I. Désintégrations radioactives

1. Cas des désintégrations radioactives

Certains noyaux atomiques sont instables. Ils finissent donc par se désintégrer : un autre noyau plus léger est formé et une particule est émise :

noyau instable ⟶ noyau plus stable + particule

Le noyau instable est dit **radioactif**. Sa désintégration est appelée **désintégration radioactive** et appartient à la catégorie des transformations nucléaires. Elle a la propriété d'être :

– spontanée : le noyau instable est le seul réactif ;
– aléatoire : la date à laquelle intervient la désintégration d'un noyau est imprévisible ;
– inéluctable : un noyau radioactif finit forcément par se désintégrer.

2. Application des lois de conservation

Lors d'une transformation nucléaire, il y a conservation du nombre de nucléons (ou nombre de masse) A et du nombre de charges électriques Z.

Conséquence pour une désintégration radioactive :
Soit la désintégration d'un noyau X donnant lieu à la formation d'un autre noyau Y et d'une particule P :

$${}^{A}_{Z}X \longrightarrow {}^{A1}_{Z1}Y + {}^{A2}_{Z2}P$$

Les lois de conservation impliquent que $A = A_1 + A_2$ et que $Z = Z_1 + Z_2$.

3. Différentes radioactivités

Il existe 3 types de radioactivités qui se distinguent par la particule émise lors de la désintégration.

La radioactivité α

Les noyaux radioactifs α se désintègrent en émettant un noyau **d'hélium 4**, aussi appelés particule **alpha**. En suivant les lois de conservation, cela peut être modélisé par une équation nucléaire du type :

$${}^{A}_{Z}X \longrightarrow {}^{A-4}_{Z-2}Y + {}^{4}_{2}He$$

La radioactivité β^-

Les noyaux radioactifs β^- se désintègrent en émettant un **électron**, aussi appelé **particule β^-**. En suivant les lois de conservation, cela peut être modélisé par une équation nucléaire du type :

$${}^{A}_{Z}X \longrightarrow {}_{Z+1}^{\;\;\,A}Y + {}^{\;\,0}_{-1}e$$

La radioactivité β^+

Les noyaux radioactifs β^+ se désintègrent en émettant une particule chargée +e, appelé **positon** ou **particule β^+**. En suivant les lois de conservation, cela peut être modélisé par une équation nucléaire du type :

$${}^{A}_{Z}X \longrightarrow {}_{Z-1}^{\;\;\,A}Y + {}^{\;\,0}_{+1}e$$

4. L'émission gamma

À la suite d'une désintégration ➔ ou β, le noyau produit peut se trouver dans un état excité : il est alors noté X ∗ .
Il se désexcite en émettant un photon de haute énergie, constituant un rayonnement électromagnétique γ. Cela peut s'écrire : ${}^{A}_{Z}X^{*} \longrightarrow {}^{A}_{Z}X + \gamma$

II. Modélisation de l'évolution d'une population de noyaux radioactifs

1. Évolution de la population moyenne d'un ensemble de noyaux radioactifs

On considère une population de noyaux radioactifs.
$N(t)$ est le nombre de noyaux non désintégrés à la date t ;
Δt est une durée supposée faible pour le phénomène considéré ;
ΔN est la variation du nombre de noyaux non désintégrés entre les dates t et $t + \Delta t$.
On admettra que : $\Delta N \approx -\lambda N(t)\Delta t$

Interprétation de cette relation :

- le signe « − » indique que le nombre de noyaux non désintégrés diminue pendant la durée Δt considérée, ΔN est donc négatif ;
- la variation du nombre de noyaux non désintégrés est proportionnelle au nombre initial de noyaux et à la durée considérée ;
- λ est la constante radioactive, exprimée en s^{-1} : sa valeur est propre à chaque noyau. Plus λ est élevée, plus la décroissance de la population est rapide.

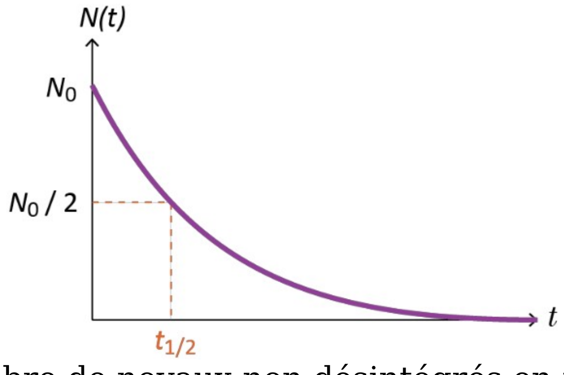
Cependant le nombre de noyaux non désintégrés N(t) n'est pas constant pendant la durée Δt, ce qui rend cette relation approximative. Elle n'est exacte que si les dates t et $t + \Delta t$ sont infiniment voisines, c'est-à-dire si la durée Δt tend vers 0 ce que l'on notera : $dN = -\lambda N dt$

2. Loi de décroissance radioactive

On peut réécrire la relation précédente sous la forme : $\frac{dN}{dt} = -\lambda N$

Cette équation relie la fonction N à sa dérivée : il s'agit d'une équation différentielle du premier ordre.
Sa solution est : $N(t) = N_0\, e^{-\lambda t}$
N_0 étant le nombre initial de noyaux (à la date $t = 0$).
Cette relation est connue sous le nom de **loi de décroissance radioactive**. Elle est analogue à la loi obtenue en cinétique chimique pour un ordre 1.

La courbe associée à cette loi de décroissance radioactive est :



évolution du nombre de noyaux non désintégrés en fonction du temps

3. Temps de demi-vie d'un échantillon radioactif

La décroissance du nombre de noyaux radioactifs peut être plus ou moins rapide selon la nature des noyaux, on peut les comparer en utilisant la notion de temps de demi-vie (noté $t_{1/2}$).
Le temps de demi-vie est la durée au bout de laquelle la moitié des noyaux radioactifs initialement présents se sont désintégrés (voir graphique ci-dessus).

Exemples :

Noyau radioactif	Symbole	Demi-vie $t_{1/2}$	Origine
Uranium 238	$^{238}_{92}U$	4,46 x 10^9 ans	Certaines roches
Radium	$^{226}_{88}Ra$	1 600 ans	Roches terrestres riches en uranium
Carbone 14	$^{14}_{6}C$	5 730 ans	Atmosphère et composés carbonés
Césium 137	$^{137}_{55}Cs$	30,2 ans	Produits de réacteurs nucléaires
Radon 220	$^{220}_{86}Rn$	58 s	Gaz provenant de roches granitiques
Iode 131	$^{131}_{53}I$	8,02 jours	Sous-produits de réacteurs nucléaires

Relation entre le temps de demi-vie et la constante radioactive :
Par définition du temps de demi-vie on a :

$$N(t_{1/2}) = \frac{N_0}{2}$$
$$N_0 e^{-\lambda t_{1/2}} = \frac{N_0}{2}$$
$$e^{-\lambda t_{1/2}} = \frac{1}{2}$$
$$-\lambda t_{1/2} = \ln\left(\frac{1}{2}\right)$$
$$\lambda t_{1/2} = \ln(2)$$

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

Remarque : $t_{1/2}$ est inversement proportionnelle à λ, ce qui est cohérent : plus λ est élevée, plus la décroissance est rapide donc plus la durée nécessaire à la désintégration de la moitié de l'échantillon est faible.

III. Activité d'un échantillon radioactif

1. Définition et relations utiles

L'activité A d'un échantillon radioactif est égale au nombre de désintégrations par seconde dans l'échantillon. Elle s'exprime en becquerel (Bq) en hommage au physicien du même nom.
1 Bq correspond à une désintégration par seconde.

Relation entre l'activité et le nombre de noyaux dans un échantillon
Pendant une durée dt, le nombre de désintégrations vaut : N(t) − N(t + dt) = −dN
L'activité radioactive à la date t vaut donc :

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

Évolution temporelle de l’activité d’un échantillon
Si l’on applique la relation précédente en tenant compte de la loi de décroissance radioactive on obtient :

$$\begin{aligned} A(t) &= -\frac{dN}{dt} \\ &= -\frac{d}{dt}\left(N_0 e^{-\lambda t}\right) \\ &= \underbrace{+\lambda N_0}_{A_0} e^{-\lambda t} \end{aligned}$$

On retiendra : $A(t) = \lambda N(t) = A_0\, e^{-\lambda t}$

L’activité suit donc une loi de décroissance radioactive analogue à N(t) :

2. Activités de quelques sources naturelles et artificielles

Toute la matière autour de nous est radioactive. En effet, les isotopes instables se désintègrent spontanément. On peut comparer les activités de différents échantillons :

Sources	Activité (Bq)
1 L d’eau minérale ou d’eau de mer	10
1 L de lait	50 à 80
1 kg de poisson	100
1 homme de 70 kg	10 000
1 kg de sol granitique	8 000
1 kg de minerai d’uranium	25×10^6
1 kg de radioisotopes pour les diagnostics médicaux	70×10^6

3. Modalités de protection

Les particules émises par les différentes formes de radioactivités ont des propriétés différentes et, à haute dose, sont toutes dangereuses pour l’homme. Il est possible de se protéger des radiations émises, aussi appelées rayonnements ionisants, en adoptant un comportement et des tenues adaptées. Pour se protéger des rayonnements ionisants il faut : s’éloigner de la source, mettre des écrans adaptés et diminuer la durée d’exposition.

Rayonnement	Effet	Protection
Particules α	Elles sont très peu pénétrantes, peu de danger sauf en cas d’ingestion.	Arrêtées par une feuille de papier ou une petite couche d’air.
Particules β^-	Assez pénétrantes. Peuvent provoquer des lésions cutanées.	Arrêtées par une épaisseur de quelques millimètres d’aluminium.
Particules β^+	Assez pénétrantes. Peuvent provoquer des lésions cutanées.	Durée de vie très courte car lorsqu’elle rencontre un électron, les deux particules s’annihilent pour donner un rayonnement γ
Rayonnements γ	Très pénétrants. Peuvent léser les tissus et les organes.	Arrêtés par une épaisseur de plomb d’une vingtaine de centimètres.

Des organismes publics comme l’autorité de sureté nucléaire (ASN) ou l’institut de radioprotection et de sureté nucléaire (IRSN) effectuent des recherches et font des recommandations concernant l’exposition à la radioactivité.

IV. Applications de la radioactivité

Tant dans le domaine médical qu'industriel, la radioactivité trouve de nombreuses applications pratiques.

Datation

La radioactivité est utilisée pour la datation des fossiles ou reliques anciennes. Il faut cependant faire attention au choix du radioélément que l'on va quantifier. Il faut estimer l'âge de l'échantillon et choisir en fonction. En effet, au bout de $10 \times t_{1/2}$, on considère que les noyaux radioactifs sont tous désintégrés. Par exemple, pour la datation des matériaux qui ont jusqu'à 50 000 ans, on utilise le carbone 14 qui a un temps de demi-vie de 5600 ans.

Diagnostic médical

Des radioéléments peuvent être également utilisés comme traceurs pour effectuer des diagnostics médicaux (par exemple lors des scintigraphies) ou encore pour le traitement de certains cancers. Les radioéléments sélectionnés pour ces applications ont un temps de demi-vie relativement court (quelques jours au maximum).

Contrôle qualité

Au niveau industriel, la radioactivité est évidemment au cœur de l'activité des centrales nucléaires mais elle est également utilisée pour contrôler la qualité de certaines soudures ou la détection de fuites dans des canalisations