

Chapitre 15 : La Radioactivité

- Déterminer, à partir d'un diagramme (N, Z), les isotopes radioactifs d'un élément.
- Utiliser des données et les lois de conservation pour écrire l'équation d'une réaction nucléaire et identifier le type de radioactivité.
- Établir l'expression de l'évolution temporelle de la population de noyaux radioactifs.
- Exploiter la loi et une courbe de décroissance radioactive.
- **Capacité mathématique** : Résoudre une équation différentielle linéaire du premier ordre à coefficients constants.
- Expliquer le principe de la datation à l'aide de noyaux radioactifs et dater un événement.
- Citer quelques applications de la radioactivité dans le domaine médical.
- Citer des méthodes de protection contre les rayonnements ionisants et des facteurs d'influence de ces protections.



[Site internet](#)

I. Stabilité et instabilité des noyaux

A) Rappel de seconde et 1ere

1) Notation symbolique d'un noyau :



Z : numéro atomique nombre de protons

A = N + Z : nombre de nucléons : neutrons + protons

X : symbole de l'élément associé à Z

Pour déterminer le nombre de neutron : **$N = A - Z$**

2) Isotopes :

Deux noyaux isotopes possède le **même numéro atomique Z mais un nombre de neutrons N différents**. Ex : ${}^{12}_6C$ et ${}^{14}_6C$

Remarque : Le symbole X et le numéro Z donnant la même information (nombre de protons), le noyau sera souvent présenté sans donner Z.

Ex : carbone 12 et carbone 14 ou les isotopes 12 et 14 du carbone.

Application N°1 : Composition d'un noyau

- Donner la composition de l'isotope 238 de l'uranium (Z = 92).
- Donner la composition du noyau d'iode ${}^{131}_{53}I$.

B) Noyau radioactif

Un noyau radioactif est **instable** et va **émettre une particule** en se désintégrant.

Ces particules peuvent être : des photons (γ), des électrons (${}_{-1}^0e$), des positrons (${}_{1}^0e$) ou des noyaux d'hélium (${}_{2}^4He$).

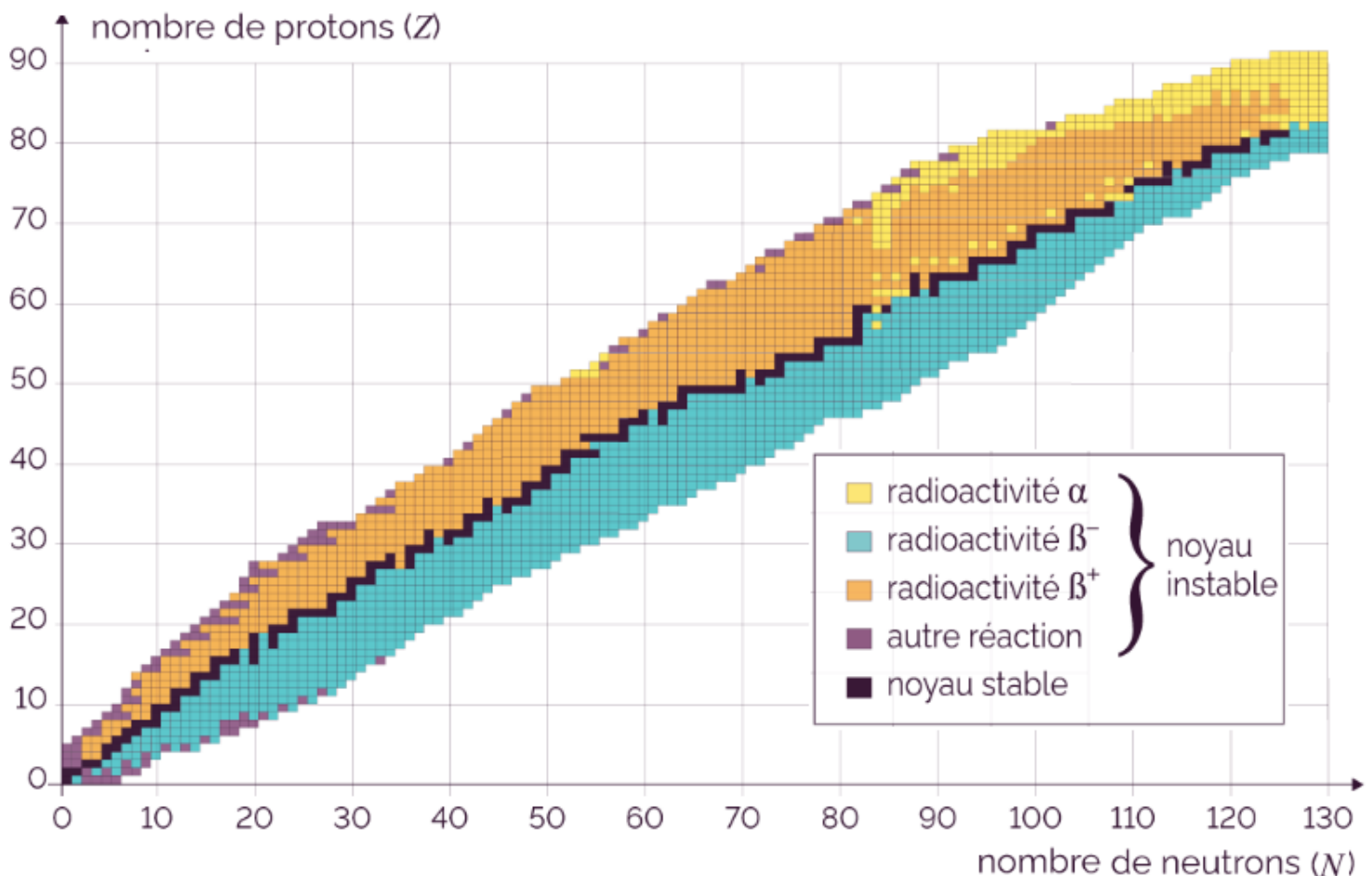
Cette désintégration radioactive est :

- **Spontanée** (sans apport d'énergie)
- **Aléatoire** (date imprévisible)
- **Inéluctable** (se fera forcément à un moment)

C) Diagramme (N, Z)

Il existe des milliers des noyaux différents et seulement environ 300 sont stables (non radioactifs).

Pour savoir si un noyau est stable, on doit connaître sa composition (N neutrons et Z protons). Le diagramme (N, Z) donne alors le résultat.



Application N°2 : Stable ou radioactif ?

- Uranium 235 (Z = 92)
- Fer 56 (Z = 26)
- Argon 40 (Z = 18)
- Iode 131 (Z = 53)
- Azote 14 (Z = 7)
- Technétium 99 (Z = 43)

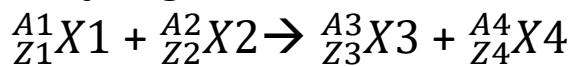
II. Différents types de radioactivité

Il existe différents types de radioactivité dont le nom dépend de la nature de la particule émise pour se stabiliser.

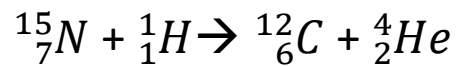
A) Rappels : Lois de conservation

Comme pour les transformations physiques et chimiques, une équation peut décrire une transformation nucléaire en additionnant à gauche les noyaux détruits et à droite les noyaux formés.

De façon général :



Exemple :



1) Conservation de la charge Z

La charge Z est conservée lors d'une transformation nucléaire :

$$Z1 + Z2 = Z3 + Z4$$

$$7 + 1 = 6 + 2$$

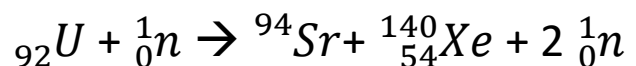
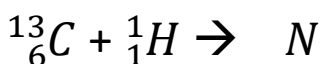
2) Conservation du nombre de nucléon A

Le nombre de nucléons est conservé lors d'une transformation nucléaire :

$$A1 + A2 = A3 + A4$$

$$15 + 1 = 12 + 4$$

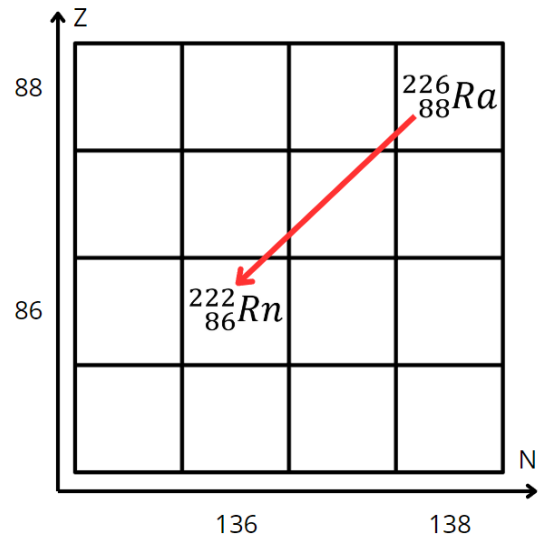
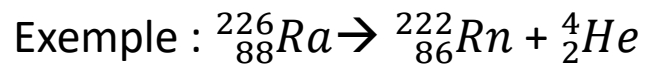
Applications N°3 : Compléter les transformations nucléaires suivantes :



B) Radioactivité alpha α

La radioactivité α concerne les **noyaux trop lourds** pour être stables (en haut à droite du diagramme (N, Z)). Ils émettent un **noyau d'hélium ${}^4_2\text{He}$** appelé **particule α** et perdent donc 4 nucléons.

Le noyau résultant sera 2 cases plus basse et à gauche dans le diagramme (N, Z).

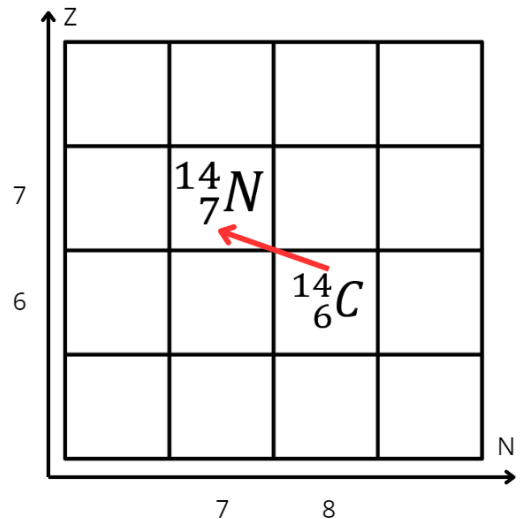
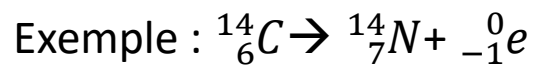


C) Radioactivité bêta β^-

La radioactivité β^- concerne les noyaux qui possèdent **trop de neutrons** par rapport aux protons (en dessous de la stabilité du diagramme (N, Z)).

Un **neutron se transforme en proton** et émet un **électron ${}^0_{-1}e$** .

Le noyau résultant sera 1 case plus haute et à gauche dans le diagramme (N, Z).

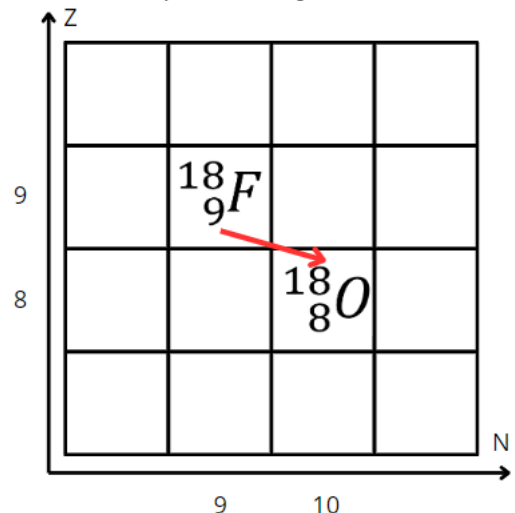
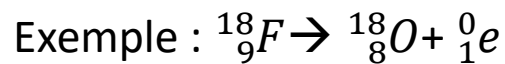


D) Radioactivité bêta β^+

La radioactivité β^+ concerne les noyaux qui possèdent **trop de protons** par rapport aux neutrons (au-dessus de la stabilité du diagramme (N, Z)).

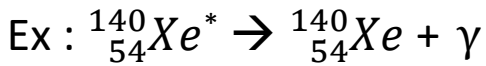
Un **proton se transforme en neutron** et émet un **positron 0_1e** .

Le noyau résultant sera 1 case plus basse et à droite dans le diagramme (N, Z).



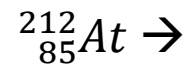
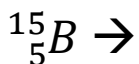
E) Radioactivité gamma γ

Le noyau **fils** obtenu après désintégration est très souvent dans un **état excité** (noté avec *). Pour retourner à son état fondamental, il va perdre de l'énergie en émettant un **photon (ou rayonnement électromagnétique) gamma γ** .



Application N°4 :

En utilisant le diagramme (N,Z), trouver le type de radioactivité des noyaux suivants et donner leur équation de désintégration:



Application N°5 : Parmi les transformations suivantes retrouver les désintégrations radioactives et donner leur type :

- ${}^{238}_{92}\text{U} \rightarrow {}^{234}_{90}\text{Th} + {}^4_2\text{He}$
- $\text{Na} + \text{Cl} \rightarrow \text{NaCl}$
- ${}^{60}_{27}\text{Co} \rightarrow {}^{60}_{28}\text{Ni} + {}^0_{-1}\text{e}$
- $\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{H}_2\text{O}$
- ${}^{22}_{11}\text{Na} \rightarrow {}^{22}_{10}\text{Ne} + {}^0_1\text{e}$
- ${}^{137}_{55}\text{Cs}^* \rightarrow {}^{137}_{55}\text{Cs} + \gamma$
- ${}^2_1\text{H} + {}^3_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^1_0\text{n}$
- ${}^{235}_{92}\text{U} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^{139}_{56}\text{Ba} + {}^{94}_{36}\text{Kr} + 3 {}^1_0\text{n}$
- $\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$
- ${}^{14}_7\text{N} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{17}_8\text{O} + {}^1_1\text{H}$

III. Evolution d'une population de noyaux radioactifs

A) L'activité A

L'activité A, en **becquerel Bq** (s^{-1}), d'un échantillon radioactif correspond au **nombre moyen de désintégration par seconde** .

$$A(t) = - \frac{N(t+\Delta t) - N(t)}{\Delta t} \text{ et pour } \Delta t \rightarrow 0$$

$$A(t) = - \frac{dN}{dt}$$

A(t) : activité (en Bq)
 Δt : intervalle de temps (s)
N(t) : le nombre de noyaux radioactifs au temps t

Remarques :

- 1 Bq correspond à une désintégration par seconde.
- L'activité se mesure avec un **compteur de radioactivité** (Ex : compteur Geiger-Müller).
- L'activité est une **grandeur extensive** (proportionnelle à la quantité de matière) comme le volume ou la masse.

$A(t) = \lambda N(t)$. Le coefficient de proportionnalité **λ est appelé constante radioactive** (s^{-1} ou autre inverse de temps comme h^{-1})

B) Equation différentielle et solution

1) Equation différentielle

En réunissant les deux équations précédentes : $A(t) = -\frac{dN}{dt}$ et $A(t) = \lambda N(t)$ on obtient une équation différentielle.

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

$N(t)$: le nombre de noyaux radioactifs au temps t
 λ : constante radioactive

2) Solution

La solution d'une telle équation est :

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

$N(t)$: le nombre de noyaux radioactifs
 N_0 : nombre initial de noyau radioactif
 λ : constante radioactive

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

τ : constante de temps caractéristique $\tau = \frac{1}{\lambda}$

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

A : activité ; A_0 : activité initiale

3) Temps de demi-vie $t_{1/2}$

La demi-vie d'un noyau radioactif correspond à la **durée nécessaire pour désintégrer la moitié des noyaux** radioactifs donnés d'un échantillon.

Démonstration : $N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$

$$\text{À } t = t_{1/2} : \frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda t_{1/2}}$$

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

$$\ln(2) = \lambda t_{1/2}$$

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

C) Représentation graphique

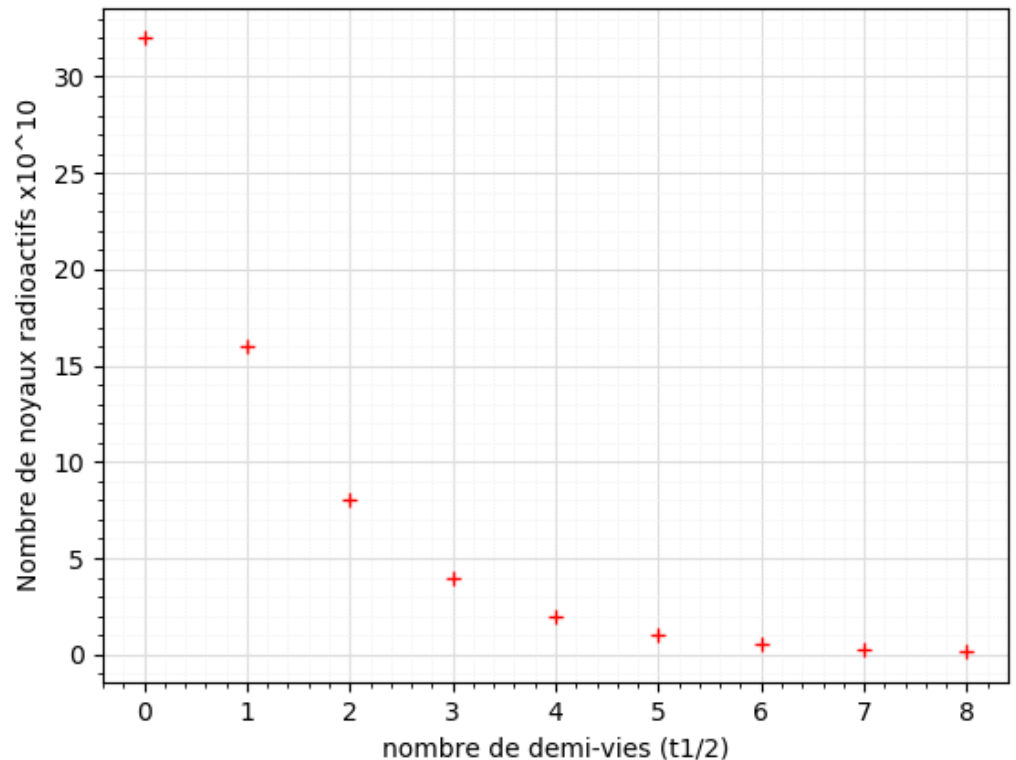
Pour représenter $N = f(t)$ on peut utiliser 2 méthodes différentes :

1) A partir de la demi-vie $t_{1/2}$

- On bout d'une demi-vie ($t = t_{1/2}$), la moitié des noyaux radioactifs de l'échantillon sont détruit. Il en reste $N_0/2$.
- Au bout de 2 demi-vies ($t = 2 t_{1/2}$), la moitié de ce qu'il restait après une demi-vie ($N_0/2$) est détruit. Il en reste $N_0/4$.
- **Au bout de K demi-vies, il en reste $N_0/2^K$**

Exemple de tracé :

Pour
 $N_0 = 3,2 \cdot 10^{11}$



2) A partir des asymptotes et tangentes

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

- Pour les temps élevés, $t \rightarrow \infty$ et $N(\infty) = N_0 e^{-\lambda \infty} = 0$

Donc nous avons une **asymptote $N(t) = 0$** pour les grands temps.

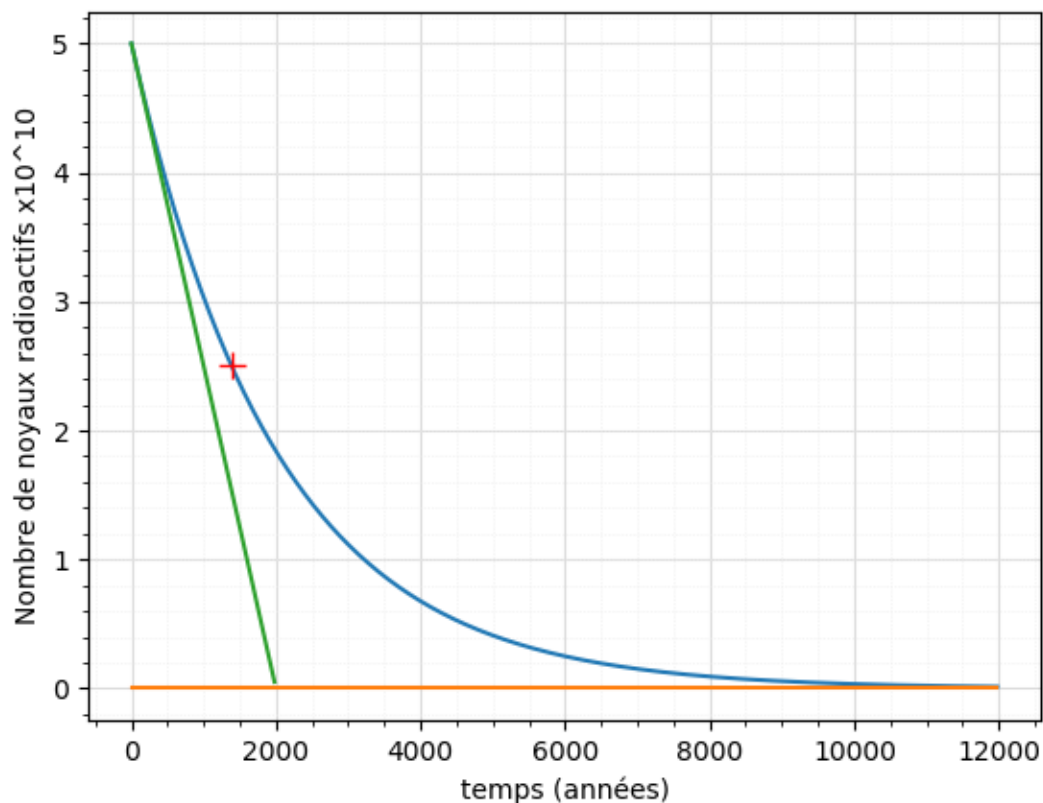
- Pour $t = 0$ nous cherchons à tracer la tangente. Il nous faut calculer la dérivée de $N(t)$ pour trouver la pente de cette tangente :

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N_0 e^{-\lambda t} \text{ et pour } t = 0 : \frac{dN}{dt}(0) = -\lambda N_0 e^{-\lambda 0} = -\lambda N_0$$

Nous avons donc une **tangente à l'origine de pente $-\lambda N_0$**

Exemple de tracé

pour
 $\lambda = 5,0 \cdot 10^{-4}$
année⁻¹
 $N_0 = 5 \cdot 10^{10}$

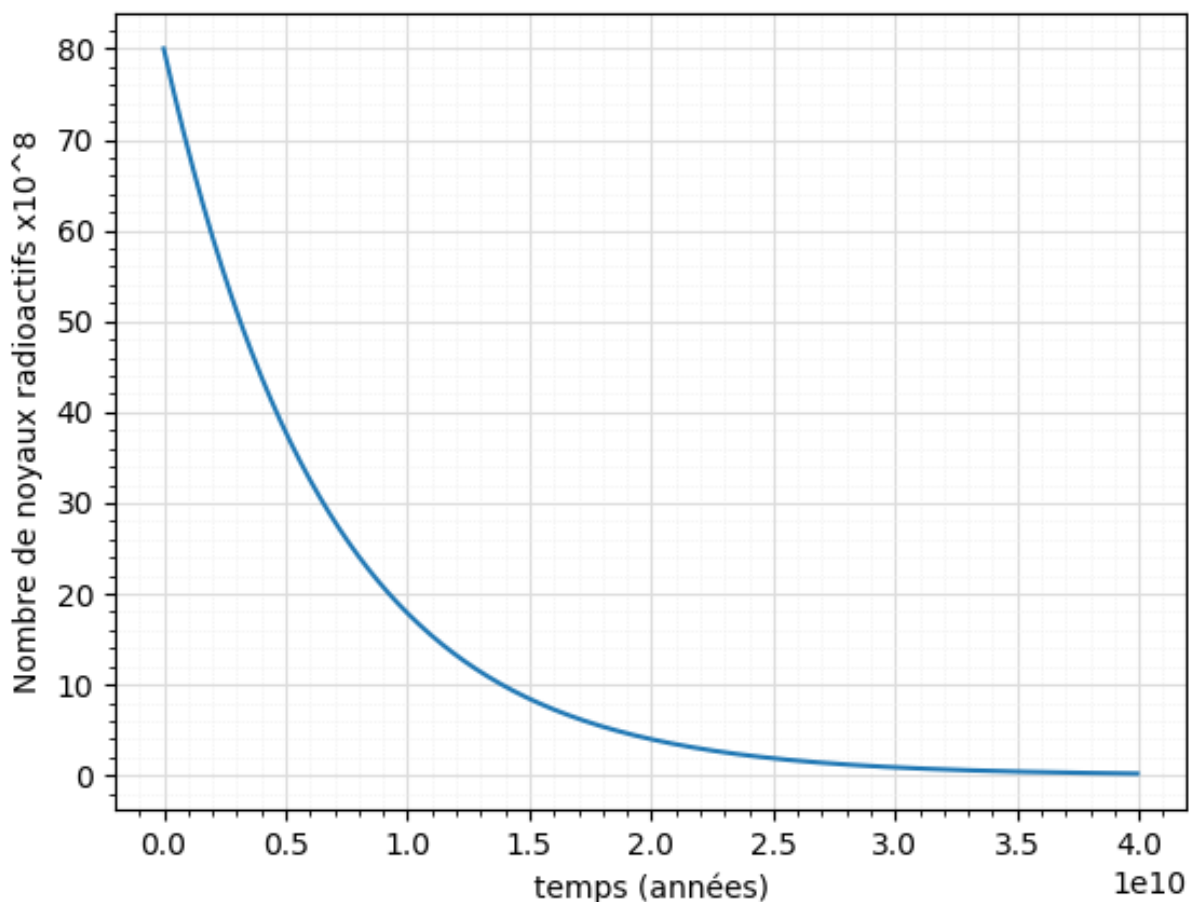


Application N°6 :

Un échantillon
d'uranium
 ${}^{238}_{92}\text{U}$ est
désintégré en
thorium ${}^{234}_{90}\text{Th}$.

Donner
l'équation de
désintégration.

En déduire le
type de
radioactivité.



Asymptote et tangente :

Tracer l'asymptote horizontale et la tangente à l'origine

En déduire la constante caractéristique de temps τ puis la constante de radioactivité λ .

Demi-vie :

Déterminer la demi-vie de l'uranium 238 et en déduire la constante de radioactivité λ .

IV. Application de la radioactivité et protection

A) Radioactivité naturelle

Il existe environ 60 radio-isotopes naturels. Nous ingérons et inhalons des éléments radioactifs présents naturellement dans l'écorce terrestre ou produits par les rayonnements cosmiques. Ces éléments nous irradient alors de l'intérieur.

B) Radiodation

Une radiodation consiste à déterminer l'âge t d'un échantillon radioactif. Elle nécessite de connaître la constante radioactive λ de l'isotope et de mesurer l'activité A ou le nombre $N(t)$ de noyaux restant à la date t .

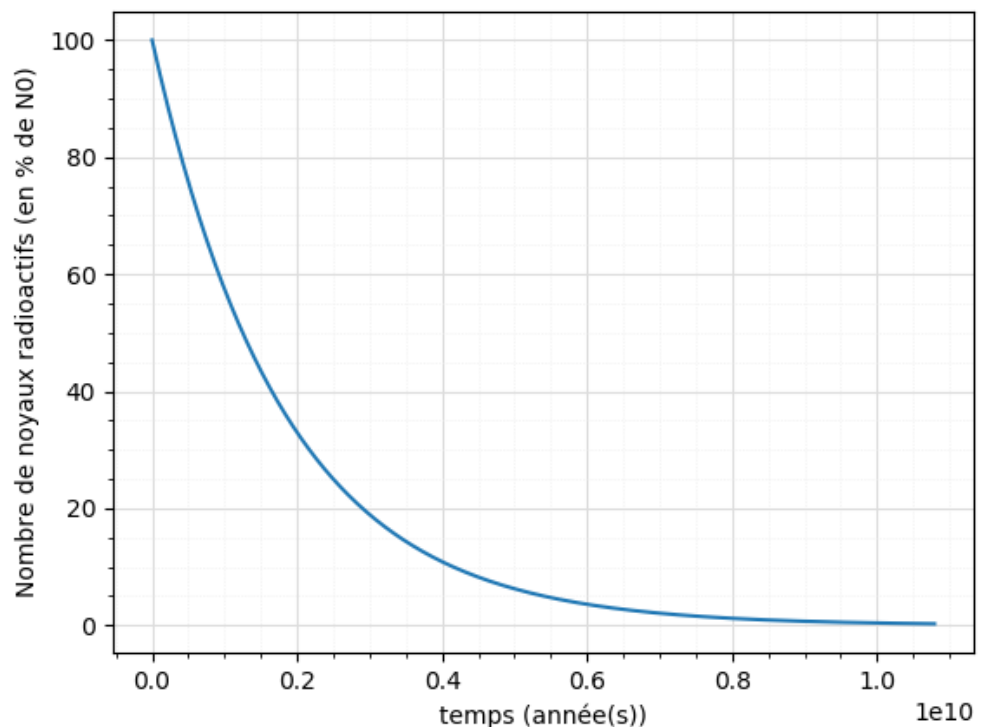
La demi-vie des isotopes utilisés doit être adaptée à l'âge de l'échantillon à dater (1 à 10 demi-vies max).

1) Méthode graphique

Application N°7 : datation au potassium 40

La désintégration de ${}^{40}_{19}\text{K}$ en ${}^{40}_{18}\text{Ar}$ est utilisée dans la datation des roches anciennes selon une méthode appelée datation potassium-argon.

1. Donner l'équation de désintégration radioactive du potassium K 40.
2. De quel type de radioactivité s'agit-il ?
3. Donner la demi-vie du potassium.
4. Une roche ancienne doit être datée. On détecte 4 fois moins de noyaux de potassium 40 que dans une roche récente. Quel âge a-t-elle ?
5. Cette méthode peut-elle dater des roches apparues à la création de la Terre (4,5 milliards d'années) ?



2) Méthode calculatoire

Par un calcul nous pouvons dater un échantillon.

Exemple : datation au carbone 14 (en azote 14) avec $\lambda = 1,21 \cdot 10^{-4} \text{ an}^{-1}$

Un échantillon contient $1,3 \cdot 10^{10}$ noyaux de carbone 14 alors que son nombre pour un échantillon récent de même masse est de $9,4 \cdot 10^{10}$.

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

$$\frac{N}{N_0} = e^{-\lambda t}$$

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

$$t = -\frac{\ln\left(\frac{N}{N_0}\right)}{\lambda} = -\frac{\ln\left(\frac{1,3}{9,4}\right)}{1,21 \cdot 10^{-4}} = 1,63 \cdot 10^4 \text{ ans}$$

L'échantillon à environ 16 300 ans

Application N°8 : désintégration β^+ du sodium 22 avec $\lambda = 2,67 \cdot 10^{-8} \text{ s}^{-1}$

Un échantillon a une activité de 32,4 kBq alors que l'activité d'un échantillon de même masse récent est 403 kBq.

- Donner l'équation de désintégration du sodium 22
- Dater l'échantillon

C) Applications médicales

Depuis 1934, la radioactivité artificielle permet de créer à volonté des atomes radioactifs. Cette découverte a ouvert de nouvelles possibilités d'analyses et de traitements médicaux :

- **diagnostics** des cancers par le biais de **scintigraphies** et **tomographies**, autorisant des examens poussés d'organes en fonctionnement (cœur, cerveau, poumons, os, reins) ;

- **traitement** des tumeurs grâce à la **radiothérapie**, qui emploie les rayonnements des radionucléides pour détruire les cellules cancéreuses.

La radioactivité fait aussi progresser la recherche scientifique, notamment par l'usage des "traceurs". En suivant le parcours de ces radionucléides injectés dans l'organisme, on comprend le métabolisme des organes et on teste de nouveaux médicaments.

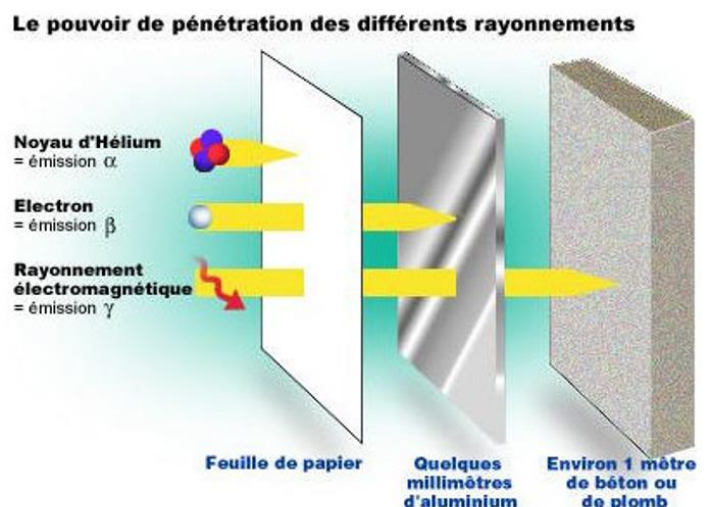
Scintigraphie : Le patient reçoit des molécules ou des isotopes radioactifs qui vont se fixer sur les organes ou les tissus que l'on cherche à explorer. Ensuite, une machine, en général une gamma-caméra, détecte les rayons gamma émis par le corps. Enfin, on reconstruit l'image obtenue. La dose de radioactivité est maintenue faible de manière à minimiser les risques liés à l'irradiation.

Tomographie : La TEP (Tomographie par Emission de Positons) repose sur le principe général de la scintigraphie qui consiste à injecter un traceur dont on connaît le comportement et les propriétés biologiques pour obtenir une image du fonctionnement d'un organe ou la présence d'une cible moléculaire. Ce traceur est marqué par un atome radioactif qui émet des positons dont l'annihilation produit deux photons. C'est la détection en coïncidence de ces photons qui permet la localisation du lieu de leur émission et donc la concentration du traceur en chaque point de l'organe. C'est cette information quantitative que l'on représente sous la forme d'une image faisant apparaître en couleurs les zones de forte concentration du traceur.

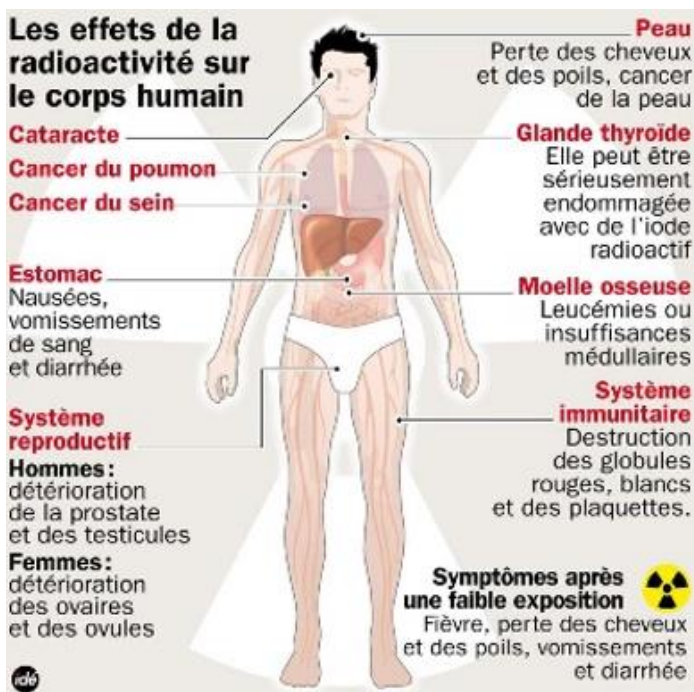
D) Dangers et protections

La protection des êtres vivants contre les rayonnements ionisants nécessite avant tout l'éloignement de la source radioactive.

Les personnes travaillant au contact de ces sources utilisent des **écrans protecteurs d'épaisseur et de matériaux adaptés** mais aussi des combinaisons, **tabliers plombés**, gants adaptés.



Il faut aussi également **minimiser le temps d'exposition**.



Exercices :

- *Echauffement (si nécessaire) : p147*
- *Applications directes*
 - *Corrigées : QCM p159, N°29, 31 et 34 p164*
 - *Non-corrigées (moyen) : N°30, 32, 33, 36, 37, 28, 48, 67, 68 p164-172*
- *Plus loin/ problème (en option) : N°40, 45, 54, 65 p165-171*