

Physique 4 : Décroissance radioactive

La radioactivité, qui est un phénomène naturel, suscite des réactions très variées : enthousiasme pour ses nombreuses applications en médecine ou dans l'industrie par exemple, ou méfiance pour ses conséquences graves (cancers, ...).

Étudions ce phénomène.

1. Comment mettre en évidence la radioactivité ?

Une source radioactive est détectée par les « rayonnements » qu'elle émet.

Ces « rayonnements » pouvant être dangereux pour la santé, nous ne manipulerons pas de telles sources. Décrivons, dans l'activité 1, comment les spécialistes procèdent pour reconnaître qu'un matériau est radioactif.

Activité 1

Comment détecter les « rayonnements » ?

Dans les laboratoires spécialisés et dans l'industrie, on détecte les rayonnements avec un **compteur Geiger**.

Lorsqu'on place un tel compteur face à une source radioactive, il émet un signal sonore chaque fois qu'il reçoit un « rayonnement » issu de la source [Doc. 1].

Le détecteur émet des signaux sonores brefs, non périodiques, de manière irrégulière.

Cette émission est aléatoire, spontanée, indépendante de la température ou de la pression.

Une feuille de papier interposée entre une source de césium 137 et le détecteur ne modifie pas la réception. En revanche, une feuille d'aluminium diminue le rythme des signaux sonores, et ce, d'autant plus que son épaisseur est importante. Une plaque de plomb les supprime.

1. Que signifie le mot *aléatoire* ?
2. D'après la lecture du texte, comment pourrait-on se protéger d'une source radioactive ?

> Exploitation

Un matériau radioactif émet des « rayonnements » détectables par un compteur Geiger, par exemple.

Ces « rayonnements » sont capables de traverser certains matériaux.

Ces « rayonnements », capables de traverser des matériaux divers et par conséquent les tissus humains, peuvent provoquer des lésions irréversibles. La présence d'un corps radioactif est signalée par un logo [Doc. 2].

La radioactivité est pourtant un phénomène naturel : nous recevons, chaque jour, des « rayonnements » à faible dose, sans dommage. C'est à forte dose que le danger est grand.

Ce sont ces « rayonnements » émis par les sels d'uranium, radioactifs, qui impressionnèrent les plaques photographiques, lors de la découverte de Henri BECQUEREL (voir l'activité préparatoire A, page 85).

Quels sont ces « rayonnements » et comment sont-ils produits ?

> Pour s'entraîner : Ex. 1



Doc. 1 Le compteur Geiger permet de détecter les sources radioactives grâce au rayonnement émis.



Doc. 2 La présence des déchets nucléaires, stockés dans les conteneurs en béton, est signalée par un logo.

2. Quels sont les différents « rayonnements » émis ?

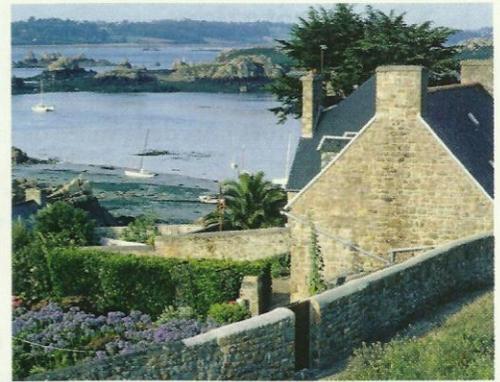
La radioactivité est un phénomène nucléaire : son origine se trouve dans les noyaux des atomes (voir les *prérequis*, page 11).

2.1 Stabilité et instabilité des noyaux

Certains noyaux gardent indéfiniment la même composition : ce sont des noyaux stables.

Pour d'autres, l'interaction forte qui contribue à leur stabilité n'est pas suffisante et ceux-ci se transforment spontanément en d'autres noyaux en émettant un « rayonnement » : ce sont des noyaux instables ou radioactifs [Doc. 3].

Sur les 350 noyaux naturels connus, une soixantaine sont instables. Nous verrons, plus tard, que la quasi-totalité des noyaux artificiels, fabriqués dans les laboratoires, sont instables.



Doc. 3 Ces roches granitiques contiennent une faible quantité d'uranium radioactif.

Activité 2

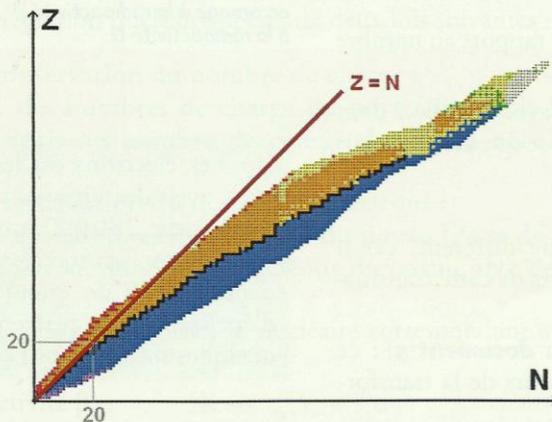
Quels sont les noyaux instables ?

Sur un diagramme (N, Z) [Doc. 4 et 5], on repère un noyau A_ZX par une case : le nombre de neutrons, $N = A - Z$, est porté en abscisse et le nombre de protons Z en ordonnée.

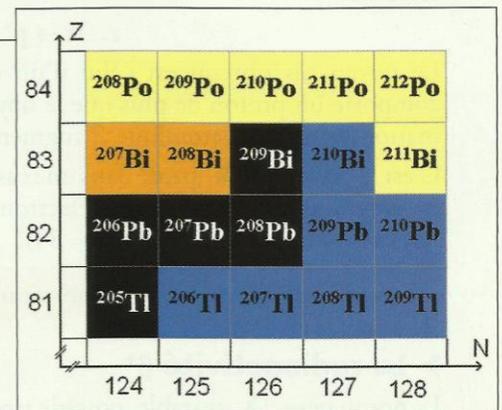
Observer les documents 4 et 5.

1. Quelle particularité présente la composition des noyaux stables pour $Z < 20$?

2. Les noyaux ${}^{208}_{83}\text{Bi}$, ${}^{209}_{83}\text{Bi}$, ${}^{210}_{83}\text{Bi}$ et ${}^{211}_{83}\text{Bi}$ sont-ils stables ?



Doc. 4 Diagramme (N, Z) extrait du logiciel Nucleus®. Les noyaux stables sont représentés en noir. Les autres, en bleu, en jaune ou en orange, sont instables.



Doc. 5 Une partie du diagramme (N, Z) .

> Observation

Sur le document 4, pour les faibles valeurs de Z ($Z < 20$), les noyaux stables se situent au voisinage de la droite $Z = N$: ils comportent autant de neutrons que de protons. C'est le cas de ${}^4_2\text{He}$, ${}^{12}_6\text{C}$, ${}^{16}_8\text{O}$, ${}^{14}_7\text{N}$, etc.

Les noyaux de bismuth présentés sur le document 5 ont des valeurs de A différentes, ce sont des isotopes (voir les *prérequis*, page 11). Parmi ces isotopes, seul le nucléide ${}^{209}\text{Bi}$ est stable.

Noyaux isotopes

Deux noyaux isotopes, d'un même élément, possèdent le même nombre de protons, mais diffèrent par le nombre de neutrons.

Ainsi, les noyaux ${}^{12}_6\text{C}$, ${}^{13}_6\text{C}$ et ${}^{14}_6\text{C}$, qui correspondent à l'élément carbone, sont des isotopes.

› Interprétation

Le domaine du diagramme contenant les noyaux stables est appelé « vallée de la stabilité ».

Les noyaux situés hors de la vallée de la stabilité sont instables.

Un noyau instable (noyau père) peut se transformer spontanément en un noyau différent (noyau fils), avec émission de « rayonnement » : il est radioactif.

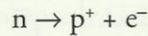
2.2 Les différents types de radioactivité

Examinons les différents types de radioactivité, liés aux « rayonnements » émis.

› La radioactivité β^-

Le noyau père A_ZX , instable, possède **trop de neutrons** par rapport au nombre de protons [Doc. 6].

L'un de ses neutrons se transforme alors en un proton avec émission d'un électron⁽¹⁾ :



Le noyau fils obtenu est celui d'un élément chimique différent, car il comporte un proton de plus que le noyau père. Au cours de cette transformation, le numéro atomique Z augmente d'une unité.

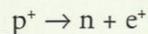
C'est le cas du ${}^{210}_{83}\text{Bi}$ (situé dans une case bleue du document 5) : ce nucléide est **émetteur β^-** , car il émet des électrons. Au cours de la transformation, on obtient du polonium ${}^{210}_{84}\text{Po}$ ($Z = 84$).

La radioactivité β^- est une émission d'électrons par le noyau.

› La radioactivité β^+

Le noyau père A_ZX , instable, possède **trop de protons** par rapport au nombre de neutrons [Doc. 6].

L'un de ses protons se transforme alors en un neutron avec émission d'un **positon** noté e^+ , antiparticule de l'électron, de même masse que celui-ci mais de charge opposée⁽¹⁾ :



Le noyau fils obtenu est celui d'un élément chimique différent, car il comporte un proton de moins que le noyau père. Au cours de cette transformation, le numéro atomique Z diminue d'une unité.

C'est le cas du ${}^{208}_{83}\text{Bi}$ (situé dans une case orange du document 5) : ce nucléide est **émetteur β^+** , car il émet des positons. Au cours de la transformation, on obtient du plomb ${}^{208}_{82}\text{Pb}$ ($Z = 82$).

La radioactivité β^+ est une émission de positons par le noyau.

Elle concerne essentiellement les éléments artificiels.

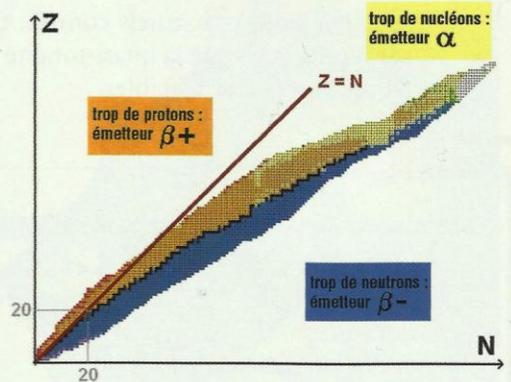
› La radioactivité α

Le noyau père A_ZX est très « massif ». Son instabilité est due à un excès de nucléons. Il se désintègre spontanément en émettant un noyau d'hélium ${}^4_2\text{He}$ (ion He^{2+} ou particule α) [doc. 6 et 7].

C'est le cas du ${}^{211}_{83}\text{Bi}$ (situé dans une case jaune du document 5) : ce nucléide est **émetteur α** , car il émet des particules α .

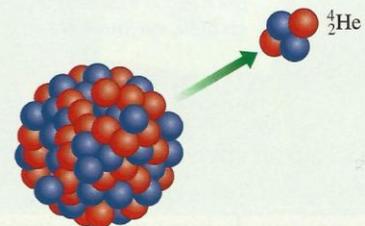
Le mot « nucléide » désigne l'ensemble des noyaux de même nombre de charge Z (ou numéro atomique) et de même nombre de masse A .

Un « radionucléide » est un nucléide radioactif.



Doc. 6 Le diagramme (N, Z) représente les différents modes de désintégration. Le domaine en noir correspond à la « vallée de stabilité », celui en bleu à la radioactivité β^- , en orange à la radioactivité β^+ , et en jaune à la radioactivité α .

(1) Les électrons ou les positons sont émis avec des vitesses très grandes, de l'ordre de $280\,000 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$. Ils sont cependant arrêtés par une feuille d'aluminium de quelques millimètres d'épaisseur et ne peuvent parcourir que quelques mètres dans l'air.



Doc. 7 Une particule α est constituée de deux neutrons et de deux protons.

La radioactivité α est l'émission de particules α par le noyau.

Les particules α sont émises avec une vitesse de l'ordre de $20\,000\text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$. Une simple feuille de papier permet de les arrêter.

> Le rayonnement γ

Lors de la désintégration d'un noyau radioactif, le noyau fils est généralement obtenu dans un état « excité » : il possède un surplus d'énergie interne. Il se désexcite en évacuant ce surplus d'énergie sous la forme d'une onde électromagnétique, appelée **rayonnement γ** . Ce rayonnement (de même type que la lumière) possède une très courte longueur d'onde (de l'ordre de 10^{-4} nm) [doc. 8].

Il est invisible et surtout très énergétique, donc très dangereux. Une grande épaisseur de béton ou de plomb est nécessaire pour se protéger de ces rayons. Notons que le terme « rayonnement » associé à β^+ , β^- ou α est impropre, car il y a émission de particules. C'est pour cette raison que « rayonnement » a été écrit entre guillemets.

Un noyau radioactif est un noyau instable qui se désintègre spontanément en donnant un noyau différent et en émettant des particules β^- , β^+ ou α et souvent, simultanément, un rayonnement γ .

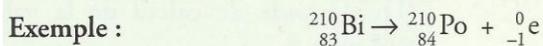
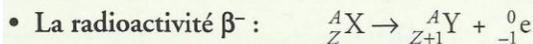
Les radionucléides connaissent une application importante dans le domaine médical (voir l'*activité préparatoire B*, page 85). On les utilise comme traceur et pour détruire des cellules cancéreuses. L'industrie les utilise aussi comme traceur (pétrochimie...) ou comme source de rayonnement γ (gamma-graphie [doc. 9]).

2.3 Équation d'une réaction nucléaire

> Une désintégration nucléaire obéit aux deux lois suivantes :

- **Loi de conservation du nombre de charge :**
La somme des nombres de charge du noyau fils et de la particule émise est égale au nombre de charge du noyau père désintégré.
- **Loi de conservation du nombre de nucléons :**
La somme des nombres de nucléons du noyau fils et de la particule émise est égale au nombre de nucléons du noyau père désintégré.

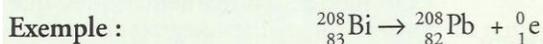
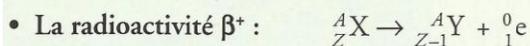
Écrivons l'équation de la réaction nucléaire correspondant aux différentes radioactivités.



La notation ${}_{-1}^0e$ est relative à l'électron.

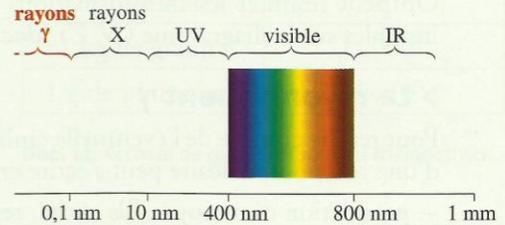
Conservation du nombre de nucléons : $210 = 210 + 0$.

Conservation du nombre de charge : $83 = 84 - 1$.



Conservation du nombre de nucléons : $208 = 208 + 0$.

Conservation du nombre de charge : $83 = 82 + 1$.



Doc. 8 Le rayonnement γ est une onde



Doc. 9 Gamma-graphie de la statue de la déesse Aphrodite, exposée au musée du Louvre. On observe les consolidations intérieures de cette statue de marbre (inserts métalliques). Une gamma-graphie consiste à réaliser un cliché radiographique en utilisant les rayons γ émis par un échantillon radioactif.

• La radioactivité α : ${}^A_Z X \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2} Y + {}^4_2 \text{He}$



Conservation du nombre de nucléons : $211 = 207 + 4$.

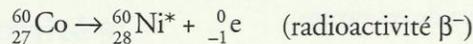
Conservation du nombre de charge : $83 = 81 + 2$.

On peut résumer les transformations subies par les isotopes du bismuth instables sur le diagramme (N, Z) [doc. 10].

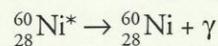
► Le rayonnement γ

Pour rendre compte de l'éventuelle émission d'un rayonnement γ , l'équation d'une réaction nucléaire peut s'écrire en deux temps :

– production d'un noyau fils excité, repéré par un astérisque :

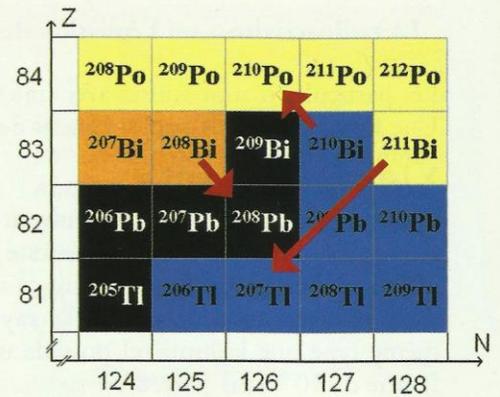


– désexcitation du noyau fils avec production d'un rayonnement γ :



Ce mode d'écriture peut être adopté pour toutes les réactions nucléaires avec émission de rayonnement γ .

► Pour s'entraîner : Ex. 4 et 7



Doc. 10 Les flèches indiquent les transformations subies par les noyaux isotopes du bismuth qui sont instables.

3. Comment évolue la radioactivité au cours du temps ?

3.1 Caractère aléatoire d'une désintégration radioactive

On a mesuré le nombre de désintégrations n d'une source radioactive (par exemple, le césium 137) pendant une durée Δt fixée. En répétant la mesure, on obtient des nombres n différents, sans relation apparente, semblant échapper à toute possibilité de prévision : la désintégration radioactive d'une population de noyaux instables a un caractère aléatoire [doc. 11].

Une série (d'un nombre suffisant) de mesures, correspondant à la même durée Δt , donne une valeur moyenne \bar{n} du nombre de désintégrations ⁽¹⁾. À l'instant t , la source radioactive comporte N noyaux non désintégrés ; à l'instant $t + \Delta t$, elle en contient $N - \bar{n}$.

N est une fonction du temps t ; elle est notée $N(t)$.

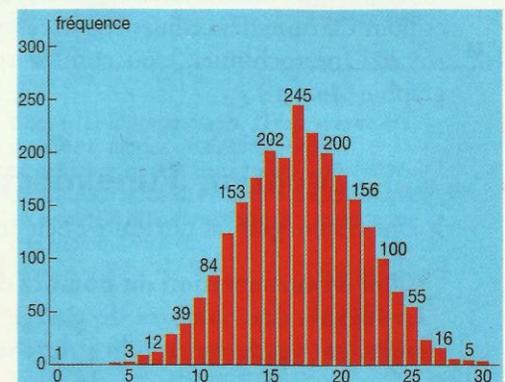
La variation du nombre de noyaux radioactifs de la source est donc :

$$N(t + \Delta t) - N(t) = \Delta N = -\bar{n}$$

Cette valeur est négative, car le nombre de noyaux radioactifs diminue au cours du temps.

3.2 Caractéristiques d'une source radioactive

Une source radioactive, constituée des noyaux radioactifs ${}^A_Z X$, contient N noyaux à la date t . Étudions le nombre moyen de désintégrations par seconde.



Doc. 11 Cet histogramme en bâtons représente les nombres de désintégrations par unité de temps de comptage. Par exemple, on a mesuré, pour une même durée, 202 fois 15 désintégrations par seconde.

(1) Méthode de calcul de la valeur moyenne \bar{n}

On a compté p_i fois le nombre de désintégrations n_i .

Dans l'exemple du document 11, $p_i = 202$ et $n_i = 15$.

On montre, en mathématiques, que :

$$\bar{n} = \frac{\sum p_i \cdot n_i}{\sum p_i}$$

> L'activité d'une source

L'activité A d'une source est le nombre moyen de désintégrations qu'elle produit par seconde :

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

avec A exprimé en becquerel (Bq) et t en seconde (s).

Le tableau du **document 12** donne l'activité [**doc. 13**] de quelques corps.

> La constante radioactive

Le nombre de désintégrations, pour une durée donnée, est proportionnel au nombre N de noyaux encore présents.

Il en est donc de même de l'activité A :

$$A = \lambda \cdot N$$

λ est la constante de radioactivité, caractéristique du radionucléide considéré. Elle s'exprime en s^{-1} .

> La demi-vie

La demi-vie, notée $t_{1/2}$, est la durée au bout de laquelle l'activité d'une source est divisée par deux.

La demi-vie est caractéristique du nucléide radioactif considéré [**doc. 14**].

3.3 Évolution du nombre de noyaux radioactifs au cours du temps

> Loi de décroissance radioactive

Pour de petits intervalles, l'activité d'un échantillon s'écrit :

$$A = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left(\frac{-\Delta N}{\Delta t} \right) = -\frac{dN}{dt}$$

Sachant que : $A = \lambda \cdot N$,

on peut écrire : $-\frac{dN}{dt} = \lambda \cdot N$.

Comme le nombre de noyaux dépend du temps :

$$-\frac{dN(t)}{dt} = \lambda \cdot N(t).$$

La fonction $N(t)$, proportionnelle à sa dérivée $\frac{dN(t)}{dt}$, est une fonction exponentielle :

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

avec N_0 le nombre de noyaux radioactifs à l'instant $t = 0$.

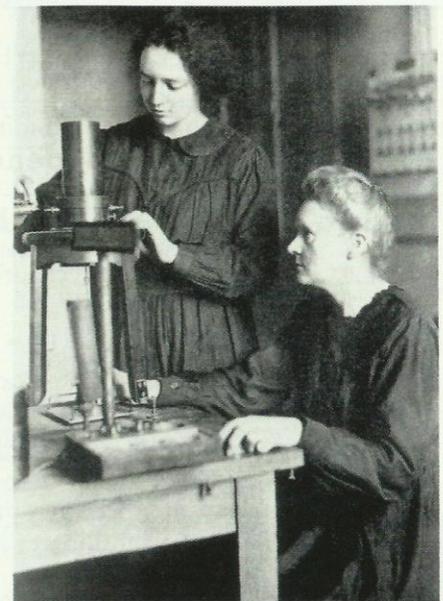
N décroît exponentiellement au cours du temps.

La relation $N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$ exprime la loi de décroissance radioactive.

Source	Activité (en Bq)
corps humain	8 000
1 L d'eau minérale	10
1 L de lait	80
1 kg de granite	1 000
1 g de plutonium	2×10^9

Doc. 12 Activité de quelques sources radioactives.

1 Bq = 1 désintégration par seconde.



Doc. 13 Marie CURIE (1867-1934), prix Nobel de Physique en 1903 et en 1911. Le nom de cette physicienne française, d'origine polonaise, reste attaché à la découverte de la radioactivité et a donné lieu à une unité d'activité : le curie, noté Ci. $1 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Bq}$.

Radionucléide	Demi-vie
^{238}U	$4,5 \times 10^9$ ans
^{14}C	5 570 ans
^{131}I	8,1 jours

Doc. 14 Demi-vies de quelques radionucléides.

➤ Représentation graphique de la loi

Le **document 15** représente l'évolution du nombre de noyaux $N(t)$ radioactifs au cours du temps.

Pour un noyau donné, on peut déterminer deux durées particulières (voir les *difficultés du chapitre*, page 98) : la constante de temps τ et la demi-vie $t_{1/2}$.

- Appliquons la formule $N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$.

La durée $\tau = \frac{1}{\lambda}$ est appelée **constante de temps**. Elle est telle que :

$$N(\tau) = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot \tau} = N_0 \cdot e^{-1} = \frac{N_0}{e}$$

Cette durée est le temps caractéristique de la désintégration ;

- La **demi-vie** $t_{1/2}$ est telle que :

$$N(t_{1/2}) = \frac{N_0}{2}, \text{ soit } \frac{1}{2} = \exp(-\lambda \cdot t_{1/2}).$$

Il vient donc : $\lambda \cdot t_{1/2} = \ln 2$. Soit : $t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \ln 2 \cdot \tau$.

Calculons le nombre de noyaux radioactifs encore présents au bout d'une

durée de $5\tau = \frac{5}{\lambda}$.

$$N(5\tau) = N_0 \cdot e^{-\lambda \left(\frac{5}{\lambda}\right)} = N_0 \cdot e^{-5}; \quad N(5\tau) \approx \frac{N_0}{100}$$

Ainsi, 99 % des noyaux présents à $t = 0$ sont désintégrés.

➤ Paramètres dont dépend l'activité

$$A(t) = -\frac{dN(t)}{dt} = \lambda \cdot N(t) = \lambda \cdot N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$$

Soit A_0 , l'activité initiale de l'échantillon (à l'instant $t = 0$) ; posons $A_0 = \lambda \cdot N_0$; alors :

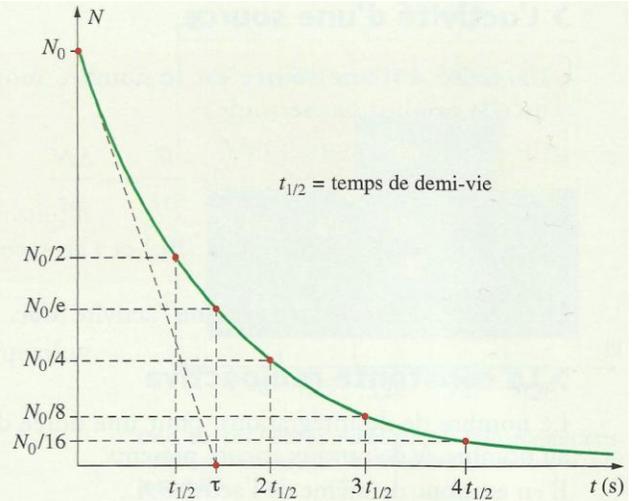
$$A(t) = A_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$$

L'activité d'un échantillon décroît exponentiellement avec le temps [**doc. 16**].

Comme $A(t) = \lambda \cdot N(t)$ et $\lambda = \frac{\ln 2}{t_{1/2}}$, l'activité d'un échantillon à

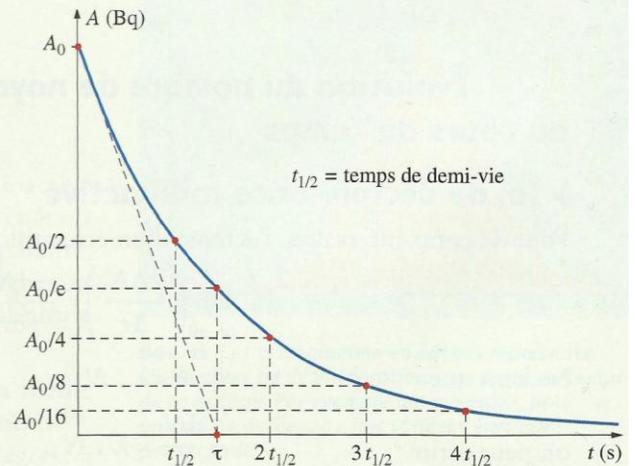
l'instant t est proportionnelle au nombre $N(t)$ de noyaux radioactifs contenus dans l'échantillon et à l'inverse de la demi-vie $t_{1/2}$.

Conséquence : de deux échantillons différents ayant le même nombre initial de noyaux radioactifs, celui qui a la demi-vie la plus courte présente la plus grande activité.



Doc. 15 Loi de décroissance de $N(t)$.

La tangente à la courbe de décroissance à l'instant $t = 0$ coupe l'axe des abscisses au point $t = \tau = \frac{1}{\lambda}$.



Doc. 16 Loi de décroissance de l'activité.

Exercice d'entraînement 1

La demi-vie de l'iode 131 utilisé en médecine est de 8,1 jours. Quelle est l'activité de 1,0 g de ce radionucléide dont la masse molaire est égale à 131 g · mol⁻¹ ?

L'activité est donnée par la relation :

$$A = \lambda \cdot N, \text{ avec } \lambda = \frac{\ln 2}{t_{1/2}}$$

Le nombre de noyaux contenus dans 1,0 g d'iode 131 est :

$$N = \frac{1,0}{131} \times 6,02 \times 10^{23} = 4,5 \times 10^{21}$$

La demi-vie vaut :

$$t_{1/2} = 8,1 \times 24 \times 3600 \text{ s}$$

$$\text{donc : } \lambda = \frac{\ln 2}{t_{1/2}} = 9,90 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$$

Numériquement, on trouve $A = 4,6 \times 10^{15}$ Bq.

➤ Pour s'entraîner : Ex. 10 et 11

4. Comment dater un événement grâce à la radioactivité ?

4.1 Désintégration du carbone 14

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

L'élément carbone comporte principalement deux isotopes : le carbone 12 stable, et, en très petite proportion, le carbone 14 radioactif, émetteur β^- . La valeur de la demi-vie de ce dernier, 5 570 ans, a été déterminée en 1951 par Willard LIBBY (inventeur de la méthode de datation au carbone 14 et prix Nobel en 1960).

Le carbone 14 est produit en permanence dans la haute atmosphère par des réactions entre des noyaux d'azote et des neutrons cosmiques [doc. 17].

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 [doc. 18] :

$$A(t) = A_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}, \quad \text{avec } \lambda = \frac{\ln 2}{t_{1/2}}.$$

4.2 Comment dater un échantillon animal ou végétal ?

Pour dater un échantillon archéologique, il faut :

- mesurer l'activité $A(t)$ d'une masse connue de cet échantillon (par exemple, 1 g) ;
- mesurer l'activité A_0 de la même masse d'un échantillon actuel du même matériau.

Dans l'hypothèse où la radioactivité naturelle est restée constante au cours des 40 000 dernières années, l'âge t de l'échantillon est donné par :

$$A(t) = A_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}, \quad \text{soit } t = -\frac{1}{\lambda} \cdot \ln \frac{A(t)}{A_0} = -\frac{t_{1/2}}{\ln 2} \cdot \ln \frac{A(t)}{A_0}.$$

Compte tenu de la demi-vie du carbone 14 qui est de 5 570 ans, cette méthode ne permet pas de dater des échantillons de plus de 40 000 ans, car l'activité $A(t)$ du carbone 14 est alors trop faible.

Il existe d'autres méthodes de datation mettant en jeu des nucléides ayant des demi-vies beaucoup plus grandes [doc. 19] et permettant donc de dater des échantillons plus anciens, telles les roches [doc. 20].

> Pour s'entraîner : Ex. 13

Exercice d'entraînement 2

L'activité $A(t)$ d'un gramme de charbon ancien, trouvé dans un foyer préhistorique, est $4,0 \times 10^{-2}$ Bq. L'activité A_0 d'un gramme de charbon récent est 0,23 Bq.

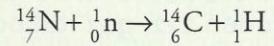
Quel est l'âge du foyer préhistorique ?

Donnée : $t_{1/2} = 5570$ ans.

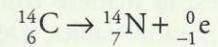
L'âge du morceau de charbon et donc celui du foyer est :

$$t = -\frac{t_{1/2}}{\ln 2} \cdot \ln \frac{A(t)}{A_0}.$$

Numériquement $t = -\frac{5570}{\ln 2} \cdot \ln \left(\frac{4 \times 10^{-2}}{0,23} \right) \approx 14000$ ans.



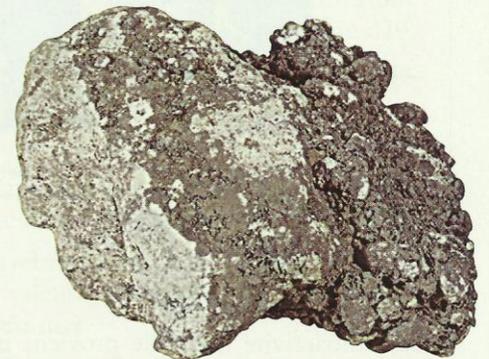
Doc. 17 Équation de la réaction de formation du carbone 14 dans la haute atmosphère.



Doc. 18 Équation de la réaction de désintégration du carbone 14.

Méthode	Validité
carbone 14	40 000 ans
potassium-argon	milliard d'années
rubidium-strontium	milliard d'années
uranium-plomb	milliard d'années

Doc. 19 Les différentes méthodes de datation et leurs domaines de validité.



Doc. 20 Cette météorite lunaire a été datée par radioactivité à 3,97 milliards d'années.