

1. Radioactivité

1.1. Phénomènes de radioactivité.

1.1.1. *Définitions.* La radioactivité est une réaction dite nucléaire car elle concerne le noyau de l'atome par opposition aux réactions chimiques qui ne concernent que le cortège électronique sans modifier le noyau. Elle a été découverte en 1896 par Henri Becquerel dans le cas de l'uranium, et très vite confirmée par Pierre et Marie Curie pour le radium.

La radioactivité correspond au phénomène d'émission par un atome d'un rayonnement constitué de particules matérielles ou de photons. si cet atome est incorporé à une molécule par substitution d'un de ces constituants, la molécule devient à son tour radioactive avec les mêmes caractéristiques que l'atome.

1.2. Propriétés de la désintégration. Un noyau radioactif est un noyau instable dont la désintégration (destruction) provoque l'apparition d'un nouveau noyau.

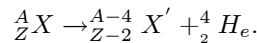
la désintégration radioactive d'un noyau est aléatoire, on ne peut pas prévoir quand va se produire. Elle est spontanée et se produit sans aucune intervention extérieure. Elle ne dépend pas ni de son environnement chimique, de l'espèce chimique qui contient le noyau radioactif, ni des conditions extérieures (pression ou température).

1.3. Equilibre radioactif. Considérons un élément radioactif A qui se désintègre en donnant naissance à un atome qui est lui même radioactif. On dit qu'on atteint l'équilibre radioactif lorsqu'à un moment donné, on aura autant d'atomes B qui mourront que d'atomes B qui naîtront. On a alors

$$N_A \cdot \lambda_A = N_B \cdot \lambda_B$$

1.4. Différents types de radioactivité. Il existe trois types de radioactivité:

1.4.1. 1- *Radioactivité alpha* (α). Ce processus obéit à la réaction

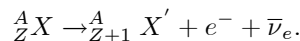


La transformation n'est pas isobarique, et elle ne peut se produire que pour $A > 4$. Il y a production d'une particule, dénommée alpha et notée ${}^4_2 He$ qui correspond à 2 protons (noyau d'hélium) et 2 neutrons. Elle est très stable car son énergie de liaison par nucléon est importante (7.07 MeV/nucléon). L'énergie produite du fait de la désintégration varie entre 4 et 9 MeV, et l'énergie de la particule alpha diminue quand la période radioactive augmente.

Par exemple, le radium se transforme en radon: ${}^{226}_{88} Ra \rightarrow {}^{222}_{86} Rn + {}^4_2 He$.

1.4.2. 2- *Radioactivité bêta* (β). Les processus beta sont au nombre de trois, tous font intervenir des électrons et aboutissent à une transformation isobarique qui conserve le nombre de nucléon.

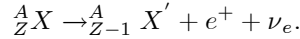
1- Emission β^- . Ce processus obéit à la réaction



Soit dans le cas le plus simple de la transformation d'un neutron ${}^1_0 n \rightarrow {}^1_1 p + e^- + \bar{\nu}_e$, et ce processus est le plus fréquent car les noyaux radioactifs naturels ont souvent un excès de neutrons qui peut être réduit par désintégration β^- .

A titre d'exemple: ${}^{214}_{83} Bi \rightarrow {}^{214}_{84} Po + e^- + \bar{\nu}_e$.

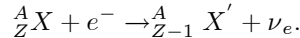
2- Emission β^+ . Ce processus obéit à la réaction



Soit dans le cas le plus simple de la transformation d'un neutron ${}^1_0 p \rightarrow {}^1_0 n + e^+ + \nu_e$, ce processus traduit l'excès de protons et concerne que des noyaux artificiels.

A titre d'exemple: ${}^1_7 N \rightarrow {}^1_6 X' + e^+ + \nu_e$.

3- Capture électronique. La capture d'un électron, en général de la couche K, par l'atome, a les mêmes conséquences que l'émission d'un positon puisqu'un proton est transformé en un neutron et la charge électrique est diminuée d'une unité. D'autre part, le cortège électronique se réorganise afin de combler la lacune laissée dans les couches internes par l'électron capturé. Cette réorganisation est accompagnée d'émissions de rayons X et/ou d'électrons Auger, résulte de l'interaction électromagnétique. Alors, il est possible d'envisager la réaction:



A titre d'exemple, par capture électronique: ${}^{125}_{53} I + e^- \rightarrow {}^{125}_{52} Te^* + \nu_e$.

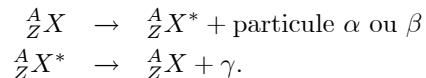
- La capture électronique accompagne toujours la désintégration β^+ .

1.4.3. 3- *Radioactivité gamma* (γ). Les processus gamma, sont au nombre de deux, liés l'un et l'autre à une transformation isomérique nucléaire du noyau (qui ne change que le niveau d'énergie de noyau). Ce sont: - L'émission des photons d'origine nucléaire.

- La conversion interne.

L'émission des photons d'origine nucléaire. Un noyau excité ${}^A_Z X^*$ est produit dans un état métastable, et retourne sur son niveau fondamental, en émettant un photon γ . Ce mécanisme est associé à d'autres processus radioactifs qui ont permis la transition d'un noyau X dans son état fondamental vers le noyau X^* dans un état excité.

la radioactivité γ est souvent associée aux mécanismes β et α .



Par exemple, le ${}^{60}Co$ par désintégration β^- conduit avec une probabilité de 99.9% à un état excité du ${}^{60}Ni$. Ce dernier se désexcite en perdant les 2158.8 keV d'excès d'énergie en deux étapes par émission de photons γ .

La conversion interne. le mécanisme de désintégration γ permet à un noyau excité de retourner sur son niveau fondamental par émission d'un photon. Un autre mécanisme est possible: le noyau cède son excès d'énergie à un électron de la couche K qui est alors émis par l'atome, il s'agit du mécanisme de conversion interne. Cette vacance dans la couche K est ensuite compensée par un électron d'énergie supérieure. L'excès d'énergie résultant est compensé par l'émission d'un photon ou d'un électron Auger.

A titre d'exemple, ${}^{125}_{52} Te^*$ conduit ${}^{125}_{52} Te$ dans 7% des cas par émission γ et dans 93% des cas par conversion interne.

2. Quantification de la radioactivité

2.1. Lois de conservation. Lors d'une désintégration nucléaire, il y a conservation de nombre de charge Z et du nombre de nucléons A , selon les lois de conservation de **Soddy** suivantes:

L'équation de la désintégration s'écrit: $\frac{A}{Z}X \rightarrow \frac{A_1}{Z_1}Y + \frac{A_2}{Z_2}P$,

- lois de conservation du nombre de masse A ; $A = A_1 + A_2$,

- lois de conservation du nombre de charges Z ; $Z = Z_1 + Z_2$.

La désintégration d'un noyau X (appelé noyau père) conduit à un noyau Y (appelé noyau fils) et à l'expulsion d'une particule P (particule α ou β).

2.2. Loi de décroissance radioactive. Si on note N_0 , le nombre initial, d'atomes, alors le nombre N , de particules encore existantes à un instant t est donné par la loi de décroissance radioactive:

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

où λ est la constante radioactive (s^{-1}) caractéristique d'un élément.

2.2.1. *Notion d'activité.* En utilisant la définition de l'activité d'un échantillon d'une population d'atomes, on a

$$A = -\frac{dN}{dt} = \lambda N.$$

Pour quantifier l'activité radioactive A d'un échantillon, on déduit le Becquerel, (Bq) qui correspond à une désintégration par seconde.

En général la radioactivité naturelle s'exprime en Becquerel par kilogramme (Bq/kg), et on trouve une autre unité historique, le Curie (Ci) qui correspond à $3.7 \cdot 10^{10} Bq$.

2.3. Période radioactive. la Période radioactive caractérise le temps au bout duquel, la moitié du nombre initial N_0 des noyau radioactives a disparu, on a donc

$$T_{\frac{1}{2}} = \frac{\ln 2}{\lambda},$$

et chaque atome se caractérise par une durée de vie moyenne τ : $\tau = \frac{1}{\lambda}$.

2.4. Période biologique. Si un organisme a ingéré une certaine quantité de produits radioactifs, il est à son tour considéré comme radioactif. S'il n'y a pas d'élimination de la substance radioactive, on observe une décroissance de la radioactivité donnée simplement par la période radioactive $T_{\frac{1}{2}}$ (qui sera noté T_{phys}). Pratiquement, l'organisme va éliminer naturellement les corps radioactifs ingérés et de ce fait devient moins radioactif. la radioactivité de l'organisme est caractérisée par une période effective T_{eff} qui reliée à la période biologique T_{bio} liée au métabolisme et à la période T_{phys} de l'élément radioactif. En effet, on suppose que la loi de décroissance biologique est également exponentielle, on a

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda_{phys}N - \lambda_{bio}N = -(\lambda_{phys} + \lambda_{bio})N = -(\lambda_{eff})N$$

et par définition de la période radioactive (biologique ou physique), on a donc

$$\frac{1}{T_{eff}} = \frac{1}{T_{bio}} + \frac{1}{T_{phys}}$$

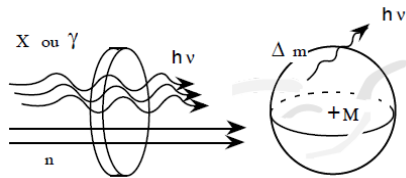
3. Dosimétrie des rayons X ou γ

La dosimétrie des rayonnements est la mesure, le calcul et l'évaluation des doses absorbées.

La dosimétrie médicale est le calcul de la dose absorbée et l'optimisation de l'administration de la dose dans les examens et traitements médicaux. En général, les expositions aux rayonnements provenant des examens de diagnostic médical sont faibles (en particulier dans les utilisations diagnostiques). Les doses peuvent également être élevées (uniquement à des fins thérapeutiques), mais dans chaque cas, elles doivent toujours être justifiées par les avantages d'un diagnostic précis des conditions possibles de la maladie ou par les avantages d'un traitement précis. Ces doses comprennent les contributions de la radiologie diagnostique médicale et dentaire (radiographies diagnostiques), de la médecine nucléaire clinique et de la radiothérapie. Dosimétrie médicale est souvent effectuée par un physicien de santé.

3.1. Concepts fondamentaux en dosimétrie.

3.1.1. *Notion de KERMA.* L'énergie transférée est caractérisée par le KERMA (est l'acronyme de kinetic energy released per unit mass) est égale à l'énergie totale transférée par unité de masse irradié.



$$KERMA = K = \frac{\Delta E_c}{\Delta m}.$$

Il peut être exprimé aussi:

$$K = F \cdot \frac{\mu_t}{\rho},$$

L'unité MKSA (SI) est le joule par kilogramme, encore appelée Gray (Gy) avec $1Gy = 1J/kg^{-1} = 100Rad$ ou $1Rad = 100erg/g = 10^{-2}Gy$, et $1erg = 10^{-7}joule$

F : la fluence ou densité surfacique d'énergie.

μ_t : le coefficient linéaire d'atténuation pour l'énergie transférée.

ρ : la masse volumique du matériau irradié.

3.1.2. *Notion de Dose absorbée.* l'énergie (W_i) absorbée ou l'énergie déposée par un tissu par unité de masse (Δm) lors de sa traversée par un rayonnement est appelée dose absorbée D :

$$D = \frac{\sum W_i}{\Delta m},$$

elle se mesure en Gray et elle dépend des conditions d'exposition:

- Si l'irradiation est interne, l'élément radioactif étant assimilé par l'organisme, son activité permet de connaître le nombre de désintégration par seconde et donc le nombre de particules (dont l'énergie est connue) qui sont susceptible d'interagir avec les constituants du tissu.

- Si l'irradiation est externe, les conditions géométriques de l'exposition définissent la fraction du rayonnement total à prendre en compte dans l'estimation de la dose absorbée.

Dans ce dernier cas, si l'émission est isotrope, pour une surface s exposée, située à une distance d de la source, la fraction interceptée du rayonnement émis est:

$$\frac{s}{4\pi d^2},$$

avec: $4\pi d^2$ représentant la surface de la sphère de rayon d de la source centrée sur la source.

L'action d'un rayonnement dépend à la fois de sa nature (photons, électrons, particules, alpha...) et du tissu traversé (os, moelle osseuse...). Il faut donc pondérer la dose absorbée par deux facteurs: W_R qui dépend de rayonnement et W_T qui dépend du tissu ou de l'organe traversé.

En radiologie $W_R = 1$. La dose absorbée est notée $D_{T,R}$ et elle se mesure en Gray.

On note que le KERMA ne dépend pas de l'entourage de la masse Δm , contrairement à la dose absorbée.

Dans le domaine radiologique, compte tenu des énergies des rayons X utilisés (typiquement inférieures à 150 keV), le kerma et la dose absorbée sont identiques en tout point du milieu traversé et dans ce cas, on dit que l'**équilibre électronique** est réalisé, qui est généralement obtenu pour des photons d'énergie inférieure ou égale à 3 MeV.

$h\nu \leq 3MeV$ L'équilibre électronique est obtenu : $K = D$

$h\nu > 3MeV$ L'équilibre électronique n'est pas obtenu : $K \neq D$.

La **dose équivalente** H_T : est une grandeur physique mesurant l'impact sur les tissus biologiques d'une exposition à un rayonnement, prend en compte le type de rayonnement, se mesure en sievert (Sv) et a pour expression:

$$H_T = \sum_R W_R.D.$$

La **dose efficace** E : est la somme des doses équivalentes et absorbées par les tissus ou organes, prend en compte le type de tissu ou d'organe touché. Se mesure en sievert (Sv) et a pour expression:

$$E = \sum_T D.H_T.$$

Remarque:

La dose maximale admissible est de 20 mSv par an. Au-delà de 10 Sieverts reçus, on considère que la mort est certaine.

3.1.3. *Notion d'Exposition.* L'exposition aux rayonnements est une mesure de l'ionisation de l'air due aux rayonnements ionisants des photons à haute énergie (rayons X et rayons gamma). les électrons projetés épuisent leur énergie en créant des ionisations et des excitations. Il se trouve que pour chaque ionisation créée l'électron cède à la matière une quantité d'énergie bien définie, égale à $34eV$ (soit $5.44.10^{-18}j$)

En appelant ΔN le nombre d'ionisations créées par un électron d'énergie initiale ΔE_c , on a

$$\begin{aligned} \Delta E_c &= \bar{w}.\Delta N \\ \bar{w} &= 34eV. \end{aligned}$$

L'exposition est la somme des charges électriques (ΔQ) des ions produits dans l'air par les électrons mis en mouvement dans une masse d'air Δm . On exprime

l'exposition X par:

$$X = \frac{\sum \Delta Q}{\Delta m}$$

L'exposition s'exprime en C/kg (coulomb par kilogramme) ou en Röntgen (R) tels que: $1R = 2,58 \cdot 10^{-4} C/kg = 1,6 \cdot 10^{12} \text{ionisation/g}$.

Une exposition de 1 Röntgen correspond à un KERMA dans l'air $87,7 \text{ergs/g}$.

On peut mesurer l'exposition et la dose absorbée seulement si l'énergie des rayons X ou $\gamma < 3 \text{Mev}$ et dans ce cas:

Si le matériau irradié est l'air, L'exposition est reliée au KERMA dans l'air par la relation:

$$X = \frac{e}{\bar{w}_{air}} \cdot K_{air}$$

Où \bar{w}_{air} est l'énergie moyenne d'ionisation dans l'air et e la charge élémentaire.

La densité massique de charge est définie comme le rapport de la somme des charges électriques des ions produits dans un milieu de masse Δm par les électrons traversant Δm .

$$Y = \frac{\sum \Delta q}{\Delta m}$$

La densité massique de charge s'exprime comme l'exposition en C/kg .

La densité massique de charge est reliée à la dose absorbée par :

$$Y = \frac{e}{\bar{w}} \cdot D$$

Où \bar{w} est l'énergie moyenne d'ionisation du milieu.

3.2. Relations entre les différentes grandeurs dans le cas de l'équilibre électronique. Pour des rayons X et γ d'énergie inférieure à 3 MeV, il est possible de mesurer une exposition et une dose absorbée dans un tissu.

3.2.1. *Relation entre la dose absorbée dans l'air et l'exposition.* $D \text{ (rad)} = 0,877R \text{ (Röntgen)}$.

3.2.2. *Relation entre l'exposition et la fluence énergétique au point de mesure.*

$$F \text{ (ergs/cm}^2\text{)} = \frac{87.7}{\left(\frac{\mu_t}{\rho}\right)_a} \cdot R$$

$\left(\frac{\mu_t}{\rho}\right)_a$: est le coefficient massique de transfert dans l'air exprimé en cm^2/g .

3.2.3. *Relation entre l'exposition et la dose absorbée dans un Matériau quelconque.*

$$D_m \text{ (rad)} = \frac{\left(\frac{\mu_t}{\rho}\right)_m}{\left(\frac{\mu_t}{\rho}\right)_a} \cdot 0.87R$$

$\left(\frac{\mu_t}{\rho}\right)_m$: est le coefficient massique de transfert dans un matériau

4. La radioprotection

Le but de la radioprotection est d'empêcher ou de réduire les risques liés aux rayonnements ionisants.

Afin d'éviter ou réduire ces risques, la radioprotection s'appuie sur trois grands principes: justification, optimisation et limitation des doses de rayonnements. Pour appliquer ces principes, la radioprotection met en oeuvre des moyens réglementaires

et techniques spécifiquement adaptés à trois catégories de population: le public, les patients et les travailleurs.

la justification: Les sources de rayonnements ionisants ne doivent pas être utilisées s'il existe d'autres alternatives (par exemple, pas de radiographie si des résultats similaires sont obtenus avec une échographie); de plus, les sources radioactives sont maintenant strictement interdites dans les produits de la vie courante.

Dans le cas des analyses médicales, c'est au médecin de faire le compromis entre le bénéfice et le risque: le bénéfice que le patient retire de l'examen doit être supérieur au risque radiologique.

l'optimisation: des expositions à ces rayonnements au niveau le plus faible possible.

la limitation: Il existe des limites annuelles d'exposition à ne pas dépasser: elles sont les plus basses possible, afin d'éviter l'apparition d'effets stochastiques. Chaque pays définit des limites réglementaires en fonction des recommandations de la Commission internationale de protection radiologique (CIPR).