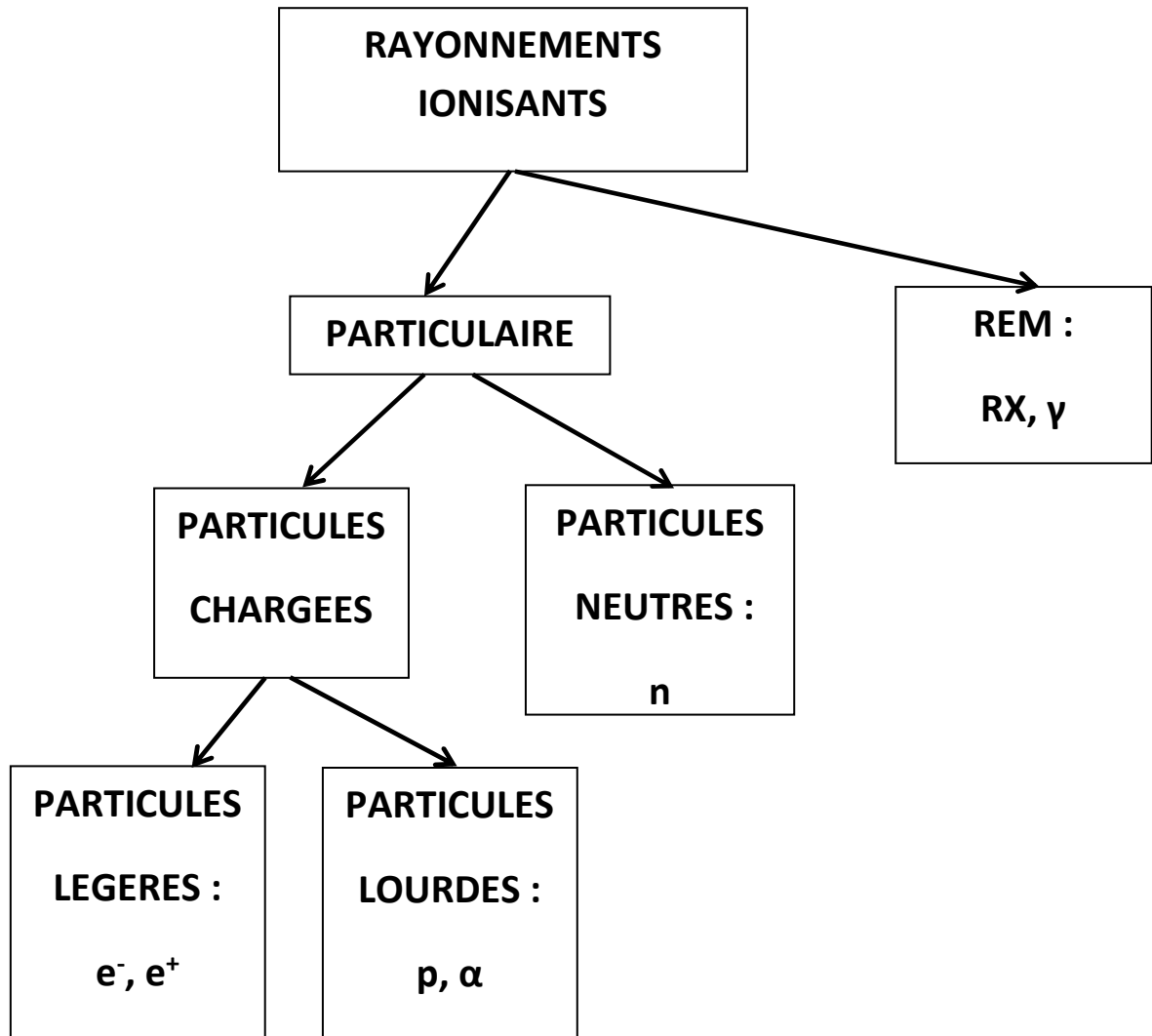


INTERACTIONS RAYONNEMENTS MATIERE

CLASSIFICATION DES RAYONNEMENTS IONISANTS :

Les rayonnements ionisants sont classifiés suivant l'organigramme suivant :



1- INTERACTION DES REM (PHOTONS) AVEC LA MATIERE :

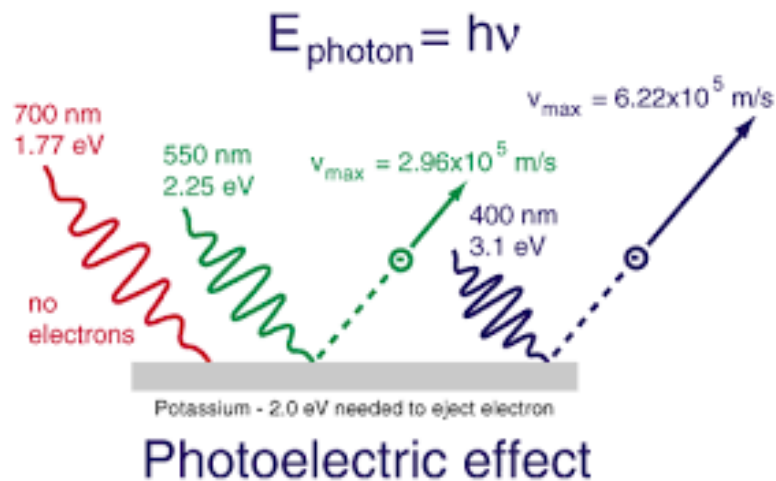
Lorsque les photons traversent un milieu matériel, ils peuvent interagir avec la matière en provoquant les différents effets suivants :

- I - Effet photoélectrique.
- II- Effet Compton.
- III- Production de paires.
- IV- Aucune interaction.

Contrairement aux particules chargées, les photons peuvent ne pas interagir avec le milieu traversé et en sortir avec les mêmes propriétés initiales (énergie et direction).

1-1 L'EFFET PHOTOELECTRIQUE :

L'effet photoélectrique est un phénomène physique durant lequel un matériau, généralement **métallique**, émet des **électrons** lorsqu'il est exposé à un REM ayant une fréquence ou une énergie supérieures à un certain seuil.

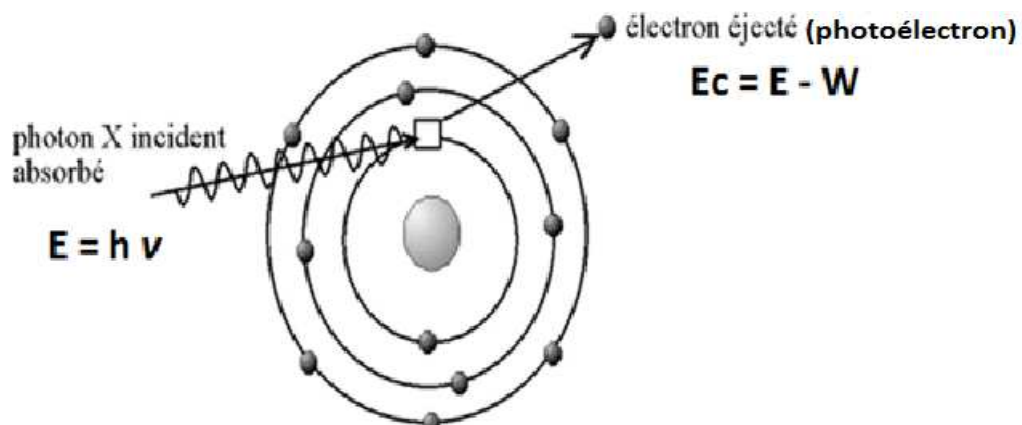


En étudiant l'effet photoélectrique, il a été observé que :

- L'effet photoélectrique ne se produit que si l'énergie des photons était supérieure à une certaine valeur seuil.
- Si l'énergie des photons est inférieure à cette valeur seuil, l'effet photoélectrique ne se produit pas même si l'on augmente l'intensité du faisceau (nombre de photons par unité de temps).
- Lorsque l'énergie est suffisante pour provoquer l'effet photoélectrique, et en augmentant l'intensité du faisceau, on augmente le nombre d'électrons émis.
- Si l'intensité des photons est constante, et que l'on augmente leur énergie, le nombre d'électrons émis n'augmente pas, mais c'est leur énergie cinétique qui va augmenter.

Ce phénomène a été expliqué en 1905 par A. Einstein en introduisant le concept de photons qui constituent le faisceau du REM, chacun de ces photons ayant une énergie $E = h\nu$.

D'après cette explication, pour que l'effet photoélectrique se produise, il faut que : $E > W$.
 W étant l'énergie de liaison de l'électron émis.

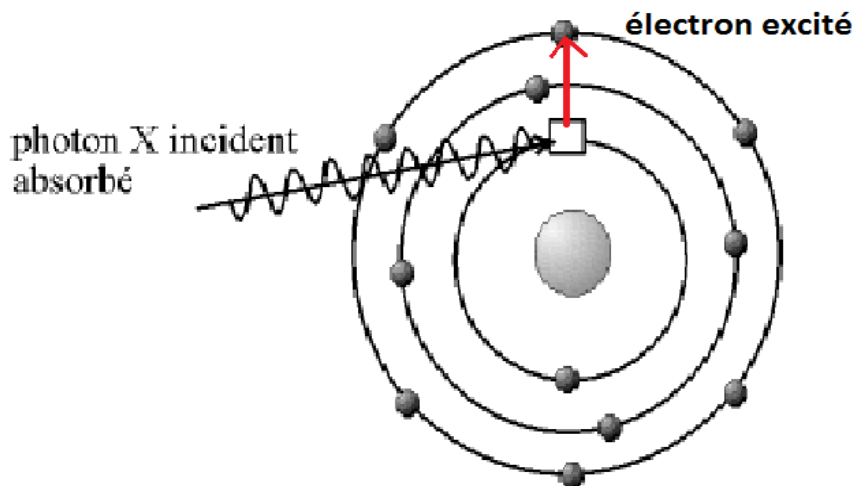


- L'électron émis est appelé photoélectron, et il possède une énergie cinétique :

$$E_c = E - W$$

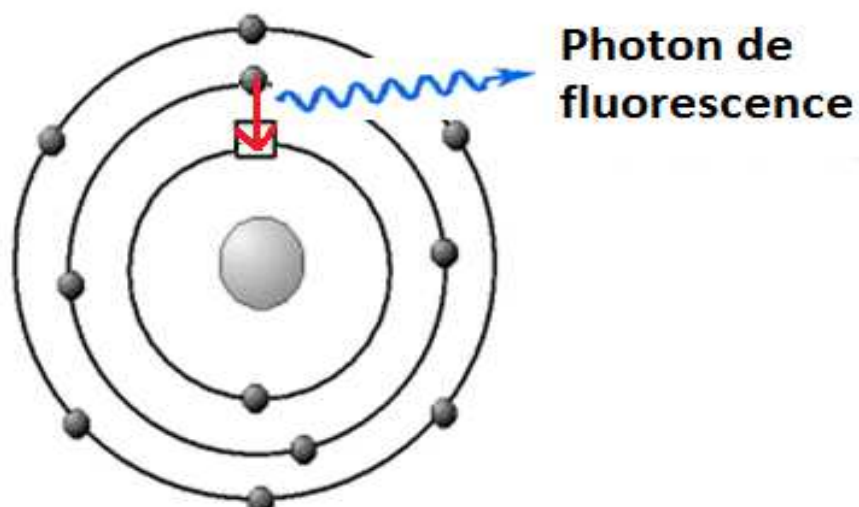
- L'effet photoélectrique se produit avec les électrons des couches internes.

- **Si $E < W$ mais $E = W_i - W_f$, alors excitation électronique.**



Si l'énergie du photon n'est pas suffisante pour libérer l'électron mais qu'elle est égale à la différence d'énergie entre le niveau occupé par l'électron et un niveau supérieur, alors le photon est absorbé par l'électron qui va passer vers le niveau supérieur. Ce phénomène est appelé excitation électronique.

1-2 Photons de fluorescence et électron Auger.



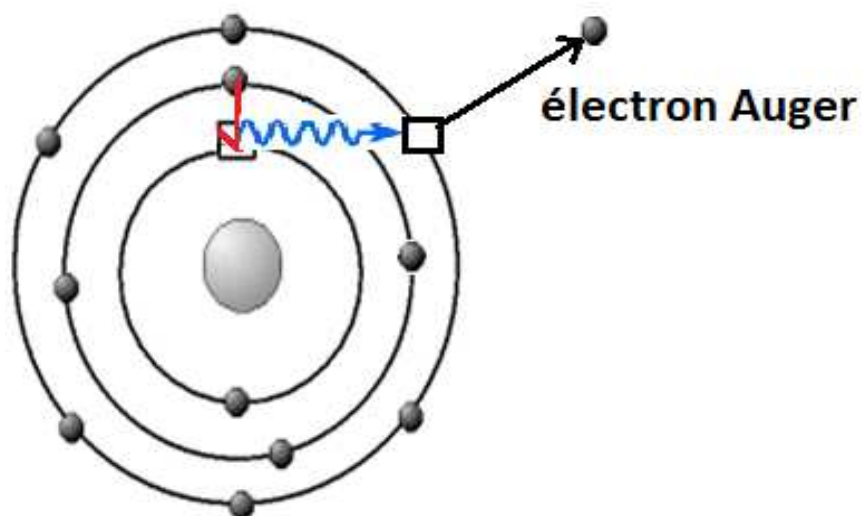
Lorsque le photoélectron est émis, ou lorsqu'un électron passe vers un niveau supérieur par excitation, il va laisser un vide dans le niveau qu'il occupait, et donc l'atome devient instable. Car dans un atome stable les électrons occupent les niveaux énergétiques les plus bas. Pour stabiliser l'atome de nouveau, les électrons qui occupent les niveaux supérieurs vont descendre vers les niveaux les plus bas laissés vides. Ce mécanisme est appelé le réarrangement électronique. Lorsqu'un électron descend d'un niveau énergétique supérieur vers un niveau inférieur, il perd de l'énergie. Cette énergie perdue par l'électron est émise sous forme de photon appelé photon de fluorescence. Il a une énergie telle que :

$$E = W_f - W_i$$

E : énergie du photon de fluorescence.

W_f : énergie de liaison du niveau final.

W_i : énergie de liaison du niveau initial.



Lorsqu'un photon de fluorescence est émis, et si son énergie est suffisante, il peut être absorbé par un électron qui va utiliser son énergie pour se libérer. Cet électron est appelé électron Auger et son énergie cinétique est donnée par :

$$E_c = E - W_e$$

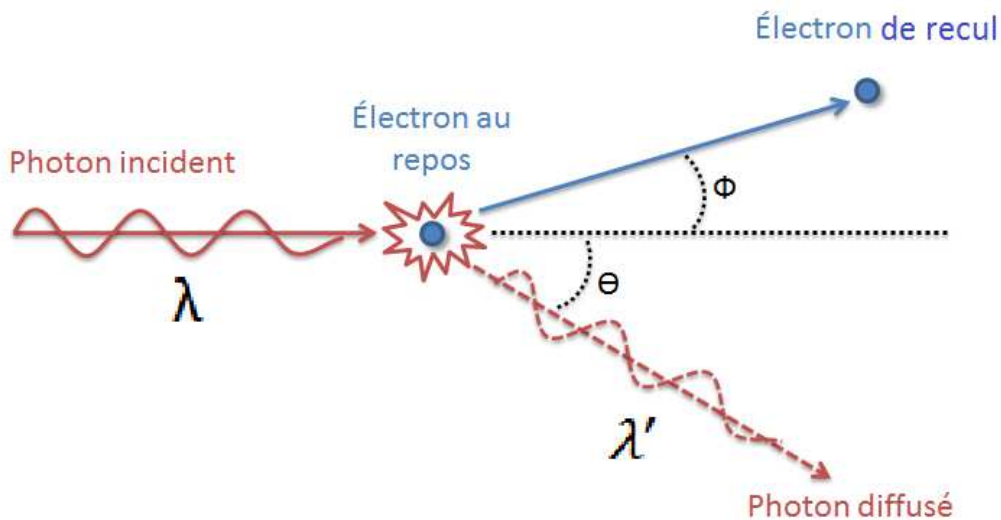
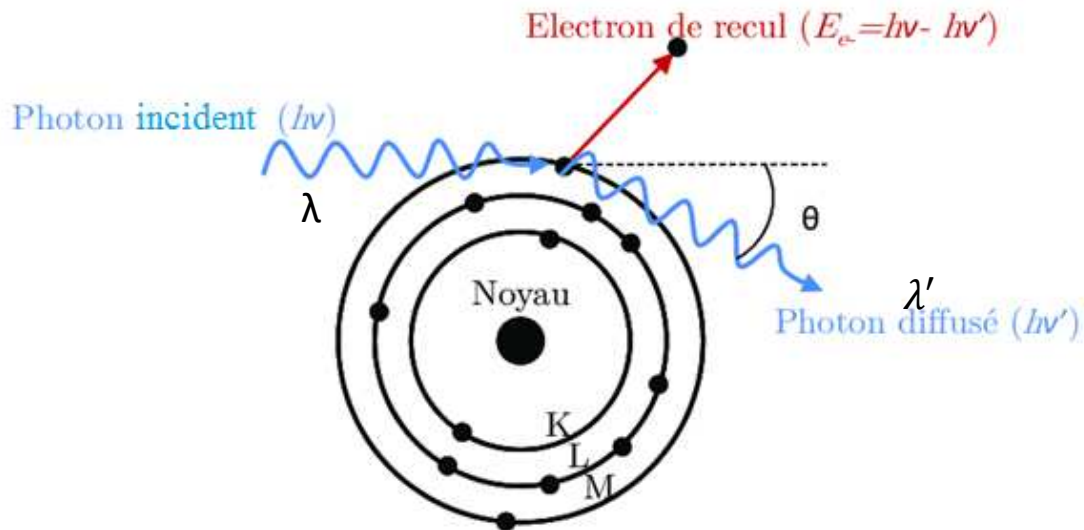
E : énergie du photon de fluorescence.

W_e : énergie de liaison de l'électron.

- La différence entre un électron Auger et un photoélectron réside dans l'origine du photon absorbé. Dans le cas du photoélectron, le photon absorbé vient de l'extérieur du matériau, alors que celui absorbé par l'électron Auger est un photon de fluorescence qui est émis par le matériau lui-même.

EFFET COMPTON :

L'effet Compton est une collision entre un photon et un électron faiblement lié à son atome (électron appartenant à la couche externe) supposé au repos. Dans l'effet Compton, le photon incident n'est pas absorbé par l'électron mais est diffusé (changement de direction et de longueur d'onde)



L'effet Compton :

- Ne peut être expliqué qu'en considérant le photon comme onde et particule donc possédant une quantité de mouvement.
- Obéit aux principes de conservation de l'énergie et du vecteur quantité de mouvement.

En appliquant le principe de conservation de l'énergie on obtient :

$$E + m_0c^2 = E' + (E_c + m_0c^2)$$

E et E' représentent respectivement l'énergie du photon avant et après le choc. E_c est l'énergie cinétique de l'électron (appelé électron de recul) après le choc. Donc on obtient :

$$E_c = E - E' = h\nu - h\nu' = \frac{hc}{\lambda} - \frac{hc}{\lambda'}$$

En appliquant le principe de conservation du vecteur quantité de mouvement on obtient :

$$\vec{P} + \mathbf{0} = \vec{P}' + \vec{P}_e \quad \leftrightarrow \quad \frac{\vec{h}}{\lambda} = \frac{\vec{h}}{\lambda'} + \vec{P}_e$$

$$\vec{P}_e = \vec{P} - \vec{P}'$$

En faisant la projection de ces vecteurs sur les axes on obtient :

$$P_e \cdot \cos\varphi = P - P' \cos\theta$$

$$P_e \cdot \sin\varphi = P' \sin\theta$$

La variation de la longueur d'onde du photon est donnée par cette relation:

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{m_0 c} (1 - \cos\theta)$$

$$\frac{h}{m_0 c} = 0,024 \text{ \AA}$$

$$\Delta\lambda(\text{\AA}) = \lambda' - \lambda = 0,024(1 - \cos\theta) = 0,048 \cdot \sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right)$$

La relation précédente n'est valable que si les longueurs d'onde sont exprimées en \AA.

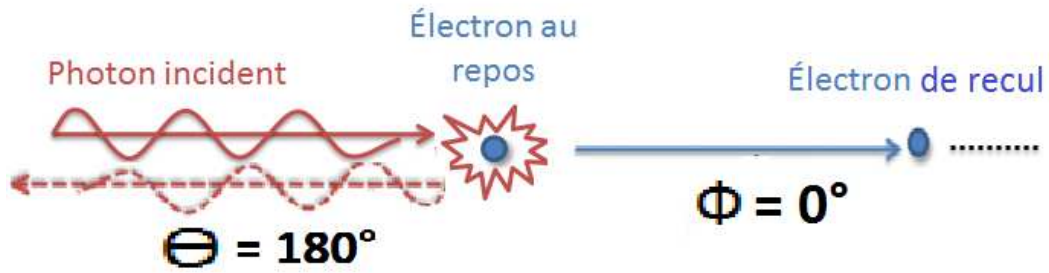
On donne l'angle de diffusion de l'électron de recul par la relation suivante :

$$\text{Cotg}(\varphi) = \text{tg}\left(\frac{\theta}{2}\right) \left(1 + E \frac{1}{m_0 c^2}\right) \quad : \quad E = \frac{hc}{\lambda}$$

CAS PARTICULIERS :

CHOC FRONTAL :

Dans ce cas, l'électron de recul est projeté en avant dans la même direction que celle du photon incident ($\varphi = 0$). Le photon lui, après le choc, est rétrodiffusé, c-à-d qu'il est diffusé dans la même direction initiale, mais dans le sens opposé ($\theta = 180^\circ$).

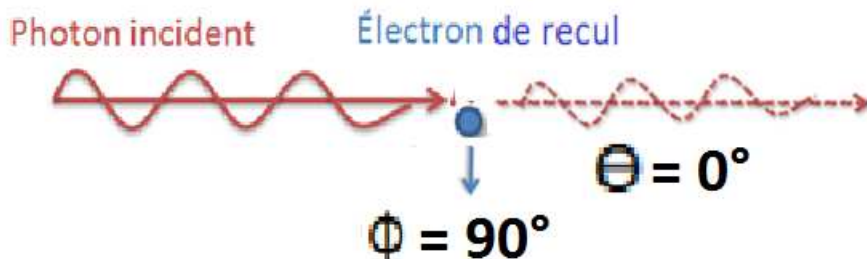


L'énergie cinétique de l'électron de recul est dans ce cas est maximale.

$$E_c = E_{cmax}$$

CHOC TANGENTIEL :

Dans ce cas l'électron continue sur la même direction et le même sens ($\theta = 0$) et l'électron est projeté avec un angle ($\varphi = 90^\circ$)



Donc on obtient :

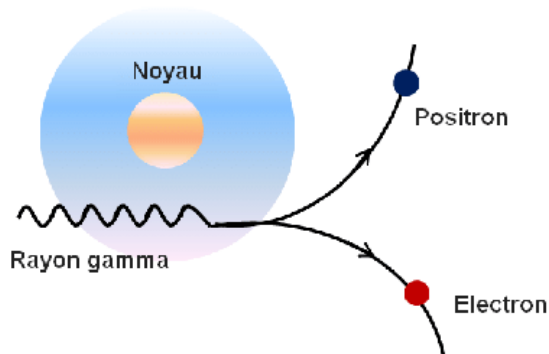
$$\lambda' = \lambda \quad \leftrightarrow \quad \Delta\lambda = 0$$

et :

$$E_c = 0$$

PRODUCTION DE PAIRES :

Lorsqu'un photon ayant une énergie suffisante passe au voisinage d'un noyau, il interagit avec le champ électrique créé par ce dernier. Le photon disparaît en donnant naissance à un électron et un positron. Ces deux particules se partagent l'énergie du photon.



En appliquant le principe de conservation de l'énergie, on a :

$$E = (T^- + m_0c^2) + (T^+ + m_0c^2) = T^- + T^+ + 2m_0c^2$$

$$E = T + 1,022 \text{ MeV} \quad : \quad T = T^- + T^+$$

E : énergie du photon.

T⁻ : énergie cinétique de l'électron.

T⁺ : énergie cinétique du positon.

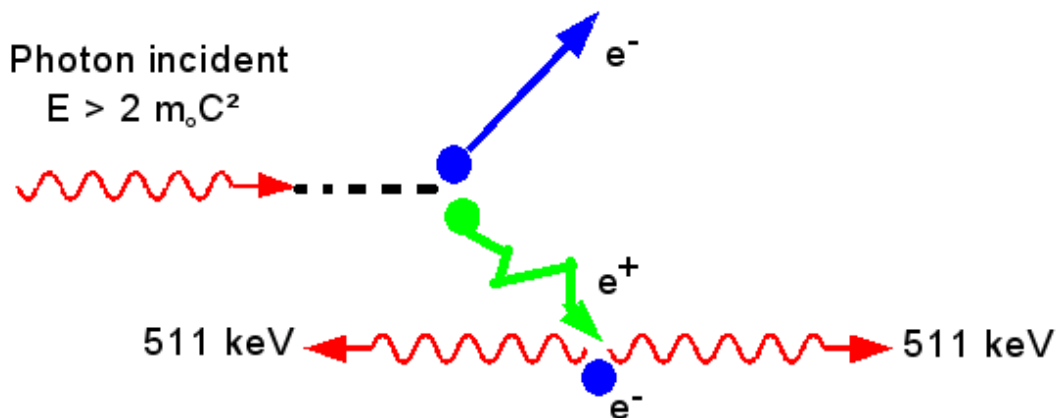
Donc pour qu'un photon puisse créer une paire électron-positon, il faut que :

$$E \geq 2m_0c^2$$

$$E \geq 2,0511 \text{ MeV}$$

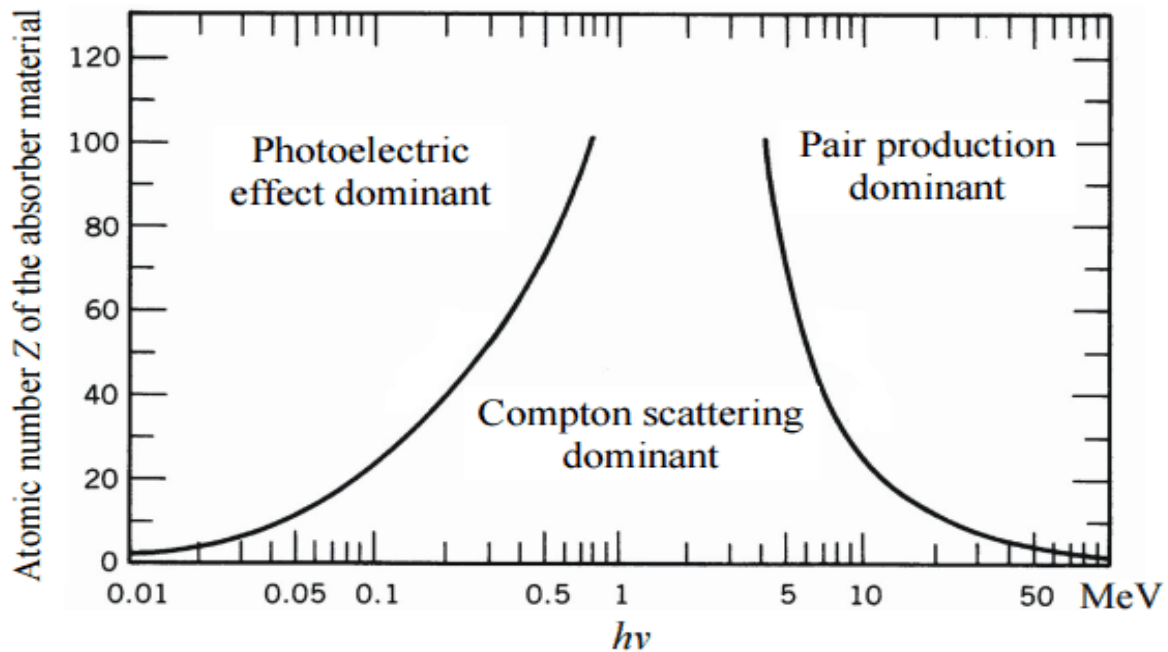
$$E \geq 1,022 \text{ MeV}$$

ANNIHILATION POSITON-ELECTRON :



Après plusieurs collisions, et lorsque le positon est pratiquement au repos, il va rencontrer un autre électron avec lequel il va s'annihiler. Cette annihilation va provoquer l'émission de deux photons ayant chacun une énergie : $E = m_0c^2 = 511 \text{ KeV}$. Ces deux photons sont émis dans la même direction mais dans des sens opposés.

DOMAINES DE PREDOMINANCE DE CHAQUE PHENOMENE :



- L'effet photoélectrique prédomine à basse énergie et pour les matériaux lourds (Z élevé).
- L'effet Compton est prépondérant pour les énergies intermédiaires (imagerie) et pour les matériaux légers (faible Z).
- La matérialisation est le processus dominant pour les rayonnements d'énergie supérieure à quelques MeV et pour les matériaux lourds.

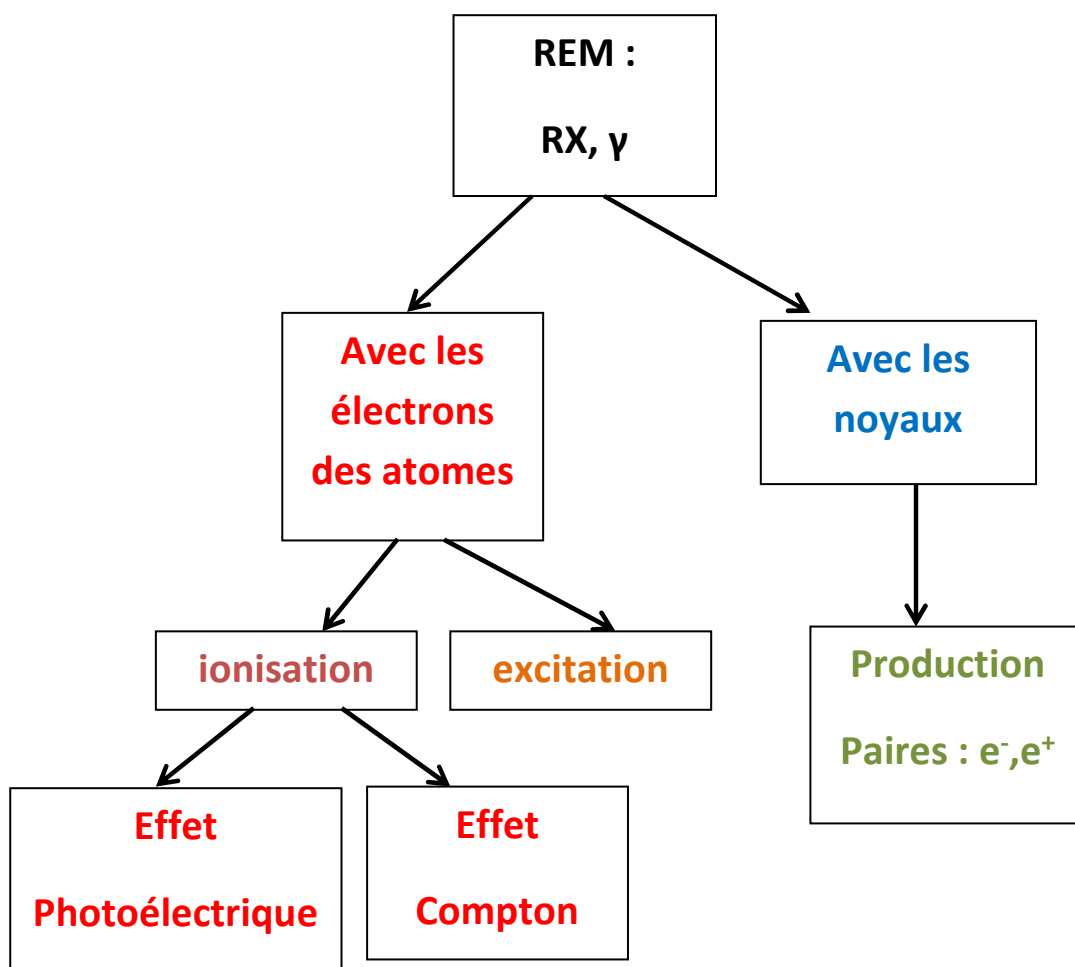
Tableau donnant les effets prépondérants d'un rayonnement chez un malade (eau) suivant l'énergie du photon incident

Eau (le malade)	Effets prépondérants
$0 < h\nu < 50 \text{ keV}$	Effet photoélectrique (on ne voit rien en imagerie)
$50 \text{ keV} < h\nu < 20 \text{ MeV}$	Effet Compton (les photons diffusés génèrent une image)
$h\nu > 20 \text{ MeV}$	Effet création de paires (utilisé en thérapie)

- En médecine, on n'utilise pas de photons incidents de plus de 1,3 MeV
- En radiodiagnostic, les photons sont compris entre **60 et 140 keV** pour qu'on ait à la fois un effet photoélectrique et un effet-Compton en fonction de Z , permettant ainsi le contraste entre les tissus de différentes densités. L'effet Compton trop prédominant est source de « flou » donc on essaie de les limiter.
- Pour la radiothérapie, les photons sont compris entre **200 et 250 keV**

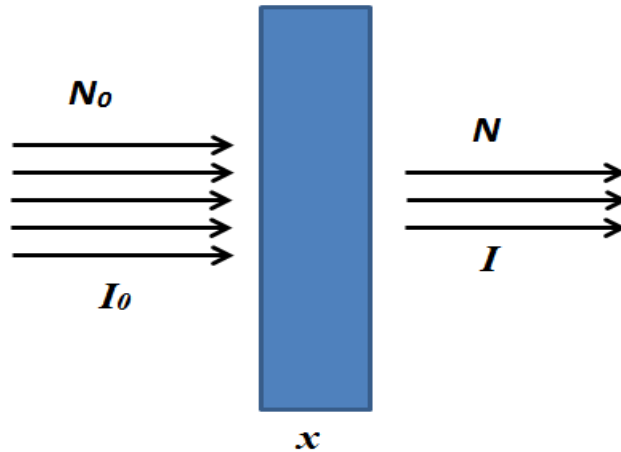
- la direction des faisceaux diffusés est aléatoire, ce qui correspond à une **diffusion** du faisceau de rayons dans toutes les directions ; l'énergie des rayons diffusés est inférieure à celle du faisceau primaire, mais est encore suffisamment énergétique pour avoir des effets significatifs sur l'image radiographique : **flous, voiles, noircissements de l'image**
- le rayonnement diffusé se propage dans toute la pièce et justifie une grande partie des mesures de radioprotection, en particulier le port du tablier plombé, pour éviter l'**irradiation**.
- elle constitue une **énergie perdue** (ou tout du moins incontrôlable) en radiothérapie

TYPES DES INTERACTIONS DES REM AVEC LA MATIERE



ATTENUATION DES REM :

Lorsqu'un faisceau de photons traverse un certain milieu, un certain nombre de ces photons est absorbé suite à leurs interactions avec le milieu, alors que le reste des photons ne subira aucune interaction et sortira du milieu avec les mêmes caractéristiques initiales. Le phénomène d'absorption des photons est appelé atténuation. Les photons qui n'ont pas été atténués sont appelés photons transmis.



La variation du nombre de photons suite à leur atténuation est donnée par :

$$dN = \mu \cdot N \cdot dx$$

$$\frac{dN}{N} = \mu \cdot dx$$

Donc le nombre de photons transmis est égal à :

$$N = N_0 e^{-\mu \cdot x}$$

Cette loi peut être utilisée pour calculer l'intensité transmise du faisceau (nombre de photons par unité de temps) :

$$I = I_0 e^{-\mu \cdot x}$$

$\mu = \frac{(dN/N)}{dx}$: est le coefficient d'atténuation linéaire. Il représente la probabilité d'absorption d'un photon par unité d'épaisseur.

Il dépend de : 1- la nature du milieu.

2- l'énergie des photons.

Il est constitué de trois composantes :

$$\mu = \mu_{ph} + \mu_c + \mu_p$$

μ_{ph} : coefficient d'atténuation par effet photoélectrique.

μ_c : coefficient d'atténuation par effet Compton.

μ_p : coefficient d'atténuation par production de paires.

sa dimension est L^{-1} et son unité usuelle est le cm^{-1} .

N représente le nombre de photons qui ont été transmis, c-à-d qui n'ont pas été absorbés (qui n'ont subi aucune interaction).

Le nombre de photons qui ont été atténués (absorbés) est : $N_0 - N$.

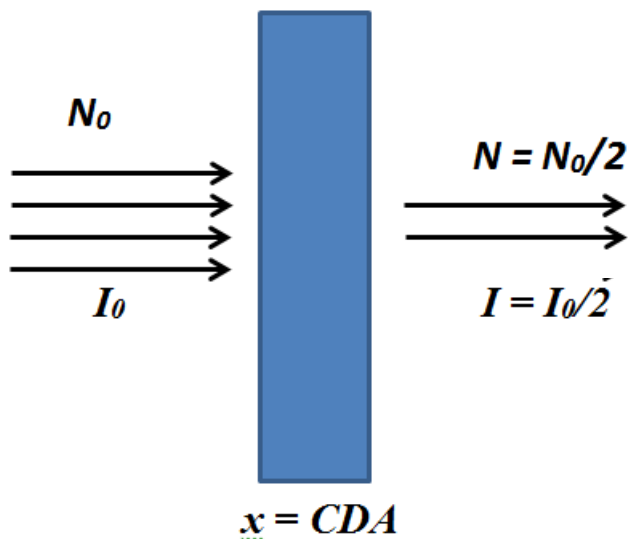
Le pourcentage de photons transmis est donné par : $\frac{N}{N_0}$

Le pourcentage de photons atténués (absorbés) est donné par : $\frac{N_0 - N}{N_0}$

Généralement on utilise le coefficient massique d'atténuation (μ/ρ).
Son unité est : cm^2/g .

$$N = N_0 e^{-(\mu/\rho) \cdot \rho x}$$

COUCHE DE DEMI-ATTENUATION (CDA):



La couche de demi-atténuation (CDA) est l'épaisseur du milieu nécessaire pour atténuer le nombre de photons incidents de moitié.

$$\text{Donc : } x = CDA \rightarrow N = \frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\mu \cdot CDA} \rightarrow CDA = \frac{\ln 2}{\mu}$$

REMARQUES:

- 1- On utilise souvent la masse surfacique ($\rho \cdot CDA$) au lieu de la CDA.

$$\rho \cdot CDA = \frac{\ln 2}{\mu/\rho}$$

- 2- si l'on pose $n = \frac{x}{CDA}$, alors on peut écrire : $N = \frac{N_0}{2^n}$

n est appelé nombre de CDA.

Exemple :

Un technicien veut se protéger des rayons γ émis par une source de Cobalt 60.

- L'écran de plomb utilisé, élimine 99% des photons incidents, quelle est son épaisseur ?

Donnée : $\mu = 0,6 \text{ cm}^{-1}$

Solution :

99% des photons doivent être éliminés (absorbés), donc 1% seront transmis, c.-à-d. : $N = 0,01.N_0$

Ou bien :

$$\frac{N_0 - N}{N_0} = 99\% = 0,99 \rightarrow N_0 - N = 0,99.N_0 \rightarrow N = 0,01.N_0$$

Et on a :

$$N = N_0 e^{-\mu x}, \text{ donc : } e^{-\mu x} = 0,01 \rightarrow x = \frac{-\ln(0,01)}{\mu} = 7,68 \text{ cm}$$

Remarque :

Il est impossible d'arrêter tous les photons incidents. Car il faut une épaisseur infinie pour cela, puisqu'il y'aura toujours des photons qui vont traverser le milieu sans subir d'interaction.

APPLICATIONS DE L'ATTENUATION DES REM:

Radiographie X.

Scanner X.

Calcul de l'épaisseur du blindage de protection.

3- INTERACTIONS DES PARTICULES CHARGÉES AVEC LA MATIÈRE

Les particules chargées interagissent avec le milieu à travers les électrons, les noyaux et les atomes constituant ce milieu.

Avec le cortège électronique :

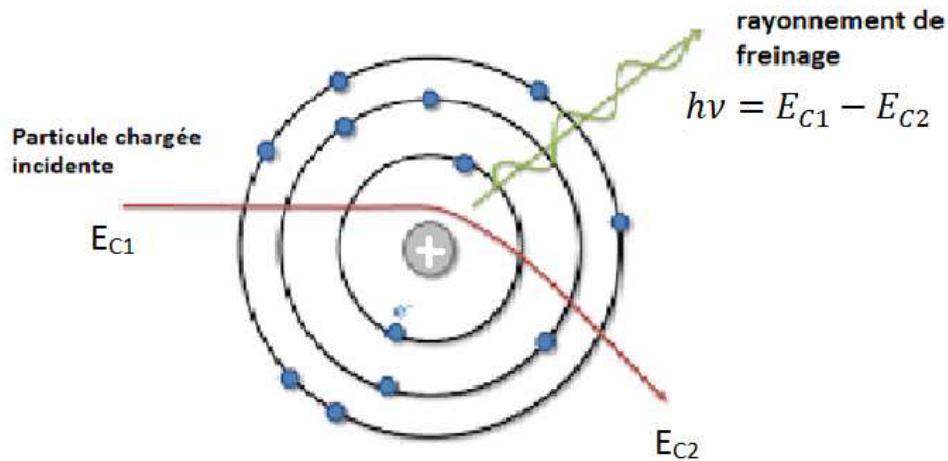
L'interaction des particules avec les électrons se traduit par des collisions qui vont soit déboucher sur des ionisations soit des excitations électroniques selon l'énergie cinétiques des particules.

Collisions → ionisations et ou excitations électroniques.

Les ionisations et les excitations vont conduire par la suite à l'émission de photons de fluorescence et peut-être des électrons Auger.

Avec les noyaux :

L'interaction des particules chargées avec les noyaux se traduit par l'émission d'un rayonnement de freinage.



- Le rayonnement de freinage est très rare dans les tissus biologiques.(densité faible).

INTERACTION AVEC LES ATOMES :

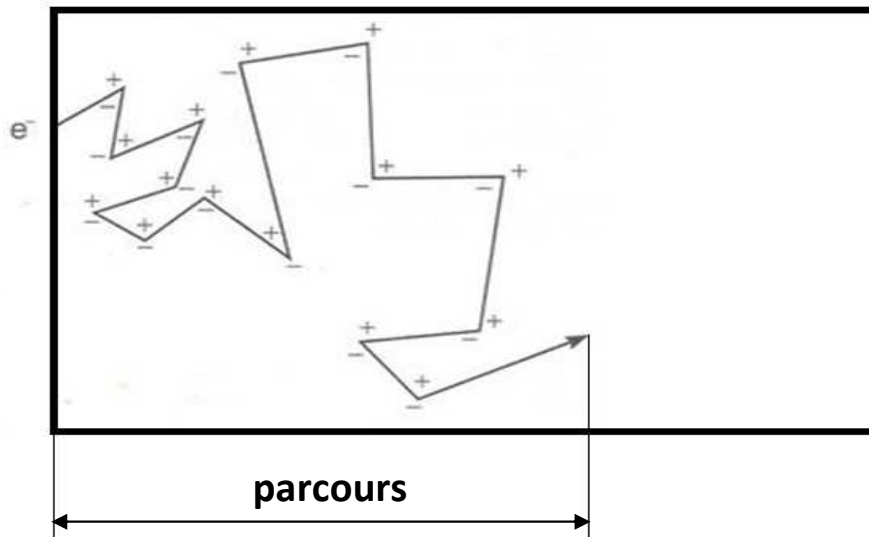
Lorsqu'une particule n'a pas suffisamment d'énergie pour provoquer une ionisation ou une excitation, alors elle interagit avec l'atome dans son ensemble. L'énergie transmise à l'atome est transformée en énergie thermique (vibrations de l'atome).

Trajectoire et parcours :

- La trajectoire d'une particule dans un milieu est la distance parcourue par cette particule dans le milieu jusqu'à ce qu'elle perde toute son énergie cinétique.
- Le parcours est la profondeur maximale atteinte par cette particule à l'intérieur du milieu.

Particules légères (e^- , e^+) :

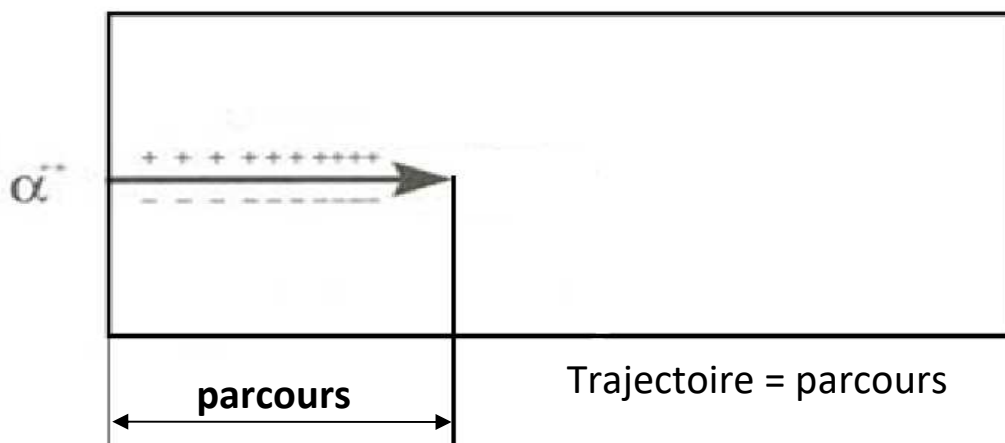
Dans le cas des particules légères, la trajectoire est en zigzag, puisqu'à chaque interaction il y a un grand changement dans la direction de la particule à cause de sa faible masse. Ceci conduit à une trajectoire beaucoup plus grande que le parcours.



Trajectoire > parcours

Particules lourdes :

Les particules lourdes ayant des masses très supérieures à celles des électrons, elles ne changent pratiquement pas de direction lorsqu'elles interagissent avec ces derniers. Il en résulte une trajectoire rectiligne est égale au parcours.



Remarque :

- Il est possible d'arrêter toutes les particules chargées avec un blindage ayant une épaisseur > parcours, contrairement aux photons.
- A énergies égales, le parcours d'une particule lourde est inférieur à celui d'une particule légère.

ENERGIE MOYENNE D'IONISATION ($\bar{\omega}$) :

Pour expliquer l'énergie moyenne d'ionisation, prenons l'exemple de l'eau. Pour ioniser une molécule d'eau il faut une énergie de 16 eV. Cependant et statistiquement, il a été observé que pour chaque ionisation, la particule va provoquer environ 3 excitations électroniques et un nombre important d'excitations thermiques. Ces excitations consomment elles aussi 16 eV. Donc pour chaque ionisation la particule aura dépensé réellement 16+16 =32 eV. Ces 32 eV représentent ce qu'on appelle l'énergie moyenne d'ionisation. Elle est différente de l'énergie d'ionisation de l'eau qui elle est égale à 16 eV.

$$\bar{\omega} = \frac{E}{I_t}$$

E : énergie cédée par la particule au milieu.

I_t : nombre d'ionisations total.

- $\bar{\omega}$ dépend du milieu et non de la particule

TRANSFERT LINEIQUE D'ENERGIE (TLE) :

C'est l'énergie déposée par la particule dans le milieu par unité de distance :

$$TLE = \frac{E}{L}$$

E : énergie cédée par la particule.

L : parcours.

Pour une particule donnée, le rapport entre le TLE et la masse volumique du milieu est constant :

$$\frac{TLE_1}{\rho_1} = \frac{TLE_2}{\rho_2}$$

- Plus le TLE est grand plus la particule est dangereuse pour les cellules.

DENSITE LINEIQUE D'IONISATION (DLI) :

C'est le nombre de paires d'ions créées par unité de distance.

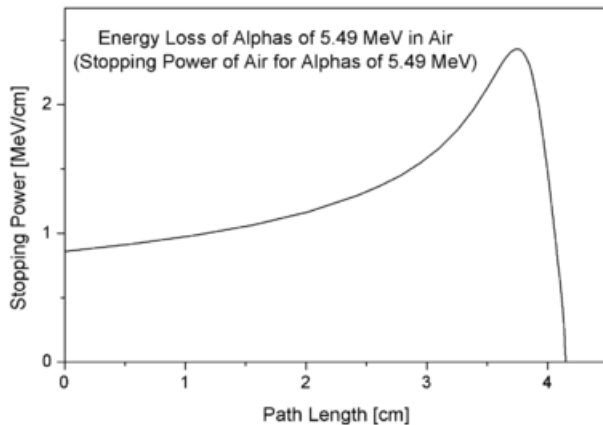
$$DLI = \frac{I_t}{L} = \frac{TLE}{\bar{\omega}}$$

Son unité : paires d'ions(PI)/ μm

COURBE DE BRAGG :

Les particules ne perdent pas la même quantité d'énergie durant tout leurs parcours. Elles sont beaucoup plus ionisantes vers la fin de ce dernier.

Pour représenter cette variation de la perte d'énergie suivant la profondeur de pénétration (parcours) on utilise une courbe appelée courbe de Bragg.

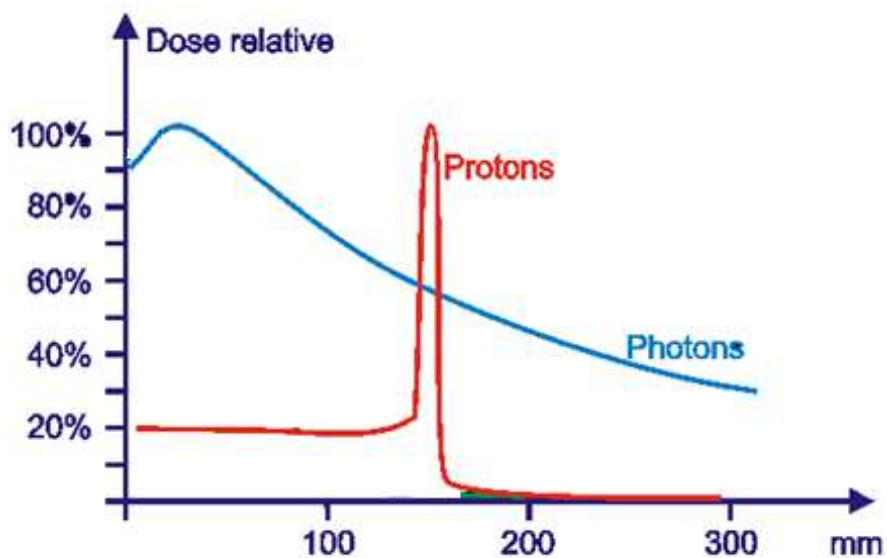


Courbe de Bragg représente l'évolution de la perte d'énergie (ionisation spécifique) le long de la trajectoire de la particule chargée

Une courbe typique de Bragg est représentée sur ce graphique pour une particule alpha de plusieurs MeV d'énergie initiale

Applications de la courbe de Bragg :

1- Protonthérapie :



Courbes de Bragg de photons et de protons dans un tissu biologique.

Sur la figure ci-dessus, on remarque que les protons perdent la majorité de leur énergie sur une zone très étroite entre 150 et 160 mm ce qui est très bénéfique dans le cas de leur utilisation en radiothérapie (protonthérapie) car ça minimise leurs effets secondaires sur les organes non ciblés, contrairement aux photons qui eux déposent leur énergie sur une longue distance ce qui accroît les effets secondaires.

2- Epaisseur du blindage de protection :

La courbe de Bragg nous permet aussi de connaître le parcours de la particule dans un milieu. Ce qui nous permet de connaître l'épaisseur du blindage qu'on doit utiliser pour la radioprotection des personnes. En effet il suffit d'utiliser un blindage ayant une épaisseur supérieure au parcours des particules pour s'en protéger, car on est sûr qu'aucune particule ne pourra traverser ce blindage.