

(Chapter head:)*

Chapitre 3: Rayonnements

1. INTRODUCTION

L'effet des rayonnements sur la matière vivante est souvent perçu comme un effet nocif. L'étude scientifique de l'interaction matière-rayonnement, donne une possibilité de comprendre correctement de nombreux complexes faits expérimentaux, c'est la radiobiologie.

Les scientifiques ou médecins spécialisés retirent de ces études un ensemble cohérent de connaissances orienté vers la radioprotection. Cette dernière est issue du désir d'éviter une pathologie induite par les rayonnements sur une population malade ou en bonne santé, mais aussi sur la descendance de ces populations.

2. GÉNÉRALITÉS

Un rayonnement ou une radiation est un mode de propagation de l'énergie dans l'espace, sous forme d'onde ou de particules.

Les rayonnements ne peuvent être détectés que grâce à leurs interactions avec la matière: ils cèdent totalement, ou en partie, leur énergie et en subissent des modifications.

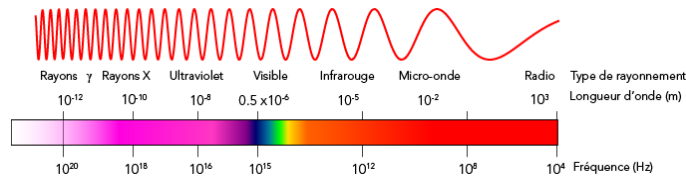
2.1. Classification des rayonnements. 1- Selon la nature du rayonnement, ils sont classés en rayonnements électromagnétiques et rayonnements particuliers.

2- Selon les effets sur la matière biologiques, ils sont classés en rayonnements ionisants et rayonnements non-ionisants.

2.1.1. Rayonnements électromagnétiques. On distinct deux aspects:

Aspect ondulatoire. Le rayonnement électromagnétique (REM) se compose d'ondes. Ces ondes contiennent de l'énergie électrique et magnétique.

Le spectre électromagnétique englobe toute une gamme d'énergies, depuis l'énergie très faible, comme les ondes radio, jusqu'à l'énergie très haute, comme les rayons gamma.



Le REM est caractérisé par une longueur d'onde λ et une fréquence f ou ν , avec $\lambda = \frac{c}{f}$. Plus la fréquence est élevée, plus l'onde est courte. Par exemple, les rayons gamma ont une très haute fréquence et une très courte longueur d'ondes.

Il y a sept formes naturelles de REM. Les rayons γ possèdent la plus haute énergie et la plus courte longueur d'onde. Puis, il y a les rayons X, les rayons ultraviolets, la lumière visible, le rayonnement infrarouge et les micro-ondes. Enfin, il y a les ondes radio qui ont le moins d'énergie et la plus grande longueur d'onde.

Les seules parties du spectre électromagnétique que nos sens peuvent détecter directement sont l'infrarouge (ressenti comme de la chaleur) et la lumière visible. Nous ne pouvons pas voir ni sentir les ondes radio, les rayons X et les rayons γ , mais ils peuvent traverser le corps.

Aspect corpusculaire. La théorie quantique d'Einstein prévoit que les REM transportent l'énergie par paquets (quanta) d'énergie appelés « photons » (paquets d'énergie de charge électrique nulle et de masse nulle qui se propagent dans le vide à la vitesse de la lumière, soit $c \approx 3.10^8 m/s$). Chaque photon transporte même quantité où même quantum d'énergie: $E_\gamma = \hbar.f$, mesurée en joule (**j**), si non par électron-volt (**eV**).

2.1.2. *Rayonnements particulières.* Ces Rayonnements sont formés de particules matérielles, dotées d'une masse au repos nom nulle animées d'une énergie cinétique.

Ces particules forment un faisceau de particules caractérisées par:

- une charge
- une masse au repos m_0
- une vitesse V

Dans le cadre de la relativité, la masse et l'énergie de ces particules en mouvement est donnée par la relation relativiste suivante:

$$m = m_0 / \sqrt{(1 - V^2/c^2)}$$

et l'énergie totale est:

$$E = E_0 + E_c = m.c^2$$

D'où l'énergie cinétique de ces particules est donnée par la relation suivante:

$$E_c = E - E_0 = m.c^2 - m_0.c^2$$

$$E_c = m_0.c^2 \cdot \left[1/\sqrt{(1 - V^2/c^2)} - 1 \right]$$

quand V est négligeable devant c , on obtient la formule approximative de E_c avec $m_0 \approx m$,

$$E_c = 1/2.m.V^2$$

L'impulsion (ou la quantité de mouvement) de ces particules est donnée par la relation: $\vec{p} = m.\vec{V}$

2.1.3. *La Dualité Onde-corpuscule.* D'après le savant **De Broglie**, toute particule en mouvement est associée une longueur d'onde λ . Comme pour le photon et l'onde lumineuse, la particule et l'onde de matière décrivent le même objet physique et leurs propriétés sont donc intimement liées. Ces propriétés sont données par les relations de De Bröglie, qui sont le pendant des relations de Planck Einstein.

2.1.4. *Rayonnements ionisants.* Les rayonnements ionisants sont des rayonnements **électromagnétiques** ou **corpusculaires** émettent des « rayons » d'énergies suffisantes pour transformer les atomes de la matière qu'ils traversent en ions (un atome qui a perdu ou gagné un ou plusieurs électrons). Cet effet rendre la matière instable.

2.1.5. *Rayonnements non-ionisants.* Les rayonnements non-ionisants sont des rayonnements dont l'énergie électromagnétique transportée par chaque quantum est insuffisante pour ioniser des atomes de la matière qu'ils traversent (c'est-à-dire pour arracher complètement un électron d'un atome).

2.1.6. *Rayons X*. Les rayons X sont une forme de rayonnement électromagnétique à haute fréquence constitué de photons dont l'énergie varie d'une centaine d'eV, à plusieurs MeV.

Ce rayonnement a été découvert en 1895 par le physicien allemand Wilhelm Röntgen. La principale propriété des rayons X est de traverser la matière en étant partiellement absorbés en fonction de la densité de celle-ci et de l'énergie du rayonnement, ce qui permet d'avoir une information sur l'intérieur des objets qu'ils traversent.

Les rayons X sont une des modalités principales de l'imagerie médicale et du contrôle non destructif. Ils sont également utilisés en cristallographie et En astrophysique contemporaine.

Production des rayons X. On aura tous à un moment opportun dans notre vie à prendre une ou plusieurs radiographie, que se soit chez le dentiste ou chez le médecin. Donc il est très intéressant de comprendre le fonctionnement des rayons X qui sont à l'origine de la radiographie.

Alors, Comment sont-ils produits ?

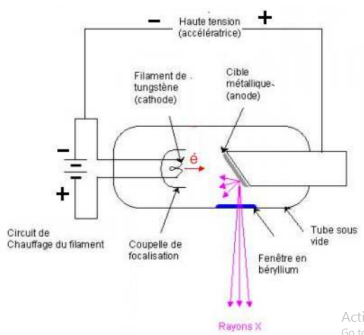
Les rayons X (RX) sont produits dans des tubes à RX également appelés tubes de Coolidge. Le principe est le suivant: des électrons émis par une cathode (un filament, le plus souvent en tungstène, chauffé par le passage d'un courant électrique) sont accélérés par une différence de potentiel élevée en direction d'une cible constituée d'une anode en métal (en tungstène également). Cela crée ensuite des RX, qui sont émis par la cible selon deux mécanismes:

- le freinage des électrons par les atomes de la cible crée un rayonnement continu (**rayonnement de freinage** ou **Bremsstrahlung** en allemand) dont une partie appartient au domaine des RX;
- les électrons accélérés ont une énergie suffisante pour exciter certains des atomes de la cible, en perturbant leurs couches électroniques internes. Ces atomes excités émettent des RX en retournant à leur état fondamental (stable).



Tube de Coolidge

et sur schéma:



Le tube de Coolidge est composé des éléments essentiels suivants:

1- Tube en verre ou en céramique: il constitue l'enceinte qui contient tous les autres éléments. Il doit être sous vide (l'air doit être éliminé pour qu'il ne constitue pas d'obstacle sur le chemin des électrons accélérés.)

2- Une cathode qui constitue la source des électrons: elle est sous la forme d'un filament qui sera chauffé par un courant de chauffage et qui va émettre les électrons par effet thermoïonique.

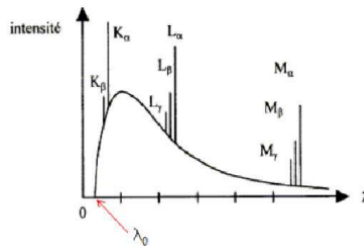
3- Une coupelle de focalisation: dont le rôle est d'empêcher les électrons émis par la cathode de se disperser dans toutes les directions.

4- Une anticathode (anode): elle constitue la cible pour les électrons accélérés et où seront produits les RX.

5- Un support pour la cible (en cuivre en général) dans lequel est incorporé un système de refroidissement qui va empêcher l'anode de fusionner sous l'effet de la chaleur dégagée par les électrons incidents.

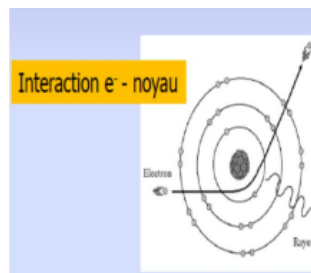
6- Une fenêtre en feuilles minces de béryllium: elle a le rôle de laisser sortir les RX tout en gardant le tube étanche à l'air extérieur.

Spectre du Rayonnement Emis par le Tube de Coolidge. En général c'est un spectre composé de deux types de spectres, le spectre **continu** et le spectre de **raies**. Dans le cas où l'énergie cinétique des électrons accélérés n'est pas assez importante pour libérer des électrons des couches internes des atomes de la cible, alors on n'obtient qu'un spectre continu.



Spectre global d'émission des rayons X

Le spectre continu de rayon X. Imaginez un électron ayant une énergie cinétique initiale E_0 qui heurte (interagit avec) un des atomes de la cible, comme l'illustre la figure. L'électron peut perdre une énergie ΔE , qui peut se traduire par l'émission d'un photon de RX qui rayonne à partir du site de la collision. (Il y a très peu d'énergie transférée au recul de l'atome en raison de la masse relativement élevée de ce dernier, on peut donc la négliger).



L'électron diffusé de la figure, ayant maintenant une énergie inférieure à E_0 , peut heurter un autre atome de la cible, générant un deuxième photon, dont l'énergie sera généralement différente de celle du photon produit dans la première collision.

Ce processus de diffusion peut continuer jusqu'à ce que l'électron soit- presque immobilisé. Chacun des photons générés par ces collisions forme une partie du spectre continu de RX.

Dans le schéma du spectre, on voit bien la longueur d'onde de seuil nettement définie $\lambda_0 = \lambda_{min}$ sous laquelle le spectre continu n'existe pas. Cette longueur d'onde minimale correspond à une unique collision frontale avec un atome cible, collision dans laquelle un électron incident perd toute son énergie cinétique initiale E_0 . Pratiquement toute l'énergie de l'électron est transférée d'un photon unique, dont la longueur d'onde associée (la plus petite longueur d'onde possible du RX) est déterminée par:

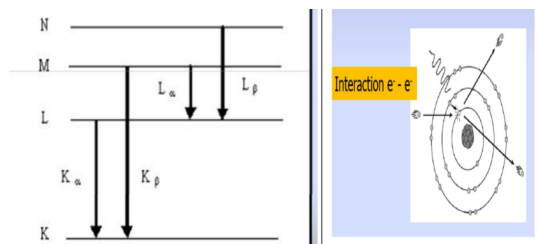
$$E_0 = E_{max} = h.f = h.c/\lambda_{min} \Rightarrow \lambda_{min} = h.c/E_{max}$$

La longueur d'onde de seuil λ_{min} est totalement indépendante du matériau de la cible.

le spectre de Raies. Si un faisceau d'électrons est dirigé vers une cible, les électrons sont susceptibles d'avoir une énergie suffisante pour arracher les électrons les plus liés au noyau des atomes constituant la cible. Si un électron d'un niveau inférieur est expulsé, les électrons des niveaux les plus élevés vont occuper la place laissée vacante en libérant l'excès d'énergie sous forme de photons de RX.

Concrètement, si des électrons de la couche K correspondant au niveau quantique $n = 1$ sont arrachés, les électrons d'état d'énergie plus élevée en occupant la place laissée vacante conduisent à la production de **raies caractéristiques** K_α , K_β , $K\gamma$...

De même, si la place vacante est sur la couche L ($n = 2$), il y a production de raies caractéristiques L_α , L_β , $L\gamma$ Le processus se répète pour toutes les couches M, N etc. Chaque'un de ces raies est en fait constitué de plusieurs raies très rapprochées correspondant à la structure fine des niveaux d'énergie atomique.



2.1.7. *Puissance de Tube à RX.* Pour que le Tube à RX puisse fonctionner, il doit consommer (absorber) une puissance, qui est égale à:

$$P \text{ (watts)} = u.i$$

avec, u (kv): est la tension (d.d.p) appliquée entre la cathode et l'anode.

i (mA): est l'intensité du courant produit par le faisceau d'électrons accélérés. Rendement énergétique de Tube à RX. Seule une fraction de la puissance P consommée au niveau de l'anode est utile à la production des RX. Si ϕ représente le flux rayonné par le tube (énergie transportée par seconde), le rendement R est donné par:

$$R = \phi/P = (K.i.u^2.z) / u.i = K.u.z$$

avec, K : est le coefficient de proportionnalité est égale 10^{-10} .

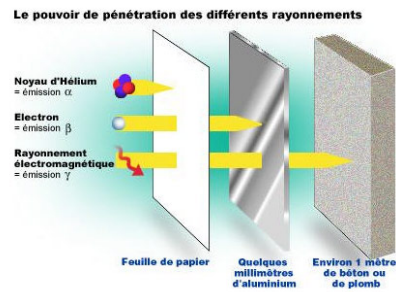
z : est le numéro atomique de la cible.

Les valeurs de tension accélératrice u varient selon les besoins de l'utilisation des RX, par exemple: 50kv en radioscopie, 100kv en radiographie et 200kv en radiothérapie. Un atome instable de nature ou après un contact avec un rayonnement va chercher à se stabiliser en émettant différents rayonnements:

- en perdant des protons et des neutrons: rayonnement α ;
- en transformant un neutron en proton ou vice-versa: rayonnement β^- ou β^+ ;
- en émettant des photons (particules composant la lumière): rayonnements X et gamma.

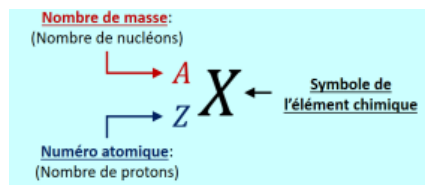
Les rayonnements provoquent des effets différents sur l'organisme en fonction du type de rayonnement et de la dose reçue.

L'énergie dégagée n'est en effet pas identique pour tous les rayonnements, et les moyens de s'en protéger sont donc différents. Par exemple, une feuille de papier est suffisante pour arrêter les rayonnements α , mais il faut un mètre de béton ou de plomb pour arrêter des rayonnements γ .



3. STRUCTURE ATOMIQUE

Un **atome** est la plus petite partie d'un corps simple. Les atomes sont les constituants élémentaires de toutes les substances solides, liquides ou gazeuses. Il est généralement constitué d'un **noyau** (de taille de 10^{-15}m) composé de particules appelées **nucléons** (protons et neutrons) autour desquels orbitent des électrons. Sa taille caractéristique est de l'ordre de l'angström, soit 10^{-10}m . L'écriture conventionnelle pour représenter un élément chimique est la suivante:



- Les neutrons sont électriquement neutres. Les protons possèdent chacun une charge électrique positive, appelée charge élémentaire: $e = 1,6 \cdot 10^{-19}\text{C}$. Les électrons possèdent chacun une charge électrique négative $-e = -1,6 \cdot 10^{-19}\text{C}$.

Un atome est électriquement neutre: il y a donc autant de protons que d'électrons.

- La masse d'un atome est la somme de la masse de tous ses nucléons et de ses électrons, et comme la masse de l'électron est négligeable devant celle des nucléons, il vient que:

$$m_{\text{atome}} = Z \cdot m_{\text{proton}} + (A - Z) \cdot m_{\text{neutron}}$$

Avec:

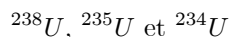
$$\begin{aligned} m_{neutron} &= 1.6726 \cdot 10^{-27} kg, \\ m_{proton} &= 1.6742 \cdot 10^{-27} kg \\ \text{et } m_{\text{électron}} &= 9.1094 \cdot 10^{-31} kg \end{aligned}$$

La masse atomique est mesurée en grammes (g), et comme les valeurs de cette masse sont très petites, on privilégie l'unité de masse atomique (u.m.a.). Où $1u.m.a = 1.66 \cdot 10^{-24}g$.

On note que cette unité de masse atomique est déterminée relativement à la masse d'un atome de carbone carbonfnf4 ($1u.m.a = \frac{1}{12}.m_c$), on appelle ce type de masse atomique la masse atomique relative.

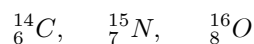
3.1. Les isotopes. Ce sont des nuclides qui ont le même nombre de proton Z . Deux isotopes ont le même nom chimique, ils possèdent exactement les mêmes propriétés chimiques et sont chimiquement indiscernables.

- Chaque élément chimique possède un nombre variable d'isotopes, les uns naturels, les autres artificiellement produits. Ainsi, parmi les 14 isotopes de l'uranium, on cite les 3 les plus importants:

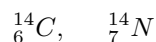


- Le nombre des isotopes d'un élément est directement lié à la structure nucléaire de celui ci, par exemple, pour $z = 20, 28, 50$ le nombre d'isotopes est plus grand que pour les éléments voisins. On verra que les nombres 20, 28, 50 font partie d'une série de nombres appelés nombres magiques, qui joueraient un rôle important dans la structure nucléaire.

3.2. Les isotones. Deux noyaux sont isotones s'ils ont le même nombre de neutron N . Dans les quelques exemples suivants, on a toujours $A - Z = N = 8$



3.3. Les isobares. Ce sont des noyaux qui ont le même nombre de masse A et, et nombre atomique différent. Deux noyaux isobares correspondent donc à des éléments chimiques distincts. Parmi d'inombrables exemples, citons:



3.4. Les isomères. Ce sont des noyaux ayant même nombre de masse A et même nombre atomique Z ($Z = A = N$) peuvent pourtant se distinguer par leur énergie interne. le noyau dont l'énergie interne est la plus basse est dit dans l'état fondamental, alors que pour les autres on parle d'états excités. Comme l'exemple de ${}^{80}_{35}Br$ existe sous deux formes: l'une et l'autre sont radioactives, mais de période différente.

3.5. Energie de liaison dans le noyau E_L : L'énergie de liaison E_L assure la cohésion des nucléons dans le noyau, et c'est l'énergie qu'il faut fournir pour annuler l'interaction entre les nucléons. Energie de masse du noyau + $E_L =$ Energie de masse de nucléons séparés.

Energie de liaison par nucléons $\frac{E_L}{A}$ permet de comparer la stabilité nucléaire de différents atomes, plus $\frac{E_L}{A}$ est élevé plus le noyau est stable.

3.6. Défaut de masse. Le défaut de masse d'un noyau Δm est la différence entre la somme des masses de ses nucléons isolés et la masse de ce noyau.

$$\Delta m = Z.m_p + (A - Z).m_n - M(A, Z)$$

Ce défaut de masse correspond à l'énergie de liaison des différents nucléons entre eux.

$$E_L = (Z.m_p + N.m_n - M) . C^2 > 0.$$

4. INTERACTION DES RAYONNEMENTS X OU γ AVEC LA MATIÈRE

L'interaction des photons d'origine extranucléaire (rayon X) et des photons d'origine nucléaire (rayon gamma) avec la matière est indépendante de leur origine.

Ces rayonnements ne peuvent être détectés que grâce à leurs interactions avec la matière: ils cèdent totalement, ou en partie leur énergie et en subissent des modifications.

Le champ électromagnétique va interagir avec les particules chargées présentes dans les tissus, seuls les électrons compte tenu de leur faible masse peuvent suivre les variations temporelles du champ électromagnétique. Les différents processus d'interaction d'absorption et de diffusion, conduisent à une **atténuation** du faisceau dans la direction incidente.

4.1. Loi d'atténuation (loi de Beer-Lambert). Lorsqu'une onde plane collimatée se propage dans un milieu homogène absorbant et non diffusant de longueur L , la variation d'intensité I en fonction de la distance parcourue (l'épaisseur x) dans ce milieu est donnée par la loi de Beer-Lambert:

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

avec, I_0 est l'intensité ou l'énergie du faisceau incident.

I est l'énergie du faisceau après avoir traversé x .

μ est le coefficient linéaire d'atténuation.

Cette loi exponentielle décroissante liant le nombre de photons émergent s'écrit:

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

avec, N est le nombre de photons transmis.

N_0 est le nombre de photons incidents.

4.1.1. *Remarques:* - le nombre de photons ayant interagi avec la matière est donc:

$$N_{inter} = N_0 - N_0 e^{-\mu x} = N_0 (1 - e^{-\mu x})$$

- Si le faisceau traverse plusieurs milieux de coefficients d'atténuation différents $\mu_1, \mu_2, \mu_3 \dots \mu_i$, sur des épaisseurs $x_1, x_2, x_3 \dots x_i$, le nombre de rayons émergents sera:

$$N(x) = N_0 e^{-(\mu_1 x_1 + \mu_2 x_2 + \mu_3 x_3 + \dots + \mu_i x_i)} \Rightarrow N(x) = N_0 e^{-\sum \mu_i x_i}$$

- Dans l'imagerie médicale, l'image radiographique est formée par les différences d'atténuation du faisceau de rayon X dans les milieux traversés.

- Dans le vide, un faisceau de rayonnements électromagnétiques émis à partir d'une source perd de son intensité à cause de la divergence dans l'espace de ce faisceau; à la distance de la source, l'intensité est:

$$I_x = \frac{I_0}{d^2}$$

4.2. **Couche de Demi-atténuation (C.D.A.).** On appelle C.D.A. l'épaisseur qui réduit de moitié le nombre de photons incidents

$$C.D.A = \frac{\log 2}{\mu}$$

si en remplace μ par sa valeur $\log 2/C.D.A.$ dans la loi d'atténuation, on obtient

$$N = N_0/2^n$$

n est le nombre de C.D.A.

- On peut exprimer la loi d'atténuation en fonction de la masse surfacique m :

$$N = N_0 e^{-\frac{\mu m}{\rho}}$$

et $\frac{\mu}{\rho}$ est le coefficient d'atténuation massique.

4.3. **les diverses formes d'interaction.** On les classe généralement selon le type de cible. la matière étant constituée d'électrons et de noyaux, les photons incidents peuvent interagir avec les uns et les autres.

4.3.1. *Interaction photon-électron est de trois types :* 1. le photon transmet toute son énergie à un électron et disparaît: **effet photo-électrique.**

2. le photon transmet une partie de son énergie et est diffusé: **effet Compton.**

3. le photon est dévié, sans perte d'énergie, par un électron: **diffusion Thomson-Rayleigh.**

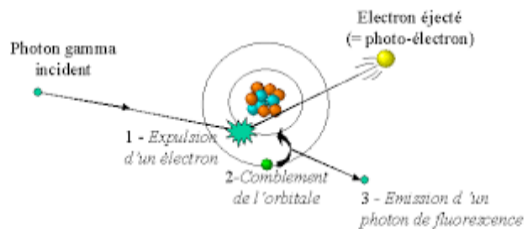
4.3.2. *Interaction photon-noyau est de deux types.* 1. Les réactions photonucléaires.

2. Effet de matérialisation (la production de paires d'électrons).

4.3.3. **Effet photo-électrique:** Le photon incident d'énergie $E_\gamma = \hbar.f$, interagit avec un électron dont l'énergie de liaison w est inférieur à E_γ . Il l'expulse et lui transfère une énergie cinétique $E_c = E_\gamma - w$.

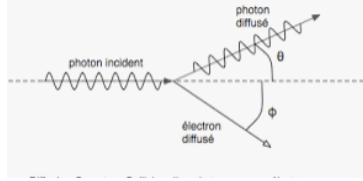
L'expulsion de l'électron laisse sur la couche électronique une place libre qui est vite occupée par un électron provenant d'une couche plus externe dont l'énergie de liaison est w' . Cette transition s'accompagne d'une émission d'un photon de fluorescence d'énergie: $E'_\gamma = w - w'$.

La place laissée libre par cet électron est à son tour comblé et ainsi de suite.



4.3.4. **Effet Compton:** Le photon incident a une énergie élevée et interagit avec des électrons faiblement liés, se qui conduit à suivant: le photon ne disparaît pas après le choc, mais son énergie et sa direction sont modifiées. Cette effet consiste en une diffusion du photon incident accompagnée perte de l'énergie, le photon incident d'énergie $\hbar.f$ frappe l'électron e , cet électron est projeté avec une énergie cinétique E_c sous un angle Φ , et applé électron de recul ou encore électron Compton.

On outre, un photon diffusé d'énergie $\hbar.f'$ inférieur à $\hbar.f$ repart dans une direction faisant un angle θ avec la direction d'incidence.



En utilisant la conservation de la quantité de mouvement et celle de l'énergie, on obtient:

$$\vec{P}_{photon} = \vec{P}'_{photon} + \vec{P}'_{électron}$$

$$\hbar.f = \hbar.f' + \Delta E$$

Avec $\Delta E = (m - m_0) c^2$ est la perte d'énergie de l'électron en mouvement.

En projetant sur deux axe, il vient:

$$\begin{aligned} ox/ \quad P_{photon} &= P'_{photon} \cdot \cos \theta + P'_{électron} \cdot \cos \Phi \\ oy/ \quad 0 &= P'_{photon} \cdot \sin \theta - P'_{électron} \cdot \sin \Phi. \end{aligned}$$

L'élimination de Φ à l'aide de $\cos^2 \Phi + \sin^2 \Phi = 1$ en utilisant les longueurs d'onde conduit à:

$$\hbar.f' = \hbar.f \left[1 + \hbar.f/m_0.c^2 (1 - \cos \theta) \right]^{-1}$$

ou bien, on écrit

$$\frac{1}{E_{diffusée}} - \frac{1}{E_{incidente}} = \frac{1 - \cos \theta}{m_0.c^2}$$

d'où l'énergie cinétique de l'électron Compton est

$$E_c = \hbar^2.f.f'/m_0.c^2 (1 - \cos \theta).$$

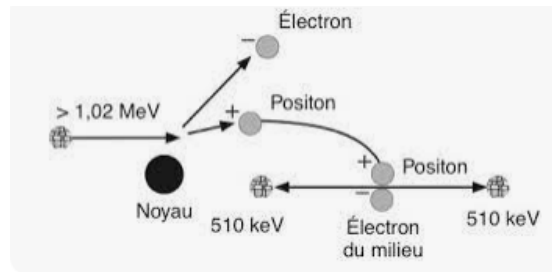
et le **déplacement Compton** est donné:

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

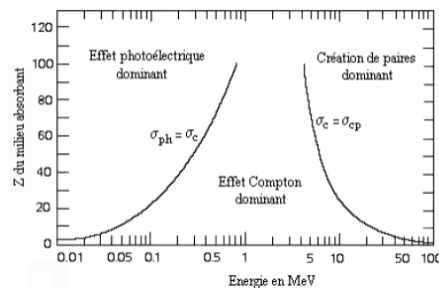
$\frac{\hbar}{m_0.c}$ est homogène à une longueur (longueur Compton) et vaut dans le cas de l'électron $0.00243nm$.

4.3.5. *Effet de matérialisation:* Quand un photon très énergétique ($E_\gamma > 2m_0.c^2 = 1.022MeV$) passant au voisinage du champ électrique très intense du noyau, il peut disparaître et donner naissance ou peut se matérialiser sous forme d'un électron et d'un positon (pair e^-, e^+). L'énergie du photon ayant été entièrement transformé en matière.

Le positon est rapidement freiné (ionisation + excitation), puis il s'annihile (dématérialisation) avec un électron du milieu en donnant naissance à deux photons de $0.511MeV$ chacun, et à 180° l'un de l'autre (qui vont être absorbés par le milieu). Et l'électron e^- devient libre de la matière.

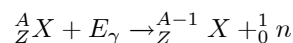


Domaines de prédominance: On peut en fonction du numéro atomique et de l'énergie du rayonnement électromagnétique, définir trois zones de prépondérance pour chacune des trois processus d'interaction:



- 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.

4.3.6. *Les réactions photo-nucléaires.* La réaction photo-nucléaire peut se produire si l'énergie de photon $E_\gamma > 10MeV$. Le photon est absorbé par le champ électrique intense du noyau, qui devient alors instable et se désintègre en émettant un ou plusieurs nucléons:



L'isotope ${}^{A-1}_Z X$ du noyau formé est radioactif, il émet un photon gamma lors du retour à l'état fondamental.

Remarque: Ces réactions de très haute énergie n'ont pas d'intérêt medical.

4.3.7. *Probabilités d'interactions:* Pour analyser la variation du coefficient d'atténuation linéaire μ , il est nécessaire de distinguer les coefficients d'atténuation linéaires relatifs à chacun des trois processus élémentaires fondamentaux décrits précédemment et qui peuvent se produire individuellement ou simultanément. Il faut donc étudier la probabilité d'interaction (ou d'absorption) relative à chacun des 3 effets.

τ : coefficient d'atténuation linéaire pour l'effet photo-électrique,

σ : coefficient d'atténuation linéaire pour l'effet Compton,

π : coefficient d'atténuation linéaire pour l'effet matérialisation.

On peut écrire alors $\mu = \tau + \sigma + \pi$ et aussi: $\mu/\rho = \tau/\rho + \sigma/\rho + \pi/\rho$ si on considère les coefficients d'atténuation massiques.

Probabilités d'interactions pour chaque processus: - pour l'effet photo-électrique τ/ρ , Le coefficient s'écrit selon la loi:

$$\tau/\rho = \frac{kz^3}{E^3}$$

- pour l'effet Compton le coefficient σ/ρ est indépendant de la matière irradiée, donc indépendant de z , et décroît donc uniquement en fonction de l'énergie incidente $\left(\frac{\sigma}{\rho} \propto \frac{1}{E}\right)$.

- pour l'effet de matérialisation le coefficient π/ρ suit la loi:

$$\pi/\rho = k.E.z^2.$$

Avec: k est la constante de proportionnalité,

z : est le numéro atomique du milieu traversé,

E : est l'énergie du photon incident.

4.4. Domaines d'applications médicales: Concernant l'importance relative et dans le domaine d'application médicale, c'est l'effet Compton qui est le plus important surtout en **radiothérapie**, il permet d'éviter l'absorption des RX par les atomes de z élevés tel que le calcium et ainsi d'atteindre les tumeurs profondes.

En radiodiagnostic ($50KeV-100KeV$), l'effet photoélectrique intervient.

C'est lui qui permet de faire apparaître le contraste naturel dû au Calcium dans l'os (${}_{20}Ca$).

REFERENCES

- [1] Physique pour les sciences de la vie et de la santé, Clément Santamaria
- [2] Polycopié de biophysique; Dr. Segni R.
- [3] Cahier de biophysique des radiations - 2ATP [https://p1.asso2atp.fr > uploads > 2018/08 > Cahie...PDF](https://p1.asso2atp.fr/uploads/2018/08/Cahie...PDF).
- [4] Cours de RadioActivité du Professeur Lacoeuille.

UNSTITUT DES SCIENCES VÉTÉRINAIRES

E-mail address: bensaid@hotmail.com