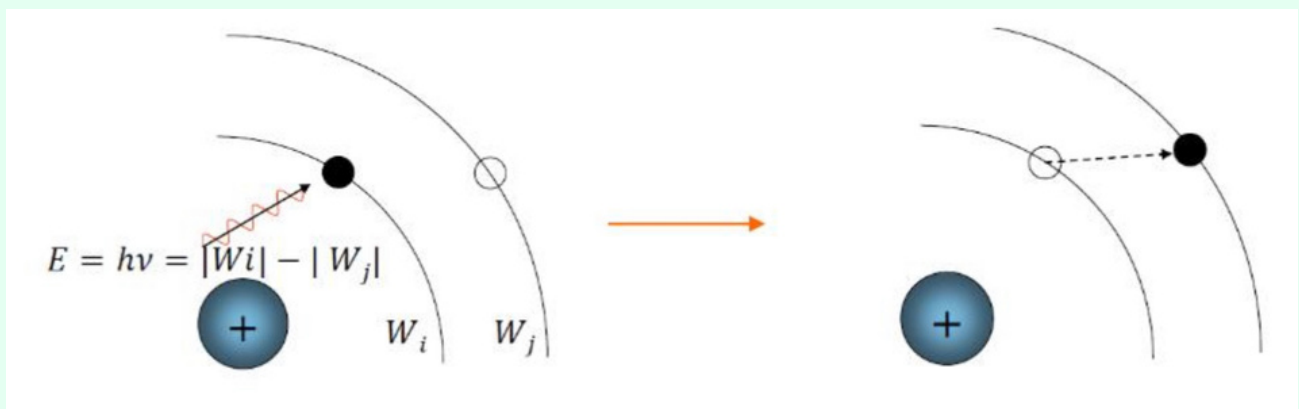
### 3) INTERACTIONS ELEMENTAIRES :

#### 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 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).
- 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 réarrangement pour retourner à l'état fondamental (stable). Mais on verra ça un peu plus tard dans le cours.



### Interaction par ionisation :

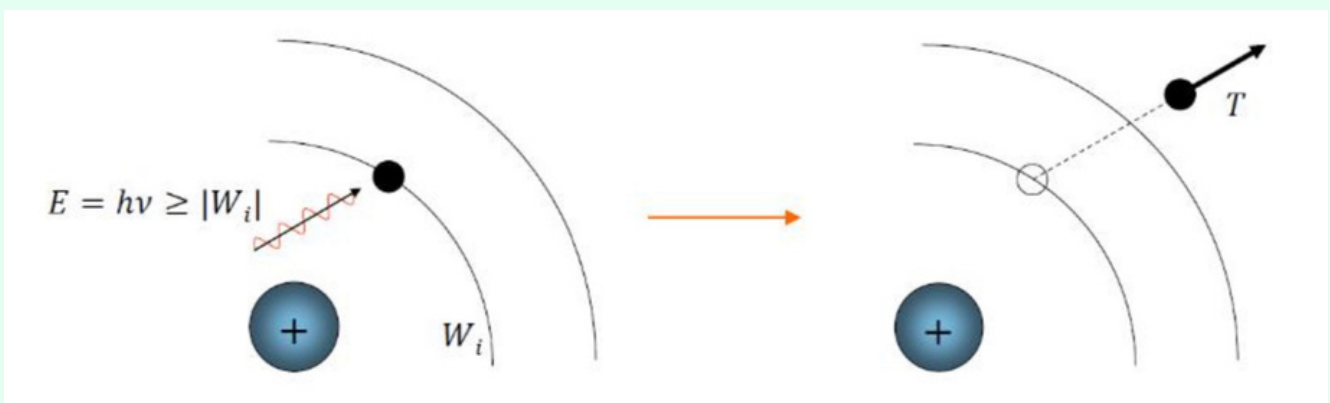
L'interaction par ionisation ressemble un peu à l'excitation qu'on vient tout juste de voir. Donc si vous avez déjà compris l'excitation alors l'ionisation sera un jeu d'enfant pour vous.

- 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**.
- 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
- 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 moins l'énergie qui a été consommé pour arracher l'électron:

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

Energie du photon incident      Energie de liaison de l'électron      Energie cinétique T emportée par 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 donc sur ce petit schéma, 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)

**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). C'est plus loin encore pas tout de suite. 4

**Le tutorat est un service gratuit. Toute vente ou reproduction est interdite.**



#### 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:  $h\nu \geq |W|$

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

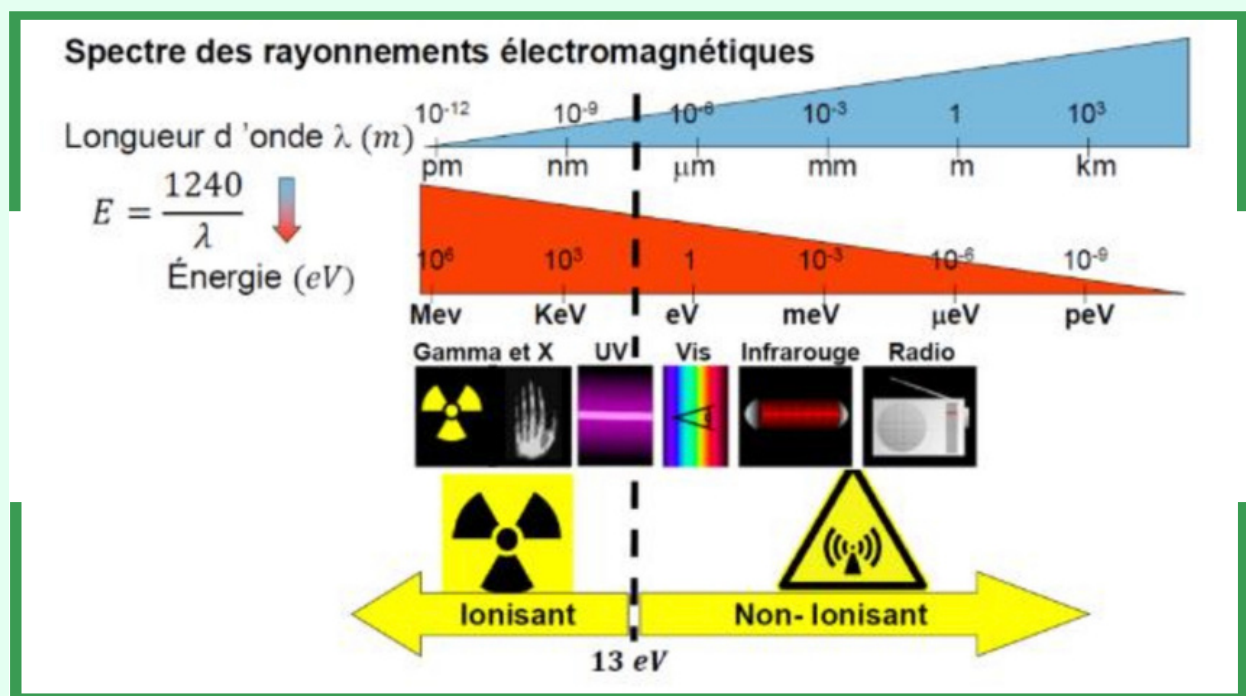
$$W_{H_2O} \approx 13,6 \text{ eV}$$

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**



*Petit rappel qui fait pas de mal:*

*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...)
- des effets biologiques (directs ou indirects sur l'ADN)

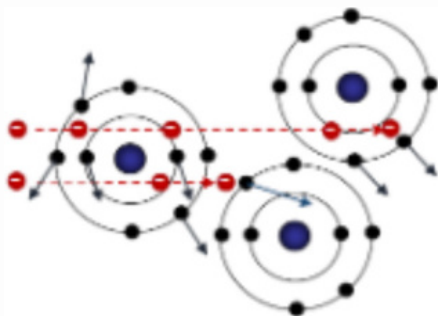
Là on a un tableau qui est vraiment super super super important. Donc on l'apprend bien par cœur sinon je vais pas être contente ++++++

#### LES PARTICULES CHARGÉES:

$$\alpha^{2+} ; \beta^{-} ; \beta^{+} ; e^{-} ; p^{+}$$

Sont directement ionisantes.

- Interactions obligatoires avec la matière: car celle-ci est elle-même chargée.
- Interactions coulombiennes (électrostatiques) qui se font même à distance de la trajectoire.
- Quelle que soit leur trajectoire dans la matière, leur charge va les faire interagir avec les électrons.
- Si elles sont chargées positivement, elles vont attirer les électrons, et si elles sont chargées négativement elles vont repousser les électrons.

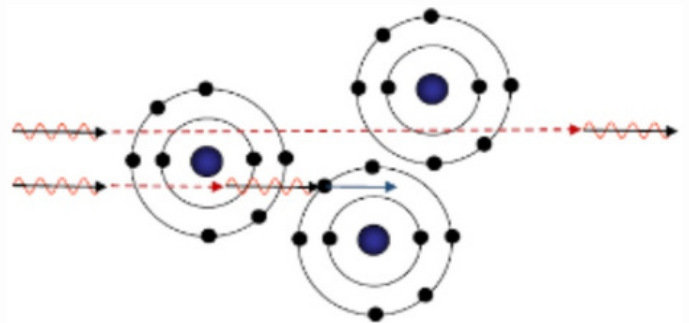


#### LES REM ET LES PARTICULES NEUTRES:

$$\gamma ; X ; {}^1_0n$$

Sont indirectement ionisants.

- Interactions non obligatoires avec la matière.
- Interactions balistiques (statistiques)
- Cela signifie qu'elles vont interagir avec les électrons à condition que leurs trajectoires se rencontrent.
- Elles sont dites «indirectement ionisants» par les électrons mis en mouvement (avec les photons  $\gamma$  et X) ou par les protons secondaires  ${}^1_0n$ .
- C'est important parce que cela détermine les parcours dans la matière.



REM = rayonnement électromagnétique

Ce tableau est super important et ce qui suit l'est encore plus:

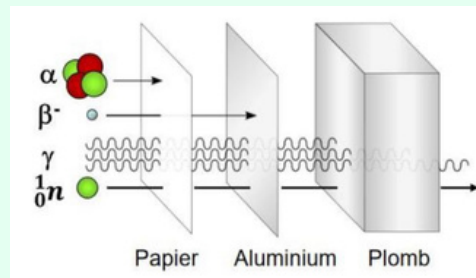
Les rayonnements particuliers ont une forte probabilité d'interagir avec la matière, ils sont rapidement arrêtés :

- 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 également 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 (ça pareil 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 médical (dans le but de traverser les tissus).



### Petit recap des familles:

- Les rayonnements particuliers sont directement ionisants et déposent rapidement leur énergie dans les tissus -> effets biologiques important.
- Les rayonnements électromagnétiques sont indirectement ionisants et déposent peu leur énergie dans les tissus -> peu d'effets biologiques.

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

### 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 car une atome ionisé ou excité, n'est plus dans son état fondamental).

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**.

Cette partie est super longue mais pas vraiment à apprendre. Lisez la une fois mais vous attardez pas trop dessus, il faut juste que vous compreniez les exemples que je vous mettrai sur le forum.

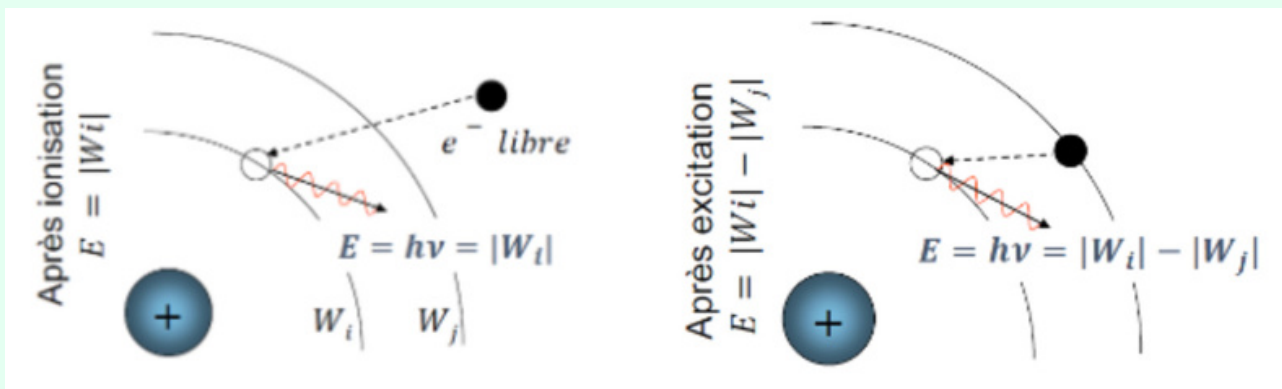


## Mais Iris, qu'est-ce que c'est qu'un photon de fluorescence?

Ça va, ça va, on y arrive. Ne vous inquiétez paaas.

- 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 égal 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 d'un simple réarrangement de leurs positions.



### Ionisation avec retour à l'état fondamental de manière direct :

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  $E$  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)

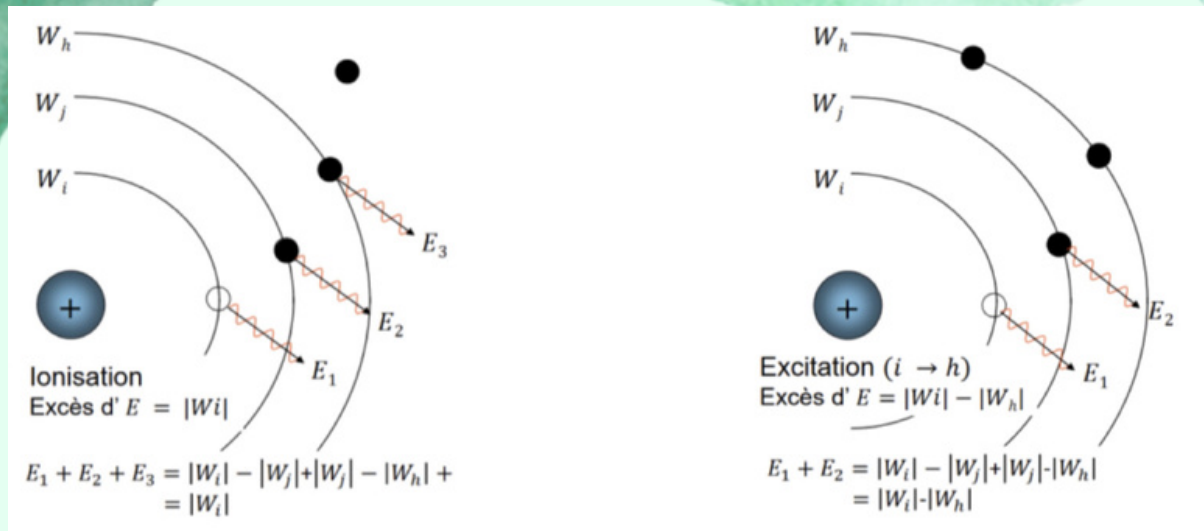
### Excitation avec retour à l'état fondamental de manière direct :

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) 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 (c'est ce qu'on va voir maintenant).

*La suite est un peu barbare et pas très compréhensible, je sais qu'en P1, j'avais du mal à comprendre... Alors pour vous aider, je mettrai sur le forum, non pas 1 mais bien 2 exemples détaillés de ces réarrangements super barbares! (Je suis pas super géniale, sérieux?) J'en ferai un pour l'ionisation et un pour l'excitation avec des vraies valeurs pour que ça soit moins imagé (surtout que les QCM qui tombent sont plus des qcm de calculs que de leçons. Vous inquiétez pas, vous comprendrez bien assez vite..*

*J'espère que ces explications suffiront mais si jamais c'est pas le cas, faites un post sur le forum, et j'essaierai de trouver une autre manière de vous répondre ou alors directement faire un live sur le discord pour le faire en direct avec vous.*



### Ionisation 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  $E_1$  : 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  $E_2$ . La nouvelle case vacante sur la couche h peut être comblée par un électron libre qui produira un troisième photon de fluorescence  $E_3$ .

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 à la couche h avec retour à l'état fondamental de manière indirecte :

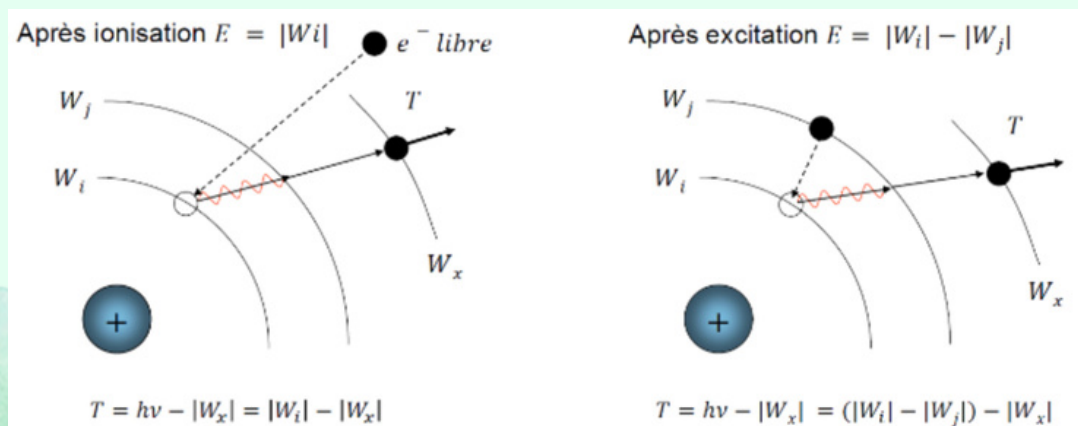
La case peut être comblée par un électron de la couche j qui produit un premier photon de fluorescence  $E_1$ . Cette vacance d'électron sur la couche j peut être comblée par un électron de la couche h qui produit un deuxième photon de fluorescence  $E_2$ . Encore une fois, la somme des énergies de tous 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 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  $T = \text{excès d'énergie de l'atome} - |W_x|$

Là aussi c'est hyper barbare mais ce sont pas des phrases à apprendre par cœur, vous comprendrez mieux avec les exemples que je vous mettrai sur le forum.



**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

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

**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, va transférer son énergie à un électron plus périphérique qui sera arraché. Cet électron Auger sera arraché avec une énergie cinétique  $T = h\nu - |W_x| = (|W_i| - |W_j|) - |W_x|$ .

**Petit recap:**

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

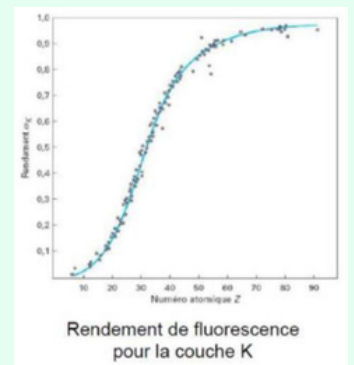
La compétition entre ces 2 phénomènes est caractérisée par le rendement de fluorescence  $\omega_i$  qui dépend du  $Z$  de l'atome.

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

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.

Pas très important ce passage là

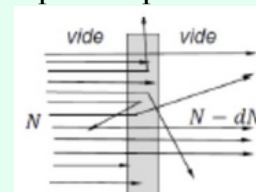
L'émission Auger est donc plus probable pour les atomes légers, avec un  $Z$  faible.

**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):

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

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

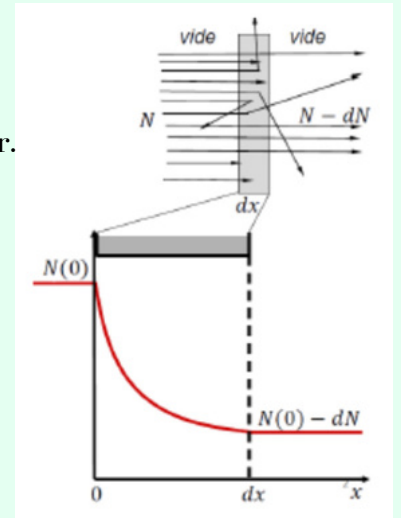
Le nombre de photons transmis est donc proportionnel à l'épaisseur de, au nombre  $N$  de photons et à  $\mu$ , la probabilité d'interaction par unité de longueur. Plus cette probabilité est élevée et plus un grand nombre de photons va être atténué, donc moins il y aura de photons transmis.

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 traversé.

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



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

$\mu$  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 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 :

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

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 recap:

$\mu$  (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 coeff 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 :

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

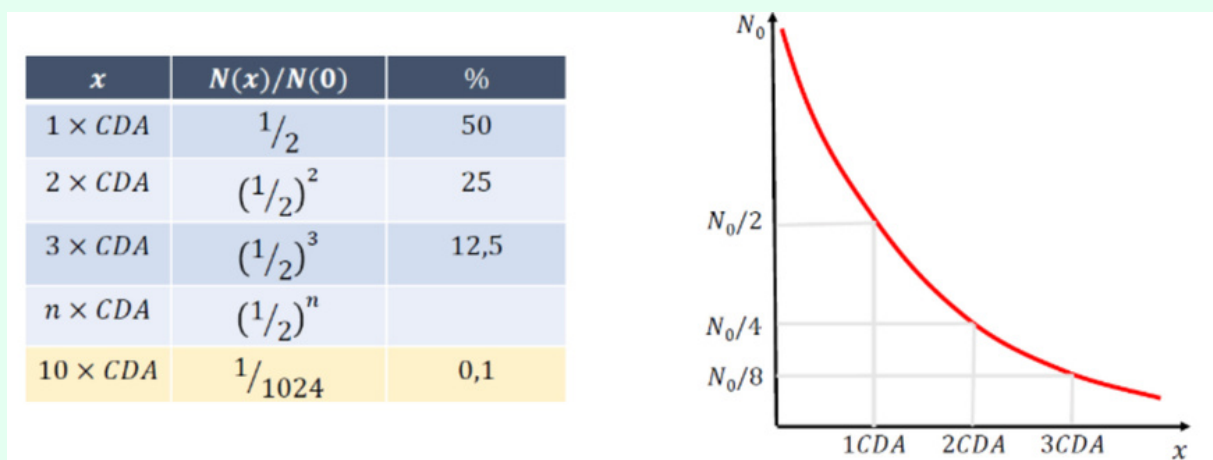
Ce qu'il faut vrm comprendre c'est que  $k$  correspond au nombre de CDA. Si  $k=3$  il y a 3 CDA donc le nombre de photon est divisé par  $2 \times 2 \times 2 = 8$

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 :  $CDA = \ln 2 / \mu$

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



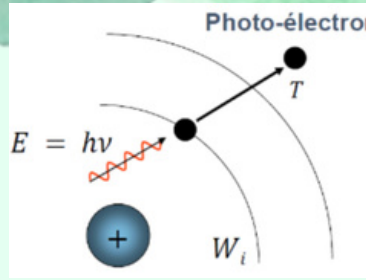
Petite phrase pour tout bien comprendre: D'après le tableau, après 3 CDA, on a 12,5 % des photons qui passent.

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

### Les mécanismes d'interactions des photons : Cette partie est vraiment super importante

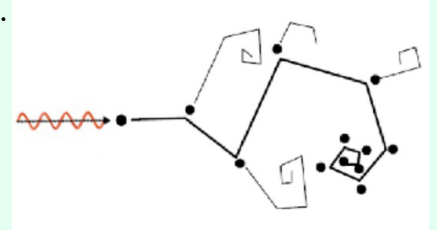
#### L'effet photo-electrique:

Cela correspond à un transfert de la TOTALITE de l'énergie du photon incident à un électron des atomes de 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 photon-électro, émis avec une énergie cinétique  $T = h\nu - |W|$ .

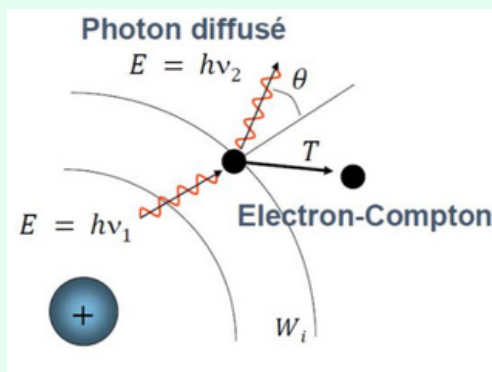


Les conséquences:

- 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 aux photons électron.



### L'effet Compton



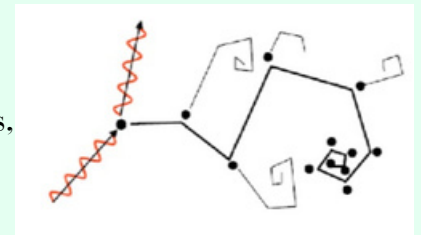
Cela correspond à un transfert PARTIEL de l'énergie du photon incident à un électron des atomes de la matière (électron faiblement lié).

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 :

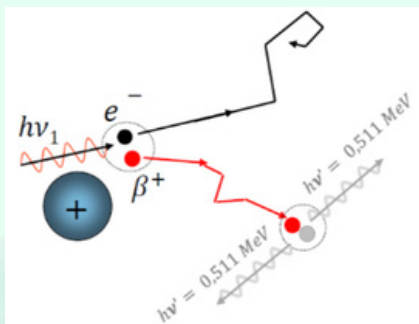
$$hv_1 = T + hv_2 + |W_i|$$

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  $Ea$  (ou transférée)
- Pour le photon : une partie du rayonnement est diffusée, avec l'énergie diffusée  $Ed$  ( $h\nu_2$ )



### La création de paire



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

Evidemment, 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.

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



## Les probabilités des différents mécanismes d'interactions

Cette partie est pas très importante

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

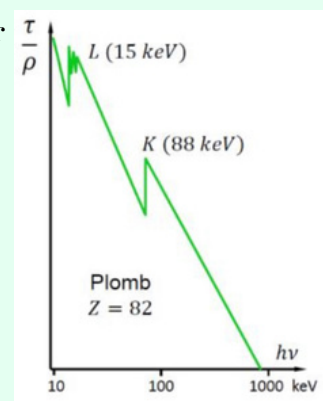
La probabilité qu'un photon d'interagir par effet photo-électrique est noté  $\tau$  et représente le coefficient linéique d'atténuation par un effet photo-électrique pur. On peut donc écrire:  $N(x) = N(0)e^{-\tau x}$   
On peut réécrire la loi d'atténuation en ne tenant compte que de  $\tau$  si on 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 photo-électriques, à savoir différents  $N(0)$  ou  $N(x)$  mais la probabilité d'interaction radiologique utilisés par (avec un Z élevé) d'où les contrastes observés sur les radiés.

	H	C	N	O	Ca	I	Ba	→ Produits de contraste radiologique
Z	1	6	7	8	20	53	56	

### 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:

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

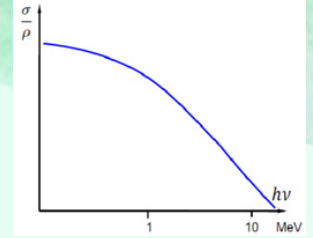
La probabilité d'interaction pour l'effet Compton est pratiquement INDEPENDANTE de la nature de la matière, comme le montre cette comparaison entre l'eau et le plomb :

- 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.

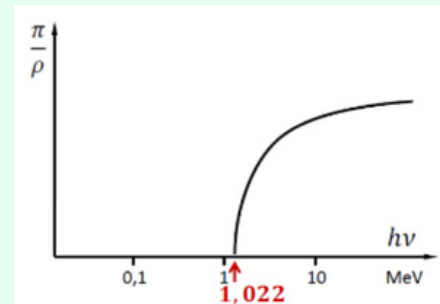
La probabilité d'interaction par effet Compton est pratiquement indépendante de la nature de la matière ( $Z$ ).



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

La probabilité qu'un photon d'interagir par effet de création de paire est notée  $\pi/\rho$  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 électro. 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.

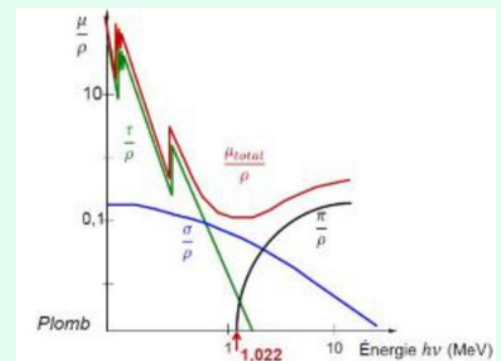
$$N(x) = N(0)e^{-\pi x}$$



### Les importances relatives

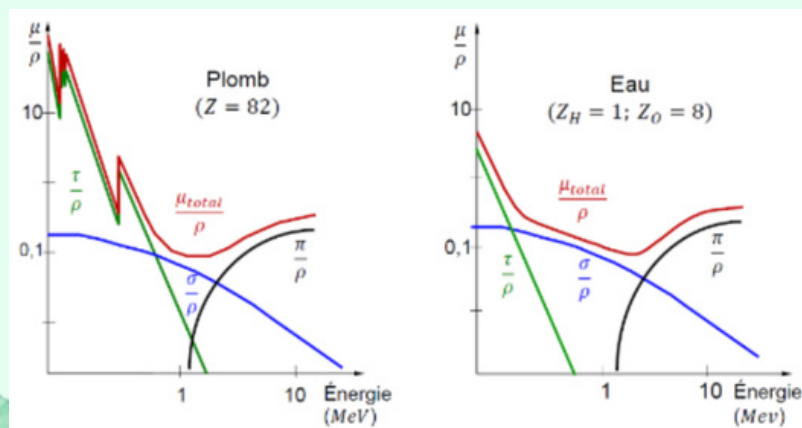
#### En fonction de l'énergie du photon :

Pour les photons à énergie faible, l'effet photo électrique (vert) est le plus probable, mais l'effet Compton (bleu) 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 proba 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.

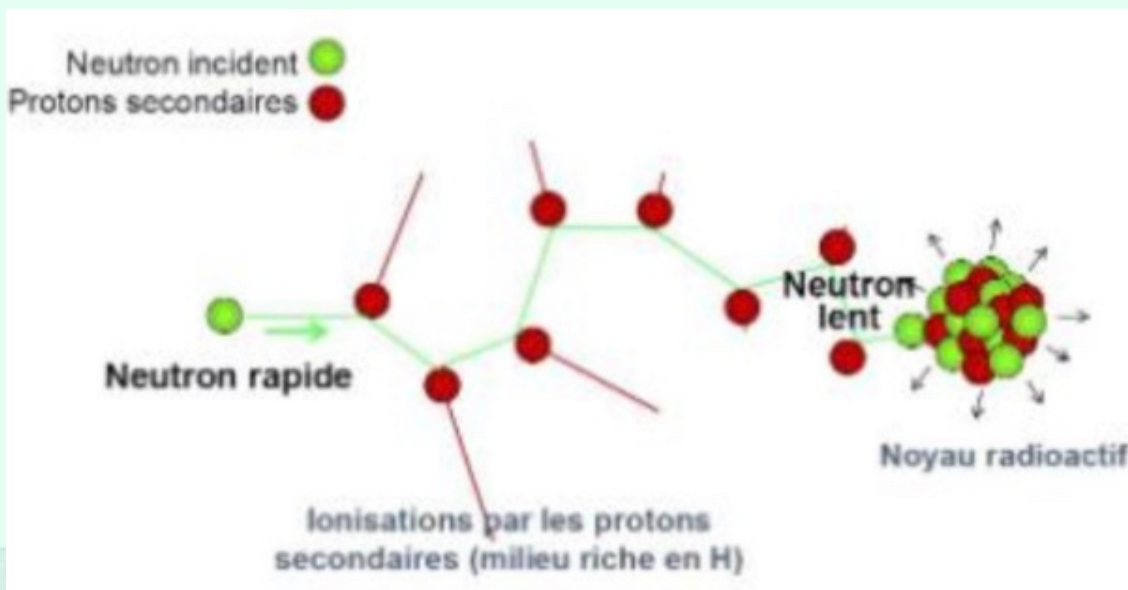
Les neutrons sont donc dit « très pénétrants » (=interagissent très peu).

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  $H$  percuté est alors expulsé avec une  $E$  cinétique, on parle alors de proton secondaire, qui peut provoquer des ionisations (les neutrons sont donc indirectement ionisants).
  - Dans les milieux composés de noyaux lourds, les neutrons « rebondissent » sans perdre beaucoup d'énergie (diffusion).

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).

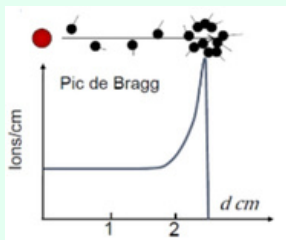
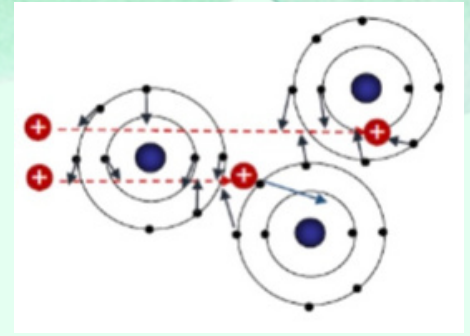
- Les neutrons lents (d'énergie cinétique faible ou neutrons «thermiques») :
  - Ils sont absorbés par les noyaux (cela correspond à la capture nucléaire à l'origine de transformations radioactives («capture radiative»)).





## Les interactions des particules chargées

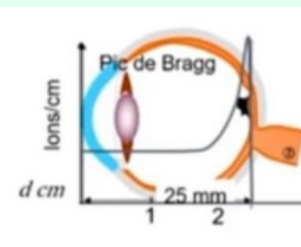
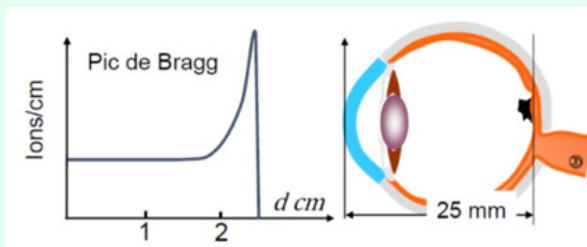
On parle ici des protons et des particules  $\alpha$  qui vont avoir des interactions coulombiennes avec les électrons de la matière. Elles vont avoir une influence extrêmement importante sur les électrons puisque même si leur trajectoire passe à distance, elles vont interagir par le biais coulombien (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, avec 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.



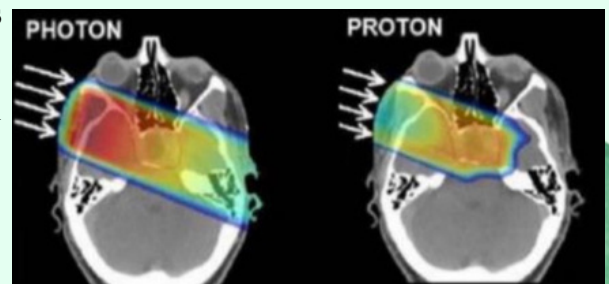
On voit ainsi sur ce schéma le nombre d'ionisations effectuées selon la distance, et on voit qu'il existe un Pic de Bragg, qui correspond à une augmentation brutale de la concentration des ionisations au moment où la vitesse diminue, avec une chute brutale des ionisations à partir d'une certaine distance,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

### Exemple de la protonthérapie++ :

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 préserver 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 electron-electron: interaction dite « par collision »:

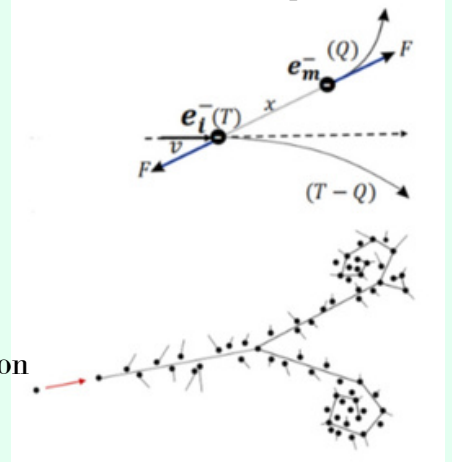
Un électron est chargé négativement et va interagir avec un autre électron évidemment chargé négativement lui aussi. Ce ne sont pas des interactions (chocs) physiques mais des interactions coulombiennes par deux charges qui vont se repousser.

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

- Si  $T < |Wi|$  ou  $\neq \Delta Wi$ , il ne va pas y avoir de déplacement des électrons mais simplement des phénomènes de vibration et des dépôts de chaleur.
- Si  $T = \Delta Wi$ , il y a excitation.
- Si  $T \geq |Wi|$ , 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 le prochain cours). 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 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.

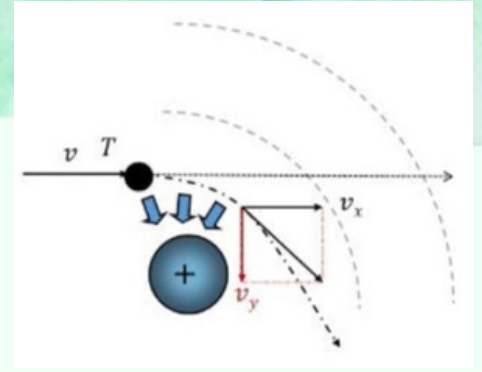


### Les interactions electron-noyau: interaction dite « par freinage »:

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 incidente (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.



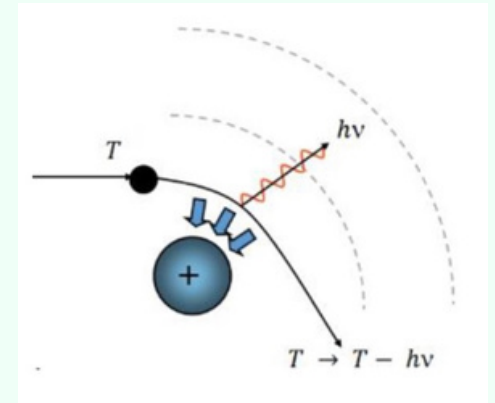
L'électron étant chargé négativement et le noyau chargé positivement, il va y avoir une attraction coulombienne de l'électron par le noyau. Du fait de cette attraction coulombienne, l'électron va être dévié et subir une accélération centripète ( $v_y$ ). Cette accélération va générer une énergie manifestée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



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.

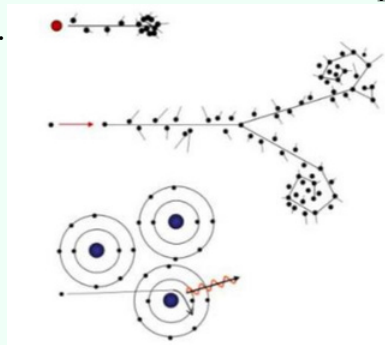
Les conséquences pour l'électron incident c'est qu'il est dévié et perd de l'énergie puisqu'une partie va être perdue par ce rayonnement produit par son passage à proximité du noyau ( $T \rightarrow T - h\nu$  d'où le nom de « rayonnement de freinage »).

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).

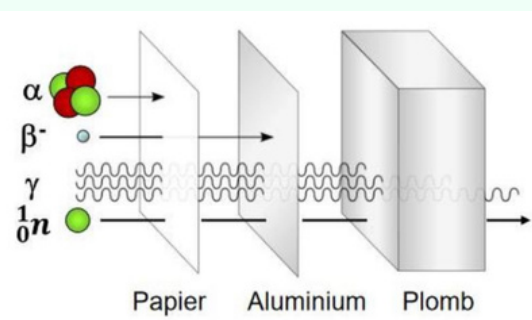
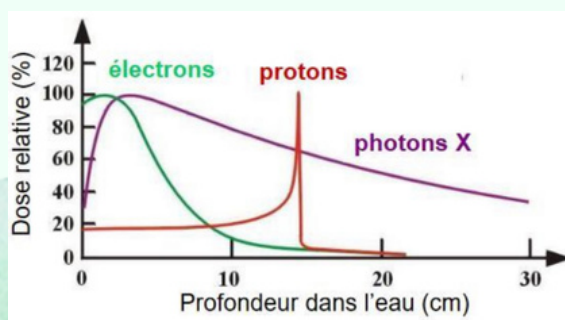


## 8) CONCLUSION

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.



Pour reprendre les interactions avec la matière de l'ensemble des rayonnements ionisants (électromagnétiques et particulaires), on peut constater que la distribution de l'énergie déposée dépend du type de rayonnement. L'importance des interactions (le pouvoir d'arrêt) dépend de l'énergie et de la matière.





Si vous imprimez, n'imprimez pas cette page!

Petites dédis qui font plaisir:

- dédi à ma maman, qui a été mon meilleur soutien tout au long de l'année. Je la remercie d'avoir été hyper indulgente avec moi et de m'avoir fait à manger. Je la remercie également de m'avoir emmené à la bu tous les matins et d'être venu me chercher tous les soirs, durant le dernier mois avant les concours (j'aurais perdu un temps fou sans elle).
- dédi à mes deux copines: Luna et Tosca, avec qui j'ai passé une grosse partie de l'année, sans elles mon deuxième semestre aurait été lamentablement long et j'aurais peut-être abandonné... je crois fort en vous les filles, j'espère que vous allez tout défoncer au concours Belge!
- dédi à Lisa et Élisabeth qui demandaient de mes nouvelles constatement et qui m'ont permis de me vider la tête.
- dédi à Erika qui dead ça dans sa licence de droit et qui ne m'en a pas voulu de répondre à ses messages 1 fois par semaine.
- dédi aux best marraines for ever (Lou et Mathilde) qui m'ont soutenue toutes l'année et qui ont cru en moi. Je vous aime fort.
- dédi à Camille! Trop fière d'être avec toi en P2 ❤️
- dédi à mes Fillotes (Emma, Anouck, Anna, Jihane et Mélissa) je vous veux toutes en P2
- dédi à mes fillots officiels (y en a trop donc je vous cite pas mais je vous aime ❤️)

juste une  
photo de  
mon petit  
chat parce  
que je suis  
fan d'elle

