

# Chapitre 8 φ : la radioactivité et les transformations nucléaires

## I. Stabilité et instabilité des noyaux

### 1. Rappels sur le noyau

${}^A_ZX$  A : nombre de nucléons : nombre de masse  
 Z : nombre de protons : numéro atomique ou nombre de charge

### 2. Isotopes

Des noyaux qui possèdent le même nombre de protons Z mais des nombres de neutrons différents sont appelés isotopes.

exemple :  ${}^1_1\text{H}$  (99,985 %)       ${}^2_1\text{H}$  (0,015 %)       ${}^3_1\text{H}$  (traces)

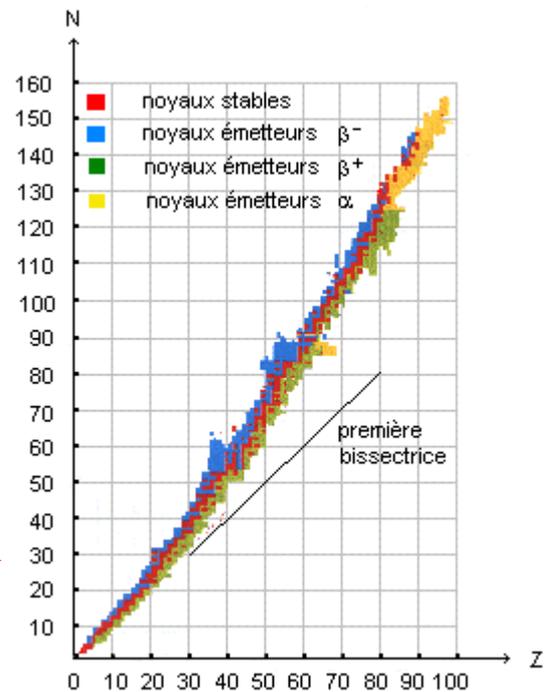
Remarque : des isotopes possèdent les mêmes propriétés chimiques puisqu'ils ont le même nombre d'électrons !

### 3. Stabilité des noyaux

- ◆ interaction électromagnétique : responsable de la répulsion entre protons
- ◆ interaction forte : responsable de l'attraction entre nucléons ; très intense mais seulement à très courte portée (< 10 fm)

Conséquence : un noyau trop gros, possédant donc trop de nucléons, est instable.

Le diagramme de Segré (ci-contre) permet de différencier les noyaux stables des noyaux instables.



## II. Radioactivité

### 1. Définition

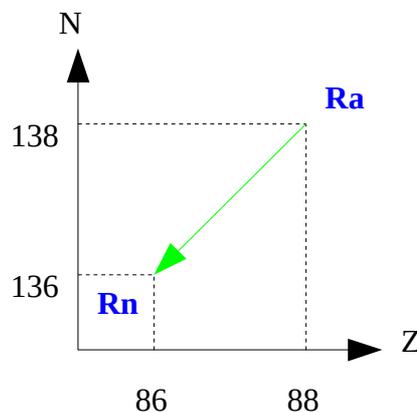
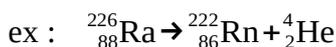
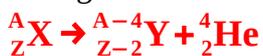
Quand un noyau  ${}^A_ZX$  est instable, il subit une transformation spontanée qui aboutit à la formation d'un nouveau noyau  ${}^{A'}_{Z'}Y$ . C'est le phénomène de radioactivité.

### 2. Lois de conservation : lois de Soddy

Au cours d'une réaction nucléaire, il y a conservation de la charge électrique et conservation du nombre total de nucléons.

### 3. Radioactivité α

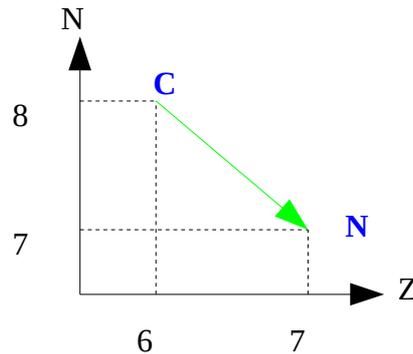
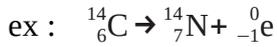
Elle concerne les noyaux lourds, instables à cause d'un trop grand nombre de nucléons. Le noyau se désintègre en émettant un noyau  ${}^4_2\text{He}$  nommé particule α.



La radioactivité α rapproche le noyau du domaine de stabilité.

#### 4. Radioactivité $\beta^-$

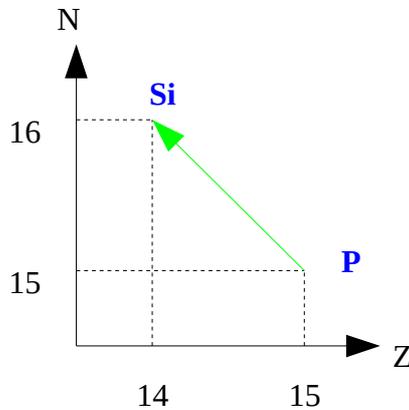
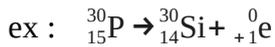
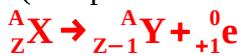
Elle concerne les noyaux instables à cause d'un trop grand nombre de neutrons. Le noyau émet un électron  $e^-$ .



La radioactivité  $\beta^-$  rapproche le noyau du domaine de stabilité.

#### 5. Radioactivité $\beta^+$

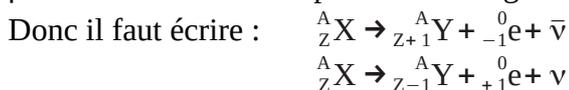
Elle concerne les noyaux instables à cause d'un trop grand nombre de protons. Le noyau émet un positon  $e^+$  (anti-particule de l'électron).



La radioactivité  $\beta^+$  rapproche le noyau du domaine de stabilité.

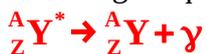
#### 6. Conservation de l'énergie

Des mesures ont montré que, lors d'une désintégration  $\beta^-$  ou  $\beta^+$ , l'énergie transportée par les particules après la transformation était plus petite que celle transportée avant la transformation. Ceci a conduit Wolfgang Pauli à postuler, en 1936, l'émission d'autres particules : le neutrino  $\nu$  pour la désintégration  $\beta^+$  et l'antineutrino  $\bar{\nu}$  pour la désintégration  $\beta^-$ .



#### 7. Radioactivité $\gamma$

Lors d'une désintégration  $\alpha$  ou  $\beta$ , le noyau père expulse une particule,  $\alpha$  ou  $\beta$ . Le noyau fils obtenu est instable : on dit qu'il est excité. Il se désexcite en libérant un photon qui transporte un rayonnement électromagnétique très énergétique et de très faible longueur d'onde : le rayonnement  $\gamma$ .



#### 8. Activité

L'activité d'un échantillon A mesure le nombre de désintégrations par seconde. Elle s'exprime en becquerel (Bq).

### III. Équivalence masse-énergie

#### 1. Énergie de masse

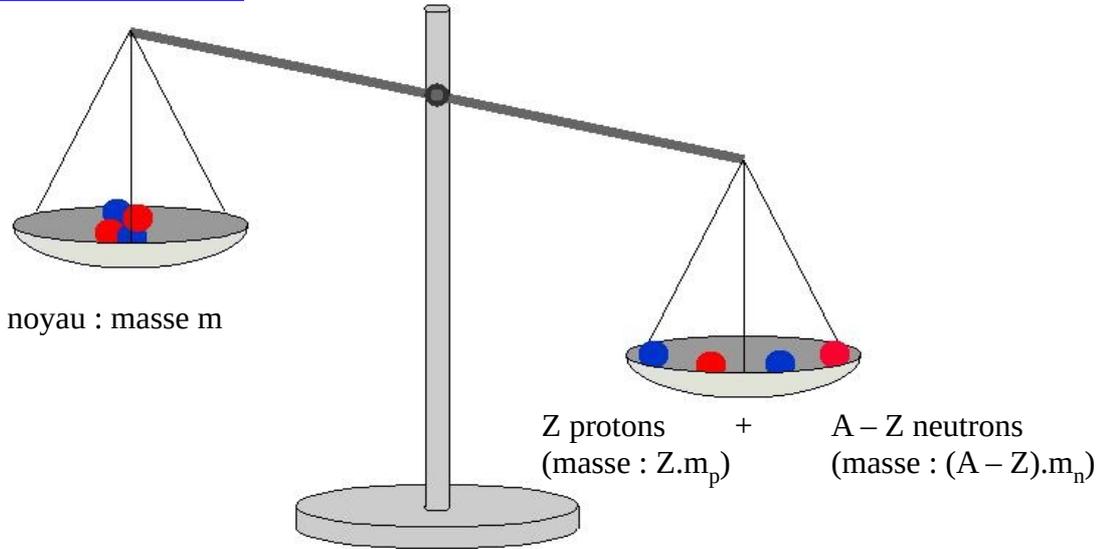
En 1905, Einstein proposa sa théorie de la relativité. Celle-ci a deux conséquences :

- tout corps ayant une masse possède, au repos, une énergie potentielle : l'énergie de masse ;

- masse et énergie sont des grandeurs équivalentes : de l'énergie peut se transformer en masse et réciproquement.

L'énergie de masse d'un corps est  $E = m.c^2$  avec E en joule (J), m en kg et c en m.s<sup>-1</sup>.

## 2. Défaut de masse



On constate que  $m < Z.m_p + (A - Z).m_n$

Pour un noyau  ${}^A_ZX$ , le défaut de masse est  $\Delta m = [Z.m_p + (A - Z).m_n] - m$ .

## 3. Énergie de liaison

Si la masse du noyau est inférieure à la masse de ses constituants pris séparément, alors :

$$m.c^2 < [Z.m_p + (A - Z).m_n].c^2$$

Donc un noyau est plus stable que ses constituants séparés car son énergie de masse est plus faible.

On appelle énergie de liaison  $E_l = \Delta m . c^2$ .

C'est cette énergie qui est récupérée lors d'une réaction nucléaire.

## IV. Fission et fusion nucléaires

### 1. Fusion nucléaire

La fusion nucléaire est une réaction nucléaire au cours de laquelle deux noyaux légers s'unissent pour former un noyau plus lourd et plus stable.

ex :  ${}^2_1H + {}^3_1H \rightarrow {}^4_2He + {}^1_0n$  Cette réaction libère  $2,88.10^{-12}$  J par noyau formé.

Remarque : cette réaction ne peut pas être spontanée car les noyaux se repoussent naturellement. Il faut atteindre une température d'environ  $100.10^6$  °C.

La fusion contrôlée pourrait être, à l'avenir, une source d'énergie inépuisable (Cadarache, projet ITER).

### 2. Fission nucléaire

La fission nucléaire est une réaction nucléaire au cours de laquelle un noyau lourd se brise en deux noyaux plus légers et plus stables.

ex :  ${}^1_0n + {}^{235}_{92}U \rightarrow {}^{94}_{38}Sr + {}^{140}_{54}Xe + {}^1_0n$  Cette réaction libère  $2,96.10^{-11}$  J par noyau d'uranium brisé.

Remarque : cette réaction nécessite d'être amorcée par un neutron rapide qui sert de projectile.

Cette réaction produit 2 (ou 3) neutrons qui peuvent, à leur tour, casser 2 ou 3 noyaux d'uranium : réaction en chaîne. C'est ce qu'on fait dans les centrales nucléaires actuelles.

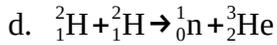
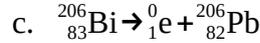
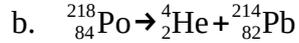
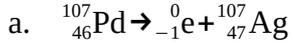
## Exercices

### Exercice 17 p 137

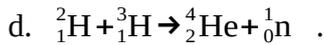
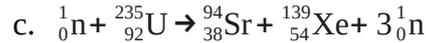
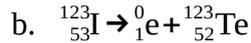
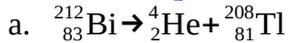
1.  $A = \frac{9}{60} = \mathbf{0,15 \text{ Bq}}$

2. En 2,0 minutes, il y en aurait exactement le double, soit  $2,0 \times 9 = 18$ .

### Exercice 18 p 137

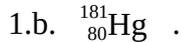


### Exercice 19 p 137



### Exercice 20 p 137

1.a. Le numéro atomique du mercure est 80.



### Exercice 21 p 137

1.a.  ${}_{92}^{235}\text{U}$  : 92 protons et 143 neutrons.

1.b.  ${}_2^4\text{He}$  : 2 protons et 2 neutrons.

2.  ${}_{94}^{239}\text{Pu} \rightarrow {}_{92}^{235}\text{U} + {}_2^4\text{He}$  : le noyau père était du plutonium.

### Exercice 22 p 137

1.  $E = |\Delta m| \cdot c^2$  .

2.  $E = 2,457 \cdot 10^{-28} \times 299\,792\,458^2 = \mathbf{2,208 \cdot 10^{-11} \text{ J}}$  .

### Exercice 23 p 137

1.  $|\Delta m| = \frac{E}{c^2} = \frac{2,82 \cdot 10^{-12}}{299\,792\,458^2} = \mathbf{3,14 \cdot 10^{-29} \text{ kg}}$  .

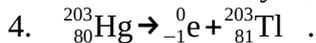
2.  $|\Delta m| = \frac{E}{c^2} = \frac{2 \cdot 10^9}{299\,792\,458^2} = \mathbf{2 \cdot 10^{-8} \text{ kg} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ g} = 20 \mu\text{g}}$  .

### Exercice 25 p 138

1. Isotopes : même nombre de protons mais pas le même nombre de neutrons.

2.  $q_{\text{Hg}} = 80 \times e = 80 \times 1,6 \cdot 10^{-19} = 1,28 \cdot 10^{-17} \text{ C}$ .

3. A l'échelle du noyau, c'est l'interaction forte qui prédomine.



### Exercice 28 p 139

1. Il y avait :  ${}_{92}^{235}\text{U}$  : 92 protons et 143 neutrons ;  ${}_{92}^{238}\text{U}$  : 92 protons et 146 neutrons.

2. Pour que les lois de Soddy soient respectées, il faut que  $x = 3$ .

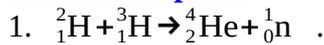
3.  $|\Delta m| = \left| m({}_{62}^{154}\text{Sm}) + m({}_{30}^{74}\text{Zn}) + 3 \cdot m({}_0^1\text{n}) - \left[ m({}_{92}^{235}\text{U}) + m({}_0^1\text{n}) \right] \right|$

$\Leftrightarrow |\Delta m| = \left| 2,5553783 \cdot 10^{-25} + 1,3106009 \cdot 10^{-25} + 3 \times 1,67493 \cdot 10^{-27} - \left[ 3,9021711 \cdot 10^{-25} + 1,67493 \cdot 10^{-27} \right] \right|$

$\Leftrightarrow |\Delta m| = 2,6933 \cdot 10^{-28} \text{ kg}$

$E = |\Delta m| \cdot c^2 = 2,6933 \times 299\,792\,458^2 = \mathbf{2,42062 \cdot 10^{-11} \text{ J}}$  : énergie libérée par noyau désintégré.

### Exercice 29 p 139



2.  $E = |\Delta m| \cdot c^2 = |m({}^4_2\text{He}) + m({}^1_0\text{n}) - m({}^2_1\text{H}) - m({}^3_1\text{H})| \cdot c^2$  donc :

$$E = |6,64466 \cdot 10^{-27} + 1,67493 \cdot 10^{-27} - 3,34358 \cdot 10^{-27} - 5,00736 \cdot 10^{-27}| \times 299792458^2 = \mathbf{2,81759 \cdot 10^{-12} \text{ J}}$$

3. 1 m<sup>3</sup> d'eau de mer contient 33 g de deutérium

$$1,0 \text{ L} = 1,0 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ contient donc } m = 33 \cdot 10^{-3} \text{ g de deutérium.}$$

L'énergie calculée à la question précédente est pour la fusion de 1 noyau de deutérium. Il faut donc calculer combien il y a de noyaux dans 33.10<sup>-3</sup> g.

$$N_A = \frac{N}{n} \Leftrightarrow N = n \cdot N_A \quad : \text{ nombre de noyaux de deutérium.}$$

$$\text{Masse molaire : } M = \frac{m}{n} \Leftrightarrow n = \frac{m}{M} .$$

$$\text{Donc } N = \frac{m}{M} \cdot N_A = \frac{33 \cdot 10^{-3}}{3,34358 \cdot 10^{-24} \times 6,02 \cdot 10^{23}} \times 6,02 \cdot 10^{23} = 9,86 \cdot 10^{21} \text{ (attention : la masse d'un noyau}$$

est en kg !, il faut donc la convertir en g)

$$\text{Par conséquent : } E = 2,81759 \cdot 10^{-12} \times 9,86 \cdot 10^{21} = \mathbf{28 \cdot 10^9 \text{ J}}$$

4. La combustion de 800 L d'essence dégage une énergie  $E' = 3,5 \cdot 10^7 \times 800 = \mathbf{28 \cdot 10^9 \text{ J}}$ . L'affirmation du texte est donc vraie.

### Exercice 32 p 141

1. Cet isotope de l'hydrogène contient 1 proton et 2 neutrons.

2. a.  $E = |\Delta m| \cdot c^2 = |m({}^4_2\text{He}) + m({}^1_0\text{n}) - m({}^2_1\text{H}) - m({}^3_1\text{H})| \cdot c^2$  donc :

$$E = |6,64466 \cdot 10^{-27} + 1,67493 \cdot 10^{-27} - 3,34358 \cdot 10^{-27} - 5,00736 \cdot 10^{-27}| \times 299792458^2 = \mathbf{2,81759 \cdot 10^{-12} \text{ J}}$$

2. b. La valeur ci-dessus a été calculée pour un noyau d'hélium formé.

$$\text{Quantité d'hélium dans 1 kilogramme : } n = \frac{m}{M} = \frac{1000}{4,0} = 250 \text{ mol} .$$

Nombre d'atome d'hélium dans 1 kilogramme :  $N = n \cdot N_A = 250 \times 6,02 \cdot 10^{23} = 1,50 \cdot 10^{26}$  atomes.

$$\text{Énergie libérée par la formation de 1 kilogramme d'hélium : } E' = 1,50 \cdot 10^{26} \times 2,81759 \cdot 10^{-12} = \mathbf{4,24 \cdot 10^{14} \text{ J}}$$

$$2. \text{ c. Quantité de carbone qui libérerait la même énergie : } n' = \frac{E'}{240 \cdot 10^3} = \frac{4,24 \cdot 10^{14}}{240 \cdot 10^3} = 1,77 \cdot 10^9 \text{ mol}$$

$$\text{Masse de charbon correspondante : } m' = n' \cdot M(\text{C}) = 1,77 \cdot 10^9 \times 12 = 21 \cdot 10^9 \text{ g} = 21 \text{ 000 t.}$$

$$3. \text{ a. Quantité de combustible dans 1 kilogramme : } n' = \frac{m'}{M'} = \frac{1000}{2,0+3,0=5,0} = 200 \text{ mol}$$

Nombre de noyaux dans 1 kilogramme :  $N'' = n'' \cdot N_A = 200 \times 6,02 \cdot 10^{23} = 1,20 \cdot 10^{26}$  noyaux.

$$\text{Énergie libérée par la formation de 1 kilogramme : } E'' = 1,20 \cdot 10^{26} \times 2,81759 \cdot 10^{-12} = \mathbf{3,39 \cdot 10^{14} \text{ J}}$$

3. b. 30 % x 3,39.10<sup>14</sup> ~ 10<sup>14</sup>. On retrouve bien l'ordre de grandeur donné dans le texte.

4. On constate qu'une faible masse de réactif nucléaire libère une très grande quantité d'énergie, par rapport à la masse de réactif qu'il faudrait dans le cas d'une réaction chimique, comme une combustion.