

Thème : Transformation nucléaire
Cours 27 : Stabilité et instabilité des noyaux – Radioactivité
(version professeur)

B.O. 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. Radioactivité naturelle ; applications à la datation. Applications dans le domaine médical ; protection contre les rayonnements ionisants.

I. Stabilité et instabilité des noyaux : Diagramme (N, Z)

1. Composition d'un noyau atomique. (Rappels).

Représentation symbolique du noyau A_ZX

- le noyau d'hélium 4 a pour représentation symbolique ${}^4_2\text{He}$, il est composé de 2 protons et de 2 neutrons.
- le noyau de radium 222 a pour représentation symbolique ${}^{222}_{88}\text{Ra}$, il est composé de 88 protons et de 134 neutrons.

Question : Quelle est la représentation symbolique du noyau constitué de 92 protons et de 146 neutrons ?

Classification périodique :

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII	XIV	XV	XVI	XVII	XVIII
H 1																	He 2
Li 3	Be 4											B 5	C 6	N 7	O 8	F 9	Ne 10
Na 11	Mg 12											Al 13	Si 14	P 15	S 16	Cl 17	Ar 18
K 19	Ca 20	Sc 21	Ti 22	V 23	Cr 24	Mn 25	Fe 26	Co 27	Ni 28	Cu 29	Zn 30	Ga 31	Ge 32	As 33	Se 34	Br 35	Kr 36
Rb 37	Sr 38	Y 39	Zr 40	Nb 41	Mo 42	Tc 43	Ru 44	Rh 45	Pd 46	Ag 47	Cd 48	In 49	Sn 50	Sb 51	Te 52	I 53	Xe 54
Cs 55	Ba 56	La 57-71	Hf 72	Ta 73	W 74	Re 75	Os 76	Ir 77	Pt 78	Au 79	Hg 80	Tl 81	Pb 82	Bi 83	Po 84	At 85	Rn 86
Fr 87	Ra 88	Ac 89-103															
Lanthanides			La 57	Ce 58	Pr 59	Nd 60	Pm 61	Sm 62	Eu 63	Gd 64	Tb 65	Dy 66	Ho 67	Er 68	Tm 69	Yb 70	Lu 71
Actinides			Ac 89	Th 90	Pa 91	U 92	Np 93	Pu 94	Am 95	Cm 96	Bk 97	Cf 98	Es 99	Fm 100	Md	No	Lw

Réponse : il s'agit du noyau d'uranium de représentation symbolique ${}^{238}_{92}\text{U}$

2. Isotopie.

Des isotopes sont des noyaux qui ont le même nombre de charges Z, mais des nombres de nucléons différents. (C'est à dire un nombre de neutrons différents).

Autres exemples : les noyaux ${}^{222}_{88}\text{Ra}$ et ${}^{226}_{88}\text{Ra}$ sont des isotopes.

3. Domaines de stabilité et d'instabilité des noyaux : Etude du diagramme (N, Z).

3.1 Pourquoi certains noyaux sont-ils instables ?

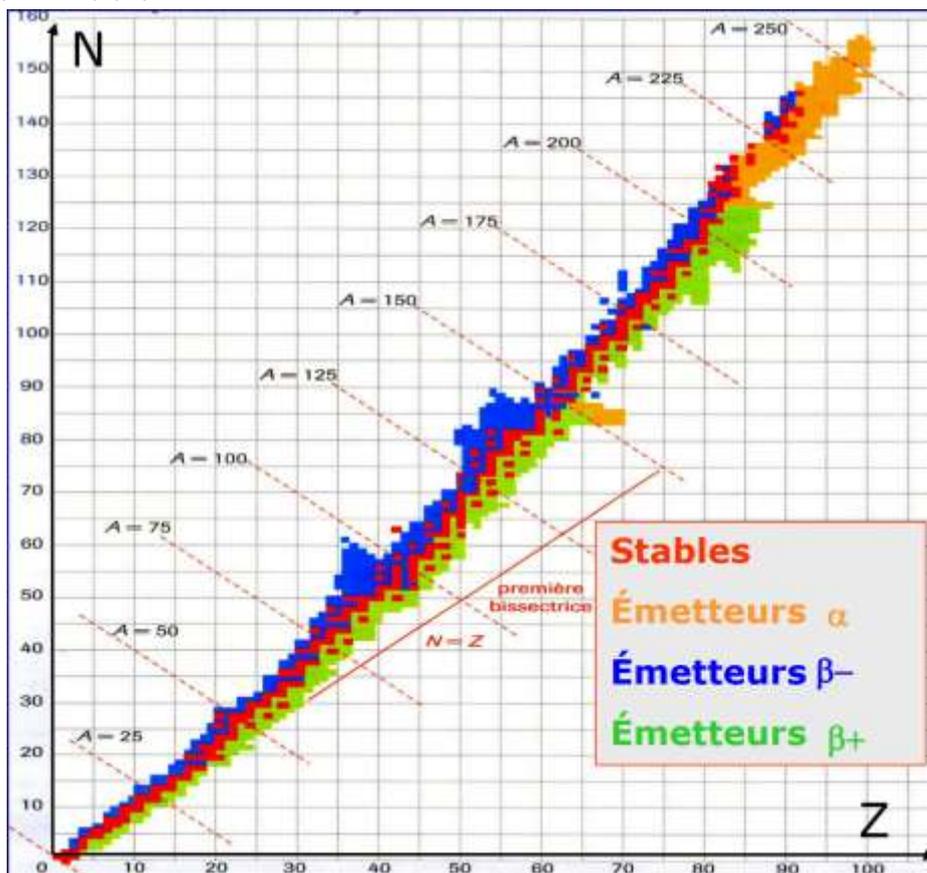
La stabilité des noyaux résulte de la compétition entre deux interactions :

- L'interaction **forte** : Elle est attractive, intense à courte distance et active sur les noyaux tels que $N = Z$
- L'interaction **coulombienne** (électrique) entre les protons : Elle est répulsive, agit à plus longue distance et est 10 fois moins active que l'interaction forte.

Lorsque A augmente, l'interaction coulombienne (entre les protons), bien que moins intense finit par l'emporter sur l'interaction forte.

Les forces répulsives sont ainsi plus intenses : il y a désintégration du noyau.

3.2. Etude du diagramme (N, Z).



On distingue 4 domaines différents :

- Le domaine en rouge représente les éléments chimiques stables (vallée de la stabilité)

On constate que pour des noyaux légers ($A < 20$) les noyaux stables sont sur la bissectrice.

Au-delà ($A > 20$), les noyaux stables s'écartent de cette bissectrice. Ils ont besoin de plus de neutrons que de protons pour rester stables.

- Le domaine en bleu représente les noyaux instables ayant un excès de neutrons.
- Le domaine en vert représente les noyaux instables ayant un excès de protons
- Le domaine en orange représente les noyaux instables ayant un excès de masse

L'instabilité des noyaux entraînent une désintégration de ceux-ci.

II. Les différents types de radioactivité.

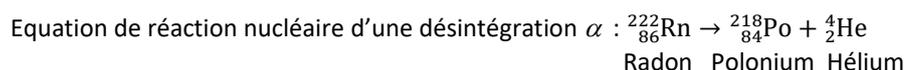
Selon leurs positions dans le diagramme (N, Z), les noyaux se désintégreront de manières différentes.

1. La radioactivité alpha α (émission d'un noyau d'hélium 4)

Les noyaux appartenant au domaine des noyaux instables ayant un **excès de masse**, subiront une désintégration de type α (alpha).

Question : En utilisant la classification périodique des éléments et en indiquant les lois de conservation du nombre de nucléons et de la charge électrique, écrire l'équation de réaction nucléaire d'une désintégration alpha du radon Rn.

Réponse :



On constate que les lois de conservation sont vérifiées :

- Conservation du nombre de nucléons : $222 = 218 + 4$
- Conservation de la charge électrique : $86 = 84 + 2$

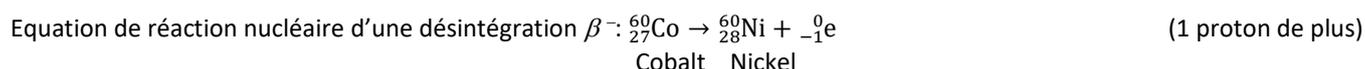
Le rayonnement est peu pénétrant. Il est arrêté par une feuille de papier ou quelques centimètres d'épaisseur d'air. Ce sont les poussières radioactives inhalées qui sont dangereuses.

2. La radioactivité beta moins β^- (émission d'un électron ${}_{-1}^0e$)

Les noyaux appartenant au domaine des noyaux instables ayant un **excès de neutrons**, subiront une désintégration de type β^-

Question : En utilisant la classification périodique des éléments et en indiquant les lois de conservation du nombre de nucléons et de la charge électrique, écrire l'équation de réaction nucléaire d'une désintégration beta moins du Cobalt ${}_{27}^{60}\text{Co}$

Réponse :



On constate que les lois de conservation sont vérifiées :

- Conservation du nombre de nucléons : $60 = 60 + 0$
- Conservation de la charge électrique : $27 = 28 + (-1)$

Lors de la désintégration β^- , un neutron subit la transformation suivante : ${}_0^1n \rightarrow {}_1^1p + {}_{-1}^0e$

Le rayonnement β^- est assez pénétrant. Il est arrêté par une feuille métallique.

3. La radioactivité beta plus β^+ (émission d'un positon 0_1e)

Le positon est l'antiparticule de l'électron son symbole est 0_1e
 Cette radioactivité bêta est moins fréquente que la radioactivité beta moins. Elle n'affecte que les noyaux artificiels.
 Les noyaux appartenant au domaine des noyaux instables ayant un **excès de protons**, subiront une désintégration de type β^+

Question : En utilisant la classification périodique des éléments et en indiquant les lois de conservation du nombre de nucléons et de la charge électrique, écrire l'équation de réaction nucléaire d'une désintégration alpha du phosphore ${}^{30}_{15}\text{P}$

Réponse :



Phosphore Silicium

On constate que les lois de conservation sont vérifiées :

- Conservation du nombre de nucléons : $30 = 30 + 0$
- Conservation de la charge électrique : $15 = 14 + 1$

4. La radioactivité gamma γ (ou désexcitation γ)

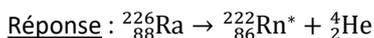
La radioactivité g ne s'accompagne pas d'émission de particule matérielles. ${}^A_Z\text{X}^* \rightarrow {}^A_Z\text{X}$

Si le noyau produit par l'une des trois désintégrations précédentes α , β^- et β^+ , est dans un état excité (instable), il peut retrouver son état fondamental (stable) en émettant un rayonnement γ .

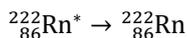
L'état excité d'un noyau se note avec une étoile * :

Lors de la désintégration du Radium ${}^{222}_{88}\text{Ra}$ par émission d'une particule α , il produit un noyau dans un état excité.

Question : Ecrire l'équation de réaction nucléaire de la désintégration du noyau de radium.

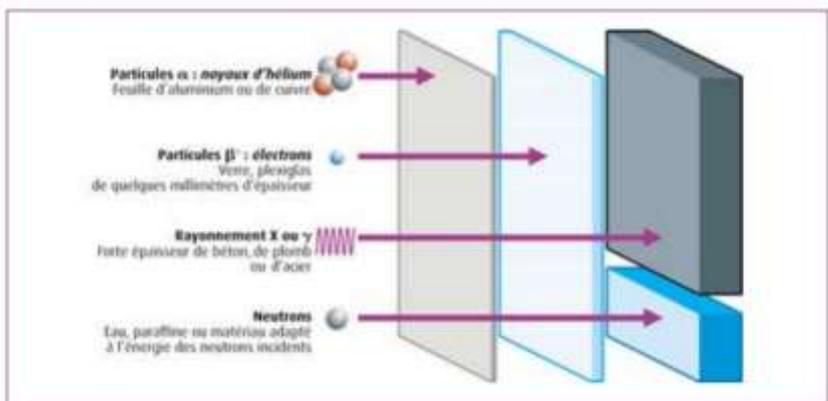


Le radon ainsi formé se désexcite spontanément en émettant un rayonnement gamma.



Le rayonnement radioactif γ est très pénétrant. Il faut une plaque de plomb de 20 cm d'épaisseur pour l'arrêter.

Document : Matériaux pour la protection contre les rayonnements ionisants.



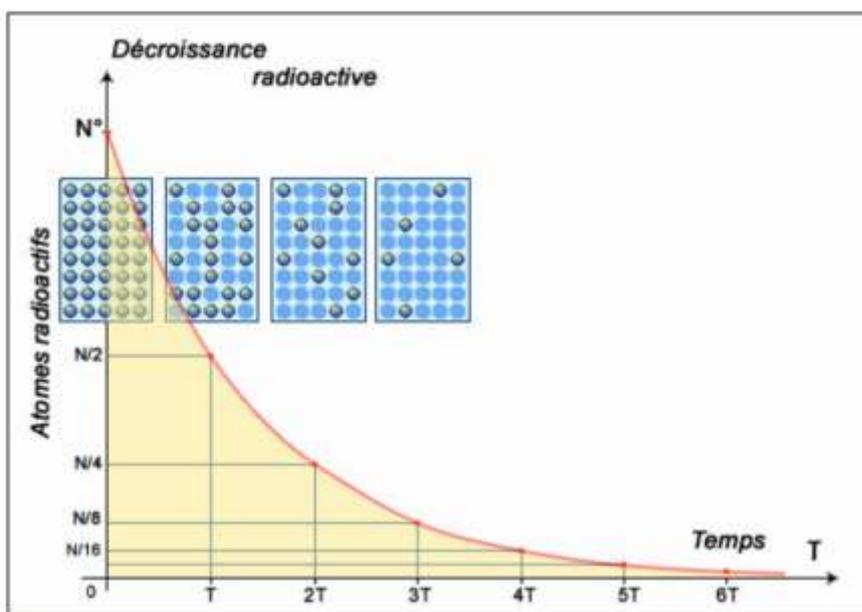
I. Évolution temporelle d'une population de noyaux radioactifs

1. Décroissance radioactive.

Document 1 :

La loi de décroissance radioactive est une loi fondamentale de la radioactivité. Quand un noyau émet une particule alpha ou un électron bêta, il se transforme : c'est ainsi que du radium devient du radon, du tritium de l'hélium ! De ce fait, le nombre d'atomes de l'espèce radioactive diminue inexorablement. Il en va de même du nombre de désintégrations par seconde, que l'on appelle activité de la source radioactive, et du nombre de rayonnements émis. Nombre d'atomes radioactifs, nombre de désintégrations, nombre de rayonnements émis marchent de concert. Ils décroissent de la même façon !

Source : <https://www.laradioactivite.com/site/pages/PeriodeActivite.htm>



DemiVie

Le nombre de noyaux d'un échantillon radioactif diminue de moitié au bout d'un temps caractéristique appelé "période radioactive". Cette division par deux ne dépend pas de l'âge des noyaux. Au bout de deux périodes, le nombre de noyaux est divisé par quatre, au bout de trois périodes par huit, etc... Cette loi de décroissance en fonction du temps est dite exponentielle. La période est, avec la nature des rayonnements émis, la principale caractéristique d'un élément radioactif.

©IN2P3

Source : <https://www.laradioactivite.com/site/pages/PeriodeActivite.htm>

Question : Indiquer sur le schéma comment déterminer le temps de demi-vie $t_{1/2}$ (anciennement appelée période radioactive)

Réponse : Le temps de demi-vie est la durée correspondant à la désintégration de la moitié des noyaux radioactifs initialement présents dans l'échantillon. Sur le graphique, on lit l'abscisse T correspondant au nombre de noyaux radioactifs restants $\frac{N_0}{2}$

2. Activité.

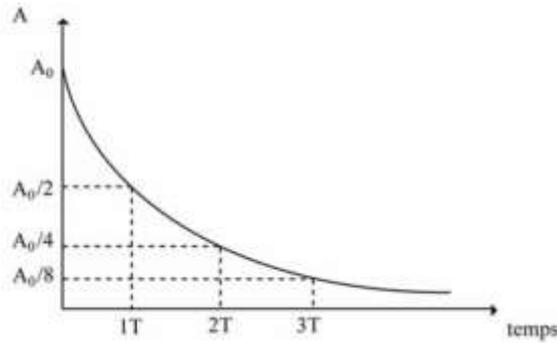
Etude de la loi de décroissance radioactive peut s'effectuer à partir du nombre N de noyaux radioactifs restants ou bien à partir de l'activité A .

L'activité d'un échantillon radioactif est le nombre de désintégration par seconde.

Elle s'exprime en Becquerel (Bq)

1 Bq = 1 désintégration / seconde

On peut tracer le graphique $A = f(t)$ équivalent au précédent $N = f(t)$



$$A_n = \frac{A_0}{2^n} \Leftrightarrow N_n = \frac{N_0}{2^n}$$

n étant le nombre de période

Deux expressions de l'activité peuvent être données quand t tend vers 0 :

- L'activité $A(t)$ traduit la variation du nombre de noyaux radioactifs au cours du temps : $A(t) = -\frac{dN(t)}{dt}$
- L'activité $A(t)$ est proportionnelle au nombre de noyaux restants : $A(t) = \lambda \cdot N(t)$

λ la constante de désintégration radioactive. Elle est caractéristique du noyau radioactif. Elle s'exprime en s^{-1}

Etablissons l'équation différentielle traduisant la loi de décroissance radioactive :

A partir des deux expressions de l'activité, on peut écrire que :

$$\frac{dN(t)}{dt} = -\lambda \cdot N(t) \qquad \frac{dN(t)}{dt} : \text{dérivée de } N \text{ par rapport au temps}$$

Il s'agit d'une équation différentielle linéaire du premier ordre à coefficients constants.

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

$$\text{Soit } \frac{dN(t)}{N(t)} + \lambda \cdot dt = 0$$

On peut également écrire pour des durées Δt plus longues que la variation (négative) du nombre de noyaux $\Delta N = N(t) - N_0$ est proportionnelle à la durée Δt , aux nombres de noyaux restants $N(t)$ et à la constante de désintégration radioactive λ .

On a alors $\Delta N = -\lambda \cdot N(t) \cdot \Delta t$

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

3. Résolution mathématique de l'équation différentielle traduisant la décroissance radioactive en fonction de $N(t)$.

Le problème à résoudre est donc le suivant : on cherche à déterminer l'expression du nombre de noyaux restants au cours du temps $N(t)$ qui vérifie l'équation $\frac{dN(t)}{N(t)} + \lambda \cdot dt = 0$

La résolution s'effectue en **une** étape (car il n'y a pas de solution particulière dans ce cas).

Résolution de l'équation sans second membre, c'est-à-dire $\frac{dN(t)}{N(t)} + \lambda \cdot dt = 0$

En séparant les variables $N(t)$ et t

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

Si deux expressions sont égales alors leurs primitives par rapport à t sont égales à une constante près.

$$\Leftrightarrow \ln(|N(t)|) = -\lambda \cdot t + \text{constante}$$

$$\Leftrightarrow e^{\ln(|N(t)|)} = e^{-\lambda \cdot t + \text{constante}}$$

$$\Leftrightarrow |N(t)| = e^{-\lambda \cdot t} \cdot e^{\text{constante}}$$

Rappels mathématiques :

si $f(x) = 5x + 2$ alors $f'(x) = 5$
 Réciproquement
 si $f'(x) = 5$ alors $f(x) = 5x + K$
 K étant une constante à déterminer.

La primitive de $\frac{1}{x} dx$ est $\int \frac{1}{x} dx = \ln|x| + K$
 $\int \frac{1}{x} dx = \ln|x| + K$ si $x \neq 0$

On appelle K la constante correspondant au terme $e^{\text{constante}}$

On peut écrire que la solution de l'équation différentielle a pour expression $|N(t)| = K \cdot e^{-\lambda \cdot t}$

où K est une constante à déterminer

Détermination de la constante K par les conditions initiales

On se place dans les conditions initiales : à $t = 0$ on a $N(0) = N_0$

N_0 est le nombre de radioactifs initial.

$$\Leftrightarrow K \cdot e^{-\lambda \cdot 0} = N_0$$

$$\Leftrightarrow K = N_0 \quad \text{avec } e^{-\lambda \cdot 0} = 1$$

La solution complète de l'équation différentielle est donc : $N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$: il s'agit de la loi de décroissance radioactive.

On note τ la constante de temps. $\tau = \frac{1}{\lambda}$ (unité : seconde)

La relation $N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$ peut s'écrire $N(t) = N_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$

Application à la désintégration de l'argent 108 (Bac Asie 2006)

Questions préliminaires :

On soumet à un flux de neutrons lents un échantillon d'argent ne contenant que des atomes d'argent 107. Un noyau d'argent 107 capte un neutron et il se forme un noyau d'argent 108. Le noyau d'argent 108 est radioactif. Il se désintègre suivant plusieurs processus compétitifs dont la radioactivité β^- et la radioactivité β^+ .
Donnée: extrait de la classification périodique fournissant les symboles des éléments et leur numéro atomique

Rh Z = 45	Pd Z = 46	Ag Z = 47	Cd Z = 48	In Z = 49
--------------	--------------	--------------	--------------	--------------

1. Capture d'un neutron.

- 1.1. Rappeler les deux lois de conservation qui permettent d'écrire l'équation d'une réaction nucléaire.
- 1.2. Écrire l'équation de la réaction de capture d'un neutron par un noyau d'argent 107.

2. Désintégration du noyau d'argent 108.

- 2.1. Rappeler la nature des particules émises au cours des radioactivités β^- et β^+ . Écrire leur symbole.
- 2.2. Écrire les équations correspondant à chacune des transformations radioactives pour l'argent 108.

Réponses :

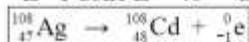
1. Capture d'un neutron.

- 1.1. Les deux lois de conservation lors d'une réaction nucléaire sont :
 - la conservation du nombre de charges,
 - la conservation du nombre de nucléons.
- 1.2. équation de la réaction de capture d'un neutron par un noyau d'argent 107: ${}_{47}^{107}\text{Ag} + {}_0^1\text{n} \rightarrow {}_{47}^{108}\text{Ag}$
(l'écriture du neutron ${}_0^1\text{n}$ pouvait se déduire des lois de conservation précédentes)

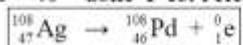
2. Désintégration du noyau d'argent 108.

- 2.1. La radioactivité β^- s'accompagne de l'émission d'un électron de symbole : ${}_{-1}^0\text{e}$.
La radioactivité β^+ s'accompagne de l'émission d'un positon de symbole : ${}_1^0\text{e}$.

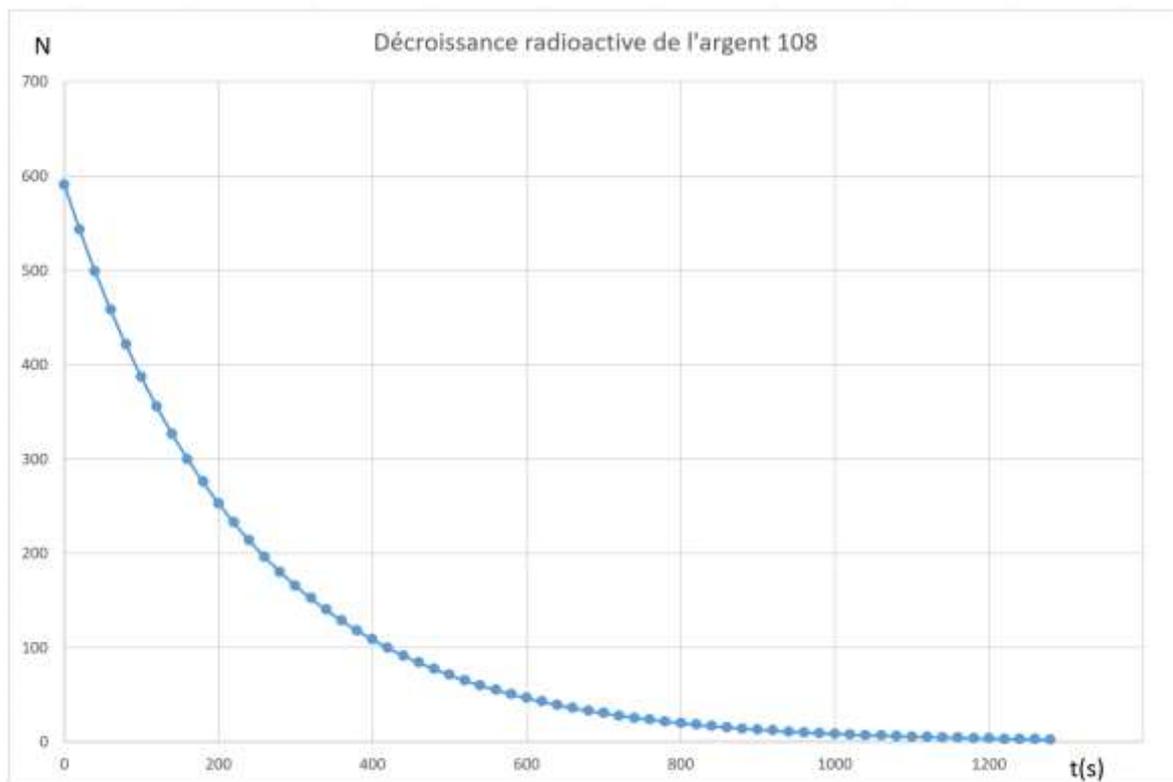
- 2.2. Désintégration β^- : ${}_{47}^{108}\text{Ag} \rightarrow {}_Z^AX + {}_{-1}^0\text{e}$
Lois de conservation : $108 = A + 0$ donc $A = 108$
et $47 = Z - 1$ donc $Z = 48$ donc X est l'élément Cadmium Cd



- or : $108 = A + 0$ donc $A = 108$
et $47 = Z + 1$ donc $Z = 46$ donc Y est l'élément Palladium Pd



Question : Déterminer graphiquement la valeur de la demi-vie radioactive de l'argent 108 et de la constante de temps τ
 En déduire la valeur de λ dans le cas de la désintégration de l'argent 108

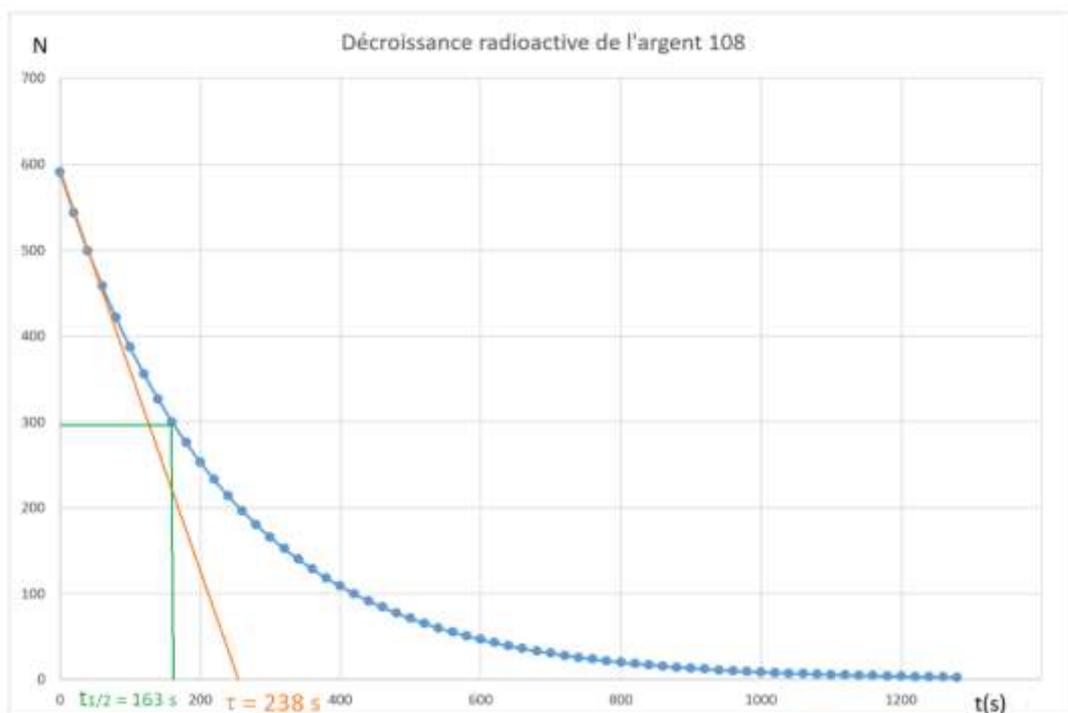


Réponse :

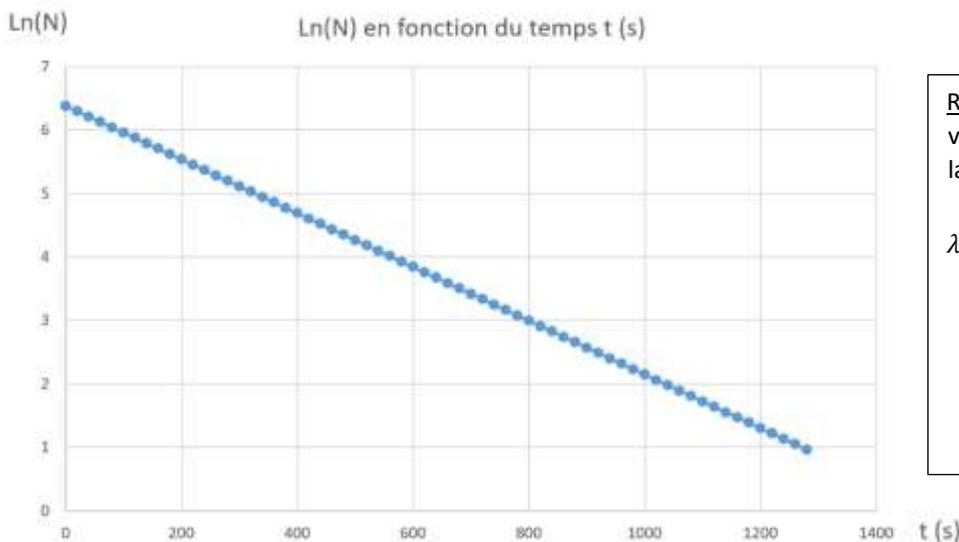
Le temps de demi-vie est égal à

La constante de temps est égale à $\tau = 236$ s

La constante de décroissance radioactive est donc égale à $\lambda = \frac{1}{\tau} = \frac{1}{236} = 4,24 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$



Question : déterminer la valeur de la constante radioactive λ à partir du graphique suivant, correspond à l'équation $\ln N(t) = -\lambda \cdot t + \ln N_0$



Réponse : Il faut déterminer la valeur du coefficient directeur de la droite.

$$\lambda = \frac{6,38 - 1,00}{1200 - 0} = 4,48 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$$

4. Relation entre temps de demi-vie $t_{1/2}$ et constante radioactive λ .

Rappel : Le temps de demi-vie est la durée correspondant à la désintégration de la moitié des noyaux radioactifs initialement présents dans l'échantillon.

Relation entre la constante de désintégration et la demi-vie $t_{1/2}$

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

$\Leftrightarrow \ln\left(\frac{1}{2}\right) = -\lambda \cdot t_{1/2}$

$\Leftrightarrow \ln 1 - \ln 2 = -\lambda \cdot t_{1/2}$ $\ln 1 = 0$

$\Leftrightarrow \ln 2 = \lambda \cdot t_{1/2}$

$\Leftrightarrow t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$

Question : Vérifier à partir des résultats précédents l'exactitude de cette relation.

Réponse : Sur le graphique on a lu : $t_{1/2} = 163 \text{ s}$

Calculons la valeur de la constante radioactive : $\lambda = \frac{\ln 2}{t_{1/2}} = \frac{\ln 2}{163} = 4,25 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$

On avait déterminé la valeur de constante radioactive à partir de la constante de temps $\lambda = \frac{1}{\tau} = \frac{1}{236} = 4,24 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$

Les deux valeurs correspondent.

5. Relation entre la constante de temps τ et la demi-vie $t_{1/2}$

On a $\tau = \frac{1}{\lambda}$

$\Leftrightarrow t_{1/2} = \ln 2 \cdot \tau$

Question : Vérifier à partir des résultats précédents l'exactitude de cette relation.

Réponse : Sur le graphique on a lu : $t_{1/2} = 163 \text{ s}$ et $\tau = 236 \text{ s}$.

On a $t_{1/2} = \ln 2 \cdot \tau = \ln 2 \times 236 = 163 \text{ s}$

Les deux valeurs correspondent.

II. Comment bien choisir un radioélément pour dater un événement ?

1. La datation absolue.

La datation absolue est fondée sur la décroissance de certains noyaux instables. Elle exploite la relation qui existe entre rapports isotopiques et durée écoulée depuis la fermeture du système.

2. Choix de l'isotope.

Question : Quel isotope doit-on choisir, parmi les 3 isotopes proposés, pour la datation d'un os de mammouth ?

Isotopes	Demi-vie (an)
Carbone 14 $^{14}_6C$	5730
Potassium 40 $^{40}_{19}K$	$12,5 \times 10^9$
Rubidium 87 $^{87}_{37}Rb$	50×10^9

Réponse :

On doit choisir le carbone 14 car il permet une datation de 100 ans à 50 000 ans. Le potassium 40 permet une datation entre 1 million d'années et 1 milliard d'années. Le Rubidium 87 permet une datation entre 10 million d'année et 4 milliard d'années.

3. Quel est le principe de la datation au carbone 14 ?

La quantité de carbone 14 sur Terre est stable car il est produit en permanence dans la haute atmosphère. Cette production compense la perte due à la désintégration.

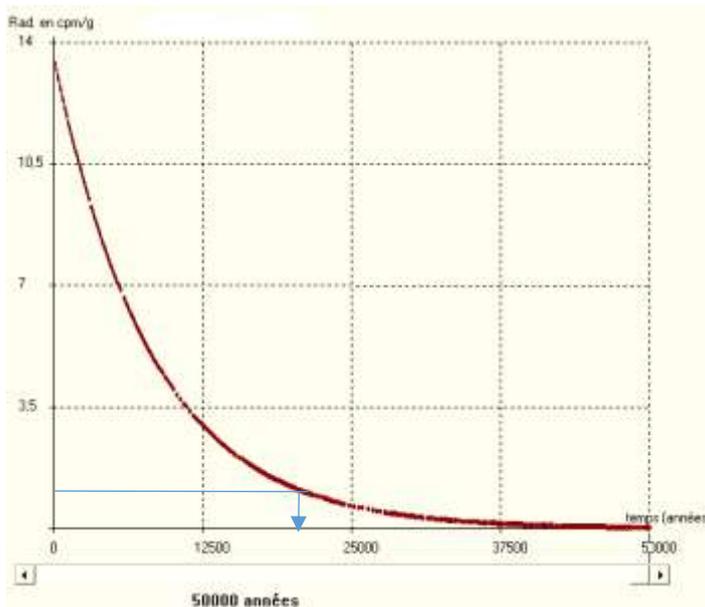
Le rapport isotopique $\frac{^{14}_6C}{^{12}_6C}$ reste constant pour le CO₂ atmosphérique.

Ce rapport reste constant dans les tissus vivants. Après la mort, le carbone 14 n'est pas renouvelé et le rapport isotopique décroît. L'âge est calculée à partir de la mesure de la radioactivité et en utilisant la loi de décroissance radioactive.

4. Détermination de la date de mort du mammouth.

La radioactivité mesurée dans un os du mammouth est égale à 1,301 cpm/g (cpm/g : coups par minute par gramme).

Question : Déterminer la date de la mort du mammouth à partir du graphique ci-dessous.



Courbe issue du logiciel gratuit : radiochronologie.

Réponse :

Le mammoth est mort il y a 19 350 années.

III. Applications médicales de la radioactivité.

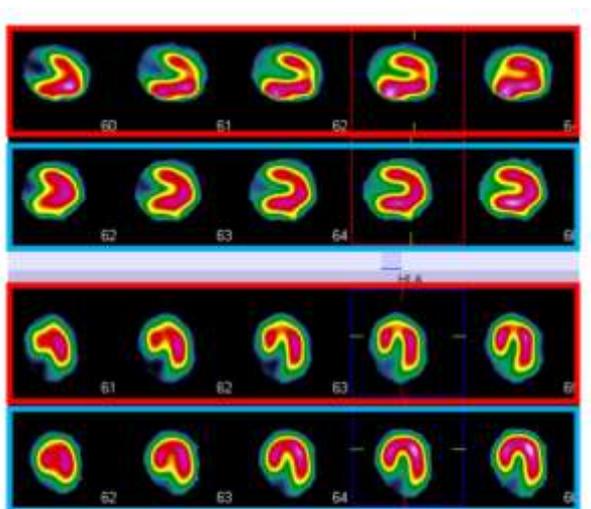
La médecine nucléaire utilise des isotopes radioactifs pour l'exploration de l'organisme humain.

La scintigraphie consiste à injecter (le plus souvent par voie veineuse) un isotope radioactif (le traceur) qui se fixe dans la partie à explorer et émet un rayonnement gamma à l'extérieur que l'on peut détecter grâce à une caméra à scintillation.

La gamma-caméra permet ainsi la localisation spatiale des photons émis par l'organe cible.

Les isotopes utilisés sont l'iode 131 : $^{131}_{53}\text{I}$ pour l'exploration fonctionnelle de la thyroïde et surtout le technétium 99 : $^{99}_{43}\text{Tc}$ dont l'intérêt est sa courte période $T = 6,02$ h ce qui minimise les équivalents de dose administrée.

On peut également utiliser le thallium 201 $^{201}_{81}\text{Tl}$ (période $T = 3,04$ jours) dans la scintigraphie myocardique.



Scintigraphie cardiaque d'effort correspondant au patient ci-dessus (images encadrées en rouge) et de repos (images encadrées en bleu) dans 2 incidences différentes : on observe un défaut de perfusion (en rose-orangé) à l'effort, alors qu'au repos la redistribution est normale. Ceci confirme donc une ischémie myocardique d'effort dans le myocarde antéro-apicale témoin de la répercussion de la sténose de l'artère InterVentriculaire Antérieure.

IV. Protection contre les rayonnements ionisants. Classe inversée.

Résumer en quelques lignes les mesures de prévention initiales pour se protéger de la radioactivité.

Site à consulter : www.inrs.fr > dms > inrs > CataloguePapier > TI-ED-958