

Institut des sciences vétérinaires

RAYONNEMENTS

Dr. AYADI A

BIOPHYSIQUE

SOMMAIRE

1. Classification des rayonnements
 - 1.1 Champ électromagnétique
 - 1.2 Spectre électromagnétique
 - 1.3 Caractéristiques des ondes électromagnétiques OEM
 - ✚ Propagation et célérité :
 - ✚ Période, fréquence et longueur d'onde :
 - ✚ Energie d'une onde électromagnétique
 - 1.4 Dualité onde-corpuscule
 - 1.5 Rayonnement gamma (γ)
 - ✚ Découverte
 - ✚ Nature
 - ✚ Mécanisme de production du rayonnement gamma
 - 1.6 Rayonnement X
 - ✚ Découverte
 - ✚ Nature
 - ✚ Production des rayons X
 - ✚ Principe de production des rayons X
 - ✚ Spectre de Rayons X
2. Interaction rayonnement matière :
 - 2.1 Rayonnement ionisant
 - 2.2 Rayonnement non-ionisant
 - 2.3 Interaction des Particules non chargées avec la matière
 - 2.3.1 Phénomène d'atténuation
 - ✚ Loi d'atténuation:
 - ✚ Coefficient d'atténuation massique (μ/ρ)
 - ✚ Couche de demi-atténuation (CDA)
 - 2.3.2 Phénomènes élémentaire lors de l'Interaction photons –matière :
 - ✚ Effet photo-électrique :
 - ✚ L'effet Compton
 - ✚ création de paires ou effet de matérialisation :
 - ✚ Domaines de prédominance
 - ✚ Coefficient d'atténuation globale

1. Classification des rayonnements

On classe les rayonnements selon leurs natures ou selon leurs interactions avec la matière.

Elles peuvent être classés selon leurs natures soit en:

✚ Rayonnements Electromagnétiques (REM) :

Exemple : **Rayons X et γ**

✚ Rayonnement particulaire (corpusculaires), (RP) :

Exemple : particule de masse non-nulle

- **chargés** (**électrons et positons**), qui agissent avec les électrons de la matière cible
- **neutres** (**neutrons**), qui agissent sur les noyaux de la matière cible
- **Rayonnement alpha (α) et (β)**

Ou elles sont classés selon leurs interactions avec la matière en :

✚ Rayonnements ionisants,

✚ Rayonnements non ionisants

1. Rayonnements Electromagnétique

1.1 Champ électromagnétique

Un champ électromagnétique est la zone d'influence créée par les ondes d'un **champ électrique** \vec{E} et d'un **champ magnétique** \vec{B} . Les deux ondes forment des vagues invisibles à l'œil nu (oscillations) qui progressent régulièrement et en alternance dans l'environnement.

Le champ électrique varie en grandeur et est orienté de façon perpendiculaire à la direction de propagation du rayonnement, il résulte de la présence de charges électriques. **Le champ magnétique est orienté de façon perpendiculaire au champ électrique**, il se crée lorsque en provoque un mouvement alternatif de charges électriques. Les deux champs **se déplacent à la vitesse de la lumière (c)**.

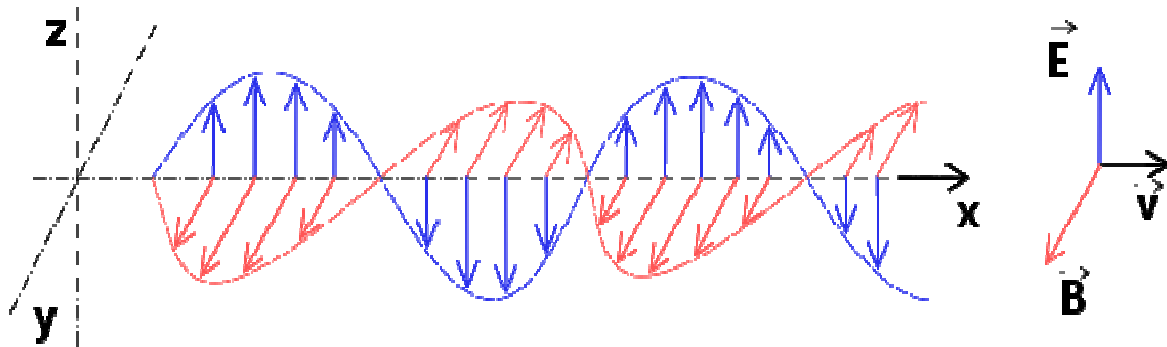
Les ondes du champ électromagnétique se mesure selon :

- **la fréquence ν** en Hertz (nombre d'oscillations effectuées par l'onde en 1 seconde)
- **la longueur d'onde λ** (distance entre le sommet d'une onde et le sommet de l'onde suivante).

La longueur d'onde est inversement proportionnelle à la fréquence : **plus la fréquence est élevée plus la longueur d'onde est courte**.

Plus la fréquence est basse, plus les champs électriques et magnétiques sont **distincts**.

Plus la fréquence est haute, plus les champs électriques et magnétiques sont **liés**.



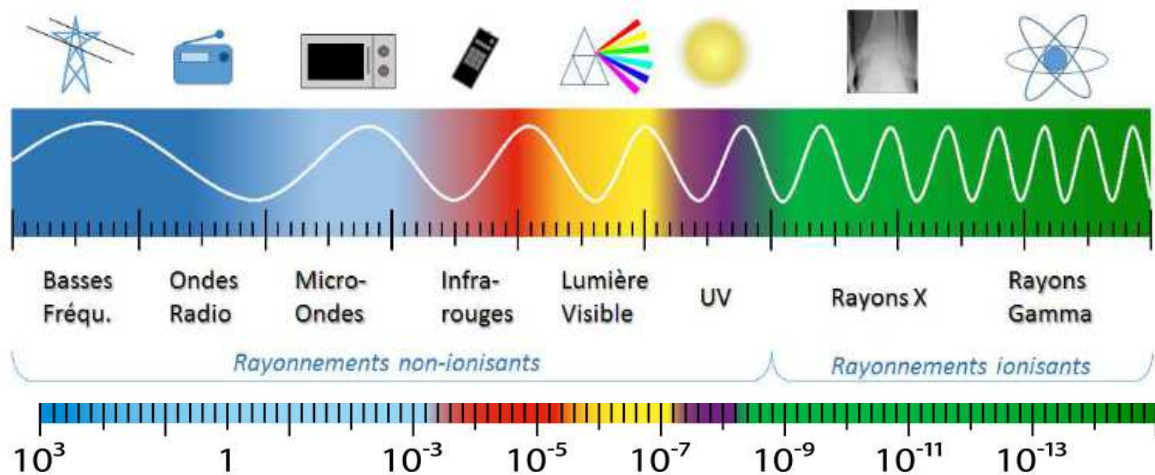
v = Vitesse de déplacement de l'onde \vec{E} = Champ électrique et \vec{B} = Champ magnétique

1.2 Le spectre électromagnétique

Le spectre électromagnétique se décompose en **rayonnements non-ionisants** et **rayonnements ionisants** selon la fréquence ou la longueur des ondes électromagnétiques.

Les ondes électromagnétiques transportent de l'énergie appelée « **photon** » à l'origine du rayonnement. L'énergie du rayonnement varie selon la fréquence.

Généralement les « **champs** » désignent davantage les fréquences basses et les « **rayons** », les hautes fréquences qui diffusent davantage d'énergie dans l'espace.



Spectre électromagnétique

Remarque :

- Une **onde électromagnétique monochromatique**, c'est-à-dire présentant **une seule fréquence** est aussi appelée **onde sinusoïdale**.

- L'onde électromagnétique est une onde plane (c'est-à-dire que sa propagation dans le vide se fait dans une direction perpendiculaire au plan défini par \vec{E} et \vec{B}).
- Les intensités du champ électrique et magnétique sont reliées par la relation : $C = \frac{E}{B}$,
 - E : champ électrique en volt par mètre ($V \cdot m^{-1}$)
 - B : champ magnétique en teslas (T)
 - C : célérité en mètres par seconde ($m \cdot s^{-1}$)

1.3 Caractéristiques des ondes électromagnétiques OEM

✚ Propagation et célérité :

Une onde électromagnétique permet le transport de l'énergie sans aucun support matériel (propagation dans le vide).

La célérité dans le vide et dans l'air d'une OEM est : $C = 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

La vitesse de propagation v des OEM dépend du milieu de propagation. Dans d'autres milieux, elle est inférieure à C .

Exemples :

Dans le verre : $v_{\text{verre}} = 2,00 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

Dans l'eau : $v_{\text{eau}} = 2,25 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

Chaque milieu transparent est caractérisé par son indice de réfraction « n » qui dépend parfois de la fréquence, et qui permet d'exprimer la vitesse dans le milieu: $v_{\text{milieu}} = C / n$

Dans la matière, Les ondes électromagnétiques (O E M) peuvent se propager dans certains milieux matériels et pas d'autre, suivant leurs fréquences une matière peut se montrer :

- transparente (propagation possible)
- opaque (pas propagation, les ondes sont totalement absorbées, diffusées ou réfléchies).

✚ Période, fréquence et longueur d'onde :

Phénomène périodique : phénomène qui se reproduit identique à lui-même à intervalles de temps réguliers.

Période T : durée d'une oscillation ou c'est le temps nécessaire pour que l'onde effectue un cycle

Fréquence ν : nombre d'oscillations par seconde

$$\nu = \frac{1}{T}$$

ν : fréquence en hertz (Hz) ou (s^{-1})
 T : période en secondes (s)

.On utilise des multiples de Hz :

le kilohertz : $1 \text{ kHz} = 10^3 \text{ Hz}$

le mégahertz : $1 \text{ MHz} = 10^6 \text{ Hz}$

le gigahertz : $1 \text{ GHz} = 10^9 \text{ Hz}$

Longueur d'onde λ : distance parcourue par l'onde durant une période T . Elle dépend du milieu de propagation.

$$\lambda = c \cdot T = \frac{c}{\nu}$$

λ : longueur d'onde en mètres (m)

c : célérité en mètre par seconde ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

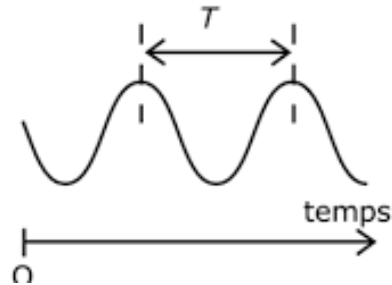
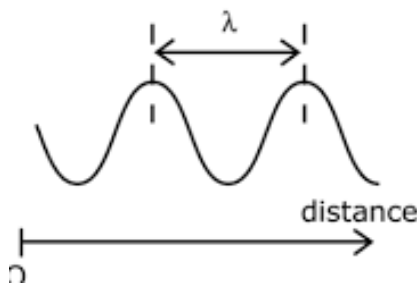
T : période en secondes (s)

ν : fréquence en hertz (Hz)

le nanomètre : $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ mètre}$

le micromètre : $1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{ mètre}$

le centimètre : $1 \text{ cm} = 10^{-2} \text{ mètre}$.



⚡ Energie d'une onde électromagnétique

Les échanges d'énergie portée par le rayonnement électromagnétique qui ont lieu entre le soleil et le système terre-océan-atmosphère ne se font pas de manière continue, mais de façon discrète, **sous forme de paquets d'énergie, véhiculés par des corpuscules élémentaires immatériels (masse nulle), les photons. Chaque photon transporte ainsi un quantum d'énergie proportionnel à la fréquence de l'onde électromagnétique considérée** ; cette énergie est d'autant plus grande que la fréquence est élevée.

En 1905, Einstein considérait les quanta de Planck pour énoncer la relation d'énergie du photon en fonction de la fréquence de l'onde :

$$E = h \nu$$

E : l'énergie de l'onde électromagnétique en joule (J)

ν : la fréquence de l'onde (Hz ou s^{-1})

h : la constante de Planck ($h = 6,625 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$)

A l'échelle atomique, il est d'usage d'exprimer, l'énergie en électron-volt (eV).

1.4 Dualité onde-corpuscule

La lumière peut être considérée comme un flux de photons ou comme la propagation d'une onde électromagnétique. La lumière est une forme particulière d'énergie. Elle se manifeste tantôt par une onde (aspect ondulatoire), tantôt sous la forme d'un flux de particules élémentaires appelé quanta ou encore photons (aspect corpusculaire). On parle **du principe de dualité onde-corpuscule**.

En 1922, **louis de Broglie** a résolu en partie le problème **de la dualité ondulatoire et corpusculaire des ondes électromagnétiques** de matière à les associer en attribuant une masse. Cela a permis d'appliquer la relation d'Einstein : $E = m c^2$.

Broglie pose une relation pour toute particule matérielle en mouvement possède un aspect ondulatoire. On peut donc lui associer une longueur d'onde λ dépendant de sa quantité de mouvement :

$$E = h \cdot \nu = h \cdot c / \lambda = m c^2$$

$$\text{Soit } \lambda = h / P \text{ ou } \lambda = h / m \cdot \nu$$

$$h \cdot \nu \text{ (J)} = 3.10^8 \cdot 6.6.10^{-34} / \lambda \text{ (m)} = 1.98.10^{-25} / \lambda \text{ (m)}$$

L'énergie est exprimée en électron-volt (eV) qui représente l'énergie acquise par l'électron lorsqu'il est accéléré par une différence de potentiel de 1 Volt = $1.6.10^{-19}$ (eV).

La longueur d'onde exprimée en (Å°)

$$h \cdot \nu \text{ (eV)} = 12400 / \lambda \text{ (Å°)}$$

1.5 Rayonnement gamma (γ)

✚ **Découverte** : La découverte des rayons gamma en 1900 est due à Paul **Villard**, chimiste français (1860-1934), qui a observé ce rayonnement lors de la désexcitation d'un noyau atomique résultant d'une désintégration, ce processus d'émission est appelé « radioactivité gamma ».

✚ **Nature** : Les rayons gamma sont un type d'onde sur le spectre électromagnétique. Parmi toutes les ondes du spectre, les rayons gamma ont **la longueur d'onde la plus courte** de 10^{-14} m à 10^{-12} m et très énergétiques, ils traversent facilement la matière et **sont très dangereux pour les cellules vivantes**. Le rayonnement gamma est constitué de photons, comme la lumière visible ou le rayonnement X.

d'où Energie E_γ : $E_\gamma = h \nu = hc / \lambda$

✚ Mécanisme de production du rayonnement gamma

On distingue plusieurs sources possibles de production de rayonnement.

➤ Rayonnement thermique

Seul un milieu extrêmement chaud ($T = 10^8$ K) est susceptible de produire un rayonnement gamma. De tels milieux sont extrêmement rares, et ce processus n'est pas fondamental pour la production de ce rayonnement.

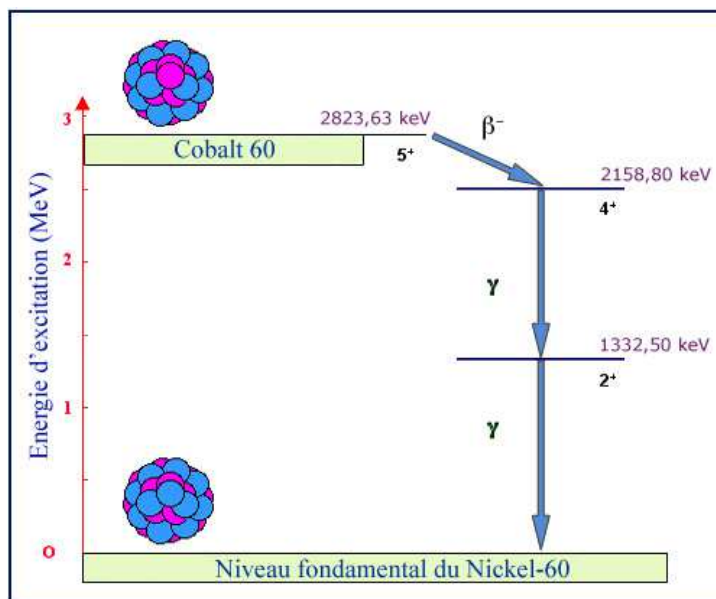
➤ Rayonnement de freinage

Un électron passant au voisinage d'une particule chargée est soumis à son champ coulombien. La décélération de l'électron s'accompagne d'une perte d'énergie sous forme de rayonnement γ lorsque l'électron a une vitesse relativiste.

➤ Désexcitation d'un noyau :

L'émission γ accompagne généralement les transformations radioactives. Lorsque le noyau est à un état excité, il y a un retour à un état stable (désexcitation spontanée) en émettant un photon γ d'énergie égale à la différence d'énergie entre le niveau énergétique de départ et celui d'arrivée. Les énergies sont quantifiées, le spectre d'émission des photons γ est discontinu. Les désintégrations gamma sont généralement instantanées et suivent de très près l'émission de particules alpha ou bêta.

Une telle désexcitation du noyau pourra intervenir soit lors de l'interaction d'un noyau avec des neutrinos soit au cours de certaines réactions thermonucléaires.



Le noyau perd les 2158,80 keV de son énergie d'excitation en émettant un premier photon gamma suivi d'un second. L'émission des deux photons suit de très près celle de l'électron et de l'antineutrino.

1.6 Rayonnement X

+ Découverte

Fin 1895, **Wilhelm Conrad Röntgen, physicien allemand**, découvre quasiment par hasard les rayons X. Une découverte qui va révolutionner la compréhension du monde dans lequel nous vivons, elle appliquée rapidement à la médecine, devint la radiologie. Elle sera couronnée par le premier prix Nobel de physique décerné en 1901.

+ Nature

Les rayons X sont des ondes électromagnétiques utilisées dans de nombreuses applications dont l'imagerie médicale, que vous connaissez sous le nom de radiographie conventionnelle.

Ils font partie du spectre électromagnétique comme la lumière visible.

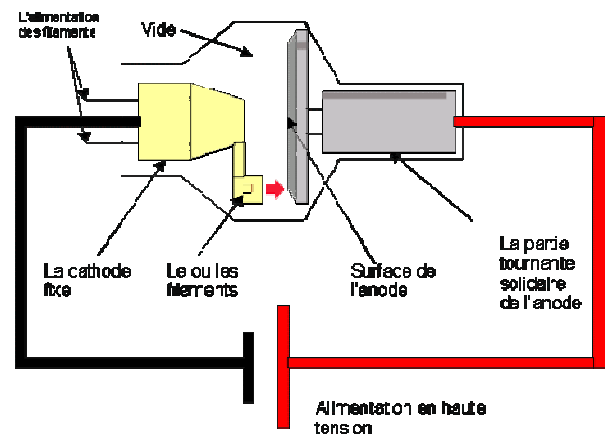
Les rayons X ont **une longueur d'onde** très courte se situant entre 10^{-12} m et 10^{-8} m. Notre œil est incapable de percevoir ces rayons, car ils ne font pas partie de la lumière visible.

Les rayons X ont **une haute fréquence**, de 3×10^{16} Hz à 3×10^{19} Hz, ils sont très énergétiques traversant plus ou moins facilement les corps matériels et un peu moins nocifs que les rayons gamma. C'est donc pourquoi les rayons X sont dangereux.

+ Production des rayons X

Comment sont-ils produits ?

Les Rayons X sont produit à l'aide d'un tube à rayons X (Coolidge, Crookes) composé de deux électrodes : l'anode ou l'anticathode et la Cathode. La cathode, qui est relié au pole négatif (a basse tension), et constituée d'un filament de tungstène émet par effet thermoélectronique, des électrons qui se rendent jusqu'a l'anode, qui lui est relié au pole positif (haute tension). Cela crée ensuite des rayons X.



+ Principe de production des rayons X

- **Effet thermoélectronique** : un filament de tungstène (cathode (-)) est chauffé à très haute Température à l'aide d'un courant électrique de faible intensité et de faible tension.
- **Accélération des électrons** : le filament de tungstène émet alors des électrons qui sont accélérés par une tension U (qq dizaines de KeV), et qui se précipitent vers une cible métallique (anode (+)). Sous l'action du champ électrique U, ils acquièrent une énergie cinétique :

$$E = \frac{1}{2} m v^2 = e U$$

- **Concentration du faisceau d'électrons** : afin d'éviter une divergence trop importante due à la répulsion des électrons entre eux, le filament est entouré d'un cylindre porté à un potentiel négatif ; c'est une pièce de concentration qui permet la **focalisation** du faisceau d'électrons vers la cible.
- **émission du rayonnement** : le rayonnement est émis perpendiculairement au faisceau d'électrons incidents, et traverse le bord du tube par une « fenêtre »

La **puissance du générateur** exprimée en watts a pour expression :

$$P \text{ (watts)} = U \text{ (kV)} \cdot i \text{ (mA)}$$

U : est la valeur de la tension accélératrice.
 i : est l'intensité du courant électronique.

Seule une fraction (1%) de cette puissance consommée au niveau de l'anode est utile à la production des rayons X. Si \emptyset représente le **flux rayonné par le tube** (énergie transportée par seconde), le **rendement énergétique** du tube est égale à :

$$R = \emptyset/P = (k \cdot i \cdot U^2 \cdot Z) / (U \cdot i) = k \cdot U \cdot Z$$

K : est le coefficient de proportionnalité égale à 10^{-10}

U : est la tension accélératrice exprimée en volts.

Z : est le numéro atomique de la cible.

- si I augmente, le nombre d'électrons émis augmente, et donc le nombre de photons X émis augmente
- si U augmente, l'énergie des électrons émis augmentent, et donc l'énergie maximale des photons X émis augmente

La plupart de la puissance électrique $P = U \cdot i$ est **consommée sous forme de chaleur**, si bien que la **puissance rayonnée** \emptyset effectivement sous forme de rayons X $\emptyset = P_R = k \cdot i \cdot U^2 \cdot Z$ est faible.

N.B : La tension accélératrice variée selon les besoins de l'utilisation des rayons X :

- 50 kV en radioscopie.
- 100 kV en radiographie.
- 200 kV en radiothérapie.

✚ Spectre de Rayons X

Le spectre continu ou spectre de Bremsstrahlung : qui est lié à un freinage brutal des électrons qui passent tout près d'un noyau, sans provoquer l'ionisation de l'atome. La plus grande quantité d'énergie est convertie en chaleur par les collisions avec les atomes de l'anticathode. Mais d'après la théorie électromagnétique, le ralentissement des électrons est accompagné par l'émission d'un rayonnement électromagnétique. L'énergie ΔW perdue par l'électron dans ce freinage se retrouve dans l'énergie $h\nu$ d'un photon émis. ΔW peut avoir n'importe quelle valeur inférieure à l'énergie cinétique eV que possède l'électron en arrivant sur l'anticathode. Par conséquent, la longueur d'onde peut avoir n'importe quelle valeur satisfaisant à la condition $eV \geq h\nu$.

Le spectre continu est dû à la décélération des électrons incidents lorsqu'ils entrent en contact avec l'anticathode. Certains électrons, stoppés net par un seul choc, transmettent toute leur énergie et donnent naissance à des photons X dont l'énergie $h\nu$ est inférieure ou égale à l'énergie eV des électrons incidents.

la valeur limite de la longueur d'onde des photons X émis est :

$$\lambda_{min} = \frac{hc}{eV} \Rightarrow \lambda_{min}(\text{\AA}) = \frac{12400}{V(\text{volts})}$$

La longueur d'onde des photons émis ne peut être inférieure à λ_{min} qui décroît quand la tension croît. On remarque que cette longueur d'onde est indépendante de la cible et ne dépend que de la tension d'accélération des électrons.

Supposons que l'on bombarde une cible de Mo avec des électrons accélérés sous des tensions croissantes. Étudions pour chaque tension d'accélération la répartition du spectre obtenu, c'est-à-dire l'évolution de l'intensité des rayons X émis en fonction de leur longueur d'onde. Jusqu'à une tension de 20 kV, on obtient un spectre continu qui s'arrête vers les courtes longueurs d'onde. À partir de 25 kV, des raies d'émission très intenses apparaissent ; elles se détachent du spectre continu : ce sont **les raies caractéristiques**.

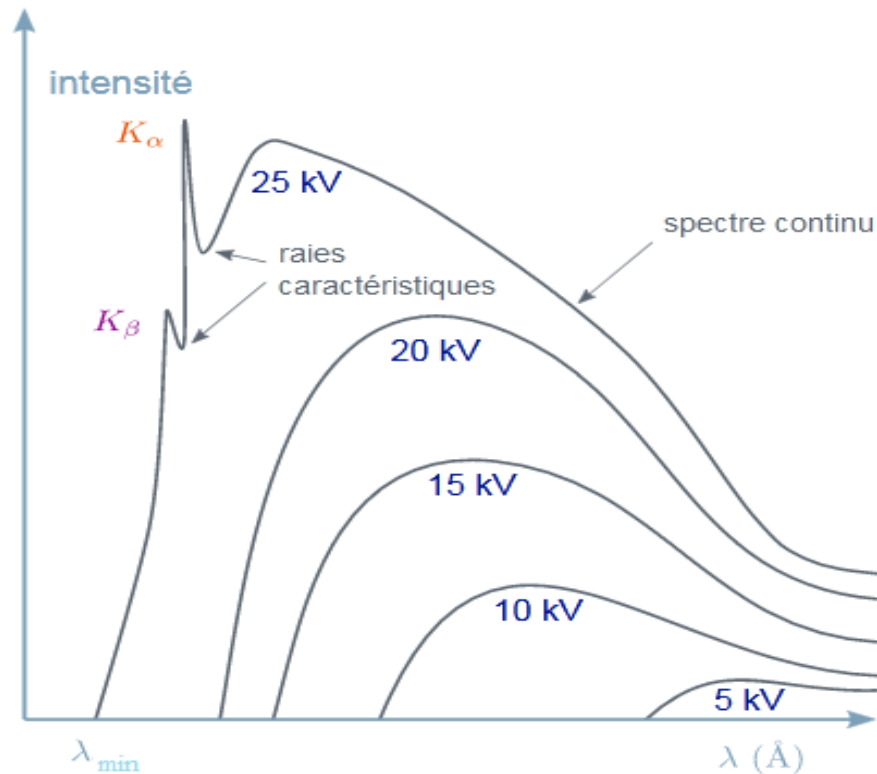


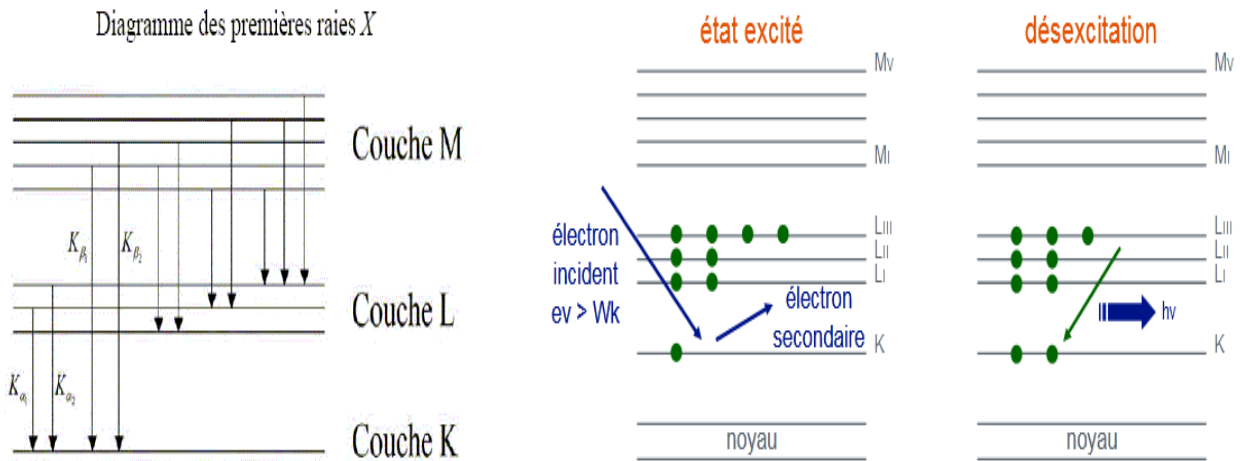
Schéma du spectre d'émission X du molybdène en fonction de la tension appliquée V

Le spectre des raies caractéristiques : Lorsqu'un électron de haute énergie pénètre à l'intérieur de l'atome, il peut en arracher un électron appartenant à une couche intérieure (K, L,...). Dans un temps très court, un électron d'une couche supérieure vient prendre la place laissée vide. Ce processus est accompagné par l'émission d'un rayonnement électromagnétique dont la fréquence est proportionnelle à la différence des énergies de l'électron sur les orbites, avant et après la transition.

Exemple : Si un électron est éjecté d'un niveau d'énergie W_1 et est remplacé par un électron d'un niveau d'énergie $W_2 < W_1$, le photon X émis aura une énergie E telle que :

$$E = W_1 - W_2 = \frac{hc}{\lambda} \Rightarrow \lambda = \frac{hc}{(W_1 - W_2)}$$

N.B : La différence entre les énergies de deux électrons appartenant à deux couches voisines est la plus grande pour les couches les plus intérieures.



La couche définie par $n = 1$ (appelée pour des raisons historiques la couche K). Si l'électron qui comble la vacance de couche K provient de la couche où $n = 2$ (appelée couche L), le rayonnement émis est **la raie K_{α}** , s'il provient de la couche où $n = 3$ (appelée couche M) il produit **la raie K_{β}** ...etc. Le trou laissé dans la couche L ou M sera comblé par un électron provenant d'une couche supérieur de l'atome.

N.B : les rayons X émis **par ionisation** présentent donc **un spectre de raies**

Raies X	transitions électroniques	énergie des RX	Z	gamme d'éléments
K_{α}, K_{β}	couche L, M ---> couche K	1 keV à 40 keV	11 à 60	Na - Nd
$L_{\alpha}, L_{\beta}, L_{\gamma}$	couche M, N, O --->couche L	1 keV à 20 keV	30 à 92	Cu - U
M	couche N, O --->couche M	1 keV à 4 keV	60 à 92	Nd - U

Remarque : C'est l'utilisation de ce spectre qui est utilisée dans le domaine de la cristallographie et de l'analyse chimique par fluorescence ". Il présente **peu d'intérêt en médecine**

Le spectre global résulte de la superposition du spectre continu du rayonnement de freinage (qui est prédominant) et du spectre de raies.

2. Interaction rayonnement matière :

Les rayonnements sont classés selon leurs interactions avec la matière en :

2.1 Rayonnement ionisant

Un rayonnement ionisant est un rayonnement dont l'énergie électromagnétique est suffisante pour provoquer **l'ionisation** d'atomes ou de molécules et abimer les cellules humaines par exemple.

Plus la fréquence est élevée, plus les ondes transportent une énergie capable **transformer** la structure électrique d'un atome ou d'une molécule.

L'ionisation est le fait d'enlever ou d'ajouter des électrons à un atome ou à une molécule qui devient **instable** (ion).

Pour se stabiliser l'ion émet différents **rayonnements** (rayons alpha, rayons bêtas, rayons X et gamma).

Les éléments instables qui se désintègrent en émettant des rayonnements ionisants sont appelés **radionucléides**.

On distingue deux types des Rayonnements ionisants :

- Un rayonnement est dit « **directement ionisant** » lorsqu'il est constitué de **particules électriquement chargées**, d'énergie suffisante pour produire des ions (atomes porteurs de charges électriques) par interaction avec la matière.

Exemple : rayons alpha, rayons bêtas

- Un rayonnement est dit « **indirectement ionisant** » lorsqu'il est constitué de **particules non chargées électriquement**, dont l'énergie est suffisante pour produire, selon plusieurs types d'interactions, une ionisation de la matière.

Exemple : rayons X et gamma

2.2 Rayonnement non-ionisant

Un rayonnement non-ionisant est un rayonnement dont l'énergie électromagnétique est **insuffisante** pour provoquer l'ionisation d'atomes ou de molécules.

Plus la fréquence est basse, moins les ondes transportent d'énergie.

La plupart des rayonnements de notre **quotidien** (radio, GSM, micro-ondes, etc.) sont non ionisants.

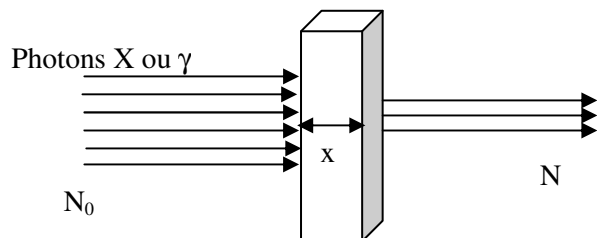
2.3 Interaction des Particules non chargées avec la matière

On s'intéresse à l'interaction d'un ensemble de photons (X ou γ) et avec la matière, en caractérisant leur atténuation en fonction de l'épaisseur.

2.3.1 Phénomène d'atténuation

Loi d'atténuation:

Quand un faisceau de rayons X et γ traverse un matériau, il en ressort atténué. On dit qu'une certaine fraction du faisceau est absorbée par le matériau. Dans le cas d'un faisceau monochromatique parallèle de rayons X ou γ , le nombre de rayons émergent (N) n'ayant subi aucune interaction dans la traversée d'un écran (d'un matériau homogène) d'épaisseur x est lié au nombre de rayons incidents (N_0) par la relation exponentielle :



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

Le coefficient de proportionnalité μ est appelé coefficient linéaire d'atténuation. Il a pour dimension l'inverse d'une dimension et s'exprime en cm^{-1} .

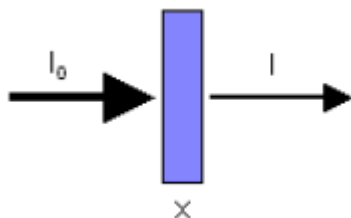
➤ μ dépend :

- du rayonnement incident (Energie), μ croît avec l'énergie.
- de la nature du matériau traversé. Z et ρ (os \neq tissus... \neq cuivre..)

➤ Le nombre de photons ayant interagi avec la matière est donc :

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

➤ Puisque les photons considérés sont monochromatiques une relation analogue relie l'énergie incidente I_0 du faisceau et son énergie après avoir traversé une épaisseur x :



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

➤ Si on considère un milieu matériel dont plusieurs coefficients d'atténuation différents ($\mu_1, \mu_2, \mu_3, \dots, \mu_i$) d'épaisseur ($x_1, x_2, x_3, \dots, x_i$) respectivement, le nombre de rayons émergents sera :

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

✚ Coefficient d'atténuation massique (μ/ρ)

Le coefficient d'atténuation linéaire μ dépend de la nature du matériau. Si on considère μ_1 de l'eau et μ_2 de l'air, les mesures montrent que $\mu_1 > \mu_2$. Il est alors apparu plus fructueux d'introduire la **masse volumique ρ** du milieu traversé pour avoir μ/ρ représentant le coefficient d'atténuation massique.

Dans ce cas, la loi d'atténuation s'écrit :

$$N(x) = N_0 e^{-\mu_m m}, \quad \mu_m (\text{cm}^2/\text{g}) = \mu (\text{cm}^{-1}) / \rho (\text{g}/\text{cm}^3)$$

Avec $m = x \rho$, masse par unité de surface du matériau considéré (unité : $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$) ou ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$)

- **Remarque :**

- L'image radiographique est formée par les différences d'atténuation du faisceau de rayons 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

d de la source, l'intensité est : $I_x = \frac{I_0}{d^2}$

✚ Couche de demi-atténuation (CDA)

C'est l'épaisseur nécessaire pour atténuer de moitié le nombre de photons incidents.

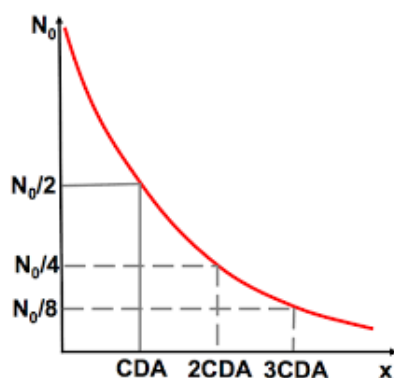
$$\text{CDA} = x_{1/2}$$

Pour une épaisseur $x = 1 \text{ CDA}$, on a : $N = N_0/2 \rightarrow N/N_0 = 1/2 = e^{(-\mu \text{CDA})}$

$$\text{Donc } \text{CDA} = \ln 2 / \mu$$

Le CDA représente une caractéristique des différents matériaux vis-à-vis des rayonnements électromagnétiques.

La loi d'atténuation s'écrit aussi :



$$N(x) = N_0 / 2^n \quad \text{où} \quad n = x / \text{CDA}$$

2.3.2 Phénomènes élémentaire lors de l'Interaction photons –matière :

L'atténuation des photons est liée aux interactions élémentaires entre les photons incidents et les constituants du milieu matériel (électrons et noyau). Ces interactions élémentaires peuvent conduire à **une absorption du photon incident** ou à **une diffusion du photon incident** qui concourt toutes les deux à l'atténuation.

Les photons X et γ interagissent avec la matière par plusieurs processus :

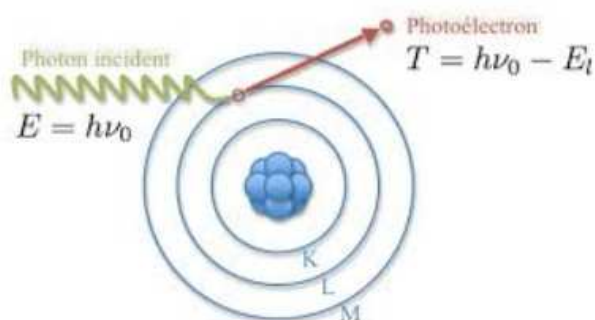
- Si les photons interagissent avec les électrons on a :
 - **Effet photo-électrique** : si le photon transmet toute son énergie à un électron et disparaît
 - **Effet-Compton** : si le photon transmet une partie de son énergie et est diffusé
 - **Diffusion Thomson-Rayleigh**: si le photon est dévié, sans perte d'énergie, par un électron
 - le photon n'interagit pas avec la matière : il est transmis sans aucune perte d'énergie
- Si les photons interagissent avec le noyau on a :
 - **Effet de matérialisation ou phénomènes de création de paire** : ici les photons sont très énergétiques.

⚡ Effet photo-électrique :

L'effet photo-électrique est une interaction photon-électron. Il résulte du transfert de la totalité de l'énergie du photon incident $h\nu$ sur un électron de l'un des atomes de la cible. Cet effet ne se produit que si l'énergie du photon est supérieure à l'énergie de liaison W_L de l'électron. L'électron est alors éjecté du cortège électronique de l'atome avec une énergie cinétique $E_C = h\nu - W_L$. L'électron expulsé, appelé Photo-électron, épuise son énergie cinétique en ionisations et excitations.

Cette condition donne l'équation de l'effet photoélectrique : $h\nu = E_c + W_L$

Cet **aspect qualitatif** du rayonnement électromagnétique (énergies des photons) ne peut pas être décrit par le modèle ondulatoire.

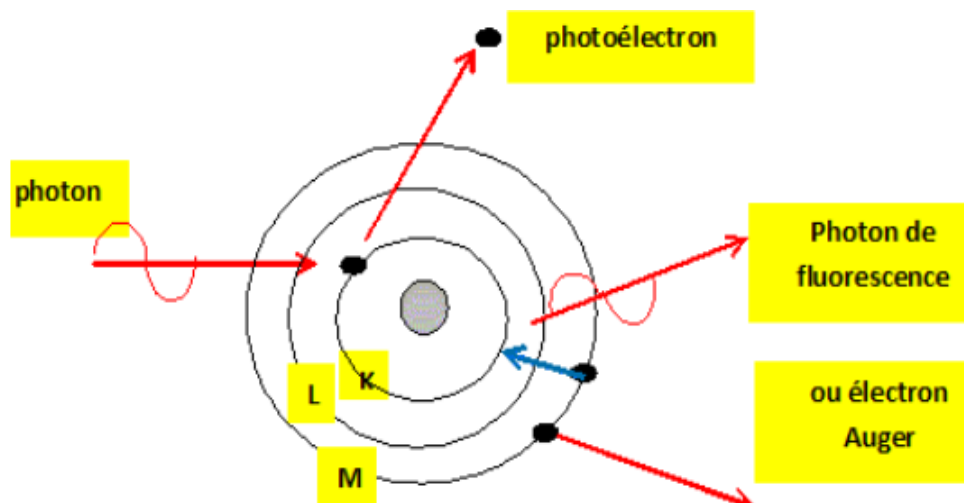


$T = E_c$, énergie cinétique

$E = h\nu_0$, énergie du photon incident

$E_l = W_L$, énergie de liaison

- La direction d'émission du photoélectron varie avec l'énergie du photon incident ; plus l'énergie est grande, plus la probabilité que le photoélectron soit émis dans la même direction que le photon est grande
- Ce photoélectron va progressivement perdre son énergie cinétique par interactions avec d'autres atomes du milieu, créant ainsi des ionisations (secondaires)
- l'atome se retrouve sous forme ionisé, et cette ionisation (primaire) est suivie d'une réorganisation en cascade du cortège électronique de l'atome (pour combler la lacune sur la couche dont a été expulsé l'électron) : il en résulte **l'émission d'un autre photon (rayon X de fluorescence)** ou l'expulsion d'un électron d'une couche encore plus périphérique : **l'électron-Auger**.



- La loi d'atténuation par effet photo électrique est décrite par la relation :

$$N(x) = N_0 e^{-\tau x}$$

τ : Probabilité d'atténuation par effet photoélectrique ou coefficient d'atténuation linéaire par l'effet photoélectrique.

- **Relation de Bragg et Pierce :**

$$\frac{\tau}{\rho} = K \frac{Z^3}{E^3}$$

τ/ρ : coefficient d'atténuation massique par l'effet photoélectrique.

k : constante dépendant de la couche de l'électron

E : énergie de photons, $E = h\nu$

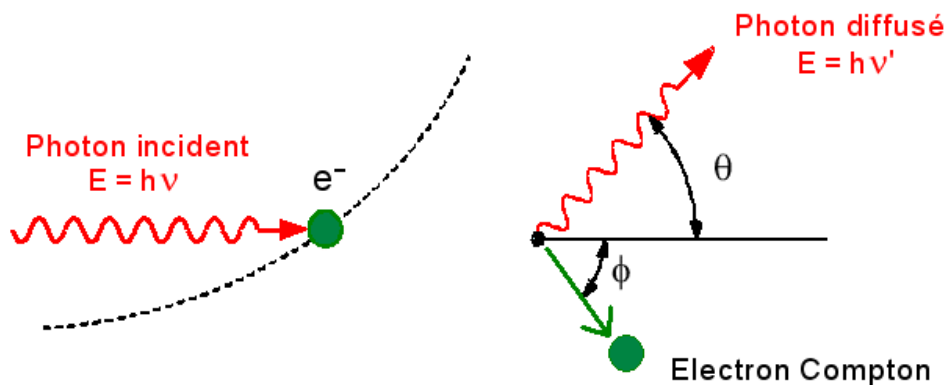
L'effet photoélectrique augmente si Z augmente (éléments lourds) et si l'énergie de photon diminue. Pour favoriser l'effet photo-électrique, il faut donc prendre des photons

d'énergie relativement faible (10-50 KeV) . cette relation est surtout valable dans le cadre de l'absorption des rayons X utilisés en radiologie

✚ L'effet Compton

Le photon incident interagit encore une fois avec un électron, mais cet électron a une énergie de liaison beaucoup plus faible que celui impliqué dans l'effet photoélectrique. Ces électrons sont considérés au repos. Un photon d'énergie $E_i = h\nu$ incident vient frapper un électron au repos (énergie de liaison W_L presque nulle). Après le choc, un photon est diffusé suivant une direction θ et son énergie devient : $E_{diff} = h\nu' < h\nu$, et un électron est éjecté suivant une direction ϕ avec une énergie cinétique $E_c(e) = E_i - E_{diff} - W_L$.

si l'énergie de liaison $W_L = 0 \rightarrow E_i = E_{diff} + E_c(e) \rightarrow h\nu = h\nu' + \frac{1}{2} m_e v^2$



- la relation entre l'énergie incidente E_i et l'énergie diffusée E_{diff} :

$$\frac{1}{E_{diff}} - \frac{1}{E_i} = \frac{1 - \cos \theta}{m_0 c^2}$$

- Le photon incident et diffusé selon une direction θ telle que :

$$\lambda_{diff} - \lambda_i = \frac{h}{m_0 c^2} (1 - \cos \theta)$$

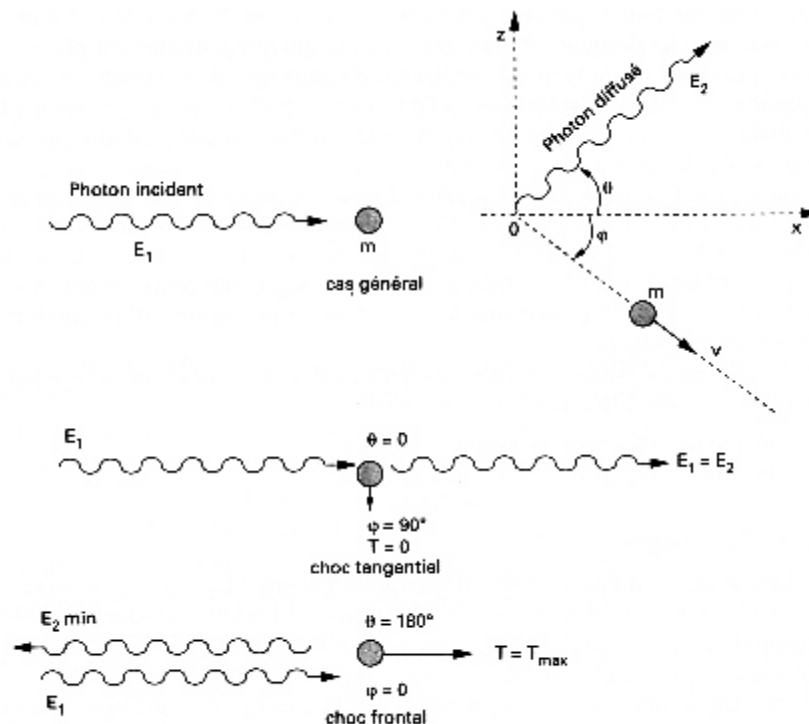
Et la longueur Compton $\lambda_c = \frac{h}{m_0 c^2} (1 - \cos \theta)$

- L'électron au repos est éjecté vers l'avant suivant la direction ϕ telle que :

$$\sin \phi = \frac{h \cdot \sin \theta}{\lambda_d \sqrt{2m_e E_{ce}}}$$

Remarque :

- ✓ l'effet-Compton n'est possible que si l'énergie du photon incident E_i est supérieure à l'énergie de liaison de l'électron W_L
- ✓ lorsque l'énergie du photon incident croît, l'énergie emportée par l'électron Compton devient de plus en plus importante par rapport à celle du photon diffusé.
- ✓ en cas de **choc frontal**, l'énergie cédée à l'électron est maximum, celle du photon diffusé est minimum et il retourne d'où il vient : rétrodiffusion ($\theta=180^\circ$)
- ✓ Pour une diffusion rasante (ou **choc tangential**, $\theta=0$) : $E_{c(e)}=0$ et le photon garde sa trajectoire et toute son énergie



• Coefficient d'atténuation Compton σ

Il est diminué lorsque l'énergie du rayonnement augmente (à peu près en $1/E_i$), et est pratiquement indépendant du numéro atomique Z du milieu traversé.

Coefficient d'atténuation massique par effet Compton : $\frac{\sigma}{\rho} \propto \frac{1}{E_i}$

🚧 Création de paires ou effet de matérialisation :

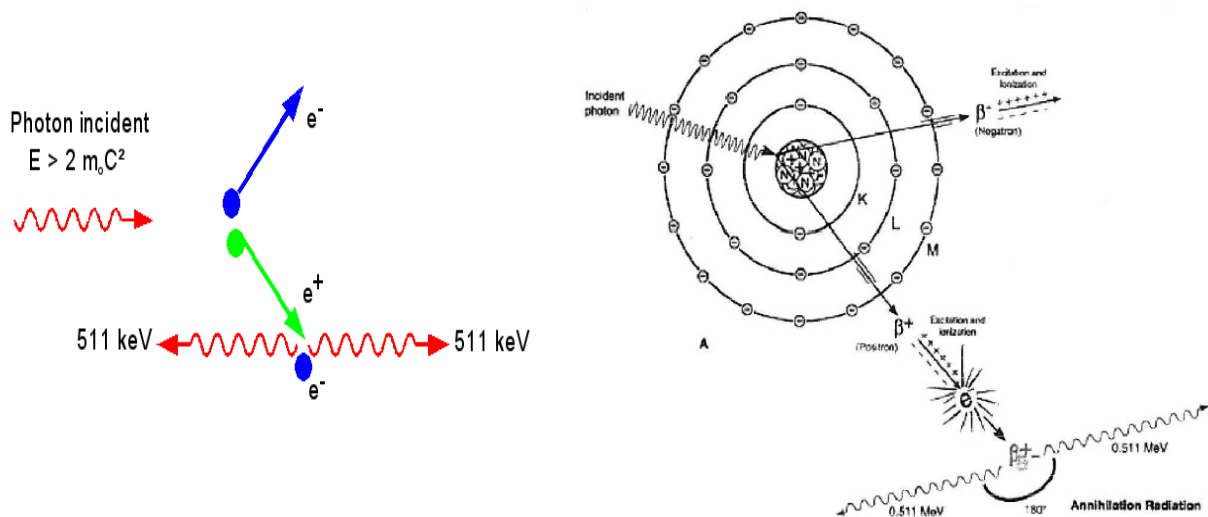
Effet de matérialisation correspond à l'interaction entre un photon et le noyau. Il se fait uniquement si l'énergie incident de photons est $E_i > 1.022 \text{ MeV}$ soit $E_i = h\nu > 2m_0c^2$

Le champ électrique intense qui entoure un noyau peut transformer un photon en négaton et positon: c'est l'effet de production de paires. $\gamma \rightarrow e^+ + e^-$

Cette matérialisation (qui est le processus inverse de l'annihilation) nécessite une énergie minimale du photon incident d'au moins 2 fois 511 keV,

Le négaton et le positon créés perdent leur énergie par phénomène d'ionisation du milieu.

Enfin, le positon s'annihile avec un électron négatif du milieu et il en résulte un rayonnement de 2 photons gamma d'énergie individuelle 511 keV à 180° l'un de l'autre.



Remarque : la matérialisation se produit pour des énergies supérieures à celles donnant un effet photo-électrique et un effet-Compton, si l'énergie de photon incident $h\nu$ est supérieure à **1.02 MeV** la réaction photo-nucléaire peut se produire. Le photon est absorbé par le champ électrique intense du noyau, ce dernier devient un noyau isotope radioactif. il émet un photon gamma lors du retour à la stabilité

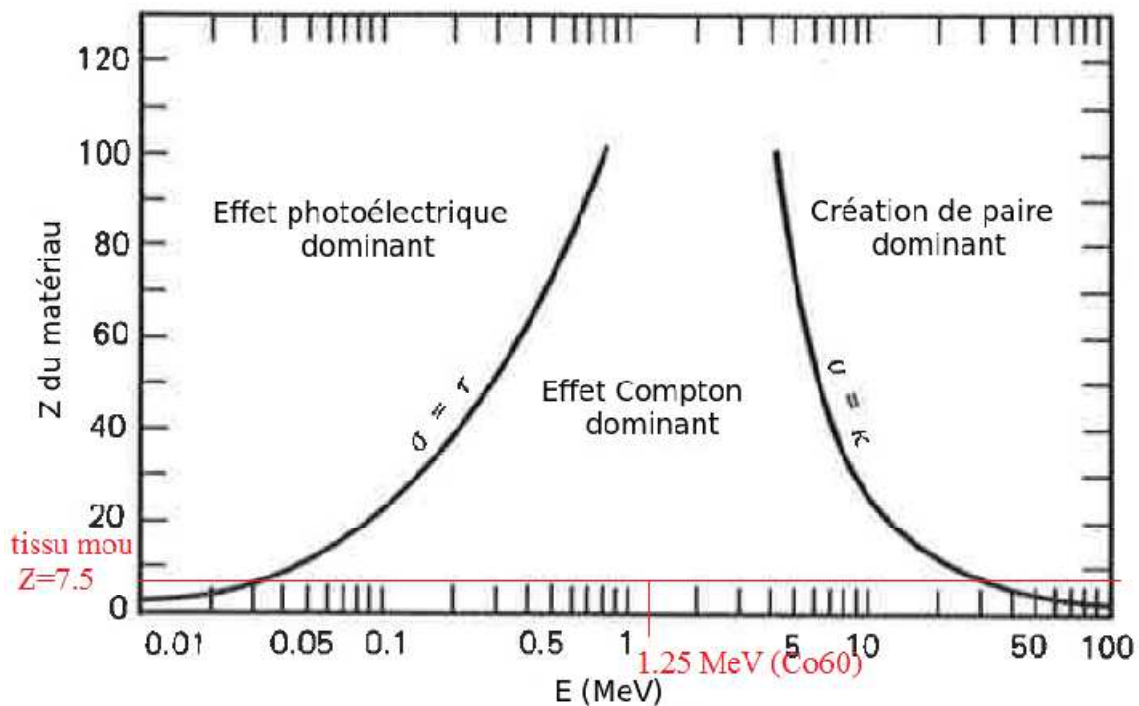
Coefficient d'atténuation par effet de matérialisation π :

la probabilité d'atténuation π/ρ augmente avec le Z du milieu et lentement avec l'énergie incidente E_i (π/ρ est inférieur à π/ρ pour les énergies plus basses) : $\frac{\pi}{\rho} \propto Z \ln E_i$

🚩 Domaines de prédominance

Délimitation des domaines d'énergie de prédominance des trois interactions principales des photons avec la matière : effet photoélectrique, effet Compton et effet création de paire en fonction du numéro atomique du milieu traversé.

Exemple : L'interaction Compton est prédominante dans le tissu mou (plus de 70% d'eau, Z 7.5) pour les photons de hautes énergies.

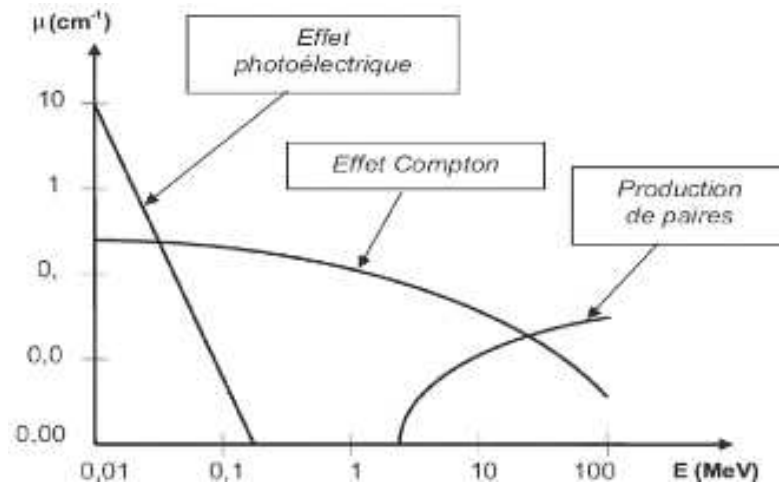


L'importance relative entre ces trois phénomènes dépend de la nature du matériau et de l'énergie du photon. On constate que :

- ✓ 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.

✚ Coefficient d'atténuation globale

Le coefficient d'atténuation globale est la somme des coefficients liés à chaque interaction.



Références bibliographie

<http://clea-astro.eu/lunap/RayGamma>

<https://nte.mines-albi.fr/SciMat/co/SM2uc2-2.html>

<https://www.fenelec.com/fmdc4u/Cours/Interactions%20des%20rayonnements%20ionisants%20avec%20la%20matiere.pdf>

<https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/Public/48/072/48072230.pdf>