

INTERACTION RAYONNEMENT – MATIERE

Introduction :

Les rayonnements et la radioactivité sont des phénomènes fondamentaux en physique. Tous deux impliquent l'émission ou la transmission d'énergie sous forme d'ondes électromagnétiques ou de particules. Leur champ commun réside dans leur capacité à interagir avec la matière et à produire divers effets, tels que la création d'images diagnostiques en médecine ou la génération de chaleur. Cependant, la distinction majeure réside dans le processus de désintégration nucléaire associé à la radioactivité, où les noyaux atomiques instables émettent spontanément des particules et des rayonnements, tandis que les rayonnements englobent un spectre plus large d'émissions, qu'elles soient naturelles ou artificielles, sans nécessairement impliquer de désintégration nucléaire.

En 1889, Wilhelm Conrad Roentgen, physicien allemand, a réalisé une découverte révolutionnaire qui a eu un impact majeur sur le domaine de la physique et de la médecine. Roentgen a remarqué qu'une lumière mystérieuse était produite par un type de rayonnement invisible capable de traverser la plupart des matières opaques. Il a nommé ce phénomène "rayons X", X symbolisant l'inconnu.

En médecine, les rayons X ont rapidement été adoptés pour le diagnostic des fractures osseuses et des maladies internes, révolutionnant ainsi le domaine de l'imagerie médicale. En physique, la découverte des rayons X a ouvert de nouvelles avenues pour l'étude de la structure atomique et des interactions électromagnétiques.

En 1896, Henri Becquerel, physicien français, découvre par hasard la radioactivité. Intrigués par cette découverte, Pierre et Marie Curie entreprennent des recherches approfondies sur ce phénomène marquant le début d'une nouvelle ère dans la compréhension de la structure atomique et des interactions nucléaires. Leurs travaux pionniers ont ouvert la voie à des avancées majeures dans des domaines tels que la physique nucléaire, la médecine et l'industrie, tout en posant les bases de la radiothérapie et de la radiologie modernes.

En 1897 J.J. Thomson caractérise les rayons cathodiques et que les électrons sont des constituants élémentaires des atomes, dont il imagine le modèle du "pain aux raisins".

1898 Marie et Pierre Curie découvrent le polonium et le radium. Marie Curie introduit le terme radioactivité pour décrire les rayons émis par l'uranium, le thorium, le polonium, le radium.

1899 Plusieurs scientifiques montrent l'existence de deux types de rayonnements émis par l'uranium. Rutherford les nommera rayons alpha et bêta.

1900 Paul Villard identifie un troisième type de radioactivité : le rayonnement gamma.

Quel est donc la différence entre rayonnement et radioactivité?

Un rayonnement est le processus de transmission d'énergie sous forme d'ondes électromagnétique ou acoustique (ondes radio, infrarouge, lumière, rayons X, rayons gamma) ou de particules (alpha, bêta, neutrons) à travers l'espace.

Une radioactivité est le processus de désintégration spontanée des noyaux atomiques instables, généralement accompagnée de l'émission de rayonnements ionisants.

Certains rayons peuvent traverser la matière, y compris les tissus biologiques, ce qui les rend utiles pour l'imagerie diagnostique (radiographie des os, mammographie, scintigraphie, etc.).

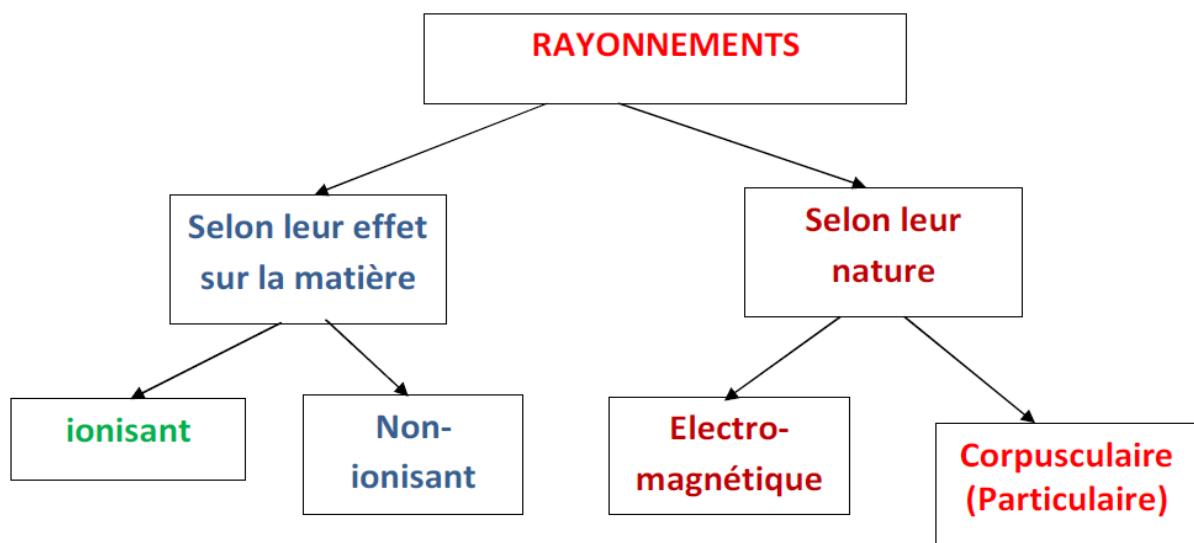
Leurs capacités de détruire les cellules ou d'entraver leur multiplication, ce qui justifie leur utilisation dans certains traitements (radiothérapie, laser, etc.).

Classification des rayonnements

Les rayonnements peuvent être classés en deux grandes catégories suivant leur nature, et aussi selon leurs inductions sur la matière.

Selon leur effet sur la matière : ionisants, non ionisants.

Selon leur nature : électromagnétique et corpusculaire



1) Selon leur effet sur la matière : ionisants, non ionisants

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.

Les rayons ultraviolets marquent la frontière entre les rayonnements ionisants et non ionisants.

Certains rayons ultra-violets ionisants (UVC) émis par le soleil sont filtrés par l'atmosphère et ceux qui nous parviennent sont essentiellement non ionisants (UVA et UVB).

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.

Il existe des mesures spécifiques aux rayonnements ionisants :

le Becquerel (Bq) mesure la quantité de rayonnements émis

le Gray (Gy) mesure la dose reçue ou absorbée de rayonnements

le Sievert (Sv) mesure l'impact de la radioactivité (dose de rayonnement nocive).

Rayonnements non-ionisants	Champs/rayons du spectre électromagnétique	Fréquence	Exemples
	Champ statique	0Hz	Appareils à pile, batterie, aimants, champ magnétique terrestre, caténaires des transports électrifiés, Imagerie par Résonnance Magnétique (IRM).
	Fréquences extrêmement basses	3Hz < 300 H	Lignes à haute tension, voies ferrées (16,7 Hz), tous les appareils électriques branchés sur le secteur (50 Hz), véhicules électriques.
	Fréquences basses ou intermédiaires	300 Hz < 100 KHz	Écrans d'ordinateur et de télévision, portique antivol, détecteur de métaux, plaques de cuisinière à induction, ampoule économique.
	Radiofréquence ou ondes radio	100 KHz < 300 GHz	radio, GSM (900 MHz), antennes relais, radar, wifi, babyphone, Bluetooth, micro-ondes.
	Rayons infrarouges	300 GHz < 400 THz	Soleil, lampes à infrarouge
	Lumière visible	400 THz < 770 THz	Soleil, ampoules électriques
	Rayons ultraviolets	750 THz < 900 THz	Soleil, bancs solaires (UVA, UVB).
		> 1000 THz	UVC (rayons dangereux filtrés par l'atmosphère, lumière noire, étoiles)
Rayonnements ionisants	Rayons X et gamma	300 PHz < 30 EHz	Radon, uranium, radiothérapie, radiographie, substances radioactives, rayons cosmiques

2) Selon leur nature : électromagnétique et corpusculaire

Un **champ électromagnétique** est la zone d'influence créée par les ondes d'un champ électrique et d'un champ magnétique.

Les deux ondes forment des vagues invisibles à l'œil nu (oscillations) qui progressent régulièrement et en alternance dans l'environnement.

Les ondes du champ électromagnétique se mesure selon :

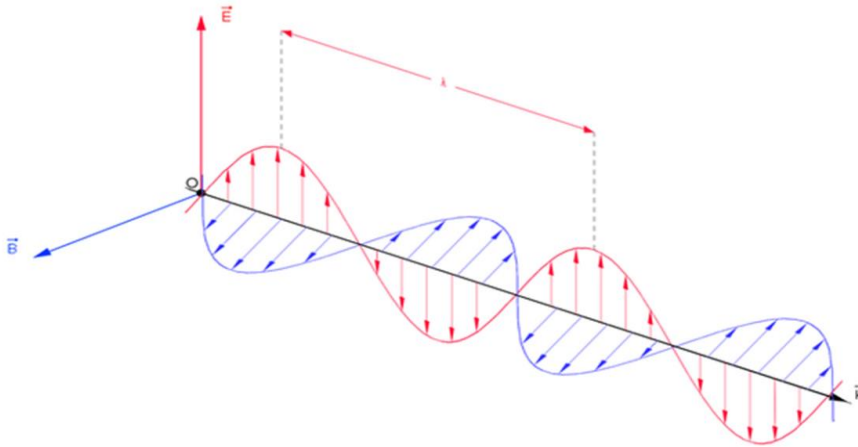
la fréquence en Hertz (nombre d'oscillations effectuées par l'onde en 1 seconde)

la longueur d'onde (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.

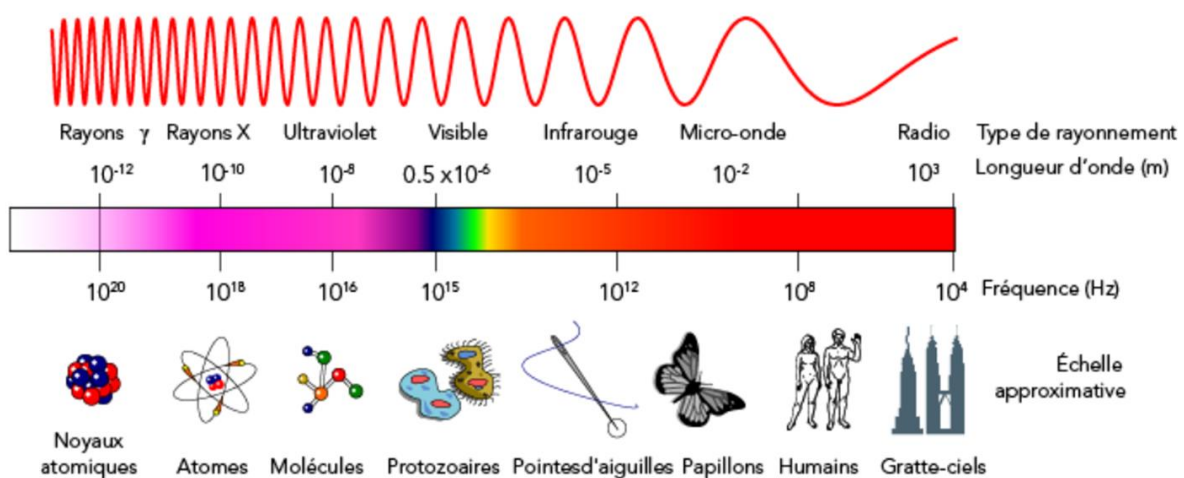
Plus la fréquence est haute, plus les champs électriques et magnétiques sont liés.



Le spectre électromagnétique se décompose en rayonnements non-ionisants et rayonnements ionisants selon la fréquence 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.



Le rayonnement corpusculaire (particulaire) RP est constitué de particules subatomiques se déplaçant à des vitesses très importantes. Ces particules possèdent une masse et éventuellement une charge électrique comme l'électron, proton, neutron, particule α (He^{++}), positon (e^+).

Dualité onde-corpuscule

Les particules et la lumière se comportent à la fois comme des ondes et comme des particules.

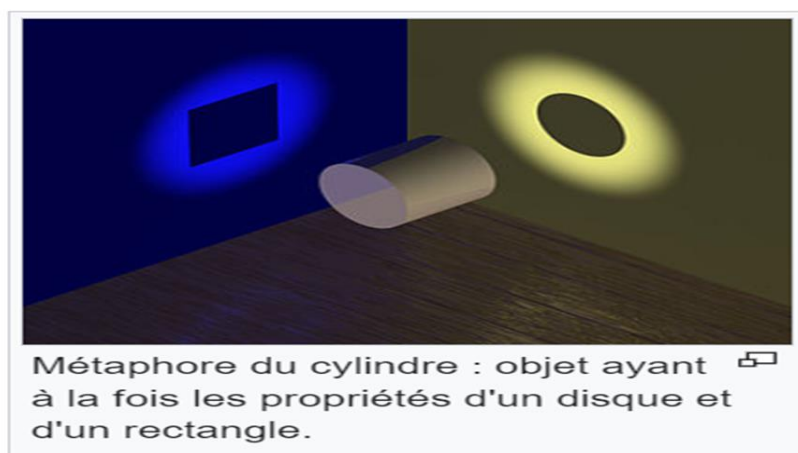
On peut associer une longueur d'onde aux particules appelée longueur d'onde de de Broglie.

Une expérience importante qui confirma la nature ondulatoire de la lumière est l'expérience des fentes d'Young.

Einstein en 1905 introduisit l'idée que la lumière est composée de petits paquets d'énergie assimilables à des particules.

La dualité onde-corpuscule fut découverte expérimentalement par plusieurs scientifiques, mais c'est de Broglie en 1924 qui introduisit le concept de longueur d'onde des particules.

La longueur d'onde d'une particule est inversement proportionnelle à sa quantité de mouvement.



Quelle est la relation entre les ondes et les particules ?

De Broglie a trouvé que si les électrons se comportent comme des ondes, alors les particules doivent avoir une longueur d'onde. Il relia cette longueur d'onde à l'impulsion ou quantité de mouvement des particules.

Énergie d'une onde et du photon

Dans le cas de la lumière, qui est une onde électromagnétique, le quantum d'énergie est inversement proportionnel à la longueur d'onde.

$$E_{\text{photon}} = h\nu \text{ avec } \nu = \frac{c}{\lambda}$$

E: Energie en Joule

h : constante de planck $h = 6,63 \cdot 10^{-34} m^2 \cdot \frac{kg}{s}$

C : vitesse de la lumière $C = 3 \cdot 10^8 m/s$

Énergie d'une particule.

D'après Einstein l'énergie d'une particule de masse m étant:

$$E_{particule} = mC^2$$

La quantité de mouvement.

$$E_{photon} = h\nu = \frac{hC}{\lambda}$$

$$E_{particule} = mC^2$$

$$\frac{h}{\lambda} = mC = \frac{E}{C} = P: \text{c'est la quantité de mouvement}$$

Autre unité de mesure de l'énergie est: $1eV = 1,6 \cdot 10^{-19} J$

En physique, on appelle excitation tout phénomène qui sort un système de son état de repos pour l'amener à un état d'énergie supérieure. Le système est alors dans un état excité. Cette notion est particulièrement utilisée en physique quantique, pour laquelle les atomes possèdent des états quantiques associés à des niveaux d'énergie : un système est dans un niveau excité lorsque son énergie est supérieure à celle de l'état fondamental.

Les énergies de liaison des électrons sur les couches suivantes sont de plus en plus faibles.

Quand une place devient disponible sur une couche, un électron situé sur une couche plus externe comble ce vide en sautant pour occuper la place laissée libre et être ainsi plus lié au noyau. Cette transition est accompagnée par l'émission d'un grain d'énergie «

électromagnétique » qui hérite de la différence d'énergie de liaison entre les deux couches.

Ces minuscules ondes électromagnétiques sont des photons dont certains – les photons lumineux – sont capables d'impressionner la rétine de l'œil.

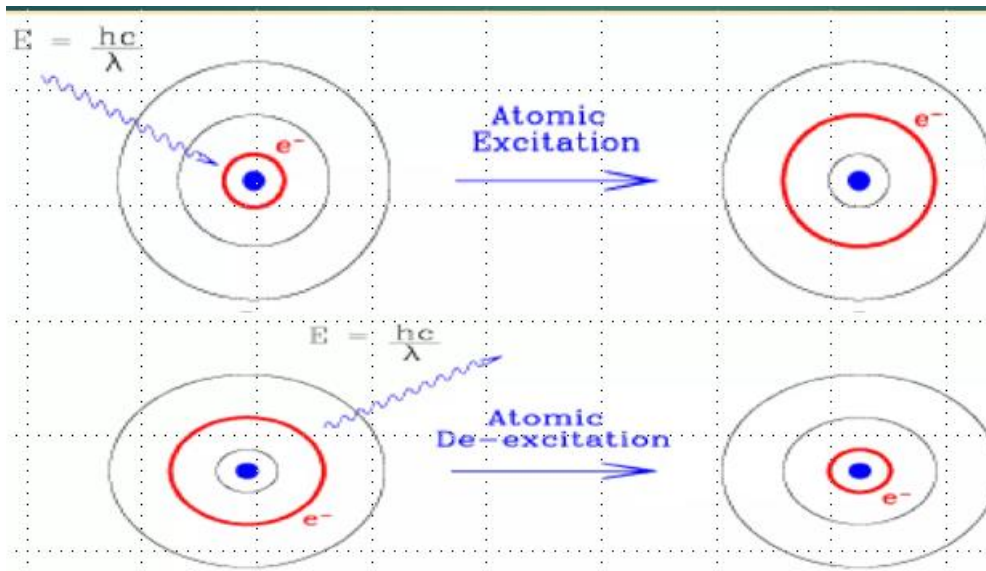
L'énergie du photon est égale à la différence d'énergie des deux couches. L'énergie des couches étant caractéristiques de l'atome, celle du photon l'est aussi. La longueur d'onde de ce photon (c'est-à-dire sa couleur dans le cas de la lumière) étant liée à son énergie, cette longueur d'onde est à son tour propre à l'atome.

Mécanisme d'interaction des ondes électromagnétique (Photon) avec la matière.

Excitation de l'atome.

Le REM fournit de l'énergie à l'atome,

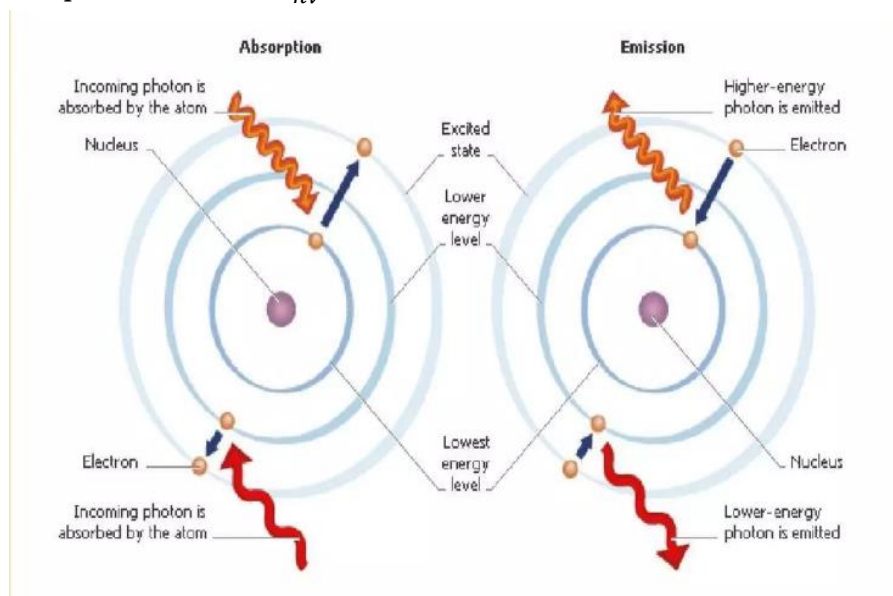
- Les électrons sont alors portés sur des orbites plus éloignées que leurs niveaux fondamentaux
- L'atome se trouve donc dans un état excité.
- Le retour à la normale se fera par émission de fluorescence



Se produit lorsque

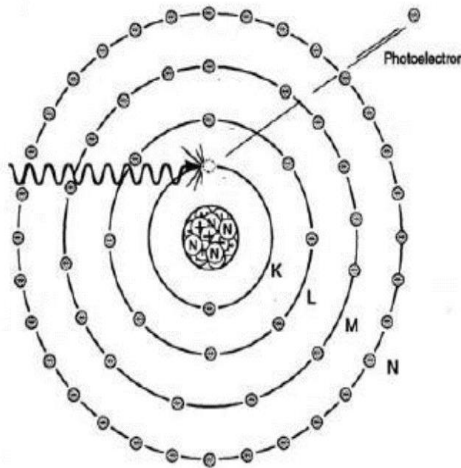
$$E_{hv} < E_L$$

- L'électron absorbe le photon et il est élevé à un niveau énergétique supérieur
- L'énergie absorbée par l'électron ne permet pas de l'éloigner de l'atome.
- L'électron retournant à son niveau d'énergie inférieur restitue la même énergie du photon absorbé E_{hv} .



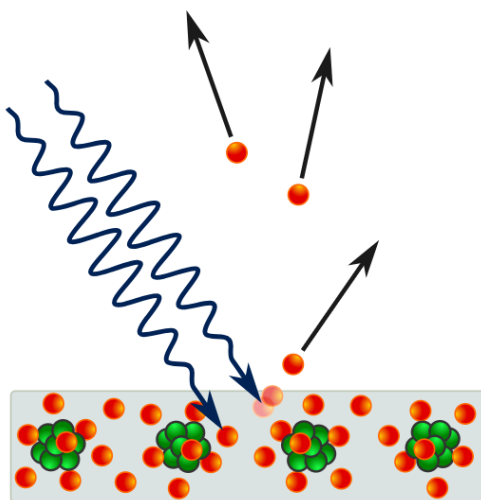
a. L'effet photoélectrique

L'effet photoélectrique est l'interaction du photon avec un électron fortement lié de l'atome.



Le photon interagit avec l'électron lié à l'atome avec $E_{h\nu} \geq E_L$

- Le photon incident disparaît après avoir donné toute son énergie à l'électron.
- L'électron éjecté emporte une énergie cinétique $E_C = E_{h\nu} - E_L$
- Ce mécanisme est prépondérant pour des photons d'énergies relativement faibles lorsqu'ils interagissent avec les électrons des couches profondes.



Le schéma montre l'émission d'électrons depuis une plaque métallique. L'émission de chaque électron (particules rouges) requiert une quantité minimale d'énergie, laquelle est apportée par un photon (ondulations bleues).

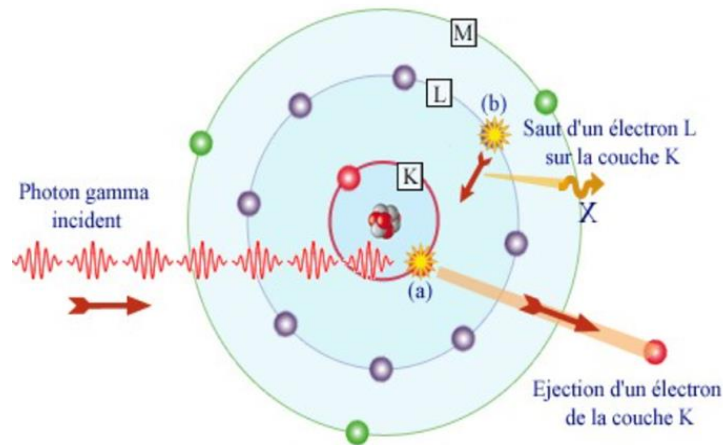
Absorption d'un gamma par un atome

L'effet photoélectrique se produit en deux temps. Tout d'abord, le photon arrache

(a) un électron lié d'un atome. Dans le cas d'un gamma, il s'agit généralement d'un électron appartenant aux couches les plus internes L ou K (comme sur la figure). Ensuite l'atome qui

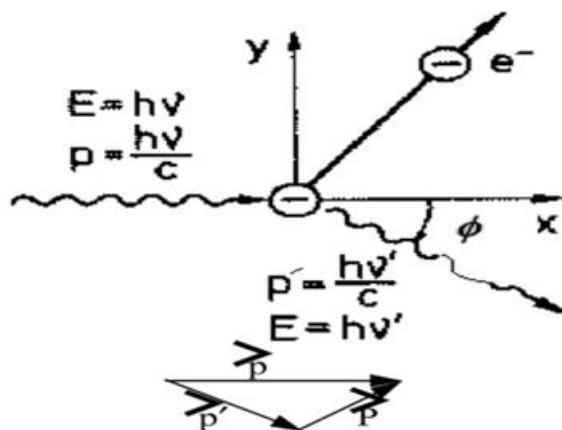
a perdu un de ses électrons internes se trouve dans un état excité. Un électron d'une couche plus externe

(b) vient occuper la lacune laissée par l'électron éjecté. Si l'électron éjecté appartenait à la couche K comme sur la figure, un rayon X est émis lors de cette transition.



b. Effet Compton

Ce phénomène, appelé diffusion Compton, elle représente l'interaction du photon avec les électrons des couches périphériques (électron quasi libres). Le photon est alors diffusé avec une énergie inférieure à son énergie incidente $h\nu_0$, et l'électron reculant selon l'angle ϕ

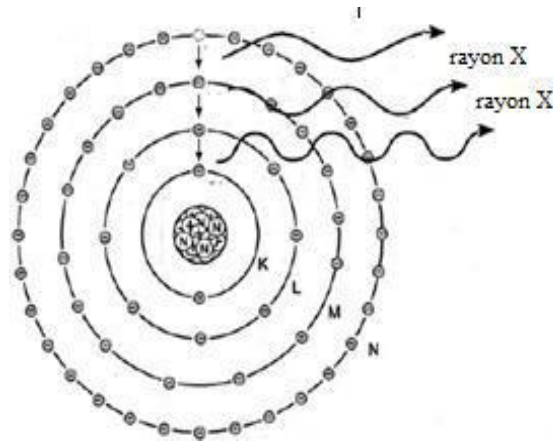


- (a) An incident photon with wavelength λ , energy E and momentum $\vec{p}$ approaching an electron e at rest.
- (b) The incident photon is scattered through an angle ϕ and the struck electron recoils.
- (c) Vector diagram for the conservation of momentum.

Plus l'énergie du photon incident est élevée, plus les photons diffusés et les électrons éjectés sont émis vers l'avant.

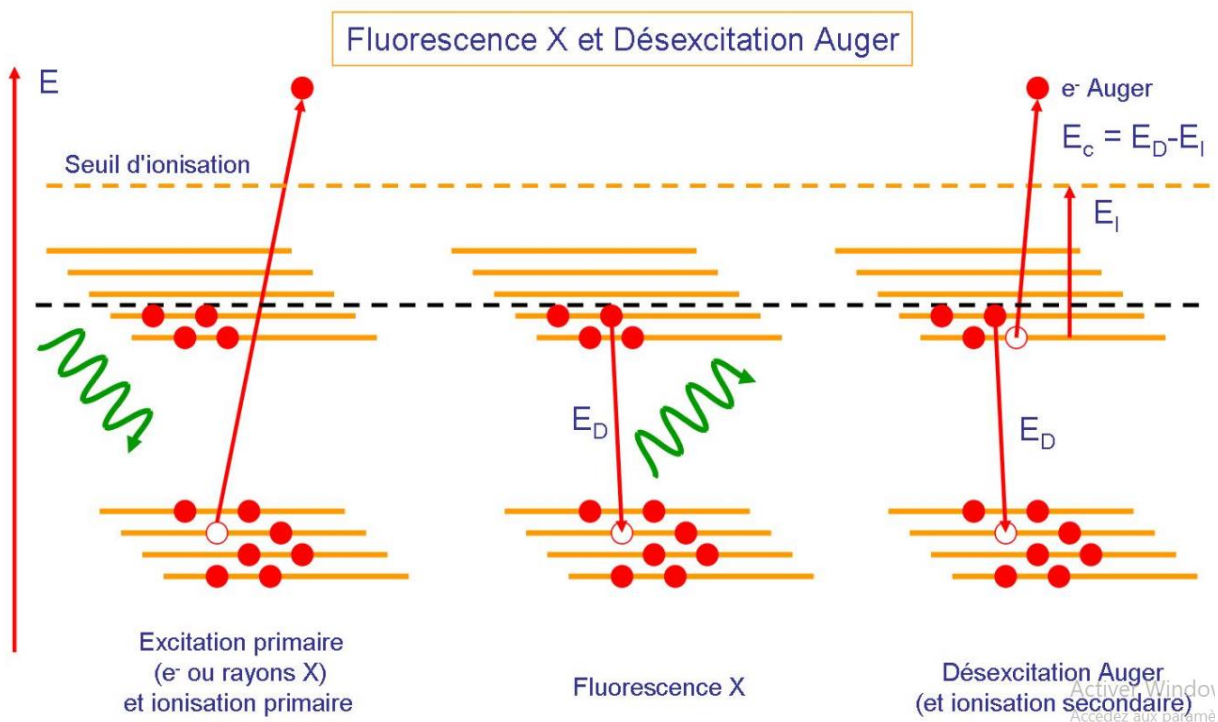
Cascade de saut d'électrons des couches externes vers les couches profondes suivi d'une émission de rayonnement c'est « le rayonnement caractéristique »

- L'atome subit un « réarrangement électronique »
- La règle est que les électrons occupent les niveaux d'énergie les plus bas.
- Ce phénomène est le principe de base de formation des rayons X.



Effet Auger:

- ❑ C'est l'interaction d'un photon de fluorescence issu d'un réarrangement électronique avec un électron du même atome, lorsque ce photon a une énergie supérieure à E_L
- ❑ Il s'ensuit l'éjection d'un électron Auger



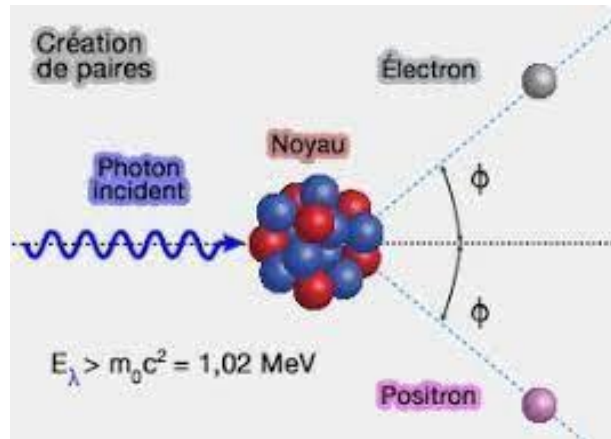
L'effet de production de la paire ou matérialisation :

Lorsqu'un photon de haute énergie interagit avec un noyau atomique, créant ainsi une paire électron-positron.

L'énergie nécessaire pour obtenir la matérialisation de cette paire est égale à 1,022 MeV.

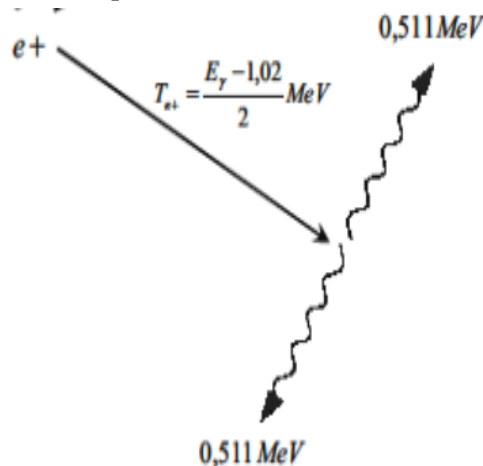
Au-dessous de cette valeur, la réalisation de cet effet est énergétiquement impossible.

L'énergie peut être convertie en masse selon cette équation $E = mc^2$



Devenir de la paire :

- Le négaton, le plus stable, peut rester à l'état libre soit s'accoler à un atome pour former un ion.
- Le positron le moins stable, une fois ralenti, il rencontre un électron négatif de la matière et cette rencontre provoque un phénomène de dématérialisation avec émission de deux photons de 0,511 MeV à 180°.



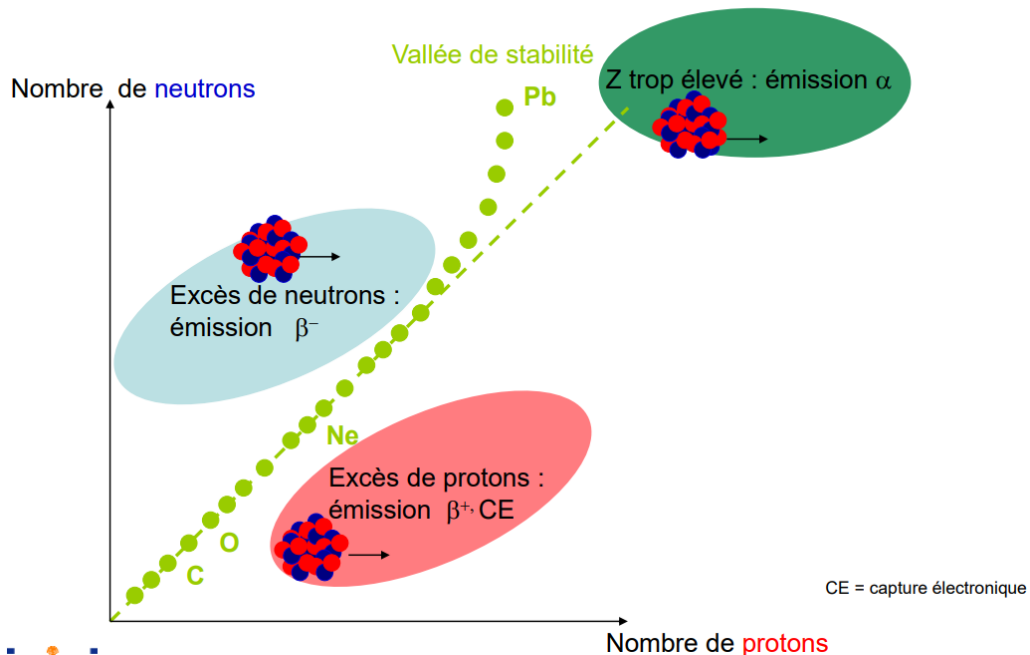
Rayonnement particulaire –matière.

Il existe trois particules élémentaires, deux lourdes (Neutron et Proton) et une légère (électron), auquel on peut ajouter le Positron (β^+) et le Négaton (β^-).

L'interaction d'une particule matérielle ionisante avec la matière est caractérisée par un transfert d'énergie dû à des chocs directs ou à distance (collision) entraînant le ralentissement de la particule d'un côté et des effets physiques (ionisation) de l'autre et ceci jusqu'à l'arrêt.

- Leurs effets radio-biologiques sont plus importants par rapport aux REM

Origine des rayonnements alpha, beta, gamma



Les rayonnements alpha et beta.

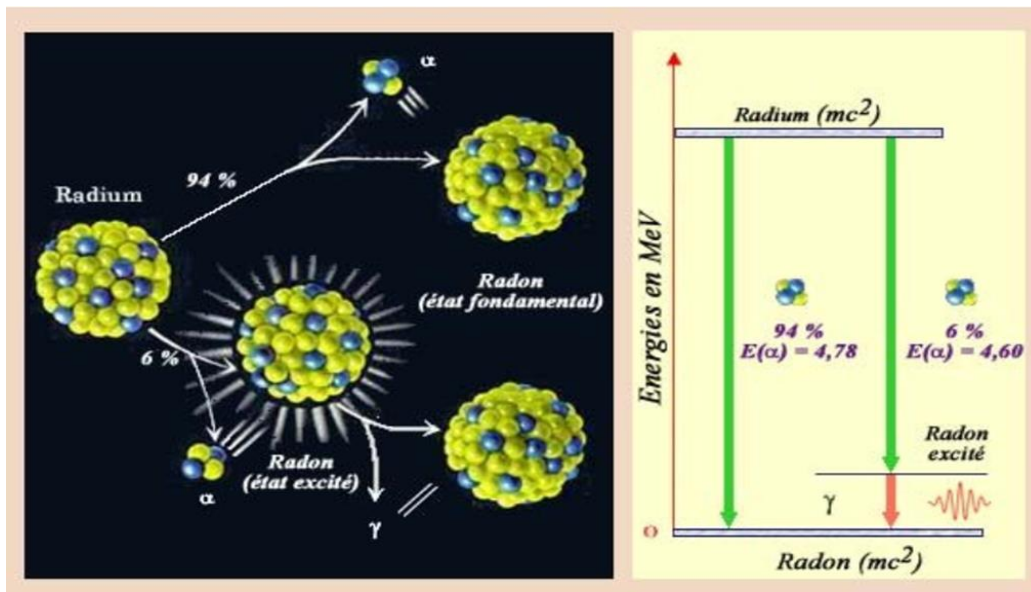
- ☐ Les rayonnements α et β sont issus des désintégrations nucléaires de noyaux instables.
- ☐ Ces désintégrations sont presque toujours suivies, après un temps très variable, d'une désexcitation.
- Le noyau fils Y se désexcite en émettant un photon, appelé photon γ .
- ☐ Le noyau fils Y peut être lui-même instable et se désintégrer à son tour (filiation radioactive).

Interaction de l'alpha avec la matière.

- ☐ Les rayonnements α sont très ionisants et peu ou pas pénétrant.
- ☐ La particule α est massive et fortement chargée ($2+$), elle va très fortement interagir avec les couches électroniques de la matière qu'elle traverse.
- ☐ En cédant peu à peu son énergie cinétique, elle est ralentie.
- ☐ A chaque fois, l'énergie cédée va permettre une ionisation.



- ☐ La probabilité d'interaction α -noyau est très faible.
- ☐ Ils sont arrêtés par une feuille de papier mais elles sont redoutées lorsqu'elle pénètre à l'intérieur de l'organisme (plaie cutanée).



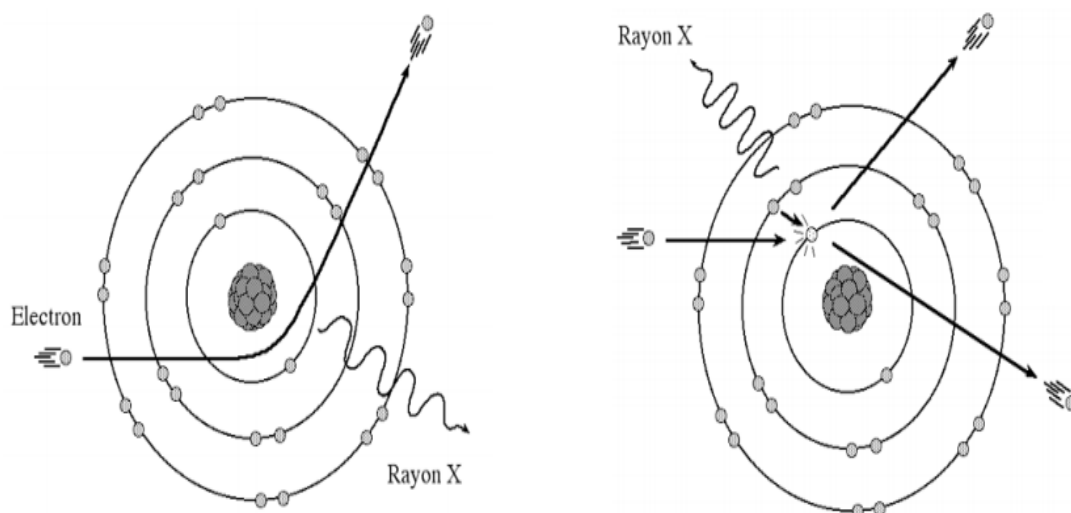
Interaction du rayonnement beta avec la matière.

- ☐ Les rayonnements β sont faiblement ionisants,
- ☐ Leurs trajets dans la matière sont donc en lignes brisées,
- ☐ Les segments diminuant de longueur à chaque interaction, leur parcours peut atteindre 1,5cm.

3 cas d'interaction possibles avec les rayonnements β :

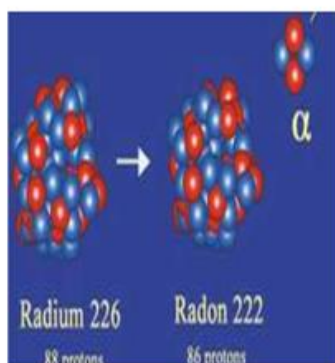
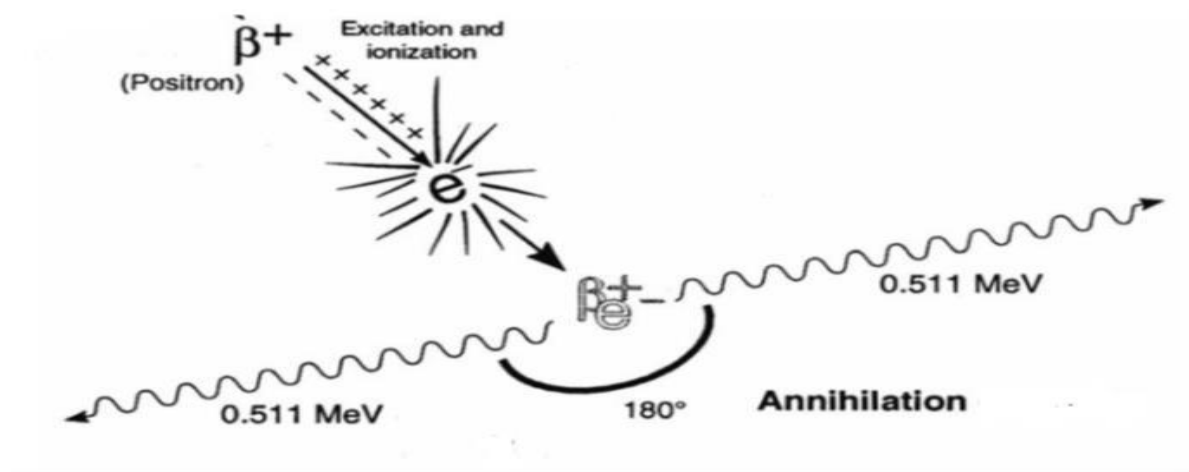
- ☐ Perte de l'énergie cinétique de l'électron incident sans interaction notable (chaleur),
- ☐ Un freinage à proximité du noyau.
- ☐ Interaction avec les électrons des atomes (Compton et ionisation).

Les deux phénomènes aboutissent à la formation de rayons X

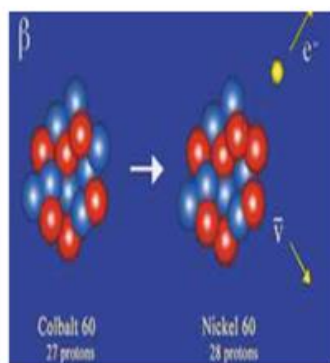


Annihilation.

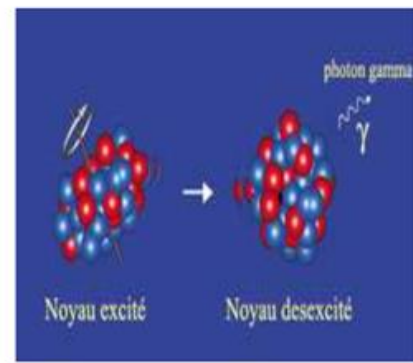
Lorsqu'un positon rencontre un électron dans la matière, ils peuvent s'annihiler mutuellement produisant ainsi une libération d'énergie sous forme de photons gamma. Les photons gamma sont des particules électromagnétiques hautement énergétiques qui peuvent ioniser davantage la matière ou provoquer des réactions nucléaires.



RADIOACTIVITE ALPHA (A)



RADIOACTIVITE BÊTA (B)

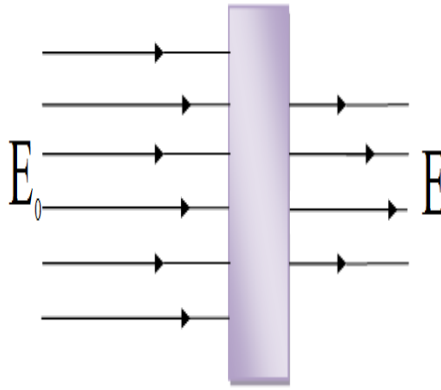


RADIOACTIVITÉ GAMMA (Γ)

Lois d'atténuation d'un faisceau de photon.

Ces lois décrivent comment l'intensité de la lumière diminue à mesure qu'elle traverse un matériau, en tenant compte de facteurs tels que la concentration du matériau, son épaisseur, ses propriétés d'absorption et les interactions spécifiques entre les photons et les électrons du matériau.

Lorsqu'une source émet un rayonnement, cette émission se fait souvent dans toutes les directions de l'espace qu'on va considérer comme isotrope et homogène



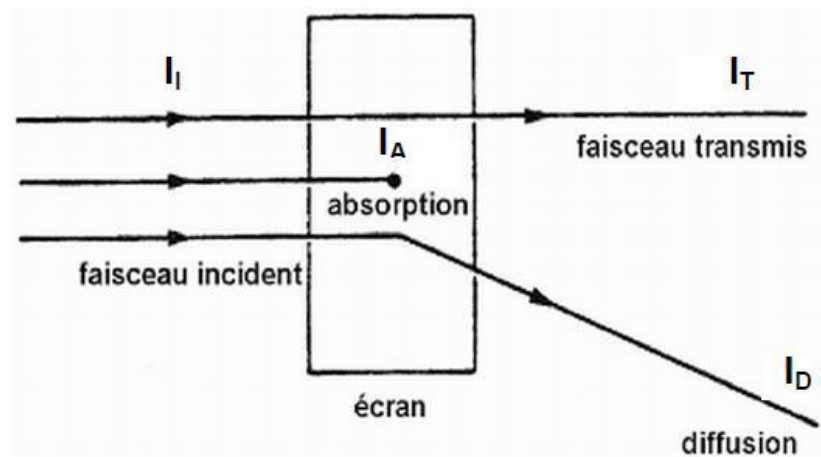
Dans le vide, les photons se propagent sans interaction, donc en ligne droite à partir de la source.

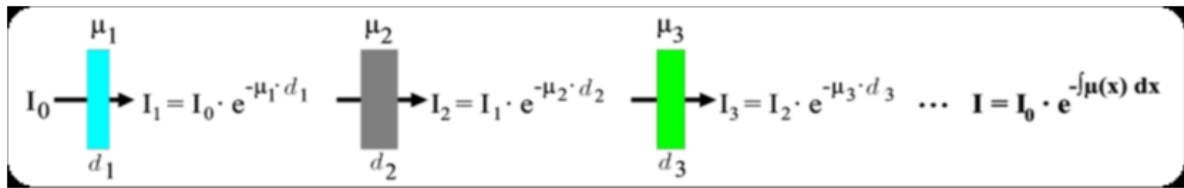
- ☐ C'est une loi purement géométrique, qui n'est pas seulement applicable aux REM.
- ☐ Elle porte le nom de loi de l'inverse du carré de la distance. Elle répond à la loi

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

Quand un faisceau mince unidirectionnel de photons mono énergétiques traverse un milieu matériel.

- ☐ Une partie des photons est arrêtée,
- ☐ Une autre déviée(diffusée)
- ☐ Une autre transmise restant dans la même direction de propagation du faisceau sans être déviée.
- ☐ L'énergie totale du faisceau sera diminuée ou atténuée





Calcul de l'atténuation du faisceau dans l'objet

Loi d'atténuation .

- ☐ Le caractère aléatoire des interactions des photons avec la matière conduit à une loi d'atténuation exponentielle.
- ☐ Si on considère un écran d'épaisseur x caractérisé par un coefficient d'atténuation linéique μ et recevant N_0 photons, il n'en laissera passer un nombre N tel que:

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

N et N_0 peuvent facilement être remplacés par l'intensité du faisceau I ou bien par l'énergie du faisceau E

Couche Demi-Atténuation (CDA):

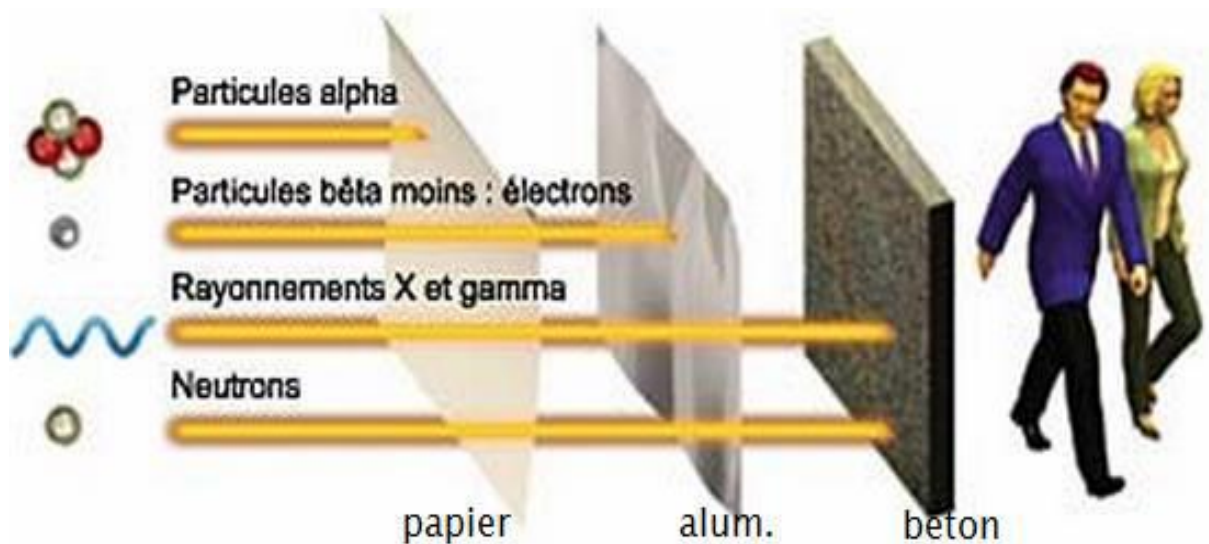
- ☐ C'est l'épaisseur que doit avoir l'écran pour ne laisser passer que la moitié des photons incidents, autrement dit c'est l'épaisseur qui réduit le nombre de photon du faisceau de moitié.
- ☐ La CDA dépend du milieu absorbant et de l'énergie des photons
- ☐ Fait important il est impossible d'arrêter totalement un faisceau photon.
- ☐ On peut cependant par un écran convenable, limiter son énergie à des valeurs qui ne présente pas de dangers biologique

$$N_{CDA} = N_0 e^{-\mu \cdot CDA}$$

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\mu \cdot CDA}$$

$$\mu \cdot CDA = \ln 2$$

$$CDA = \frac{\ln 2}{\mu}$$



Conclusion.

- ❖ L'étude des phénomènes liés à l'interaction rayonnement matière a permis de faire évoluer plusieurs disciplines en médecine.
- ❖ Dans le diagnostic radiologique, l'effet photoélectrique est à la base de formation de rayons X et la dématérialisation est le principe pour la TEP (Tomographie par émission de positons ; examen d'imagerie en médecine nucléaire).
- ❖ Aussi, le pouvoir ionisant et destructeur des électrons est à la base de la radiothérapie et la radiobiologie.
- ❖ Les autres phénomènes tels l'effet Compton pour la formation de rayonnements diffusés et l'atténuation du faisceau de photon ont permis de développer la radioprotection