

Biophysique des Radiations

Suite du Cours

4. Production Rayons X et Rayons Gamma γ

C'est l'aspect corpusculaire qui domine car l'énergie est grande. Ce sont des photons d'énergie supérieure à 10KeV. En médecine le domaine d'énergie le plus utilisé est compris entre 50KeV et 10 MeV. Les rayons X et les rayons gamma (γ) sont de même nature, mais sont produits différemment : les rayons X sont produits par des transitions électroniques alors que les rayons gamma sont produits lors de la désintégration radioactive des noyaux des atomes ou d'autres processus nucléaires, ils se produisent lors des transitions de nucléons entre les couches nucléaires.

4.1.Rayons X

Les rayons X sont une forme de rayonnement électromagnétique à haute fréquence constitué de photons de faible longueur d'onde (0.03 nm à 10 nm). L'énergie de ces photons va d'une centaine d'eV (électron-volt), à environ un MeV. Ils sont émis par le bombardement de la surface d'un solide par des rayons cathodiques qui sont des faisceaux d'électrons accélérés par des tensions variant entre 10^3 et 10^6 V.

4.2.Production des Rayons X

Les rayons X se produisent par des particules chargées animées d'une vitesse suffisante qui entre en collision avec la matière. On distingue les rayons X mous, utilisés en cristallographie (0.5 \AA° à 2.5 \AA°), et les rayons X (0.05 \AA° à 1 \AA°) dans utilisés dans le domaine médical.

Le principe est basé sur la projection des électrons accélérés sous une forte tension (de plusieurs kilovolts) sur une cible métallique, en général du tungstène, dans laquelle l'absorption de ces électrons provoque un rayonnement de freinage qui est constitué de photons (rayons X).



Figure 2. Spectre des Rayons X

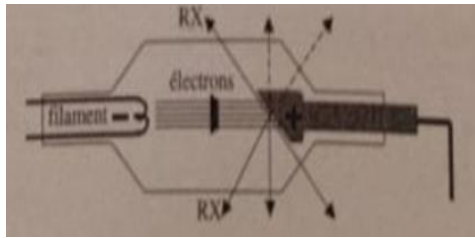


Figure 3. Schéma du principe de production des Rayon X

En médecine, on utilise les faisceaux d'électrons pour soigner des tumeurs cancéreuses superficielles et des faisceaux de RX pour les tumeurs plus profondes, la tension d'accélération étant choisie en fonction de la profondeur de la tumeur à traiter. Sont utilisés des RX émis sous 30 kV en mammographie, sous 50 à 60 kV en radiologie dentaire et entre 100 et 200 kV en radiologie classique ou scanner. Dans l'industrie également, on peut utiliser ces appareils soit en émission d'électrons pour irradier à fortes doses des éléments de faible épaisseur (traitement de certains plastiques), soit en RX pour des irradiations en profondeur.



Figure 4. Scanner

Un électron incident d'énergie cinétique E_c , passant assez près du noyau, est attiré par lui suivant la loi d'attraction de Coulomb. La trajectoire de l'électron s'incurve et la particule est freinée. Ceci entraîne une diminution de l'énergie cinétique de la particule. Cette fraction d'énergie cinétique perdue se retrouve sous forme d'un rayonnement électromagnétique X.

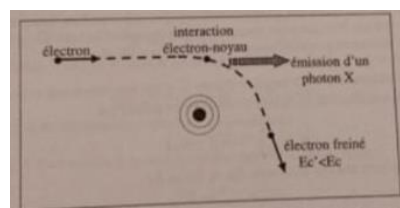


Figure 5. Phénomène physique de la production des Rayons X

-Electron subissant la force d'attraction d'un noyau atomique

- ✓ Ralentissement
- ✓ Déviation
- ✓ Perte D'énergie sous forme de photons de freinage

-Plus l'énergie de l'électron augmente et le Z est grand, plus le phénomène sera important

-L'énergie cinétique peut être représentée comme suit :

$$E_c = 1/2 m v^2$$

-L'Energie d'un photon : $E \text{ (eV)} = h \nu = h c / \lambda_0$

-La longueur d'onde minimum λ_0 :

$$\lambda_0 \text{ (m)} = hc / eV = 6.64 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8 / 1.6 \cdot 10^{-19} = 12.4 \cdot 10^{-7} / V(V), \text{ le potentiel } V \text{ en volt}$$

$$\lambda_0 \text{ (Å)} = 12.4 / V(KV) \text{ Relation de Duane et Hunt}$$

4.3.Définition du rayonnement de freinage

Un électron rapide subit à l'approche d'un noyau atomique de la cible une force coulombienne d'attraction qui va incurver sa trajectoire. De ce fait il se produit un mouvement d'accélération centrale. Or toutes charges électriques accélérées émettent un rayonnement électromagnétique (rayon x ou photon x) qui correspond à une certaine quantité d'énergie. L'électron subit une perte d'énergie, d'où freinage.

5. La Radioactivité

5.1 Définition

La radioactivité inventée vers 1898 par Marie Curie, est la propriété des noyaux des atomes instables à se transformer spontanément, directement ou indirectement, en noyaux stables. Lors de ces transformations sont émis des rayonnements qui correspondent à des noyaux d'hélium (particules α), à des électrons ou positons (particules β) et à des photons de grande énergie (rayons γ). La radioactivité peut être d'origine naturelle (due aux rayonnements cosmiques et telluriques) ou artificielle obtenue par des réactions nucléaires. Bien entendu un isotope donné, qu'il soit d'origine naturelle ou artificielle, a exactement les mêmes propriétés radioactives.

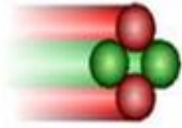

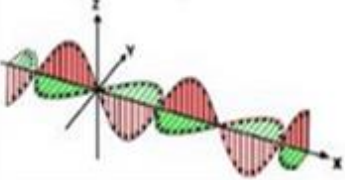
	rayons α	rayons β	rayons γ
nature	noyaux d'hélium ${}^4_2\text{He}$ vitesse jusqu'à 20 000 km/s 	électrons β^- ; β^+ vitesse jusqu'à 290 000 km/s 	ondes électromagnétiques de très petite longueur d'onde 
origine	expulsion de ${}^4_2\text{He}$ (formé de 2 protons et 2 neutrons)	${}^A_Z X \Rightarrow {}^A_{z-1} X' + {}^0_{+1} e + \nu$	suite à une décomposition α ou β , un noyau excité se stabilise par émission d'un photon γ
principe :	${}^A_Z X \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2} Y + {}^4_2 \text{He}$	${}^A_Z X \Rightarrow {}^A_{z+1} X' + {}^0_{-1} e^+ + \bar{\nu}$	${}^A_Z X^* \rightarrow {}^A_Z X + h\nu$
exemple :	${}^{226}_{88} \text{Ra} \rightarrow {}^{222}_{86} \text{Rn} + {}^4_2 \text{He}$	${}^{99}\text{Mo} \rightarrow {}^{99m}\text{Tc} + \beta^-$ ${}^{18}\text{F} \rightarrow {}^{18}\text{O} + \beta^+$	${}^{99m}\text{Tc} \rightarrow {}^{99}\text{Tc} + \gamma$

Tableau 2. Présentations des rayons γ , particules α et β

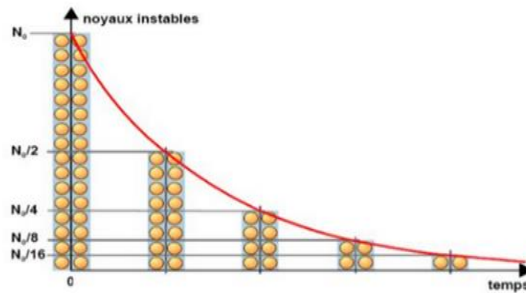
5.2.La décroissance radioactive

La principale source de rayonnement particulaire (électrons, proton, alpha, ...) et de rayonnement gamma ($R \gamma$) est la désintégration des radioéléments (radioactivité). La désintégration des noyaux instables suit la loi :

$$dN = - \lambda N dt \Rightarrow dN/N = -\lambda dt + C$$

Où N est le nombre de noyaux non désintégrés à l'instant t , N_0 est le nombre initial de noyaux en λ (en s^{-1}) est la probabilité de désintégration par unité de temps appelée aussi la constante radioactive.

L'expérience montre que la diminution du nombre total N des atomes qui se désintègrent suit la courbe exponentielle.



Soit N_0 est le nombre d'atome à $t = 0$ et N nombre d'atome après un temps t

La variation du nombre dN est proportionnel au temps dt

En intégrant les deux termes de l'équation on obtient :

$$\text{Log } N = -\lambda t + C$$

Pour calculer la constante d'intégration C on revient aux conditions initiales :

$$\text{A } t = 0, N = N_0 \Rightarrow C = \text{Log } N_0 \Rightarrow \text{Log } N = -\lambda t + \text{Log } N_0 \Rightarrow \text{Log } N / N_0 = -\lambda t$$

$$\Rightarrow N = N_0 e^{-\lambda t}$$

5.2.1.La période radioactive

La période radioactive (notée $T_{1/2}$) est le temps de demi vie au bout duquel la moitié des atomes initiaux disparaissent c'est-à-dire l'activité initiale est divisée de moitié. Ainsi, celle-ci sera divisée par 2 au bout d'une période, par 4 au bout de deux périodes etc.

On définit aussi la demi-vie ou période T par :

$$\text{A } t = T, N = N_0 / 2 = N_0 e^{-\lambda t} \Rightarrow \lambda = \log 2 / T (\lambda \text{ en } S^{-1})$$

5.3.L'activité et le becquerel

Une substance radioactive est caractérisée par son « activité ». Cette grandeur traduit le nombre de désintégrations qui se produit par unité de temps (généralement la seconde). Ainsi, l'activité représente ainsi la vitesse de désintégration du radioélément :

$$\begin{aligned} A = dN/dt, R = dN/dt &= \lambda N = \lambda N_0 e^{-\lambda t} \\ &= R_0 e^{-\lambda t} \end{aligned}$$

Où R_0 : activité initiale

R : activité du temps (t)

Avant l'introduction du Système International pour les unités de mesure (S.I.), l'activité était exprimée en curie (Ci). Le curie correspond au nombre de désintégrations par seconde produites par 1 gramme de radium à l'équilibre, soit 37 milliards de désintégrations par seconde (dps). Cette unité est remplacée depuis plusieurs années par le becquerel (Bq) qui est égal à 1 désintégration par seconde. Ainsi, 1 Ci équivaut à 37 milliards de Bq . On utilise communément les multiples méga (MBq), giga (GBq) et térabecquerel (TBq) (respectivement, 1 million, 1 milliard et mille milliards de becquerels) ou plus rarement le sous-multiple millibecquerel (mBq) pour les mesures liées à l'environnement.

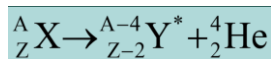
$$1\text{Ci} = 3.7 \cdot 10^{10} \text{ Bq} = 3.7 \cdot 10^{10} \text{ dps}$$

$$1\text{Bq} = 1\text{dps}$$

Il existe différents types de désintégrations dont les principales sont :

La désintégration α

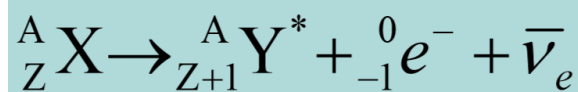
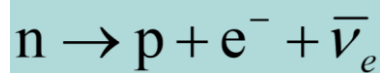
Il y a émission d'un noyau d'hélium appelée particule alpha et obtention d'un noyau Y



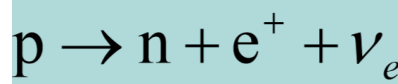
La désintégration β

Il y a émission d'un électron e^- appelé β^- ou d'un positon e^+ appelé β^+

L'émission β^- s'accompagne toujours d'une émission anti-neutrino électronique (masse nulle, charge électrique nulle)



L'émission β^+ s'accompagne toujours d'une émission neutrino électronique



La désintégration γ

Il y a émission d'un photon γ à partir d'un noyau métastable. Donc c'est l'obtention d'un noyau Y (exemple de la radioactivité) dans un état excité, qui revient à son état fondamental en émettant un ou plusieurs photons.



6. effets biologiques des radiations

Ils existent plusieurs types d'effets biologiques des rayonnements ionisants sur les tissus vivants : effets physiques, effets sur l'ADN et sur les cellules. Les effets de ces rayonnements tiennent compte de la qualité du rayonnement (la dose équivalente absorbée la dose absorbée par un tissu biologique. Les effets biologiques d'une irradiation rapide sont très différents de ceux d'une radiation longue. Les premiers entraînent une mort cellulaire et se manifestent en quelques heures, jours ou semaines, les autres sont mieux tolérés car une partie des lésions sont réparées. Cependant, des doses de radiation trop faibles pour détruire les cellules peuvent néanmoins provoquer des modifications cellulaires dont les conséquences apparaissent au bout de plusieurs années.

Pour les effets physiques tels que l'effet photoélectrique et Compton ; les conséquences de ces effets sur une molécule d'eau H_2O présente dans le tissu biologique. La cassure entre des liaisons d'hydrogène et d'oxygène de la molécule d'eau va entraîner des radicaux libres H^* et OH^* . L'ionisation provoquée dans les cellules le long du parcours des particules est susceptible d'entraîner des modifications chimiques non seulement au niveau de molécules simples comme l'eau, mais d'agresser des structures aussi complexes et cruciales que la molécule essentielle pour la vie l'ADN. Deux effets potentiels négatifs sur l'ADN des rayonnements ionisants peuvent avoir une action directe ou indirecte sur les cellules qui peuvent être assimilés à une solution aqueuse :

- Une action directe provoquant de lésions au niveau des molécules de soluté
- Une action indirecte due à l'interaction des produits de la radiolyse de l'eau avec les molécules du soluté

Action directe

La molécule reçoit la particule ionisante. La molécule ainsi ionisée peut :

- Transférer sa charge vers une autre molécule
- Se couper en deux fragments plus petits

Action indirecte

La radiolyse de l'eau conduit à la formation des radicaux très réactifs :

- HO^{*2} : oxydant
- H^{*} (hydrogène) : réducteur

Ces radicaux libres peuvent réagir entre eux ou avec d'autres molécules.

7-Théorie de la cible

La théorie de la cible est basée sur une structure cellulaire pyramidale où il existe une molécule dont le rôle est primordial : la cible, il s'agit de l'ADN. Si la radiation frappe la molécule de la cellule (la cible), la survie cellulaire peut être compromise et l'atteinte de cette molécule suffit de provoquer sa mort. Le nombre de cellules survivantes (N) après l'action de la dose (D) décroît exponentiellement :

$$N = N_0 e^{-D/D_0}$$

avec N le nombre initial de cellules et D₀ la dose nécessaire pour laisser 37% de cellules survivantes

On appelle la dose létale (D_{1/2}) la dose nécessaire pour obtenir 50% de cellules survivantes.

$$D_{1/2} = D_0 \cdot \log 2$$

Le nombre des cellules survivantes : $N = N_0 e^{-D \log 2 / D_{1/2}}$

La proportion des cellules survivantes en pourcentage ($S = N/N_0$)

et celle des cellules mortes $T = N_0 - N / N_0 = 1 - N_0 e^{-D/D_0}$

8-Imagerie Médicale

L'imagerie médicale est de plusieurs types. Il y a l'imagerie par atténuation (Radiographie standard et Scanner) et l'imagerie par émission en médecine nucléaire (scintigraphie, Position émission Tomography PET).