

# Chapitre 7

## Réactions nucléaires

### 7.1 Généralités

#### 7.1.1 Définitions

Un atome est constitué d'électrons et d'un noyau, lui-même constitué de *nucléons* (protons et neutrons). Le *nombre de masse*, noté  $A$ , est le nombre de nucléons d'un noyau. Le *nombre de charge*, noté  $Z$ , est le nombre de protons de ce noyau.

Le *nombre de neutrons* est donc  $N = A - Z$ . L'atome étant électriquement neutre,  $Z$  désigne également le nombre de ses électrons ; il est aussi appelé *numéro atomique* de l'atome.

Un *élément chimique* est l'ensemble des atomes de même numéro atomique  $Z$ . On connaît actuellement une centaine d'éléments chimiques.

Un *nucléide* est l'ensemble des atomes de noyau identique, ou l'ensemble de ces noyaux. Deux atomes ou deux noyaux d'un même nucléide ont même nombre de charge  $Z$  et même nombre de masse  $A$ . On représente un nucléide de l'élément  $X$  par l'écriture :  ${}^A_ZX$ . Actuellement, on connaît environ 1500 nucléides naturels ou artificiels. Ils se distinguent les uns des autres soit par leur nombre de masse, soit par leur nombre de charge, soit par les deux à la fois.

Les différents nucléides d'un même élément chimique sont dits *isotopes*. Deux isotopes ont même nombre de charge  $Z$  mais un nombre de masse  $A$  différent. Les noyaux des isotopes diffèrent par leur nombre de neutrons  $N$ .

**Exemple 7.1** Les nucléides  ${}^{12}_6\text{C}$  et  ${}^{14}_6\text{C}$  sont deux nucléides différents du même élément chimique carbone, ils sont isotopes.

#### 7.1.2 Lois de conservation

Lors des réactions nucléaires, les grandeurs suivantes sont conservées :

- Le nombre de nucléons  $A$ .

- La charge électrique et donc aussi le nombre de charge  $Z$ .
- L'énergie des particules participant à la réaction et formant un système isolé. On rappelle que l'énergie totale  $E$  d'une particule est la somme de l'énergie cinétique  $E_C$  et de l'énergie au repos  $E_0$  :

$$E = E_C + E_0.$$

Il est important d'inclure l'énergie au repos dans le bilan énergétique car elle tient compte de l'énergie de liaison d'un noyau atomique.

- La quantité de mouvement.

## 7.2 La radioactivité

### 7.2.1 Ce qu'on entend par radioactivité

En 1896, Henri Becquerel découvrit que l'uranium et ses composés émettent continuellement un rayonnement. Pierre et Marie Curie poursuivant les travaux commencés par Becquerel ont donné à ce phénomène le nom de *radioactivité*.

**Définition** *On appelle radioactivité la transformation d'un noyau atomique au cours de laquelle un rayonnement est émis.*

On rencontre de nombreux éléments radioactifs naturels.

- L'uranium 238 ou 235 est un des éléments radioactifs naturels les plus importants.
- Le radon 222 est un gaz radioactif naturel, issu des roches et terrains contenant de l'uranium.
- Le corps humain contient également des éléments radioactifs : le potassium 40 et le carbone 14.

Parmi les 1500 nucléides connus, il en existe environ 325 naturels :

- 274 sont stables, leur noyau ne se modifie pas spontanément au cours du temps ;
- 51 sont instables car ils sont radioactifs, leur noyau est susceptible à tout moment de subir un changement pouvant porter sur le nombre de masse  $A$  et/ou sur le nombre de charge  $Z$ .

Si on classe ces nucléides stables en fonction des nombres qui les caractérisent,  $A$  et  $Z$ , on peut tracer une *courbe de stabilité* (figure 7.1).

Les noyaux instables radioactifs se situent :

- de part et d'autre de la courbe de stabilité ; ces nucléides possèdent un excès ou un défaut de neutrons ;
- au-delà du dernier nucléide stable ( $Z = 82$ ), ces nucléides possèdent un excès de nucléons. Ce sont les noyaux lourds.

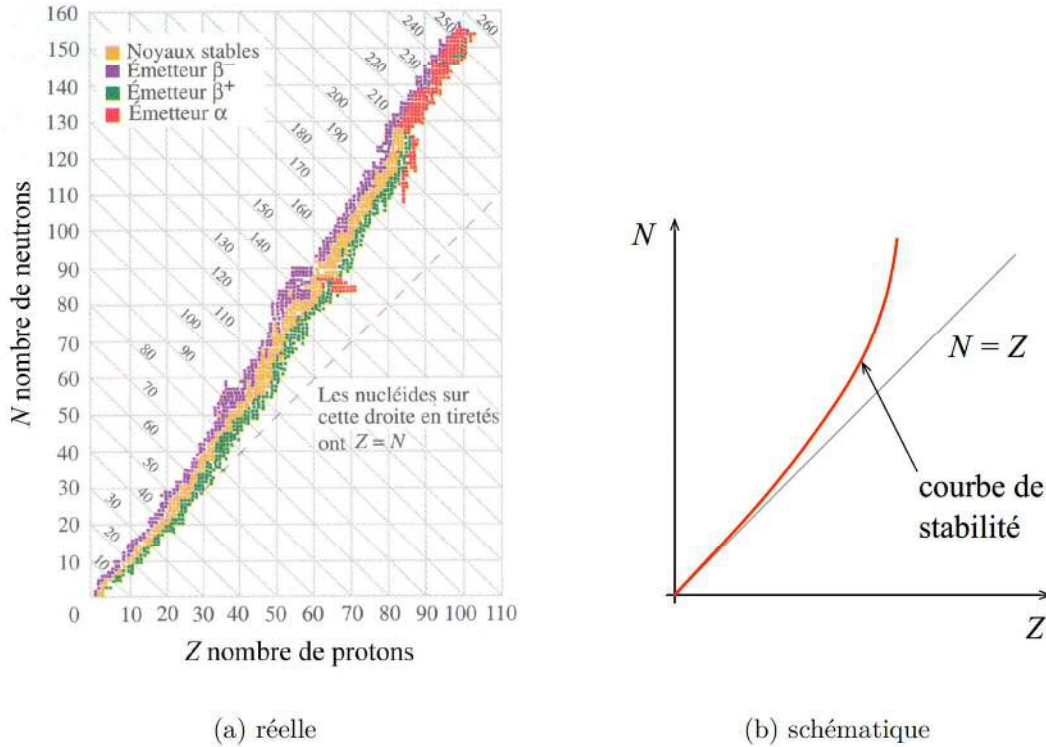


FIGURE 7.1 – Courbe de stabilité

### 7.2.2 Les différents modes de désintégration

#### La radioactivité $\alpha$

**Définition** La radioactivité  $\alpha$  est l'émission de noyaux d'hélium  ${}^4_2\text{He}$  par certains noyaux. Les noyaux d'hélium sont aussi appelés particules ou rayons  $\alpha$ .

Les noyaux émetteurs  $\alpha$  ont des nombres de masse et de charge élevés ( $A > 200$  ;  $Z > 82$ ) ; ce sont des noyaux trop lourds et donc instables.

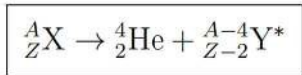
La radioactivité  $\alpha$  se traduit par une réaction nucléaire représentée par l'équation :



$A'$  et  $Z'$  sont reliés à  $A$  et à  $Z$  par les règles de conservation du nombre de nucléons et de la charge électrique :

$$\begin{aligned} A &= A' + 4 \\ Z &= Z' + 2. \end{aligned}$$

On obtient alors :



Exemple :  ${}^{226}_{88}\text{Ra} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^{222}_{86}\text{Rn}^*$ .

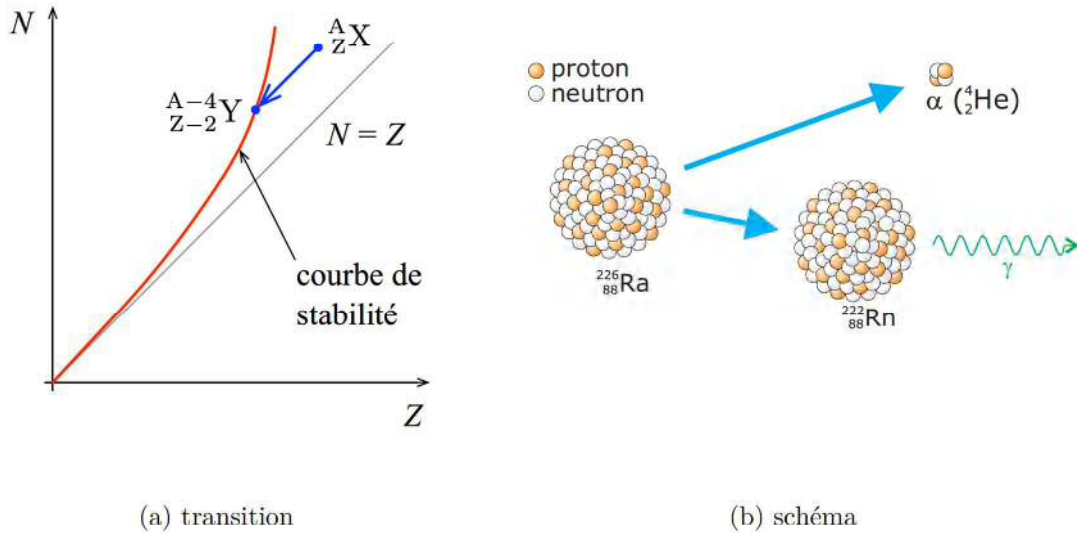
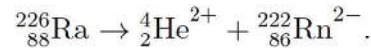


FIGURE 7.2 – Désintégration  $\alpha$  d'un noyau lourd

Le nucléide X est appelé le noyau « père », Y est le noyau « fils ». La particule  $\alpha$  est éjectée du noyau avec une certaine énergie cinétique. La désintégration du noyau lourd rapproche le noyau fils de la courbe de stabilité (figure 7.2).

L'astérisque (\*) indique que le noyau fils peut être émis dans un état excité, qui donne lieu ultérieurement à un rayonnement  $\gamma$ .

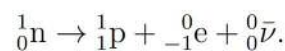
*Remarque* : pour un atome radioactif, la réaction nucléaire de désintégration ne porte que sur les noyaux. Le cortège électronique de l'atome n'est pas modifié. De ce fait, dans l'écriture de la réaction nucléaire, X est un noyau. Sinon, on écrirait par exemple, pour les atomes et les ions :



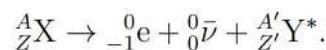
### La radioactivité $\beta^-$

La radioactivité  $\beta^-$ , encore appelée rayonnement  $\beta^-$ , est l'émission d'électrons par certains noyaux.

La désintégration  $\beta^-$  se produit pour des nucléides instables trop riches en neutrons ; elle résulte de la désintégration, dans le noyau, d'un neutron qui se transforme en un proton avec émission d'un électron et d'un *antineutrino* :



La réaction nucléaire  $\beta^-$  est représentée par l'équation :



L'existence de l'antineutrino fut postulée par Wolfgang Pauli pour rétablir la conservation de l'énergie lors de la désintégration  $\beta^-$ . En effet, l'étude du bilan énergétique de cette réaction nucléaire montre que l'énergie du noyau père est toujours supérieure à la somme des énergies du noyau fils et de l'électron ; l'antineutrino emporte une partie de l'énergie initiale.

L'antineutrino est une particule sans charge, sa masse au repos est quasiment nulle. Il est très difficile de le détecter car il n'interagit que très faiblement avec la matière.

La conservation du nombre de nucléons et de la charge électrique relie respectivement  $A$  à  $A'$  et  $Z$  à  $Z'$  :

$$\begin{aligned} A &= A' \\ Z &= Z' - 1. \end{aligned}$$

On obtient alors :

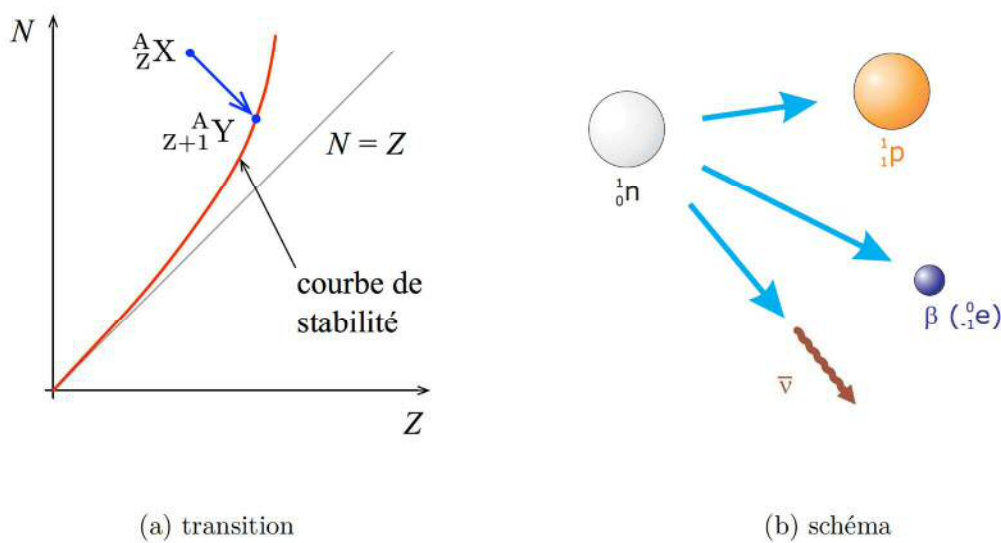
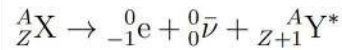


FIGURE 7.3 – Désintégration  $\beta^-$

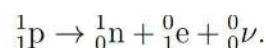
Exemple :  ${}_{6}^{14} C \rightarrow {}_{-1}^0 e + {}_0^0 \bar{\nu} + {}_{7}^{14} N^*$ .

Les noyaux situés à gauche de la courbe de stabilité se désintègrent par émission  $\beta^-$  ; cette désintégration rapproche le noyau fils de la courbe de stabilité (figure 7.3).

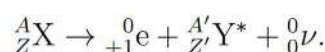
Le noyau fils peut être émis dans un état excité et l'électron est éjecté avec une énergie cinétique plus ou moins importante.

### La radioactivité $\beta^+$

La radioactivité  $\beta^+$  se produit avec des nucléides obtenus artificiellement au laboratoire. C'est pourquoi on la qualifie de radioactivité artificielle, elle est caractéristique des noyaux trop riches en protons. Elle résulte de la désintégration, dans le noyau, d'un proton qui se transforme en un neutron avec émission d'un positron et d'un neutrino :



La réaction nucléaire  $\beta^+$  est représentée par l'équation :



Le positron est une particule de masse égale à celle de l'électron mais de charge opposée. L'existence du neutrino fut postulée pour rétablir la conservation de l'énergie lors de la désintégration  $\beta^+$ . Le neutrino est une particule sans charge, sa masse au repos est quasiment nulle. Il est très difficile de le détecter car il n'interagit que très faiblement avec la matière.

*Remarque* : le neutrino et l'antineutrino de même que l'électron et le positron forment des couples particule-antiparticule.

En tenant compte de la conservation du nombre de nucléons et du nombre de charge, on obtient les relations suivantes :

$$\begin{aligned} A &= A' \\ Z &= Z' + 1. \end{aligned}$$

D'où l'équation de la réaction :

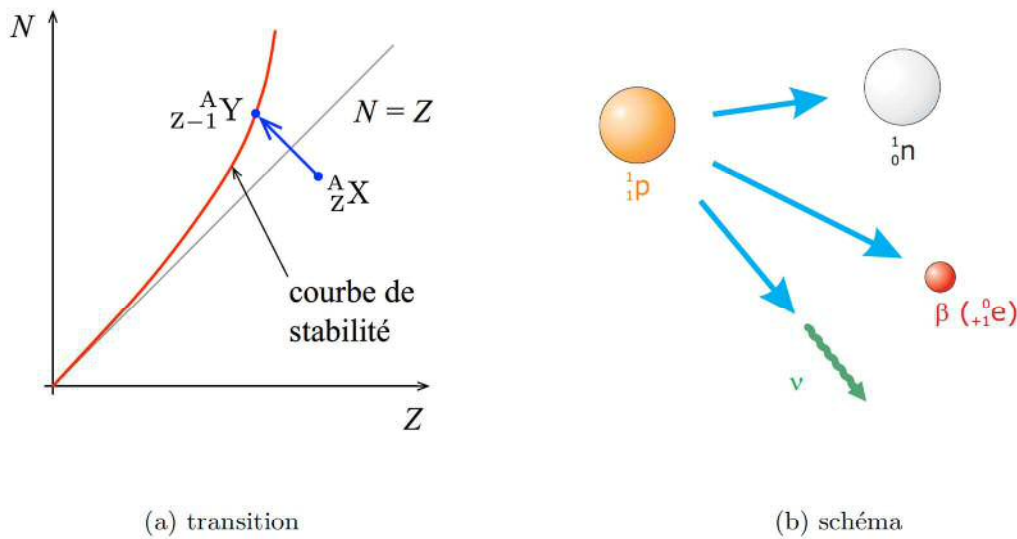
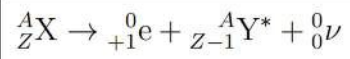


FIGURE 7.4 – Désintégration  $\beta^+$

*Exemple* :  ${}_{15}^{30}P \rightarrow {}_1^0e + {}_0^0\nu + {}_{14}^{30}Si^*$ .

Les noyaux situés à droite de la courbe de stabilité se désintègrent par émission  $\beta^+$  ; cette désintégration rapproche le noyau fils de la courbe de stabilité (figure 7.4).

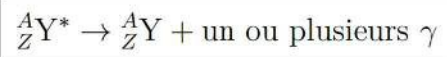
Le noyau fils est émis ou non dans un état excité ; le positron est éjecté avec une énergie cinétique plus ou moins importante.

### L'émission $\gamma$

**Définition** *L'émission  $\gamma$  est une émission de rayonnements électromagnétiques très énergétiques.*

À la suite d'une désintégration  $\alpha$ ,  $\beta^-$  ou  $\beta^+$ , le noyau fils est émis dans un état excité. Il retrouve son état fondamental en émettant un ou plusieurs photons de haute énergie. Un photon n'a ni charge ni masse au repos ; il est caractérisé par  $Z = 0$  et  $A = 0$ .

Au cours de l'émission  $\gamma$ , le nucléide se conserve :



Le rayonnement  $\gamma$  est très pénétrant. Il peut traverser plusieurs dizaines de centimètres de plomb, ou plusieurs mètres de béton. Dans le langage courant, il est souvent nommé rayon X.

### 7.2.3 La décroissance radioactive

#### Désintégration d'un noyau radioactif

La transformation d'un noyau instable en un autre noyau n'est pas un processus de « vieillissement » continu mais se passe d'un seul coup ; une telle transformation nucléaire est appelée *désintégration*.

Il est impossible de prévoir la date de la désintégration d'un noyau particulier. Sur un ensemble de noyaux instables identiques, il est impossible de prévoir lesquels de ces noyaux vont se désintégrer à une date donnée. Le phénomène de la désintégration d'un noyau radioactif est donc *imprévisible* et *aléatoire*.

Vu le caractère aléatoire de la désintégration, il est impossible de trouver une loi qui décrirait le comportement d'un seul noyau. On peut cependant prévoir avec précision l'évolution *statistique* d'un grand nombre de noyaux identiques.

#### La loi de décroissance radioactive

Considérons un échantillon contenant  $N$  noyaux radioactifs d'un nucléide donné à la date  $t$ . Le phénomène de désintégration va provoquer la décroissance du nombre de noyaux.

Pendant un très court intervalle de temps  $\Delta t$ , le nombre de noyaux varie de  $\Delta N$ . Le nombre de noyaux ayant subi une désintégration pendant cet intervalle de temps est donc égal à  $-\Delta N$ . Le signe moins est nécessaire car  $\Delta N$  est négatif.

La probabilité de désintégration pendant l'intervalle de temps  $\Delta t$  est :

$$\text{probabilité} = -\frac{\Delta N}{N}.$$

Comme la désintégration n'est pas un processus de « vieillissement », cette probabilité ne varie pas au cours du temps et est proportionnelle à l'intervalle de temps  $\Delta t$  :

$$-\frac{\Delta N}{N} \sim \Delta t \Rightarrow -\frac{\Delta N}{N} = \lambda \Delta t$$

où  $\lambda$  est un coefficient de proportionnalité appelée *constante radioactive*. Elle représente la probabilité de désintégration par unité de temps, s'exprime en  $s^{-1}$  et ne dépend que du nucléide. On obtient ainsi :

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} = -\lambda N$$

et à la limite  $\Delta t \rightarrow 0$  :

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N. \quad (7.1)$$

Cette relation est une équation différentielle qu'on peut résoudre en écrivant :

$$\frac{1}{N} \frac{dN}{dt} = -\lambda$$

et en introduisant la fonction logarithme naturel (ou népérien) :

$$\frac{d \ln N}{dt} = -\lambda.$$

Cette équation différentielle admet comme solution :

$$\ln N = -\lambda t + c$$

où  $c$  est une constante d'intégration déterminée par les conditions initiales. Si à l'instant  $t = 0$  le nombre de noyaux est  $N_0$ , la constante vaut  $c = \ln N_0$ . D'où :

$$\ln N - \ln N_0 = -\lambda t \Rightarrow \ln \frac{N}{N_0} = -\lambda t.$$

En appliquant à cette relation la fonction exponentielle, on obtient la *loi de décroissance radioactive* :

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

**Énoncé** *Le nombre  $N(t)$  de noyaux radioactifs contenus dans un échantillon varie suivant la loi :*

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

où  $\lambda$  est la constante radioactive du nucléide et  $N_0$  le nombre de noyaux initialement présents.

### La demi-vie d'un nucléide

Un nucléide radioactif est le plus souvent caractérisé par sa *demi-vie*  $t_{1/2}$  (ou période radioactive) préférablement à  $\lambda$ .

**Définition** *La demi-vie (ou période radioactive) d'un nucléide est l'intervalle de temps au bout duquel la moitié des noyaux initialement présents ont subi une désintégration.*

La demi-vie varie d'une fraction de seconde jusqu'à des milliards d'années selon le nucléide considéré.



Pour trouver une relation entre la demi-vie  $t_{1/2}$  et la constante radioactive  $\lambda$ , on écrit, pour  $t = t_{1/2}$  :

$$\begin{aligned} N(t_{1/2}) &= \frac{N_0}{2} \\ N_0 e^{-\lambda t_{1/2}} &= \frac{N_0}{2} \\ e^{-\lambda t_{1/2}} &= \frac{1}{2} \\ -\lambda t_{1/2} &= \ln \frac{1}{2} = -\ln 2 \end{aligned}$$

et finalement :

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

Pour chaque intervalle de temps correspondant à une demi-vie, le nombre de noyaux est divisé par deux (figure 7.5).

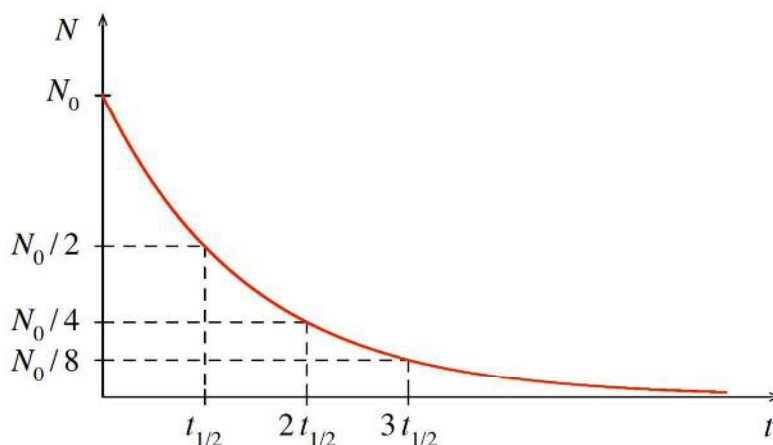


FIGURE 7.5 – Loi de décroissance radioactive

## 7.2.4 Utilisation de la loi de décroissance

### Activité d'un échantillon radioactif

**Définition** L'activité  $A$  à une date  $t$  d'un échantillon contenant  $N$  noyaux radioactifs est définie comme étant le nombre de noyaux qui se désintègrent par seconde :

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

En utilisant la relation (7.1), on peut écrire :

$$A(t) = \lambda N(t)$$

L'activité est proportionnelle au nombre de noyaux présents et varie donc suivant la même loi exponentielle :

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

et en définissant l'activité initiale  $A_0 = \lambda N_0$  on a :

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

Dans le système international, l'unité d'activité est le *becquerel* (Bq). Un becquerel correspond à une désintégration par seconde.

L'activité d'un échantillon de masse  $m$ , de masse molaire atomique  $M$  et de demi-vie  $t_{1/2}$  peut être calculée en utilisant :

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

et :

$$N = N_A \frac{m}{M}$$

ce qui permet d'écrire :

$$A = \frac{\ln 2 N_A m}{M t_{1/2}}$$

où  $N_A$  est le nombre d'Avogadro.

**Exemple 7.2** Le calcul de l'activité de 1 g de  $^{226}_{88}\text{Ra}$  de masse molaire 226 g/mol et de demi-vie 1600 ans donne  $A = 3,7 \cdot 10^{10}$  Bq. Cette valeur correspond au *curie* (Ci), ancienne unité de l'activité.

## La datation en géologie

Plusieurs éléments radioactifs peuvent être utilisés pour dater les roches. On considère ici l'exemple de la *datation* par le plomb.

Le plomb ordinaire d'origine non radioactive est un mélange des isotopes  $^{204}\text{Pb}$ ,  $^{206}\text{Pb}$ ,  $^{207}\text{Pb}$  et  $^{208}\text{Pb}$ . Les différentes désintégrations radioactives des isotopes de l'uranium et du thorium produisent tous les isotopes du plomb à l'exception de l'isotope  $^{204}\text{Pb}$ .

Si le plomb d'un échantillon ne contient pas  $^{204}\text{Pb}$ , cela indique que le plomb présent a été produit par désintégration radioactive. L'échantillon peut alors servir à la datation.

Par application de la relation  $N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$ , concernant l'uranium, on peut trouver la date de début de désintégration, donc de formation de l'échantillon. Pour cela, il suffit de connaître le rapport  $r = N'/N$  entre le nombre  $N$  de noyaux d'uranium et le nombre  $N'$  de noyaux de plomb à un instant donné.

Le bilan de toutes les désintégrations successives permet de dire que la disparition d'un noyau d'uranium correspond à l'apparition d'un noyau de plomb. Cela permet de déterminer  $N_0$  :

$$N_0 = N + N' = (1 + r) N = (1 + r) N_0 e^{-\lambda t}$$

et on a alors :

$$(1 + r) = e^{\lambda t}.$$

La demi-vie de l'uranium  $^{238}\text{U}$  est  $4,5 \cdot 10^9$  années,  $\lambda$  est donc connu. On peut calculer  $t$  à partir de  $r$ .

**Exemple 7.3** Pour un échantillon on mesure  $r = 0,8$ . Un calcul permet de conclure qu'il s'est écoulé  $3,8 \cdot 10^9$  années depuis la formation de l'échantillon.

### La datation en archéologie

On peut aussi dater l'âge d'une matière animale ou végétale grâce aux éléments radioactifs. L'isotope  $^{14}_6\text{C}$  du carbone, radioactif  $\beta^-$ , de demi-vie  $t_{1/2} = 5730$  ans, est présent dans l'atmosphère sous forme de dioxyde de carbone, en proportion infime mais constante par rapport à l'isotope  $^{12}_6\text{C}$  :

$$r_0 = \frac{N(^{14}_6\text{C})}{N(^{12}_6\text{C})} \simeq 10^{-12}.$$

Les végétaux absorbent le dioxyde de carbone atmosphérique et fixent l'isotope 14 du carbone dans leur tissu. Tous les êtres vivants consommant des plantes absorbent également cet isotope. Au cours de leur vie, végétaux, animaux et humains en contiennent une proportion constante ( $r_0 = 10^{-12}$ ). Après la mort, l'isotope  $^{14}_6\text{C}$  n'est plus absorbé. Sa teneur diminue au rythme des désintégrations radioactives.

La mesure de l'activité d'un échantillon permet d'évaluer le rapport  $r$ , donc la date de sa mort. En effet :

$$r = r_0 e^{-\lambda t}.$$

La mesure de ce rapport  $r$  sur un objet ancien permet de dater cet objet.

**Exemple 7.4** La mesure de l'activité d'une momie dans un sarcophage donne un rapport  $r = 6 \cdot 10^{-13}$ . Un calcul donne  $t = 4222$  ans. La momie est dans le sarcophage depuis 4222 ans.

## 7.3 Réactions nucléaires

### 7.3.1 Énergie de liaison

À l'intérieur d'un noyau, les nucléons, protons et neutrons, sont confinés dans un très petit volume. La répulsion électromagnétique intense des protons devrait faire éclater le noyau, mais les nucléons s'attirent par interaction forte. Cette interaction, dont la portée n'excède pas la taille du noyau, est identique entre nucléons qu'ils soient protons ou neutrons.

#### Énergie de liaison d'un noyau

Les nucléons d'un noyau sont fortement liés de sorte qu'il faut fournir de l'énergie pour les séparer, c'est-à-dire pour « casser » leurs liaisons.

**Définition** L'énergie de liaison d'un noyau, que l'on note  $E_\ell$ , est l'énergie qu'il faut fournir au noyau pris au repos pour le dissocier en ses différents nucléons obtenus isolés et immobiles.

On peut donc écrire l'énergie de liaison d'un noyau  ${}^A_ZX$  :

$$\begin{aligned} E_\ell &= \sum E_{\text{nucléon}} - E_X \\ &= Z \cdot E_{\text{proton}} + (A - Z) \cdot E_{\text{neutron}} - E_X. \end{aligned}$$

Les énergies du noyau et de ses constituants sont des énergies au repos. En utilisant la relation d'Einstein, l'expression devient :

$$E_\ell = Z m_p c^2 + (A - Z) m_n c^2 - m_X c^2$$

où  $m_X$ ,  $m_p$  et  $m_n$  sont les masses au repos respectivement du noyau, d'un proton et d'un neutron. Ainsi :

$$E_\ell = [Z m_p + (A - Z) m_n - m_X] c^2.$$

L'expression entre crochets est la différence entre la masse au repos des nucléons et la masse au repos du noyau, différence appelée *défaut de masse*.

**Définition** Pour un noyau  ${}^A_ZX$ , on constate un défaut de masse  $\Delta m$  positif :

$$\Delta m = Z m_p + (A - Z) m_n - m_X$$

En valeur relative, le défaut de masse est de l'ordre du pourcent. L'énergie s'exprime à l'aide du défaut de masse :

$$E_\ell = \Delta m c^2$$

**Exemple 7.5** La masse d'un noyau d'hélium est  $m_X = 6,6446 \cdot 10^{-27}$  kg, celle de ses nucléons est  $2 m_p + 2 m_n = 6,6951 \cdot 10^{-27}$  kg. Le défaut de masse d'un noyau de hélium est  $\Delta m = 5,05 \cdot 10^{-29}$  kg, soit 0,8% de la masse du noyau. L'énergie de liaison vaut  $E_\ell = 4,54 \cdot 10^{-12}$  J.

### Énergie de liaison par nucléon

La figure 7.6 représente l'énergie de liaison par nucléon  $\frac{E_\ell}{A}$  en fonction du nombre de masse.

On constate que les noyaux légers et lourds présentent une énergie de liaison par nucléon plus faible que les noyaux moyens.

Une réaction nucléaire libère de l'énergie si l'énergie de liaison des produits est supérieure à celle des réactifs (figure 7.7). De ce fait, si deux noyaux légers se soudent pour former un noyau moyen, la réaction, appelée *réaction de fusion*, libère de l'énergie. De même, lors de la réaction, appelée *fission nucléaire*, au cours de laquelle un noyau lourd se casse en deux noyaux moyens, il y a libération d'énergie.

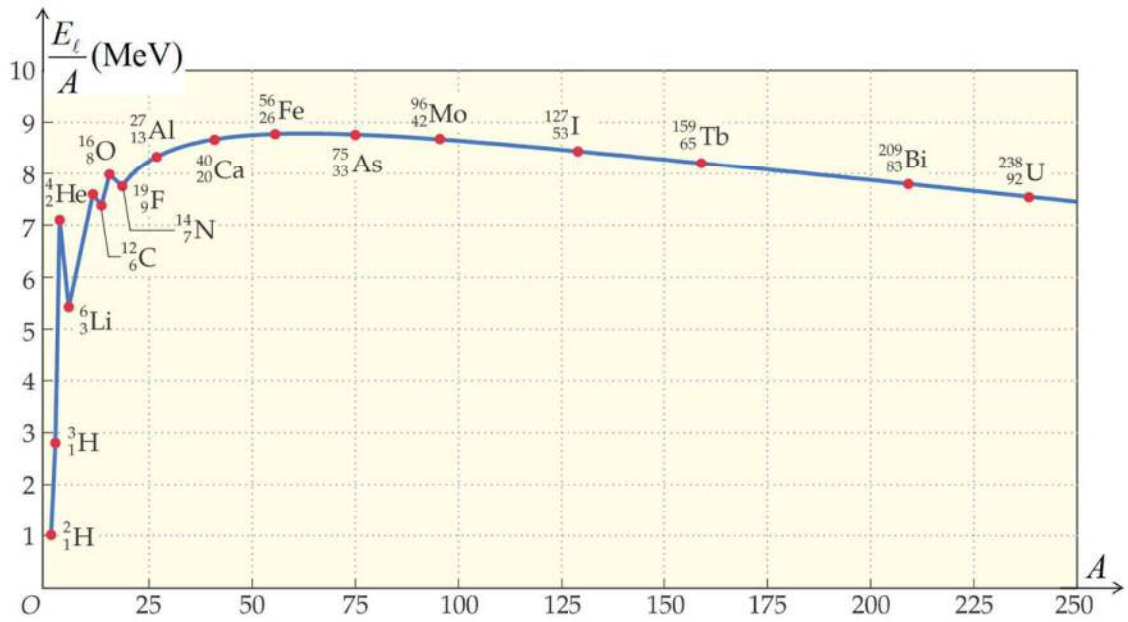


FIGURE 7.6 – Énergie de liaison par nucléon

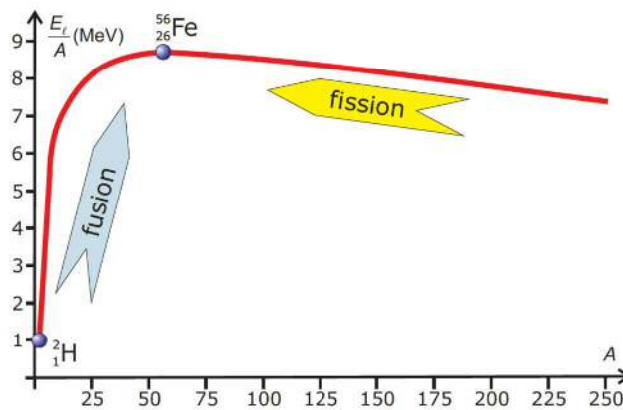


FIGURE 7.7 – Fusion de noyaux légers et fission d'un noyau lourd

### 7.3.2 La fission nucléaire

#### Principe et intérêt de la fission

La fission est la cassure d'un noyau lourd en noyaux plus légers. Nous allons nous intéresser ici au cas de l'uranium 235. Sous l'impact d'un neutron, le noyau d'uranium 235 se brise en deux noyaux plus légers et deux ou trois neutrons, tout en libérant une énergie importante.

#### Bilan d'une réaction de fission

Une réaction possible de la fission du noyau d'uranium 235 est :



Comme pour toute autre transformation nucléaire, il y a conservation du nombre de masse et du nombre de charge.

L'énergie libérée par cette réaction est considérable :

$$E = E_{\text{réactifs}} - E_{\text{produits}} = (m_n c^2 + m_U c^2) - (m_{\text{Sr}} c^2 + m_{\text{Xe}} c^2 + 2m_n c^2).$$

*Remarque* : un gramme d'uranium libère la même énergie que la combustion de 1,8 tonnes de pétrole.

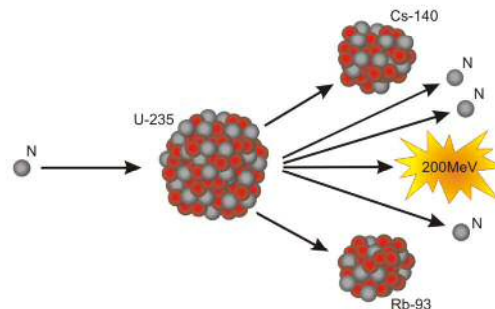
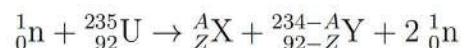
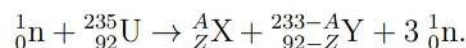


FIGURE 7.8 – Exemple d'une fission d'un noyau d'uranium

La fission d'un noyau d'uranium peut donner différents noyaux plus légers (figure 7.8). L'équation générale d'une fission est :



ou bien :



*Remarque* : les noyaux X et Y sont souvent radioactifs  $\beta^-$  et émis dans un état excité et donnent alors lieu à l'émission de rayons  $\gamma$ .

## La réaction en chaîne

À la suite de la capture d'un neutron, un noyau fissile d'uranium 235 ou de plutonium 239 a subi une fission. Plusieurs neutrons accompagnent les produits de fission. Dans l'exemple de la figure 7.9, les trois neutrons secondaires provoquent trois nouvelles fissions, qui génèrent trois neutrons de seconde génération, qui déclenchent à leur tour neuf fissions tertiaires. La réaction en chaîne prend un tour explosif, ce qui arrive dans une bombe atomique où la proportion de noyaux fissiles est très élevée.

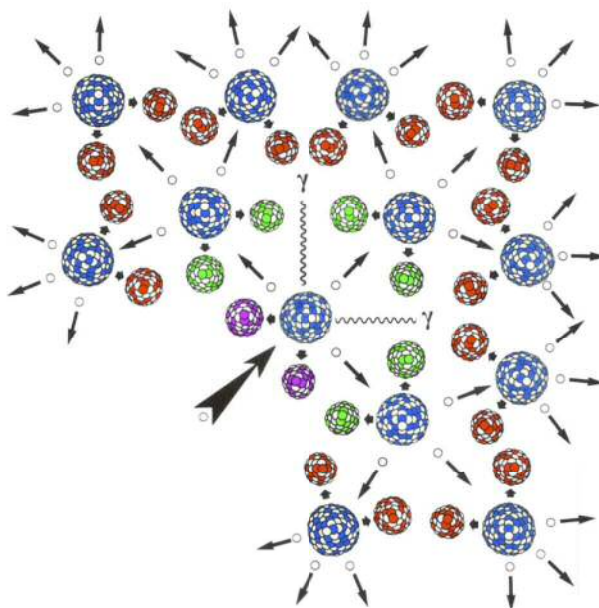


FIGURE 7.9 – Réaction en chaîne incontrôlée

Dans le cœur d'un réacteur où les noyaux fissiles ne dépassent pas 4 % et où beaucoup de neutrons se perdent en route, le nombre de neutrons entretenant la fission est exactement un et la réaction en chaîne s'entretient sans se développer.

### 7.3.3 Fusion nucléaire

#### Principe de la fusion

Une fusion nucléaire est une réaction au cours de laquelle deux noyaux légers s'unissent, c'est-à-dire fusionnent, pour en former un plus lourd, tout en libérant une énergie importante. Les principales réactions de fusion se font à partir de l'hydrogène  ${}^1_1\text{H}$  et de ses deux isotopes, le deutérium  ${}^2_1\text{H}$  et le tritium  ${}^3_1\text{H}$ .

#### Bilan d'une réaction de fusion

Les figures 7.10 et 7.11 montrent deux exemples de réactions de fusion.

Comme pour toute autre transformation nucléaire, il y a conservation du nombre de masse et du nombre de charge.

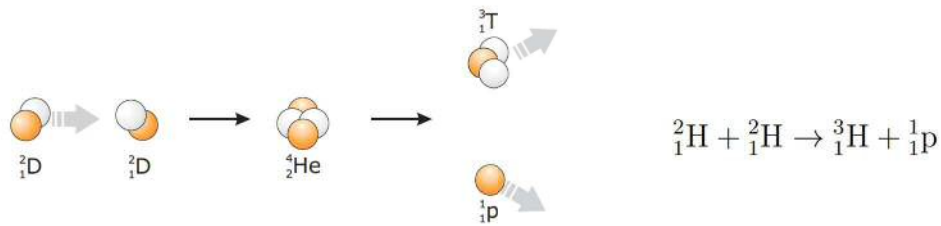


FIGURE 7.10 – Fusion nucléaire donnant du tritium

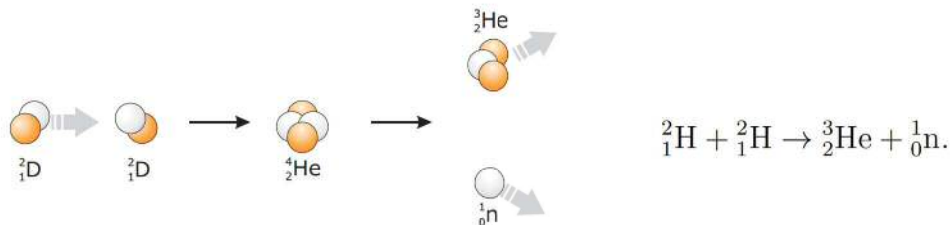
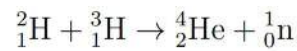


FIGURE 7.11 – Fusion nucléaire donnant un isotope de l'hélium

Pour la réaction de fusion :



l'énergie libérée est :

$$E = E_{\text{réactifs}} - E_{\text{produits}} = (m_{{}^2\text{H}} c^2 + m_{{}^3\text{H}} c^2) - (m_{{}^4\text{He}} c^2 + m_n c^2).$$

*Remarque* : la fusion d'un gramme de tritium libère la même énergie que la combustion de 13,5 tonnes de pétrole.