

FICHE : Interactions des rayonnements avec la matière

I- Les rayonnements ionisants (RI)

1) Définition :

Les RI sont des rayonnements (électromagnétiques ou particulaires) **capables de produire des ions** de façon directe ou indirecte. Ils sont capables d'expulser hors de l'édifice atomique un électron laissant les atomes de la matière sous forme d'ion.

Ces ions sont à la base de la détection des rayonnements et **induisent des effets biologiques**.

2) Les rayonnements directement ou indirectement ionisants

- Les rayonnements **directement ionisants** correspondent aux **particules chargées** (électron, proton, particules α , β^+ , β^-). Elles interagissent de **manière obligatoire** avec la matière par des interactions **électrostatiques/coulombiennes**.
- Les particules **neutres** (neutron) ou les rayonnements électromagnétiques (**REM**) comme les photons X, γ sont **indirectement ionisants**, ils interagissent de manière **non obligatoire** avec la matière par des interactions **balistiques/statistiques**

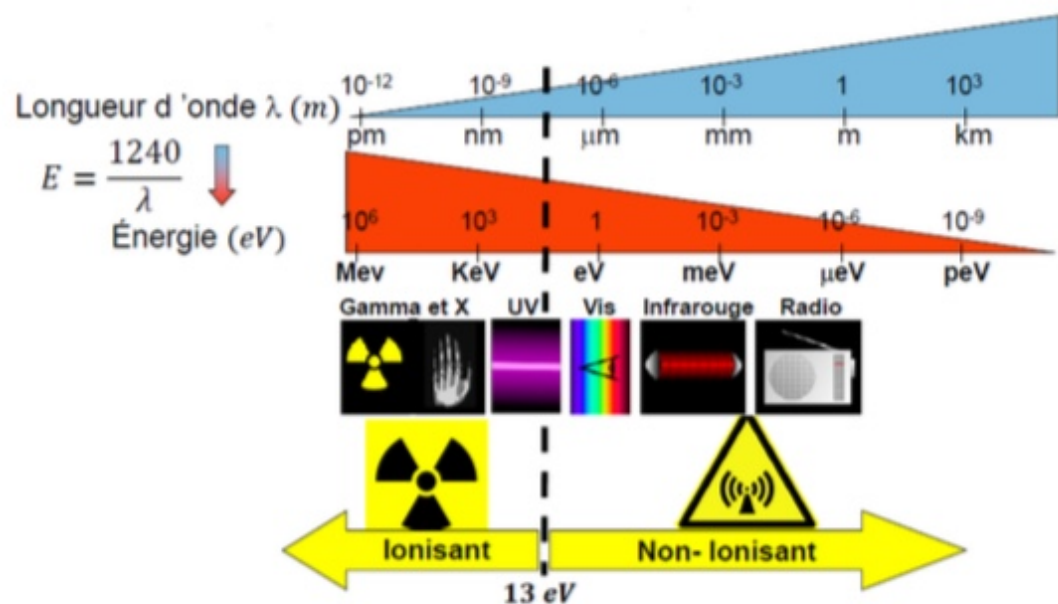
3) Caractère ionisant ou non des REM

Pour qu'un REM soit ionisant, il faut que son énergie ($E=h\nu$) soit **supérieure ou égale à l'énergie de liaison** de l'électron, pour que celui-ci puisse être expulsé.

Les milieux biologiques sont très riches en eau donc par convention, on dira qu'un REM est ionisant si son énergie est supérieure ou égale à l'énergie de liaison de la molécule d'eau :

$$\text{Seuil énergétique : } W_{H_2O} \cong 13,6 \text{ eV}$$

Spectre des REM



Si on place la limite d'environ 13eV, on peut voir :

- REM ionisants= rayons X, γ et une partie des UV
- REM non ionisants= autre partie des UV, le visible, les IR, radios

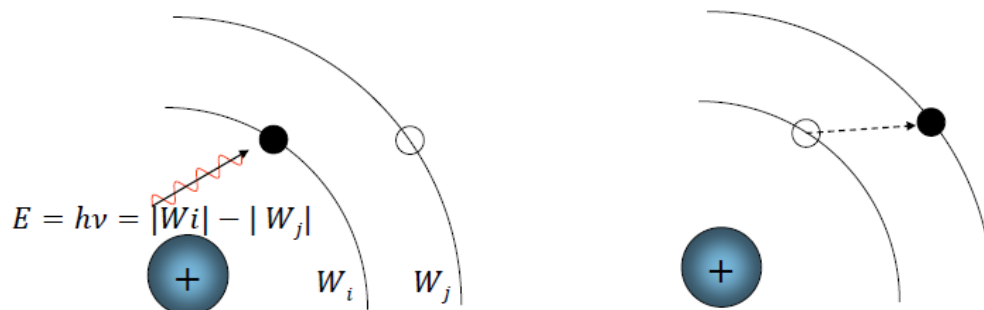
II- Interactions élémentaires

1) Interaction par excitation

Si le photon traversant la matière a une énergie ($E = h\nu$) **inférieure** à l'énergie de liaison (W_i) de l'électron mais qui correspond à **l'exacte différence d'énergie entre deux couches** ($E = W_i - W_j$) de l'atome, l'électron va changer d'orbitale. L'atome passe ainsi dans un état excité

avec un excès d'énergie (correspondant à l'exacte différence entre les énergies de liaison des deux couches).

L'énergie absorbée est **quantifiée** puisqu'elle ne prend des valeurs que bien définies qui dépendent de la structure des atomes de la matière traversée.



2) Interaction par ionisation

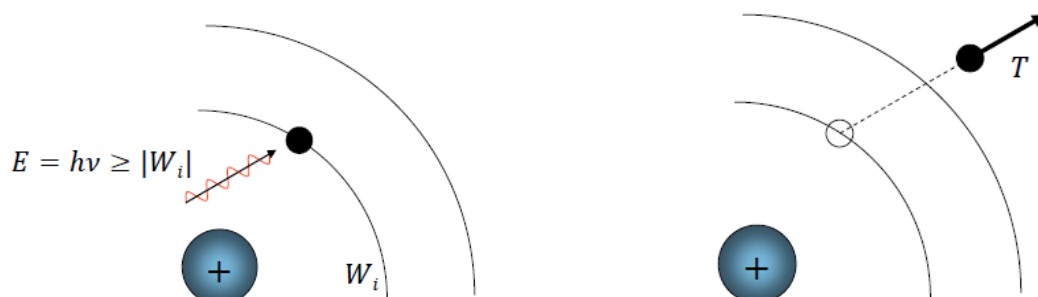
Si le photon a une énergie supérieure ou égale à l'énergie de liaison de l'électron ($E \geq W_i$), celui-ci est **expulsé hors de l'édifice atomique** : l'atome est ainsi **ionisé**. L'atome passe d'un état fondamental à un état ionisé avec un excès d'énergie. Ce dernier correspond exactement à l'énergie apportée par le photon qui est aussi l'énergie consommée pour arracher l'électron : $E = W_i$

L'électron est expulsé avec une certaine énergie cinétique :

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

Donc l'énergie totale du photon est utilisée pour arracher l'électron à son orbitale, et l'énergie qui reste est transférée à l'électron arraché sous forme d'énergie cinétique.

L'énergie absorbée n'est cette fois-ci **pas quantifiée** puisqu'il suffit que le seuil énergétique soit franchi pour permettre l'ionisation.

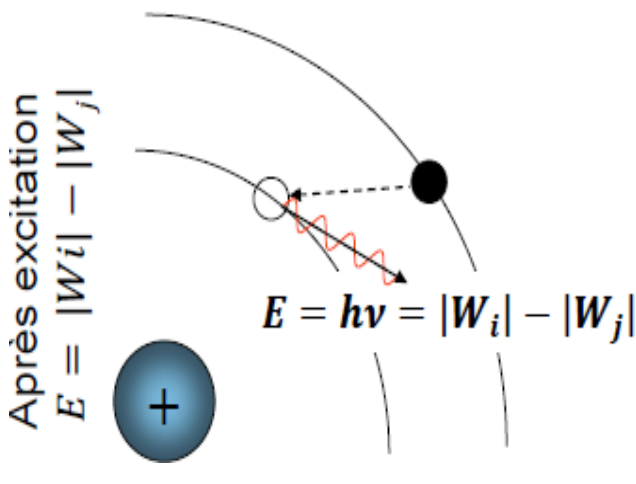
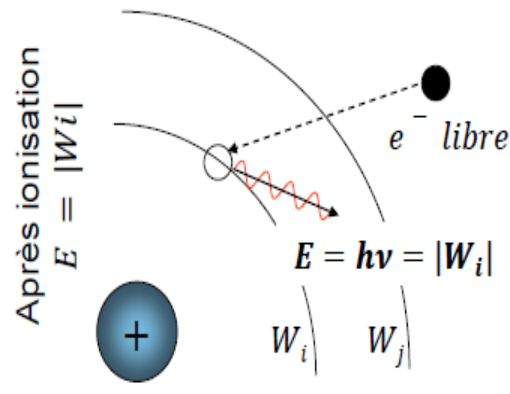


III- Conséquences pour la matière

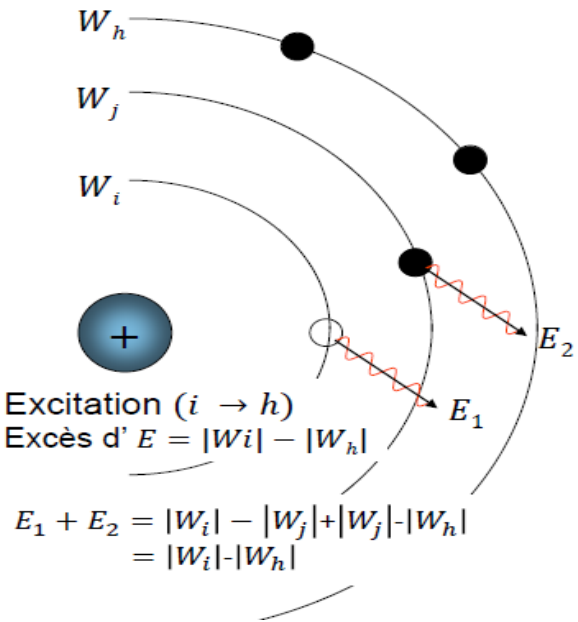
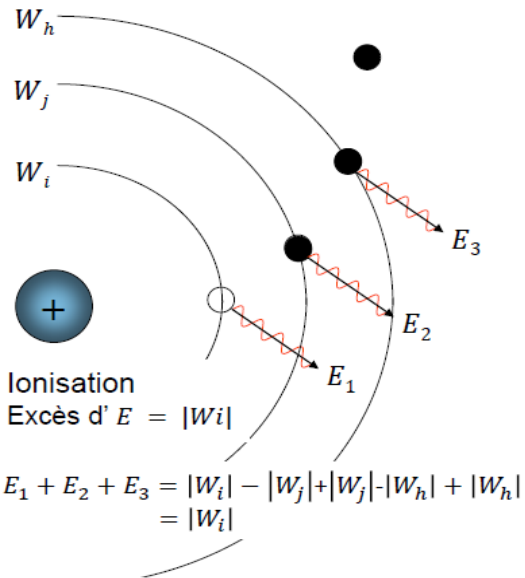
Un atome à l'état excité ou ionisé est **instable** à cause de l'excès d'énergie ; il cherche donc à retourner dans son état fondamental. Ce

retour peut se faire par l'émission d'un photon de fluorescence ou d'un électron de Auger.

1) Émission d'un photon de fluorescence

Après une excitation	Après une ionisation
<p>Rappel : Un photon a donné son énergie à un électron qui a donc changé d'orbitale, il est par exemple passé de la couche K à la couche L. Le « trou » laissé par l'électron sur la couche K que l'on nomme une vacance électronique peut être comblée par un électron provenant d'une couche plus périphériques (càd moins profonde= L,M etc...). Le retour à l'état fondamental se fait pas l'émission d'un photon de fluorescence dont l'énergie vaut exactement l'énergie permettant l'excitation :</p>	<p>La vacance électronique laissée par l'électron expulsé de l'atome peut être comblée par un électron qui vient de l'extérieur de l'atome : un électron libre. Le retour à l'état fondamental se fait par l'émission d'un photon de fluorescence d'énergie égale à celle acquise pendant l'ionisation</p>
$E = h\nu = W_i - W_j $	$E = h\nu = W_i $
	

Je viens d'expliquer le retour à l'état fondamental en 1 étape mais il peut également se faire en plusieurs étapes par une **cascade de réarrangements**. (QCM+++)

Après une excitation	Après une ionisation
 <p>Excitation ($i \rightarrow h$) Excès d' $E = W_i - W_h$</p> $E_1 + E_2 = W_i - W_j + W_j - W_h = W_i - W_h $ <ol style="list-style-type: none"> 1) Ici on a un électron qui est passé de la couche i à la couche h, donc l'atome est excité avec un excès d'énergie de $E = W_i - W_h$ 2) L'atome veut retourner à son état fondamental afin d'être plus stable. Un électron de la couche intermédiaire j vient combler la case vacante sur i \rightarrow émission d'un photon de fluorescence d'énergie $E = W_i - W_j$ 3) Un électron de la couche h vient aussi combler le vide laissé sur j \rightarrow émission d'un photon de fluorescence d'énergie 	 <p>Ionisation Excès d' $E = W_i$</p> $E_1 + E_2 + E_3 = W_i - W_j + W_j - W_h + W_h = W_i $ <ol style="list-style-type: none"> 1) Un atome est ionisé sur sa couche i c'ad qu'il y a eu un photon avec une énergie suffisante pour pouvoir arracher un électron de l'atome sur sa couche i. L'atome a un excès d'énergie de : $E = W_i$ 2) Le « trou » sur la couche i est comblé par un électron de la couche j \rightarrow émission photon de fluorescence d'énergie $E = W_i - W_j$ Puis la case vacante sur j est comblée par un électron de h de la même manière que précédemment \rightarrow émission d'un photon de fluorescence de $E' = W_j - W_h$

$E' = W_j - W_h $ <p>En faisant la somme des énergies des 2 photons de fluorescence émis en cascade on retrouve la valeur de l'excès d'énergie du départ : $E + E' = W_i - W_j + W_j - W_h = W_i - W_h$</p>	<p>3) La case vacante sur la couche h est à son tour comblée par un électron libre → émission d'un photon de fluorescence de $E'' = W_h$</p> <p>En refaisant la somme des 3 photons de fluorescence émis en cascade, on retrouve la même valeur que l'excès d'énergie qu'avait l'atome au départ. Je ne vous remets pas la forme littérale, Regardez sur la petite image du dessus c'est détaillé 😊</p>
---	--

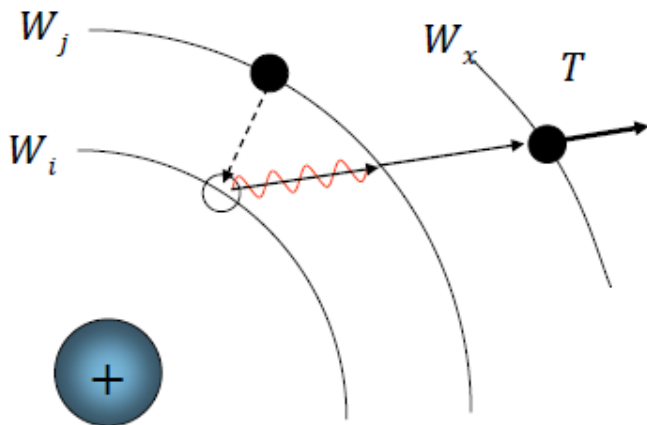
4) Émission d'un électron de Auger (QCM++++)

Quand l'atome retourne à l'état fondamental en émettant des photons de fluorescence ; un de ceux-ci peut venir arracher un électron des couches plus périphériques de l'atome.

Après une excitation	Après une ionisation
<p>Dans le cas présent, il y a une vacance électronique sur i (probablement à cause d'un rayonnement qui l'a excité). Pour retourner à son état fondamental, un électron passe de la couche j à la couche i provoquant l'émission d'un photon de fluorescence d'énergie</p> $E = h\nu = W_i - W_j $ <p>En partant, sur sa trajectoire le photon peut venir arracher un électron des couches plus périphériques, il l'expulse en lui</p>	<p>De la même manière, si l'atome est ionisé sur sa couche i, la vacance électronique peut être comblée par un électron libre de la matière ce qui s'accompagne de la restitution de l'excès d'énergie sous forme d'un photon de fluorescence d'énergie $E = h\nu = W_i$</p> <p>Si la trajectoire du photon de fluorescence passe par la position d'un électron d'une couche x plus périphérique, il va pouvoir l'expulser en</p>

transmettant son énergie sous forme d'énergie cinétique.

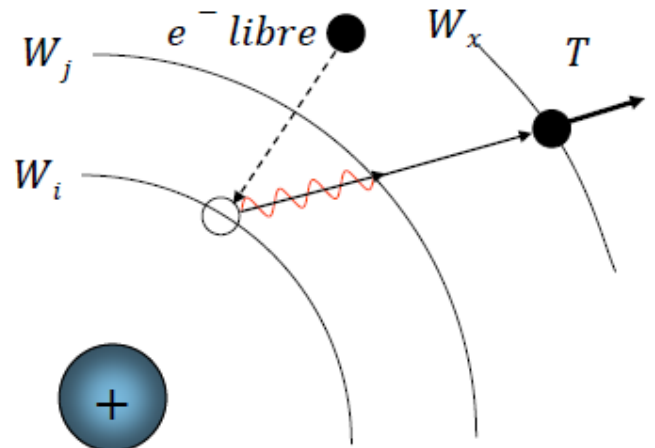
$$T = h\nu - |W_x| = |W_i| - |W_j| - |W_x|$$



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

lui transmettant son énergie sous forme d'énergie cinétique T :

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



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

Rmq : La création d'un électron de Auger va créer une nouvelle vacance électronique en ionisant l'atome. Il y aura donc de nouveaux réarrangements électroniques que l'on n'étudiera pas ☺

5) Conclusion

Il peut y avoir une **compétition** entre l'émission radiative (photon de fluorescence) et l'émission d'un électron de Auger caractérisé par le rendement de fluorescence w_i qui dépend du Z

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

Plus l'atome est riche en électrons (Z élevé) → +probabilité fluorescence

Plus l'atome est léger (Z faible) → +probabilité Auger

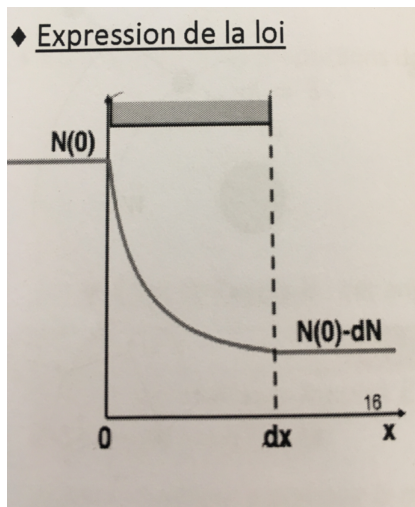
Pour retenir : Atome léger = Auger

IV- Interactions des photons avec la matière

1) Loi d'atténuation des photons

Les photons sont indirectement ionisants, ils vont avoir une interaction aléatoire avec la matière ils sont ainsi : **absorbés, diffusés ou transmis**. On s'intéresse à leur transmission à travers la matière.

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



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

μ La probabilité d'interaction par unité de longueur
 x L'épaisseur de matière traversée

Plus généralement, le nombre de photons transmis :

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

L'atténuation des photons se fait de manière **exponentielle**

- $\mu =$ **coefficient linéique d'atténuation** = probabilité d'interaction par unité de longueur ($[L^{-1}]$ ex : cm^{-1})

→ Spécifique de l'énergie du photon

→ Dépend de l'état du milieu traversé

- On préfère utiliser $\frac{\mu}{\rho} =$ **coefficient massique d'atténuation** ($[L^2 \cdot M^{-1}]$ ex : $cm^2 \cdot g^{-1}$)

→ Ne dépend pas de l'état du milieu traversé !!

Avec la loi ça donne :

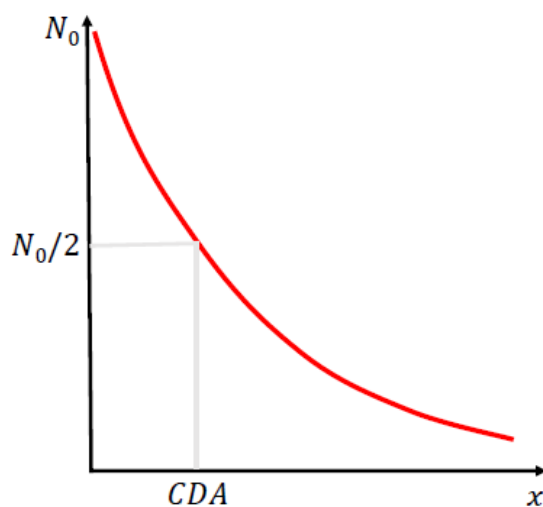
$$N(x) = N(0)e^{-\frac{\mu}{\rho} \rho x}$$

Démonstration : $\rho = \frac{m}{vol} = \frac{m}{s \times x} \rightarrow \rho x = \frac{m}{s}$ (la masse surfacique étant plus facile à mesurer)

Rmq : Ce n'est pas la formule la plus importante. Retenez surtout la différence entre les deux coefficients.

2) La couche de demi-atténuation CDA :

La CDA représente l'épaisseur x de matière diminuant le flux de photons initial par un facteur 2 (soit $N(0)/2$) :

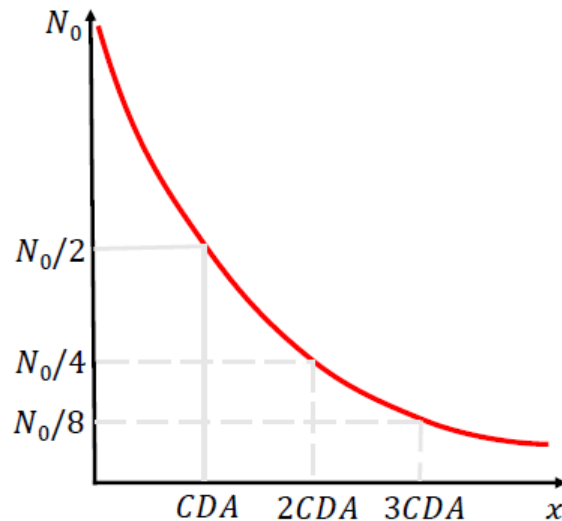


$$CDA = \frac{\ln(2)}{\mu} \approx \frac{0,7}{\mu}$$

On peut exprimer la loi d'atténuation en fonction du nombre de CDA
(QCM+++++)

x	$N(x)/N(0)$	%
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

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



Astuces :

- Connaître par cœur les puissances de 2 jusqu'à 10 : $2^1 = 2$; $2^2 = 4$; $2^{10} = 1024$
- Savoir quel nombre de CDA atténue combien de % de photons. Ex : 3CDA atténue 87,5% ; laisse passer 12,5 %.

ATTENTION au vocabulaire **atténue** \neq **laisse passer** !!

La courbe est une exponentielle donc elle **n'atteint jamais 0** et **DONC** l'absorption d'un faisceau de photons **n'est jamais totale** !!

Au bout de **10 CDA** : on **néglige** le nombre de photons restants (car **0,1%** des photons transmis)

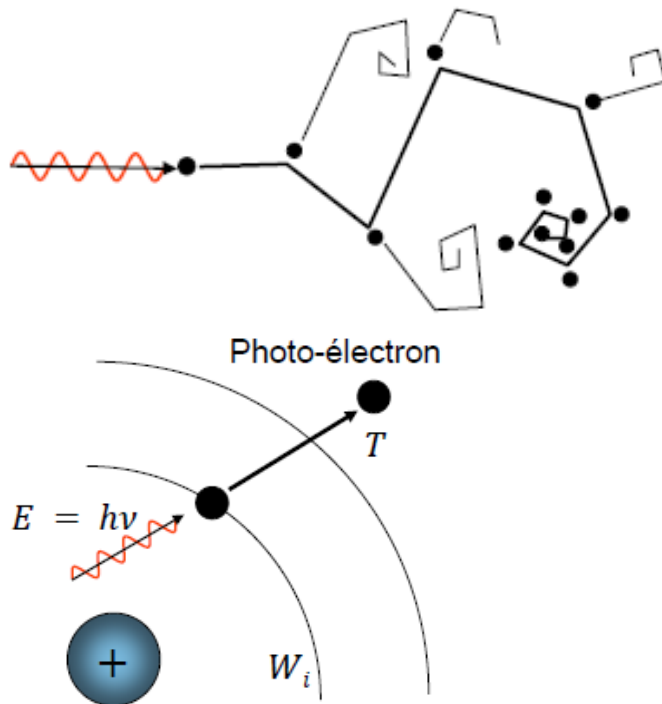
V- Mécanismes d'atténuation des photons

a) Effet photo-électrique

Il s'agit d'un transfert de la **totalité** de l'énergie du photon incident à un électron des atomes de la matière.

Le photoélectron est expulsé de l'édifice atomique et mis en mouvement avec une certaine énergie cinétique :

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



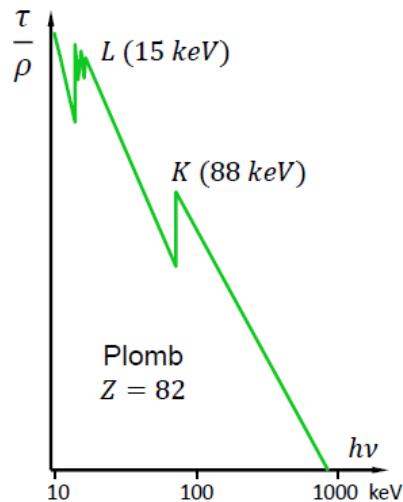
Conséquences :

- L'atome se réarrange par émission de photon de fluorescence/ électron de Auger
- L'électron expulsé perd de son énergie cinétique par ionisations successives
- Le rayonnement disparaît car le photon donne toute son énergie à l'électron

Probabilité d'interaction τ :

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

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



Probabilité élevée pour: - les éléments **lourds** (car Z^3 au numérateur)
 - les photons **d'énergie faible** (car $(h\nu)^3$ au dénominateur)

Donc l'effet photo-électrique dépend du Z !!

b) Effet Compton

Il s'agit d'un transfert **partiel** de l'énergie du photon incident à un électron des atomes de la matière.

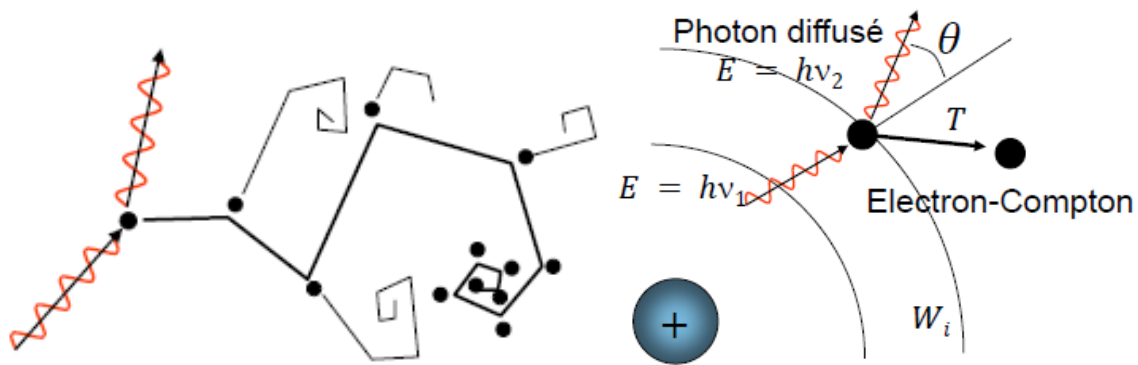
Le photon incident arrive avec un énergie $E=h\nu_1$ et en transfère une partie à l'électron Compton qui part avec une énergie cinétique T :

$$T = h\nu_1 - |W_i|$$

L'énergie qui lui reste est mise sous forme de photon diffusé d'énergie $E = h\nu_2$ avec $h\nu_1 > h\nu_2$

Donc l'énergie du photon incident se répartit entre l'énergie de liaison de l'électron Compton (pour l'arracher), l'énergie cinétique de l'électron Compton expulsé et l'énergie du photon diffusé :

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



Conséquences :

- L'atome se réarrange par émission de photon de fluorescence ou émission d'électron de Auger
- L'électron perd son énergie cinétique par ionisations successives : c'est **l'énergie absorbée ou transférée** $E_a = T$
- Une partie du rayonnement est diffusée : c'est **l'énergie diffusée** $E_d = hv_2$

Pour connaître les proportions des énergies absorbée et diffusée, on utilise la **formule Compton** :

$$\frac{E_a}{E_d} = \frac{T}{hv_2} = \frac{hv_1(1 - \cos \theta)}{mc^2}$$

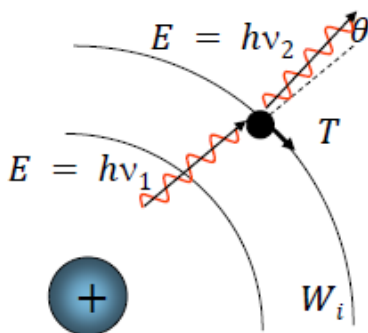
Effet de l'angle θ = angle de déviation du photon:

- **θ faible**

$\rightarrow \frac{E_a}{E_d}$ faible \rightarrow majorité de l'énergie est diffusée

$\theta=0$ choc « tangentiel »

\rightarrow Toute l'énergie est diffusée

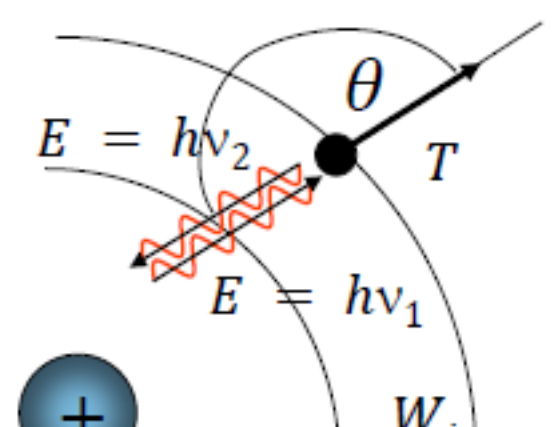


θ élevé

$\rightarrow \frac{E_a}{E_d}$ élevé \rightarrow majorité de l'énergie absorbée

$\theta=\pi$ choc « frontal »

L'énergie cinétique T est maximale

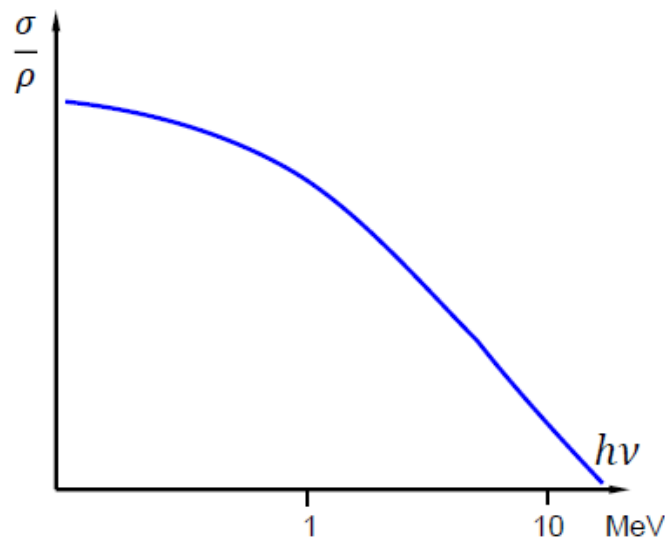


Rmq : Plus l'énergie $h\nu$ est élevée, plus le rapport E_a/E_d est élevé.

probabilité d'interaction σ :

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

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

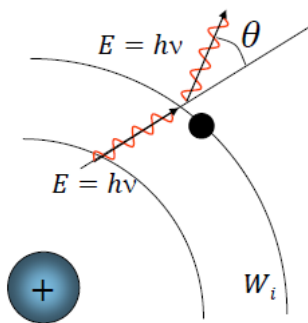


La probabilité est **maximale pour les énergies faibles** (inversement proportionnelle à l'énergie $h\nu$)

L'effet Compton est indépendant du Z (et donc de la matière)!!

c) Diffusion de Thomson-Rayleigh

C'est un **simple changement de direction** du photon sans changement d'énergie= il est dévié. Cela concerne les photons **peu énergétiques** principalement. Il est négligeable pour les photons X et γ .



d) Création de paire/matérialisation

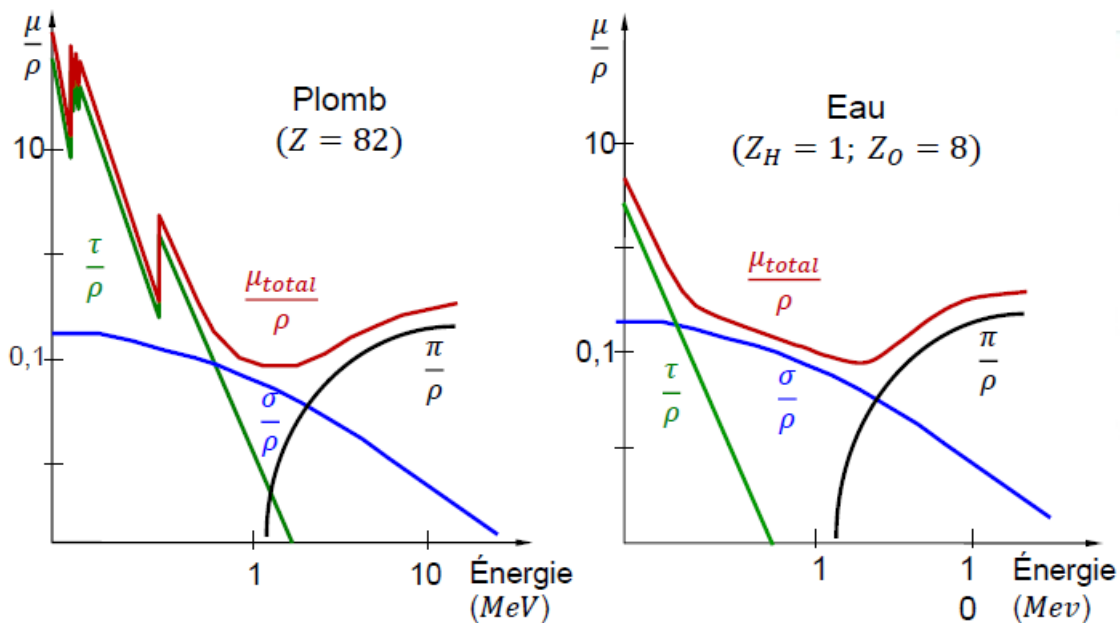
Elle correspond au passage d'un photon **très énergétique** à proximité d'un noyau. Le photon voit son énergie transformée en deux particules : **un électron et son antiparticule le positon**.

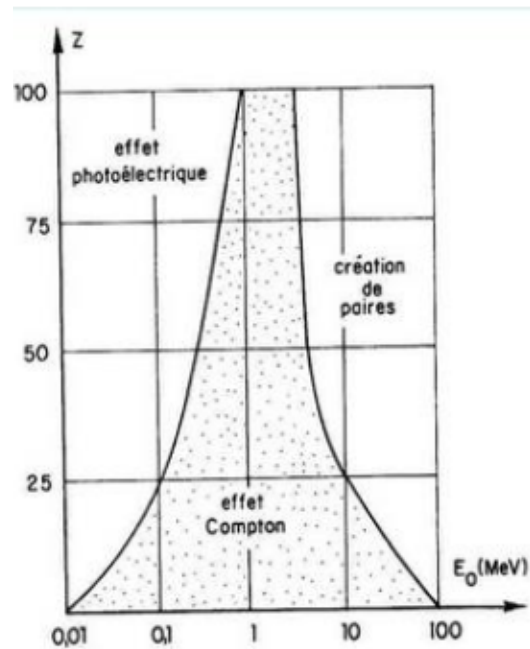
L'électron poursuit son chemin dans la matière tandis que le positon β^+ se désintègre en 2 photons d'énergie 0,511MeV (ou 511keV) émis à 180°. La probabilité d'interaction π augmente avec l'énergie des photons incidents.

ATTENTION la création de paire n'est pas toujours possible, il y a un seuil énergétique de 1,022 MeV !!

Rmq : la réaction inverse correspond à l'annihilation.

e) Importance relative des mécanismes d'interaction





La courbe rouge= probabilité d'atténuation globale
Bleue= effet Compton, vert= effet photo-électrique, noir= création de paire.

En comparant l'eau et el plomb on peut voir que seul l'effet photo-électrique change de manière significative ce qui modifie la probabilité d'atténuation globale.

VI- Interaction des particules avec la matière

A) Interactions des neutrons

Rappel : les neutrons sont indirectement ionisants.

Ils interagissent avec les noyaux par choc direct. La probabilité de cette interaction est donc faible puisque les neutrons sont petits par rapport aux noyaux. Ils sont donc très pénétrants= traversent une large épaisseur de matière avec peu d'interaction.

a) Les neutrons rapides

Dans les milieux riches en hydrogène (généralement milieux biologiques), noyaux légers, le transfert d'énergie est maximal puisque les neutrons percutent le noyau d'H et l'expulse avec une certaine énergie cinétique ce qui crée un proton* secondaire qui fera par la suite des ionisations. Donc les neutrons sont indirectement ionisants car ils créent des protons secondaires qui sont eux responsables des ionisations.

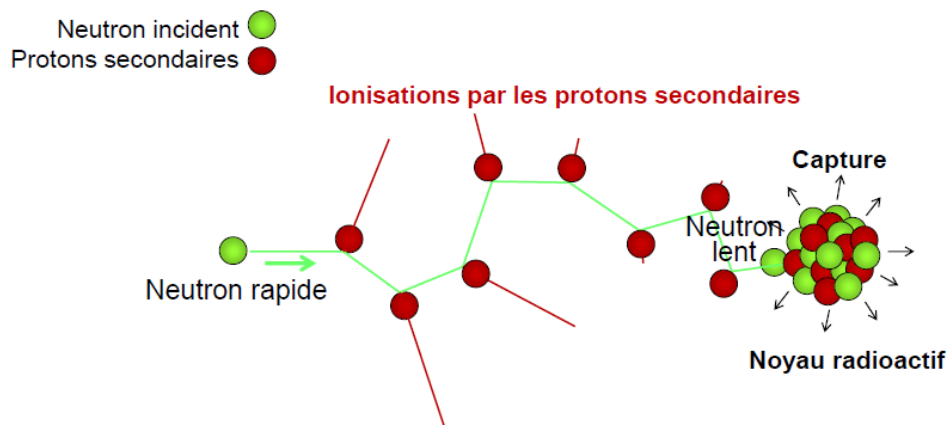
En revanche, dans les milieux riches en noyaux lourds, le transfert d'énergie est minimal car les neutrons rebondissent sur les noyaux, ils sont déviés : ils diffusent.

Rmq : c'est l'intérêt des bombes à neutrons qui en utilisant des neutrons rapides provoquent beaucoup de dégâts biologiques en touchant peu les infrastructures.

*proton= noyau d'hydrogène

b) Les neutrons lents/thermiques

Comme ils ont peu d'énergie, ils ne rebondissent pas sur les noyaux mais sont capturés et absorbés : c'est la capture radiative. Les noyaux deviennent dès lors radioactifs.

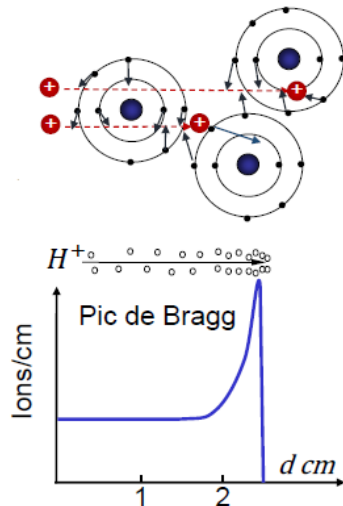


B) Interaction des particules chargées positivement

Les particules positives sont directement ionisantes

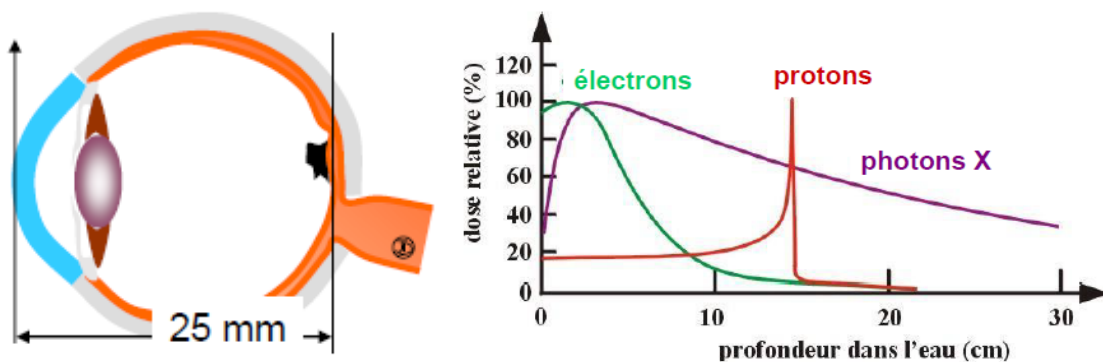
- Masse supérieure à celle de l'électron donc :
Transfert d'énergie par faibles quantités beaucoup plus probable,
nombreuses ionisations avec ionisations secondaires
Peu de fluctuation de trajectoire.
- Pouvoir d'arrêt très élevé :
Parcours court
Effets biologiques importants

Maximum d'ionisation en fin de parcours = pic de Bragg.



Dans la **radiothérapie externe** : utilisation des ionisations des rayonnements pour le traitement des cancers. Le choix du type de rayonnement se fait en fonction des effets souhaités.

→ Exemple : **protonthérapie (on choisit les protons pour le pic de Bragg car on peut traiter des lésions à une distance connue)** des mélanomes de la choroïde (dans l'œil), avec des protons de 65 MeV (comme dans le Cyclotron) qui sont déposés à une distance bien précise (25 mm) pour ne pas léser le nerf optique situé plus en profondeur.



C) Interaction des électrons

Les électrons sont directement ionisants et interagissent avec les noyaux ou les autres électrons. Cette interaction est à l'origine des rayons X.

Conclusion :

En traversant la matière les RI perdent leur énergie progressivement en provoquant des ionisations. L'importance du transfert d'énergie dépend du type de rayonnement, de son énergie et des milieux traversés.

Message de fin :

Je sais que la fiche est très longue mais au moins elle est complète, vous avez tous les détails surtout pour ceux qui n'ont pas encore les ronéos. Je ne voulais pas vous faire un truc illisible ou trop étriqué... en plus il y a des petites astuces et des conseils. N'hésitez pas à refaire les QCM des diapos. Pour ce qui est des formules sachez que seules celles en rouge sont vraiment importantes.

Des gros bisous à tous et à très vite <3 courage

La team M&M's 😊