

Thème : Constitution et transformation de la matière

Chapitre 20 : les transformations nucléaires

- ✓ C'est en 1896 que le physicien français **Henri Becquerel** découvre accidentellement que des sels d'uranium peuvent voiler des plaques photographiques. Il en a conclu que les sels d'uranium émettaient un rayonnement provenant des atomes. Ce phénomène naturel porte le nom de **radioactivité**.
- ✓ En étudiant ce phénomène, **Pierre et Marie Curie** parviennent à isoler deux nouveaux éléments radioactifs, le radium et le polonium, ce qui leur vaut le prix Nobel de physique en 1903.
- ✓ En 1934, **Irène et Frédéric Joliot-Curie** découvrent la radioactivité artificielle.

1. Quelques rappels sur les noyaux atomiques.

1.1. Comment les caractériser ?

☹ Un atome est constitué : $\left\{ \begin{array}{l} - \text{d'un} \dots \text{chargé} \dots \text{constitué de} \dots \\ (\dots + \dots) \\ - \text{d'un nuage électronique (chargé} \dots) \end{array} \right.$

Particules élémentaires	Charge électrique	Masse
Neutrons	Nulle	$m_n = m_p = 1,67 \times 10^{-27} \text{ kg}$
Protons	+ e	$m_n = m_p = 1,67 \times 10^{-27} \text{ kg}$
électrons	- e	$m_e = \frac{m_p}{1800} = 9,1 \times 10^{-31} \text{ kg}$

☹ Un atome est électriquement

La représentation d'un noyau atomique est :



X est le

Z est le; c'est le nombre de

A est le; c'est le nombre de

Le nombre de neutrons est donc N =

1.2. Qu'appelle-t-on isotopes d'un élément ?

Chaque élément est caractérisé par son numéro atomique Z.

Des atomes qui ont le numéro atomique mais un nombre de masse sont appelés

Exemples : Isotopes de l'élément H: ${}^1_1\text{H}$, ${}^2_1\text{H}$ et ${}^3_1\text{H}$; Isotopes de l'élément C: ${}^{12}_6\text{C}$, ${}^{13}_6\text{C}$ et ${}^{14}_6\text{C}$

	hydrogène			carbone			uranium		
Isotopes naturels	${}^1_1\text{H}$ hydrogène	${}^2_1\text{H}$ deutérium	${}^3_1\text{H}$ tritium	${}^{12}_6\text{C}$	${}^{13}_6\text{C}$	${}^{14}_6\text{C}$	${}^{234}_{92}\text{U}$	${}^{235}_{92}\text{U}$	${}^{238}_{92}\text{U}$
Abondance naturelle	99,985	0,015	Trace	98,90	1,10	Trace	0,0055	0,720	99,274

1.3. Diagramme (N,Z) ou diagramme de Segré

Activité : 1 p 114

Bilan :

Le diagramme (N,Z) permet :

- d'identifier les isotopes d'un élément chimique donné
- de déterminer, pour chaque élément chimique, la stabilité ou l'instabilité des différents isotopes de cet élément.
- d'identifier le type de désintégration radioactive subie par un isotope radioactif donné et donc d'en déduire l'équation de désintégration radioactive associée à cet isotope radioactif.

Observation du diagramme (N,Z) :

Thème : Constitution et transformation de la matière

Chapitre 20 : les transformations nucléaires

- ✓ Il possède une zone centrale, appelée vallée de la stabilité, correspondant aux noyaux stables.
 - ⇒ Pour $Z < 20$: cette vallée contient la droite d'équation $N=Z$. Ces noyaux sont stables car ils ont souvent autant de neutrons que de protons.
 - ⇒ Pour $Z > 20$: la cohésion du noyau n'est assurée que si celui-ci contient plus de neutrons que de protons.
- ✓ Les noyaux situés en dehors de la zone de stabilité sont instables. Cela concerne les noyaux trop gros (trop de nucléons) ou ceux dont la proportion neutron/proton est déséquilibrée.

2. Qu'est-ce que la radioactivité ?

2.1. Noyaux radioactifs et radioactivités :

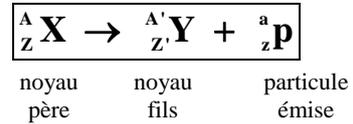
Noyaux radioactifs : ce sont des noyaux Un noyau radioactif se transforme en un autre noyau (stable ou pas) . On dit qu'il

La radioactivité correspond à la désintégration (décomposition) spontanée et aléatoire de noyaux (naturels ou artificiels) instables. Elle s'accompagne de l'émission de particules α , β^- , β^+ et d'un rayonnement γ .

2.2. Les différentes réactions nucléaires spontanées :

2.2.1. Deux lois de conservation ou loi de Soddy:

La désintégration d'un noyau se traduit par une équation-bilan du type



Au cours de cette désintégration il y a :

- conservation du nombre de nucléons, soit
- conservation du nombre de charge, soit

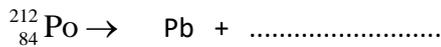
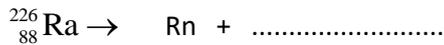
2.2.2. La radioactivité α :

Elle concerne les nucléides lourds ($A > 200$), qui comportent donc un grand nombre de nucléons.

Elle correspond à la production de noyaux d'hélium ${}^4_2\text{He}$.

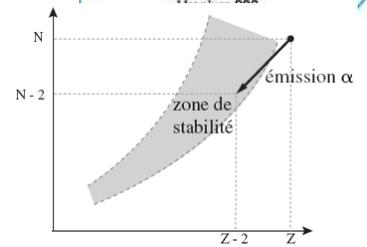
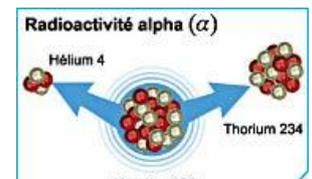
Equation de la désintégration α : ${}^A_Z X \rightarrow \dots\dots\dots$

Exemples : Complétez les équations suivantes.



Dans la classification le noyau fils précède le noyau père de 2 cases.

Dans le diagramme (N,Z), le noyau fils est décalé de 2 cases vers le bas et deux cases vers la gauche par rapport au noyau père.



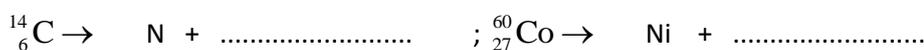
2.2.3. La radioactivité β^- :

Elle concerne les noyaux présentant un excès de neutrons par rapport au nombre de protons.

Elle correspond à la production d'un électron ${}^0_{-1}e$.

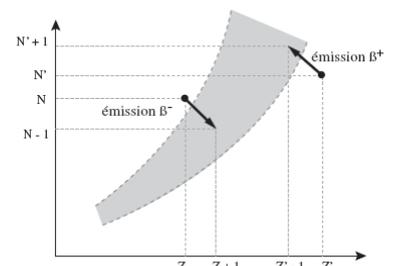
Equation de la désintégration β^- : ${}^A_Z X \rightarrow \dots\dots\dots$

Exemples : Complétez les équations suivantes.



Dans la classification périodique, le noyau fils suit d'une case le noyau père.

Dans le diagramme (N,Z) le noyau fils est décalé d'une case vers la droite par rapport au noyau père.



Thème : Constitution et transformation de la matière

Chapitre 20 : les transformations nucléaires

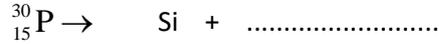
2.2.4. La radioactivité β^+

Elle ne concerne que les nucléides artificiels présentant un excès de protons par rapport au nombre de neutrons.

Elle correspond à la production d'un positron (ou positron ou anti électron) 0_1e .

Equation de la désintégration β^+ : ${}^A_ZX \rightarrow \dots\dots\dots$

Exemple : Complétez l'équation suivante.



Dans la classification, le noyau fils précède d'une case le noyau père.

Dans le diagramme de Segré (N,Z), le noyau fils est décalé d'une case vers le haut et d'une case vers la gauche par rapport au noyau père.

2.2.5. Le rayonnement γ :

Les radioactivités α et β s'accompagnent de la production de noyaux fils instables ou excités; ces noyaux ont une énergie supérieure à celle de l'état fondamental (état stable).

Le retour d'un noyau excité à l'état fondamental s'accompagne de la libération d'énergie sous forme d'un rayonnement électromagnétique γ de très courte longueur d'onde ($\lambda < 10^{-13}$ m). Il se propage donc à la vitesse de la lumière.

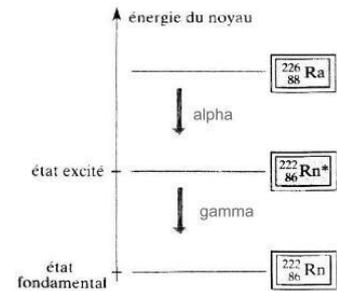
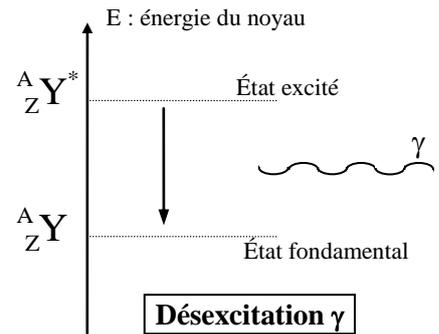
Equation de l'émission γ :



Exercice : Complétez l'équation suivante.



Exercices: 1, 2 et 3 (feuille distribuée)



3. Décroissance radioactive

Les désintégrations radioactives sont :

- : il est impossible de prévoir l'instant de désintégrations
- : elles se déclenchent sans aucune interaction extérieure
- : un noyau instable se désintègre tôt ou tard
- des paramètres de pression et de température contrairement aux réactions chimiques.

A l'échelle microscopique, on ne peut pas dire quand un noyau va se désintégrer. Néanmoins, à l'échelle macroscopique (c'est-à-dire sur un grand nombre de noyau), on a pu établir la loi de décroissance radioactive.

3.1. Loi de décroissance radioactive

On considère un échantillon contenant N_0 noyaux radioactifs à l'instant initial ($t=0s$)

Soit $N(t)$ le nombre de noyaux radioactifs à l'instant t .

Soit $\Delta N(t) = N(t+\Delta t) - N(t)$ la variation du nombre de noyaux radioactifs, c'est-à-dire le nombre de désintégrations nucléaires spontanées qui se produisent dans l'échantillon pendant une durée Δt .

On montre que $\Delta N(t)$ est proportionnelle à $N(t)$ et à Δt selon la relation :

$$(1) \quad \left| \begin{array}{l} N(t) \text{ le nombre de noyaux radioactifs à l'instant } t \\ \Delta t : \text{ durée en seconde} \\ \lambda : \text{ constante radioactive (s}^{-1}\text{)} \end{array} \right.$$

Thème : Constitution et transformation de la matière

Chapitre 20 : les transformations nucléaires

Remarques :

- λ est une caractéristique du noyau.
- $\Delta N(t) = N(t+\Delta t) - N(t)$ 0 le nombre de noyaux radioactifs diminuent au cours du temps.

La relation (1) devient :

Si $\Delta t \rightarrow 0$, $\frac{\Delta N(t)}{\Delta t}$ tend vers $\frac{dN(t)}{dt}$ (écriture différentielle de la fonction dérivée $N(t)$ par rapport au temps).

La relation (1) devient donc :

C'est une équation différentielle linéaire du premier ordre à coefficient constant.

Cette équation différentielle est du type $y' = axy$; avec $a = \dots\dots\dots$

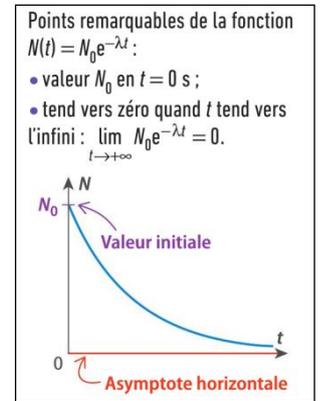
La solution de l'équation est $y(t) = Ax e^{-\lambda \cdot t}$

y' correspond à $\frac{dN(t)}{dt}$

$y(t)$ correspond à $N(t)$

La constante A est obtenue avec les conditions initiales : A t = 0s, $N(t=0) = N_0$

D'où soit



Loi de décroissance radioactive :

Le nombre de noyaux $N(t)$ à l'instant t d'un échantillon radioactif suit la loi de décroissance radioactive suivante :

- | N_0 noyaux radioactifs à l'instant initial ($t=0$ s)
- | λ : constante radioactive (s^{-1})

3.2. Temps de demi-vie

Définition :

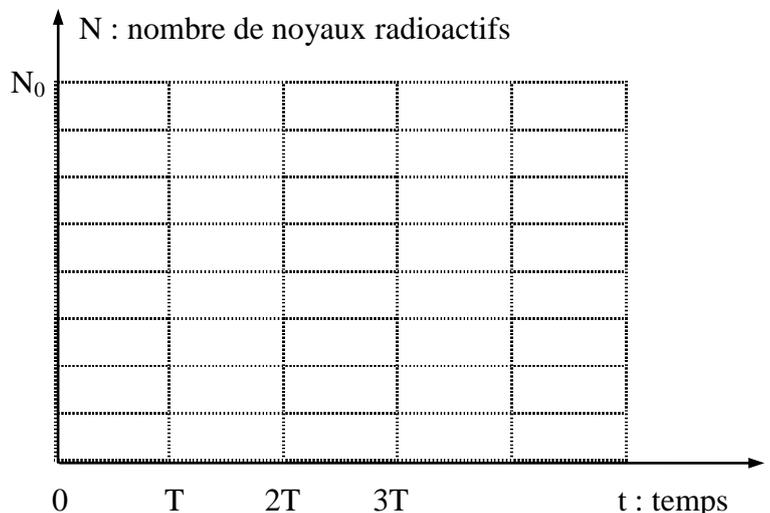
Le temps de demi-vie d'un élément radioactif est

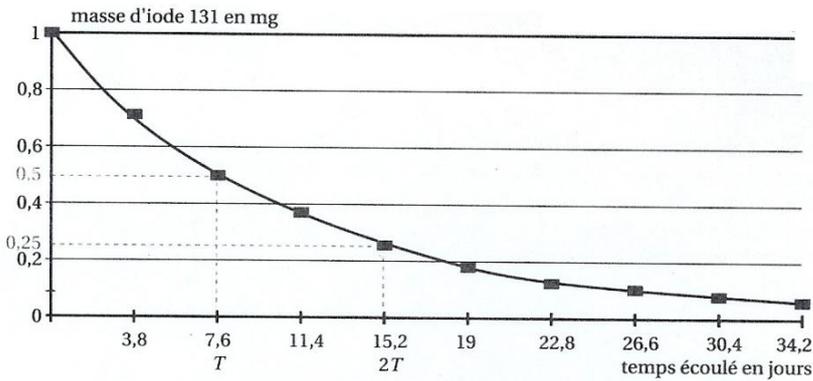
On la note $t_{1/2}$; elle s'exprime en s.

Exemples: ^{214}Po ($1,5 \cdot 10^{-4}$ s); ^{131}I (8 jours); ^{14}C (5700 ans); ^{235}U ($7 \cdot 10^8$ ans)

Exercice : Complétez le tableau ci-dessous et tracez la courbe de décroissance radioactive $N = f(t)$.

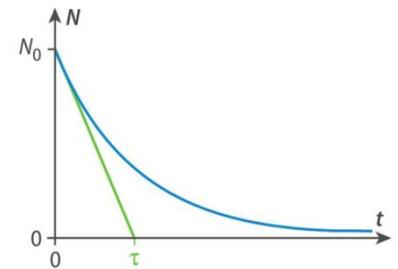
date	nombre de noyaux restants
0	N_0
T	
2T	
3T	
4T	
.....	
nT	





Évolution de la masse d'un échantillon d'iode 131 au cours du temps.

$t = t_{1/2}$, il y a $\frac{N_0}{2}$ noyaux radioactifs d'où :



Détermination graphique de la constante de temps τ .

D'où :

ou

On appelle τ la constante de temps de la désintégration radioactive

A la date $t = \tau$:

3.3. Comment caractériser l'activité d'une source ?

L'activité A d'une source est

L'unité d'activité est le **becquerel (Bq)** **1 Bq = 1 désintégration/s**

Information : l'ancienne unité d'activité d'une source est le Curie: 1 Curie = $3,7 \cdot 10^{10}$ Bq (ce qui correspond à l'activité d'un gramme de radium)

L'activité pendant la durée Δt est donc par définition : > 0 soit

Si $\Delta t \rightarrow 0$, $\frac{\Delta N(t)}{\Delta t}$ tend vers $\frac{dN(t)}{dt}$ d'où

Autre définition :

L'activité d'un échantillon est l'opposé de la dérivée du nombre de noyau radioactif par rapport au temps.

Sachant que donc

Soit

Finalement :

L'activité $A(t)$ d'un échantillon de noyau radioactif est

Thème : Constitution et transformation de la matière

Chapitre 20 : les transformations nucléaires

..... or d'où

De plus : soit (Activité de l'échantillon à la date $t = 0s$)

Finalement :

Conclusion : L'activité d'un échantillon suit la même loi de décroissance radioactive que $N(t)$.

Exercice : L'activité initiale d'une source ^{131}I est $A_0 = 1,1 \cdot 10^6 \text{ Bq}$ et sa période radioactive est de 8 jours. Sachant que l'activité d'une source suit la loi de décroissance radioactive, quelle est son activité au bout :
de 8 jours ?

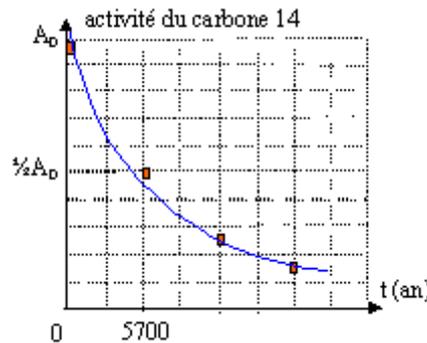
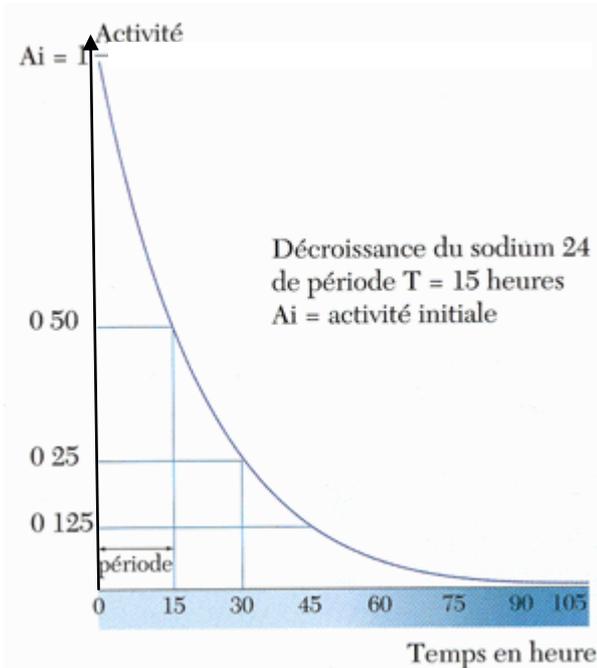
de 24 jours ?

de 160 jours ?

Conclusion : Le temps de demi-vie est aussi la durée au bout de laquelle l'activité d'un échantillon radioactif a diminué de moitié.

Noyau	Constante radioactive λ (en s^{-1})
$^{218}_{86}\text{Rn}$	19,5
$^{220}_{86}\text{Rn}$	$1,25 \times 10^{-2}$
$^{222}_{86}\text{Rn}$	$2,10 \times 10^{-6}$
$^{222}_{90}\text{Th}$	310
$^{232}_{90}\text{Th}$	$1,56 \times 10^{-18}$

Constantes radioactives de quelques isotopes du radon et du thorium.



Au bout d'un temps égal à environ 20 fois la période du radioélément, l'échantillon est considéré inactif.

Exercices : 22 p 125, 28 p 126, 27 p 126 (corrigé dans le livre)

3.4. Importance du temps de demi-vie :

- La valeur de la période va guider le choix d'un radionucléide en médecine : il doit avoir une période de quelques jours c'est-à-dire :
 - Une période pas trop courte pour permettre l'accomplissement des examens.
 - Une période pas trop longue pour éviter une irradiation superficielle.
- La période de certains radionucléides utilisés dans les centrales nucléaires est extrêmement longue, d'où les difficultés pour le stockage de ces matériaux. Il faut donc prévoir la gestion des déchets nucléaires sur le long terme.

4. Radioactivité naturelle

Il existe une soixantaine d'isotopes naturels, les plus abondants étant le potassium 40, l'uranium 238 et le thorium 232.

Exercice : 30 p 127 (corrigé dans le livre)

Noyau	Demi-vie
$^{14}_6\text{C}$	$5,73 \times 10^3$ ans
$^{40}_{19}\text{K}$	$1,25 \times 10^9$ ans
$^{232}_{90}\text{Th}$	$1,41 \times 10^{10}$ ans
$^{238}_{92}\text{U}$	$4,47 \times 10^9$ ans

Demi-vies de quelques radio-isotopes naturels.

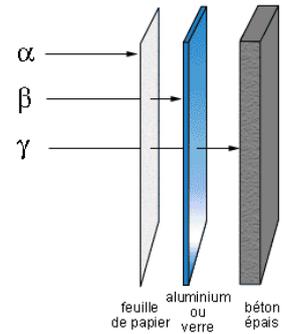
Thème : Constitution et transformation de la matière

Chapitre 20 : les transformations nucléaires

5. Protections contre les rayonnements ionisants

Particules et rayonnement sont tous très dangereux pour l'être humain :

- particules α : **peu pénétrantes** (arrêtées par quelques cm d'air ou une simple feuille de papier) mais **très ionisantes**;
- particules β : **peu ionisantes** mais **pénétrantes** (arrêtées par plusieurs m d'air ou quelques mm d'aluminium);
- rayons γ : **peu ionisants** mais **très pénétrants** (arrêtés par écrans de plomb ou de béton ou de l'eau).



La protection aux rayonnements peut être assurée par :

- la **réduction du temps d'exposition** (le danger est proportionnel à la durée);
- l'**éloignement de la source** (le danger est inversement proportionnel au carré de la distance);
- la **mise en place d'écrans** de protection (béton, eau, feuilles de plomb).

Exercice: 26 p 125 (corrigé dans le livre)

6. Deux applications médicales :

6.1. La scintigraphie.

Cette méthode d'examen est utilisée pour **observer** un organe et **détecter** les tumeurs. Cette méthode est fondée sur la fixation sélective, par certains organes, de certains éléments.

Un **traceur** radioactif (^{131}I pour la glande thyroïde, ^{32}P pour le cerveau ou les os, ...) est injéré, inhalé ou injecté par voie intraveineuse à très faible dose et se fixe sur l'organe à examiner. En se désactivant, ce radioélément émet des rayons γ que l'on détecte avec un compteur.

6.2. La radiothérapie.

Ces méthodes agressives sont utilisées pour **détruire** certaines tumeurs cancéreuses :

- par injection dans l'organisme de radioéléments (^{131}I , ...) émetteurs β^- combinés à des molécules qui se concentrent dans les tissus à irradier et entraînent leur destruction,
- par irradiation externe de la tumeur avec des rayons γ (« bombe au cobalt ^{60}Co »).

C'est une technique délicate car il ne faut pas détruire trop de cellules saines au voisinage de cellules atteintes.

Exercices : 33 p 128, 5 et 6 (feuille distribuée)

7. Application à la datation

Dans un objet à dater, il faut que le nombre de noyaux radioactifs soit très important pour pouvoir utiliser la loi de décroissance radioactive.

La détermination de la date nécessite :

- Un échantillon de noyaux radioactifs de constante radioactive λ connue
- Le nombre de noyaux à la date t
- Le nombre de noyaux à la date $t=0$ s

Exemples : datation au carbone, datation au plomb 210

Exercices : 34 p 128, 23 p 125 (corrigé dans le livre), 4 (feuille distribuée)

