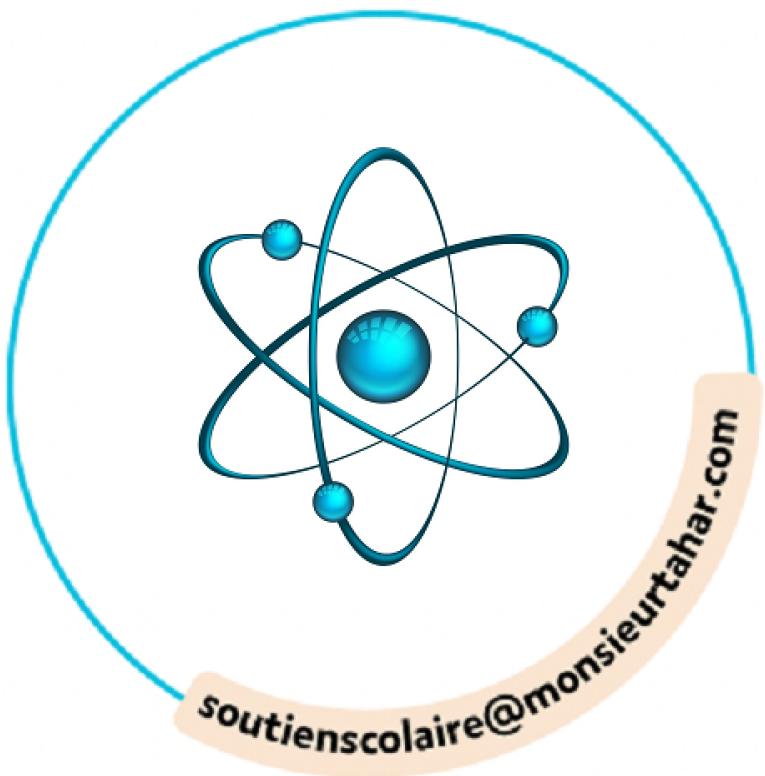


PHYSIQUE-CHIMIE



CHAPITRE 8

I. QUELQUES DEFINITIONS RELATIVES AUX NOYAUX D'ATOMES

1. Caractéristiques d'un noyau d'atome.

La représentation symbolique du noyau d'un atome est



- X est le symbole de l'élément chimique.
- Z est le nombre de protons. Z est aussi appelé **nombre de charge** ou **numéro atomique**.
- A est le nombre de nucléons. A est aussi appelé **nombre de masse**.
- N = A - Z est le nombre de neutrons présents dans le noyau.

2. Élément.

Un élément est constitué par l'ensemble des particules, atomes et ions monoatomiques, ayant le même nombre de charge Z.

3. Isotopes.

Des noyaux sont appelés **isotopes** si ils ont le même nombre de charge mais des nombres de nucléons A différents.

Par exemple:

Les trois isotopes les plus connus de l'élément carbone sont : $^{12}_6C$, $^{13}_6C$; $^{14}_6C$,

$^{35}_{17}Cl$ et $^{36}_{17}Cl$ sont des isotopes du chlore.

- Aux 92 éléments qui existent sur Terre à l'état naturel correspondent 350 noyaux différents (290 sont stables 60 sont radioactifs).

- Aux 112 éléments que l'on connaît dans les laboratoires de physique nucléaire correspondent plus de 3000 noyaux différents.

II. STABILITE ET INSTABILITE DES NOYAUX

1. Les principales forces agissant dans le noyau.

Au sein du noyau s'affrontent principalement deux types d'interactions:

- **Des répulsions électriques** qui ont tendance à détruire le noyau,
- **Des interactions nucléaires** fortes qui ont tendance à assurer la cohésion du noyau.

2. Instabilité du noyau.

Sous l'action des différentes forces en présence, certains noyaux sont stables (ils ont une durée de vie considérée comme infinie à l'échelle géologique) et d'autres sont instables (ils se détruisent spontanément au bout d'une durée plus ou moins grande à la même échelle).

3. Radioactivité.

a) Définition.

Un noyau radioactif est un noyau instable dont la désintégration (destruction) est aléatoire et s'accompagne de:

- L'apparition d'un nouveau noyau,
- L'émission d'une particule notée α , β^- ou β^+ ,
- L'émission d'un rayonnement électromagnétique noté γ . Cette émission de rayonnement γ n'est pas systématique mais extrêmement fréquente.

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.

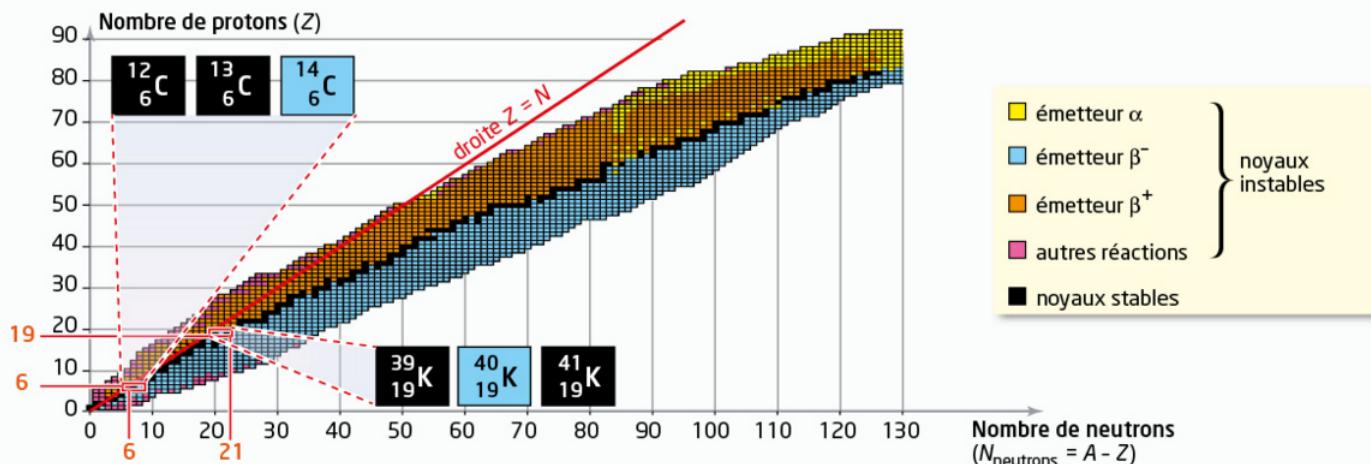
b). Propriétés de la désintégration.

La désintégration radioactive est:

- **Aléatoire:** Il est impossible de prévoir l'instant où va se produire la désintégration d'un noyau radioactif
- **Spontanée:** La désintégration se produit sans aucune intervention extérieure,
- **Inéluctable:** Un noyau radioactif se désintégrera tôt ou tard,
- **Indépendante** de la combinaison chimique dont le noyau radioactif fait partie,
- **Indépendante** des paramètres extérieurs tels que la pression ou la température.

c) Vallée de stabilité des noyaux.

DOCUMENT Diagramme (N ; Z) ou diagramme de Segré



Lorsque l'on range tous les noyaux connus dans un repère tel que celui présenté ci-contre, il apparaît quatre zones:

- Une zone noire dans laquelle apparaissent les noyaux stables. Cette zone est appelée **vallée de stabilité**. On remarquera que pour $Z \leq 30$ les noyaux stables sont situés sur la première bissectrice (ou dans son voisinage immédiat) ce sont donc des noyaux pour lesquels $N=Z$.
- Une zone jaune dans laquelle se situent des noyaux donnant lieu à une radioactivité de type α . Ce sont des noyaux lourds (N et Z sont grands donc A est grand),
- Une zone bleue dans laquelle se situent des noyaux donnant lieu à une radioactivité de type β^- . Ce sont des noyaux qui présentent un excès de neutrons par rapport aux noyaux stables de même nombre de masse A ,
- Une zone orange dans laquelle se situent des noyaux donnant lieu à une radioactivité β^+ . Ce sont des noyaux qui présentent un excès de protons par rapport aux noyaux stables de même nombre de masse A .

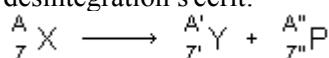
III. LES DIFFERENTS TYPES DE RADIOACTIVITE

1. Lois de conservation.

Les réactions de désintégration nucléaires obéissent à un certain nombre de lois. Cette année, par souci de simplification, nous n'en utiliserons que deux, dites **lois de Soddy**.

Lors d'une désintégration radioactive α ou β il y a conservation de la charge électrique du noyau Z (conservation du nombre de protons) et du nombre de nucléons A .

Considérons la désintégration d'un noyau X (appelé noyau père). Cette désintégration conduit à un noyau Y (appelé noyau fils) et à l'expulsion d'une particule P (particule α ou β). L'équation de la désintégration s'écrit:



Les lois de conservation de **Soddy** imposent alors:

Loi de conservation du nombre de nucléons A: $A = A' + A''$.

Loi de conservation du nombre de protons: $Z = Z' + Z''$.

2. Radioactivité α .

a) Définition.

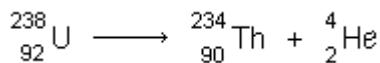
Des noyaux sont dits radioactifs si s'ils expulsent des noyaux d'hélium ${}^4_2 \text{He}$.

On notera qu'en toute rigueur le noyau de l'atome d'hélium porte **deux charges positives**. Mais dans ce domaine de la physique on convient de ne pas les représenter.

b) Equation de la réaction de désintégration α .

D'après les lois de conservation de **Soddy** l'équation s'écrit:
$$\frac{A}{Z} X \longrightarrow \frac{A-4}{Z-2} Y + \frac{4}{2} \text{He}$$

Par exemple, l'uranium 238 est un radionucléide α . Son équation de désintégration s'écrit:



le noyau fils obtenu est un noyau de thorium.

c) Caractéristiques de la particule α .

Ces particules sont expulsées avec des vitesses relativement modestes et sont arrêtées par quelques centimètres d'air ou par une feuille de papier, mais elles sont très ionisantes et donc dangereuses.

3. Radioactivité β^- .

a) Définition

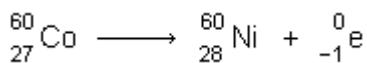
Des noyaux sont dit radioactifs β^- s'ils émettent des électrons notés ${}_{-1}^0 e$

On notera cette situation étrange où un positon qui, à priori, n'existe pas dans le noyau, est tout de même expulsé du noyau. Cet électron ne peut provenir que de la transformation d'un nucléon.

b) Equation de la réaction de désintégration.

D'après les lois de conservation de **Soddy** l'équation s'écrit:
$$\frac{A}{Z} X \longrightarrow \frac{A}{Z+1} Y + {}_{-1}^0 e$$

par exemple, le cobalt 60 est un radionucléide β^- . Son équation de désintégration s'écrit:



c) Caractéristiques de la particule β^- .

Les particules β^- sont assez peu pénétrantes. Elles sont arrêtées par quelques millimètres d'aluminium.

4. Radioactivité β^+ .

a). Définition.

Des noyaux sont dits radioactifs β^+ s'ils émettent des positons ${}_{+1}^0 e$.

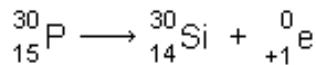
Ce sont des particules portant une charge +e.

On notera cette situation étrange où un positon qui, à priori, n'existe pas dans le noyau, est tout de même expulsé du noyau. Ce positon ne peut provenir que de la transformation d'un nucléon.

b) Equation de la désintégration.

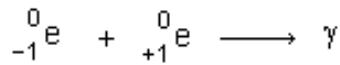
D'après les lois de conservation de **Soddy** l'équation s'écrit:
$${}_{Z}^A X \longrightarrow {}_{Z-1}^A Y + {}_{+1}^0 e$$

par exemple, le phosphore 30 est un radioémetteur β^+ . Son équation de désintégration est:



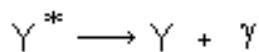
c) Caractéristique de la particule β^+ .

Ces particules ont une durée de vie très courte. Lorsqu'elle rencontrent un électron, les deux particules s'annihilent pour donner de l'énergie sous forme d'un rayonnement électromagnétique γ suivant le bilan :



e) Désexcitation γ .

Le noyau fils est en général obtenu dans un état excité (niveau d'énergie élevé). Ce noyau dans cet état excité est en général noté Y^* . Le noyau fils ne reste pas dans cet état instable. Il évacue cette énergie excédentaire en **émettant un rayonnement électromagnétique γ** . On dit qu'il se désexcite. Cette émission γ apparaît donc comme un phénomène secondaire de la radioactivité. On écrira:



IV. LOI DE DECROISSANCE RADIOACTIVE

1. Notations utilisées.

Soit un échantillon contenant N_0 noyaux radioactifs à la date $t_0 = 0$ choisie comme date initiale.
Soit N le nombre de noyaux radioactifs (non désintégrés) encore présents dans l'échantillon à la date t .

La variation moyenne du nombre de noyaux $\Delta N(t)$ entre des instants très proches t et $t + \Delta t$ est proportionnelle :

- au nombre de noyaux $N(t)$ présents à l'instant t
- à la durée Δt

$$\Delta N = N_{t+\Delta t} - N_t = -\lambda \cdot N \cdot \Delta t$$

λ est la constante radioactive. Elle est caractéristique d'un radioélément.

Par analyse dimensionnelle de l'expression précédente, on montre que λ a la dimension de l'inverse d'une durée. $[\lambda] = [T]^{-1}$, λ s'exprime en s^{-1} .

- ΔN correspond au nombre de noyaux qui se sont désintégrés pendant cet intervalle de temps.

$$N_{\text{désint}} = -\Delta N = \lambda N \Delta t$$

2. Décroissance exponentielle.

Lorsque $\Delta t \rightarrow 0$, on écrira que $\Delta t = dt$ et $\Delta N = dN$

L'équation ci-dessus devient $dN = -\lambda \cdot N \cdot dt$ ou encore :

$$\frac{dN}{dt} + \lambda N = 0$$

C'est une équation différentielle du premier ordre, relation mathématique liant la dérivée première et la fonction $N(t)$.

Cette équation est une équation différentielle linéaire du premier ordre à coefficients constants avec second membre constant du type : $y' = a \cdot y$

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

La résolution de ce type d'équation différentielle est la suivante : $y(x) = C \cdot e^{ax}$

$N(t) = C \cdot e^{-\lambda t}$ C est une constante qu'on détermine à partir des conditions initiales

A $t=0$ s, $N(0) = N_0 = C$ d'où la solution de l'équation différentielle:

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

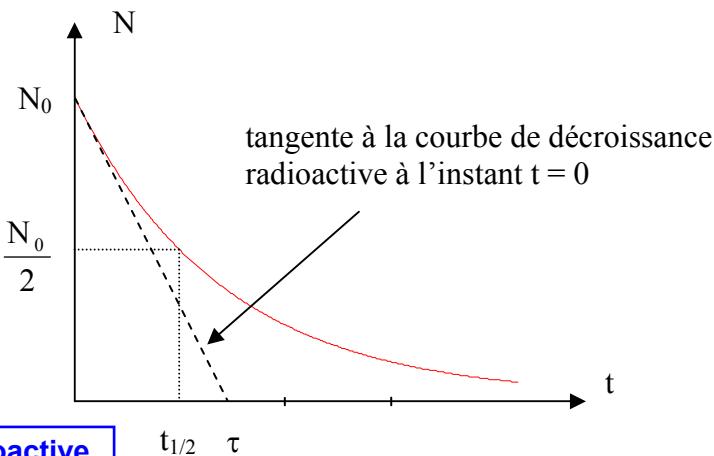
N est une fonction exponentielle décroissante du temps (il reste de moins en moins de noyaux radioactifs dans l'échantillon).

Mais les propriétés de la fonction exponentielle font que N tend vers 0 lorsque t tend vers l'infini. En principe il reste donc toujours des noyaux radioactifs dans l'échantillon.

Plus la constante radioactive λ est grande, plus la décroissance est rapide

Il faut bien comprendre que:

- N représente le nombre de noyaux radioactifs encore présents (non désintégrés) à l'instant t dans l'échantillon.
- N_0 représente le nombre de noyaux radioactifs présents dans l'échantillon à l'instant initial $t=0$.
- λ est la constante radioactive du radioélément considéré.
- t est le temps écoulé depuis l'instant initial.



3. Demi-vie radioactive.

a) Définition.

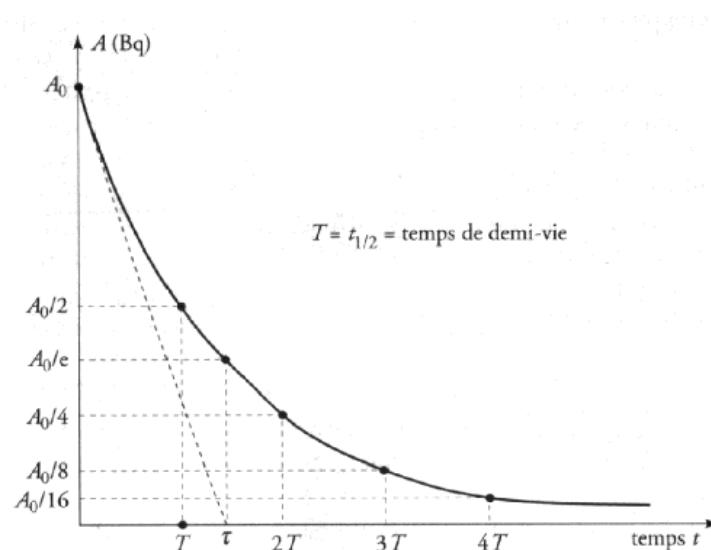
La demi-vie radioactive, notée $t_{1/2}$, d'un échantillon de noyaux radioactifs est égale à la durée nécessaire pour que, statistiquement, la moitié des noyaux radioactifs présents dans l'échantillon se désintègrent.

On a donc:

$$N(t_{1/2}) = N_0 / 2$$

On peut montrer que : $N(2t_{1/2}) = N_0/4$ $N(3t_{1/2}) = N_0/8$ $N(4t_{1/2}) = N_0/16$

Ce qui nous permettra de tracer la courbe $N(t)$ rapidement.



b) Expression de la demi-vie $t_{1/2}$ en fonction de λ ou de τ .

Portons dans $N = N_0 e^{-\lambda \cdot t} = N_0 e^{-t/\tau}$

$$N_0 e^{-\lambda \cdot t_{1/2}} = N_0 / 2$$

$$e^{-\lambda \cdot t_{1/2}} = 1 / 2$$

$$\ln e^{-\lambda \cdot t_{1/2}} = \ln 1 / 2$$

$$-\lambda \cdot t_{1/2} = 0 - \ln 2$$

$$t_{1/2} = \ln 2 / \lambda \quad \text{D'où}$$

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda} \quad \text{et} \quad t_{1/2} = \tau \ln 2$$

ATTENTION !!! : Cette relation est à connaître par cœur et doit pouvoir être éventuellement retrouvée (comme-ci-dessus) !

La valeur de demi-vie varie considérablement suivant la nature des noyaux radioactifs :

Isotope	$^{212}_{84}\text{Po}$	$^{99}_{43}\text{Te}$	$^{14}_6\text{C}$	$^{238}_{92}\text{U}$
Demi-vie	$0,3 \mu\text{s}$	6 heures	5 730 ans	$4,50 \cdot 10^9 \text{ ans}$

V. ACTIVITE D'UNE SOURCE RADIOACTIVE

1. Définition.

L'activité A d'une source radioactive est égale au nombre moyen de désintégrations par seconde dans l'échantillon. Elle s'exprime en becquerels dont le symbole est Bq (1Bq=1 désintégration par seconde).

Le curie (Ci) est une autre unité de mesure d'activité utilisée. Il correspond à l'activité de 1,0g de radium et vaut $3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$.

Pour information : Quelques ordres de grandeurs de niveaux d'activité radioactive (naturelle ou artificielle) auxquels l'homme est soumis :

Source	Activité radioactive (origine)
Eau de mer	13 Bq par litre (potassium 40, traces d'uranium et de tritium)
Terre	500 à 5000 Bq par kg selon les terrains (uranium, thorium et descendants, potassium 40)
Homme	130 Bq par kg (potassium 40, carbone 14)
Scintigraphie osseuse	5,50.10 ⁸ Bq par injection (technétium 99)
Résidus de la fission nucléaire	Plusieurs milliards de Bq par cm ³

2. Expression de l'activité.

A pourra être notée:

$$A = \frac{-\Delta N}{\Delta t} \quad \text{ou bien} \quad A = \frac{-dN}{dt}$$

on a donc:

$$-dN = \lambda N dt$$

$$A = \frac{-dN}{dt} \quad \text{d'où}$$

$$\boxed{\mathbf{A = \lambda N}}$$

Cette dernière relation permet d'exprimer l'activité d'un échantillon en fonction du temps.
 $A = \lambda N$ d'où $A = \lambda N_0 e^{-\lambda t}$

d'où

$$\boxed{\mathbf{A = A_0 e^{-\lambda t}}}$$

L'activité suit la même loi de décroissance exponentielle que N.

VI. CONSEQUENCES DE LA RADIOACTIVITE

1) Une remontée dans le temps : la datation au carbone 14

Grâce au carbone 14, on peut dater la mort de matériaux organiques (restes d'organismes végétaux ou animaux) en remontant jusqu'à 40 000 ans environ.

Le carbone entre dans la composition de la molécule du gaz carbonique, présent dans l'atmosphère, et dans de nombreux composés organiques. L'élément carbone comporte principalement du carbone 12 stable et une très faible proportion de carbone 14, radioactif, de demi-vie 5 568 ans.

Le carbone 14 est produit en permanence dans la haute atmosphère par le rayonnement cosmique à partir de noyaux d'azote. Les divers échanges (photosynthèse, alimentation) qui se produisent entre l'atmosphère et le monde «vivant» maintiennent quasiment constant le rapport entre la quantité de carbone 14 et celle de carbone 12. Mais, dès qu'un organisme meurt, le carbone 14 qu'il contient n'est plus renouvelé puisque les échanges avec le monde extérieur cessent; sa proportion se met à décroître.

Choisissons l'instant $t = 0$ au moment de la mort de l'organisme; l'activité du carbone 14 est alors A_0 .

Pour déterminer l'âge du matériau mort, on mesure l'activité actuelle $A(t)$ du carbone 14 d'un échantillon de matériau mort et on applique la formule : $A(t)=A_0 \cdot \exp(-\lambda t)$

$$\text{On obtient : } t = \frac{1}{\lambda} \ln\left(\frac{A_0}{A}\right) = \left(\frac{t_{1/2}}{\ln 2}\right) \ln\left(\frac{A_0}{A}\right)$$

Pour évaluer A_0 , on émet l'hypothèse que la proportion entre le carbone 14 et le carbone 12 pour les matériaux vivants n'a pratiquement pas varié jusqu'en 1950. Au-delà de 1950, les activités industrielles ont pu être à l'origine d'une variation de cette proportion, liée à une accumulation de dioxyde de carbone dans l'atmosphère. Par conséquent, A_0 représente l'activité en carbone 14 dans les organismes vivants en 1950; on trouve cette valeur dans les tables.

L'âge de la Terre

Le produit de désintégration ultime de l'uranium 238 (période de 4,47 milliards d'années) est le plomb 206 stable. Il est donc possible de déterminer l'âge des roches anciennes par la mesure du rapport de la teneur de ces roches en plomb 206 à celle en uranium 238.

Une roche contient d'autant plus de plomb qu'elle est âgée.

D'autres couples, tels le couple rubidium 87 (période de 48,9 milliards d'années) et le strontium 87 (qui est stable), sont utilisés.

L'âge de la Terre a été ainsi estimé à 4,55 milliards d'années.

2) Les effets biologiques de la radioactivité

a) Les dangers

En traversant le corps, les particules α et β , ainsi que le rayonnement γ , provoquent des destructions cellulaires. A faible dose ces rayonnements sont responsables d'une augmentation des cancers et d'anomalies génétiques.

On parle d'irradiation lorsqu'un organisme se trouve à proximité d'une source radioactive. Il reçoit alors une partie du rayonnement émis par la source. Il y a contamination lorsque les produits radioactifs sont absorbés par les voies digestives ou respiratoires. Ils peuvent alors se désintégrer au sein même de l'organisme.

Le danger augmente avec l'activité A de la source radioactive, la proximité de la source, la durée d'exposition et le type de radioactivité (les **particules α sont arrêtées par une feuille de papier** ; les **particules β par une fine plaque d'aluminium** ; **le rayonnement γ par une forte épaisseur de plomb ou de béton**).

b) Les utilisations pour l'homme

La médecine utilise, en radiothérapie et en imagerie médicale, des échantillons radioactifs bien choisis.

Les radiations ionisantes, délivrées à haute dose et focalisées sur les tumeurs, peuvent détruire les cellules malignes. Leur utilisation constitue une thérapeutique efficace contre certains cancers.

La radioactivité trouve également de nombreuses applications dans l'industrie.

En particulier, l'irradiation est un moyen privilégié pour détruire, à froid, les micro-organismes (champignons, bactéries, virus...).

Ainsi, la majorité du matériel médico-chirurgical (seringues jetables, etc.) est aujourd'hui radiostérilisée.

De même, le traitement par irradiation de produits alimentaires permet d'améliorer l'hygiène de certains aliments comme les graines, les épices et aussi l'élimination des salmonelles sur les crevettes et les cuisses de grenouilles... Cette technique porte le nom d'ionisation des aliments.