

Décroissance radioactive

Cours de sciences physiques - niveau Terminale

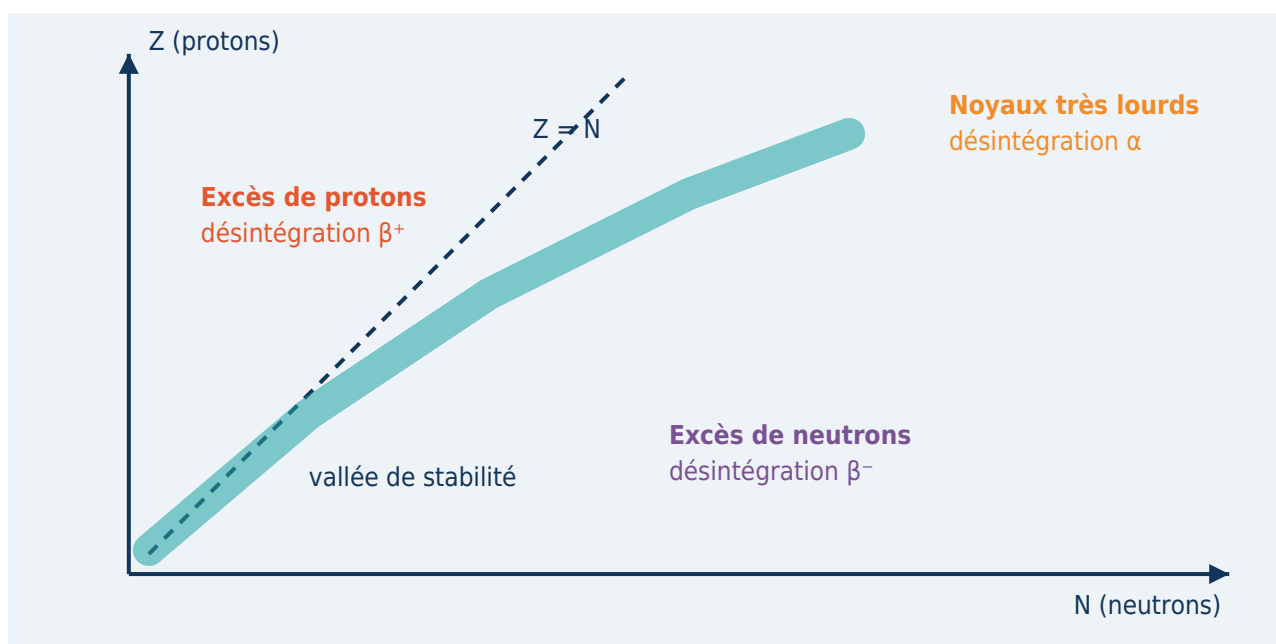
Dans un sous-sol de granite, un détecteur crépite alors que rien ne bouge : des noyaux se transforment spontanément, sans cause extérieure. Cette **décroissance radioactive** est imprévisible pour un noyau pris seul, mais d'une régularité remarquable pour des milliards de noyaux, ce qui permet de dater un os vieux de plusieurs milliers d'années ou de doser une injection médicale.

Ce cours est à **télécharger en PDF et à imprimer gratuitement** : le bouton se trouve en bas de la page, sans inscription.

Des noyaux instables

Un noyau est constitué de **nucléons** : Z protons et N neutrons, soit $A = Z + N$ nucléons. On le note A_ZX . Deux noyaux de même Z mais de A différents sont des **isotopes** : le carbone 12 (${}^{12}_6C$, stable) et le carbone 14 (${}^{14}_6C$, radioactif) en sont un exemple.

La cohésion du noyau est assurée par l'interaction forte, qui l'emporte sur la répulsion électrique entre protons. Pour un noyau léger, la stabilité demande à peu près autant de neutrons que de protons ; pour un noyau lourd, il faut davantage de neutrons. Dans le diagramme (N, Z) , les noyaux stables forment une « vallée de stabilité » ; les autres sont **instables** et se transforment spontanément : on dit qu'ils sont **radioactifs**.



Dans le diagramme (N, Z) , la vallée de stabilité s'écarte de la droite $Z = N$ pour les noyaux lourds ; chaque zone instable évolue par un type de désintégration.

Les désintégrations α , β^- , β^+ et le rayonnement γ

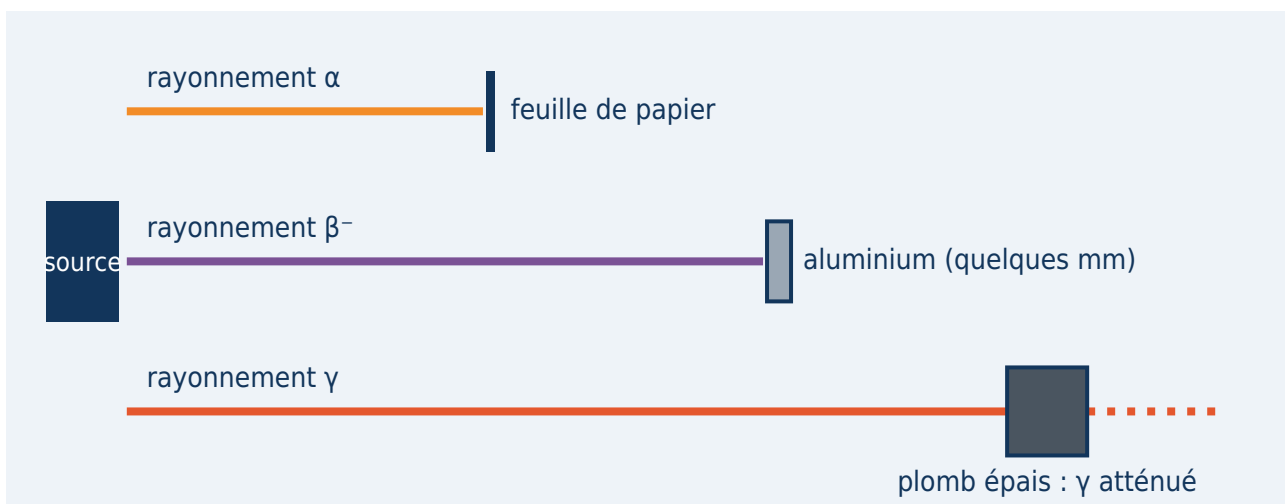
Lors d'une désintégration, un **noyau père** donne un **noyau fils** et une particule. Deux **lois de conservation** (lois de Soddy) s'appliquent : conservation du **nombre de charge** Z et du **nombre de nucléons** A . L'énergie totale et la quantité de mouvement sont aussi conservées.

- **Radioactivité α** : émission d'un noyau d'hélium ${}^4_2\text{He}$, fréquente pour les noyaux lourds. Exemple : ${}^{238}_{92}\text{U} \rightarrow {}^{234}_{90}\text{Th} + {}^4_2\text{He}$. Contrôle : $238 = 234 + 4$ et $92 = 90 + 2$.
- **Radioactivité β^-** : un neutron se transforme en proton ; émission d'un électron ${}^0_{-1}\text{e}$ et d'un antineutrino. Exemple : ${}^{14}_6\text{C} \rightarrow {}^{14}_7\text{N} + {}^0_{-1}\text{e} + \text{antineutrino}$. Contrôle : $14 = 14 + 0$ et $6 = 7 + (-1)$.
- **Radioactivité β^+** : un proton se transforme en neutron ; émission d'un positon ${}^0_{+1}\text{e}$ et d'un neutrino. Exemple : ${}^{18}_9\text{F} \rightarrow {}^{18}_8\text{O} + {}^0_{+1}\text{e} + \text{neutrino}$.
- **Rayonnement γ** : le noyau fils, souvent produit dans un état excité noté X^* , revient à son état fondamental en émettant un photon de très haute énergie : $X^* \rightarrow X + \gamma$. Z et A ne changent pas.

LOIS DE CONSERVATION

Dans toute équation de désintégration, la somme des nombres de nucléons A et la somme des nombres de charge Z sont **identiques de chaque côté de la flèche**. Elles permettent d'identifier un noyau fils inconnu grâce au tableau périodique.

Les rayonnements n'ont pas la même pénétration. Les particules α sont arrêtées par une simple feuille de papier ou quelques centimètres d'air ; les électrons β^- par quelques millimètres d'aluminium ; les photons γ ne sont qu'atténués, par des écrans épais de plomb ou de béton. Tous sont des **rayonnements ionisants** : ils arrachent des électrons à la matière qu'ils traversent, ce qui peut endommager les cellules vivantes.



Du plus au moins ionisant : α (peu pénétrant), β^- (moyennement pénétrant), γ (très pénétrant).

La loi de décroissance radioactive

La désintégration d'un noyau est un phénomène **aléatoire** : on ne peut pas prévoir quand un noyau donné se désintègre. Pour un grand nombre $N(t)$ de noyaux identiques, le nombre de désintégrations pendant une courte durée dt est proportionnel à $N(t)$ et à dt . On note λ la constante de proportionnalité, appelée **constante radioactive** (en s^{-1}). Elle est caractéristique du noyau.

$$dN/dt = -\lambda N(t)$$

Cette équation différentielle linéaire du premier ordre a pour solution, avec $N(0) = N_0$:

FORMULE À RETENIR

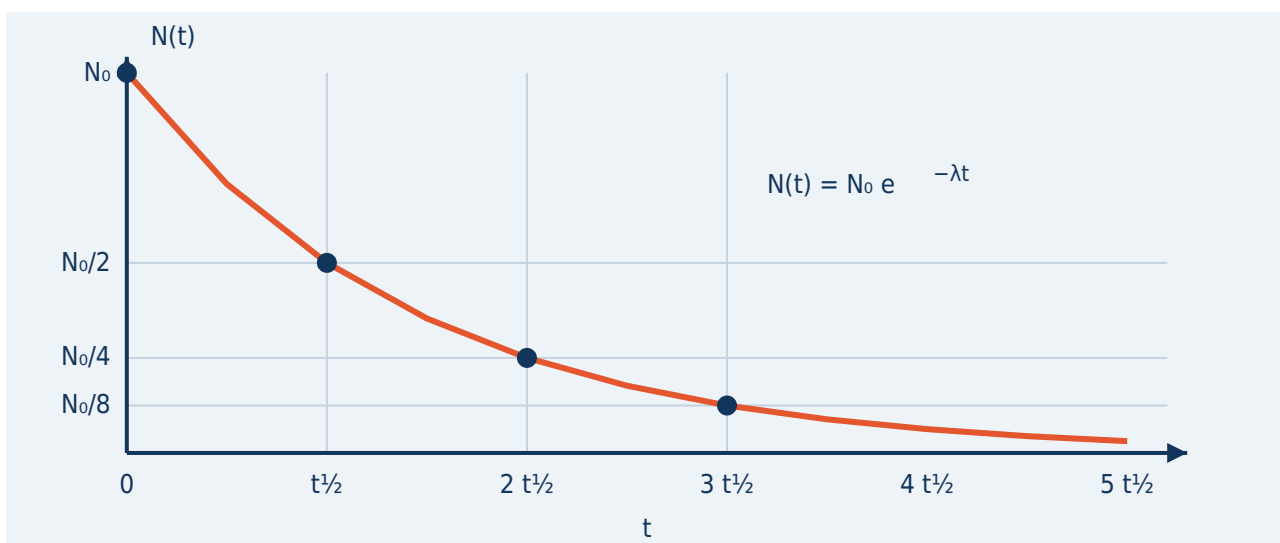
$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$$

N en nombre de noyaux, t en secondes (ou en jours, années... avec λ dans l'unité inverse), λ en s^{-1} .

La **constante de temps** est $\tau = 1/\lambda$, en secondes : à $t = \tau$, il reste $N_0/e \approx 37\%$ des noyaux. La **demi-vie** $t_{1/2}$ est la durée au bout de laquelle la moitié des noyaux initiaux s'est désintégrée.

DÉMONSTRATION

À $t = t_{1/2}$, $N = N_0/2$, donc $N_0/2 = N_0 e^{-\lambda t_{1/2}}$. On simplifie : $1/2 = e^{-\lambda t_{1/2}}$, donc $\ln 2 = \lambda t_{1/2}$.
D'où $t_{1/2} = \ln 2 \div \lambda = \tau \ln 2 \approx 0,693 \tau$.



Décroissance exponentielle : le nombre de noyaux est divisé par 2 à chaque durée $t_{1/2}$, quel que soit l'instant de départ.

APPLICATION NUMÉRIQUE

Fiche en ligne : sciences-physiques-pdf.fr/radioactivite-et-loi-de-decroissance-cours-sciences-terminale/ · Cours, exercices, TP et contrôles corrigés de sciences physiques sur sciences-physiques-pdf.fr · page 3/5

L'iode 131 a une demi-vie $t_{1/2} = 8,0 \text{ jours} = 6,9 \times 10^5 \text{ s}$. Sa constante radioactive vaut $\lambda = \ln 2 \div t_{1/2} = 0,693 \div 6,9 \times 10^5 \approx \mathbf{1,0 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}}$ et sa constante de temps $\tau = 1/\lambda \approx \mathbf{1,0 \times 10^6 \text{ s}}$, soit 11,5 jours. Après 24 jours, c'est-à-dire 3 demi-vies, il reste $N_0 \div 2^3 = \mathbf{12,5 \%}$ des noyaux initiaux.

L'activité d'une source radioactive

L'**activité** A d'un échantillon est le nombre de désintégrations par seconde. Elle s'exprime en **becquerels** (Bq) : 1 Bq = 1 désintégration par seconde.

FORMULE À RETENIR

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

A en Bq, λ en s^{-1} , N sans unité ; $A_0 = \lambda N_0$.

L'activité est donc proportionnelle au nombre de noyaux restants : elle décroît avec la même demi-vie. Un compteur Geiger mesure en pratique un taux de comptage, proportionnel à l'activité à condition de retrancher le **bruit de fond** (rayonnement naturel ambiant).

APPLICATION NUMÉRIQUE

Un échantillon contient $N = 2,0 \times 10^{10}$ noyaux d'iode 131. Son activité est $A = \lambda N = 1,0 \times 10^{-6} \times 2,0 \times 10^{10} = \mathbf{2,0 \times 10^4 \text{ Bq}}$.

La datation par le carbone 14

Dans l'atmosphère, le rayonnement cosmique fabrique en permanence du carbone 14, de demi-vie 5 730 ans. Un être vivant en échange constamment avec son milieu : la proportion de carbone 14 dans son carbone reste constante. À sa mort, les échanges cessent : le carbone 14 décroît, sans être renouvelé. En mesurant l'activité A d'un échantillon et en la comparant à celle A_0 d'un échantillon vivant, on obtient son âge.

MÉTHODE

De $A/A_0 = e^{-\lambda t}$, on tire $\mathbf{t = -\ln(A/A_0) \div \lambda}$, avec $\lambda = \ln 2 \div t_{1/2} = 1,21 \times 10^{-4} \text{ an}^{-1}$ pour le carbone 14.

EXEMPLE

Un morceau de bois a une activité égale à 60 % de celle d'un bois vivant : $\mathbf{t = -\ln(0,60)}$

$\div 1,21 \times 10^{-4} = 0,511 \div 1,21 \times 10^{-4} \approx \mathbf{4,2 \times 10^3 \text{ ans}}$. La méthode devient imprécise au-delà d'environ 10 demi-vies (50 000 ans) : l'activité restante est trop faible. Pour les roches de plusieurs milliards d'années, on utilise d'autres couples, comme l'uranium et le plomb.

Radioactivité, santé et protection

La médecine nucléaire utilise des noyaux de courte demi-vie : le fluor 18 (110 minutes) pour la tomographie par émission de positons, le technétium 99m (6 heures) pour des scintigraphies. Le noyau disparaît vite, ce qui limite l'irradiation du patient. À l'inverse, la radiothérapie emploie des sources intenses dirigées sur une tumeur.

Les effets d'un rayonnement dépendent de l'énergie absorbée par kilogramme de tissu (dose absorbée, en gray) et du type de rayonnement ; la **dose efficace**, en sievert (Sv), mesure le risque pour l'organisme. Trois réflexes protègent : réduire la **durée** d'exposition, augmenter la **distance** à la source, interposer un **écran** adapté.

ERREUR FRÉQUENTE

Après deux demi-vies, il ne reste pas « rien » mais **un quart** des noyaux : la demi-vie n'est pas la durée de vie totale. Autre confusion : la décroissance de N est exponentielle, pas linéaire, et on ne peut pas dire à quel instant un noyau précis se désintégrera.

L'essentiel à retenir

- Un noyau A_ZX radioactif se désintègre spontanément selon α , β^- , β^+ , souvent suivi d'un rayonnement γ .
- Dans une équation de désintégration, A et Z sont conservés.
- $N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$; $\tau = 1/\lambda$; $t_{1/2} = \ln 2 \div \lambda$.
- L'activité $A = \lambda N$ se mesure en becquerels et décroît comme N.
- Datation : $t = -\ln(A/A_0) \div \lambda$, efficace jusqu'à environ 10 demi-vies.
- Protection : durée, distance, écran.