

Décroissance radioactive

Comment peut-on affirmer qu'un morceau de charbon trouvé dans une grotte ornée a environ 12 000 ans... alors que personne n'était là pour le noter ?

Ce que tu vas savoir faire

- Déterminer la composition d'un noyau, reconnaître des isotopes et exploiter un diagramme (N, Z)
- Écrire l'équation d'une désintégration α , β^- ou β^+ en utilisant les lois de conservation, et identifier le type de radioactivité
- Établir la loi de décroissance radioactive et exploiter une courbe de décroissance (demi-vie, constante radioactive, activité)
- Dater un échantillon par le carbone 14 ou la méthode potassium-argon
- Citer des applications médicales et des règles de radioprotection
- Simuler le caractère aléatoire des désintégrations avec Python

À revoir avant de commencer

- Structure de l'atome et du noyau, notation ${}^A_ZX$ (2de)
- Élément chimique et classification périodique (2de)
- Quantité de matière, constante d'Avogadro, masse molaire (2de-1re)
- Fonction exponentielle, équation $y' = ay$ et logarithme népérien (maths)
- Loi de vitesse d'ordre 1 et temps de demi-réaction (fiche 04)

1 Le cours

1. Le noyau atomique : rappels

Tout objet qui t'entoure est fait d'atomes, et presque toute la masse d'un atome est concentrée dans son noyau, 100 000 fois plus petit que lui (environ 10^{-15} m contre 10^{-10} m). Certains noyaux restent intacts pendant des milliards d'années ; d'autres, instables, finissent par se transformer spontanément : c'est la **radioactivité**, découverte par Henri Becquerel en 1896.

Définitions – Composition d'un noyau, isotopes

Un noyau est constitué de **nucléons** : des **protons** (charge $+e$) et des **neutrons** (charge nulle). On le note ${}^A_ZX$ où :

- Z est le **numéro atomique** (nombre de protons), qui caractérise l'élément chimique X ;
- A est le **nombre de masse** (nombre de nucléons) ;
- $N = A - Z$ est le nombre de neutrons.

Des **isotopes** sont des noyaux qui ont le même nombre de protons Z (même élément) mais des nombres de neutrons N différents, donc des nombres de masse A différents. Exemple : ${}^{12}_6C$ (6 neutrons), ${}^{13}_6C$ (7 neutrons) et ${}^{14}_6C$ (8 neutrons) sont trois isotopes du carbone.

2. Stabilité des noyaux : le diagramme (N, Z)

On connaît environ 3 000 noyaux différents, mais seulement 250 environ sont **stables**. Si on les place dans un diagramme avec N en abscisse et Z en ordonnée, les noyaux stables se regroupent dans une bande étroite : la **vallée de stabilité**.

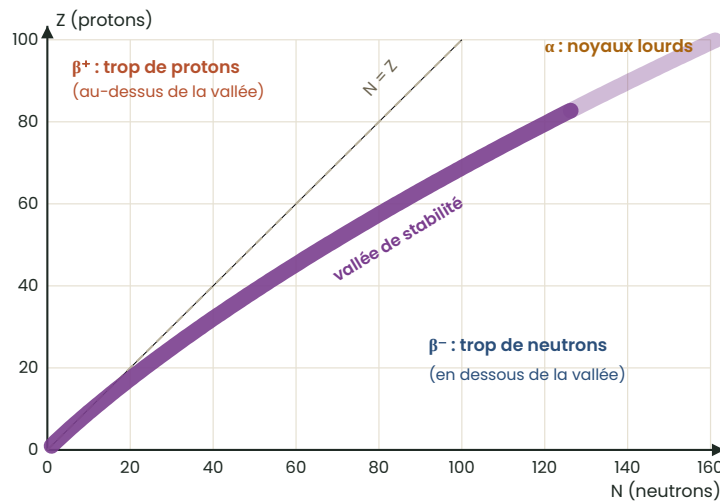


Diagramme (N, Z) simplifié. Les noyaux stables (bande foncée) suivent la droite $N = Z$ jusqu'à $Z \approx 20$, puis comportent plus de neutrons que de protons. Au-delà du plomb ($Z = 82$), aucun noyau n'est stable (bande claire).

Méthode – Prévoir le type de désintégration avec le diagramme (N, Z)

- Noyau situé **à droite / en dessous** de la vallée : il a **trop de neutrons** ; il se désintègre par radioactivité β^- (un neutron devient un proton) : N diminue de 1 et Z augmente de 1.
- Noyau situé **à gauche / au-dessus** de la vallée : il a **trop de protons** ; il se désintègre par radioactivité β^+ (un proton devient un neutron).
- Noyau lourd** (en général $A > 200$) : il se désintègre souvent par radioactivité α , qui fait perdre 2 protons et 2 neutrons d'un coup.

Pour trouver les isotopes radioactifs d'un élément, on lit sur le diagramme (ou dans un tableau de nucléides) la ligne horizontale $Z = \text{constante}$: les noyaux situés hors de la vallée sont radioactifs.

3. Les désintégrations radioactives

Définition – Radioactivité

La **radioactivité** est la transformation **spontanée** d'un noyau instable, appelé **noyau père**, en un noyau plus stable, appelé **noyau fils**, avec émission d'une particule (α , β^- ou β^+) et souvent d'un rayonnement électromagnétique γ . C'est une **transformation nucléaire** : l'élément chimique change (contrairement à une transformation chimique, où les noyaux sont conservés).

Lois de conservation (lois de Soddy)

Au cours d'une transformation nucléaire, il y a conservation :

- du **nombre de nucléons** : la somme des nombres de masse A est la même avant et après ;
- de la **charge électrique** : la somme des nombres de charge Z est la même avant et après.

Pour une désintégration ${}_Z^AX \longrightarrow {}_{Z_1}^{A_1}Y + {}_{Z_2}^{A_2}P$: $A = A_1 + A_2$ et $Z = Z_1 + Z_2$.

Type	Particule émise	Équation générale	Exemple
α	noyau d'hélium ${}^4_2\text{He}$	${}_Z^AX \longrightarrow {}_{Z-2}^{A-4}Y + {}^4_2\text{He}$	${}^{238}_{92}\text{U} \longrightarrow {}^{234}_{90}\text{Th} + {}^4_2\text{He}$
β^-	électron ${}^0_{-1}\text{e}$	${}_Z^AX \longrightarrow {}_{Z+1}^AY + {}^0_{-1}\text{e}$	${}^{14}_6\text{C} \longrightarrow {}^{14}_7\text{N} + {}^0_{-1}\text{e}$
β^+	positon ${}^0_1\text{e}$	${}_Z^AX \longrightarrow {}_{Z-1}^AY + {}^0_1\text{e}$	${}^{18}_9\text{F} \longrightarrow {}^{18}_8\text{O} + {}^0_1\text{e}$
γ	photon γ	${}_Z^AY^* \longrightarrow {}_Z^AY + \gamma$	${}^{60}_{28}\text{Ni}^* \longrightarrow {}^{60}_{28}\text{Ni} + \gamma$

À comprendre

- β^- : dans le noyau, un neutron se transforme en proton en émettant un électron : ${}_1^1\text{n} \longrightarrow {}_1^1\text{p} + {}^0_{-1}\text{e}$. L'électron émis vient donc **du noyau**, pas du nuage électronique.
- β^+ : un proton se transforme en neutron en émettant un **positon** (antiparticule de l'électron, de même masse mais de charge $+e$) : ${}_1^1\text{p} \longrightarrow {}_0^1\text{n} + {}^0_1\text{e}$.
- γ : après une désintégration, le noyau fils est souvent dans un état **excité** (noté Y^*). Il revient à son état fondamental en émettant un photon γ de très haute énergie (longueur d'onde inférieure à 10^{-11} m). Ni A ni Z ne changent. Exemple : le cobalt 60 donne par désintégration β^- du nickel 60 excité : ${}^{60}_{27}\text{Co} \longrightarrow {}^{60}_{28}\text{Ni}^* + {}^0_{-1}\text{e}$, qui émet ensuite un rayonnement γ .
- Les désintégrations β s'accompagnent aussi de l'émission d'une particule presque indétectable (neutrino ou antineutrino), qu'on n'écrit pas dans les équations au lycée.

Exemple résolu – Écrire une équation de désintégration

Écrire l'équation de désintégration : a) du radium 226 (${}^{226}_{88}\text{Ra}$), radioactif α ; b) de l'iode 131 (${}^{131}_{53}\text{I}$), radioactif β^- .

Extrait de la classification : ${}_{52}\text{Te}, {}_{53}\text{I}, {}_{54}\text{Xe}, \dots, {}_{86}\text{Rn}, {}_{87}\text{Fr}, {}_{88}\text{Ra}$.

Solution

a) ${}^{226}_{88}\text{Ra} \longrightarrow {}_Z^AX + {}^4_2\text{He}$. Conservation du nombre de nucléons : $226 = A + 4$, donc $A = 222$. Conservation de la charge : $88 = Z + 2$, donc $Z = 86$: c'est le radon. ${}^{226}_{88}\text{Ra} \longrightarrow {}^{222}_{86}\text{Rn} + {}^4_2\text{He}$.

b) ${}^{131}_{53}\text{I} \longrightarrow {}_Z^AX + {}^0_{-1}\text{e}$: $131 = A + 0$ et $53 = Z - 1$, donc $A = 131$ et $Z = 54$: c'est le xénon.
 ${}^{131}_{53}\text{I} \longrightarrow {}^{131}_{54}\text{Xe} + {}^0_{-1}\text{e}$.

4. La loi de décroissance radioactive

Impossible de prévoir **quand** un noyau donné va se désintégrer : il peut le faire dans une seconde ou dans mille ans. C'est un phénomène **aléatoire**. En revanche, sur un très grand nombre de noyaux, le comportement moyen est parfaitement prévisible, comme on peut prévoir qu'environ la moitié des pièces lancées tomberont sur « pile ».

Définition – Caractère aléatoire, constante radioactive

La désintégration d'un noyau est **aléatoire**, **spontanée** et **inéluctable**. Elle ne dépend ni de l'« âge » du noyau, ni de la température, ni de la pression, ni de l'espèce chimique dans laquelle il se trouve.

Tous les noyaux d'une même espèce ont la même probabilité de se désintégrer par unité de temps : c'est la **constante radioactive** λ , en s^{-1} . Pendant une durée Δt courte, parmi N noyaux, le nombre moyen de désintégrations est $\lambda N \Delta t$.

Établir la loi de décroissance radioactive À SAVOIR ÉTABLIR

Entre t et $t + \Delta t$, la variation du nombre de noyaux est $\Delta N = N(t + \Delta t) - N(t) = -\lambda N(t) \Delta t$ (le signe « - » traduit la diminution). En divisant par Δt et en faisant tendre Δt vers 0 :

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

C'est une équation différentielle du type $y' = ay$ avec $a = -\lambda$; ses solutions sont $N(t) = C e^{-\lambda t}$. À $t = 0$, $N(0) = C = N_0$. D'où la **loi de décroissance radioactive** :

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

Activité et demi-vie

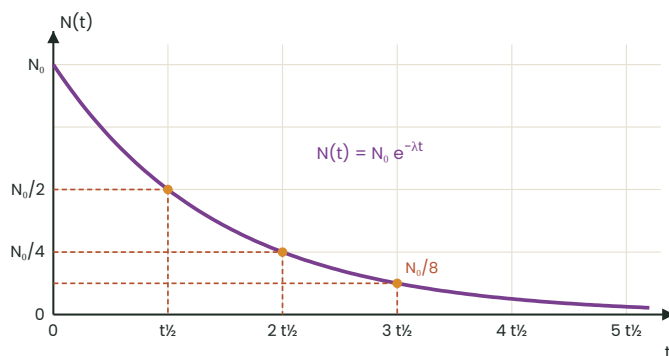
L'**activité** A d'un échantillon est le nombre moyen de désintégrations par seconde :

$$A(t) = -\frac{dN}{dt} = \lambda N(t) = A_0 e^{-\lambda t} \quad \text{avec } A_0 = \lambda N_0$$

- A en **becquerels** (Bq) : 1 Bq = 1 désintégration par seconde ;
- λ en s^{-1} ; N sans unité (nombre de noyaux) ; t en s.

La **demi-vie** $t_{1/2}$ est la durée au bout de laquelle la moitié des noyaux initialement présents se sont désintégrés : $N(t_{1/2}) = \frac{N_0}{2}$. On montre (même calcul qu'en cinétique, fiche 04) que :

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \quad \text{et, au bout de } n \text{ demi-vies : } N = \frac{N_0}{2^n}, \quad A = \frac{A_0}{2^n}.$$



Décroissance radioactive : le nombre de noyaux est divisé par 2 à chaque demi-vie, quelle que soit la date de départ.

Noyau	Type	Demi-vie	Noyau	Type	Demi-vie
baryum 137m	γ	2,55 min	iode 131	β^-	8,02 jours
fluor 18	β^+	110 min	carbone 14	β^-	5 730 ans
technétium 99m	γ	6,0 h	potassium 40	β^- (surtout)	$1,25 \times 10^9$ ans
radon 222	α	3,82 jours	uranium 238	α	$4,47 \times 10^9$ ans

Au labo – Mesurer une activité et observer le caractère aléatoire

Comptage. Un **compteur Geiger-Müller** compte les particules qui le traversent pendant une durée choisie. Même sans source, il détecte quelques coups par minute : c'est le **bruit de fond**

(radioactivité naturelle, rayons cosmiques), qu'on mesure d'abord et qu'on retranche. Si on répète plusieurs fois un comptage de même durée devant une source, on obtient des valeurs différentes, réparties autour d'une moyenne : c'est la signature du caractère aléatoire.

Décroissance du baryum 137m. Avec un minigénérateur césium 137 / baryum 137m, on extrait (par élution) une solution de baryum 137m, émetteur γ . On compte les désintégrations toutes les 30 secondes pendant une quinzaine de minutes : l'activité décroît exponentiellement et on mesure $t_{1/2} \approx 2,6 \text{ min}$.

Simulation avec des dés. Chaque dé représente un noyau ; à chaque lancer, les dés qui tombent sur 6 sont « désintégrés » et retirés. Le nombre de dés restants décroît selon une loi exponentielle (voir la partie Python).

Exemple résolu – L'iode 131 en médecine

Pour traiter certaines maladies de la thyroïde, on administre à un patient une gélule d'iode 131 d'activité $A_0 = 4,0 \text{ GBq}$. Demi-vie : $t_{1/2} = 8,02 \text{ jours}$. $N_A = 6,02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$, $M(^{131}\text{I}) = 131 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$.

1. Calculer la constante radioactive λ en s^{-1} .
2. En déduire le nombre de noyaux d'iode 131 dans la gélule, puis leur masse.
3. Quelle serait l'activité de la gélule au bout de 24 jours (sans élimination biologique) ?
4. Au bout de combien de temps l'activité ne vaut-elle plus que 1 % de sa valeur initiale ?

Solution

1. On convertit en secondes : $t_{1/2} = 8,02 \times 24 \times 3\,600 = 6,93 \times 10^5 \text{ s}$. $\lambda = \frac{\ln 2}{t_{1/2}} = \frac{\ln 2}{6,93 \times 10^5} = 1,00 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$.

2. $A_0 = \lambda N_0$, donc $N_0 = \frac{A_0}{\lambda} = \frac{4,0 \times 10^9}{1,00 \times 10^{-6}} = 4,0 \times 10^{15}$ noyaux. Masse : $m = \frac{N_0}{N_A} \times M = \frac{4,0 \times 10^{15}}{6,02 \times 10^{23}} \times 131 = 8,7 \times 10^{-7} \text{ g}$, moins d'un microgramme !

3. 24 jours $\approx 3 t_{1/2}$: $A = \frac{A_0}{2^3} = \frac{4,0}{8} = 0,50 \text{ GBq}$ (le calcul $A_0 e^{-\lambda t}$ avec $t = 24 \times 86\,400 \text{ s}$ donne la même valeur).

4. On cherche t tel que $A_0 e^{-\lambda t} = 0,01 A_0$, soit $e^{-\lambda t} = 0,01$ et $t = \frac{\ln 100}{\lambda} = \frac{\ln 100}{\ln 2} t_{1/2} = 6,64 \times 8,02 = 53 \text{ jours}$.

5. La datation par radioactivité

Puisque la décroissance suit une loi connue, un échantillon radioactif est une véritable **horloge**. Il suffit de connaître la quantité (ou l'activité) initiale et de mesurer la quantité actuelle.

Méthode – Dater un échantillon

De $A(t) = A_0 e^{-\lambda t}$ (ou $N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$), on tire l'âge de l'échantillon :

$$t = \frac{1}{\lambda} \ln \left(\frac{A_0}{A(t)} \right) = \frac{t_{1/2}}{\ln 2} \ln \left(\frac{A_0}{A(t)} \right).$$

On choisit un noyau dont la demi-vie est du même ordre de grandeur que l'âge à mesurer : si elle est trop courte, il ne reste plus rien à mesurer ; si elle est trop longue, l'activité n'a presque pas changé.

Deux horloges naturelles

Carbone 14 (objets d'origine biologique : bois, os, tissus, charbon). Il se forme en permanence dans la haute atmosphère ($^{14}_7\text{N} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^{14}_6\text{C} + {}^1_1\text{p}$). Tant qu'il est vivant, un organisme échange du carbone avec l'atmosphère : la proportion de carbone 14 y reste constante, ce qui correspond à une activité d'environ 13,6 désintégrations par minute et par gramme de carbone. À sa mort, les échanges cessent et l'activité décroît avec $t_{1/2} = 5\,730$ ans. Méthode utilisable de quelques centaines d'années à environ 50 000 ans.

Potassium-argon (roches volcaniques). Le potassium 40 ($t_{1/2} = 1,25 \times 10^9$ ans) se transforme en partie (environ 11 % des désintégrations) en argon 40, un gaz. Quand la lave est en fusion, l'argon s'échappe ; après solidification, il reste piégé dans la roche et s'accumule. En mesurant les quantités d'argon 40 et de potassium 40, on date la solidification de la roche : de quelques centaines de milliers à plusieurs milliards d'années.

Exemple résolu – Dater un morceau de bois

Un fragment de bois retrouvé sur un site archéologique a une activité de 9,8 désintégrations par minute et par gramme de carbone. Estimer son âge.

Solution

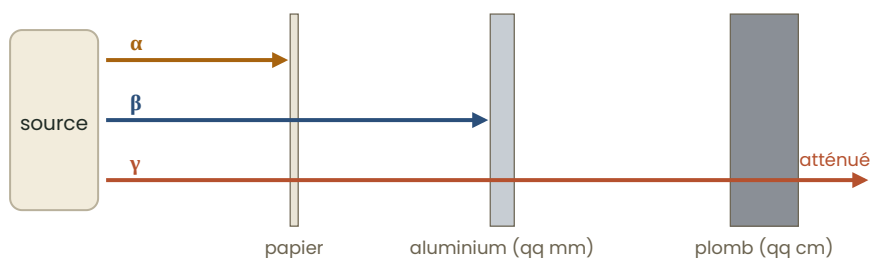
$A_0 = 13,6 \text{ min}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$ (bois vivant) et $A = 9,8 \text{ min}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$. Les unités s'éliminent dans le rapport : pas besoin de convertir.

$$t = \frac{t_{1/2}}{\ln 2} \ln \left(\frac{A_0}{A} \right) = \frac{5\,730}{\ln 2} \times \ln \left(\frac{13,6}{9,8} \right) = 2,7 \times 10^3 \text{ ans.}$$

L'arbre a été abattu il y a environ 2 700 ans. Contrôle : A est compris entre A_0 et $A_0/2$, l'âge doit être inférieur à une demi-vie : c'est bien le cas.

6. Radioprotection et applications médicales

Les rayonnements α , β et γ sont **ionisants** : ils peuvent arracher des électrons aux atomes qu'ils rencontrent et endommager les cellules vivantes (en particulier l'ADN). Leurs effets dépendent de l'activité de la source, du type de rayonnement, de son énergie et de la durée d'exposition. On les mesure par la **dose efficace**, en **sieverts** (Sv) : en France, l'exposition moyenne est d'environ 4,5 mSv par an (radon, rayonnements cosmique et tellurique, examens médicaux).



Pouvoir de pénétration : les particules α sont arrêtées par une feuille de papier (ou quelques centimètres d'air), les β par quelques millimètres d'aluminium ; les γ sont seulement atténués par plusieurs centimètres de plomb ou une épaisse couche de béton.

Se protéger des rayonnements ionisants

- **La distance** : l'exposition diminue très vite quand on s'éloigne de la source (comme $1/d^2$ pour une source ponctuelle) ; on manipule avec des pinces.
- **La durée** : l'exposition est proportionnelle au temps passé près de la source.
- **Les écrans** : leur nature et leur épaisseur dépendent du rayonnement (plexiglas ou aluminium pour β , plomb ou béton pour γ) ; tabliers et protège-seringues plombés.
- **Le confinement** : éviter l'ingestion ou l'inhalation (gants, hottes, locaux ventilés). Un émetteur α , peu dangereux à l'extérieur du corps, est très nocif à l'intérieur.

Les zones où sont utilisées des sources sont signalées par le trèfle radioactif. La réglementation limite l'exposition artificielle du public (hors médecine) à 1 mSv par an.

Applications médicales

- **Diagnostic (imagerie)** : on injecte un traceur radioactif qui se fixe sur l'organe à étudier, et on détecte de l'extérieur les photons γ émis. **Scintigraphie** au technétium 99m (émetteur γ , $t_{1/2} = 6,0$ h) ; **TEP** (tomographie par émission de positons) au fluor 18 (émetteur β^+ , $t_{1/2} = 110$ min) : chaque positon s'annihile avec un électron en donnant deux photons γ émis dans des directions opposées. On choisit des demi-vies courtes (minutes, heures) pour limiter l'exposition du patient.
- **Thérapie** : détruire des cellules cancéreuses. **Radiothérapie** externe (faisceaux de rayonnements), **curiethérapie** (sources placées au contact de la tumeur), **radiothérapie interne** (iode 131 qui se fixe dans la thyroïde).
- **Stérilisation** du matériel médical par rayonnement γ (cobalt 60).

2 Les pièges à éviter

Attention – Les erreurs classiques

- **Confondre A , Z et N .** Dans $^{14}_6\text{C}$, il y a 6 protons et $14 - 6 = 8$ neutrons, pas 14 neutrons.
- **Écrire que la masse est conservée.** Ce sont le **nombre de nucléons** et la **charge** qui sont conservés. La masse, elle, diminue légèrement (c'est l'origine de l'énergie libérée).
- **Croire que tout a disparu au bout de $2 t_{1/2}$.** Au bout de $t_{1/2}$ il reste $N_0/2$, au bout de $2 t_{1/2}$ il reste $N_0/4$: la moitié de ce qui **reste** disparaît à chaque demi-vie.
- **Utiliser λ dans une mauvaise unité.** Pour obtenir une activité en becquerels (s^{-1}), λ doit être en s^{-1} dans $A = \lambda N$: convertir la demi-vie en secondes.

- **Oublier le caractère aléatoire.** La demi-vie n'est pas la « durée de vie » d'un noyau : on ne peut pas savoir quand un noyau donné se désintégrera, et un noyau ne « vieillit » pas.
- **Confondre positon et proton.** Le positon ${}^0_1e$ a la masse d'un électron et la charge $+e$; le proton ${}^1_1p$ est un nucléon.

3 Avec Python

On simule la désintégration aléatoire de $N_0 = 1\,000$ noyaux, comme avec des dés : pendant chaque intervalle Δt , chaque noyau a une probabilité $p = 1/6$ de se désintégrer (fonction `random()` qui renvoie un nombre au hasard entre 0 et 1). On compare au modèle théorique $N_n = N_0 (1 - p)^n$, qui est bien une exponentielle décroissante : $N_n = N_0 e^{-\lambda t}$ avec $t = n \Delta t$ et $\lambda \Delta t = -\ln(1 - p) \approx 0,182$.

```
import random
random.seed(2027)          # pour obtenir toujours le même tirage

N0 = 1000                  # nombre initial de noyaux
p = 1/6                    # probabilité de désintégration par intervalle Δt
N = N0
print(" n   N simulé   N théorique")
for n in range(0, 13):
    if n % 2 == 0:         # affichage un intervalle sur deux
        print(f"{n:2d}   {N:5d}       {N0*(1-p)**n:7.1f}")
    # chaque noyau encore présent "lance son dé" : il se désintègre si p est réalisée
    N = sum(1 for noyau in range(N) if random.random() >= p)

# demi-vie estimée : premier n pour lequel N <= N0/2, sur une nouvelle simulation
N, n = N0, 0
while N > N0/2:
    N = sum(1 for noyau in range(N) if random.random() >= p)
    n += 1
print("Moitié des noyaux désintégrés après", n, "intervalles")
```

Affichage obtenu :

```
n   N simulé   N théorique
0   1000       1000.0
2   698        694.4
4   471        482.3
6   335        334.9
8   239        232.6
10  169        161.5
12  125        112.2
Moitié des noyaux désintégrés après 4 intervalles
```

Les valeurs simulées fluctuent autour des valeurs théoriques (caractère aléatoire) ; les écarts relatifs sont plus grands quand il reste peu de noyaux. La demi-vie théorique vaut $\frac{\ln 2}{-\ln(5/6)} \approx 3,8$ intervalles, en accord avec la simulation. Avec matplotlib, en traçant N en fonction de n pour plusieurs tirages, on obtient des courbes « en escalier » très proches de l'exponentielle théorique, d'autant plus proches que N_0 est grand.

4 Exercices

Exercice 1 – Composition des noyaux ★

On considère les noyaux : $^{12}_6\text{C}$, $^{14}_6\text{C}$, $^{14}_7\text{N}$, $^{235}_{92}\text{U}$, $^{238}_{92}\text{U}$, $^{40}_{19}\text{K}$ et $^{40}_{18}\text{Ar}$.

1. Donner la composition (protons, neutrons) de chaque noyau.
2. Quels noyaux sont isotopes ? Justifier.
3. $^{14}_6\text{C}$ et $^{14}_7\text{N}$ sont-ils isotopes ? Qu'ont-ils en commun ?

Exercice 2 – Compléter des équations ★

Compléter les équations et indiquer le type de radioactivité. *Données* : $Z(\text{B}) = 5$; $Z(\text{S}) = 16$; $Z(\text{Pb}) = 82$.

1. $^{222}_{86}\text{Rn} \longrightarrow ^{218}_{84}\text{Po} + ?$
2. $^{32}_{15}\text{P} \longrightarrow ? + ^0_{-1}\text{e}$
3. $^{11}_6\text{C} \longrightarrow ^{11}_5\text{B} + ?$
4. $^{210}_{84}\text{Po} \longrightarrow ? + ^4_2\text{He}$
5. $^{137}_{56}\text{Ba}^* \longrightarrow ^{137}_{56}\text{Ba} + ?$

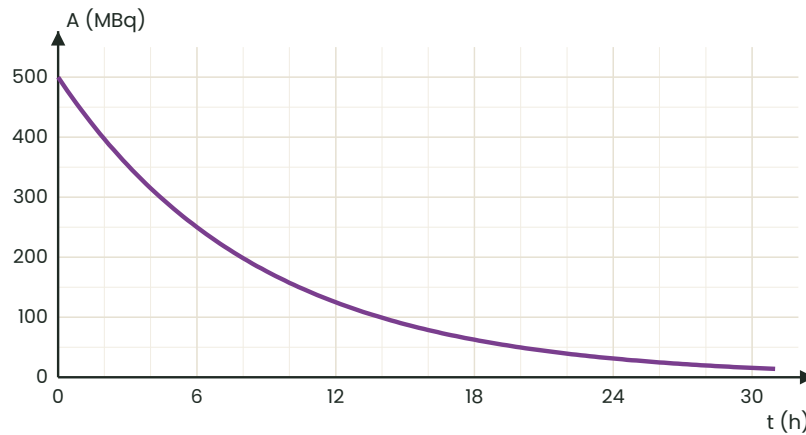
Exercice 3 – Isotopes du sodium ★★

Le seul isotope stable du sodium ($Z = 11$) est le sodium 23. Le sodium 22 et le sodium 24 sont radioactifs. *Données* : $Z(\text{Ne}) = 10$; $Z(\text{Mg}) = 12$; $Z(\text{Np}) = 93$; $Z(\text{Am}) = 95$.

1. Situer ces deux noyaux par rapport au sodium 23 sur un diagramme (N, Z). Lequel a un excès de neutrons ? un excès de protons ?
2. En déduire le type de radioactivité de chacun et écrire les équations de désintégration.
3. L'américium 241 ($^{241}_{95}\text{Am}$), utilisé autrefois dans les détecteurs de fumée, est un noyau lourd. Quel type de radioactivité peut-on prévoir ? Écrire l'équation.

Exercice 4 – Exploiter une courbe de décroissance ★★

Pour une scintigraphie osseuse, on injecte à un patient une solution contenant du technétium ^{99m}Tc , émetteur γ . La courbe donne l'activité de la dose injectée (sans tenir compte de l'élimination biologique).



Activité du technétium ^{99m}Tc injecté en fonction du temps.

1. Déterminer graphiquement la demi-vie du technétium ^{99m}Tc .
2. Calculer la constante radioactive λ en s^{-1} , puis le nombre de noyaux injectés.
3. Calculer l'activité au bout de 24 h. Vérifier sur la courbe.
4. Au bout de combien de temps l'activité passera-t-elle sous 1 MBq ?
5. Écrire l'équation de l'émission γ du technétium ^{99m}Tc ($^{99m}_{43}\text{Tc}$, noté $^{99}_{43}\text{Tc}^*$). Pourquoi ce noyau est-il bien adapté à l'imagerie médicale ?

Exercice 5 – Datation au carbone 14 ★★

Dans une grotte ornée, on a prélevé un fragment de charbon de bois dont l'activité est de 3,1 désintégrations par minute et par gramme de carbone (données simplifiées). Pour un organisme vivant : $13,6 \text{ min}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$; $t_{1/2}(^{14}\text{C}) = 5\,730 \text{ ans}$.

1. Entre combien de demi-vies se situe l'âge du charbon ? (Comparer A à $A_0/4$ et $A_0/8$.)
2. Calculer l'âge du charbon de bois.
3. Calculer l'activité qu'aurait un os vieux de 100 000 ans. Pourquoi ne peut-on pas le dater au carbone 14 ?
4. Quelle méthode utiliser pour dater une roche volcanique de plusieurs millions d'années ?

Exercice 6 – Type bac : le fluor 18 et l'imagerie TEP ★★★

Document 1 – Production. Le fluor 18 est produit dans un cyclotron en bombardant de l'oxygène 18 avec des protons : $^{18}_8\text{O} + {}^1_1\text{p} \longrightarrow {}^{18}_9\text{F} + {}^1_0\text{n}$. Il est ensuite incorporé à une molécule de glucose (FDG) qui se fixe préférentiellement dans les cellules très actives, comme les cellules cancéreuses.

Document 2 – Détection. Le fluor 18 est radioactif β^+ , de demi-vie $t_{1/2} = 110 \text{ min}$. Le positon émis parcourt environ un millimètre dans les tissus puis s'annihile avec un électron : deux photons γ de même énergie partent dans des directions opposées et sont détectés par une couronne de détecteurs autour du patient.

Document 3 – Protocole. La dose de FDG doit avoir une activité de 250 MBq au moment de l'injection. Le trajet entre le cyclotron et l'hôpital dure 2 h 00. Données : $Z(\text{O}) = 8$; $N_A = 6,02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$.

$$10^{23} \text{ mol}^{-1}; M(^{18}\text{F}) = 18 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}.$$

1. Vérifier que l'équation du document 1 respecte les lois de conservation.
2. Écrire l'équation de désintégration du fluor 18.
3. Calculer la constante radioactive du fluor 18 en s^{-1} .
4. Quelle activité la dose doit-elle avoir au départ du cyclotron ?
5. Calculer le nombre de noyaux de fluor 18 dans la dose au moment de l'injection, puis la masse correspondante. Commenter.
6. Calculer l'activité due au fluor 18 restant 24 h après l'injection (sans élimination biologique). Commenter.
7. Citer deux mesures de radioprotection pour le manipulateur qui prépare et injecte la dose.

5 Teste-toi (QCM)

- 1 Le noyau $^{14}_6\text{C}$ contient :
A. 6 protons et 14 neutrons
B. 6 protons et 8 neutrons
C. 8 protons et 6 neutrons
D. 14 protons et 6 neutrons
- 2 Lors d'une désintégration β^- :
A. Z diminue de 1
B. A diminue de 4
C. Z augmente de 1 et A ne change pas
D. un proton est émis
- 3 Demi-vie de 8 jours : au bout de 24 jours, la fraction de noyaux restants vaut :
A. $1/3$
B. $1/8$
C. $1/24$
D. 0
- 4 L'activité d'un échantillon radioactif s'exprime en :
A. becquerels
B. sieverts
C. joules
D. $\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}$
- 5 La demi-vie et la constante radioactive sont liées par :
A. $t_{1/2} = \lambda \ln 2$
B. $t_{1/2} = 1/\lambda$
C. $t_{1/2} = \ln 2/\lambda$
D. $t_{1/2} = \lambda/2$
- 6 Le rayonnement le plus pénétrant est le rayonnement :
A. α
B. β^-
C. β^+
D. γ

L'essentiel à retenir

- ${}^A_Z\text{X}$: Z protons, A nucléons, $N = A - Z$ neutrons. Isotopes : même Z , A différents.
- Vallée de stabilité : excès de neutrons $\rightarrow \beta^-$; excès de protons $\rightarrow \beta^+$; noyaux lourds $\rightarrow \alpha$.
- α : ${}^4_2\text{He}$; β^- : ${}^0_{-1}\text{e}$; β^+ : ${}^0_1\text{e}$; γ : photon (désexcitation du noyau fils).
- **Soddy** : conservation du nombre de nucléons A et de la charge Z .
- Désintégration **aléatoire**, spontanée, indépendante des conditions extérieures.
- $N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$ (λ en s^{-1}), obtenue à partir de $\frac{dN}{dt} = -\lambda N$.
- Activité : $A = \lambda N = A_0 e^{-\lambda t}$, en becquerels.
- $t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$; après n demi-vies, $N = N_0/2^n$.
- Datation : $t = \frac{t_{1/2}}{\ln 2} \ln \frac{A_0}{A}$ (carbone 14 : objets biologiques ; potassium-argon : roches).
- Radioprotection : distance, durée, écrans, confinement.
- Médecine : scintigraphie (γ), TEP (β^+), radiothérapie, curiethérapie.

6 Corrigés

Exercice 1

- $^{12}_6\text{C}$: 6 p, 6 n ; $^{14}_6\text{C}$: 6 p, 8 n ; $^{14}_7\text{N}$: 7 p, 7 n ; $^{235}_{92}\text{U}$: 92 p, 143 n ; $^{238}_{92}\text{U}$: 92 p, 146 n ; $^{40}_{19}\text{K}$: 19 p, 21 n ; $^{40}_{18}\text{Ar}$: 18 p, 22 n.
- Isotopes (même Z , A différents) : $^{12}_6\text{C}$ et $^{14}_6\text{C}$; $^{235}_{92}\text{U}$ et $^{238}_{92}\text{U}$.
- Non : ils n'ont pas le même Z (ce sont deux éléments différents). Ils ont le même nombre de nucléons $A = 14$. (C'est d'ailleurs la désintégration β^- du carbone 14 qui donne l'azote 14.) De même pour $^{40}_{19}\text{K}$ et $^{40}_{18}\text{Ar}$.

Exercice 2

- $^{222}_{86}\text{Rn} \longrightarrow ^{218}_{84}\text{Po} + ^4_2\text{He}$: radioactivité α ($222 = 218 + 4$; $86 = 84 + 2$).
- $^{32}_{15}\text{P} \longrightarrow ^{32}_{16}\text{S} + ^0_{-1}\text{e}$: β^- .
- $^{11}_6\text{C} \longrightarrow ^{11}_5\text{B} + ^0_1\text{e}$: β^+ ($11 = 11 + 0$; $6 = 5 + 1$).
- $^{210}_{84}\text{Po} \longrightarrow ^{206}_{82}\text{Pb} + ^4_2\text{He}$: α .
- $^{137}_{56}\text{Ba}^* \longrightarrow ^{137}_{56}\text{Ba} + \gamma$: émission γ (désexcitation, A et Z inchangés).

Exercice 3

- Sodium 23 : $N = 12$; sodium 22 : $N = 11$; sodium 24 : $N = 13$. Sur la ligne $Z = 11$, le sodium 24 est à droite du noyau stable (excès de neutrons), le sodium 22 à gauche (excès de protons).
- Sodium 24 : β^- : $^{24}_{11}\text{Na} \longrightarrow ^{24}_{12}\text{Mg} + ^0_{-1}\text{e}$. Sodium 22 : β^+ : $^{22}_{11}\text{Na} \longrightarrow ^{22}_{10}\text{Ne} + ^0_1\text{e}$.
- Noyau lourd ($A = 241 > 200$) : radioactivité α . $^{241}_{95}\text{Am} \longrightarrow ^{237}_{93}\text{Np} + ^4_2\text{He}$.

Exercice 4

- $A_0 = 500 \text{ MBq}$; $A = 250 \text{ MBq}$ est atteinte à $t_{1/2} = 6,0 \text{ h}$.
- $\lambda = \frac{\ln 2}{6,0 \times 3\,600} = 3,2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$. $N_0 = \frac{A_0}{\lambda} = \frac{500 \times 10^6}{3,21 \times 10^{-5}} = 1,6 \times 10^{13}$ noyaux.
- $24 \text{ h} = 4 t_{1/2}$: $A = \frac{500}{2^4} = 31 \text{ MBq}$. Sur la courbe, on lit environ 30 MBq à $t = 24 \text{ h}$: cohérent.
- $A_0 e^{-\lambda t} = 1 \text{ MBq}$ donne $t = \frac{\ln(500/1)}{\lambda} = \frac{\ln 500}{\ln 2} \times 6,0 = 54 \text{ h}$ (un peu plus de 2 jours).
- $^{99}_{43}\text{Tc}^* \longrightarrow ^{99}_{43}\text{Tc} + \gamma$. Il émet des photons γ , assez pénétrants pour sortir du corps et être détectés, et sa demi-vie courte (6 h) laisse le temps de faire l'examen tout en limitant l'exposition du patient.

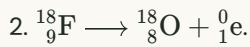
Exercice 5

- $A_0/4 = 3,4$ et $A_0/8 = 1,7 \text{ min}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$. Comme $1,7 < 3,1 < 3,4$, l'âge est compris entre $2 t_{1/2} = 11\,460$ ans et $3 t_{1/2} = 17\,190$ ans.
- $t = \frac{5\,730}{\ln 2} \times \ln\left(\frac{13,6}{3,1}\right) = 1,2 \times 10^4 \text{ ans}$ (environ 12 000 ans), cohérent avec la question 1.
- $A = 13,6 \times e^{-\frac{\ln 2}{5\,730} \times 100\,000} = 7,6 \times 10^{-5} \text{ min}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$, soit moins d'une désintégration par jour et par gramme : c'est bien plus faible que le bruit de fond, impossible à mesurer de façon fiable. (100 000 ans représentent plus de 17 demi-vies.)

4. Il faut un noyau de demi-vie beaucoup plus longue : la méthode potassium-argon ($t_{1/2} = 1,25 \times 10^9$ ans), adaptée aux roches volcaniques.

Exercice 6

1. Nucléons : $18 + 1 = 19$ et $18 + 1 = 19$. Charge : $8 + 1 = 9$ et $9 + 0 = 9$. Les deux lois sont respectées.



$$3. \lambda = \frac{\ln 2}{110 \times 60} = 1,05 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}.$$

4. Pendant le trajet, l'activité est multipliée par $e^{-\lambda \Delta t}$ avec $\Delta t = 7\,200$ s. Il faut donc au départ : $A_{\text{départ}} = 250 \times e^{\lambda \Delta t} = 250 \times e^{1,05 \times 10^{-4} \times 7\,200} = 250 \times 2^{120/110} = 5,3 \times 10^2$ MBq.

5. $N = \frac{A}{\lambda} = \frac{250 \times 10^6}{1,05 \times 10^{-4}} = 2,4 \times 10^{12}$ noyaux ; $m = \frac{N}{N_A} M = \frac{2,4 \times 10^{12}}{6,02 \times 10^{23}} \times 18 = 7,1 \times 10^{-11}$ g. Une masse infime suffit : la détection des rayonnements est extrêmement sensible.

6. $24 \text{ h} = 1\,440 \text{ min}$, soit $1\,440/110 \approx 13$ demi-vies : $A = 250 \times 10^6 \times 2^{-1440/110} = 2,9 \times 10^4$ Bq (environ 29 kBq). L'activité a été divisée par près de 9 000 : le lendemain, il ne reste pratiquement plus de fluor 18 (et l'élimination biologique la réduit encore).

7. Par exemple : travailler derrière un écran plombé et utiliser un protège-seringue (écran) ; manipuler rapidement (durée) ; garder ses distances avec le patient après l'injection et utiliser des pinces (distance) ; porter des gants (contamination) et un dosimètre.

QCM

1. B ($N = 14 - 6 = 8$) · 2. C (un neutron devient un proton) · 3. B ($24 \text{ jours} = 3 t_{1/2}$ et $2^3 = 8$) · 4. A (1 Bq = une désintégration par seconde ; le sievert mesure une dose efficace) · 5. C · 6. D.