

Chapitre II : La radioactivité

Contenu de la matière

1. Chimie générale

1.1. Généralité :

1.1.1. Atome, noyau, isotopie,

1.1.2. Stabilité et cohésion du noyau, énergie de liaison par nucléon,...

1.2. Radioactivité :

1.2.1. Définition

1.2.2. Radioactivité naturelle : principaux types de rayonnement

1.2.3. Radioactivité artificielle

1.2.4. Loi de désintégration radioactive

1.2.5. Différents types de réaction nucléaire

1.3. Configuration électronique des atomes

1.3.1. Introduction des nombres quantiques

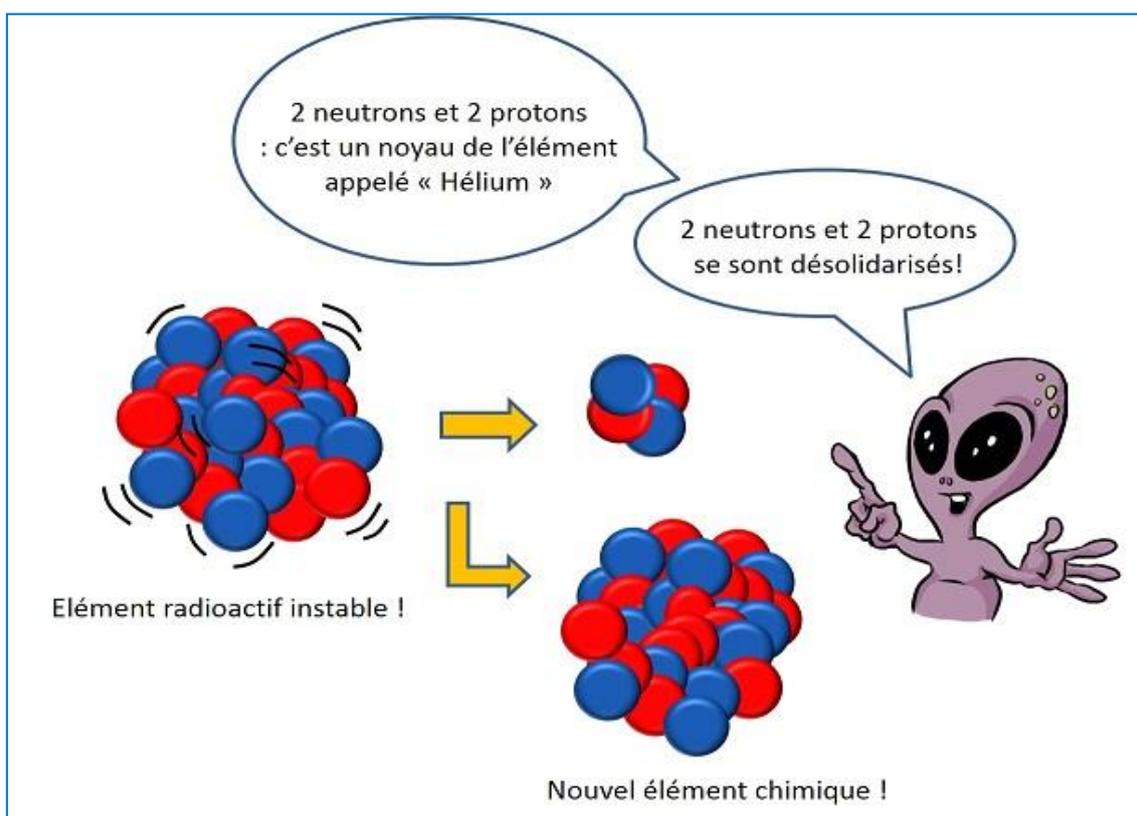
1.3.2. Principes régissant la structure électronique d'un atome :

1.3.3. Règle énergétique (règle de Klechkowski)

1.3.4. Règle d'exclusion de Pauli

1.3.5. Règle de Hund

1.4. Classification périodique :



Dr : ZAABAT. N

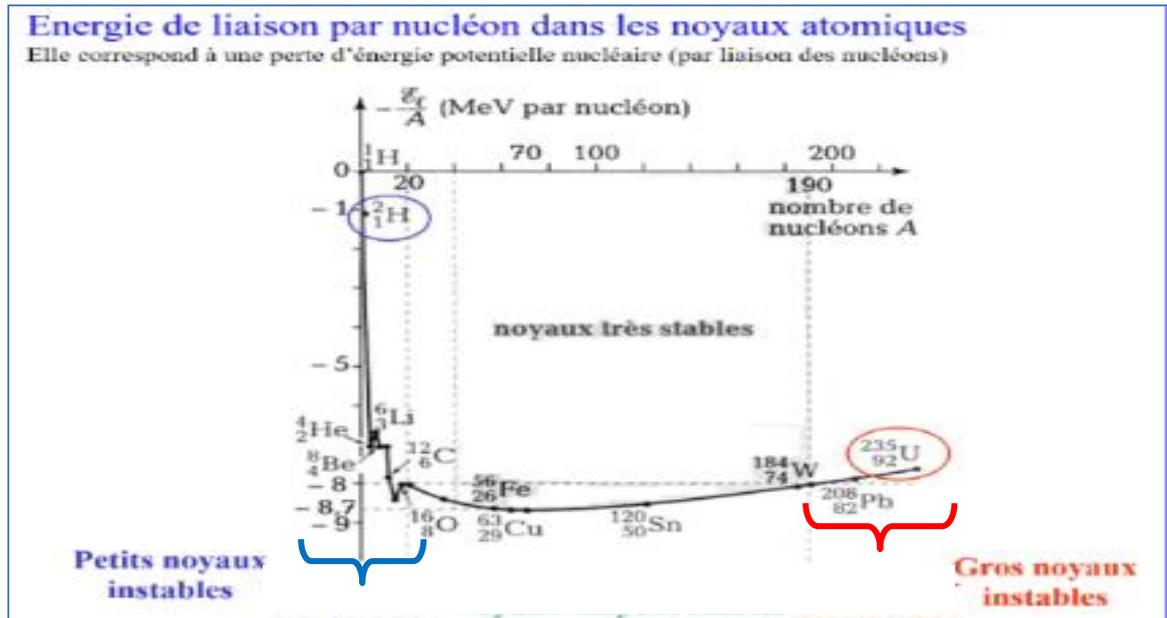
1^{ère} année LMD. SNV

Année universitaire : 2023-2024

Chapitre II : La radioactivité

1-Définition

La radioactivité est le phénomène physique par lequel les noyaux instables se transforment en noyaux atomiques plus stables. 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.



Courbe d'Aston

Cette courbe porte le nom du physicien anglais F.W Aston. Elle représente la variation de l'énergie de liaison par nucléon (exprimée en MeV/nucléon) en fonction du nombre de nucléons A dans un noyau atomique. Elle nous permet de comprendre la stabilité des différents noyaux. On peut constater via cette courbe :

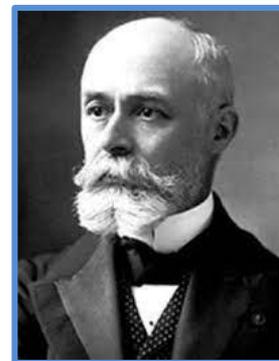
Les noyaux instables : $(\Delta E / A) < 8 \text{ Mev/ nucléon}$

Le noyau le plus stable est le fer ($^{56}_{26}\text{Fe}$) : $\Delta E / A = 8,7 \text{ Mev/nucléon}$

2-La radioactivité naturelle

Elle a été découverte par Henri BECQUEREL en 1886.

C'est la propriété de certains noyaux à se désintégrer spontanément en émettant divers rayonnements alpha, bêta, gamma. Les noyaux lourds (gros noyaux) émettent des rayonnements β^- ou alpha. Les noyaux les moins lourds (légers ou petits noyaux) émettent des rayonnement β^- .



Henri Becquerel

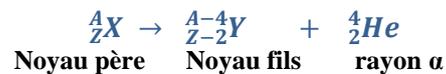
Un noyau radioactif

Est un noyau instable dont la désintégration provoque l'apparition d'un nouveau noyau, l'émission d'une particule notée α , β^- ou β^+ , et fréquemment l'émission d'un rayonnement électromagnétique noté γ .

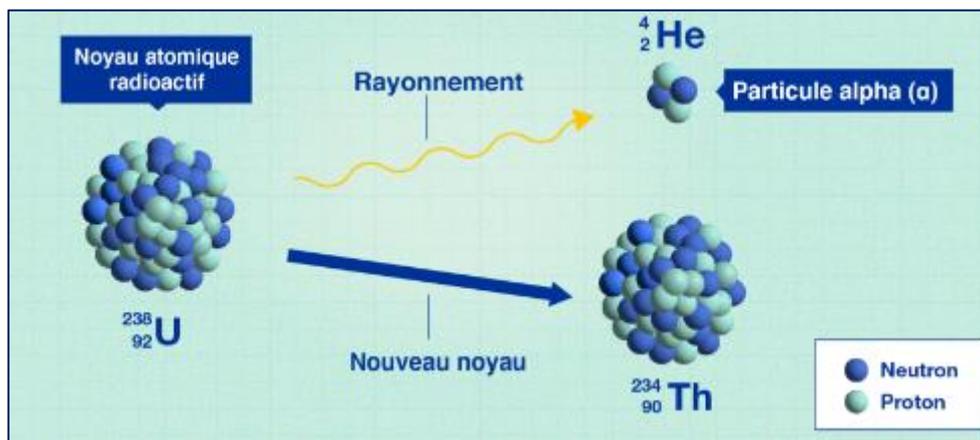
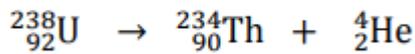
2.1 Les types de rayonnements nucléaires

a- Les rayons α (alpha):

Ce sont des noyaux d'hélium ${}^4_2\text{He}$ émis lors de la désintégration spontanée d'un noyau lourd ($A > 200$) en noyau plus légers. Un noyau « père » ${}^A_Z\text{X}$ se désintègre pour donner le noyau fils ${}^{A-4}_{Z-2}\text{Y}$ et expulsion d'un rayonnement alpha selon la réaction suivante :



Exemple



Les particules alpha sont moins pénétrantes, elles peuvent être arrêtées efficacement par une feuille de papier, une couche de vêtements ou même la couche superficielle de la peau.

b- Les rayons β :

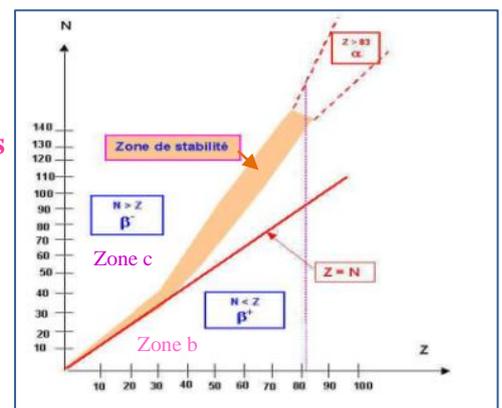
Lorsque le rapport N/Z est trop élevé, les noyaux instables émettent des particules bêta des **négatons (β^-)** ou des **positons (β^+)**.

Les rayons β^- (négatons)

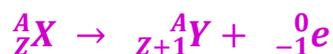
Lorsque dans le noyau il y a un excès de neutrons ($N > Z$: zone c, N : nombre de neutrons ; Z : nombre de protons)

Il y a émission d'un négaton β^- .

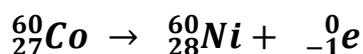
Un noyau père ${}^A_Z\text{X}$ se transforme en un noyau fils ${}^{A}_{Z+1}\text{Y}$



accompagnée de l'émission d'un électron 0_1e appelé particule β^- , selon la réaction nucléaire suivante :



Exemple :



Remarque : lors de cette radioactivité β^- un neutron se transforme en un proton selon l'équation suivante : ${}^1_0n \rightarrow {}^1_1p + {}^0_{-1}e$

Les rayons β^+ (positons)

Il concerne les noyaux riches en protons ($Z > N$) qui sont situés au-dessous de la zone de stabilité (diagramme) émettent des particules ${}^0_+1e$ appelées : **positons β^+** de même masse que les électrons ordinaires mais de charge $+e$.

L'équation de désintégration s'écrit :

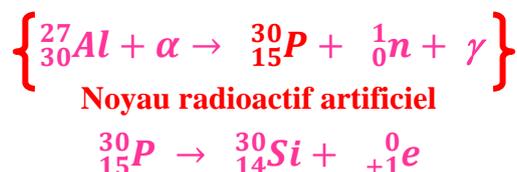


Un proton excédentaire se transforme en un positon et un neutron suivant le bilan :



Ce type de rayonnement s'observe qu'avec des radioéléments artificiels (c'est-à-dire des noyaux engendrés par des réactions nucléaires réalisées par l'homme).

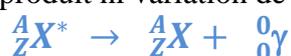
Exemple



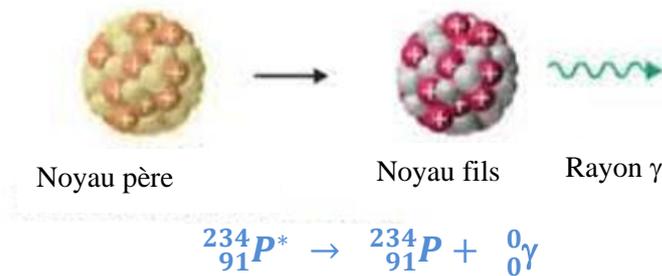
Les particules β peuvent pénétrer plus profondément dans la matière, mais sont arrêtées par des matériaux tels que le plastique, le verre ou quelques millimètres de métal comme l'aluminium. Elles peuvent causer des dommages aux tissus biologiques s'ils sont en contact direct avec le corps, mais leur pénétration est limitée.

c- Les rayons γ :

L'éjection des particules et souvent s'accompagnent d'un rayonnement électromagnétique de très courte longueur d'onde ($\lambda < 1\text{Å}$) se sont les rayons γ (C'est un dégagement d'énergie qui accompagne une réaction nucléaire). Ils sont émis lorsqu'un noyau est formé par désintégration α ou β . le noyau fils est généralement produit dans un état excité (il possède un excédent d'énergie par rapport à son état fondamental). Ce noyau libère un rayonnement γ
Une émission de rayonnement γ ne produit ni variation de A ni de Z .

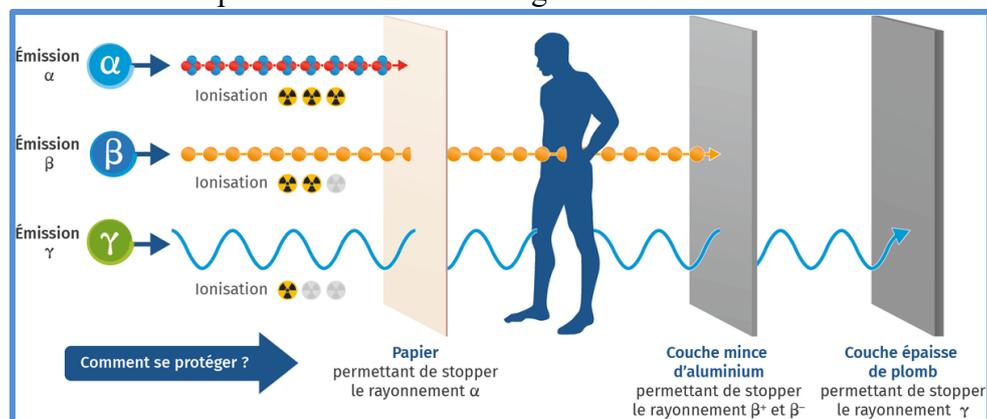


Exemple :



Les rayonnements γ ont un pouvoir de pénétration bien plus important que celui des particules α et β , il faut une forte épaisseur de béton ou de plomb pour s'en protéger, mais ils sont plus ionisants.

Ils sont particulièrement dangereux pour les tissus biologiques car ils peuvent pénétrer profondément dans le corps et causer des dommages à l'ADN des cellules.



3. La radioactivité artificielle

La radioactivité artificielle a été mise en évidence en 1934 par Irène et Frédéric JOLIOT– CURIE. Une réaction nucléaire artificielle est une réaction nucléaire qui est initiée, contrôlée ou produite par l'homme. Les noyaux cibles sont bombardés ${}^A_Z\text{X}$ par un autre noyau généralement léger ${}^{A_1}_{Z_1}\text{P}$ ou particule (noyau projectile : les protons, les neutrons, les électrons) pour donner de nouveaux noyaux.

Une réaction artificielle peut être écrite de la manière suivante :



On peut utiliser une écriture abrégée ou simplifiée pour la réaction nucléaire :



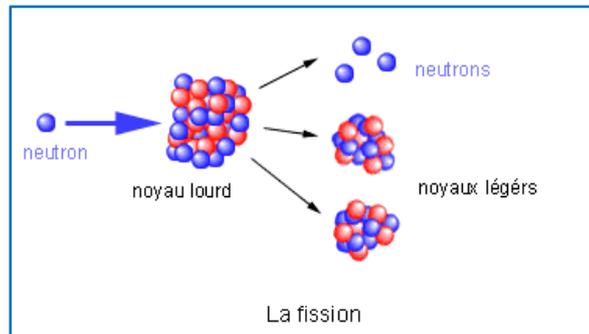
Exemple :



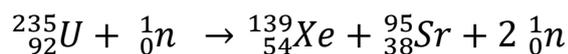
3.1 Les différents types d'une réaction nucléaire :

a-Réaction de fission

Est un processus par lequel un noyau lourd ($A > 200$) donne naissance à deux noyaux plus légers. Généralement accompagnée de la libération d'une très grande énergie et de neutrons. C'est la réaction qui alimente les réacteurs nucléaires pour produire de l'électricité.



Exemple :

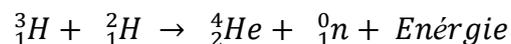


Les neutrons résultants peuvent conduire à des nouvelles fissions en formant une **fission en chaîne**.
 1 gramme d'uranium 235 libère ainsi autant d'énergie que la combustion de plusieurs tonnes de charbon.

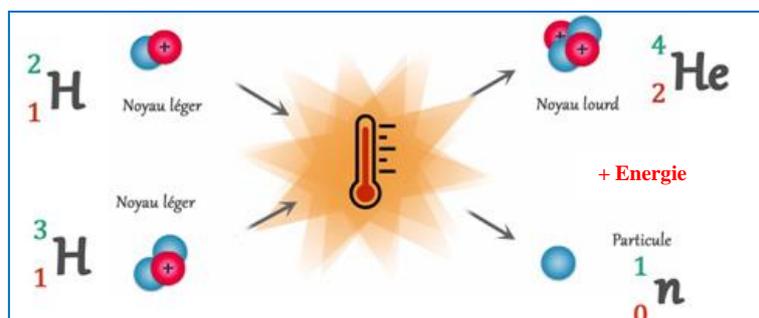
b-Réaction de fusion

Dans la fusion, deux ou plusieurs noyaux légers se combinent (se fusionnent) pour donner un noyau plus lourd avec émission d'un neutron ou proton, et un dégagement de chaleur.

Exemple: la bombe d'hydrogène



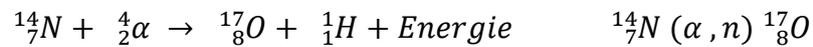
L'énergie dégagée par cette réaction est de $E = 17,6 \text{ MeV/He}$



c-Réaction de transmutation

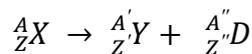
Dans cette réaction le nombre de masse du nucléide obtenu égal ou très voisin de celui du nucléide transformé. Le nucléide formé est stable ou radioactif

Exemple 1 :



Loi de conservation

Au cours une réaction nucléaire (naturelle ou artificielle) d'un noyau, il y a conservation du
Nombre massique
Nombre atomique



Conservation du nombre massique : $A = A' + A''$

Conservation du nombre atomique : $Z = Z' + Z''$

Exemple :



$$A = 235 + 1 = 236$$

$$A' = 141 + 92 + x = 233 + x$$

$$\Rightarrow x = 3 \text{ donc } A' = 236$$

$$Z = 92 + 0 = 92$$

$$Z' = 56 + 36 + 0 = 92$$

4-Loi de désintégration radioactive :

Pour un échantillon donné le nombre d'atomes radioactifs varie avec le temps suivant une loi qui est précisément la loi désintégration radioactive (naturelle ou artificielle) .

Soit la désintégration suivante :



$$t=0 \quad N_0 \quad 0$$

$$t \quad N_t \quad N_0 - N_t$$

N_0 : nombre de noyaux initial

N_t = nombre de noyaux restants au temps "t"

$N_0 - N_t$ = nombre des noyaux désintégrés

$-dN = C$ est la variation du nombre de noyaux désintégrés pendant un temps dt (le signe (-), signifie que le nombre de noyaux diminue au cours du temps).

dt = variation du temps t

La vitesse de disparition des noyaux (la désintégration) en fonction de N s'écrit :

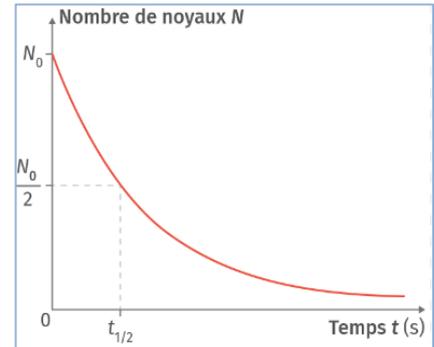
$$-dN / dt = \lambda N \Rightarrow -dN / N = \lambda dt$$

La loi de variation du nombre de noyaux en fonction du temps s'obtient en intégrant l'équation différentielle du 1er ordre.

$$\int_{N_0}^{N_t} \frac{dN}{N} = \int_0^t -\lambda dt \Rightarrow [\ln N]_{N_0}^{N_t} = -\lambda [t]_0^t$$

$$\ln N_t - \ln N_0 = -\lambda t \Rightarrow N_t / N_0 = e^{-\lambda t}$$

$$\Rightarrow \boxed{N_t = N_0 e^{-\lambda t}} \text{ C'est la loi de la décroissance radioactive}$$



La courbe de décroissance radioactive

λ : est la constante radioactive ou constante de désintégration, elle varie avec la nature du noyau radioactif et son unité c'est s⁻¹ ou min⁻¹.

t : le temps

4.1 La relation entre la loi de désintégration et la masse

$$1 \text{ mole} \longrightarrow N_A = 6,023 \cdot 10^{23}$$

$$n \text{ moles} \longrightarrow N_{\text{noyaux}}$$

$$n = \frac{N}{N_A}$$

$$n = \frac{m}{M_M} = \frac{N}{N_A} \Rightarrow N = \frac{m}{M_M} N_A \dots\dots\dots \textcircled{1}$$

$$\text{La loi de désintégration radioactive : } N_t = N_0 e^{-\lambda t} \dots\dots\dots \textcircled{2}$$

$$\text{On remplace 1 dans 2} \Rightarrow \frac{m_t}{M_M} N_A = \frac{m_0}{M_M} N_A e^{-\lambda t} \Rightarrow \boxed{m = m_0 e^{-\lambda t}}$$

m : la masse restante exprimée en gramme (g)

m₀ : la masse initiale exprimée en gramme (g)

M_M : la masse molaire exprimée en g/mole

5-L'activité : \mathcal{A}

C'est le nombre de désintégrations par unité de temps.

$$\mathcal{A} = -dN/dt = \lambda N$$

\mathcal{A} est exprimée en :

- ♦ désintégrations par seconde (dps) ou Becquerels (Bq)
- ♦ Curies (Ci)

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

$$1 \text{ curie (Ci)} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ dps}$$

$$1 \mu\text{Ci} = 10^{-6} \text{ Ci}$$

5.1-La relation entre l'activité et la loi de désintégration

\mathcal{A}_0 : activité initiale \mathcal{A} : activité au temps t

$$\mathcal{A} = \lambda N \Rightarrow N = \mathcal{A} / \lambda$$

$$\mathcal{A}_0 = \lambda N_0 \Rightarrow N_0 = \mathcal{A}_0 / \lambda \quad \Rightarrow \quad \mathcal{A} / \lambda = \mathcal{A}_0 / \lambda (e^{-\lambda t}) \Rightarrow \mathcal{A} = \mathcal{A}_0 e^{-\lambda t}$$

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

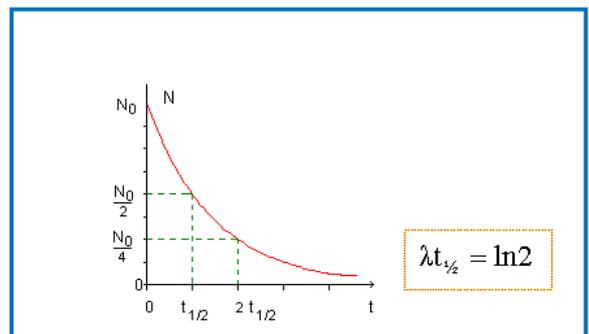
6- Période radioactive (T ou $t_{1/2}$)

La période ou temps de demi-vie d'un noyau radioactif noté par T ou $t_{1/2}$ est le temps nécessaire pour que la moitié des noyaux radioactifs présents initialement dans l'échantillon se désintègre.

	A	→	B
t=0	N_0		0
$t_{1/2}$	$N_0/2$		

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \Rightarrow \ln(N/N_0) = -\lambda t$$

A $T = t_{1/2} \Rightarrow N = N_0/2$



$$\Rightarrow \ln \frac{(N_0/2)}{N_0} = -\lambda T \Rightarrow \ln(1/2) = -\lambda T \Rightarrow \ln 1 - \ln 2 = -\lambda T$$

$$\Rightarrow -\ln 2 = -\lambda T \Rightarrow \mathbf{T = \ln 2 / \lambda = 0,69 / \lambda}$$

La demi-vie radioactive est une caractéristique de chaque type de noyau radioactif, elle ne dépend que de la constante radioactive λ .

Exemple :

Calculer l'activité de 1g de ²²⁶Ra pendant une période T= 1620ans

$$\mathcal{A} = -dN/dt = \lambda N \dots\dots\dots (3)$$

$$T = \ln 2 / \lambda \Rightarrow \lambda = \ln 2 / T \dots\dots\dots (4); N = \frac{m}{M_M} N_A \dots\dots\dots (5)$$

On remplace 4 et 5 dans 3 $\Rightarrow \mathcal{A} = \frac{\ln 2}{T} \times \frac{m}{M_M} \times N_A$

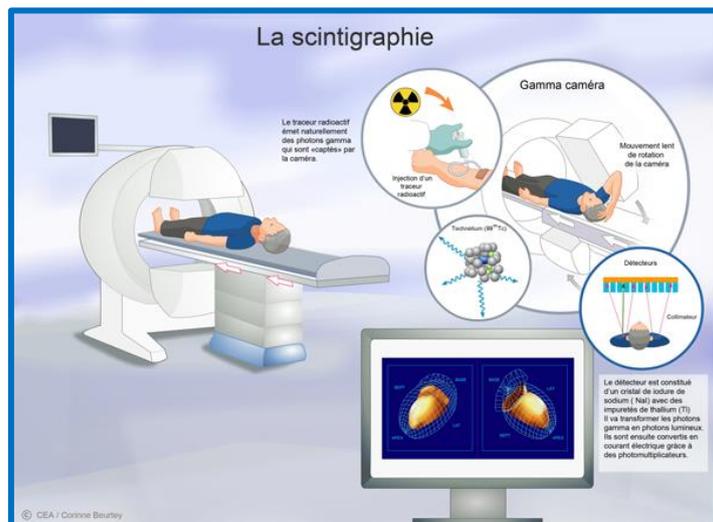
$$\mathcal{A} = \frac{0,69 \times 6,023 \cdot 10^{23} \times 1}{1620 \times 365 \times 24 \times 60 \times 60 \times 226} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{dps}$$

7- Applications de la radioactivité

Il est important de noter que la radioactivité possède de nombreuses applications bénéfiques, elle peut être dangereuse si elle n'est pas gérée correctement.

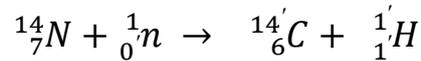
a-La médecine

La radiation ionisante est utilisée en médecine nucléaire pour diagnostiquer et traiter les maladies. En médecine diagnostique des traceurs radioactifs sont utilisés pour obtenir des images des organes et des tissus internes par des techniques telles que la tomographie par émission de positons (TEP) et scintigraphie. En thérapie, la radiothérapie est utilisée pour traiter le cancer, ou la radiation est dirigée vers les cellules cancéreuses pour les détruire.



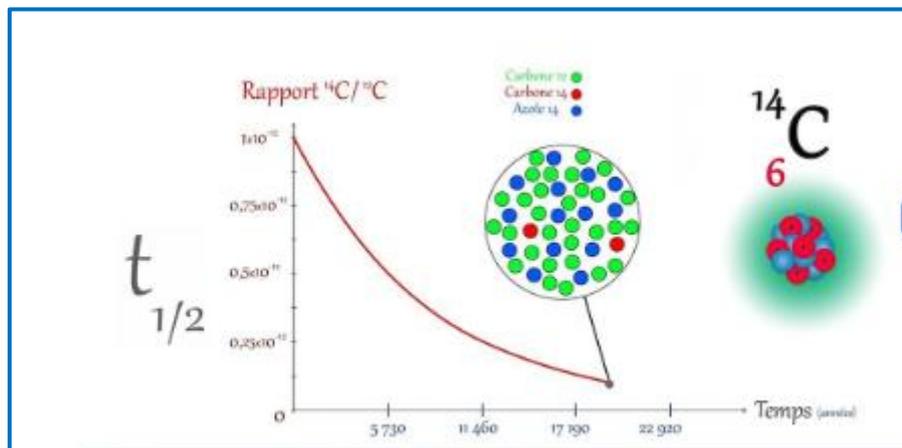
b-La datation

L'utilisation du ^{14}C radioactif permet de déterminer l'âge des pièces archéologiques et géologiques. Cet isotope est produit de manière continue dans l'atmosphère par l'action des neutrons des rayons cosmique sur l'azote ^{14}N de l'atmosphère suivant la réaction :



Il est oxydé en CO_2 et éventuellement absorbé par les plantes et les animaux. le nombre de désintégration par unité du temps et de masse est également constante pour tous les organismes vivants (15,3 dpm/gr).

La datation repose sur la désintégration du carbone 14 en carbone 12 dans les organismes vivants, qui cesse lorsque ces organismes meurent. En mesurant la quantité de carbone 14 restante dans un objet, les scientifiques peuvent estimer son ancienneté



c-La production d'énergie

L'énergie nucléaire est produite par fission nucléaire ou les noyaux d'atomes lourds tels que l'Uranium se divisent en noyaux plus légers, libérant une grande quantité d'énergie. Cette dernière est utilisée dans les centrales nucléaires pour produire de l'électricité.

Exercices

Exercice 1:

Quel est le temps nécessaire pour désintégrer :

1-80% des atomes de la matière radioactive si $T=35$ ans

2-10% d'un élément radioactif si sa demi-vie =20minutes

Si le nombre initial des noyaux équivalents à 100% , quel est le nombre des atomes X % qui se désintègre pendant 3 tours

Sachant que 90% de l'isotope ^{19}F s'analyse radioactivement pendant 366 minutes, quel est sa demi vie.

Solution

$$\left. \begin{array}{l} 1) \quad N_t = N_0 e^{-\lambda t} \\ \quad T = \ln 2 / \lambda \end{array} \right\} \quad t = \frac{T}{0,69} \ln \frac{N_0}{N_t}$$

$$N_0=100\% \quad , \quad N_{\text{désintégré}}=N_d=80\%$$

$$N=N_0-N_d=100-80=20\%$$

$$t = \frac{35}{0,69} \ln \frac{100}{20} = 81,28 \text{ années}$$

$$2) \quad N_t = N_0 e^{-\lambda t}$$

$$N=N_0-N_d= 100-10=90\%$$

$$t = \frac{20}{0,69} \ln \frac{100}{90} = 3,04 \text{ minutes}$$

$$3) \quad t=3T$$

$$\left. \begin{array}{l} N_t = N_0 e^{-\lambda t} \\ \lambda = \ln 2 / T \end{array} \right\} \quad N_t = N_0 e^{-\frac{\ln 2}{T} 3T} \Rightarrow N_t = N_0 e^{\ln(2) \cdot 3}$$

$$\frac{N_0}{N} = (2)^3 \Rightarrow N = N_0/8 = 12,5\% \text{ de } N_0$$

$$X = 100 - 12,5 = 87,5\%$$

$$4) \quad \mathcal{A} = \mathcal{A}_0 e^{-\lambda t} \Rightarrow \frac{\mathcal{A}}{\mathcal{A}_0} = e^{-\lambda t} \Rightarrow \lambda t = \ln \frac{\mathcal{A}_0}{\mathcal{A}}$$

$$\left. \begin{aligned} \ln \frac{1}{t} &= \frac{1}{\lambda} \ln \frac{\mathcal{A}_0}{\mathcal{A}} \\ \lambda &= \ln 2 / T \end{aligned} \right\} T = \frac{\ln 2 \cdot t}{\ln \frac{\mathcal{A}_0}{\mathcal{A}}}$$

$$\mathcal{A}_0 = 100\%; \quad \mathcal{A} = 100 - 90 = 10\%$$

$$T = 110,27 \text{ minutes}$$

Exercice 2

On dispose de 0,200 mg de $^{203}_{80}\text{Hg}(\text{NO}_3)_2$. Combien subsistera-t-il de $^{203}_{80}\text{Hg}(\text{NO}_3)_2$ après 6 mois (182 jours) ?

La période du mercure 203 est de 46,9 jours.

Solution

Décroissance radioactive : $m = m_0 e^{-\lambda t}$

$\lambda T = \ln 2$ avec $\lambda =$ constante radioactive

T = période ou temps de demi-vie

$$m = m_0 e^{-\ln 2 \cdot \frac{t}{T}} = 0,200 e^{-\ln 2 \cdot \frac{182}{46,9}} = 0,0136 \text{ mg}$$