

Activités sur la décroissance radioactive

IV Evolution temporelle de la radioactivité.

IV-1 La désintégration est un phénomène aléatoire.

La désintégration radioactive est aléatoire, on ne peut pas prévoir quand va se produire la désintégration d'un noyau. Elle est spontanée, elle se produit sans aucune intervention extérieure. Elle ne dépend pas ni de son environnement chimique, ni de l'espèce chimique qui contient le noyau radioactif ; ni des conditions extérieures (pression ou température).

IV-2 Lois de la décroissance radioactive.

IV-2-1 Nombre de désintégrations pendant une durée Δt :

On considère un échantillon contenant N noyaux radioactifs (non désintégrés) à un instant t . Ce nombre est noté N_0 à l'instant $t_0 = 0$ s pris comme instant initial.

Pendant une durée Δt très brève, un certain nombre de noyaux radioactifs se sont désintégrés.

Soit $N + \Delta N$ le nombre de noyaux radioactifs (non désintégrés) à la date $t + \Delta t$.

($\Delta N < 0$ car N diminue)

Le nombre moyen (phénomène aléatoire) de noyaux désintégrés pendant la durée Δt est :

$$N_t - N_{t+\Delta t} = N - (N + \Delta N) = -\Delta N > 0$$

Ce nombre moyen de désintégrations pendant la durée Δt est proportionnel :

- Au N de noyaux radioactifs présents dans l'échantillon à la date t .
- A la durée Δt (si Δt double alors le nombre de désintégrations qui se produisent, double aussi).

On a donc : $-\Delta N = \lambda \cdot N \cdot \Delta t$ où λ est la constante radioactive, caractérisant un radioélément.

$$\Rightarrow \frac{-\Delta N}{N} = \lambda \cdot \Delta t \quad \lambda \text{ s'exprime en } s^{-1}.$$

Pour un type de noyau donné la constante radioactive λ est la proportion des noyaux qui se désintègre par unité de temps :

$$\lambda = -\frac{1}{N(t)} \cdot \frac{\Delta N(t)}{\Delta t}$$

Exemple :

noyau radioactif	uranium 238	carbone 14	césium 137	iode 131
constante radioactive λ	$1,5 \cdot 10^{-10} \text{ an}^{-1}$	$1,2 \cdot 10^{-4} \text{ an}^{-1}$	$2,3 \cdot 10^{-2} \text{ an}^{-1}$	$8,5 \cdot 10^{-2} \text{ jour}^{-1}$

IV-2-1 Nombre des noyaux présents dans un échantillon à un instant donné : La loi de la décroissance

L'évolution du nombre de noyaux radioactifs présents dans un échantillon au cours du temps est donnée par :

$$\frac{-\Delta N(t)}{N(t)} = \lambda \Delta t \quad (1).$$

(Par définition, la dérivée de la fonction $N(t)$ par rapport au temps est : $N'(t) = \frac{dN}{dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta N(t)}{\Delta t}$)

Si Δt tend vers 0, la relation devient $-\frac{dN}{N} = \lambda \cdot dt$.

Activité 7 :

- 1- Que devient la relation (1) si Δt tend vers zéro ?
- 2- Dédurre l'équation différentielle vérifiée par $N(t)$?
- 3- Sachant que l'équation différentielle « $f'(x)+f(x)=0$ » à pour solution $f(x)=C e^{-kx}$, La solution de l'équation différentielle de la question précédente est dite « **LOI DE LA DECROISSANCE RADIOACTIVE** ».

Exprimer la loi de décroissance radioactive en fonction du nombre des noyaux N_0 initialement présent dans l'échantillon (à $t=0$) et $N(t)$ le nombre des noyaux encore présent dans l'échantillon à l'instant t .

Remarque : Le calcul de $\int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = -\int_0^t \lambda dt$ permet aussi de retrouver l'expression de la loi de la décroissance radioactive.

Activité 8 :

A l'instant de date $t=0$, un échantillon la masse de cobalt 60 est $m_0=200$ mg, au bout de quelle durée la masse de cobalt 60 dans l'échantillon ne sera-t-elle plus que $m=10$ mg ?

Donnée : la constante radioactive du cobalt 60 est $0,13 \text{ an}^{-1}$.

IV-3 L'activité d'une substance radioactive.

Définition : L'activité A radioactive est égale au nombre moyen de désintégrations par seconde, elle s'exprime en becquerel (Bq).

$$A = -\frac{dN}{dt}$$

Activité 9 :

- a. Exprimer l'activité $A(t)$ d'une substance radioactive à l'instant t en fonction du nombre $N(t)$ de noyaux présent à l'instant t et de la constante radioactive des noyaux.
- b. Dédurre l'expression de $A(t)$ en fonction de λ , t et A_0 l'activité de la substance à $t=0$.

Remarque : L'activité s'exprime en **becquerels** dont le symbole est **Bq** . Le **curie (Ci)** est aussi une unité d'activité . Il vaut $3,7.10^{10}$ Bq.

Exemples:

source	1 L d'eau	1 kg granit	Homme (70kg)	1 kg d'uranium	1 g plutonium
activité (en Bq.)	10	1 000	10 000	25.106	2.109

Dangerosité et effet biologique :

Plus l'activité d'une source est grande, plus elle est dangereuse. L'action sur les tissus vivants dépend de plusieurs paramètres, du nombre de particules reçues par seconde, qui dépend de l'activité A et de la distance de la source; de l'énergie et de la nature des particules ; du fractionnement de la dose reçue et de la nature des tissus touchés.

Si l'activité d'une source est importante elle peut provoquer des réactions chimiques et des modifications de l'ADN

Activité 10 :

Un compteur **Geiger –Muller** , placé près d'une source radioactif, détecte en moyenne 500 désintégration par minute. 24 heures plus tard, il ne détecte en moyenne que 320 désintégration par minute. Calculer la constante radioactive des noyaux contenus dans l'échantillon.



IV-4 La demi-vie ou la période radioactive.

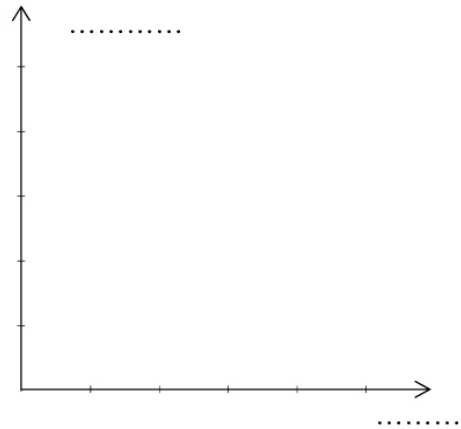
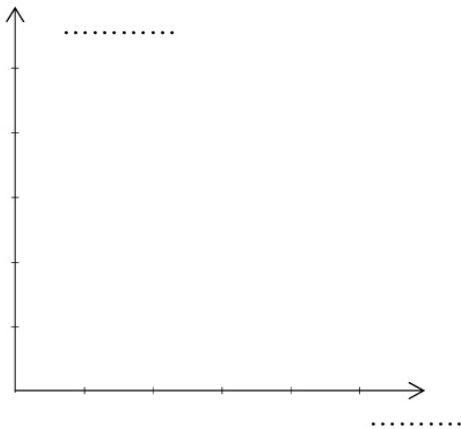
a-) Définition :

La **demi-vie radioactive**, notée **T**, d'un échantillon de noyaux radioactifs est égale à la **durée** nécessaire pour que, **la moitié** des noyaux radioactifs présents dans l'échantillon se désintègrent.
$$N(t + T) = \frac{N(t)}{2}$$

Activité 11 :

A l'instant de date $t=0$, le nombre des noyaux radioactifs dans un échantillon est N_0 . Déduire d'après la définition de la période radioactive la courbe :

- a- de la décroissance radioactive $N(t)$.
- b- De la décroissance radioactive $A(t)$



b-) Expression la demi-vie T :

Activité 12 :

Monter que la période radioactive d'une substance radioactive est :

$$T = \frac{\text{Log}2}{\lambda}$$

Exemples :

Noyau	$^{204}_{92}\text{Pb}$	$^{238}_{92}\text{U}$	$^{14}_6\text{C}$	$^{131}_{53}\text{I}$	$^{239}_{92}\text{U}$	$^{212}_{84}\text{Po}$
Radioactivité	α	α	β^-	β^-	β^-	α
Période	10^{19} ans	$4,5 \cdot 10^{19}$ ans	5700 ans	8 jours	23 min	0,3 μ s

IV- 5 Application : La datation

a-) Principe :

$$A = A_0 \cdot e^{-\lambda t} \Rightarrow \frac{A}{A_0} = e^{-\lambda t} \Rightarrow t = \dots\dots\dots$$

Connaissant un radioélément contenu dans l'objet à dater, on détermine sa constante radioactive.

On peut mesurer A, si l'on connaît l'activité A_0 de l'échantillon, alors on peut connaître la date d'origine t de l'objet.

b-) Datation au carbone 14

La proportion de carbone 14 par rapport à l'isotope 12 abondant est de l'ordre de 10^{-12} , elle est à peu près constante car il est régénéré dans l'atmosphère. Il en est de même dans le dioxyde de carbone de l'atmosphère. Or tous les organismes vivants échangent du CO_2 avec l'atmosphère soit par photosynthèse, soit par l'alimentation. Les tissus fixent l'élément carbone. La proportion de carbone 14 dans les tissus est donc identique à celle de l'atmosphère tant que l'organisme est en vie.

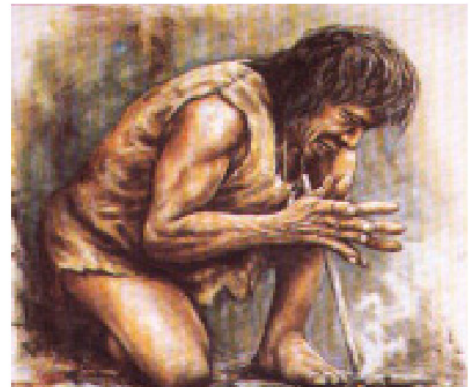
A leur mort, la quantité de carbone 14 diminue (par désintégration) selon la loi de décroissance radioactive, d'où il suffit de comparer l'activité du carbone 14 dans l'atmosphère (ou dans un objet vivant à celle de l'objet à dater.

Activité 14 :

Pour connaître l'époque à laquelle vécurent des hommes préhistoriques dans une caverne, on mesure l'activité d'un échantillon de charbon de bois enfui dans le sol de la grotte. Il s'avère alors que le nombre de désintégrations n'est plus que 1,6 par minute, alors qu'il serait 11,5 par minute pour un échantillon de même masse de bois récemment coupé.

Calculer le temps écoulé depuis le dernier feu dans la grotte:

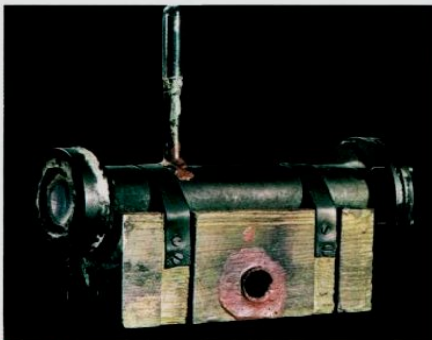
Sachant que la période radioactive du carbone 14 est $T = 5730$ ans.



VI - Réactions nucléaires provoquées :

1. De la découverte du neutron à celle de la fission

En 1932, en bombardant des noyaux de béryllium ^9Be par des particules α , **James Chadwick** découvre qu'une particule, de masse très voisine de celle du proton est émise : le **neutron**. Neutre, il est un projectile beaucoup plus efficace que les protons ou les particules α , pour déclencher des réactions nucléaires.



Doc. 1. Appareil utilisé par Chadwick.

En 1934, **Frédéric Joliot et Irène Joliot-Curie** bombardent une feuille d'aluminium par des particules α . Ils constatent que lorsque le bombardement cesse, la feuille émet un rayonnement de positons (particules de même masse que l'électron mais de charge $+e$). Chaque noyau d'aluminium ^{27}Al , ayant capturé une particule α , s'est transmuté en un isotope artificiel et radioactif du phosphore en émettant un neutron. Le phosphore radioactif se désintègre spontanément en silicium stable en émettant un positon.

Cette expérience marque la découverte de la radioactivité artificielle.

Des travaux effectués à Rome par **Enrico Fermi (Doc. 2)**, aboutissent en quelques mois à l'identification de dizaines d'isotopes radioactifs artificiels obtenus en bombardant des noyaux naturels par des neutrons. Mais Fermi ne parvient pas à identifier les produits formés dans le cas de l'uranium.

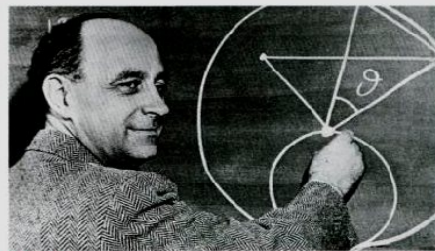
En 1938, **Otto Hahn et Fritz Strassmann** identifient l'un des produits légers formé par la désintégration des noyaux d'uranium ^{235}U bombardés par des neutrons : le baryum (l'autre est le strontium). Cette identification marque la découverte de la fission nucléaire. Son mécanisme sera expliqué par **Lise Meitner** en 1939.

Des mesures effectuées en 1939, à l'université de Columbia, montrent que l'énergie libérée lors de chaque fission du noyau d'uranium ^{235}U est de l'ordre de 200 MeV.

$$1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J} ; \quad 1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$$

Cette même année, Frédéric Joliot à Paris et Enrico Fermi à Rome découvrent que deux ou trois neutrons en moyenne sont expulsés lors de la fission de l'uranium ^{235}U . La voie s'ouvre alors pour la réalisation d'une expérience de réaction en chaîne en vraie grandeur.

La construction de la première pile nucléaire par l'équipe de Fermi se fait à Chicago en novembre 1942. Le 2 décembre de la même année, l'expérience décisive a lieu. La mise en route du processus de fission est activée. Le démarrage d'une réaction en chaîne, dans la pile nucléaire, est immédiatement constaté : le monde vient de basculer dans l'ère nucléaire.



Doc. 2. Enrico Fermi (1901-1954).

a. En utilisant les lois de conservation, identifier le composé formé lors de l'expérience effectuée par Chadwick.

Écrire l'équation de la réaction nucléaire.

b. En utilisant les lois de conservation, identifier l'isotope du phosphore et l'isotope du silicium formés lors de l'expérience effectuée par les Joliot-Curie. Écrire les équations des réactions nucléaires.

c. Pourquoi les neutrons sont-ils des projectiles plus efficaces que les particules α ou que les protons, pour bombarder les noyaux ?

d. Comparer l'énergie libérée (en MeV) par la combustion d'un atome de carbone et celle libérée par la fission d'un noyau d'uranium ^{235}U .

e. Pourquoi dit-on que la fission de l'uranium ^{235}U permet une réaction en chaîne ?

Données :

- béryllium (Be) : $Z = 4$;
- carbone (C) : $Z = 6$.
- aluminium (Al) : $Z = 13$;
- silicium (Si) : $Z = 14$;
- phosphore (P) : $Z = 15$.
- la combustion complète d'une mole d'atomes de carbone produit une énergie de 393 kJ ;
- nombre d'Avogadro : $N_A = 6,0 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$.

Définition: Une réaction nucléaire est dite provoquée lorsqu'un noyau cible est frappé par un noyau projectile et donne naissance à de nouveaux noyaux.

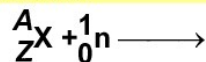
La transmutation C'est une réaction nucléaire provoqué au cours de laquelle deux noyaux interagissent pour donner un ou plusieurs noyau plus stable.

Au cours d'une transmutation les lois de conservations sont vérifiées.

VI-2 Fission et fusion nucléaires ::

VI-2-1 La fission nucléaire: réaction en chaîne :

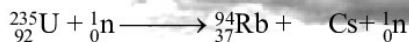
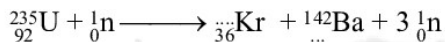
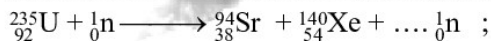
Définition : La fission est une réaction nucléaire provoquée au cours de laquelle un noyau lourd "fissile" (bombarder par un neutron) donne naissance à deux noyaux plus légers et d'autres neutrons.



avec $A+1 = \dots\dots\dots$ et $Z+0 =$

Activité 16

Plusieurs réactions de fission de l'uranium 235 sont possibles:

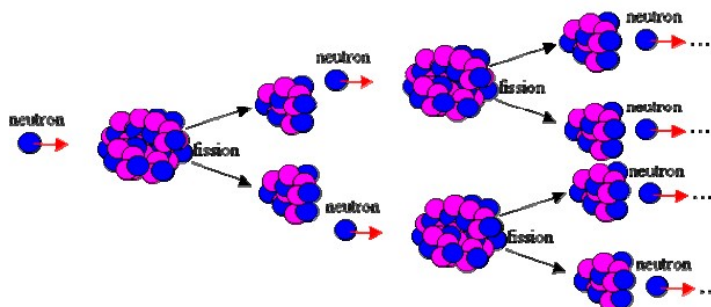


Recopier et compléter les réactions ci-dessous.

La réaction en chaîne

Les neutrons émis lors de la fission peuvent provoquer la fission d'autres noyaux. Si le nombre de neutrons émis lors de chaque fission est supérieur à 1, une réaction en chaîne peut se produire et devenir rapidement incontrôlable (bombe à fission : bombe "A" d'Hiroshima).

Dans une centrale nucléaire, la réaction en chaîne est contrôlée par des barres mobiles qui plongent dans le réacteur entre les barres de "combustible" pour absorber une partie des neutrons émis. On peut ainsi contrôler la quantité d'énergie produite par les réactions de fission.



VI-2-2 La fusion nucléaire

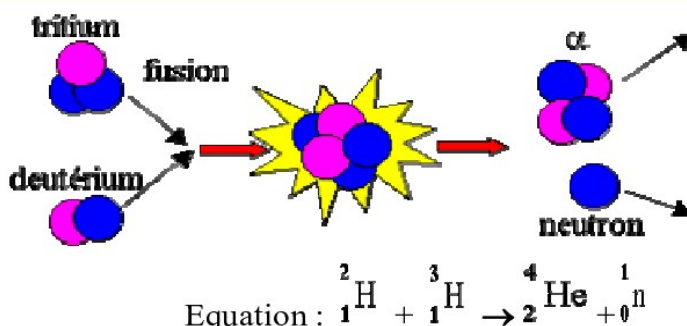
« La **fusion nucléaire** constitue le mécanisme à l'origine du rayonnement des étoiles et en particulier du Soleil. En effet, au sein des étoiles, les noyaux légers fusionnent et produisent des noyaux plus lourds. Au cours de cette réaction de fusion, la masse du noyau produit est inférieure à la somme des masses des noyaux légers d'origine. La différence de masse, en vertu de la célèbre relation d'Einstein, $E=mc^2$, est alors convertie en énergie. On estime ainsi que, dans le Soleil, pas loin de 600 millions de tonnes d'hydrogène sont transformés en 596 millions de tonnes d'hélium chaque seconde. La différence est alors convertie en énergie et est à l'origine de la chaleur et de la lumière que nous recevons.

Bien que l'énergie libérée par la fusion nucléaire soit considérable, les réactions de fusion ne se produisent pas spontanément, du moins dans les conditions de température et de pression auxquelles nous sommes habitués. Ainsi, la probabilité d'observer une réaction de fusion entre deux noyaux d'hydrogène à la surface de la terre est quasiment nulle. En effet, pour fusionner, les noyaux, qui sont chargés positivement, doivent d'abord vaincre leur tendance naturelle à se repousser. Ceci est possible lorsque la matière est dans des conditions extrêmes comme au cœur du Soleil (pression énorme et température de plusieurs millions de degrés). » »

Activité 16

- 1- a- Quels sont les noyaux concernés par la fusion nucléaire ?
b- Décrire le mécanisme de la fusion nucléaire.
- 2- a- Quelle est l'origine de l'énergie nucléaire obtenue au cours d'une fusion nucléaire ?
b- Quelle formule traduit l'apparition de cette énergie ?
- 3- Pourquoi la probabilité d'observer une réaction de fusion entre deux noyaux d'hydrogène à la surface de la terre est quasiment nulle ?

Définition: La fusion nucléaire est une réunion de deux noyaux légers pour former un noyau plus lourd.



L'énergie libérée au cours d'une fusion est considérable.

La fusion n'est possible que si les deux noyaux possèdent une grande énergie cinétique pour vaincre les forces de répulsion électriques.

La fusion se produit naturellement dans les étoiles. Dans une bombe thermonucléaire (appelée bombe H), la fusion nucléaire est incontrôlée et explosive

Elle est très intéressante pour produire de l'énergie, mais on ne la maîtrise pas suffisamment pour produire de l'électricité.

Activité 17 On donne quelques réactions de fusion au cœur du soleil. Compléter ces équation et déduire l'équation bilan



VI-3 Bilan énergétique : Energie libérée par une réaction nucléaire



D'après l'équivalence masse-énergie, la variation d'énergie ΔE de la réaction correspond à la variation de masse Δm :

$$\Delta m = (m_{X_3} + m_{X_4}) - (m_{X_1} + m_{X_2})$$

$$E = \Delta m \cdot c^2$$

Activité 18 : Soit la réaction : $U + {}_0^1n \longrightarrow {}_{39}^{95}Y + {}_{53}^{138}I + 3{}_0^1n$

1-/ S'agit il d'une fusion ou d'une fission nucléaire ?

2-/ On donne : $m({}_{92}^{235}U) = 235,12u$, $m({}_{39}^{95}Y) = 95,90u$, $m({}_{53}^{138}I) = 138,20u$, $m({}_0^1n) = 1,0087u$.

a-) Calculer l'énergie libérée par un noyau d'uranium(235) .
on donne $1u=931,5MeV \cdot c^{-2}$.

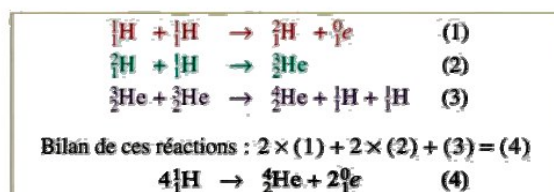
b-) Déduire l'énergie libérée par une mole d'uranium (235).

Activité 18 : Fusion dans le Soleil

La partie centrale du Soleil est appelée noyau. Son rayon est égal au quart de celui du Soleil. Sa densité est énorme et la température y est extrêmement élevée ($15 \cdot 10^6$ °C). Dans ces conditions, les réactions de fusion entre éléments légers peuvent avoir lieu. Les modèles indiquent que les réactions du cycle proton-proton (Doc 1) apportent l'essentiel de l'énergie libérée.

■ Dans environ cinq milliards d'années, quand le Soleil aura épuisé l'hydrogène du noyau central, celui-ci se contractera. L'énergie dégagée par cette contraction réchauffera les couches externes, provoquant la fusion de l'hydrogène qu'elles contiennent et leur dilatation. Le Soleil deviendra une géante rouge, son diamètre sera cent fois supérieur à son diamètre actuel (Doc 2), son énergie proviendra de la fusion de l'hélium.

■ Après l'épuisement de l'hélium, il éjectera sa matière la plus externe qui formera une nébuleuse planétaire, tandis que le cœur deviendra une naine blanche, étoile compacte se refroidissant progressivement.



Doc. 1. Principales réactions du cycle proton-proton.

• Age :	$4,7 \cdot 10^9$ ans
• Température à la surface :	5 500K
• Rayon :	696 000 km
• Puissance rayonnée :	$3,86 \cdot 10^{26}$ W
• Masse :	$2,0 \cdot 10^{30}$ kg
• Distance à la Terre :	$150 \cdot 10^6$ km
• Densité moyenne :	1,41

a. Quelle est, en MeV, l'énergie fournie par la réaction (4) ?

Données : masse d'un positon : 0,000 55 u ;

masse d'un noyau 1H : 1,007 28 u ;

masse d'un noyau 4He : 4,001 51 u ;

$1 u = 1,66 \cdot 10^{-27}$ kg ; $c = 3,00 \cdot 10^8$ m · s⁻¹.

b. Quelle est, en kg, la masse d'hydrogène transformée chaque seconde en énergie dans le Soleil ?

c. Quelle est, en kg, la masse d'hydrogène subissant la fusion chaque seconde ?

d. Quelle est la perte relative de masse du Soleil depuis sa formation ?