

La modélisation temporelle d'un système nucléaire

Cours

Sommaire

I Le phénomène de radioactivité

(A) Les isotopes instables

(B) Les désintégrations radioactives

1. Le bilan des désintégrations radioactives
2. Les trois types de désintégrations

(C) L'activité radioactive

II L'évolution temporelle d'une population de noyaux

(A) La loi de décroissance radioactive

(B) Le temps de demi-vie

III La radioactivité naturelle

(A) Les noyaux radioactifs naturels

(B) Le principe des datations

IV Les applications de la radioactivité et les moyens de protection

(A) La radioactivité en imagerie médicale

(B) La radioactivité pour le traitement par rayonnements

(C) Les méthodes de protection contre les rayonnements ionisants

I Le phénomène de radioactivité

Le phénomène de radioactivité décrit comment certains isotopes d'éléments chimiques instables se désintègrent spontanément. Le bilan de ces désintégrations est toujours le même : formation d'un nouveau noyau, plus stable, et émission d'une particule et de rayonnement gamma γ . En fonction de la nature de la particule émise, on distingue trois types de désintégrations radioactives. L'activité radioactive, en becquerels, est égale au nombre de désintégrations par seconde.

(A) Les isotopes instables

Du fait de leur composition, certains noyaux sont instables et finissent tôt ou tard par se désintégrer. Le diagramme (N , Z) permet de repérer pour un élément donné les isotopes radioactifs.

DÉFINITION

Radioactivité

La **radioactivité** est le phénomène associé à la désintégration spontanée des noyaux instables.

EXEMPLE

L'atome d'uranium 238 ($^{238}_{92}\text{U}$) est instable. Il se désintègre spontanément. C'est un élément radioactif.

DÉFINITION

Radionucléide

Un **radionucléide** est un noyau instable susceptible de se désintégrer, il est radioactif.

EXEMPLE

L'atome d'uranium 238 est instable. Son noyau est un radionucléide.

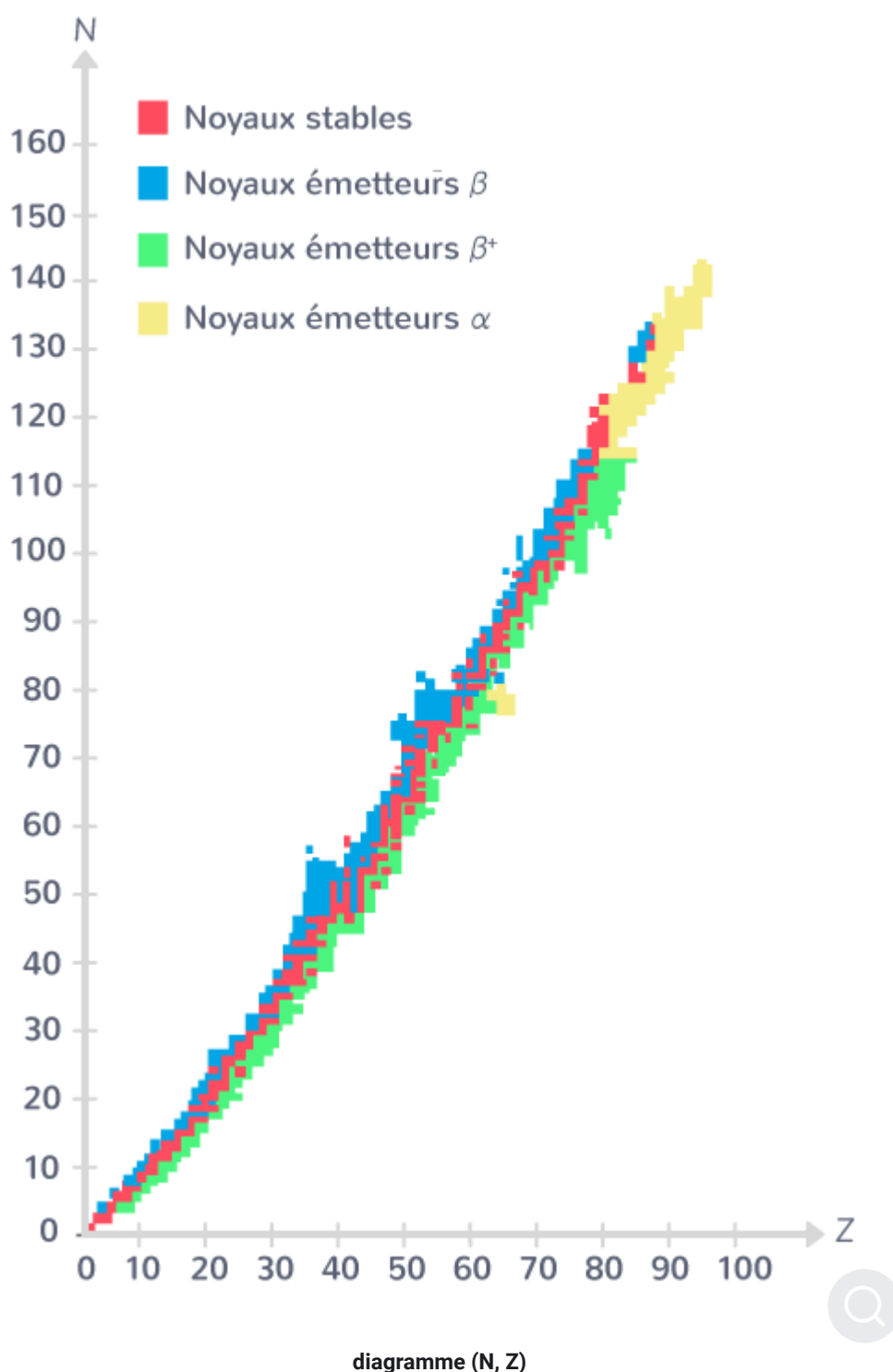


REMARQUE

Parmi les trois-cent-cinquante noyaux naturels, soixante sont instables. Ces soixante noyaux instables sont des éléments radioactifs naturels.

PROPRIÉTÉ

Parmi les isotopes possibles d'un élément, seuls certains sont stables. Les autres, instables, se désintègrent spontanément : ils sont radioactifs. Le diagramme (N, Z) représente le nombre de neutrons N en fonction du nombre de protons Z. Le diagramme (N, Z) permet de visualiser les isotopes stables et instables. On appelle « vallée de la stabilité » l'ensemble des noyaux stables. Le type de désintégration que subissent les noyaux instables dépend de leur position par rapport à la vallée de la stabilité.



REMARQUE

Le diagramme (N, Z) met en évidence que :

- Pour $Z < 20$, les noyaux stables sont ceux qui comportent autant de neutrons que de protons ($N = Z$).
- Pour $Z > 20$, les noyaux stables comportent plus de neutrons que de protons (les points de la courbe rouge sont ceux qui vérifient $N > Z$).

B Les désintégrations radioactives

À partir d'une réaction nucléaire, il est possible d'établir un bilan des désintégrations radioactives. Il existe trois types de désintégrations : α , β^+ et β^- .

1. Le bilan des désintégrations radioactives

Le bilan de toutes les désintégrations est le même : la formation d'un nouveau noyau plus stable et l'émission d'une particule et de rayonnement gamma γ .

DÉFINITION

Désintégration radioactive

La **désintégration radioactive** est une réaction nucléaire spontanée au cours de laquelle un noyau radioactif donne naissance à un noyau plus stable.

EXEMPLE

L'atome d'uranium 238 (${}_{92}^{238}\text{U}$) est instable. Il se désintègre spontanément en thorium 234 (${}_{90}^{234}\text{Th}$) et en hélium 4 (${}_2^4\text{He}$) qui sont des noyaux plus stables. Notons que le nombre atomique et que le nombre de masse se conservent lors de la désintégration.

PROPRIÉTÉ

La radioactivité est un phénomène :

- **spontané** : la radioactivité se déclenche sans intervention extérieure ;
- **aléatoire** : on ne peut pas prévoir l'instant de la désintégration ;
- **inéluctable** : un noyau instable se désintégrera tôt ou tard ;
- **indépendant** de la pression et de la température.

EXEMPLE

Un seul atome d'uranium 238 (${}_{92}^{238}\text{U}$) peut se désintégrer naturellement au bout de quelques secondes ou après quatre milliard d'années. Sa désintégration est aléatoire mais inéluctable.

PROPRIÉTÉ

La désintégration radioactive du noyau instable, appelé noyau père et noté ${}_Z^AX$, s'accompagne de l'émission :

- d'un noyau fils, noté ${}_{Z'}^{A'}Y$. Généralement, le noyau fils est obtenu dans un état excité et il est noté ${}_{Z'}^{A'}Y^*$.
- d'une particule, notée ${}_{Z''}^{A''}P$.
- d'un rayonnement électromagnétique γ (gamma), émis lors de la désexcitation du noyau fils.

Le bilan de la désintégration peut s'écrire :



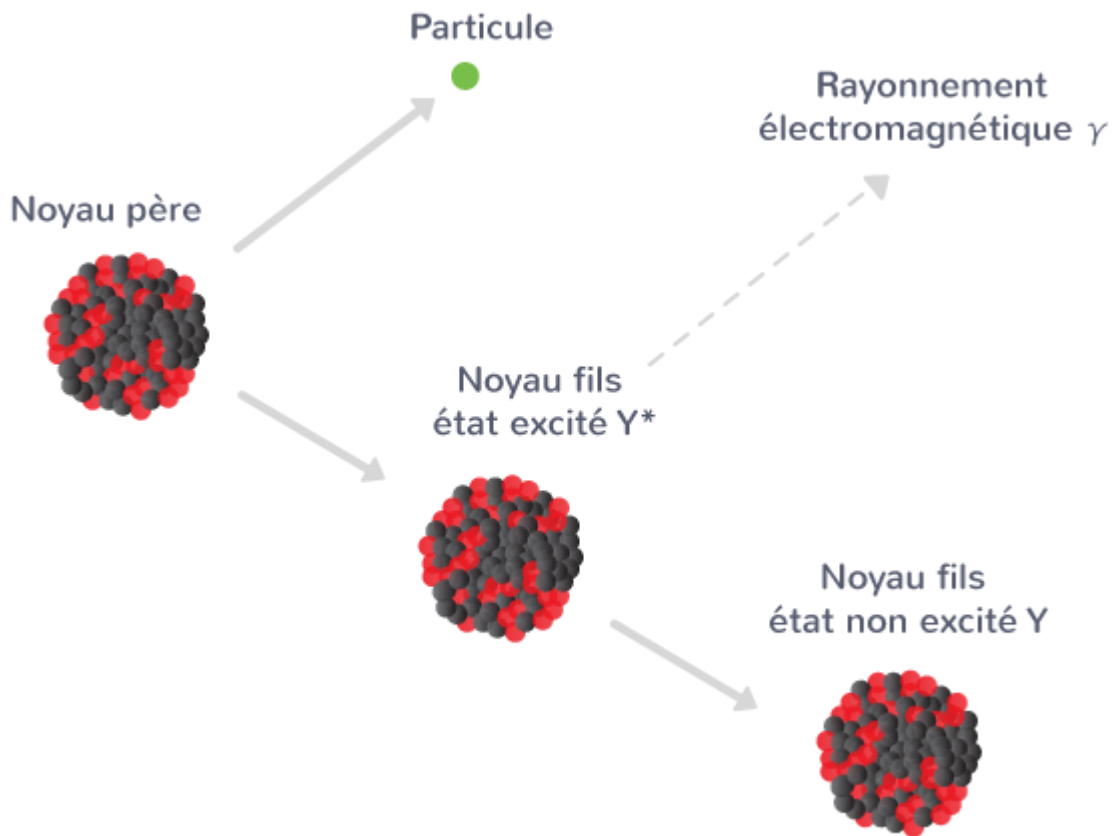
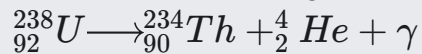


Schéma général d'une désintégration radioactive

EXEMPLE

Le bilan de la désintégration de l'uranium 238 est donné par la réaction nucléaire suivante :



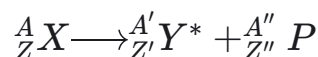
Dans cette réaction :

- ${}_{90}^{234}\text{Th}$ est le noyau fils ;
- ${}_2^4\text{He}$ est la particule ;
- γ est le rayonnement électromagnétique émis.



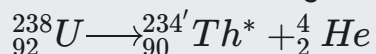
REMARQUE

Sachant qu'en se désexcitant le noyau fils émet un rayonnement γ , le bilan d'une désintégration peut également s'écrire en indiquant que le noyau fils est formé dans un état excité :



EXEMPLE

Le bilan de la désintégration de l'uranium 238 est donné par la réaction nucléaire suivante :



Où ${}_{90}^{234'}\text{Th}^* \longrightarrow {}_{90}^{234}\text{Th} + \gamma$ est la réaction d'émission de γ .

Lois de conservation du nombre de masse et du nombre de charge (loi de Soddy)

Lors d'une désintégration nucléaire, il y a conservation du nombre de charge Z et du nombre de masse (de nucléons) A .

Soit la réaction nucléaire d'une désintégration suivante :



Les lois de Soddy montrent que :

$$A = A' + A''$$

$$Z = Z' + Z''$$

EXEMPLE

L'atome d'uranium se désintègre spontanément en thorium 234 (${}^{234}_{90}\text{Th}$) et en hélium 4 (${}^4_2\text{He}$) qui sont des noyaux plus stables.

On a :

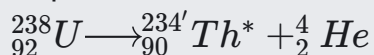
- $A_{\text{Th}} = 234$ et $A_{\text{He}} = 4$
- $Z_{\text{Th}} = 90$ et $Z_{\text{He}} = 2$

D'après les lois de Soddy, on a :

- $A_{\text{Th}} + A_{\text{He}} = 234 + 4 = 238 = A_U$
- $Z_{\text{Th}} + Z_{\text{He}} = 90 + 2 = 92 = Z_U$

On a bien conservation du nombre de charge et du nombre de masse.

On peut écrire la réaction nucléaire suivante :



2. Les trois types de désintégrations

On distingue trois types de désintégrations radioactives en fonction de la nature de la particule émise : α , β^+ et β^- .

PROPRIÉTÉ

Types de désintégration	Émissions	Noyaux concernés	Exemples
β^-	Émission d'un électron, noté ${}^0_{-1}\text{e}$ par transformation d'un neutron en proton	Ceux qui ont trop de neutrons	${}^{24}_{11}\text{Na} \longrightarrow {}^{24}_{12}\text{Mg}^* + {}^0_{-1}\text{e}$
β^+	Émission d'un positon (antiparticule de l'électron), noté ${}^0_1\text{e}$	Ceux qui ont trop de protons	${}^{19}_{10}\text{Ne} \longrightarrow {}^{19}_9\text{F}^* + {}^0_1\text{e}$
α	Le noyau se scinde pour émettre un noyau d'hélium noté ${}^4_2\text{He}$	Ceux qui sont trop lourds	${}^{238}_{92}\text{U} \longrightarrow {}^{234}_{90}\text{Th}^* + {}^4_2\text{He}$

Les trois types de désintégrations

C L'activité radioactive

L'activité radioactive d'un échantillon radioactif correspond au nombre de désintégrations radioactives se déroulant chaque seconde dans un échantillon. Elle est liée au nombre de radionucléides.

DÉFINITION

Activité radioactive

L'**activité radioactive** notée A et exprimée en becquerels (Bq) est égale au nombre de désintégrations radioactives par seconde se produisant dans un échantillon radioactif.

EXEMPLE

L'activité radioactive d'un adulte est d'environ 1 000 Bq. Cela signifie que son corps contient naturellement des radionucléides et que chaque seconde 1 000 désintégrations radioactives se produisent.

FORMULE

Relation entre l'activité radioactive et le nombre de radionucléides

L'activité radioactive A d'un échantillon est proportionnelle au nombre de radionucléides N qu'il contient :

$$A_{(\text{Bq})} = \lambda_{(\text{s}^{-1})} \times N$$

λ est la **constante radioactive** du radionucléide considéré.

EXEMPLE

La constante radioactive de l'iode 131 est $\lambda = 1,0 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$. L'activité radioactive d'un échantillon contenant $2,0 \times 10^7$ noyaux d'iode 131 est :

$$A_{(\text{Bq})} = \lambda_{(\text{s}^{-1})} \times N$$

$$A = 1,0 \times 10^{-6} \times 2,0 \times 10^7$$

$$A = 20 \text{ Bq}$$

II L'évolution temporelle d'une population de noyaux

Même si le phénomène de désintégration radioactive est aléatoire, il est possible de prévoir l'évolution temporelle d'un grand nombre de noyaux radioactifs. Cette évolution temporelle est donnée par la loi de décroissance radioactive. L'évolution des noyaux radioactifs diminue de moitié à un intervalle de temps constant appelé le « temps de demi-vie » $t_{1/2}$.

A La loi de décroissance radioactive

La loi de décroissance radioactive donne le nombre de noyaux radioactifs restant dans un échantillon à un instant t . La loi de décroissance radioactive dépend du nombre initial de noyaux et d'une constante radioactive qui dépend du noyau radioactif.

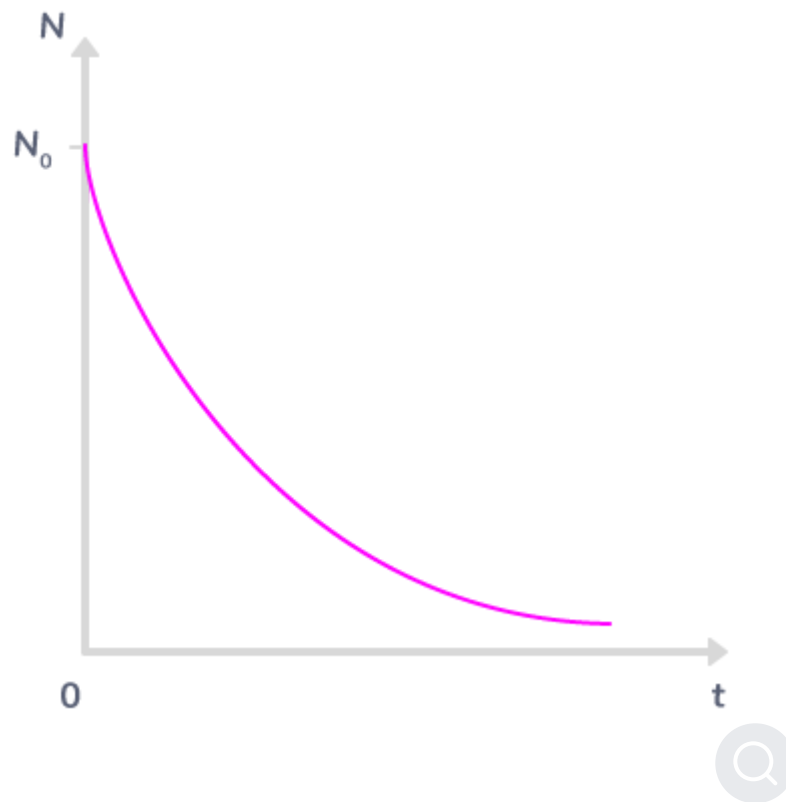
LOI

Loi de décroissance radioactive

La population de noyaux radioactifs dans un échantillon diminue de manière exponentielle. Si l'échantillon contient initialement N_0 noyaux, alors, à une date t , le nombre de noyaux restant est :

$$N_{(t)} = N_0 \times e^{-\lambda_{(\text{s}^{-1})} \times t_{(\text{s})}}$$

λ est une caractéristique de l'élément chimique, appelée constante radioactive.



Loi de décroissance radioactive

EXEMPLE

Le noyau d'iode 131 (${}^{131}_{53}\text{I}$) est un émetteur de type β^- dont la constante radioactive est $\lambda = 1,0 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$. Un échantillon qui contient initialement $N_0 = 2,0 \times 10^7$ noyaux d'iode 131, en contiendra, au bout d'une durée de quatre jours ($t = 4 \text{ jours} = 4 \times 24 \times 3\,600$ secondes) :

$$N_{(4 \text{ jours})} = 2,0 \times 10^7 \times e^{(-1,0 \times 10^{-6} \times 4 \times 24 \times 3600)}$$

$$N_{(4 \text{ jours})} = 1,4 \times 10^7$$

Après 4 jours, il restera $1,4 \times 10^7$ noyau d'iode 131.

DÉMONSTRATION

Soit un échantillon contenant N noyaux instables. La probabilité qu'un noyau se désintègre chaque seconde est égale à la constante radioactive de l'élément considéré : λ . Le nombre de noyaux qui se désintègrent ΔN pendant un petit intervalle de temps Δt est proportionnel au nombre de noyaux présents N et à la durée Δt :

$$\Delta N = \lambda \times N \times \Delta t$$

Si on fait tendre Δt vers 0, on a :

$$dN = -\lambda \times N \times dt$$

Le signe « - » vient du fait que le nombre N diminue au cours du temps. De ce fait, la dérivée temporelle du nombre de noyaux instables est négative.

On obtient l'équation différentielle du premier ordre suivante :

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda \times N$$

Avec la condition $N = N_0$ pour $t = 0$, la solution de cette équation différentielle est :

$$N_{(t)} = N_0 \times e^{-\lambda_{(s^{-1})} \times t_{(s)}}$$



L'activité radioactive suit la même loi de décroissance exponentielle car elle est proportionnelle au nombre de radionucléides.

REMARQUE

EXEMPLE

Puisque :

- $N_{(t)} = N_0 \times e^{-\lambda_{(s^{-1})} \times t_{(s)}}$
- $A_{(t)} = \lambda \times N_{(t)}$

On a, avec $A_0 = \lambda \times N_0$:

$$A_{(t)} = A_0 \times e^{-\lambda_{(s^{-1})} \times t_{(s)}}$$

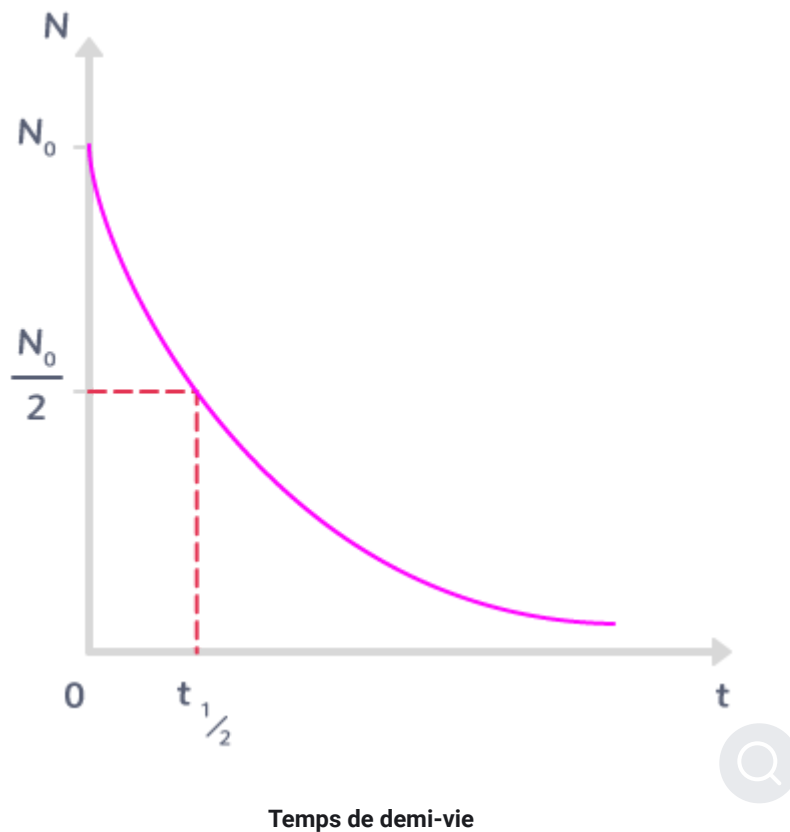
B Le temps de demi-vie

Le temps de demi-vie $t_{1/2}$ d'un noyau radioactif est la durée au bout de laquelle le nombre de noyaux radioactifs dans un échantillon est divisé par deux.

DÉFINITION

Temps de demi-vie

Le temps de demi-vie, ou période radioactive, noté $t_{1/2}$, est la durée au bout de laquelle le nombre de noyaux radioactifs contenus initialement dans un échantillon de matière est divisé par deux.



EXEMPLE

Le temps de demi-vie du carbone 14 est de 5 570 ans. Donc, au bout de cette période, un échantillon quelconque de carbone 14 aura perdu la moitié de ses radionucléides.

FORMULE

Relation entre temps de demi-vie et constante radioactive

Le temps de demi-vie $t_{1/2}$ et la constante radioactive λ d'un radionucléide sont liés par la relation suivante :

$$t_{1/2} \text{ (s)} = \frac{\ln(2)}{\lambda \text{ (s}^{-1}\text{)}}$$

EXEMPLE

La constante radioactive de l'iode 131 est $\lambda = 1,0 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$. De ce fait, le temps de demi-vie de ce radionucléide est :

$$t_{1/2} \text{ (s)} = \frac{\ln(2)}{\lambda \text{ (s}^{-1}\text{)}}$$

$$t_{1/2} = \frac{\ln(2)}{1,0 \times 10^{-6}}$$

$$t_{1/2} = 693\,147 \text{ s} = 8 \text{ jours}$$

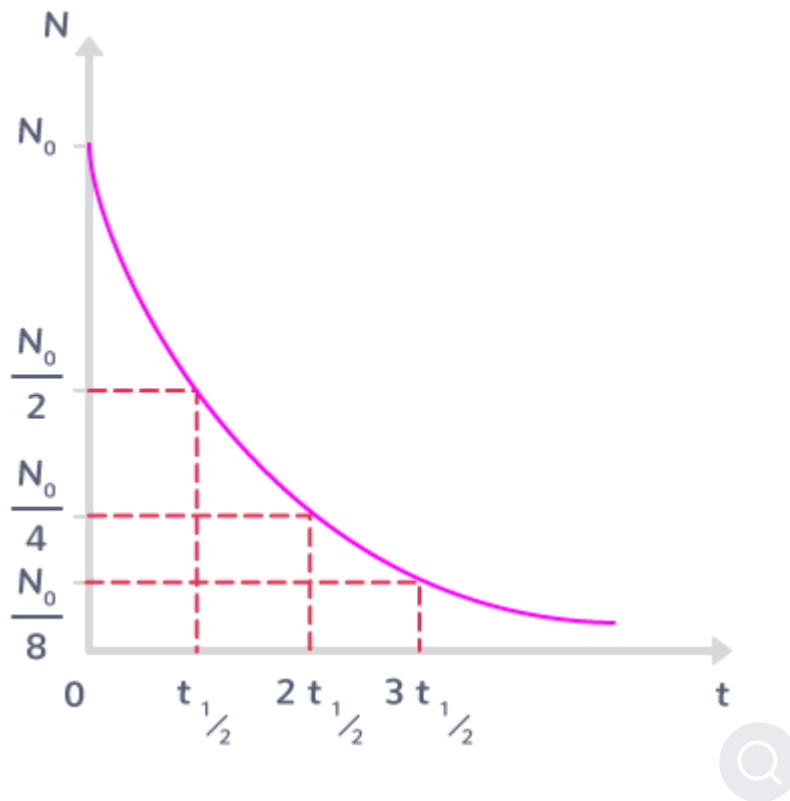


REMARQUE

Il est impossible de connaître le moment où un noyau radioactif va se désintégrer, mais on peut prévoir l'évolution d'un grand nombre de noyaux radioactifs à l'aide de leur temps de demi-vie $t_{1/2}$.

Dans un échantillon contenant initialement un nombre N_0 de noyaux radioactifs, le nombre de noyaux radioactifs encore présents dans un échantillon au bout d'une durée $t = n \times t_{1/2}$ est :

$$N = \frac{N_0}{2^n}$$



Décroissance exponentielle et temps de demi-vie successifs

EXEMPLE

Soit $N_0 = 8\,000$, le nombre initial de carbone 14. Le temps de demi-vie du carbone 14 est de 5 570 ans. Au bout de $2 \times 5\,570 = 11\,140$ ans, donc $n = 2$ et le nombre de noyaux de carbone 14 est :

$$N = \frac{N_0}{2^n}$$

$$N = \frac{8\,000}{2^2}$$

$$N = \frac{8\,000}{4}$$

$$N = 2\,000$$



La radioactivité naturelle

On peut trouver certains noyaux radioactifs dans l'environnement : c'est ce que l'on appelle la radioactivité naturelle. Ces noyaux radioactifs peuvent être utilisés pour dater certains systèmes qui étaient en

équilibre avec leur environnement.

A Les noyaux radioactifs naturels

Il existe dans la nature des noyaux radioactifs (ou radionucléides). Les plus communs sont le gaz radon 222 et le carbone 14.

Sources	Atmosphère	Roches granitiques	Le sol (et les aliments)
Radionucléides	Radon 222 ($^{222}_{86}Rn$)	Thorium 232 ($^{232}_{90}Th$)	Potassium 40 ($^{40}_{19}K$)
	Carbone 14 ($^{14}_6C$)	Uranium 235 ($^{235}_{92}U$)	
		Uranium 238 ($^{238}_{92}U$)	

B Le principe des datations

La décroissance des radionucléides naturels permet de dater certains systèmes qui étaient en équilibre avec leur environnement. La datation s'effectue en comparant le taux actuel de radionucléides et le taux, connu, lorsqu'il était en équilibre avec l'environnement.

DÉFINITION

Datation radiométrique

Une **datation radiométrique** est une méthode de datation absolue utilisant la variation régulière au cours du temps de la quantité de radionucléides dans certains corps.

EXEMPLE

Au moment de leur cristallisation, de nombreux minéraux contiennent du potassium dont une faible proportion est radioactive : le potassium 40 (^{40}K). La désintégration de cet élément produit de l'argon 40 (^{40}Ar). La mesure du nombre d'atomes d'argon 40 permet de déterminer la date de cristallisation du minéral.

PROPRIÉTÉ

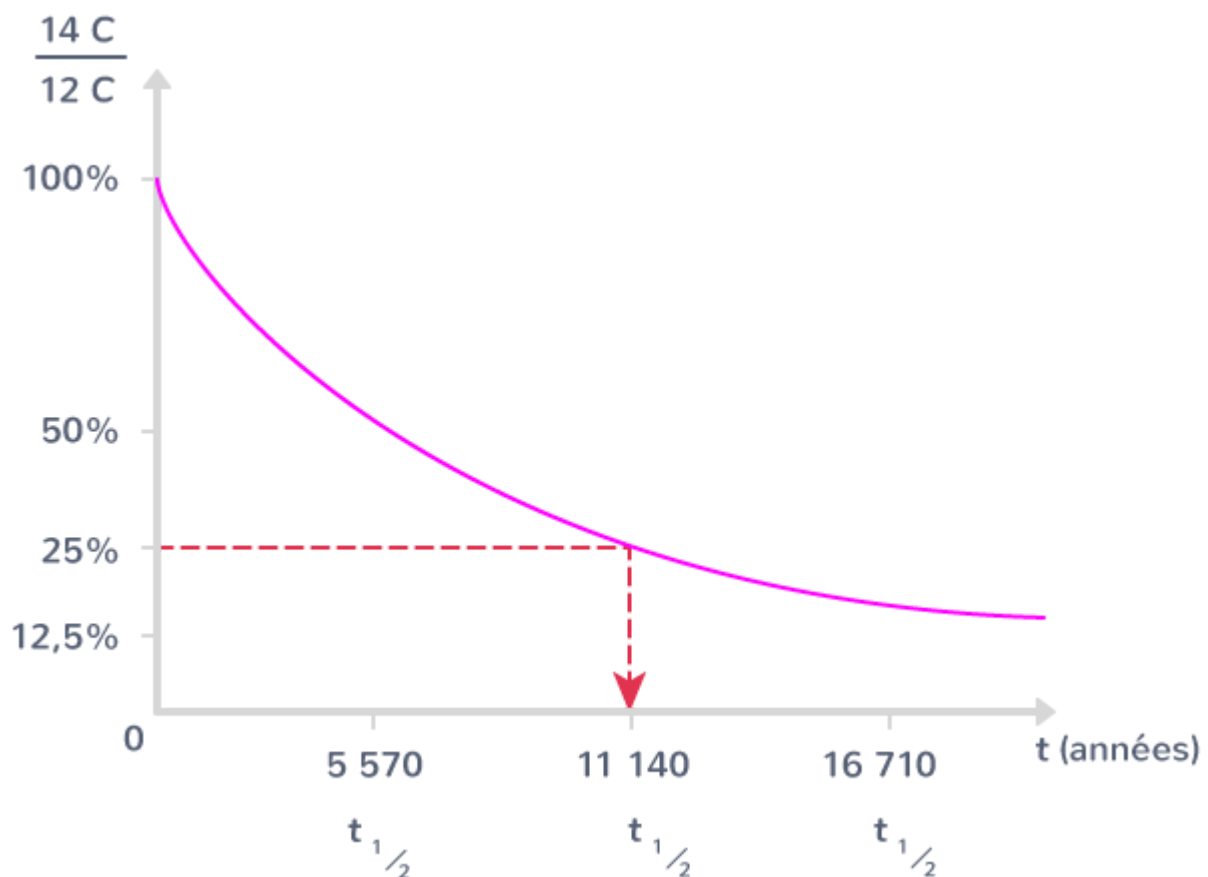
Le nombre de radionucléides présent dans un échantillon de matière diminue au fur et à mesure que les noyaux se désintègrent. À l'origine, l'échantillon est un système en équilibre avec l'environnement. À une certaine date, l'échange avec l'environnement s'arrête car l'échantillon se retrouve isolé. Il est possible de dater la fin de cet échange en comparant le taux de radionucléides présent dans l'échantillon au taux naturel actuel, ou connu lorsque l'échantillon était en équilibre avec l'environnement.

À partir de la courbe de décroissance exponentielle du radionucléide considéré, la datation du système peut se faire graphiquement.

EXEMPLE

On mesure dans un organisme mort un taux de $\frac{^{14}C}{^{12}C} = 25\%$. En plaçant ce taux sur la courbe de décroissance exponentielle du taux de carbone 14 sur carbone 12, on peut lire la durée qui sépare la

mesure de ce taux à la date de mort de l'organisme.



Datation de la mort d'un organisme à l'aide du carbone 14

D'après le graphique, cela fait 11 140 ans que le taux de carbone 14 sur carbone 12 diminue. La mort de cet organisme date de 11 140 ans.



REMARQUE

Généralement, le nombre de radionucléides est déterminé à partir de la mesure de l'activité radioactive de l'échantillon de matière.

PROPRIÉTÉ

Les méthodes de datation sont valides pour des durées égales à une dizaine de demi-vies du radionucléide considéré. Après cette durée, le nombre de noyaux radioactifs encore présents est trop faible pour être mesuré avec précision.

EXEMPLE

Le temps de demi-vie du carbone 14 étant de 5 570 ans. La durée maximale pouvant être déterminée par datation au carbone 14 est de $10 \times 5\,570 = 55\,700$ années.

IV Les applications de la radioactivité et les moyens de protection

Le phénomène de radioactivité est utilisé dans le domaine médical, en imagerie ou en traitement des maladies par rayonnement. Le danger des désintégrations radioactives est lié aux rayonnements

ionisants qu'elles émettent, mais il existe des moyens de s'en protéger.

A La radioactivité en imagerie médicale

Les rayons γ (gamma) émis par les désintégrations nucléaires traversent facilement la matière. On peut utiliser le rayonnement γ pour de l'imagerie médicale.

PROPRIÉTÉ

Des techniques d'imagerie médicale utilisent les rayonnements provenant des désintégrations radioactives.

EXEMPLE

Lors d'une tomographie par émission de positons (ou « PET-scan »), le produit radioactif est principalement absorbé par les cellules très actives, comme les tumeurs ou celles qui sont le siège d'une infection. Cette technique permet de visualiser les parties du corps présentant ces anomalies.

B La radioactivité pour le traitement par rayonnements

Les désintégrations radioactives émettent des rayonnements ionisants. Ces rayonnements sont utilisés pour détruire des cellules cancéreuses.

PROPRIÉTÉ

Les rayonnements émis par une désintégration radioactive sont des rayonnements ionisants. Les rayonnements ionisants ont l'énergie suffisante pour interagir avec la matière et peuvent être nocifs voire mortels pour les organismes vivants.

EXEMPLE

Après l'accident de Tchernobyl, les plus graves conséquences sur la santé ont été observées chez les premiers intervenants sur le site de la centrale nucléaire. En Biélorussie, en Ukraine et en Russie, l'accident a provoqué de nombreux cancers de la thyroïde chez les personnes exposées.



REMARQUE

Les rayonnements ionisants peuvent modifier le noyau des cellules vivantes et provoquer des cancers, des malformations, etc.

PROPRIÉTÉ

Des traitements médicaux exploitent des rayonnements ionisants contrôlés pour soigner des maladies, comme les cancers.

EXEMPLE

La radiothérapie consiste à irradier, de manière ciblée, des cellules tumorales avec des rayonnements ionisants. Cette technique détruit les cellules cancéreuses et limite leur prolifération.

C Les méthodes de protection contre les rayonnements ionisants

Le danger de la radioactivité est lié au rayonnement émis. Certaines règles simples permettent de s'en protéger. Pour se protéger on peut limiter la durée d'exposition, s'éloigner de la source et utiliser des écrans suffisamment denses.

PROPRIÉTÉ

Face à un risque d'exposition à des rayonnements ionisants, des règles élémentaires permettent de limiter les risques :

- diminuer au maximum la durée d'exposition aux rayonnements ;
- s'éloigner de la source des rayonnements, car l'intensité des rayonnements ionisants diminue avec la distance ;
- placer entre la source et la personne un écran de protection suffisamment dense pour absorber la majorité des rayonnements.

EXEMPLE

De nombreux professionnels sont exposés aux rayonnements ionisants : les travailleurs du nucléaire et tous ceux confrontés à la radiologie. Ces personnes professionnellement exposées aux rayonnements ionisants suivent les règles de protection et peuvent porter des écrans en plomb dans leurs vêtements.



REMARQUE

Les professionnels du nucléaire portent également un appareil appelé dosimètre. Un dosimètre mesure la quantité de rayonnements ionisants auxquels un individu est exposé. Ce dispositif permet de vérifier que la dose reçue ne dépasse pas les normes en vigueur. Les professionnels du nucléaire font l'objet d'un suivi sanitaire spécifique.