

Rayonnements ionisants – Fiche de cours

1. Interaction RI – matière

a. Les différents rayonnements

Un rayonnement ionisant $E > 13,6 \text{ eV}$ va arracher des électrons à la matière qu'il traverse et produire des ions

On distingue 2 types de rayonnement :

- directement ionisant

L'interaction est obligatoire avec un parcours fini

Comporte des particules chargées :

- légères : électrons, positrons
- lourdes : protons, alpha, deutons, ions, fragment de fission

- indirectement ionisant

L'interaction n'est pas obligatoire (loi exponentielle)

Comporte des particules non chargées :

- neutrons, neutrinos, antineutrinos
- photons : RX, γ

b. Les différents lieux d'interaction

- le champ électrique de l'atome
- le champ électrique du noyau
- les électrons
- le noyau

2. Interaction électrons – matière

a. Collision électron – électron

Il existe 2 cas :

- excitation (collision éloignée)

$E_{cédée} < E_{liaison}$; 3 excitations pour 4 interactions

Un électron passe sur une orbitale supérieure en absorbant une partie de l'énergie de l'électron incident ; un photon de désexcitation est émis lors du retour à l'état fondamental de l'atome

- ionisation (collision frontale)

$E_{cédée} > E_{liaison}$; 1 ionisation pour 4 interactions

Un électron est arraché et éjecté de l'atome ; un photon de réarrangement est émis lors du retour à l'état fondamental de l'atome

b. Parcours d'un faisceau d'électrons monoénergétiques

Les électrons ou positrons ont une trajectoire en zig-zag dans la matière

Le parcours moyen est la distance au delà de laquelle, il ne reste que 50% des électrons en mouvement dans la matière:

$$\bar{R}(cm) = \frac{E_{moyenne}(MeV)}{2\rho(g.cm^{-3})}$$

Le parcours maximal est la distance au bout de laquelle, il ne reste aucun électron en mouvement dans la matière

$$R_{max} = 1,5 \cdot \frac{E_{max}(MeV)}{2\rho(g.cm^{-3})}$$

c. Parcours d'un faisceau d'électrons polyénergétiques

Il convient de connaître l'énergie de chaque faisceau d'électrons et l'on détermine le parcours moyen et maximal

d. Energie moyenne d'ionisation du milieu

Energie moyenne transférée à la matière pour réaliser une ionisation

Pour l'eau, $E_{ionisation} = 32 \text{ eV}$; pour l'air $E_{ionisation} = 34 \text{ eV}$

e. Nombre total d'ionisations

Le nombre d'ionisations est défini par : $NI = \frac{E_{moyenne\ cinétique}}{E_{ionisation}}$

f. Densité linéique d'ionisation moyenne DLI

Le nombre moyen d'ionisations par unité de longueur est défini par : $DLI = \frac{NI}{R}$

g. Transfert d'énergie linéique moyen TEL

Le transfert moyen d'énergie linéique (interaction entre le milieu et la particule chargée) est défini par : $TEL = \frac{E_{cinétique}}{R} = DLI \cdot E_{ionisation}$

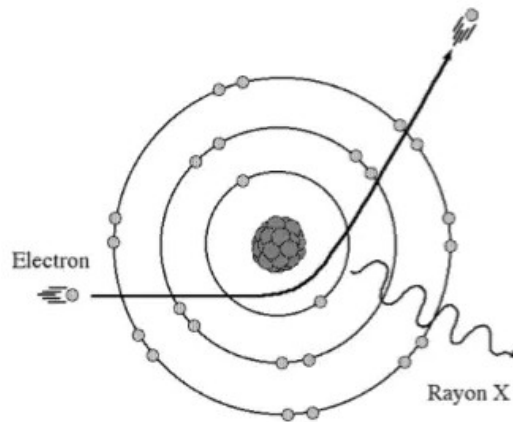
h. Pouvoir d'arrêt

Le pouvoir d'arrêt concerne la distance d'arrêt de la particule par unité de longueur ; $PA \approx TEL$

i. Freinage : électron — champ du noyau

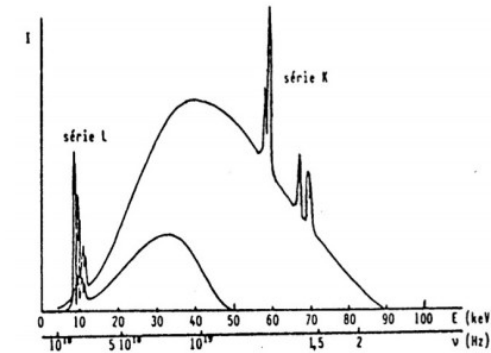
- mécanisme de production

Lorsqu'un électron passe au voisinage du champ du noyau, il est ralenti et perd de son énergie
Le freinage des électrons s'accompagne d'une radiation électromagnétique par émission de rayons X



- spectre des RX

Les rayons X émis par le tungstène ont un spectre énergétique continu



Les raies qui s'ajoutent au spectre proviennent de photons de réarrangement ; pour le tungstène :

- si $E < 50 \text{ keV}$ les raies de la série L se superposent
- si $E > 50 \text{ keV}$ les raies des séries L et K se superposent

- Longueur d'onde des RX de freinage

D'après la relation de Planck $E_{max} = h \nu_{max} = eU$

$$\lambda_{min} = \frac{hc}{eU} \quad \text{ou} \quad \lambda_{min}(nm) = \frac{1,24}{E_{max}(keV)}$$

- Rendement

$$\eta = \frac{1}{2} KZU (\%) \quad Z \text{ numéro atomique}$$

U tension accélératrice (V)

K constante dépendant du matériau utilisé à l'anode

- Indicatrice d'intensité énergétique

- pour une énergie incidente $< 500 \text{ keV}$; la direction des rayons X émis est perpendiculaire à celle des électrons incidents
- pour une énergie incidente $> 1 \text{ MeV}$; la direction des rayons X émis est parallèle à celle des électrons incidents

- Tube de Coolidge

- les électrons sont produits par effet thermoélectrique avec un filament métallique
- les électrons sont accélérés par une haute tension
- l'anode est constituée de tungstène (point de fusion élevé)
- on utilise un système d'anodes tournantes pour dissiper l'élévation de température
- plus l'intensité est élevée, plus le flux de photons X est élevé
- plus la valeur de la tension accélératrice est élevée, plus l'énergie maximale des photons X augmente

- Réglage du tube

On peut agir sur les paramètres suivants lors de l'utilisation d'un tube de Coolidge :

- l'énergie maximale E_{\max} (selon le type de tissus ; os $E_{\max} > 100\text{keV}$; tissus mou $E_{\max} = 50\text{keV}$)
- flux énergétique et la température du filament
- filtration métallique des RX les moins énergétiques ; éviter une irradiation inutile ; éviter de dégrader l'image radiographique

- Accélérateurs d'électrons

Pour augmenter l'énergie des RX, il est nécessaire d'accélérer les électrons incidents

On peut utiliser :

- Accélérateur linéaire (4-40 MeV)
- Accélérateur circulaires (100MeV)

- Applications des RX

Les applications des RX sont liées à leur énergie :

- radiographie : 50 à 100 keV
- scanner X : 80 à 150 keV
- radiothérapie : > 150 keV (de l'ordre du MeV)

i. Effet Cerenkov électron — champ de l'atome

Lorsque les électrons d'un milieu circulent à une vitesse supérieure à la célérité de la lumière dans ce milieu, il se produit l'effet Cerenkov :

- interaction entre les électrons et le champ de l'atome
- apparition d'une lumière bleue

3. Interaction particules lourdes chargées — matière

a. Collision particules lourdes chargées

Du fait de leur vitesse réduite et de leur masse importante les interactions sont nombreuses

Pour une énergie donnée, (entre 4 et 9 MeV) une particule α est 20 fois plus ionisante que un électron

Les particules chargées se propagent rectilignement dans la matière ; lors d'une interaction qui est obligatoire, il se produit une ionisation ou une excitation

b. Parcours de particules lourdes chargées

Entre 2 particules chargées de même vitesse, il existe la relation :

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{m_2}{m_1} \cdot \left(\frac{Z_1}{Z_2} \right)^2$$

c. Transfert linéique d'énergie

Le transfert linéique d'énergie est défini par :

K est une constante

n est le nombre d'atomes par unité de volume

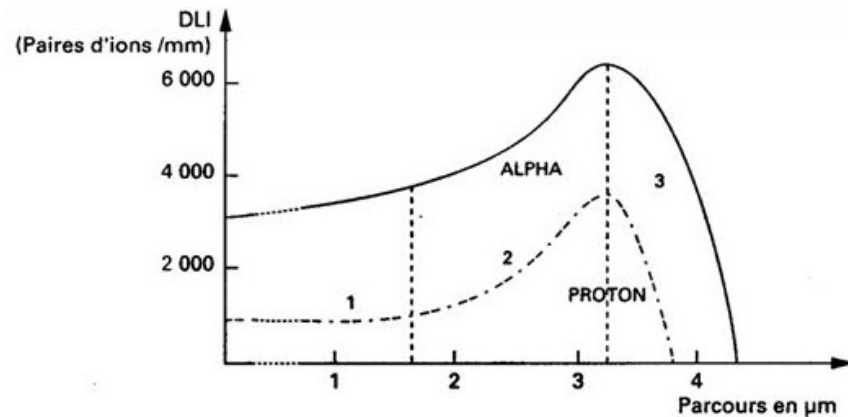
$$TEL = KnZ \left(\frac{z^2}{v^2} \right)$$

Z numéro atome du milieu

z numéro atomique de la particule incidente
v vitesse de la particule incidente

d. Pic de Bragg

En fin de parcours, pour les protons ou les particules lourdes chargées l'ionisation est beaucoup plus importante et se caractérise par le pic de Bragg ; cela permet une ionisation très précise en radiothérapie



4. Interaction photons — matière

Les photons interagissent avec la matière de manière aléatoire ; il n'existe pas de distance maximale au delà de laquelle les photons auront interagit

a. Interaction photon — champ de l'atome

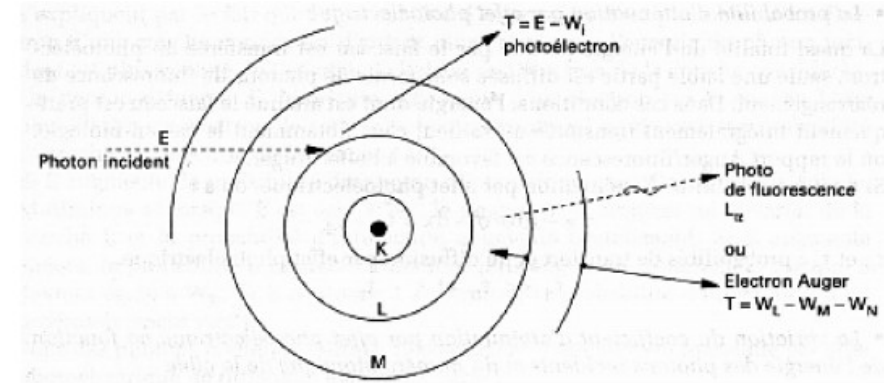
Lorsqu'un photon de faible énergie <45keV rencontre un électron non lié (effet Thomson) ou un électron lié (effet Rayleigh) alors il est dévié de sa trajectoire ; on parle de diffusion simple

Ce processus est très rare

b. Interaction photon — électron

- excitation

Un atome passe de l'état fondamental à un état excité en absorbant l'énergie d'un photon

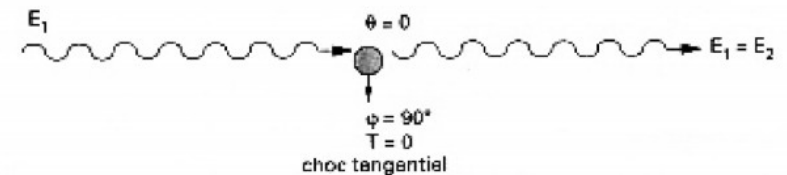


- effet Compton

Un photon ionisant transmet une partie de son énergie à un électron d'une couche superficielle ; il s'agit d'une diffusion élastique

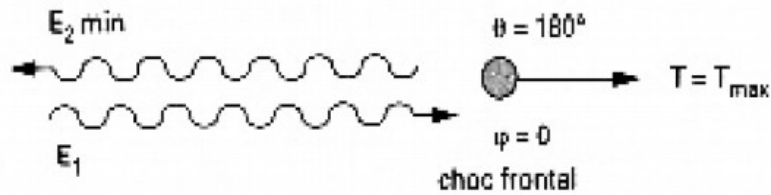
Le photon incident change de direction et un électron est expulsé avec conservation de la quantité de mouvement

- choc tangential



Le photon incident ne change pas de direction ; l'électron compton est déphasé de 90°

- choc frontal



Le photon incident revient sur lui-même ; l'électron compton est déphasé de 180°

On observe un spectre continu

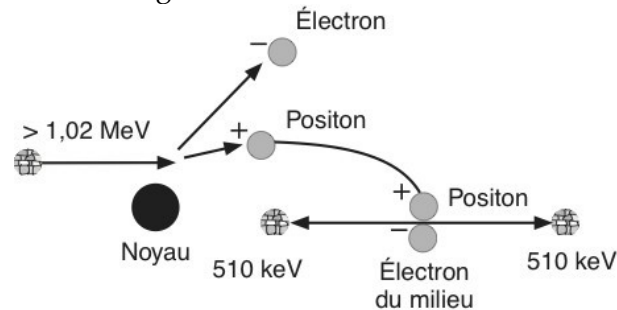
- effet photoélectrique

Un photon ionisant transmet toute son énergie à un électron d'une couche interne et disparaît
L'électron expulsé s'appelle photoélectron

Un photon de réarrangement et/ou électron Auger peuvent être émis
On observe un spectre de raies

c. Interaction photon — champ du noyau

Un photon d'énergie $> 1,022$ MeV passant au voisinage du champ du noyau se matérialise en un positron et un électron
Le positron a une durée de vie très courte et rencontre un électron pour donner 2 photons d'énergie 511 keV



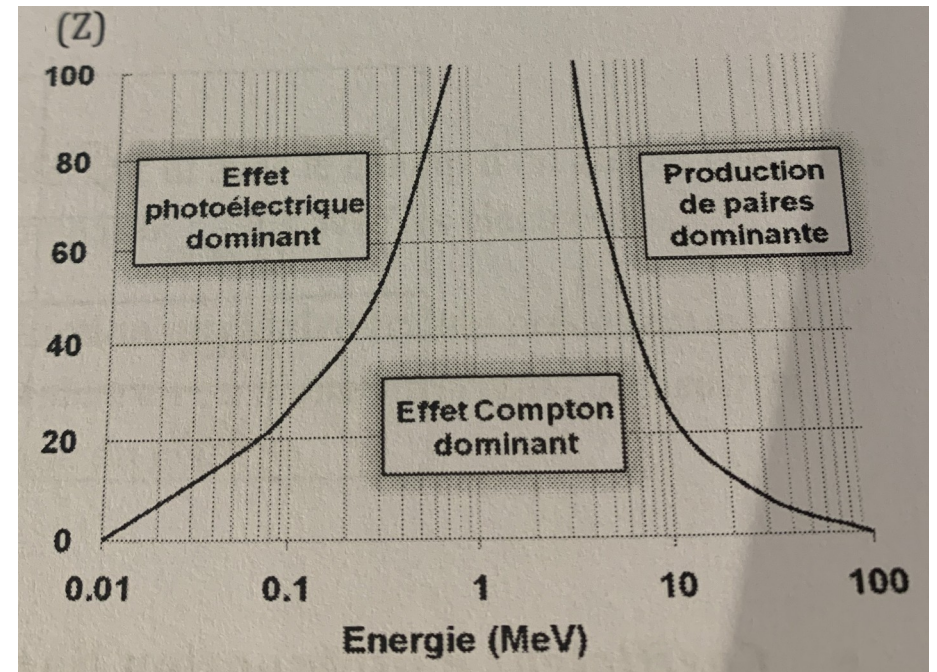
d. Interaction photon — noyau

Un noyau peut absorber un photon ; la désexcitation a lieu par émission de neutron ou par fission nucléaire

e. Atténuation d'un faisceau de photons

- Diagramme d'Evans

Les 3 principaux type d'interaction photon — matière sont résumés avec le diagramme d'Evans



- Coefficient d'atténuation linéique total

On définit $\mu = \mu_{\text{photoélectrique}} + \mu_{\text{compton}} + \mu_{\text{matérialisation}}$

- Loi d'atténuation

Soit un matériau d'épaisseur x ; soit $N(x)$ le nombre de photons diffusés dans le matériau $N(x) = N_0 e^{-\mu x}$

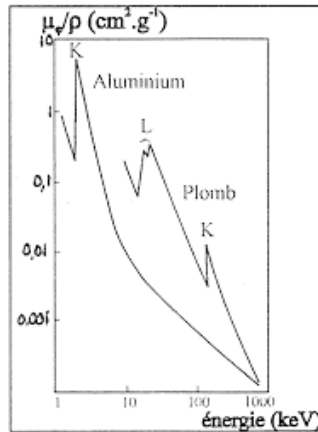
- Couche de demi atténuation CDA

La CDA est l'épaisseur de matériau qui transmet la moitié des photons incidents :

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

- Evolution de μ en fonction de l'énergie

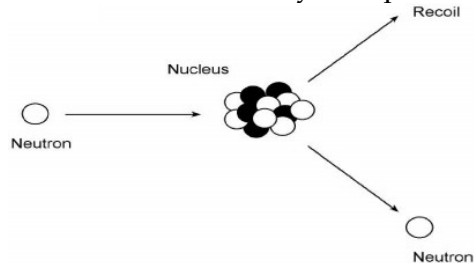
Lorsque le matériau devient saturé en énergie alors μ augmente et la CDA diminue



5. Interaction neutrons - matière

a. Diffusion de neutrons

Un neutron entre en collision avec un noyau et perd de son énergie



Pour que le neutron soit ralenti au maximum, il doit interagir avec des noyaux légers (eau, alcanes)

b. Absorption de neutrons

Il existe 2 mécanisme d'absorption de photons :

- capture neutronique (neutrons lents)
- fission nucléaire (gros noyaux)

c. Probabilité d'interaction des neutrons

On définit la probabilité d'interaction des neutrons par :

$$\sigma = \sigma_{diffusion} + \sigma_{fission} + \sigma_{capture}$$

d. Atténuation d'un faisceau de neutrons

Soit un matériau d'épaisseur x ; soit $\phi(x)$ le nombre de neutrons diffusés dans le matériau

$$\phi(x) = \phi_0 e^{-\sigma x}$$