

*la radioactivité*

## Introduction

L'homme est exposé en permanence aux rayonnements ionisants, par exemple à ceux du soleil. La lumière s'accompagne de rayonnements invisibles connus sous le nom de rayonnements ultraviolets et infrarouges. L'homme est également exposé à d'autres rayonnements invisibles de très forte énergie qui proviennent de la planète Terre, les rayonnements telluriques. De tous temps, les populations humaines ont été soumises à des rayonnements d'origine très variée. Indépendamment de l'irradiation directe due aux rayons cosmiques et aux rayonnements de matières radioactives contenues dans les roches, l'homme est soumis à une certaine irradiation interne due aux radioéléments d'origine naturelle contenus dans le sol, l'air et l'eau de boisson et les aliments, et qui peuvent se déposer dans l'organisme après ingestion ou inhalation [1].

La plus grande partie de la radioactivité naturelle de l'organisme est due à des éléments des séries de l'uranium, du thorium et du potassium 40. Les débits de dose provenant des rayonnements d'origine naturelle varient d'une région à l'autre dans d'assez larges limites. De nombreux facteurs affectent la dose d'irradiation absorbée par l'homme à partir de la radioactivité naturelle. Parmi ces facteurs, citons l'âge, le sexe, les habitudes alimentaires, le site de la résidence, le type d'habitation, etc. [2].

### 1.1 Structure de l'atome :

Le noyau de l'atome est composé de deux catégories de particules de masses voisines appelées nucléons, les uns sont chargés d'électricité positive (les protons), les autres sont neutres (les neutrons). Chaque atome est caractérisé par deux nombres  $Z$  et  $N$ , où  $Z$  est appelé numéro atomique, il indique le nombre de protons et d'électrons de l'atome.  $N$  indique le nombre de neutrons qui peut varier pour un même élément.  $A=N+Z$  représente le nombre total de nucléons, on l'appelle aussi nombre de masse. Cet assemblage de nucléons correspond à un équilibre entre les deux interactions antagonistes qui s'exercent au sein du noyau atomique : l'interaction coulombienne qui se traduit par une répulsion des protons entre eux, du fait de leur charge électrique de même signe, elle est donc proportionnelle à  $Z$ , et l'interaction nucléaire forte qui lie les nucléons entre eux à condition qu'ils se touchent, elle est proportionnelle à  $A$  [3].

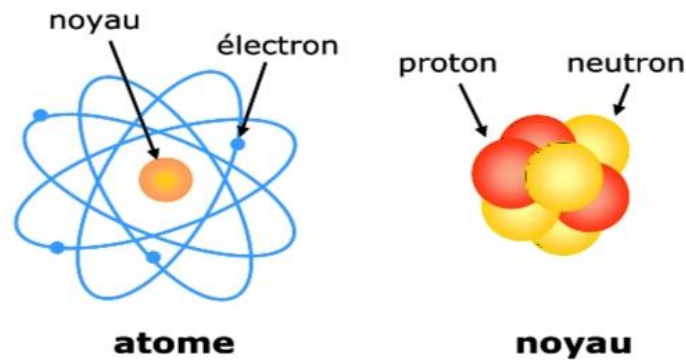


Figure 1.1 : Structure de l'atome [4]

### 1.1.1 Classification des noyaux :

Les noyaux peuvent être classés en trois catégories différentes :

#### Isotope :

Deux isotopes sont deux nucléides de même numéro atomique, mais de nombres de masse différents :  $Z_1=Z_2$  mais  $A_1 \neq A_2$ . Ils portent le même nom et ont des propriétés chimiques identiques [5] (ex : les isotopes du chlore  ${}^{35}_{17}\text{Cl}$  et  ${}^{37}_{17}\text{Cl}$ ).

#### Isobare :

Deux isobares sont deux nucléides de numéros atomiques différents mais de même nombre de masse :  $A_1=A_2$  mais  $Z_1 \neq Z_2$  (ex :  ${}^{17}_7\text{N}$  et  ${}^{17}_9\text{F}$ ).

#### Isotones

Deux isotones sont deux nucléides contenant le même nombre de neutrons :  $A_1 \neq A_2$ ,  $Z_1 \neq Z_2$  mais  $A_1 - Z_1 = A_2 - Z_2$  (ex :  ${}^{13}_6\text{C}$  et  ${}^{14}_7\text{N}$ ).

### 1.1.2. Vallée de stabilité :

La représentation des noyaux connus dans un graphe (N, Z), dite courbe de stabilité, permet de mettre en évidence la ligne de « Stabilité » peuplée par les noyaux stables.

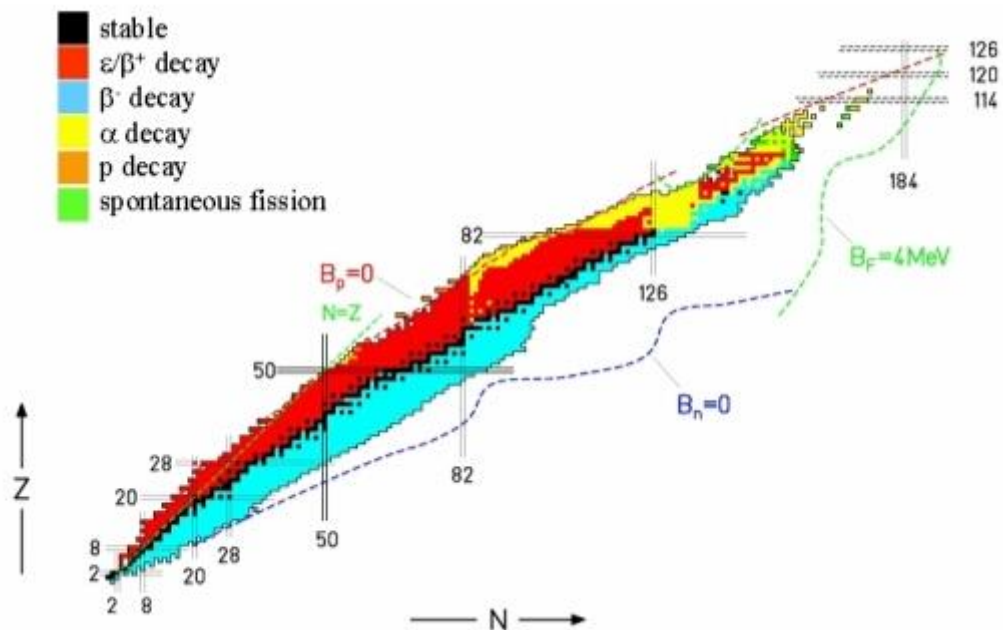


Figure 1.2 : Diagramme de stabilité des noyaux [6]

Les noyaux instables vont, par une suite de désintégrations radioactives, se transformer jusqu'à devenir stables :

- au-dessous des noyaux stables, se trouvent les noyaux très riches en neutrons (ligne bleue) qui peuvent revenir vers la ligne de stabilité par désintégration  $\beta^-$  (c'est la transformation d'un neutron en proton).
- au-dessus des noyaux stables, se trouvent les noyaux très riches en protons (ligne rouge) qui peuvent revenir vers la ligne de stabilité par désintégration  $\beta^+$  ou par capture électronique (c'est la transformation d'un proton en neutron).
- les noyaux lourds riches en protons (ligne jaune) peuvent revenir vers la ligne de stabilité par désintégration alpha.
- Enfin, les noyaux très lourds (ligne verte) peuvent se fissionner en donnant naissance à des produits de fission plus légers [6].

## 1.2 La radioactivité :

La radioactivité est une propriété naturelle de certains atomes dans la nature. La plupart des noyaux atomiques sont stables, cependant, certains atomes ont des noyaux instables à cause d'un excès de protons ou de neutrons. Les noyaux d'atomes radioactifs se transforment spontanément en d'autres noyaux, radioactifs ou stables.

Cette transformation irréversible d'un atome radioactif en un autre atome est appelée « désintégration ». Elle s'accompagne d'une émission de différents types de rayonnements ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ , etc.). La radioactivité ne concerne que le noyau et non les électrons du cortège électronique, les propriétés chimiques des isotopes radioactifs sont les mêmes que celles de leurs isotopes stables [7].

### 1.2.1 Historique :

La radioactivité n'a pas été inventée par l'homme, c'est un phénomène naturel qui a été découvert à la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle. En 1896, Henri Becquerel découvre des « rayons uraniques ». Afin de vérifier la véracité de l'hypothèse de l'un de ses confrères, Henri Poincaré, comme quoi un matériau luminescent émet des rayons X, Henri Becquerel range un échantillon de sel d'uranium (qu'il utilisait sur une plaque photographique vierge) dans un tiroir. A la reprise de l'expérience, il constate avec étonnement que la plaque a été impressionnée, bien que l'échantillon n'ait pas été exposé à la lumière solaire. Il constate que tous les composés d'uranium qu'il étudie émettent le même rayonnement auquel il donne le nom de « rayons uraniques ». Cette découverte lui vaut le Prix Nobel de physique en 1903 avec ses deux confrères Pierre et Marie Curie ainsi que le nom de l'unité légale de radioactivité le Becquerel (Bq).

Entre 1896-1898, Pierre et Marie Curie découvrent d'autres éléments radioactifs. En mesurant l'activité de certains minéraux d'uranium, Pierre et Marie Curie constatent une plus grande activité que prévue d'après leur teneur en uranium. Après analyse, ils découvrent dans ces minéraux deux éléments inconnus, très actifs, qu'ils baptisent l'un le polonium en juillet 1898, l'autre le radium en décembre 1898. Ils qualifient alors de radioactifs les éléments qui émettent des rayonnements ionisants et donnent à ce phénomène le nom de radioactivité.

En 1934, Irène et Frédéric Joliot-Curie découvrent la radioactivité artificielle : Les deux époux préparent de grandes quantités de radium et de polonium ce qui leur permet de disposer par la suite de la plus forte source d'émission alpha existant au monde. En janvier 1934, quelques mois avant le décès de Marie Curie, ils réalisent l'expérience, en bombardant une feuille d'aluminium avec des noyaux d'hélium (issus des rayonnements alpha du polonium) qui va leur permettre de découvrir le premier isotope radioactif artificiel, le phosphore 30. Celui-ci se transmute en silicium 30 par radioactivité  $\beta^+$  [8].

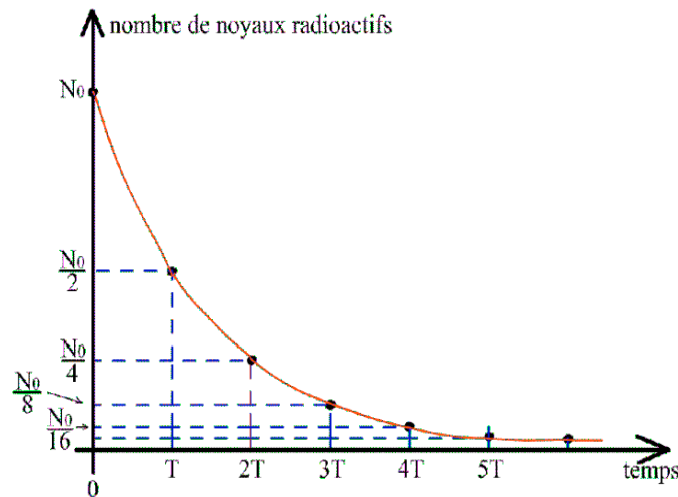
### 1.2.2 Loi de décroissance radioactive :

Pour un nombre moyen de noyaux radioactifs  $N_t$  présents à l'instant  $t$ , il en disparaît pendant  $dt$  :

$$dN_t = -N_t \lambda dt \quad (1.1)$$

Où  $\lambda$  est la constante radioactive qui représente la probabilité de désintégration d'un noyau. La résolution de cette équation différentielle donne la loi de désintégration radioactive [4] :

$$N_t = N_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad (1.2)$$



**Figure 1.3** : Courbe de décroissance radioactive

Où :

$N_0$  : nombre d'atomes radioactifs présents à l'instant initial ;

$N(t)$  : nombre d'atomes radioactifs présents à l'instant  $t$ .

### 1.2.3 Période radioactive :

La période radioactive ou demi-vie  $T_{1/2}$  d'un radionucléide est le temps au bout duquel la moitié des noyaux radioactifs initialement présents auront disparu par désintégration tel que le montre la Figure 1.3.

$T_{1/2}$  est donnée en fonction de la constante radioactive par la relation suivante :

$$T_{1/2} = \frac{\ln(2)}{\lambda} \quad (1.3)$$

### 1.2.4 Activité radioactive :

L'activité d'une source radioactive est le nombre de désintégrations par unité de temps :

$$A(t) = \lambda N(t) \quad (1.4)$$

Elle suit la même loi que la décroissance du nombre  $N$  de noyaux radioactifs composant la source, on peut écrire :

$$A = A_0 e^{-\lambda t} \quad (1.5)$$

$A_0$  : est l'activité de la source à  $t=0$ .

L'activité s'exprime en becquerel (Bq), qui correspond à une désintégration par seconde. L'ancienne unité de mesure de l'activité était le Curie (Ci) qui correspond à  $3.7 \times 10^{10}$  Bq.

### 1.3 Désintégration radioactive :

La désintégration radioactive est une réaction nucléaire spontanée au cours de laquelle un noyau radioactif donne naissance à un noyau plus stable. C'est un phénomène aléatoire, spontané, inéluctable, indécélable et irréversible.

La désintégration radioactive du noyau instable  ${}^A_Z X$  s'accompagne de l'émission :

- D'un noyau fils  ${}^{A'}_{Z'} Y$  qui est généralement dans un état excité  ${}^{A'}_{Z'} Y^*$  ;
- D'une particule  ${}^{A''}_{Z''} P$  ( $\alpha$ ,  $\beta$ ) ;
- D'un rayonnement électromagnétique  $\gamma$  émis par la désexcitation du noyau fils.

Le bilan de la désintégration radioactive s'écrit comme suit :



#### 1.3.1 Désintégration alpha

Lors d'une désintégration alpha, l'atome émet une particule chargée composée de deux protons et de deux neutrons, c'est un noyau d'hélium ( ${}^4_2\text{He}^{2+}$ ) appelé particule  $\alpha$ . Ce type de radioactivité concerne les noyaux lourds, dont le nombre atomique est supérieur à 82[9]. Ce phénomène se produit lorsque la masse  $M$  du noyau père est plus grande que la somme des masses de la particule  $\alpha$  et du noyau fils  $Y$ . Cette émission peut être représentée par l'équation suivante :

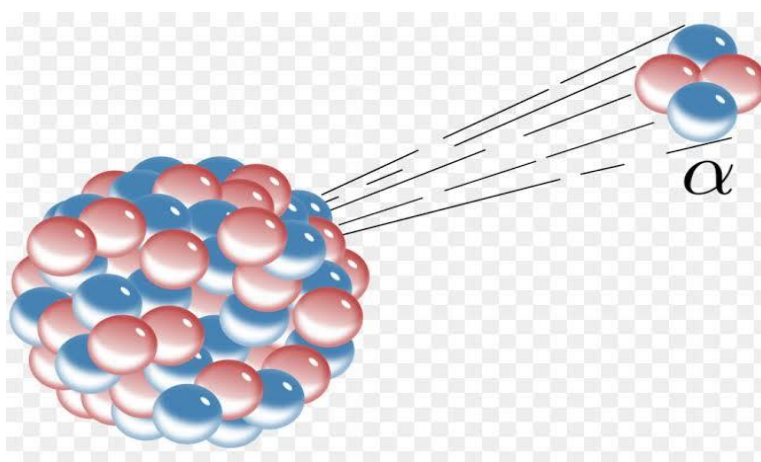


Figure 1.4 : désintégration  $\alpha$  [10]

Où représente l'énergie excédentaire qui se répartit entre :

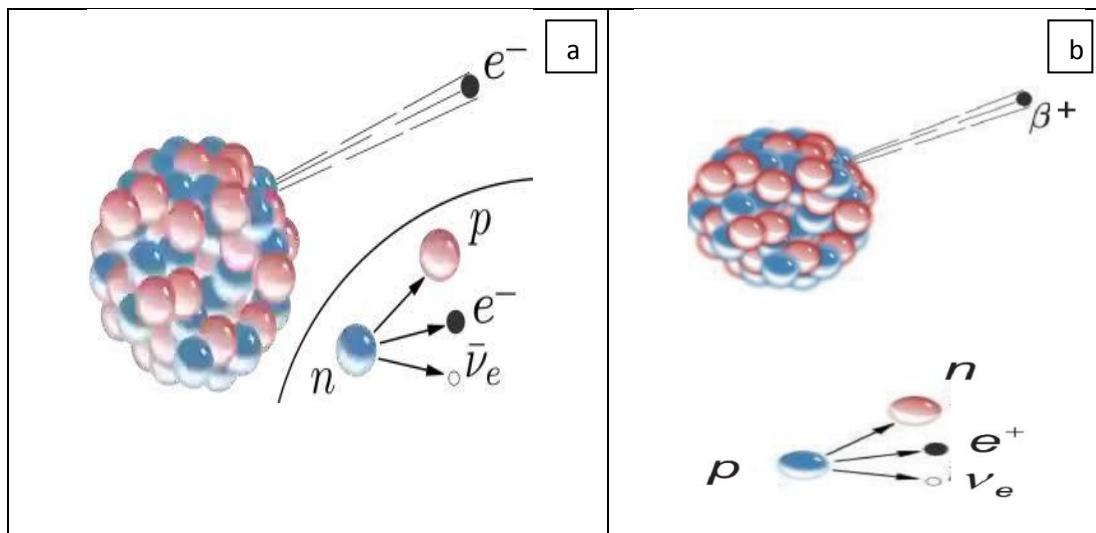
- L'énergie cinétique de la particule  $\alpha$  expulsée, qui est caractéristique de l'élément émetteur  $\alpha$  et qui ne peut prendre qu'un petit nombre de valeurs très voisines les unes des autres (spectre de raies) ;
- L'énergie du noyau émetteur, soumis à un mouvement de recul (appelée énergie de recul du noyau).

Si Y est produit à un niveau d'énergie excité, l'émission  $\alpha$  s'accompagne de l'émission d'un photon  $\gamma$ .

### 1.3.2 Désintégration beta :

La désintégration  $\beta$  se produit lorsque le noyau a un excès de neutrons ou de protons.

La désintégration  $\beta^-$ , résulte de la désintégration, dans le noyau, d'un neutron qui se transforme en un proton avec émission d'un antineutrino  $\bar{\nu}$  (voir Figure 1.5). Cette désintégration se produit pour des nucléides instables riches en neutrons, la réaction est isobarique, elle s'écrit selon l'équation ci-dessous :



**Figure 1.5 :** Schémas de désintégration  $\beta$  : **a)** désintégration  $\beta^-$ , **b)** désintégration  $\beta^+$  [10].



La désintégration  $\beta^+$  est due à un excès de protons. Le numéro atomique diminue d'une unité, cette transformation s'accompagne de l'émission par le noyau d'un électron de charge positive  $\beta^+$  (positron) et d'un neutrino  ${}^0_0\nu$ .



La radioactivité  $\beta^+$  ne concerne que les noyaux artificiels, ce sont des particules à durée de vie très courte.

Le rayonnement  $\beta$  est moyennement pénétrant, il peut être arrêté par une feuille d'aluminium de quelques mm d'épaisseur. Son pouvoir d'ionisation est moyen.

### 1.3.3 La capture électronique :

La capture électronique peut avoir lieu si la condition  $\Delta M C^2 \geq 1.022 \text{ MeV}$  n'est pas respectée. Elle intervient lorsqu'un proton du noyau réagit avec un électron de son propre cortège électronique, transmutant celui-ci en un neutron, avec émission d'un neutrino  ${}^0_0\nu$  :



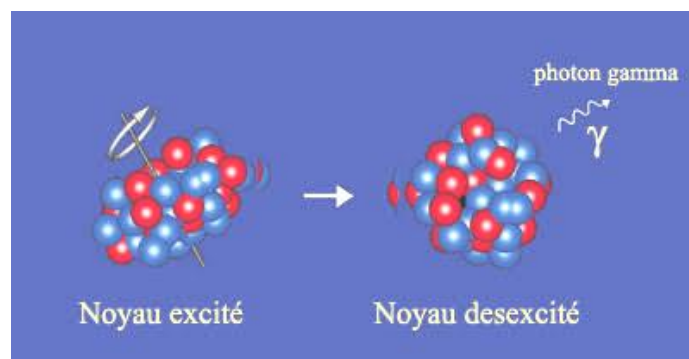
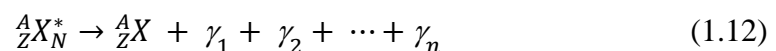
### 1.3.4 Désintégration gamma :

Au même titre que les atomes, les noyaux peuvent se trouver dans un état excité. La désexcitation d'un noyau  ${}^A_ZX_N^*$  vers son état fondamental  ${}^A_ZX_N$  peut se faire de deux manières en émettant un rayonnement  $\gamma$  :

- Par transition directe si l'énergie du photon  $\gamma$  émis est égale à l'énergie d'excitation du noyau :



- Par cascade de rayonnement  $\gamma$  dont la somme des énergies est égale à l'énergie d'excitation [6].



**Figure 1.6 :** Désintégration gamma [10]

A la suite d'une désintégration radioactive qu'elle soit alpha ou béta, le nouveau noyau formé peut être dans un état excité, il perd aussitôt son excès d'énergie pour redevenir stable en émettant un ou plusieurs photons gamma. Il est caractérisé par son énergie qui est égale à la différence entre les énergies des deux états quantiques, exprimé sous la forme :

$$\Delta E = E_e - E_s = h \nu \quad (1.13)$$

Où :

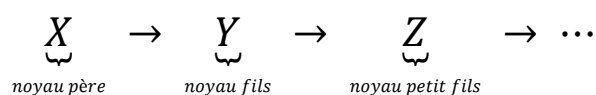
- $E_e$  : énergie de l'état excité ;
- $E_s$  : énergie de l'état stable ;
- $\nu$  : fréquence du rayon gamma en (Hz) ;
- $h$  : constante de Planck ( $h=6.626068 \cdot 10^{-34}$  J.s)

Le rayonnement  $\gamma$  est très pénétrant, il peut parcourir plusieurs centaines de mètres dans l'air, plusieurs dizaines de centimètres dans le béton et quelques centimètres dans le plomb. Bien qu'il soit moins ionisant que les rayonnements  $\beta$ , son très fort pouvoir de pénétration le rend particulièrement dangereux pour les organismes vivants.

#### 1.4 Filiation radioactive et équilibre séculaire :

Il est possible que le noyau instable se désintègre en un noyau résiduel lui-même radioactif, devant subir une série de désintégrations en cascade avant d'atteindre la stabilité : c'est la filiation radioactive ou décroissance multiple.

Si l'on considère une chaîne radioactive comme celle ci-dessous :



Et si le noyau père a une période beaucoup plus longue que le noyau fils  $T_X \gg T_Y$  ce qui équivaut à  $\lambda_X \ll \lambda_Y$  et par conséquent l'activité du noyau fils sera égale à celle du noyau père  $A_Y \cong A_X$ . Ce résultat peut être généralisé à toute chaîne radioactive pour laquelle le noyau père possède une période très grande par rapport aux noyaux descendants, c'est l'équilibre séculaire.

Les radionucléides primordiaux tels que l'uranium-238, l'uranium-235 et le thorium-232 sont en équilibre séculaire avec leurs descendants.

## La radioactivité dans l'environnement :

### 1.5 La radioactivité naturelle :

La radioactivité naturelle présente deux composantes principales : cosmique et tellurique (ou terrestre) [11].

#### 1.5.1 Le rayonnement cosmique :

La Terre est constamment bombardée par des particules de très haute énergie en provenance de l'espace galactique appelées rayons cosmiques. Ces derniers peuvent provenir du soleil, de l'explosion des étoiles, de pulsars ou de phénomènes du lointain cosmos.

Les rayons cosmiques sont donc des particules primaires neutres ou chargées. Les particules primaires chargées sont constituées de 86 % de protons, de 12 % de particules alpha et le reste de noyaux plus lourds. Les particules primaires neutres sont des photons gamma ou des neutrinos. Quand ces particules primaires entrent en collision avec les noyaux de l'atmosphère, elles produisent une cascade de particules secondaires et forment alors une gerbe de particules : muons, électrons, neutrinos et gamma. Une fraction de ces particules produites atteint le niveau du sol et constitue une source de rayonnements. En raison des interactions et des durées de vie des particules, au niveau du sol, il ne reste quasiment que des muons d'énergie moyenne de quelques GeV et des neutrinos, peu interactifs.

Au cours du développement de la gerbe, les noyaux des atomes de l'atmosphère servant de cible sont brisés en émettant des protons et des neutrons. Ces neutrons peuvent interagir avec les noyaux d'autres atomes pour les rendre radioactifs, ils sont appelés alors cosmo-géniques. C'est ainsi qu'un neutron interagissant avec un noyau d'azote de l'air se transforme en carbone-14 radioactif ou en carbone stable mais accompagné d'un tritium radioactif.

L'intensité du rayonnement cosmique croît avec l'altitude ce qui implique que l'effet protecteur de l'atmosphère diminue quand on s'élève. L'exposition due au rayonnement cosmique double à 1500 m par rapport au niveau de la mer et augmente plus encore lors d'un voyage à haute altitude.

### 1.5.2 Le rayonnement tellurique :

La radioactivité naturelle terrestre est due aux radionucléides primordiaux qui étaient présents au moment de la formation de la terre et que l'on trouve aujourd'hui encore dans l'écorce terrestre. Ces éléments sont le potassium<sup>40</sup>K et les trois familles radioactives dont les radionucléides sont en filiation, celle du thorium <sup>232</sup>Th et des deux uraniums<sup>238</sup>U et<sup>235</sup>U (Fig. 1.7). Les radionucléides primordiaux se trouvent dans les différents compartiments de l'environnement, mais c'est dans le sol et les roches qu'ils sont le plus concentrés et où leurs émissions radioactives et celles de leurs descendants forment le rayonnement terrestre.

#### L'uranium :

Cet élément chimique porte le numéro atomique 92 et est le plus lourd présent naturellement sur terre. Il existe de nombreux trois isotopes principaux de l'uranium naturel présent dans l'écorce terrestre : l'uranium 238, le plus lourd atome naturel et le plus abondant (99,28%), l'uranium235 (0,71%) ainsi que des traces d'uranium 234 (0,006%).

L'uranium est un élément naturel assez commun : il est plus abondant que l'argent ou l'or et se trouve partout dans l'écorce terrestre surtout dans les terrains granitique ou sédimentaire à des teneurs moyennes d'environ 3g/tonne. Ainsi le sous-sol d'un jardin de 400m<sup>2</sup> peut contenir, sur une profondeur de 10 m environ, 24kg d'uranium.

On trouve de l'uranium en quantité importante dans la profondeur de la terre où il est, avec le thorium et le potassium, un élément déterminant de la géothermie de notre planète, donc de son volcanisme et de sa sismicité. Enfin, l'eau de mer contient environ 3mg d'uranium par m<sup>3</sup>, ce qui représente à l'échelle mondiale environ 4,5 milliards de tonnes d'uranium dissout dans les océans [12].

#### Le Radon :

Le radon <sup>222</sup>Rn est un gaz radioactif naturel issu de la désintégration de l'uranium et du radium présents dans la croûte terrestre, surtout les sols granitiques et volcaniques. Il se désintègre lui-même en émettant une particule alpha, et malgré sa période radioactive relativement courte (3,8 jours), une partie du radon parvient à quitter les roches où il s'est formé, par les porosités et les fissures, pour atteindre l'atmosphère. Il se concentre dans des cavités closes comme les bâtiments et les habitations, mais une bonne ventilation peut l'éliminer [13].

#### Le thorium :

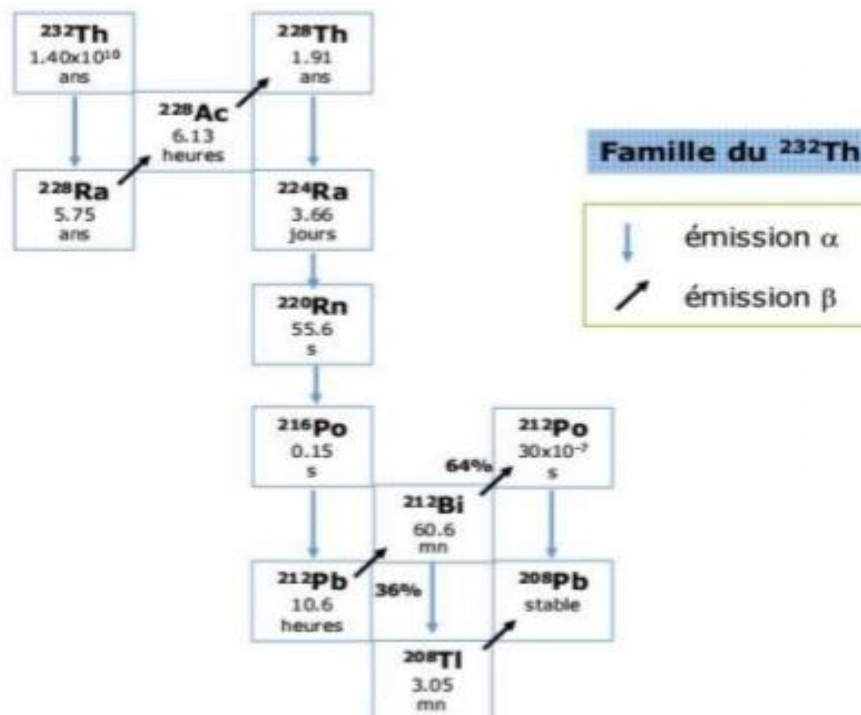
Le thorium est le deuxième élément de la série des actinides, il n'existe que sous forme radioactive. Il apparaît dans la plupart des grandes familles de radionucléides naturels et dans celles des transuraniens. Il présente 13 isotopes dont le principal est le <sup>232</sup>Th, qui donne

naissance à de nombreux produits de filiation dont  $^{228}\text{Ac}$ , émetteur de rayonnement gamma [14]. Période radioactive :  $1,45 \times 10^{10}$ .

Tout comme pour l'uranium, des études montrent que le thorium peut être absorbé par la plupart des végétaux et autres organismes terrestres et aquatiques. Cependant, des facteurs de bioconcentration semblent indiquer qu'en général le thorium ne se bio concentre pas à l'intérieur des organismes [15].

### Le potassium :

Le potassium (K) est présent dans la nature sous forme de trois isotopes naturels :  $^{39}\text{K}$  (93,258%),  $^{40}\text{K}$  (0,0117%),  $^{41}\text{K}$  (6,7302%). Seul le potassium  $^{40}\text{K}$  est radioactif. Le potassium constitue quelques 2.8 ppm de la croûte terrestre. Un gramme de potassium émet 3.31 photons gamma par seconde. La demi-vie du potassium  $^{40}\text{K}$  est de  $1.24 \times 10^9$  ans et représente environ 2,5% du poids de la croûte terrestre [16].



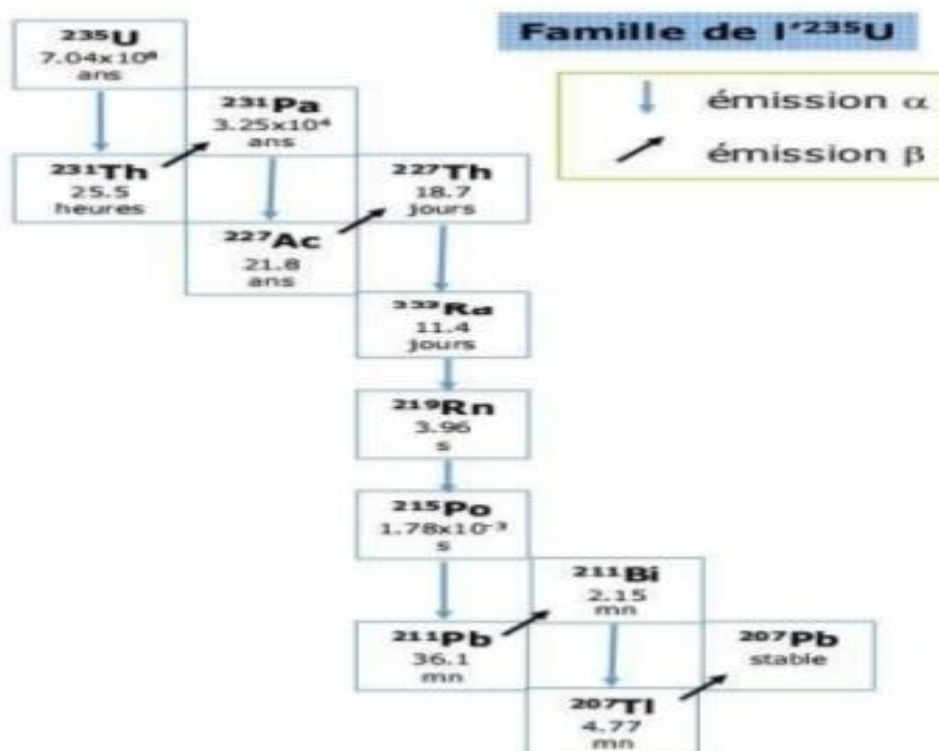
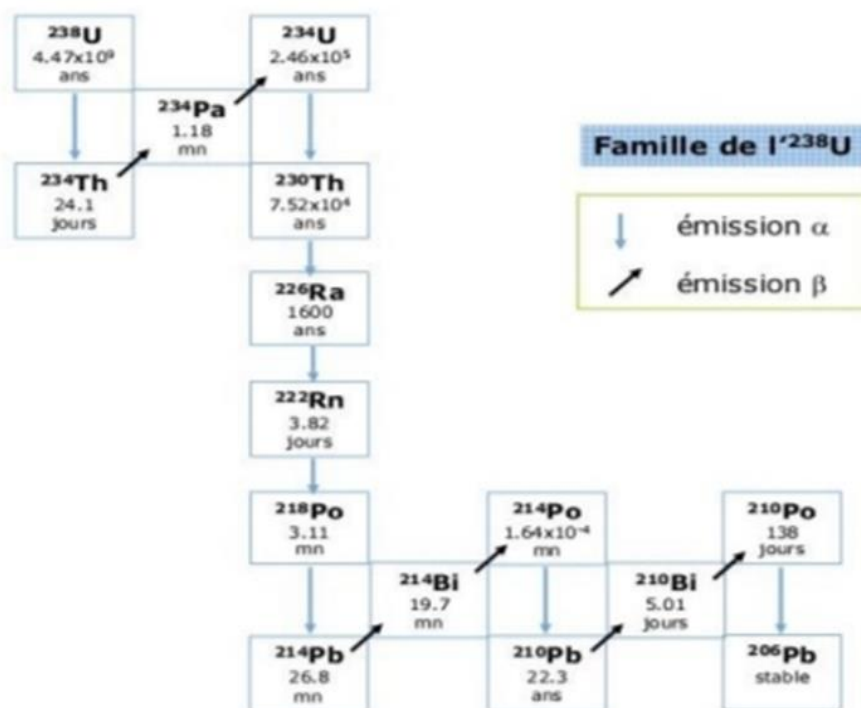


Figure 1.7 : Familles radioactives : du Thorium-232, de l'uranium-238 et de l'uranium-235

[7].

Nous pouvons conclure que le rayonnement terrestre est dû aux radionucléides primordiaux présents dans le sol et les roches, mais il est également dû aux matériaux de constructions, de revêtements des routes, etc.

### **1.6 La radioactivité artificielle :**

La radioactivité artificielle est due à des radionucléides produits par l'homme en transformant des noyaux stables en des noyaux instables, qui se désintègrent en émettant des particules ou des rayonnements énergétiques. Ces radionucléides ont été introduits à l'échelle du globe, par les essais nucléaires ou à l'échelle locale par les opérations du cycle du combustible, des centrales nucléaires, et par toutes les applications faisant intervenir la radioactivité comme la médecine, la biologie, l'industrie, etc.

#### **1.6.1 La médecine et la biologie :**

Certains radio-isotopes artificiels tels que le cobalt  $^{60}\text{Co}$ , l'iridium  $^{192}\text{Ir}$ ,  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ,  $^{131}\text{I}$ , ... sont utilisés en médecine ou en biologie pour le diagnostic in vivo, la radiothérapie, la curiethérapie ou le marquage radioactifs de molécules biologiques, ce qui engendre des déchets radioactifs à gérer (traitement et entreposage selon la durée de vie des radioéléments considérés).

#### **1.6.2 L'industrie :**

De nombreux procédés de fabrication industriels utilisent des rayonnements ionisants (sources radioactives ou des radios traceurs) pour le contrôle de leurs produits, notamment le contrôle des soudures, la détection des fuites dans les canalisations, l'envasement des barrages, etc.

#### **1.6.3 Les installations nucléaires :**

Lorsqu'on pense à l'impact des installations nucléaires sur l'environnement on pense aux réacteurs, leurs rejets et les éventuels risques sur les populations. Toutefois, il faut considérer aussi le cycle du combustible, depuis l'extraction de l'uranium de la mine, en passant par la fabrication de l'élément du combustible avec toutes ses étapes, jusqu'au retraitement du combustible usé. Il ne faut surtout pas oublier les déchets radioactifs produits et leurs conséquences sur l'environnement et les populations [17].

#### **1.6.4 Les retombés des essais d'armes nucléaires :**

Un essai nucléaire désigne l'explosion d'une bombe atomique à des fins expérimentales. Le premier essai nucléaire a eu lieu le 16 juillet 1945 au Nouveau-Mexique aux Etats-Unis, trois semaines avant les bombardements d'Hiroshima et Nagasaki au Japon. Par la suite, plus de 2400 essais nucléaires, dont 543 essais atmosphériques, ont été réalisés par les États-Unis, la

Russie, la Grande-Bretagne, la France et la Chine entre 1945 et 1980, à travers l'ensemble du globe. Ces essais ont engendré une dispersion de produits de fission parmi lesquels on cite : le césium  $^{137}\text{Cs}$ , le strontium  $^{90}\text{Sr}$ , le zirconium  $^{95}\text{Zr}$  et l'iode  $^{131}\text{I}$ . C'est à partir de 1961, que les tirs souterrains ont remplacé les explosions aériennes dans le but de réduire la pollution radioactive de l'atmosphère [17].

### 1.6.5 Les accidents nucléaires :

Un accident nucléaire est un événement accidentel grave dont les conséquences sont liées à la dispersion de matières radioactives. Il se produit suite à une défaillance majeure détruisant toutes les barrières de radioprotection de l'installation. Les accidents nucléaires sont classés selon leur degré de gravité sur une échelle internationale établie à cet effet, c'est l'échelle INES (International Nuclear Event Scale) qui compte 7 niveaux. Les événements de niveaux 1 à 3, sont sans conséquence significative sur les populations et l'environnement et sont qualifiés d'incidents, ceux des niveaux supérieurs (4 à 7) sont considérés comme accidents. Le septième et dernier niveau correspond à un accident dont la gravité est comparable aux catastrophes de la centrale nucléaire de Tchernobyl en Ukraine survenue le 26 avril 1986 et de la centrale nucléaire de Fukushima au Japon le 11 mars 2011.

#### ❖ Accident de Tchernobyl :

Le 26 avril 1986 à 1h23 du matin, le réacteur 4 de la centrale nucléaire de Tchernobyl, située en Ukraine à une centaine de km au nord de Kiev, mis en service depuis 1983, explose accidentellement lors de la réalisation d'un essai technique.



Figure 1.8 : Accident de Tchernobyl [18].



Le réacteur 4 est un réacteur de 1000 MW qui a été mis en service en 1983. C'est un réacteur de type RBMK, une conception soviétique des années 1960. Le cœur du réacteur est constitué d'un imposant bloc de graphite traversé par des canaux verticaux dans lesquels sont placés des tubes de force qui renferment chacun plusieurs assemblages de combustibles nucléaires. Le graphite assure le rôle de modérateur de neutrons nécessaire à l'entretien de la réaction en chaîne. Le refroidissement est assuré par de l'eau bouillante circulant à l'intérieur des tubes de force au contact du combustible.

L'accident a été provoqué par une série d'erreurs humaines, mais aussi en raison de défauts de conception et de manipulation. La principale erreur est la mauvaise maîtrise d'un nouveau système de refroidissement du cœur, lors de l'essai, les opérateurs n'ont pas respecté des consignes de sécurité et ont désactivé certains systèmes d'arrêt et de refroidissement, ce qui a conduit à l'augmentation incontrôlée de la puissance du réacteur conduisant à la fusion du cœur et une explosion thermodynamique. Cet accident se classe au niveau 7 sur l'échelle INES [19].

L'accident a entraîné la libération d'importantes quantités de radioéléments artificiels ( $^{131}\text{I}$  (630 PBq),  $^{134}\text{Cs}$  (35 PBq) et  $^{137}\text{Cs}$  (70 PBq)) dans l'atmosphère, sous forme d'un nuage radioactif provoquant une très large contamination de l'environnement. Les rejets se sont poursuivis jusqu'au 5 mai.

L'Afrique du Nord a reçu des radionucléides issus des premiers rejets, dès les premiers jours de la catastrophe. Les retombées y ont représenté plus de 5% de tous les radionucléides provenant de l'accident de Tchernobyl (jusqu'à 20 PBq). En Algérie (pays nord-africain) ils ont détecté de l'iode  $^{131}\text{I}$ , du césium  $^{134}\text{Cs}$  et du césium  $^{137}\text{Cs}$  dans la majorité des échantillons d'air, et ces quelques jours après la catastrophe [20].

## ❖ Accident de Fukushima :



**Figure 1.9 : Accident de Fukushima [21]**

Le 11 mars 2011, un séisme de magnitude 9.0 s'est produit à 80 km au large de l'île d'Honshu au Japon. Il a provoqué un tsunami qui a endommagé les lignes d'alimentation électrique du site nucléaire de Fukushima Daiichi, et a mis hors service le système de refroidissement dans les trois tranches en service. Les piscines d'entreposage du combustible usé et les quatre autres centrales nucléaires situées le long de la côte, ont-elles aussi été touchées. Les cœurs des trois réacteurs ont surchauffé, le combustible nucléaire a fondu et les trois cuves de confinement se sont rompues. De l'hydrogène a été libéré à partir des cuves sous pression des réacteurs, ce qui a entraîné des explosions qui ont endommagé les structures des réacteurs [22,23].

Cet accident a été classé au niveau 7 sur l'échelle INES, au même degré de gravité que la catastrophe de Tchernobyl. L'accident a entraîné d'importants rejets de radioéléments dans l'atmosphère, sous forme de nuage radioactif contenant du : xénon  $^{133}\text{Xe}$ , de l'iode  $^{131}\text{I}$  du césium  $^{137}\text{Cs}$  et  $^{134}\text{Cs}$ . Ce nuage a traversé l'océan Pacifique, l'Amérique, l'océan Atlantique, pour atteindre l'Europe, l'Afrique et l'Asie, entraînant une grande dispersion des radionucléides sous son passage et provoquant une très large contamination de l'environnement.

## 2. Les notions de dose :

La dose d'irradiation représente la quantité d'énergie transmise par les rayonnements à un milieu (organe ou tissu) suite à des interactions avec les atomes du milieu.

### 2.1 Dose absorbée :

La dose absorbée  $D$  se définit comme étant l'énergie  $\Delta E$  communiquée à une masse  $\Delta m$  de matière située au sein d'un matériau uniformément irradié, elle s'écrit selon l'expression suivante :

$$D = \frac{\Delta E}{\Delta m} \quad (1.14)$$

L'unité de dose absorbée est le Grays ( $1\text{Gy} = 1\text{ J/kg}$ ), l'ancienne unité qui est encore assez fréquemment utilisée est le rad,  $1\text{Gy} = 100\text{ rad}$ .

### 2.2 Le débit de dose :

Le débit de dose absorbée  $\dot{D}$  correspond à la dose absorbée par unité de temps :

$$\dot{D} = \frac{dD}{dt} \quad (1.15)$$

L'unité de débit de dose absorbée est le Gray par seconde ( $\text{Gy s}^{-1}$ ), mais, on utilise souvent des sous-multiples comme le ( $\text{mGyh}^{-1}$ ), compte tenu des activités manipulées.

### 2.3 Dose équivalente :

La dose équivalente permet de mesurer les effets biologiques sur un tissu ou un organe suite à une exposition à un type de rayonnement ionisant. La dose équivalente, notée  $H_{T,R}$ , est obtenue en multipliant la dose absorbée  $D_{T,R}$  dans un tissu ou organe par un facteur de pondération  $W_R$ :

$$H_{T,R} = W_R \times D_{T,R} \quad (1.16)$$

$W_R$  est le facteur de pondération lié à la nocivité du rayonnement, il vaut 1 pour le rayonnement gamma.

Lorsque le rayonnement est de nature diverse (différents types de rayonnements sont présents dans le faisceau) avec des valeurs de  $W_R$  distinctes, la dose équivalente totale est la somme des doses équivalentes liées à chaque rayonnement :

$$H_T = \sum_R H_{T,R} \quad (1.17)$$

La dose équivalente s'exprime en Sievert (Sv).

**2.4 Dose efficace :**

La dose efficace, est une grandeur de radioprotection, elle sert à évaluer l'exposition d'une personne aux rayonnements ionisants et tient compte de la sensibilité des tissus affectés et de la nature des rayonnements, elle est donnée par la relation suivante :

$$D_{eff} = \sum_T W_T \cdot H_T = \sum_T W_T \cdot (\sum_R W_R \cdot D_{T,R}) \quad (1.18)$$

Où :  $W_T$  est un facteur de pondération tissulaire qui reflète la sensibilité des tissus et organes à l'induction d'effets stochastiques. L'unité de la dose efficace est le Sievert (Sv).

La dose efficace est utilisée à des fins de réglementation, elle fournit un moyen pour démontrer la conformité avec les limites d'exposition des travailleurs et du public.

**2.5 Dose annuelle :**

La dose annuelle moyenne (Sv/a) due à une exposition aux rayonnements ionisants ayant un débit de dose  $D$  (Sv/h) est définie par :

$$D(Sv/a) = D(Sv/h) \cdot F \quad (1.19)$$

Où  $F$  : est le temps d'occupation par année qui vaut [24] :  $F = 24(h/j) \times 365.25(j/a) \times f = 8766 \times f$  (h/a), où  $f$  est la fraction de temps passée à l'intérieur (80%) ou à l'extérieur (20%) des habitations ;  $F$  vaut 1753.2 (h/a) à l'extérieur des habitations.