Lycée Joliot Curie à 7	***PHYSIQUE XVII***	Classe de Ter Spé φχ

COURS 17

« Transformation nucléaire »

Les compétences à acquérir…

- Déterminer, à partir d'un diagramme (N,Z), les isotopes radioactifs d'un élément.
- Utiliser des données et les lois de conservation pour écrire l'équation d'une réaction nucléaire et identifier le type de radioactivité.
- Stabilité et instabilité des noyaux : diagramme (N,Z), radioactivité α et β, équation d'une réaction nucléaire, lois de conservation. - Radioactivité γ
- Évolution temporelle d'une population de noyaux radioactifs ; constante radioactive ; loi de décroissance radioactive ; temps de demi-vie ; activité
- Établir l'expression de l'évolution temporelle de la population de noyaux radioactifs.
- Exploiter la loi et une courbe de décroissance radioactive.
- Radioactivité naturelle ; applications à la datation.
- Applications dans le domaine médical ; protection contre les rayonnements ionisants

Radioactivité naturelle.

Au milieu du lagon de l'île aux bénitiers (Près de Madagascar) apparait le rocher de cristal, roche volcanique comme déposée sur l'océan…

Les roches volcaniques contiennent du potassium, dont un des isotopes, le potassium 40, est radioactif…

Il se transforme en argon 40 par capture électronique avec une émission de rayonnements γ selon la réaction nucléaire :

$$^{40}_{19}K + {}^{0}_{-1}e \rightarrow {}^{40}_{18}Ar + \gamma$$

La demi-vie du potassium 40 est de $1{,}3.10^9$ans.

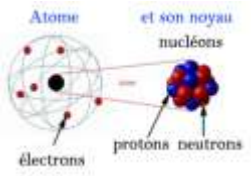
Une famille de prix Nobel !

En 1903, le prix Nobel de physique est attribué conjointement à Henri Becquerel pour « la découverte de la radioactivité naturelle…… », et à Pierre Curie et Marie Sklodowska « pour leurs recherches sur les phénomènes de radiation découverts par le professeur Becquerel » : le radium

Irène Curie et Frédéric Joliot ont été couronnés du Prix Nobel, en 1935 pour leur découverte de la « radioactivité artificielle… ».

I- Qu'est ce qu'un noyau radiactif ?

1- Composition d'un atome et surtout de son noyau :



Un atome est constitué d'un noyau chargé positivement entouré d'électrons chargés négativement :

- C'est un édifice de forme sphérique et électriquement neutre (la charge du noyau compense la charge des électrons)
- L'atome est essentiellement constitué de vide

Les particules qui constituent le noyau de l'atome sont appelées les **nucléons** ($n_{nucléons}$) qui sont:

- soit des **protons** $n_{protons}$ **chargés positivement**
- soit des **neutrons** $n_{neutron}$ **électriquement neutres**

Symbole du noyau de l'atome

$^{A}_{Z}X$

A est le nombre de masse : $n_{nucléons} = A$

Z est le numéro atomique : $n_{protons} = Z$

$n_{neutrons} = A - Z$

L'atome étant électriquement neutre, il y a autant de protons que d'électrons : $n_{électrons} = Z = n_{protons}$

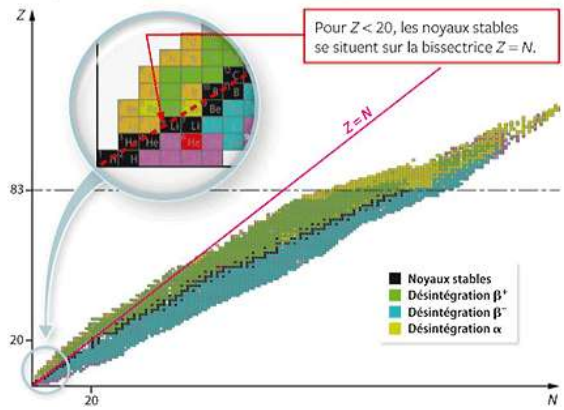
2- Des noyaux isotopes :

Deux noyaux isotopes ~~sont~~ ont le même nombre de protons…. Z mais des nombres N de neutrons……. différents……

Les trois isotopes de l'hydrogène			Les isotopes de carbone		
$^{1}_{1}H$	$^{2}_{1}H$	$^{3}_{1}H$	$^{12}_{6}C$	$^{13}_{6}C$	$^{14}_{6}C$
hydrogène	deutérium	tritium	carbone 6		radioactif

Les isotopes peuvent être stables ou instables. Un atome instable est dit radioactif

3- D'où provient l'instabilité de certains noyaux isotopes ?



Pour Z< 20, les noyaux sont stables, le plus souvent, quand Z = N (autant de protons..... que de neutrons).
Cette stablilité est assurée par des intéractions ..fortes... maintenant les protons et les neutrons très ..proches.....

Pour des noyaux plus lourds Z> 20 , ils possèdent plus de neutrons.. que de ..protons.....
Les noyaux stables (ici en noir) constitue ce que l'on appelle la ..vallée.. de stabilité.
Mais il existe près de 2000 noyaux d'atomes dont seulement 279 sont stables.....

Pour les autres, les intéractions fortes... ne peuvent plus assurer la stabilité des noyaux : Il sont dits ..radioactifs.

Afin de trouver une stabilité, les noyaux réactifs, par transformation ..nucléaire....., vont libérer des ..particules..... c'est-à-dire de l'énergie.
Particules libérées :

Particules α (alpha) : noyau d'hélium	un électron	un positron
${}^{4}_{2}He$	${}^{0}_{-1}e$	${}^{0}_{1}e$

II- Les Transformations Nucléaires :

1- Quelles sont les propriétés d'une telle transformation ?

La radioactivité est la transformation d'un ..... au cours du temps. Cette transformation modifie la nature du noyau et s'accompagne de l'émission de particules et de radiations électromagnétiques.
La désintégration d'un noyau est :
- ..spontanée....., (se déroule sans facteur déclenchant)
- ..inéluctable....., (se produira tôt ou tard mais de manière certaine)
- ..aléatoire....., (il est impossible de savoir à quel instant un noyau donné se désintégrera)

Un noyau « père » disparaît pour former un noyau « ..fils..... », des particules et des ..rayonnements.. .....

2- Comment équilibrer une transformation nucléaire ?

Lors d'une réaction nucléaire, il y a conservation :
- du nombre de ..protons..(charge)
- et du nombre de ..nucléons...

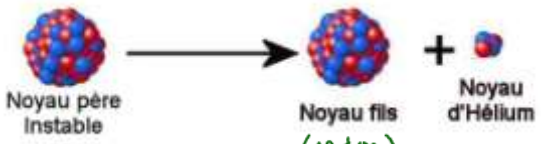
Exemple :

$${}^{40}_{19}K + {}^{0}_{-1}e \rightarrow {}^{40}_{18}Ar + \gamma$$

$$\begin{cases} 40 + 0 = 40 \\ 19 - 1 = 18 \end{cases}$$

3- Les 3 désintégrations possibles :

a- La radioactivité α (alpha):



$\Rightarrow {}^{226}_{88}Ra \rightarrow {}^{222}_{86}Rn + {}^{4}_{2}He$ (radon)

La radioactivité α correspond à l'émission d'une particule α c'est-à-dire d'un noyau d'hélium ${}^{4}_{2}He$

Exemple : Désintégration α du radium

$${}^{226}_{88}Ra \rightarrow {}^{A}_{Z}X + {}^{4}_{2}He$$

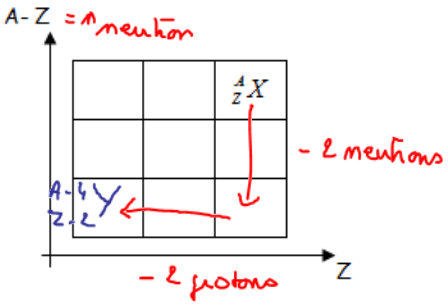
radium

$$\begin{cases} 226 = A + 4 \Rightarrow A = 226 - 4 = 222 \\ 88 = Z + 2 \Rightarrow Z = 88 - 2 = 86 \end{cases}$$

L'équation générale d'une transformation nucléaire de type α s'écrit :

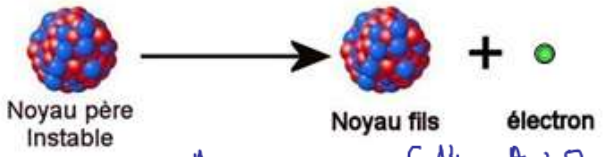
$${}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}Y + {}^{4}_{2}He$$

donc le noyau père radioactif α perd ..2..protons...et...2..neutrons....
.....



L'objectif pour le noyau père est de se désintégrer en un noyau fils de façon à se retrouver dans la vallée..de..stabilité.....

b- La radioactivité β- (bêta moins):



La radioactivité β - correspond à l'émission d'un électron $^{0}_{-1}e$

Exemple : désintégration β - du carbone 14

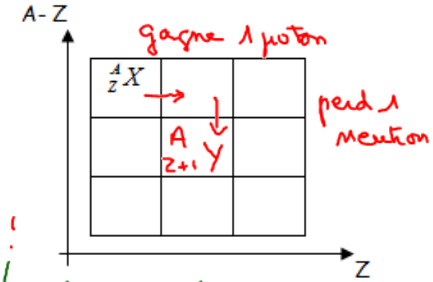
$^{14}_{6}C \rightarrow {}^{A}_{Z}X + {}^{0}_{-1}e$ $\begin{cases} 14 = A + 0 \\ 6 = Z - 1 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} A = 14 \\ Z = 7 \end{cases} \Rightarrow {}^{14}_{6}C \rightarrow {}^{14}_{7}N + {}^{0}_{-1}e$

L'équation générale d'une transformation nucléaire de type β- s'écrit :

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

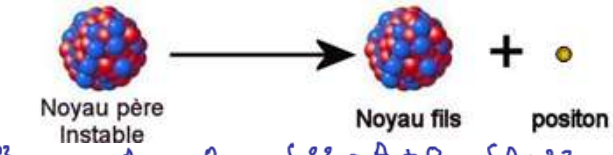
donc le noyau père radioactif β- gagne un proton et perd 1 neutron !

$^{1}_{0}n \rightarrow {}^{1}_{1}p + {}^{0}_{-1}e$



L'objectif, pour le noyau père, est de se désintégrer en un noyau fils de façon à se retrouver dans la vallée de stabilité

c- La radioactivité β+ (bêta plus):



La radioactivité β+ correspond à l'émission d'un positon (ou positron) $^{0}_{+1}e$

Exemple : Désintégration β+ du sodium 22 $^{22}_{11}Na$

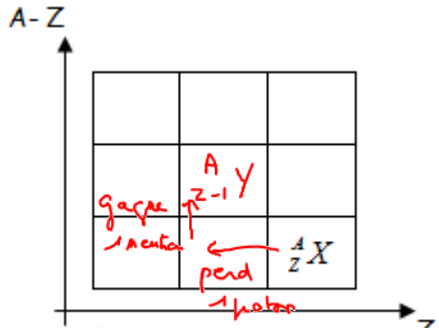
$^{22}_{11}Na \rightarrow {}^{A}_{Z}X + {}^{0}_{1}e \Rightarrow \begin{cases} 22 = A + 0 \\ 11 = Z + 1 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} A = 22 \\ Z = 10 \end{cases} \Rightarrow {}^{22}_{11}Na \rightarrow {}^{22}_{10}Ne + {}^{0}_{1}e$

L'équation générale d'une transformation nucléaire de type β+ s'écrit :

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

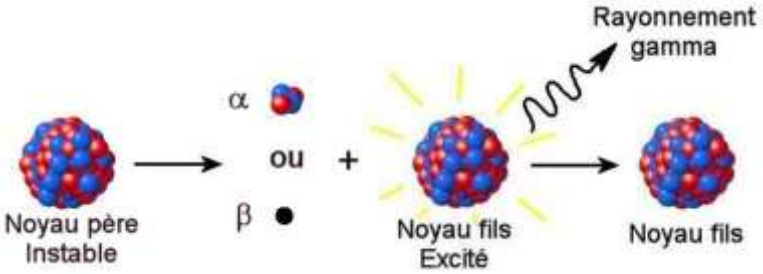
donc le noyau radioactif β+ perd un proton et gagne 1 neutron

$^{1}_{1}p \rightarrow {}^{1}_{0}n + {}^{0}_{1}e$



L'objectif, pour le noyau père, est de se désintégrer en un noyau fils de façon à se retrouver dans la vallée de stabilité

d- Rayonnement γ (gamma) :



La plupart du temps, lors des désintégrations précédentes, les noyaux fils produits sont dans un état excité – trop d'énergie. Ils seront notés par un astérisque

L'excédent d'énergie est libéré sous forme rayon γ (gamma)

Exemple : désintégration β- du cobalt $^{60}_{27}Co$

$^{60}_{27}Co \rightarrow {}^{A}_{Z}X^{*} + {}^{0}_{-1}e \Rightarrow \begin{cases} 60 = A + 0 \\ 27 = Z - 1 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} A = 60 \\ Z = 27 + 1 = 28 \end{cases}$

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

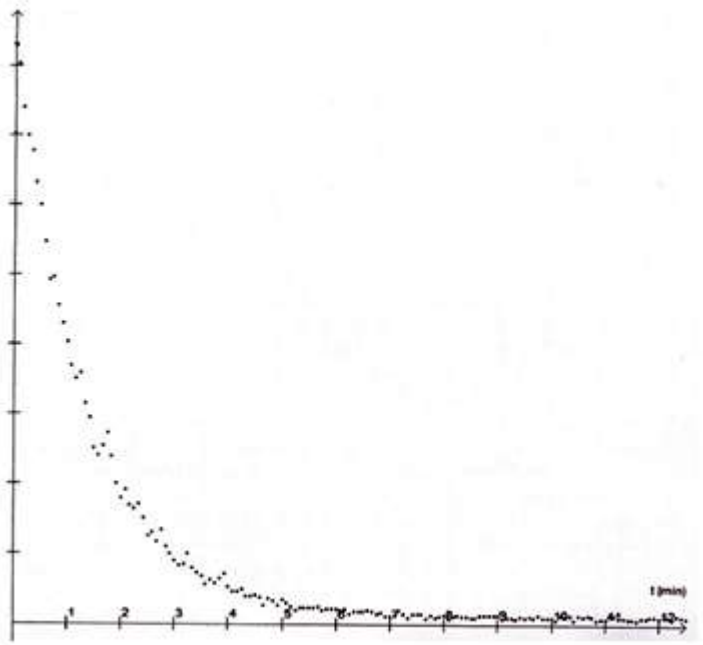
$\Rightarrow {}^{60}_{28}Ni^{*} \rightarrow {}^{60}_{28}Ni + \gamma$

II- Comment évolue un tel phénomène aléatoire ? La loi de décroissance radioctive

Même si la désintégration d'un échantillon radioactif est un phénomène aléatoire, il est possible de prévoir l'évolution, dans le temps, du **nombre de noyaux radioactifs N(t)** .

1- Analogie avec des dés :

L'activité avec les dés, nous a permis d'obtenir une courbe ayant la forme ci-dessous.



Par analogie, considérons **un échantillon de noyaux radioactifs :**

N_0 : Nombre de noyaux radioactifs à l'instant $t = 0$

$N(t=0) = N_0$

$N(t)$: Nombre de noyaux radioactifs à l'instant t

$N(t + \Delta t)$: Nombre de noyaux radioactifs à l'instant $t + \Delta t$

$N(t + \Delta t) - N(t) < 0$

Courbe décroissante

a- Quel est le nombre de noyaux qui se désintègrent sur une durée Δt ?

$$-\Delta N = -\underbrace{\left(N(t+\Delta t) - N(t)\right)}_{<0} > 0$$

b- De quoi dépend ce nombre de noyaux qui se désintègrent sur une durée Δt ?

$-\Delta N =$	λ	$\times$ $N(t)$	$\times$ Δt > 0
de nombre de noyaux qui se désintègrent dépend	du type des noyaux radioactifs	du nombre de noyaux radioactifs à l'instant t	de la durée Δt

Donc le nombre de désintégration $-\Delta N$, est proportionnel au nombre de noyaux radioactifs N(t) et à la durée Δt, peut s'écrire :

$$\boxed{-\Delta N = \lambda \times N(t) \times \Delta t > 0}$$

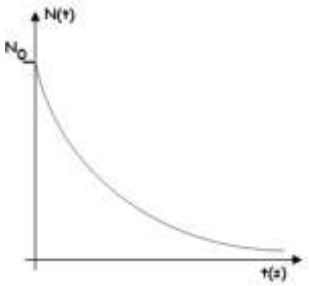
avec λ : constante radioctive caractéristique des noyaux

c- Quelle est la dimension de la constante radioactive λ ? Quelle est la dimension $\frac{1}{\lambda}$?

$$-\Delta N = \lambda . N(t) . \Delta t \Rightarrow \lambda = \frac{-\Delta N}{N(t) \times \Delta t} \leftarrow s$$

$\Rightarrow \lambda$ s'exprime en s^{-1}

2- Loi de décroissance radioactive : Quelle est la fonction mathématique qui correspond à N(t) ?



$-\Delta N = \lambda N(t) \times \Delta t \Rightarrow \frac{\Delta N}{\Delta t} = -\lambda \times N(t)$

En faisant tendre Δt vers zéro : $\frac{dN}{dt} = -\lambda \times N(t)$

dérivée de N par rapport au Temps

On obtient donc une équation différentielle linéaire du premier ordre à coefficients constants de type y ′ = ay

Sa résolution donne y (x) = Cxe^{ax}, on en déduit que N(t) = $C \times e^{-\lambda t}$

A t = 0, N(0) = N_0 donc $N(0) = Cxe^{-\lambda \times 0} = \boxed{C = N_0}$

Mathématiquement, la fonction exponentielle a comme propriété : $(e^u)' = u'e^u$

L'expression de N(t) est

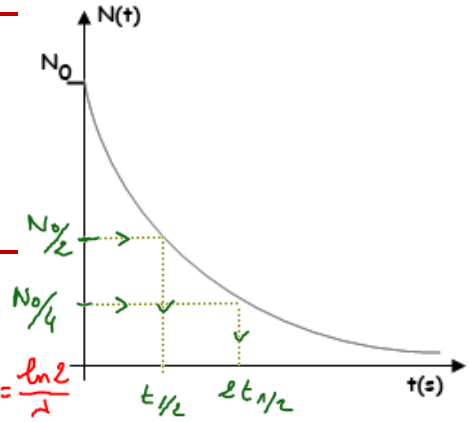
$$\boxed{N(t) = N_0 \times e^{-\lambda \times t}}$$

- λ : constante radioactive exprimée en s^{-1}
- t : exprimée en s
- N_0 : est un nombre

3- La demi-vie radioactive $t_{1/2}$

Définition :
La demi-vie radioactive $t_{1/2}$ d'un échantillon de noyaux radioactifs est égale à la durée nécessaire pour, statistiquement, la moitié des noyaux radioactifs présents à la date t soit désintégrée à la date $t + t_{1/2}$
Donc

$$N(t_{1/2}) = \frac{N_0}{2} \quad \text{ou} \quad N(t+t_{1/2}) = \frac{N(t)}{2}$$



Recherche de l'expression de $t_{1/2}$:

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

$\Rightarrow \cancel{N_0} \times e^{-\lambda t_{1/2}} = \frac{\cancel{N_0}}{2}$

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

$\Rightarrow \ln(e^{-\lambda t_{1/2}}) = \ln(1/2)$

$\Rightarrow -\lambda \times t_{1/2} = -\ln 2 \Rightarrow t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$

La demi-vie radioactive $t_{1/2}$ ne dépend que de ...la nature des noyaux radioactifs..... Elle est caractéristique de chaque type de noyau radioactif.

3-Activité d'une source radioactive et effet biologique :

Définition :
L'activité A(t) d'une source radioactive est égale au nombre moyen de désintégrations par seconde dans l'échantillon.

$$A = -\frac{\Delta N}{\Delta t}$$

A s'exprime en ...becquerel.....

1Bq = ...1 désintégration par seconde.....

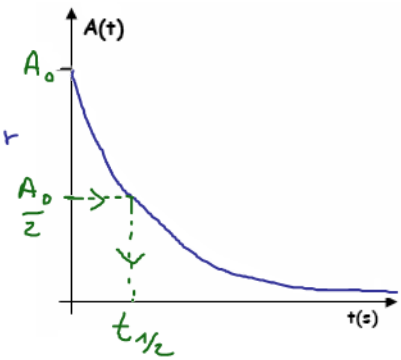
A est mesurée à l'aide d'un compteur de radioactivité ou compteur ...Geiger...-Müller

Comment évolue l'activité A(t) d'une source dans le temps ?

D'après la relation $-\Delta N(t) = \lambda N(t) \Delta t \Rightarrow -\frac{\Delta N}{\Delta t} = \lambda \times N(t)$

On peut écrire que $A(t) = -\frac{\Delta N}{\Delta t} = \lambda \times N(t) \Rightarrow A(t) = \boxed{\lambda N_0} e^{-\lambda t}$ ← A_0

A t= 0s, A(0)= $A_0 = \lambda N_0 \times e^{-\lambda 0} \Rightarrow A_0 = \lambda N_0 \Rightarrow A(t) = A_0 \times e^{-\lambda t}$



Conséquences :
- L'activité suit une loi de décroissance radioactive...
- L'activité décroit de moitié à chaque demi-vie :

$A(t_{1/2}) = \frac{A_0}{2} = \frac{\lambda N_0}{2}$

Une source radioactive est d'autant dangereuse que sont activité est .....

III- Datation :

1- Le principe :

Le comportement statistiquement déterminé nous a permis d'écrire une loi de décroissance exponentielle :
N(t) = $N_0 \times e^{-\lambda \times t}$
Utiliser un échantillon radioactif en tant qu'horloge revient à obtenir t :

N(t) = $N_0 \times e^{-\lambda \times t}$ $\Rightarrow N_0 \times e^{-\lambda t} = N(t)$!

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

$\Rightarrow -\lambda t = \ln\left(\frac{N(t)}{N_0}\right)$

$\Rightarrow \boxed{t = -\frac{1}{\lambda} \times \ln\left(\frac{N(t)}{N_0}\right)}$

Remarque : En utilisant l'activité A(t) = $A_0 \times e^{-\lambda \times t}$, on peut aussi retrouver t :

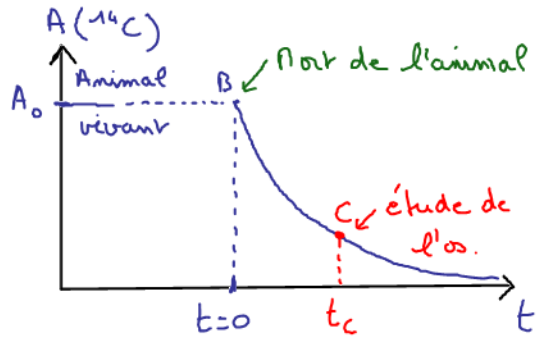
2- L'utilisation du carbone 14 pour dater des organismes vivants : Datation au carbone 14

Le carbone 14 est un isotope très peu abondant du carbone mais qui présente l'avantage d'être radioactif, réparti de manière homogène dans l'atmosphère de la planète, et en quantité à peu près constante depuis 50000 ans car il est régénéré dans les hautes couches de l'atmosphère.

-Tout organisme vivant échange du carbone avec l'atmosphère donc fixe du carbone 14. Le taux de carbone 14 dans l'atmosphère n'a pas changé depuis des milliers d'années.
- L'activité A_0 du carbone 14 fixé au moment de la mort de l'organisme est donc égale à celle du même organisme vivant aujourd'hui…
- Mais à partir de la mort de l'organisme, l'activité du carbone 14 fixé diminue alors de manière exponentielle au cours du temps

Exercice :
Des fragments d'os prélevés sur un site préhistorique ont une activité égale à 113,7 désintégrations par heure et par gramme. Sur un fragment d'os d'un homme récemment décédé, l'activité est égale à 911,7 désintégrations par heure et par gramme.
Donnée : Temps de demi-vie du carbone 14 $t_{½}$ = 5730 ans
Le carbone 14 subit une radioactivité de type alpha. Ecrire l'équation de désintégration.

Déterminer l'âge de l'ossement préhistorique.



$A(t_c) = A_0 e^{-\lambda t_c}$

$\Rightarrow e^{-\lambda t_c} = \frac{A(t_c)}{A_0}$

$\Rightarrow -\lambda t_c = \ln\left(\frac{A(t_c)}{A_0}\right)$

donc $t_c = -\frac{1}{\lambda} \ln\left(\frac{A(t_c)}{A_0}\right)$

Calcul de λ
on a montré que $t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \Rightarrow \lambda = \frac{\ln 2}{t_{1/2}} \Rightarrow \frac{1}{\lambda} = \frac{t_{1/2}}{\ln 2}$

donc $t_c = -\frac{t_{1/2}}{\ln 2} \times \ln\left(\frac{A(t_c)}{A_0}\right) = -\frac{5730 \times 365{,}5 \times 24 \times 60 \times 60}{\ln 2} \times \ln\left(\frac{113{,}7}{911{,}7}\right)$

$\Rightarrow t =$