

Partie 2:

Les Transformations Nucléaires

Cours et Exercices

Cours de Physique - Chimie

Unité 1: La décroissance radioactive



Unité 2: Noyaux, Masse et énergie



CHAPITRE 1 : La décroissance radioactive

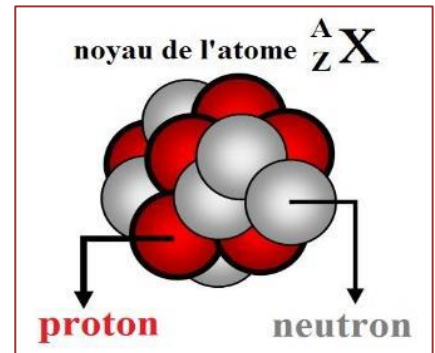
I- Stabilité et instabilité du noyau

1- La composition du noyau :

- ❖ Le noyau d'un atome est constitué de
- ❖ Le noyau d'un atome associé à un élément X est représenté par le symbole :

Tel que :

- ❖ X : représente le symbole de
- ❖ A : représente le nombre des
- ❖ Z : représente le nombre de
- ❖ $N = A - Z$: représente le nombre de



Application :

Donner la composition des noyaux suivants : $^{238}_{92}\text{U}$; $^{35}_{17}\text{Cl}$; $^{35}_{17}\text{Cl}^-$; $^{24}_{12}\text{Mg}$; $^{24}_{12}\text{Mg}^{2+}$

Le noyau	Le nombre des nucléons	Le nombre des protons	Le nombre des neutrons
$^{238}_{92}\text{U}$			
$^{35}_{17}\text{Cl}$			
$^{35}_{17}\text{Cl}^-$			
$^{24}_{12}\text{Mg}$			
$^{24}_{12}\text{Mg}^{2+}$			

2- Le nucléide :

En physique nucléaire, on appelle nucléide, l'ensemble des atomes dont

Tous les atomes d'un nucléide sont

Exemples : $^{12}_6\text{C}$; $^{16}_8\text{O}$; $^{235}_{92}\text{U}$

Remarque : Il existe environ 350 nucléides naturel et plus de 2000 sortes de nucléides artificiels obtenus en laboratoire.

3- Les isotopes :

On appelle isotopes tous les nucléides d'un même élément chimique. Deux isotopes possèdent donc

Exemples :

- ❖ Les isotopes de l'hydrogène : ${}^1_1\text{H}$: *protonium*; ${}^2_1\text{H}$: *deutérium*; ${}^3_1\text{H}$: *tritium*
- ❖ Les isotopes de l'uranium : ${}^{238}_{92}\text{U}$ (99,276%); ${}^{235}_{92}\text{U}$ (0,718%); ${}^{234}_{92}\text{U}$ (0,006%)

4- La densité de la matière nucléaire :

On peut assimiler un noyau d'un atome à une sphère de rayon r , qui dépend du nombre de masse A selon la relation : $r = r_0 \cdot A^{1/3}$. Avec $r_0 = 1,2 \cdot 10^{-15} \text{ m}$.

Si la masse approximative d'un nucléon est $m_p \approx m_n \approx m \approx 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

Alors la valeur approximative de la masse volumique de la matière nucléaire est :

.....

.....

.....

On remarque que c'est une valeur énorme : *un cube de la matière nucléaire de côté égal à 1cm a une masse de 200 millions de tonnes !!!!!*

Remarques :

Certaines étoiles ont une masse volumique voisine de celle de la matière nucléaire. Elles sont appelées : **étoiles neutroniques**. La grande densité de ces étoiles est due au fait qu'elles sont constituées essentiellement de neutrons.

5- La stabilité et l'instabilité des noyaux atomiques :

Dans le noyau, ... qui s'exercent entre sont par rapport aux qui s'exercent entre Soumis à ces, le noyau se disloquerait : sa cohésion s'explique par qui s'exerce entre, et de très courte portée, ..., à l'échelle du noyau, que l'interaction électrique :

Cependant, parmi les isotopes possibles d'un élément, seuls certains sont, alors que les autres sont et se décomposent spontanément : ils sont

6- Le diagramme de Segré :

Le diagramme de Segré ou diagramme $(N; Z)$ permet d'étudier la stabilité des noyaux atomiques en fonction de leur nombre de protons et de neutrons. On reporte, pour tous les noyaux existants, le nombre de neutrons $(N = A - Z)$ en ordonnée et le nombre de protons (Z) en abscisse, chaque petit carré représente ainsi un noyau atomique.

a- La vallée de stabilité :

Le diagramme $(N; Z)$, possède plusieurs zones, dont une centrale (rouge), appelée vallée de stabilité : elle correspond aux noyaux stables.

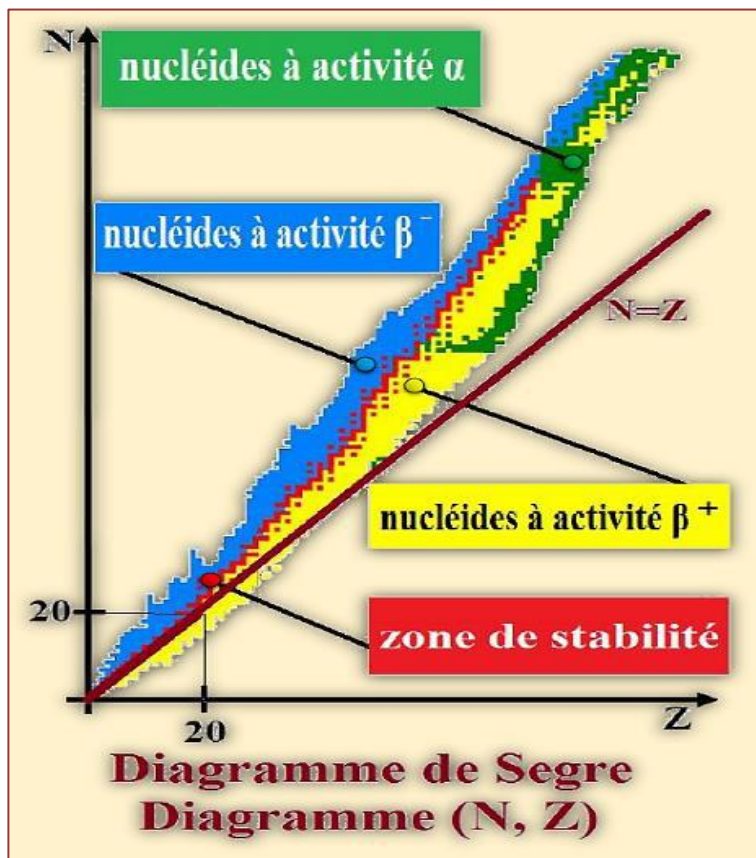
- ❖ Jusqu'à $Z = 20$, cette vallée de stabilité est une portion droite d'équation $(N = Z)$. Ces noyaux stables ont souvent autant de protons que de neutrons.

- ❖ Pour $Z > 20$, la cohésion du noyau n'est assurée que si celui-ci contient plus de neutrons que de protons. Cela se traduit par un déplacement de la vallée de stabilité, au-dessus, de la droite d'équation ($N = Z$).

b- Principaux types de désintégrations :

On distingue trois catégories de noyaux radioactifs suivant leur position par rapport à la vallée de stabilité :

- ❖ Ceux qui sont situés au-dessus du domaine de stabilité, ils ont un excédent en neutrons et ont tendance à émettre des électrons, appelés particules β^- . On dit que ces noyaux sont radioactifs β^- .
- ❖ Ceux qui sont situés au-dessous du domaine de stabilité, ils ont un excédent en protons et ont tendance à émettre des positons, appelés particules β^+ . On dit que ces noyaux sont radioactifs β^+ .
- ❖ Ceux qui sont situés en bout de la vallée de stabilité, ils ont un excédent en nucléons et ont tendance à se désintégrer en émettant des noyaux d'hélium ${}^4_2\text{He}$ appelés particules α . On dit que ces noyaux sont radioactifs α .



II- radioactivité

1- Activité historique :

Le physicien Henri Becquerel s'est intéressé à l'étude du phénomène de rayonnement des sels d'uranium, où ces sels émettent des rayonnements visibles après avoir été exposés à la lumière du soleil pendant un certain temps.

Le 26 février 1896, le ciel de Paris était nuageux, ce qui a empêché Becquerel d'exposer les sels d'uranium à la lumière du soleil. Il les a donc placés dans un tiroir de son bureau avec des plaques photographiques recouvertes d'une couche épaisse de papier noir opaque.

En mars de la même année, Becquerel a illustré les plaques photographiques et a remarqué avec stupéfaction qu'elles étaient affectées, même sans avoir été exposées à la lumière du soleil.

Ainsi, Becquerel a découvert que les sels d'uranium émettaient spontanément des rayonnements invisibles laissant des traces sur les plaques photographiques. Il a ensuite prouvé que la capacité d'émission de rayonnement était une propriété de l'élément uranium, et il a nommé ces rayonnements "**rayons uraniques**".

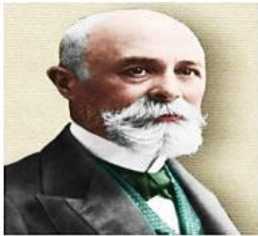
À partir de 1898, les physiciens **Pierre et Marie Curie** ont remarqué que l'élément thorium émettait également les rayons uraniques découverts par Becquerel.

Cela a été suivi par plusieurs recherches qui ont permis d'identifier et de classer les rayonnements émis par les substances radioactives.

Les physiciens anglais **Ernest Rutherford** et **Frederick Soddy** ont identifié les rayons émis par l'uranium 238 comme étant des noyaux d'hélium ionisés, et ils les ont appelés "rayons alpha" α . Cela a été représenté par l'équation : ${}^{238}_{92}\text{U} \rightarrow {}^{234}_{90}\text{Th} + {}^4_2\text{He}$

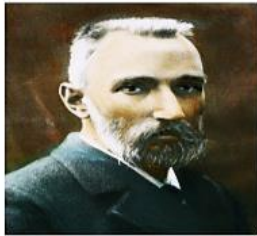
En 1900, Becquerel a découvert un autre type de rayonnement nucléaire, le rayonnement bêta β^- . Il s'agit de l'émission d'électrons à partir des noyaux de thorium, selon l'équation : ${}^{234}_{90}\text{Th} \rightarrow {}^{234}_{91}\text{Pa} + {}^0_{-1}\text{e}$

Par la suite, le Français **Paul Villard** a mis en évidence l'existence des rayons gamma γ , qui sont des ondes électromagnétiques invisibles.

**Henri Becquerel**

1852 – 1908

Prix Nobel : 1903

**Pierre Curie**

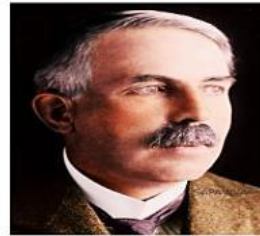
1859 – 1906

Prix Nobel : 1903

**Marie Curie**

1867 – 1934

Prix Nobel : 1903/1911

**Ernest Rutherford**

1871 – 1937

Prix Nobel : 1908

**Frederick Soddy**

1877 – 1957

Prix Nobel : 1921

Toutes ces découvertes et leurs applications ont contribué au développement et à l'enrichissement des connaissances sur la nature du noyau atomique.

1- Que signifie le terme "rayonnement" ?

.....

.....

2- Comment Becquerel a-t-il découvert que les sels d'uranium émettent des rayons invisibles ?

.....

.....

3- Est-ce que le phénomène de la radioactivité a été découvert par hasard ou y avait-il une prédiction théorique de sa découverte ?

.....

.....

4- Qu'est-ce que la radioactivité ?

.....

.....

5- Mentionner les noms des deux noyaux radioactifs qui ont été identifiés jusqu'en 1898.

.....

.....

6- Déterminer les types de la radioactivité mentionnés dans le texte et préciser leur nature.

.....

.....

2- Définition :

La radioactivité est une au cours de laquelle un noyau

..... ${}^A_ZX$ appelé, se désintègre en donnant un

autre noyau ${}^{A'}_{Z'}Y$ appelé et en émettant

${}^{A''}_{Z''}P(\alpha, \beta^- \text{ ou } \beta^+)$ et fréquemment avec émission d'un γ

selon l'équation :

3- Propriétés de la désintégration :

La désintégration radioactive est

.....

.....

.....

4- Lois de conservation : lois de SODDY

Lors d'une désintégration, il y a conservation du nombre de charge Z et du nombre de nucléons A .
La désintégration d'un noyau radioactif ${}^A_ZX$ conduit à un noyau plus stable ${}^{A'}_{Z'}Y$ et à l'expulsion d'une particule ${}^{A''}_{Z''}P$.

L'équation de la désintégration s'écrit : ${}^A_ZX \rightarrow {}^{A'}_{Z'}Y + {}^{A''}_{Z''}P$

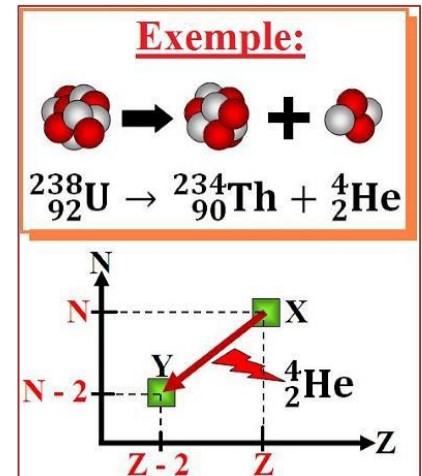
Conservation de Z :

Conservation de A :

5- Les divers types de radioactivités :

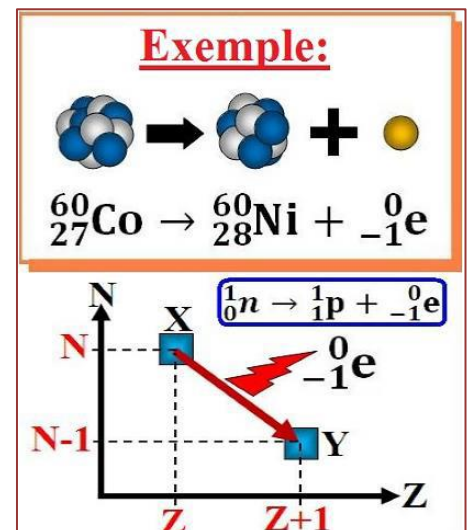
a- Radioactivité α :

La radioactivité α est une désintégration nucléaire au cours de laquelle un noyau radioactif instable



b- La radioactivité β^- :

La radioactivité β^- est une désintégration nucléaire au cours de laquelle un noyau radioactif instable

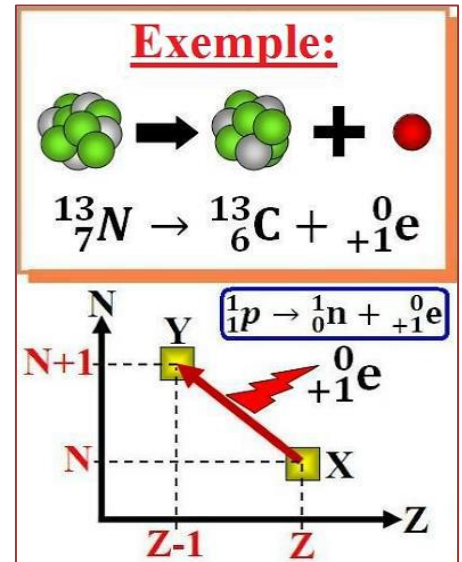


Remarque :

La désintégration β^- se traduit par

c- La radioactivité β^+ :

La radioactivité β^+ est une désintégration nucléaire au cours de laquelle un noyau radioactif instable



Remarque :

La désintégration β^+ se traduit par

d- Désexcitation γ ou désintégration γ :

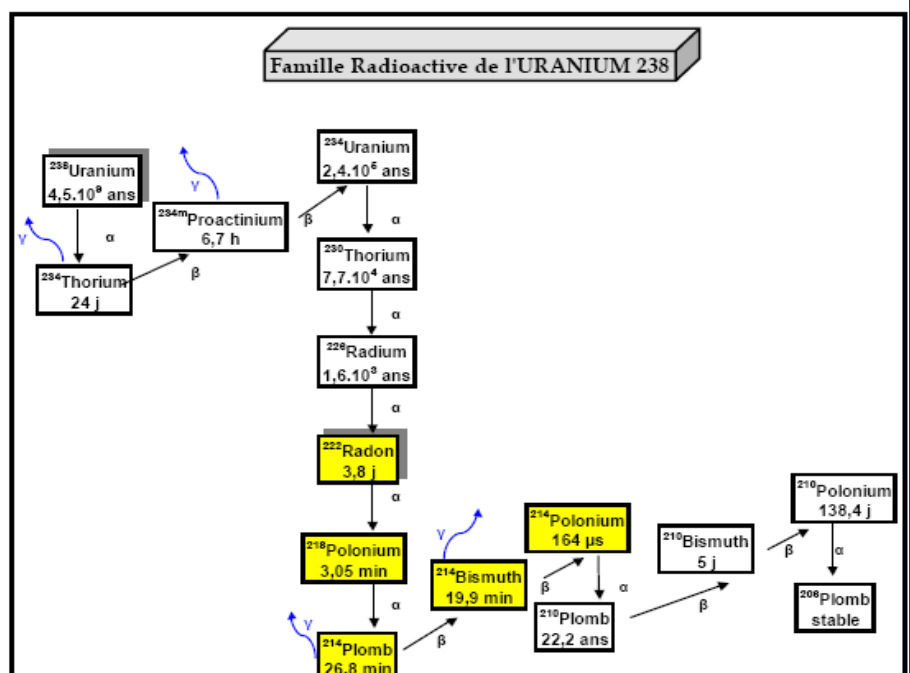
Lors d'une désintégration α ou β^- ou β^+ , un noyau père expulse une particule α ou β^- ou β^+ . Le noyau fils issu de la désintégration est le plus souvent dans un état de grande énergie, dit état excité, qui est un état instable. Il devient stable en libérant l'excédent d'énergie qu'il possède sous la forme d'un rayonnement électromagnétique de très faible longueur d'onde appelé rayonnement γ :

6- La famille radioactive :

A la suite d'une désintégration, un noyau père se transforme en un autre noyau appelé noyau fils. Ce dernier peut être stable ou radioactif. Dans le deuxième cas, il va se désintégrer à son tour en un nouveau noyau, et ce jusqu'à ce que l'on obtienne un noyau stable. L'ensemble de ces noyaux est appelé la famille radioactive du noyau de départ.

Exemple :

La famille radioactive d'uranium 238.



III- la décroissance radioactive

1- Caractère aléatoire d'une désintégration :

La radioactivité est un phénomène aléatoire : il n'est pas

.....

.....

Ce caractère aléatoire permet d'interpréter le comportement macroscopique de noyaux radioactifs qui

.....

.....

2- Loi de décroissance radioactive :

On considère un échantillon contenant N_0 noyaux radioactifs instables à l'instant $t = 0$ et on considère que $N(t)$ est le nombre de noyaux restant de cet échantillon à l'instant t , $[N(t) + dN(t)]$ est le nombre de noyaux restant à l'instant $t + dt$. Puisque $N(t)$ décroît alors $dN < 0$.

Le nombre de noyaux désintégrés entre les instants t et $t + dt$ est : $N(t) - [N(t) + dN(t)] = -dN(t)$

L'étude statistique d'un échantillon montre que le nombre de noyaux désintégrés $[-dN(t)]$ est proportionnelle à $N(t)$ Nombre de noyaux radioactifs restants et La durée dt . Ce qui se traduit par :

$$-dN(t) = \lambda \cdot N(t) \cdot dt \quad \text{D'où} \quad \frac{dN(t)}{N(t)} = -\lambda \cdot dt, \text{ c'est une équation différentielle.}$$

La solution de cette équation différentielle est donnée par :

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

C'est la loi de décroissance radioactive.

- N_0 : Le nombre de noyaux radioactifs présents dans l'échantillon à l'instant $t = 0$.
- $N(t)$: Le nombre de noyaux radioactifs présents dans l'échantillon à l'instant t .
- λ : La constante de désintégration ou constante radioactive c'est une constante caractéristique du type de noyaux qui se désintègrent. Elle exprime la portion des noyaux qui se désintègre par unité de temps.

3- La constante du temps τ :

$$e^a \cdot e^b = e^{a+b}, \quad \frac{e^a}{e^b} = e^{a-b}$$

$$e^b = a \Leftrightarrow b = \ln a; \quad a > 0$$

$$e^0 = 1, \quad \ln 1 = 0, \quad e^{-\infty} = 0$$

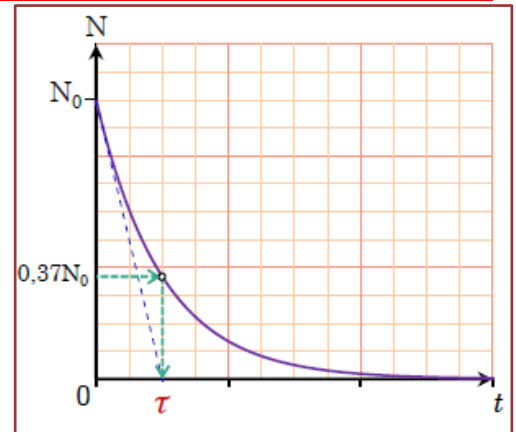
$$(a, b) > 0: \ln(a \cdot b) = \ln a + \ln b$$

$$(a, b) > 0: \ln \frac{a}{b} = \ln a - \ln b$$

$$\ln a^n = n \cdot \ln a, \quad \ln \frac{a}{b} = -\ln \frac{b}{a}$$

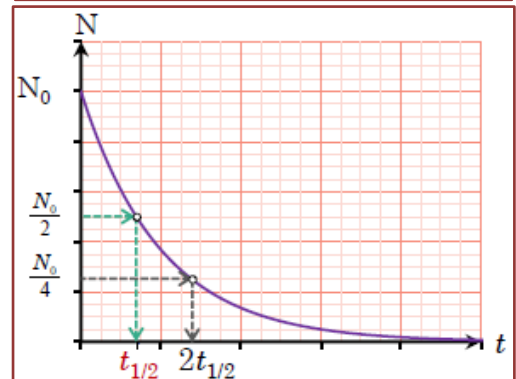
$$(a \cdot e^{-\lambda \cdot x})' = -a \cdot \lambda \cdot e^{-\lambda \cdot x} \quad \text{المشتقة:}$$

Remarques :



4- Demi-vie $t_{1/2}$ d'un échantillon radioactif :

a- Définition :



b- Relation entre λ et $t_{1/2}$:

c- Exemples :

L'élément radioactif	${}^3_1\text{H}$	${}^{219}_{82}\text{Pb}$	${}^{239}_{92}\text{U}$	${}^{16}_7\text{N}$	${}^{212}_{84}\text{Po}$	${}^{14}_6\text{C}$
Demi-vie	12,3ans	10,6h	23min	3,75s	$3 \cdot 10^{-7}\text{s}$	$5,73 \cdot 10^3\text{ans}$

Remarque :

Le temps de demi-vie d'un échantillon radioactif est indépendant de la quantité de matière initialement présente dans l'échantillon. Il ne dépend que de la nature des noyaux radioactifs qui se désintègrent.

5- L'activité d'un échantillon radioactif :

L'activité $a(t)$ d'un échantillon radioactif contenant $N(t)$ noyaux radioactifs est le nombre de désintégrations qu'il produit par seconde.

$a(t)$ Est en Becquerel (Bq)

Remarque : L'activité de 1Bq représente une désintégration par seconde.

IV- La datation par la radioactivité.

1- Le principe de la datation par la radioactivité :

Les géologues et les archéologues s'appuient sur plusieurs techniques différentes pour **déterminer l'âge des fossiles, des roches et des momies...** Parmi ces techniques, on trouve celles qui se basent sur la radioactivité. En effet, **les roches et les fossiles contiennent des nucléides radioactifs dont la quantité diminue avec le temps.** Ainsi, il est possible **de dater un échantillon en mesurant son activité radioactive et en la comparant à celle d'un échantillon de référence.**

De plus, **plus l'âge de l'échantillon à dater est élevé, plus il est nécessaire d'utiliser une méthode basée sur des nucléides à longue demi-vie.**

En utilisant ces techniques, les géologues et les archéologues **peuvent estimer l'âge approximatif** des différents échantillons et comprendre les évolutions chronologiques des événements géologiques et de l'histoire humaine.

2- La datation par le Carbone-14 :

Les organismes vivants échangent du carbone avec l'atmosphère et les composés organiques. L'élément carbone existe principalement sous deux isotopes : **le carbone 12, qui est stable, et le carbone 14, qui est radioactif de type β^- .**

Le carbone 14 est présent en quantité minime en raison de sa faible abondance naturelle de **0,0001%**. Il se trouve dans tous les composés chimiques à cette proportion d'abondance.

Cet isotope a **une demi-vie de 5600 ans** et se forme par réaction des noyaux d'azote avec les neutrons des rayons cosmiques, selon l'équation nucléaire suivante : ${}^{14}_7\text{N} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^{14}_6\text{C} + {}^1_1\text{H}$

Ce rapport se retrouve dans tous les organismes vivants, et lorsqu'ils meurent, il diminue progressivement en raison de la désintégration du carbone 14 sans être remplacé. Cela se produit selon l'équation suivante : ${}^{14}_6\text{C} \rightarrow {}^{14}_7\text{N} + {}^0_{-1}\text{e}$

Et d'après la relation $a(t) = a_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$, on détermine l'âge approximatif d'un échantillon, tel que :

.....

.....

.....

.....

.....

.....

3- La datation par d'autres méthodes :

On choisit la datation par le carbone-14 pour les échantillons dont l'âge **ne dépasse pas 50 000 ans**. Par conséquent, pour dater des échantillons très anciens tels que les roches, on utilise par exemple l'**uranium-238** qui a une demi-vie égale de $t_{1/2} = 4,4 \cdot 10^9 \text{ ans}$.

L'utilisation de la datation par l'**uranium-238** a permis d'estimer l'**âge de la Terre, qui est d'environ 4,55 milliards d'années.**

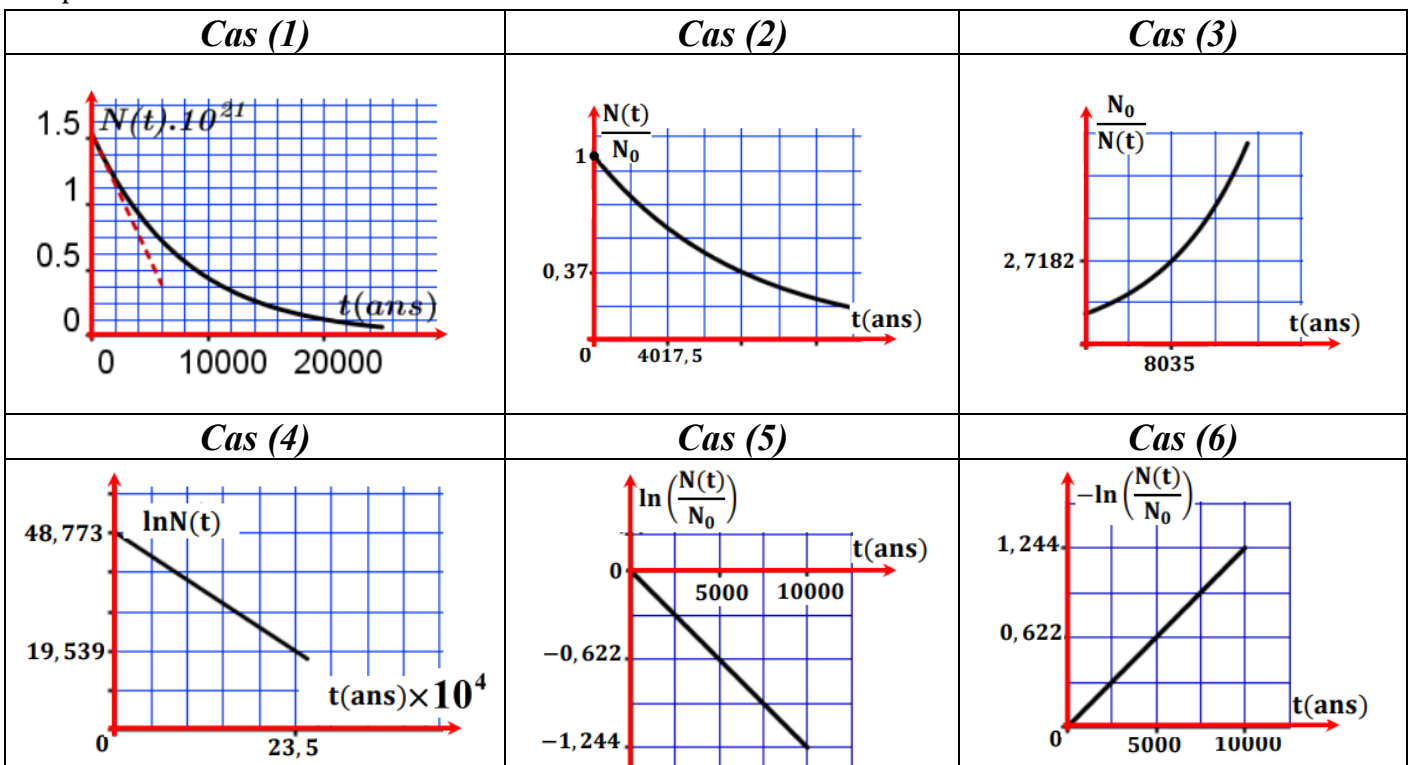
Exercice 1

Compléter et déterminer type de désintégration pour les transformations suivantes :

$^{214}_{82}\text{Pb} \rightarrow \dots\text{Bi} + {}^0_{-1}\text{e}$	$^{234}_{92}\text{U} \rightarrow {}^{230}_{90}\text{Th} + \dots$	$^{230}_{90}\text{Th} \rightarrow {}^{226}_{88}\text{Ra} + {}^4_2\text{He}$
$^{210}_{83}\text{Bi} \rightarrow {}^{210}_{84}\text{Po} + {}^0_{-1}\text{e}$	$^{234}_{90}\text{Th} \rightarrow {}^{234}_{91}\text{Pa} + \dots$	$\dots\text{Po} \rightarrow {}^{214}_{82}\text{Pb} + {}^4_2\text{He}$
$^{222}_{86}\text{Rn} \rightarrow {}^{218}_{84}\text{Po} + \dots$	$^{210}_{82}\text{Pb} \rightarrow {}^{210}_{83}\text{Bi} + {}^0_{-1}\text{e}$	$^{214}_{83}\text{Bi} \rightarrow {}^{214}_{84}\text{Po} + \dots$

Exercice 2

On considère un échantillon radioactif du **carbone 14**. Déterminer la constante radioactive λ et le temps de demi-vie du carbone 14 dans les cas suivants :



Exercice 3

Le diagramme représenté sur la figure ci-contre donne les derniers nucléides de la famille radioactive de l'uranium $^{238}_{92}\text{U}$.

- Donner la composition du noyau de $^{238}_{92}\text{U}$.
- Ecrire les équations des désintégrations représentées dans le diagramme puis identifier les nucléides X et Y.
- A l'instant $t=0$, on considère un échantillon du polonium $^{210}_{84}\text{Po}$, de masse $m_0 = 10\text{mg}$.

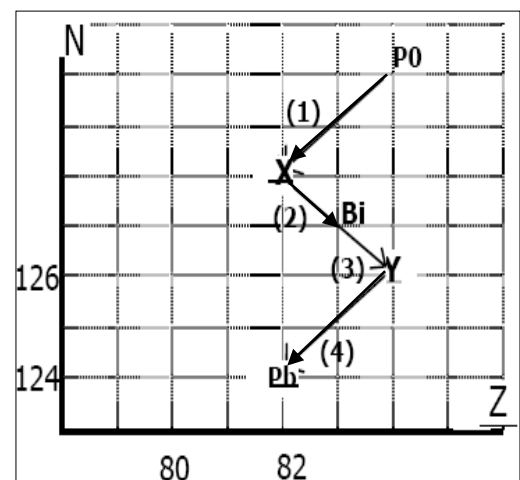
On donne :

$$M(^{210}_{84}\text{Po}) = 210\text{g.mol}^{-1}; N_A = 6,02 \cdot 10^{23}\text{mol}^{-1}; t_{1/2}(^{210}_{84}\text{Po}) = 138\text{j}$$

3-1- calculer a_0 l'activité de cet échantillon à l'instant $t=0$.

3-2- déterminer la durée nécessaire pour que 75% de cet échantillon se désintègre.

3-3- déterminer le nombre des désintégrations α et le nombre des désintégrations β^- qui conduit à la transformation de $^{214}_{84}\text{Po}$ au $^{206}_{82}\text{Pb}$.



Exercice 4

Un noyau de polonium $^{210}_{84}\text{Po}$ se désintègre pour donner une particule α et un noyau fils, de plomb $^{206}_{82}\text{Pb}$.

- 1- Ecrire l'équation de désintégration et déterminer les valeurs de A et Z.
- 2- La mesure de l'activité d'un échantillon de polonium 210 à l'instant $t_1 = 90\text{ j}$ donne $a_1 = 8.10^{20}\text{ Bq}$ et à l'instant $t_2 = 180\text{ j}$ donne $a_2 = 5.1.10^{20}\text{ Bq}$. Calculer le temps de demi-vie du polonium 210.
- 3- Calculer N_0 le nombre des noyaux de polonium 210 à l'instant $t=0$.
- 4- Déterminer la durée nécessaire pour que l'activité de l'échantillon vaut $a_0 / 2$.

Exercice 5

La médecine est l'un des principaux domaines dans lequel on trouve l'application pratique de la radioactivité. On utilise dans ce domaine plusieurs éléments radioactifs pour diagnostiquer et traiter quelques maladies. Parmi ces éléments, on trouve le Sodium 24 : $^{24}_{11}\text{Na}$ qui peut nous aider à contrôler la circulation sanguine dans le corps humain.

- 1- Le Sodium 24 : $^{24}_{11}\text{Na}$ se désintègre en magnésium $^{24}_{12}\text{Mg}$
 - 1.1 Écrire l'équation de la désintégration du Sodium 24 en précisant le type de la particule émise.
 - 1.2 Calculer la constante radioactive λ sachant que la demi-vie du Sodium 24 est : $t_{1/2} = 15\text{ h}$
- 2- Lors d'un accident routier un blessé a perdu un volume V_p du sang. Pour déterminer ce volume V_p on injecte le blessé à $t_0 = 0$ par un volume $V_0 = 5\text{ mL}$ de la solution de sodium 24 de concentration molaire $C_0 = 10^{-3}\text{ mol/L}$.
 - 2.1 Calculer n_1 le nombre de mole (quantité de la matière) de sodium 24 qui reste dans le sang du blessé à l'instant $t_1 = 3\text{ h}$. **On donne :** la constante d'Avogadro $N_A = 6,022.10^{23}\text{ mol}^{-1}$
 - 2.2 Calculer l'activité du sodium 24 dans le sang à l'instant $t_1 = 3\text{ h}$.
 - 2.3 Le résultat de l'analyse d'un volume $V_2 = 2\text{ mL}$ prélevé dans le sang du même individu à la date t_1 , donne la quantité de la matière $n_2 = 2,1.10^{-9}\text{ mol}$ du Sodium 24. Supposant que le sodium 24 est réparti uniformément dans tout le volume sanguin, déduire le volume V_p du sang perdu lors de cet accident, sachant que le volume du sang dans le corps humain est de 5L.

Exercice 6

On trouve le plomb et l'uranium dans les roches minérales par différent rapport selon la date de sa formation. On considère que la présence du plomb dans quelques roches minérales se produit seulement par la désintégration d'uranium 238 au cours du temps, on a un échantillon d'une roche minérale, contienne un nombre N_0 des noyaux d'uranium à l'instant de sa formation $t = 0$.

Cet échantillon contient, à l'instant t , une masse $m_U(t) = 10\text{ g}$ d'uranium 238 et une masse $m_{Pb}(t) = 0,01\text{ g}$ du plomb 206.

- 1- Déterminer le nombre des désintégrations α et le nombre des désintégrations β^- qui conduit à la transformation de $^{238}_{92}\text{U}$ au $^{206}_{82}\text{Pb}$.
- 2- Déterminer l'instant t . **Données :** $M(^{238}_{92}\text{U}) = 238\text{ g.mol}^{-1}$; $M(^{206}_{82}\text{Pb}) = 206\text{ g.mol}^{-1}$; $t_{1/2}(^{238}_{92}\text{U}) = 4,5.10^9\text{ ans}$

Exercice 7

Le Thorium $^{230}_{90}\text{Th}$ est utilisé dans la datation des coraux et concrétions carbonatées ainsi que dans la datation des sédiments marins et lacustres.

- 1- L'Uranium $^{238}_{92}\text{U}$ se désintègre en Thorium $^{230}_{90}\text{Th}$ en émettant x particules α et y particules β^-
 - 1.1 Ecrire l'équation de cette transformation nucléaire en déterminant les valeurs de x et y
 - 1.2 On symbolise par λ : la constante radioactive de thorium 230
Et par λ' : la constante radioactive de l'Uranium 238

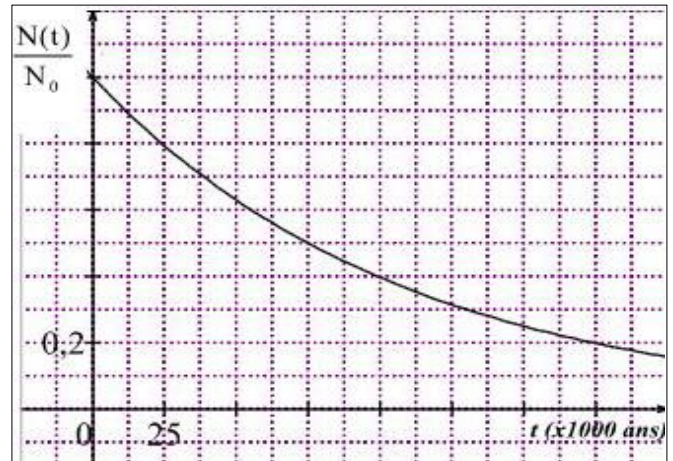
Montrer que le rapport : $\frac{N(^{230}_{90}\text{Th})}{N(^{238}_{92}\text{U})}$ reste constant lorsque les deux échantillons de $^{238}_{92}\text{U}$ et de $^{230}_{90}\text{Th}$

ont la même activité radioactive à la date t , $N(^{238}_{92}\text{U})$ et $N(^{230}_{90}\text{Th})$ sont respectivement le nombre des noyaux de l'uranium et de Thorium à la même date t .

2- Le Thorium 230 se désintègre en Randon $^{226}_{88}\text{Ra}$. Écrire l'équation de cette transformation nucléaire en précisant sa nature.

3- On note par $N(t)$ le nombre des noyaux de Thorium 230 présent dans un échantillon de corail à la date t et N_0 le nombre de ces noyaux à la date $t = 0$. La courbe ci - jointe représente les variations du rapport $N(t)/N_0$ en fonction du temps t . déterminer $t_{1/2}$.

4- La courbe ci - jointe est utilisée pour dater un échantillon d'un sédiment marin de forme cylindrique d'hauteur h prélevé dans le plancher océanique. Les résultats d'analyse d'une masse m prélevé dans la base supérieure de cet échantillon montre qu'il contient $m_s = 20\mu\text{g}$ de $^{230}_{90}\text{Th}$, par contre la même masse m prélevé dans la partie inférieure du même échantillon montre qu'il contient uniquement $m_p = 5\mu\text{g}$ de $^{230}_{90}\text{Th}$. Nous considérons qu'à $t = 0$, $m_0 = m_s$.



Calculer l'âge de la partie prélevé dans la base inférieure de l'échantillon, en ans.

CHAPITRE 2 : Noyaux, Masse et énergie

I - Equivalence « masse – énergie »

1- Relation d'Einstein :

Dans sa théorie de la relativité restreinte (1905) Albert Einstein a montré que la masse est une forme de l'énergie. Cela signifie que tout système matériel de masse m , au repos (c'est-à-dire immobile), possède une énergie E appelé _____, telle que :

- ❖ E : _____
- ❖ m : _____
- ❖ $c = 3.10^8 \text{ m.s}^{-1}$: _____

Remarque :

Cette relation montre qu'une variation Δm de masse d'un système au repos correspond à une variation ΔE d'énergie de masse telle que : _____

- ❖ _____
- ❖ _____

2- Unités de masse et d'énergie :

a- Unité de masse atomique :

b- Unité d'énergie : électronvolt :

c- Energie équivalente à l'unité de masse atomique :

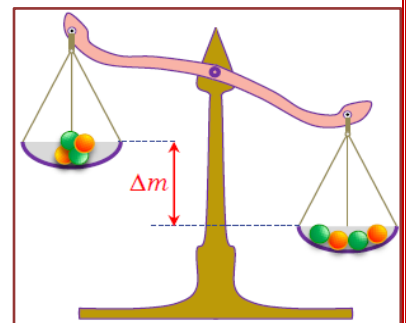
D'après la relation d'Einstein : à une masse $m = 1u = 1,66054.10^{-27} \text{ kg}$, correspond une énergie :

$$E = m.c^2 = 1,66054.10^{-27} \cdot (3.10^8)^2 = 1492,42.10^{-13} \text{ J} = 1492,42.10^{-13} \cdot \frac{1 \text{ Mev}}{1,602177.10^{-13}} = 931,5 \text{ Mev}$$

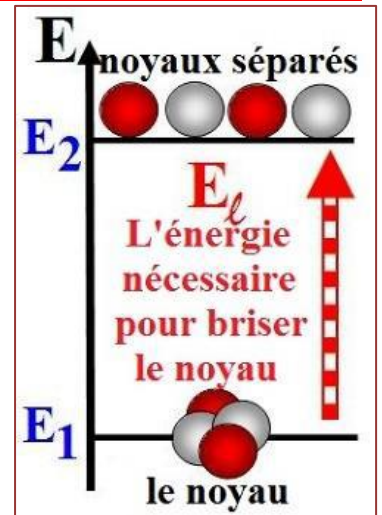
$$\Rightarrow 1u = 931,5 \text{ MeV} . c^{-2}$$

II - Energie de liaison d'un noyau

1- Défaut de masse :



2- Energie de liaison :

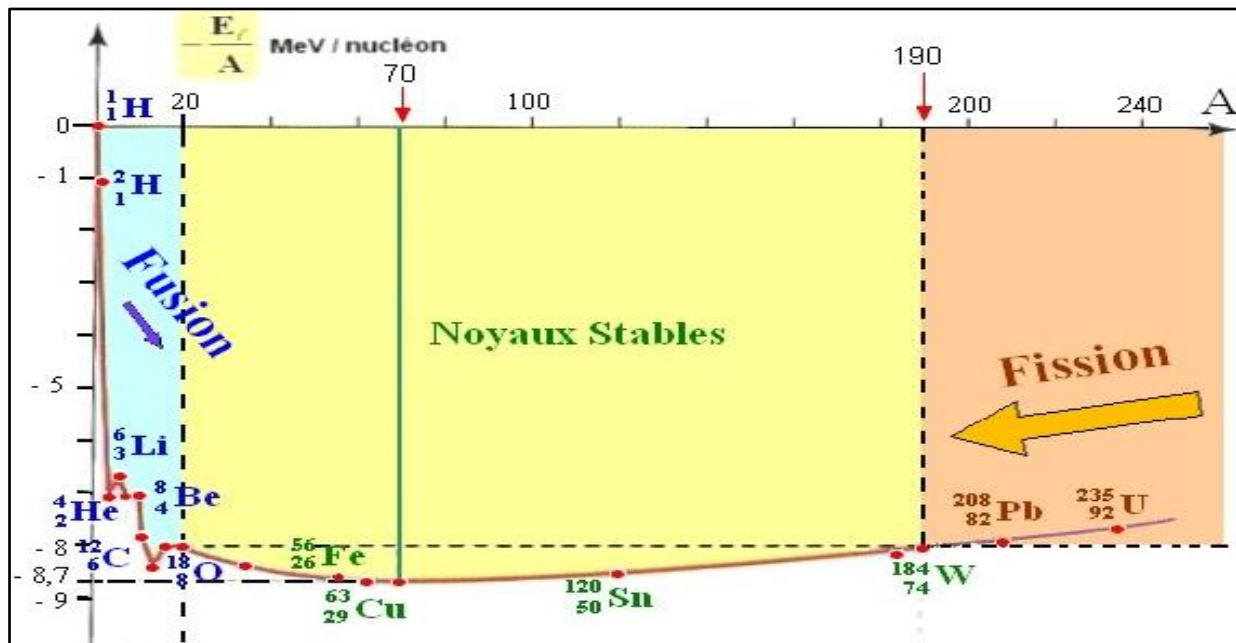


$$E_l \left({}^A_Z X \right) = \Delta m \left({}^A_Z X \right) . c^2 = \left[Z . m_p + (A - Z) . m_n - m \left({}^A_Z X \right) \right] . c^2$$

3- Energie de liaison par nucléon :

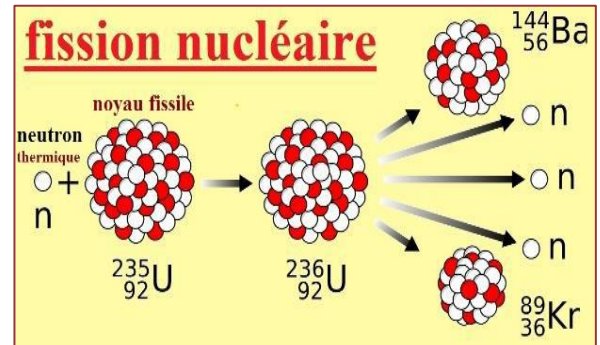
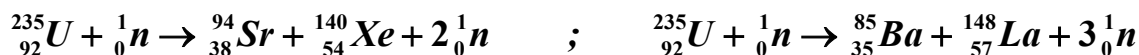
4- La courbe d'Aston :

Afin de comparer la stabilité de différents noyaux atomiques, traçons la courbe représentant l'opposé de l'énergie de liaison par nucléon $\left(-\epsilon = -\frac{E_l \left({}^A_Z X \right)}{A} \right)$, en fonction de A. c'est **la courbe d'Aston**.

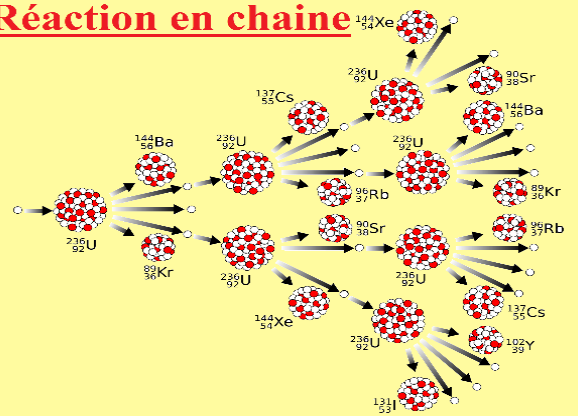


III - Fusion et fission nucléaire

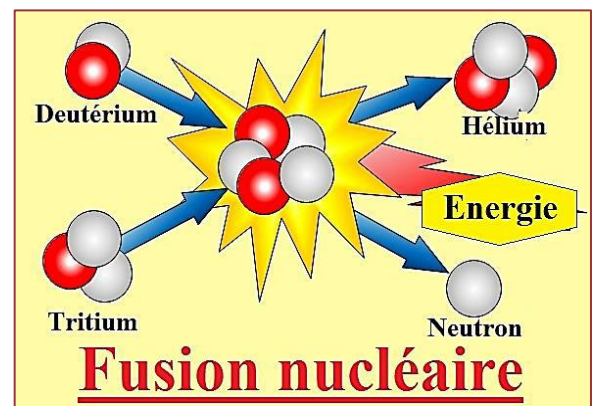
1- La fission nucléaire :

Exemples :Remarques :

- Le **noyau fissile** est un noyau qui peut participer à une réaction de fission nucléaire.
- Le **neutron thermique** est un neutron qui se déplace lentement par une vitesse ne dépasse pas 2km/s.
- Les neutrons résultant de la fission provoquent la fission d'autres noyaux, contribuant à **une réaction en chaîne** qui peut être explosive si elle n'est pas contrôlée (voir l'image). C'est ce qui se produit dans une bombe atomique A. En revanche, dans les **réacteurs nucléaires**, la réaction en chaîne est contrôlée pour produire de l'énergie de manière régulière (en absorbant les neutrons avec des barres de cadmium).

Réaction en chaîne

2- La fusion nucléaire :

Remarques :

- La fusion nucléaire n'est possible que si les noyaux légers possèdent une énergie suffisante, capable de vaincre les forces d'interaction répulsive au sein des noyaux. Ceci nécessite des températures très élevées de l'ordre de 10^8 K .
- La fusion nucléaire est accompagnée de la **libération d'une énergie considérable**, c'est la base de la bombe à hydrogène H.

IV - Bilans de masse et d'énergie

Considérons la réaction nucléaire d'équation suivante :



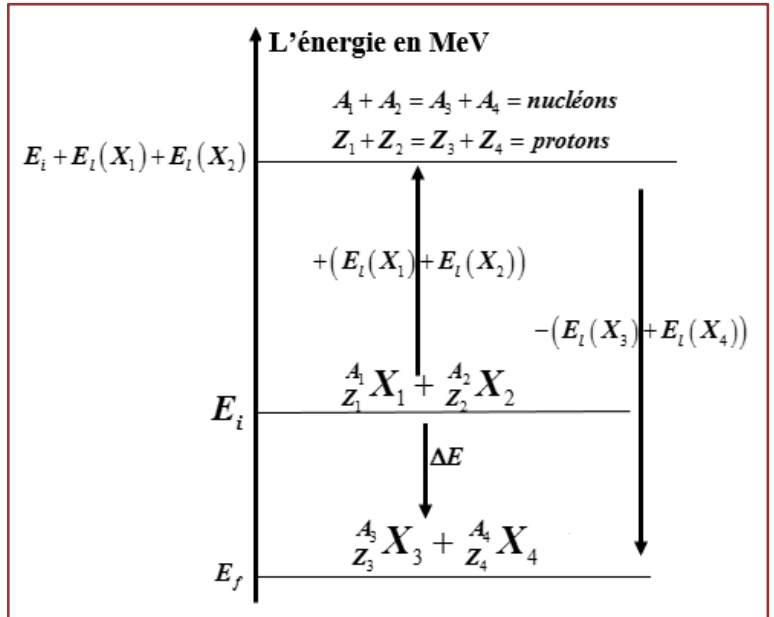
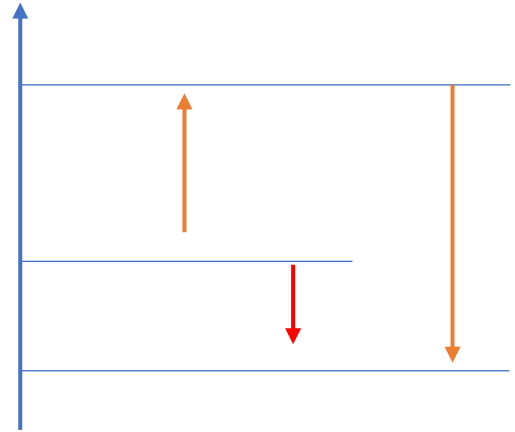
Où les symboles X_i représentent des noyaux ou des particules élémentaires.

Le bilan d'énergie ΔE , associé à cette réaction nucléaire s'écrit :

En utilisant l'expression de $E_i(X_i)$, ΔE devient :

V - Diagrammes d'énergie

1- Le cas général :

2- La désintégration α :3- La désintégration β^- :

Exercice N°1

- 1- Calculer le défaut de masse des deux noyaux : $^{208}_{82}\text{Pb}$; $^{238}_{92}\text{U}$.
- 2- Calculer l'énergie de liaison en MeV de chacun de ces deux noyaux.
- 3- Classer ces noyaux selon leur stabilité.

$$m_p = 1,0073u; m_n = 1,0087u; 1u = 931,5 \text{ MeV} \cdot c^{-2}; m(^{208}_{82}\text{Pb}) = 207,93162u; m(^{238}_{92}\text{U}) = 238,00018u$$

Exercice N°2

Le rubidium $^{85}_{37}\text{Rb}$ est un noyau stable, alors que le rubidium $^{89}_{37}\text{Rb}$ est radioactif.

- 1- Calculer l'énergie de liaison des deux isotopes du rubidium.
- 2- Calculer l'énergie de liaison par nucléon des deux isotopes.
- 3- Classer les deux isotopes selon leur stabilité croissante.
- 4- Ecrire l'équation de désintégration du $^{89}_{37}\text{Rb}$ tel que le noyau fils est un isotope de strontium $^{89}_{38}\text{Sr}$.
- 5- Calculer l'énergie libérée par la désintégration d'un noyau de rubidium 89.
- 6- Calculer l'énergie libérée par la désintégration d'un échantillon de rubidium 89 de masse $m = 10g$

Données : $m(^{88}_{38}\text{Sr}) = 88,88660479 u$; $m(\beta^-) = 0,00055u$; $1u = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

$$m(^{89}_{37}\text{Rb}) = 88,89193u; m(^{85}_{37}\text{Rb}) = 84,89144u; m_p = 1,00728u; m_n = 1,00866u; 1u = 931,5 \text{ MeV} \cdot c^{-2}$$

Exercice N°3

Les réactions de fusion et de fission sont considérées parmi les réactions qui produisent une grande énergie qu'on peut exploiter dans divers domaines.

- Données :**
- $1 \text{ MeV} = 1,6022 \cdot 10^{-13} \text{ J}$ - $1u = 931,494 \text{ MeV} \cdot c^{-2} = 1,66054 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$
 - $m(^1_1\text{H}) = 1,00728u$; $m(^4_2\text{He}) = 4,00151u$; $m(^0_{-1}\text{e}) = 5,48579 \cdot 10^{-4} u$.
 - On prend la masse du soleil : $m_s = 2 \cdot 10^{30} \text{ kg}$.
 - On considère que la masse de l'hydrogène ^1_1H représente 10% de la masse du soleil.

1-On donne dans le tableau ci-dessous les équations de quelques réactions nucléaires :

A	$^2_1\text{H} + ^3_1\text{H} \longrightarrow ^4_2\text{He} + ^1_0\text{n}$
B	$^{60}_{27}\text{Co} \longrightarrow ^{60}_{28}\text{Ni} + ^0_{-1}\text{e}$
C	$^{238}_{92}\text{U} \longrightarrow ^4_2\text{He} + ^{234}_{90}\text{Th}$
D	$^{235}_{92}\text{U} + ^1_0\text{n} \longrightarrow ^{139}_{54}\text{Xe} + ^{94}_{38}\text{Sr} + 3^1_0\text{n}$

1.1- Identifier, parmi ces équations, celle correspondant à la réaction de fusion.

1.2- En utilisant le diagramme d'énergie ci-contre, calculer :

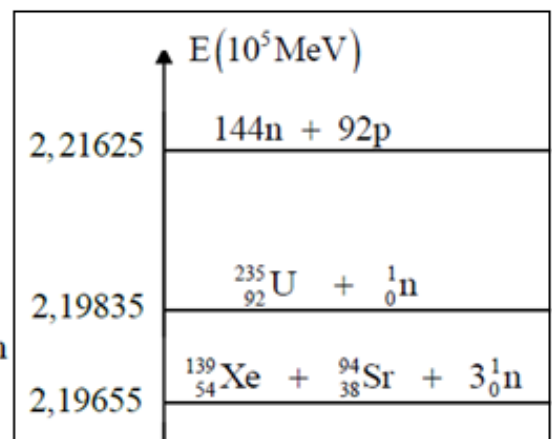
1.2.1- L'énergie de liaison par nucléon du noyau $^{235}_{92}\text{U}$.

1.2.2- L'énergie $|\Delta E_0|$ produite par la réaction D.

2-II se produit dans le soleil des réactions nucléaires dues essentiellement à la transformation de l'hydrogène selon l'équation bilan : $4^1_1\text{H} \longrightarrow ^4_2\text{He} + 2^0_{-1}\text{e}$

2.1-Calculer, en joule, l'énergie $|\Delta E|$ produite par cette transformation.

2.2 -Trouver, en ans, la durée nécessaire à la consommation de tout l'hydrogène présent dans le soleil, sachant que l'énergie libérée chaque année par le soleil selon cette transformation est $E_s = 10^{34} \text{ J}$.



Exercice N°4

Un réacteur nucléaire fonctionne avec l'uranium enrichie qui est constitué de $p = 3\%$ de ^{235}U fissible et $p' = 97\%$ de ^{238}U non fissible.

La production de l'énergie au sein de cette centrale nucléaire est basée sur la fission de l'uranium ^{235}U bombardé par des neutrons.

Donnés : $m(^{140}\text{Xe}) = 139,8920 \text{ u}$; $m(^{94}\text{Sr}) = 93,8945 \text{ u}$; $m(^{235}\text{U}) = 234,9935 \text{ u}$; $m(^1_0\text{n}) = 1,0087 \text{ u}$

$$1\text{MeV} = 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ J} ; 1\text{u} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 931,5 \text{ MeV} \cdot c^{-2}.$$

Le noyau ^{235}U subit une fission selon l'équation : $^1_0\text{n} + ^{235}_{92}\text{U} \rightarrow ^{94}_z\text{Sr} + ^{140}_{54}\text{Xe} + x^1_0\text{n}$.

1- Déterminer x et z .

2- Calculer en joule (J) l'énergie $|\Delta E_0|$ libérée par la fission de $m_0 = 1\text{g}$ de ^{235}U .

3- Pour produire une quantité d'énergie électrique $W = 3,73 \cdot 10^{16} \text{ J}$, un réacteur nucléaire de rendement $r = 25\%$ consomme une masse m de l'uranium enrichi.

Exprimer m en fonction de W , $|\Delta E_0|$, m_0 , r et p . Calculer m .

4- Dans ce réacteur nucléaire se trouve aussi une faible quantité du nucléide ^{234}U qui est radioactif α .

La mesure de l'activité radioactive, à l'instant $t = 0$, d'un échantillon de l'uranium $^{234}_{92}\text{U}$

a donné la valeur $a_0 = 5,4 \cdot 10^8 \text{ Bq}$.

Calculer la valeur de l'activité nucléaire de cet échantillon à l'instant $t = \frac{t_{1/2}}{4}$.

Exercice N°5

1- C'est en 1898 que Marie et Pierre Curie annoncèrent la découverte de deux éléments radioactifs : le polonium et le radium. Le radium $^{226}_{88}\text{Ra}$ qui se transforme en radon $^{222}_{86}\text{Rn}$, est considéré comme l'un des exemples historiques de la radioactivité α . L'activité d'un échantillon radioactif était alors calculée par rapport au radium considéré comme étalon. Elle fut exprimée en curie (Ci) pendant des années, avant d'utiliser le Becquerel (Bq) comme unité.

Le curie (1Ci) est l'activité d'un échantillon d'un gramme (1g) de radium 226.

Données :

-Masse molaire du radium : $M = 226 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$; Constante d'Avogadro : $N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$;

-Energie de liaison du noyau de radium : $E_\ell(^{226}_{88}\text{Ra}) = 1,7311 \cdot 10^3 \text{ MeV}$;

-Energie de liaison du noyau de radon : $E_\ell(^{222}_{86}\text{Rn}) = 1,7074 \cdot 10^3 \text{ MeV}$;

-Energie de liaison du noyau de l'hélium : $E_\ell(^4_2\text{He}) = 28,4 \text{ MeV}$;

-Constante radioactive du radium : $\lambda = 1,4 \cdot 10^{-11} \text{ s}^{-1}$; $1\text{an} = 365,25 \text{ jours}$;

1-1-Donner la définition de l'énergie de liaison d'un noyau.

1-2-Choisir la proposition juste parmi les propositions suivantes :

a- Le radium et le radon sont deux isotopes.

b- Le noyau du radium est constitué de 88 neutrons et de 138 protons.

c- Après une durée égale à $3t_{1/2}$ ($t_{1/2}$ demi-vie du radium), il reste 12,5% des noyaux initiaux.

d- La relation entre la demie-vie et la constante radioactive est : $t_{1/2} = \lambda \cdot \ln 2$.

1-3-Montrer que $1\text{Ci} \approx 3,73 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$.

1-4-Quelle serait, en Becquerel (Bq), en Juin 2018, l'activité d'un échantillon de masse 1g de radium dont l'activité en Juin 1898 était de 1Ci.

1-5-Calculer, en MeV, l'énergie $|\Delta E|$ produite par la désintégration d'un noyau de radium.

Exercice N°6

L'injection intraveineuse d'une solution contenant le phosphore 32 radioactif permet dans certains cas le traitement de la multiplication anormale des globules rouges au niveau des cellules de la moelle osseuse.

Données : Les masses en unité atomique u :

$$m({}_{15}^{32}P) = 31,9840 u \quad ; \quad m(\beta^-) = 5,485 \times 10^{-4} u \quad ; \quad 1 \text{ Mev} = 1,6 \times 10^{-13} J$$

$$m({}_Z^AY) = 31,9822 u \quad ; \quad 1u = 931,5 \text{ Mev}/c^2$$

La demi-vie du nucléide phosphore ${}_{15}^{32}P$: $t_{1/2} = 14,3 \text{ jours}$. $1 \text{ jour} = 86400 s$

1. L'activité radioactive du nucléide radioactif ${}_{15}^{32}P$

Le nucléide ${}_{15}^{32}P$ est radioactif β^- , sa désintégration donne naissance au nucléide ${}^4_ZY$.

1-1 écrire l'équation de la désintégration du nucléide de phosphore ${}_{15}^{32}P$ en précisant A et Z.

1-2 calculer en Mev la valeur absolue de l'énergie libérée lors de la désintégration du nucléide ${}_{15}^{32}P$.

2. L'injection intraveineuse au phosphore ${}_{15}^{32}P$

à l'instant $t=0$, on prépare un échantillon du phosphore ${}_{15}^{32}P$ dont l'activité radioactive est a_0

2-1 définir l'activité radioactive 1Bq.

2-2 à l'instant t_1 , on injecte à un patient une quantité d'une solution de phosphore ${}_{15}^{32}P$ dont l'activité radioactive est $a_1 = 2,5 \times 10^9 \text{ Bq}$.

a- Calculer en jour, la durée Δt nécessaire pour que l'activité nucléaire a_2 du phosphore ${}_{15}^{32}P$ soit égale à 20% de a_1 .

b- On note N_1 le nombre de nucléides du phosphore ${}_{15}^{32}P$ restant à l'instant t_1 et on note N_2 le nombre nucléides restant à l'instant t_2 dont l'activité radioactive de l'échantillon est a_2 .

Trouver l'expression du nombre de nucléides désintégrés pendant la durée Δt en fonction de a_1 et $t_{1/2}$.

c- En déduire, en joule, la valeur absolue de l'énergie libérée pendant la durée Δt .

Exercice N°7

La radioactivité est utilisée dans plusieurs domaines comme la médecine où l'on peut diagnostiquer la maladie par imagerie médicale en utilisant des substances radioactives comme le fluorodéoxyglucose (en abrégé FDG) qui contient du Fluor ${}_{9}^{18}F$ radioactif. Après avoir injecté le FDG par voie intraveineuse à un patient, on peut suivre les rayonnements émis à l'aide d'une caméra spéciale.

Données :

➤ L'énergie de liaison : $E_l({}_{9}^{18}F) = 119,322 \text{ Mev}$ et $E_l({}_{8}^{18}O) = 139,77 \text{ Mev}$

➤ $m({}_0^1n) = 1,00866u$; $m({}_1^1p) = 1,00728u$; $m({}_1^0e) = 0,00055u$; $1u = 931,5 \text{ Mev}.c^{-2}$; $C = 3.10^8 \text{ m}.s^{-1}$

➤ Le temps de demi-vie pour le noyau ${}_{9}^{18}F$: $t_{1/2} = 110 \text{ min}$

1- Ecrire l'équation de désintégration du fluor ${}_{9}^{18}F$ en oxygène ${}_{8}^{18}O$. Interpréter cette désintégration.

2- Déterminer l'énergie libérée lors de la désintégration d'un noyau ${}_{9}^{18}F$.

3- Pour réaliser un examen d'imagerie médicale à un patient, on lui injecte une dose de FDG d'activité $a = 5.10^8 \text{ Bq}$.

La dose du FDG a été préparée dans le bloc de médecine nucléaire d'un hôpital à 5 heures du matin pour l'injecter au patient à 10heurs du même jour. L'activité du ${}_{9}^{18}F$ à 5heures est a_0 .

a- Déterminer la valeur de a_0 .

b- Calculer l'énergie reçue par le corps du patient pendant la durée $\Delta t = 2.t_{1/2}$.

Exercice N°8

On étudie dans cet exercice la désintégration d'un échantillon radioactif du cobalt ayant une fiche technique portant les indications suivantes :

- Cobalt 60 : ${}^{60}_{27}\text{Co}$.
- Masse molaire atomique : $M = 60 \text{ g.mol}^{-1}$.
- Radioactivité : β^- .
- Constante de temps : $\tau = 2,8.10^3 \text{ jours}$.

Données :

- Constante d'Avogadro $N_A = 6,02.10^{23} \text{ mol}^{-1}$;
- Une année solaire : $1 \text{ an} = 365,25 \text{ jours}$;
- Energie de liaison du nucléide ${}_Z^AX$: $E_\ell = 588,387 \text{ MeV}$;
- $m({}^{60}\text{Co}) = 59,8523 \text{ u}$;
- $m({}_0^1\text{n}) = 1,00866 \text{ u}$, $m({}_1^1\text{p}) = 1,00728 \text{ u}$, $m({}_{-1}^0\text{e}) = 5,486.10^{-4} \text{ u}$;
- $1 \text{ u} = 931,494 \text{ MeV.c}^{-2}$.

1- Choisir la proposition juste parmi les propositions suivantes :

- a- La constante radioactive a la dimension du temps.
- b- L'activité d'un échantillon s'exprime en seconde .
- c- Pour les noyaux lourds et selon la courbe d'Aston, plus un noyau est lourd, moins il est stable.
- d- Le défaut de masse s'exprime en MeV .

2-Définir la radioactivité β^- .

3-Le noyau issu de la désintégration de ${}^{60}_{27}\text{Co}$ est ${}_Z^AX$. En se basant sur les énergies de masse, calculer en MeV l'énergie $|\Delta E|$ libérée par la réaction de désintégration du ${}^{60}_{27}\text{Co}$.

4-La masse initiale de l'échantillon radioactif à l'instant de sa réception par un laboratoire spécialisé est $m_0 = 50 \text{ mg}$. On considère l'instant de réception de cet échantillon comme origine des dates ($t = 0$) . La mesure de l'activité de l'échantillon étudié à un instant t_1 donne la valeur $a_1 = 5,18.10^{11} \text{ Bq}$.

Montrer que $t_1 = \tau \ln \left(\frac{N_A \cdot m_0}{\tau \cdot M \cdot a_1} \right)$. Calculer , en année, sa valeur .

Exercice N°9

Le noyau de polonium ${}^{210}_{84}\text{Po}$ se désintègre spontanément pour se transformer en un noyau de plomb ${}^{206}_{82}\text{Pb}$ avec émission d'une particule α .

Cet exercice se propose d'étudier le bilan énergétique de cette transformation ainsi que l'évolution de cette dernière au cours du temps.

Données :

- Energie de liaison du noyau de polonium 210 : $E_\ell({}^{210}\text{Po}) = 1,6449.10^3 \text{ MeV}$,
- Energie de liaison du noyau de plomb 206 : $E_\ell({}^{206}\text{Pb}) = 1,6220.10^3 \text{ MeV}$,
- Energie de liaison de la particule α : $E_\ell(\alpha) = 28,2989 \text{ MeV}$,
- On désigne par $t_{1/2}$ la demi-vie du noyau de polonium 210.

1-Ecrire l'équation de cette transformation nucléaire en déterminant le nombre Z .

2- Déterminer en MeV l'énergie $|\Delta E|$ produite lors de la désintégration d'un noyau de ${}^{210}_{84}\text{Po}$.

3- Soient $N_0(\text{Po})$ le nombre de noyaux de polonium dans un échantillon à l'instant de date $t = 0$ et $N(\text{Po})$ le nombre de noyaux restant dans le même échantillon à un instant de date t .

3-1- On désigne par N_D le nombre de noyaux de polonium désintégrés à l'instant de date $t = 4.t_{1/2}$.

Choisir la proposition juste parmi les propositions suivantes :

a- $N_D = \frac{N_0(\text{Po})}{8}$; b- $N_D = \frac{N_0(\text{Po})}{16}$; c- $N_D = \frac{N_0(\text{Po})}{4}$; d- $N_D = \frac{15N_0(\text{Po})}{16}$.

3-2- La courbe ci-dessous représente les variations de $\ln \left(\frac{N_0(\text{Po})}{N(\text{Po})} \right)$ en fonction du temps .

A l'aide de cette courbe, déterminer en jour la demi-vie $t_{1/2}$.

3-3- Sachant que l'échantillon ne contient pas du plomb

à $t = 0$, déterminer en jour, l'instant t_1 pour lequel :

$$\frac{N(\text{Pb})}{N(\text{Po})} = \frac{2}{5}, \text{ où } N(\text{Pb}) \text{ est le nombre de noyaux de plomb}$$

formés à cet instant.

