PHYSIQUE

Les Transformations nucléaires

I) Stabilité et instabilité des noyaux :

Animation N° 1 et 2

1) Composition d'un noyau atomique(Rappel):

Nous avons vu en TC de quoi était composé l'atome : un noyau entouré d'un cortège d'électrons. Nous allons ici nous occuper uniquement du noyau :

- ✓ Un noyau est composé de ***nucléons***, qui rassemblent les protons et les neutrons.
- ✓ La nature du noyau est déterminée par le nombre de protons Z qui le constitue. C'est le numéro de la case du tableau périodique dans laquelle se trouve classé chaque noyau, il est donc appelé ***numéro atomique***.
- ✓ La représentation symbolique du noyau d'un atome est la suivante :

$$ {}^{A}_{Z}X \quad \text{avec} \begin{cases} A : \textit{le nombre de nucléons (protons + neutrons)} \\ Z : \textit{le nombre de protons} \end{cases} $$

Exemple : Soit le noyau écrit de manière symbolique ${}^{63}_{29}Cu$:

C'est un noyau de cuivre qui a pour composition : 63 nucléons ; 29 protons et 63 - 29 = 34 neutrons

2) noyaux Isotopes:

Des noyaux qui ont **même numéro atomique** Z mais des **nombres de nucléons différents** A s'appelle des **isotopes** (ils ont donc même nombre de protons mais un nombre de neutrons différent).

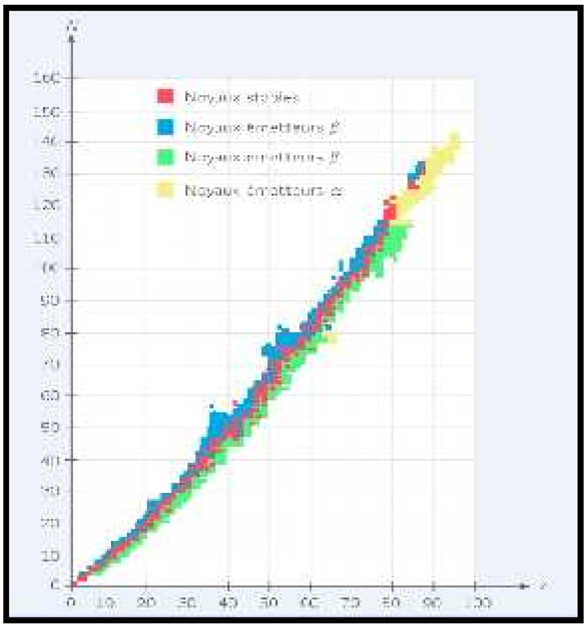
Exemple :

Pour l'élément uranium, il existe plusieurs isotopes dont ceux-ci : ${}^{235}_{92}U$ *et* ${}^{238}_{92}U$

Pour l'élément carbone, il existe plusieurs isotopes dont ceux-ci : ${}^{12}_{6}C$ *et* ${}^{14}_{6}C$

3) *Stabilité et instabilité des noyaux* :

Voir Animation N° 3



Malgré l'interaction forte, sur les 1500 noyaux connus (naturels et artificiels), seuls 260 sont stables. Les autres se ***désintègrent spontanément***, plus ou moins rapidement selon leur composition.

Pour localiser ces deux types de noyaux, on utilise un diagramme (N,Z) ; où N = A- Z désigne le nombre de neutrons, et Z le nombre de protons:

- ➢ On voit que pour **Z < 20**, les **noyaux stables se situe sur la diagonale, appelée vallée de stabilité** (autant de protons que de neutrons).
- ➢ Ensuite, la stabilité du noyau n'est assurée que si le nombre de neutrons est supérieur au nombre de protons (si Z est trop élevé, les forces électrostatiques l'emportent sur les forces nucléaires et les noyaux se désintègrent).
- ➢ Aucun noyau dont Z > 83 n'est stable.

II) La radioactivité :

1) *Définition :*

En dehors de la vallée de stabilité, les noyaux instables sont dits radioactifs : chaque noyau va se transformer en noyau stable en une ou plusieurs désintégration(s) spontanée(s). Au cours de ce processus, il y aura émission de particules qui pourra être accompagnée de rayonnement électromagnétique.

Un noyau radioactif est un noyau capable de ***se désintégrer spontanément*** pour donner un autre noyau en émettant un ou plusieurs particules.

Exemple : $Po \rightarrow Pb + He$

2) *Lois de conservation d'une réaction nucléaire : loi de Soddy*

Une réaction nucléaire sert à décrire la transformation d'un noyau instable en noyau stable, tout comme l'équation de la réaction chimique. Mais ici, cette réaction ne concerne que les noyaux des atomes.

Lors d'une réaction nucléaire, il y a conservation du nombre de nucléons A et du nombre de charges Z.

Exemple : Soit une réaction nucléaire où un noyau père (X) donne naissance à un noyau fils (Y) en émettant une particule chargée P :

$${}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A_1}_{Z_1}Y + {}^{A_2}_{Z_2}P$$

Les lois de conservation s'écrivent **:** **$A = A_1 + A_2$ ① et $Z = Z_1 + Z_2$ ②**

3) *Différentes radioactivités :*

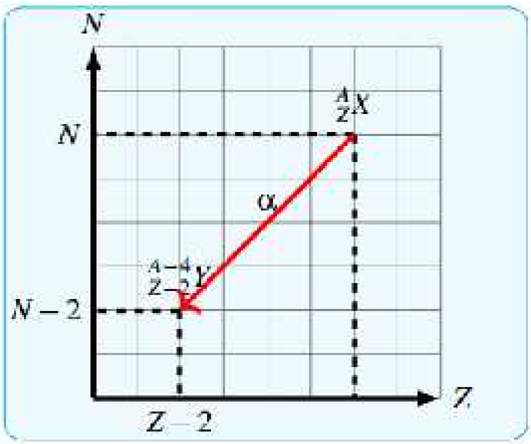
Selon leur position dans le diagramme (N, Z) , les noyaux instables engendrent un type de radioactivité.

Aussi, si le noyau fils obtenu lors d'une désintégration est stable ou non, il se désintègre immédiatement après être apparu ou non.

3-1/ Radioactivité ~ (alpha):

Définition :

Ce sont plutôt les noyaux lourds qui répondent à cette radioactivité. Ces noyaux se désintègrent en expulsant des noyaux d'Hélium, en suivant les lois de conservation, cela nous donne une équation nucléaire du type :



$${}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}Y + {}^{4}_{2}He$$

Exemple :

Le polonium ${}^{210}_{84}Po$ est radioactif α. Selon l'équation ci-dessus, il va donner naissance à un noyau fils de numéro atomique 84 – 2 = 82 : il s'agit d'un noyau de plomb. L'équation de désintégration du polonium est donc :

$${}^{210}_{84}Po \rightarrow {}^{206}_{82}Pb + {}^{4}_{2}He$$

Propriétés :

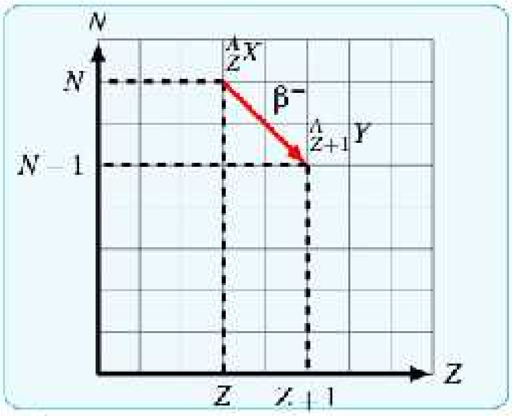
Les particules α sont arrêtées par une feuille de papier ou une petite couche d'air. Elles sont très peu pénétrantes mais très ionisantes, c'est à dire dangereuses lorsqu'elles sont ingérées par exemple.

3-2/ Radioactivité β^- (Bêta):

Définition :

Ce sont les noyaux qui ont trop de neutrons qui sont soumis à la radioactivité β^- : Ces noyaux se désintègrent en émettant un électron, on obtient l'équation :

$$^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z+1}Y + {}^{0}_{-1}e$$



Remarque :

L'électron ne provient pas du cortège électronique puisque nous sommes à l'intérieur du noyau. Et comme le noyau ne comporte pas d'électrons, cela signifie qu'il a été créé.

En effet, lors de la radioactivité β^-, Le nombre de masse reste constant alors que le numéro atomique augmente d'une unité. Ceci ne peut être réalisé que si un neutron s'est transformé en proton. Pendant cette transformation, un électron est éjecté.

Exemple :

Le cobalt 60 est radioactif β^- : il se transforme donc en un noyau de nickel selon l'équation nucléaire :

$$^{60}_{27}Co \rightarrow {}^{60}_{28}Ni + {}^{0}_{-1}e$$

Propriétés :

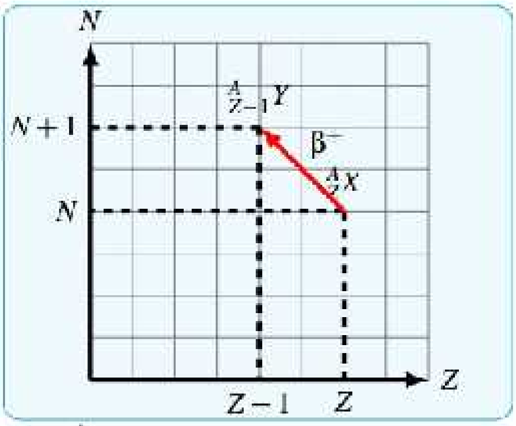
Ce rayonnement β- est assez pénétrant mais est arrêté par une épaisseur de quelques mm d'aluminium.

3-3/ Radioactivité β+ (Bêta):

Définition :

Cette radioactivité est caractéristique des noyaux ayant trop de protons, mais elle existe que pour les noyaux artificiels. Ces noyaux se désintègrent en émettant une particule chargée +e, appelée ***positon*** ou ***positron,*** encore appelé ***antiélectron :***

$$^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z-1}Y + {}^{0}_{1}e$$



Remarque :

De même que pour la radioactivité β^-, un positon n'est pas une particule constituant le noyau. Ainsi il est forcément formé lors de la transformation d'un proton en neutron.

Exemple :

Le phosphore 30 qui a été créé par Irène et Frédéric Joliot-Curie en 1934 est émetteur β^+ :

$$^{30}_{15}P \rightarrow {}^{30}_{14}Si + {}^{0}_{1}e$$

PHYSIQUE

Propriété :

Les particules β^+ ont une durée de vie très courte car lorsqu'elle rencontre un électron, les deux particules s'annihilent pour donner un rayonnement γ. On utilise ces particules en médecine vu leur durée de vie.

3-4/ Désexcitation γ (gamma) ou rayonnement gamma :

Définition :

A la suite d'une radioactivité α ou β tableau ci-dessous, le noyau fils produit est souvent dans un état excité Y*(renfermant un excès d'énergie). Il se désexcitera en une ou plusieurs étapes en émettant un rayonnement électromagnétique (de même type que la lumière) par l'intermédiaire de photons de très grande énergie : les photons γ.

$$ {}^{A}_{Z}Y^{*} \rightarrow {}^{A}_{Z}Y + \gamma $$

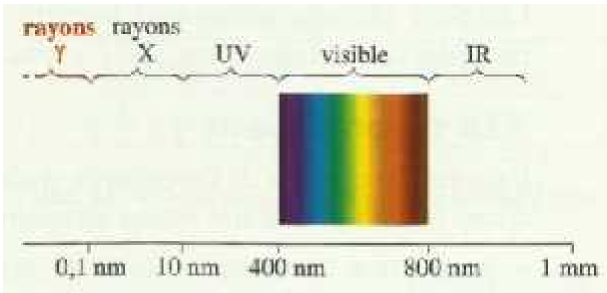
Exemple :

L'activité du Thurium à la suite d'une radioactivité α ou β on a du Thurium excité ; il perd son excitation en donnant le Thurium avec un rayonnement gamma:

$$ {}^{223}_{90}Th^{*} \rightarrow {}^{223}_{90}Th + \gamma $$

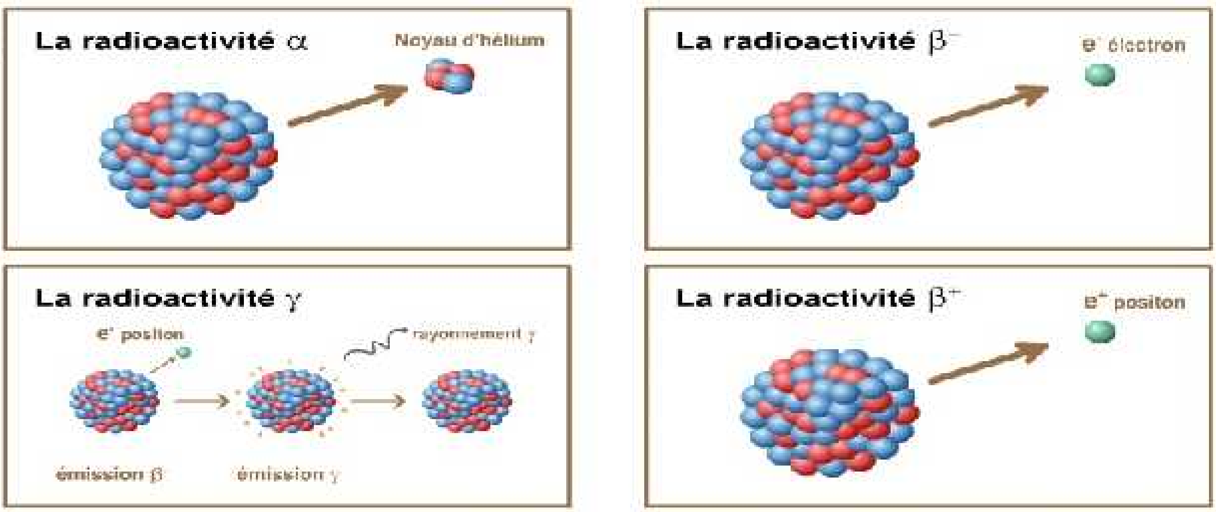
Remarque :

Le rayonnement gamma est invisible et très énergétique « longueure d'onde petite et fréquence très grande » donc très dangereux une grande épaisseur de béton ou de plomb est nécessaire pour se protéger de ce type de rayonnent



Résumé

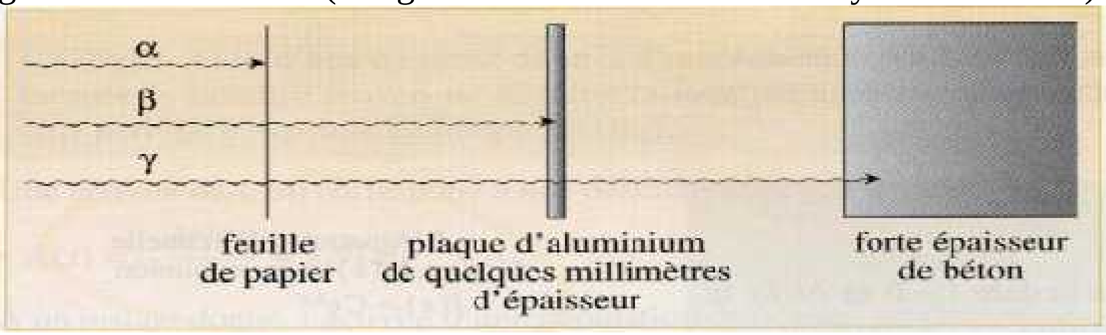
Animation N° 4



Type de radioactivité	*Noyau père*	ì	*Particule émise*	+	*Noyau fils*
~	${}^{A}_{Z}X$	ì	${}^{4}_{2}He$	+	${}^{AJ4}_{ZJ2}Y^{*}$
-	${}^{A}_{Z}X$	ì	${}^{0}_{J1}e$	+	${}^{A}_{ZH1}Y^{*}$
+	${}^{A}_{Z}X$	ì	${}^{0}_{1}e$	+	${}^{A}_{ZJ1}Y^{*}$

Propriété :

Ces rayonnements γ sont très pénétrants, ils sont arrêtés par une épaisseur de plomb d'une vingtaine de centimètres (Longueur d'onde inférieure aux rayons U.V. et X).



III) Décroissance radioactive :

Voir animation N°

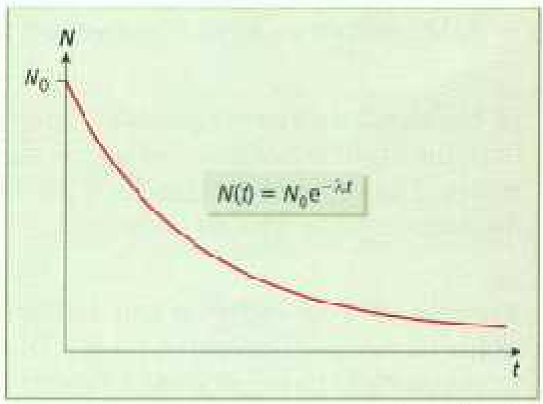
La radioactivité d'un noyau est aléatoire et non prévisible. Ce pendant la radioactivité d'un grand nombre de noyaux (1 mole = $6,02.10^{23}$ atomes) est prévisible et respecte des règles.

➢ ***Loi de décroissance exponentielle :***

On rappelle que la désintégration des noyaux radioactifs au **niveau microscopique est aléatoire**, mais au niveau **macroscopique**, le nombre moyen N de noyaux restants dans l'échantillon suit une **loi déterminée** : loi de ***décroissance exponentielle***

$$\boxed{N(t) = N_0 \times e^{-a\,t}}$$

Voir l'Animation N° 5



. Le nombre ce noyaux radioactifs d'un échantillon diminue au cours du temps, en suivant la loi de décroissance radioactive.

- ☞ N(t) : le nombre de noyaux radioactifs restants à l'instant t.
- ☞ N_0 : le nombre de noyaux radioactifs à l'instant t = 0.
- ☞ λ : la constante radioactive ou constante de désintégration elle dépend du noyau radioactif.

Pour connaître l'unité de cette constante, faisons une analyse dimensionnelle :

$$N(t) = N_0 \times e^{-a\,t} \Rightarrow N(t) / N_0 = e^{-a\,t} \textit{donc} \left[N(t) / N_0\right] = \left[e^{-a\,t}\right]$$

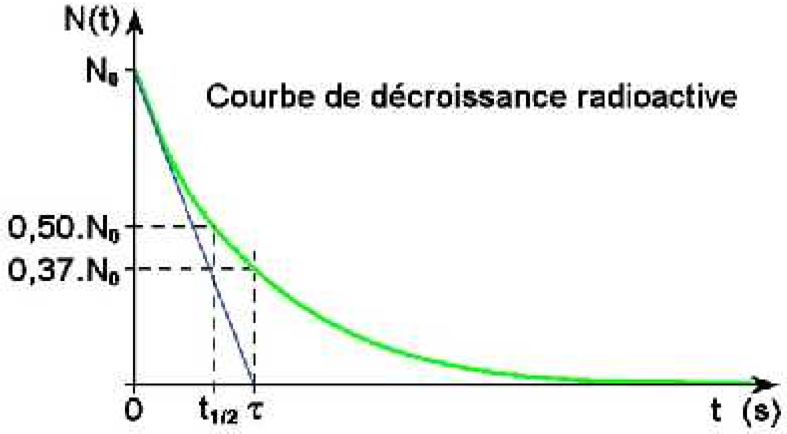
$N(t) / N_0$ est un nombre sans unité donc $e^{-a\,t}$ est aussi un nombre sans unité donc $\left[N(t) / N_0\right] = \left[e^{-a\,t}\right] = 1$ d'où $[\lambda \times t] = 1 \Rightarrow [\lambda] \times [t] = 1$

$$[\lambda] = T^{-1}$$

➢ ***Constante de temps :*** ***voir animation N°6***

La constante de temps, notée τ est l'inverse de la constante radioactive :

$$\boxed{\tau = \frac{1}{\lambda}}$$



➢ *Demi-vie radioactive :*

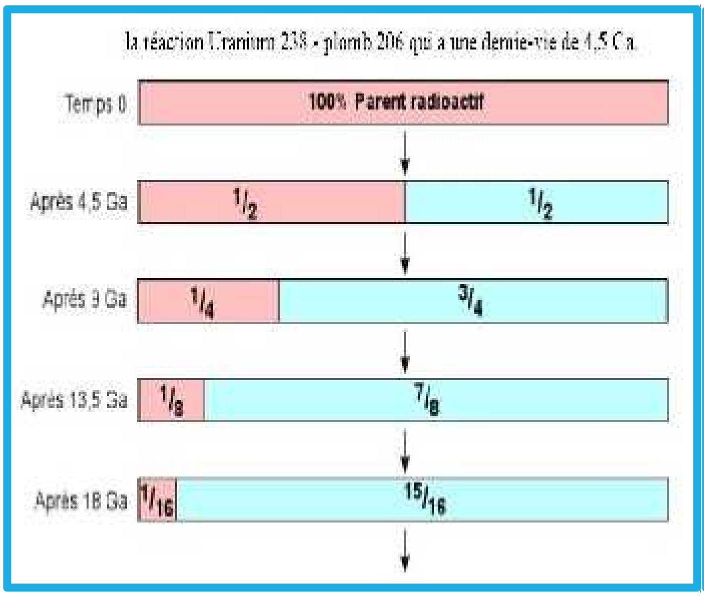
✓La durée de demi-vie $t_{1/2}$ d'un échantillon radioactif est égale à la durée nécessaire pour que pour que la population de noyau passe de N_0 à $N_0/2$.

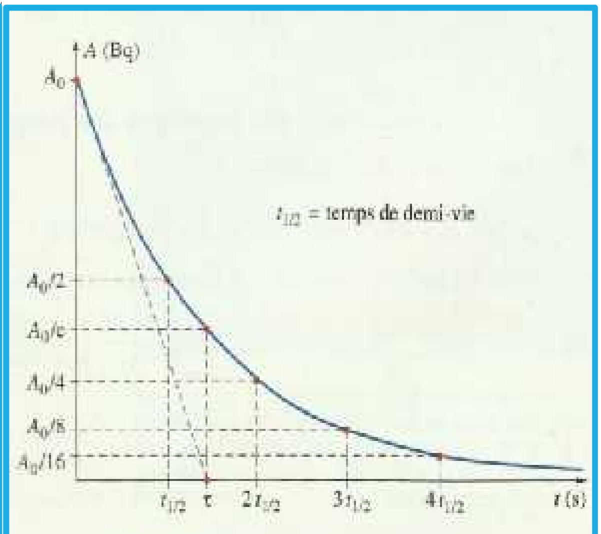
✓C'est le temps qui caractéristique chaque décroissance radioactive.

✓La durée de demi-vie est homogène à un temps, elle s'exprimera en s ou plus souvent dans une unité plus adaptée.

Exemple :

Noyau radioactif	Symbole	Demi-vie $t_{1/2}$	Origine
Rubidium 87	$^{87}_{37}Ru$	$4{,}85 \cdot 10^{10}$ ans	Certaines roches
Uranium 238	$^{238}_{92}U$	$4{,}46 \cdot 10^{9}$ ans	Certaines roches
Uranium 235	$^{235}_{92}U$	$7{,}04 \cdot 10^{8}$ ans	Certaines roches
Radium	$^{226}_{88}Ra$	1 600 ans	Roches terrestres riches en uranium
Carbone 14	$^{14}_{6}C$	5 730 ans	Atmosphère et composés carbonés
Césium 137	$^{137}_{55}Cs$	30,2 ans	Produits des réacteurs nucléaires
Radon 222	$^{222}_{86}Rn$	3,8 jours	Gaz provenant de roches granitiques

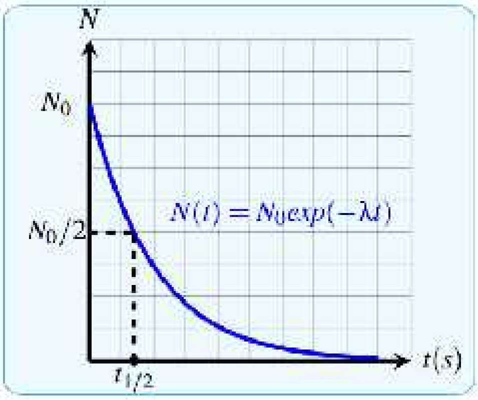




Doc. 16 Loi de décroissance de l'activité.

➢ **Expression de $t_{1/2}$ en fonction de la constante radioactive :**

Voir Doc sur les formules de la fonction logarithme népérien



A $t = t_{1/2}$ on a $N(t_{1/2}) = \frac{N_0}{2}$ et d'après la loi de décroissance radioactive : $\frac{N_0}{2} = N_0 \times e^{-\lambda t_{1/2}} \Rightarrow \frac{1}{2} = e^{-\lambda t_{1/2}}$

par application de la fonction logarithme népérien :

$$\ln\left(\frac{1}{2}\right) = \ln\left(e^{-\lambda t_{1/2}}\right) \Rightarrow -\ln(2) = -^{a} \times t_{1/2}$$

La demi-vie **ne dépend donc que de** la constante radioactive **λ** (pas de N_0).

$$\boxed{t_{1/2} = \frac{\ln(2)}{\lambda} = \tau \times \ln(2)}$$

Exercice d'application N°1 :

En utilisant la classification périodique, complète les équations des réactions ci-dessous qui sont de type α ou β^- ou β^+ :

$1/\ ^{217}_{88}Ra \rightarrow ..... + \ ^{4}_{2}He$	$2/\ ^{103}_{42}Mo \rightarrow ..... + \ ^{0}_{-1}e$
$3/\ ^{174}_{73}Ta \rightarrow \ ^{174}_{72}Hf + ...$	$4/\ ^{174}_{72}Hf \rightarrow ..... + \ ^{4}_{2}He$
$5/\ ^{213}_{84}Po \rightarrow \ ^{209}_{82}Pb + ...$	$6/\ ^{209}_{82}Pb \rightarrow \ ^{209}_{83}Bi + ...$

Exercice d'application N°2 :

Extrait du concours d'entrée à la faculté de médecine et de Pharmacie Casablanca 2009

L'uranium $^{238}_{92}U$ subit une série de désintégrations naturelles successives représentées par l'équation bilan suivante : $^{238}_{92}U \rightarrow \ ^{206}_{82}Pb + x\ ^{4}_{2}He + y\ ^{0}_{-1}e$

1) Calculer x et y.

2) On considère un échantillon d'uranium $^{238}_{92}U$ contenant $N_0(U)$ noyaux à la date t = 0s. Le nombre de noyaux N(Pb) de plomb $^{206}_{82}Pb$ formés à la date t, représente 3/4 du nombre initial $N_0(U)$: $N(Pb) = 3/4 N_0(U)$

2-1/ Exprimer N(Pb) en fonction de $N_0(U)$, t et λ « constante radioactive du $^{238}_{92}U$ ».

2-2/ Exprimer la date t en fonction de $t_{1/2}$: demi vie de $^{238}_{92}U$

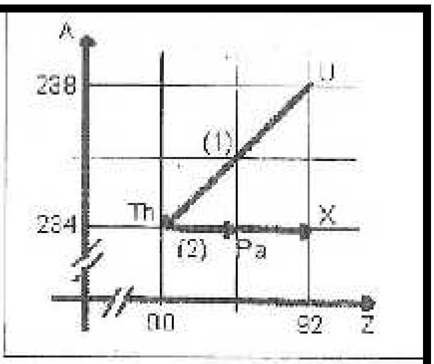
Exercice d'application N°3 :

Le diagramme ci-contre montre les premiers noyaux résultant de la Désintégration radioactive de l'uranium ^{238}U.

Q14. Les désintégrations (1) et (2) correspondent, respectivement, à :

A) α et β^+ ; B) α et β^- ; C) α et γ ; D) β^- et β^+.

Q15. Le nom du noyau X est : A) Radium ;B) Actinium ;C) Uranium ; D) Thorium.



PHYSIQUE

IV) Activité d'une source radioactive :

4-1/ Définition :

L'activité **a(t)** d'une source radioactive est le nombre de noyaux radioactifs se désintégrant par seconde. C'est aussi le nombre de particule ou de photons émis par unité de temps.

Si dans un intervalle de temps dt, - dN nucléides se sont désintégré, l'activité vaut :

$$\boxed{a(t) = \frac{-dN(t)}{dt}}$$

Unité : becquerel « 1 Bq = 1 s^{-1} »

A l'aide de la loi de désintégration non obtient :

$$a(t) = \frac{-dN(t)}{dt} = \frac{-d\left(N_0 \times e^{-\lambda t}\right)}{dt} = \lambda \times N_0 \times e^{-\lambda t}$$

Donc : $$\boxed{a(t) = \lambda \times N(t)}$$

Avec $a_0 = \lambda \times N_0$ on obtient $$\boxed{a(t) = a_0 \times e^{-\lambda t}}$$

Remarque :

On peut aussi exprimer la loi de décroissance radioactive par la masse m ; en fonction de m_0 la masse initiale d'un échantillon radioactif :

$$\boxed{m(t) = m_0 \times e^{-\lambda t}}$$

Ou par la quantité de matière n(t) en fonction de la quantité initiale d'un échantillon : $n(t) = n_0 e^{-\lambda t}$

$$\boxed{n(t) = n_0 \times e^{-\lambda t}}$$

V) Comment dater un événement grâce à la radioactivité ?

La radioactivité, en tant que phénomène dépendant du temps, permet de dater de nombreux objets (éléments du système solaire, roches, corail, nappe d'eau emprisonnée, objets, ...).

Pour dater un objet, on mesure l'activité des éléments radioactifs qu'il contient. Divers noyaux radioactifs sont utilisés selon l'ordre de grandeur de l'âge à mesurer.

Désintégration du carbone 14

Les organismes vivants (végétaux ou animaux) échangent à chaque instant du carbone avec l'atmosphère (respiration, photosynthèse) ainsi qu'avec des composés organiques (nutrition)

L'élément carbone comporte essentiellement deux isotopes : ${}^{12}_{6}C$ stable et ${}^{14}_{6}C$ en très petite proportion, radioactif et émetteur β^-. La valeur de la demi-vie de ce dernier est 5570 ans

Tant que l'organisme est vivant, les échanges avec le milieu extérieur maintiennent constante sa teneur en carbone 14, égale à celle de l'atmosphère.

Lorsque l'organisme meurt, le carbone 14 n'est plus renouvelé. Il se désintègre alors selon la loi de décroissance radioactive : ${}^{14}_{6}C \rightarrow {}^{14}_{7}N + {}^{0}_{-1}e$

$$a(t)=a_0\times e^{-\lambda t} \text{ et } \lambda=\frac{\ln(2)}{t_{1/2}} \Rightarrow \frac{a(t)}{a_0}=e^{-\lambda t} \text{ d'où } -\lambda\times t=\ln\left(\frac{a(t)}{a_0}\right) \Rightarrow t=\frac{t_{1/2}}{\ln(2)}\times\ln\left(\frac{a_0}{a(t)}\right)$$

Donc pour dater un échantillon archéologique, il faut :

☞ mesurer l'activité d'une masse connue de cet échantillon a(t)

☞ mesurer l'activité a_0 de la ***même masse*** d'un échantillon actuelle du même matériau.

Donc l'âge ***t*** de l'échantillon est donné par la relation :

$$\boxed{t=\frac{t_{1/2}}{\ln(2)}\times\ln\left(\frac{a_0}{a(t)}\right)}$$

Exemple :

Activité **a(t)** d'un gramme de charbon ancien, trouvé dans un foyer préhistorique est $4{,}0.10^{-2}$ Bq. L'activité a_0 d'un gramme de charbon récent est 0,23 Bq. Quel est l'âge du foyer préhistorique ?

On donne : $t_{1/2}$ = 5570 ans.

Exercice d'application N°4 :

Exercice 1 (6 points) : Vrai ou faux

À chaque affirmation, vous répondez sur votre copie par vrai ou faux devant son numéro :

Le radium ${}^{226}_{88}Ra$ se désintègre spontanément en émettant une particule α.

1. Le noyau du radium ${}^{226}_{88}Ra$ est composé de 88 neutrons et 138 protons.
2. La masse d'un noyau de radium est égale à la somme des masses des nucléons qui le constitue.
3. La particule α est un noyau d'hélium.
4. L'équation de désintégration du radium est ${}^{226}_{88}Ra \rightarrow {}^{4}_{2}He + {}^{222}_{86}Rn$
5. Le radium ${}^{226}_{88}Ra$ et le radon ${}^{222}_{86}Rn$ sont isotopes.
6. La demi-vie du radium ${}^{226}_{88}Ra$ est $t_{1/2}=1600$ ans. À l'instant $t=4800$ ans, le pourcentage de noyaux du radium ${}^{226}_{88}Ra$ restant par rapport au nombre initial est 12,5%.

Exercice d'application N°5 :

Exercice 2 : (4 points)

On considère un échantillon radioactif de potassium $^{40}_{19}K$ sa demi vie $t_{1/2}$ son activité initiale a_0 à l'origine des temps et à l'instant de date t est $a(t)$. Lors de la désintégration d'un noyau de cet échantillon il se forme un noyau $^{A}_{Z}X$ d'un gaz rare et un rayonnement radioactif β^- est émis.

Choisir la (ou les) bonne(s) réponse(s) parmi les propositions suivantes :

1. L'activité $a(t)$ vérifie l'équation différentielle suivante :

$\boxed{a}$: $a(t) - \frac{t_{1/2}}{\ln 2}\cdot\frac{da(t)}{dt} = 0$; $\boxed{b}$: $a(t) + \frac{t_{1/2}}{\ln 2}\cdot\frac{da(t)}{dt} = 0$; $\boxed{c}$: $a(t) - t_{1/2}\cdot\frac{da(t)}{dt} = 0$; $\boxed{d}$: $a(t) + t_{1/2}\cdot\frac{da(t)}{dt} = 0$.

2. La solution de l'équation différentielle est :

$\boxed{a}$: $a(t) = a_0 . 2^{-\frac{t}{t_{1/2}}}$; $\boxed{b}$: $a(t) = a_0 . e^{-\frac{t}{t_{1/2}}.\ln 2}$; $\boxed{c}$: $a_0 = a(t).e^{-\frac{t}{t_{1/2}}\ln 2}$; $\boxed{d}$: $a(t) = a_0 . e^{-\frac{t}{t_{1/2}}}$.

3. A l'instant $t = 3.t_{1/2}$ la valeur de rapport $\frac{a(t)}{a_0}$ est : $\boxed{a}$: $\frac{1}{64}$; $\boxed{b}$: $\frac{1}{32}$; $\boxed{c}$: $\frac{1}{16}$; $\boxed{d}$: $\frac{1}{8}$.

4. Le gaz rare formé est : $\boxed{a}$: Kr : Krypton ; $\boxed{b}$: Ne : Néon ; $\boxed{c}$: Ar : Argon ; $\boxed{d}$: He : Helium .