1 Stabilité et instabilité des noyaux

1. Composition des noyaux

● Le noyau est le cœur d'un atome. Il renferme des nucléons : Z protons chargés positivement (charge +*e*) et (A–Z) neutrons (de charge nulle et de masse voisine de celle des protons).

● A est appelé **nombre de masse** : il représente le nombre de nucléons, c'est-à-dire le nombre total de protons et de neutrons.

● Z est le **nombre de charge** ou numéro atomique : il représente le nombre de protons.

2. Représentation d'un noyau

● Un noyau est donc caractérisé par les nombres A et Z. Il sera représenté par le symbole :

$\boxed{{}^{A}_{Z}X}$, X étant le symbole de l'élément chimique.

Remarque : on appelle **nucléide** l'ensemble d'atomes ou d'ions possédant des noyaux identiques.

3. Isotopes d'un même élément chimique

● Ce sont des noyaux ayant le même nombre de charge Z (même nombre de protons) mais des nombres de masse A différents (donc des nombres différents de neutrons).

● Exemples :

Isotopes de l'hydrogène : ${}^{1}_{1}H$ [1 proton et (1–1) = 0 neutron] ; ${}^{2}_{1}H$ [1 proton et (2–1) = 1 neutron] et ${}^{3}_{1}H$ [1 proton et (3–1) = 2 neutrons].

Isotopes du carbone : ${}^{12}_{6}C$ [6 protons et (12–6) = 6 neutrons] et ${}^{14}_{6}C$ [6 protons et (14-6) = 8 neutrons].

4. Domaine de stabilité et d'instabilité des noyaux

● La cohésion et la stabilité des noyaux atomiques sont assurées par l'interaction forte. C'est une interaction attractive intense, de courte portée, qui s'exerce indifféremment entre protons, entre neutrons ou entre proton et neutron. Elle est en concurrence avec la répulsion électrostatique qui existe entre les protons.

● Lorsque le nombre de protons dans le noyau augmente, la répulsion électrostatique l'emporte sur l'interaction forte : le noyau est instable.

Exemple d'application

On considère la courbe (N, Z) de stabilité des noyaux donnant l'inventaire des noyaux des principaux atomes. Les points noirs indiquent les noyaux stables et les points rouges, les noyaux instables, radioactifs.

1. Comparer le nombre de neutrons et de protons pour des noyaux légers stables.

2. Comparer le nombre de neutrons et de protons pour des noyaux lourds stables.

3. Y a-t-il forcément un seul isotope stable par élément ?

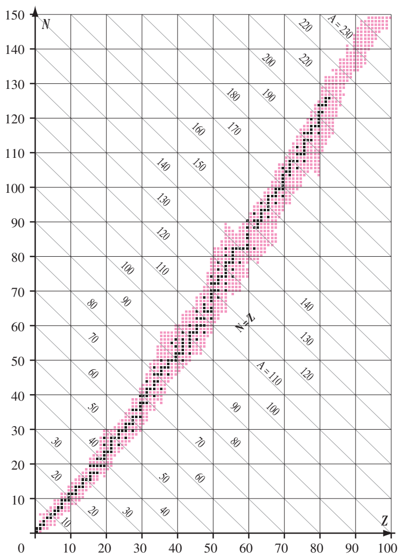

Fig. 4-1

Corrigé commenté

1. ***Indication*** *: situez les points concernés par rapport à la droite d'équation* y = x.

On voit que les points noirs pour les petites valeurs de N et de Z (noyaux légers) sont situés au voisinage de la droite N = Z. On en déduit que les noyaux stables légers contiennent un nombre de neutrons sensiblement égal à celui des protons.

2. ***Indication*** *: situez les points concernés par rapport à la droite d'équation* y = *2* x.

On voit que les points noirs pour les grandes valeurs de N et de Z (noyaux lourds) sont situés bien au-dessus de la droite N = Z. On en déduit que les noyaux stables légers contiennent plus de neutrons que de protons.

3. Certains points noirs se trouvent sur une même verticale, donc il existe des éléments qui ont plusieurs isotopes stables.

2 La radioactivité

1. Définition

● La radioactivité résulte de désintégrations spontanées de noyaux atomiques instables. Ces noyaux sont dits radioactifs. Cette désintégration radioactive s'accompagne de l'émission de particules α, β^- ou β^+.

2. Les trois types de radioactivité spontanée

● Il existe trois types de radioactivité spontanée :
– la radioactivité α : émission de particule α (positive), notée ${}^{4}_{2}\mathrm{He}$;
– la radioactivité β^- : émission d'un électron, noté ${}^{\;0}_{-1}\mathrm{e}$;
– la radioactivité β^+ : émission d'un positon ${}^{\;0}_{+1}\mathrm{e}$ (antiparticule de l'électron).

● Une désintégration radioactive s'accompagne souvent d'un rayonnement électromagnétique de fréquence élevée : un noyau père X, instable, se désintègre en un noyau fils excité Y* qui retourne dans son état fondamental Y par des émissions γ. On parle de désexcitation γ : ${}^{A}_{Z}\mathrm{Y}^* \rightarrow {}^{A}_{Z}\mathrm{Y} + \gamma$.

3. Lois de conservation des équations-bilan des réactions nucléaires

● Lors d'une réaction nucléaire, il y a conservation :
– du nombre de charge Z ;
– du nombre de nucléons A avant et après la réaction ;
– de l'énergie totale.

● Lors d'une désintégration radioactive, il y a une diminution de l'énergie de masse du système de particules qui constituaient le noyau : cette énergie se transforme en énergies cinétiques des particules et en énergie transférée par rayonnement γ.

4. Équation d'une réaction nucléaire

● *Radioactivité* α :
Elle concerne les noyaux lourds dont le nombre de masse est A > 200 (figure 4-2).

$$\boxed{{}^{A}_{Z}\mathrm{X} \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}\mathrm{Y} + {}^{4}_{2}\mathrm{He} + \gamma}\,.$$

Exemple : ${}^{226}_{88}\mathrm{Ra} \rightarrow {}^{222}_{86}\mathrm{Rn} + {}^{4}_{2}\mathrm{He} + \gamma$

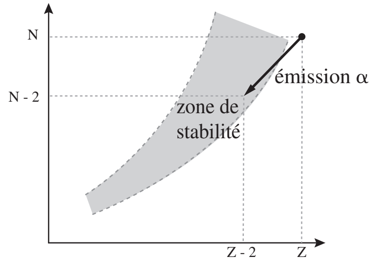

Fig. 4-2

- *Radioactivité* β^- :

Elle concerne certains nucléides présentant un excès de neutrons (figure 4-3) :

$$\boxed{{}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z+1}Y + {}^{0}_{-1}e + \gamma}.$$

Tout se passe comme si :

$$\boxed{{}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{1}_{1}p + {}^{0}_{-1}e}.$$

Exemple : ${}^{14}_{6}C \rightarrow {}^{14}_{7}N + {}^{0}_{-1}e + \gamma$

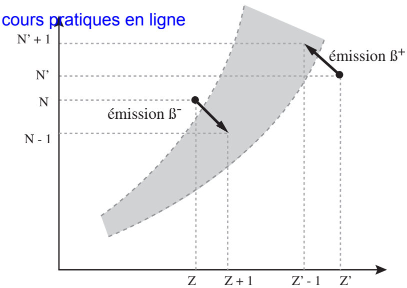

Fig. 4-3

- *Radioactivité* β^+ :

Cette désintégration ne s'observe qu'avec les radionucléides artificiels comportant un excès de protons (figure 4-3) : $\boxed{{}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z-1}Y + {}^{0}_{+1}e + \gamma}$.

Tout se passe comme si : $\boxed{{}^{1}_{1}p \rightarrow {}^{1}_{0}n + {}^{0}_{+1}e}$.

Exemple : ${}^{30}_{15}P \rightarrow {}^{30}_{14}Si + {}^{0}_{+1}e + \gamma$

Exemple d'application

1. Le nucléide ${}^{14}_{6}C$ (carbone 14) est radioactif. Il se désintègre en émettant une particule β^- (le numéro atomique du Bore est Z=5, celui de l'azote Z=7). Donner la composition de ce noyau et écrire l'équation de sa désintégration.

2. Compléter les équations des réactions nucléaires suivantes en précisant le type de radioactivité :

a) ${}^{107}_{48}Cd \rightarrow {}^{107}_{47}Ag + {}^{:::}_{:::} \ldots\ldots + \gamma$

b) ${}^{210}_{84}Po \rightarrow {}^{4}_{2}He + {}^{:::}_{:::}Pb + \gamma$

Corrigé commenté

1. D'après la notation ${}^{A}_{Z}X$, ce noyau est composé de Z = 6 protons et de (A–Z) = 8 neutrons.
L'équation de sa désintégration est : ${}^{14}_{6}C \rightarrow {}^{14}_{7}N + {}^{0}_{-1}e + \gamma$.
Le noyau fils obtenu est celui d'azote.

2. ***Indication :*** *utilisez les deux premières lois de conservation.*

a) désintégration β^+ : ${}^{107}_{48}Cd \rightarrow {}^{107}_{47}Ag + {}^{0}_{+1}e + \gamma$

b) désintégration α : ${}^{210}_{84}Po \rightarrow {}^{4}_{2}He + {}^{206}_{82}Pb + \gamma$

3 Loi de décroissance radioactive

1. Loi de décroissance

- Étant donné une population de $N(t)$ noyaux radioactifs à la date t. On note ΔN la variation de cette population pendant une durée Δt. Du fait de la désintégration d'un certain nombre de noyaux radioactifs, la population $N(t)$ décroît et la variation correspondante ΔN est négative.

- La quantité de noyaux qui se désintègrent pendant cette durée Δt est égale à $(-\Delta N)$ telle que : $\boxed{\Delta N = -\lambda . N . \Delta t}$ (1). La grandeur positive λ est la **constante radioactive**. Elle est caractéristique du type de noyau pour la désintégration étudiée (unité : s^{-1}).

- La conséquence de cette relation (1) est que le nombre moyen de noyaux non désintégrés présents dans l'échantillon à une date t est :

$$\boxed{N = N_0 e^{-\lambda t} = N_0 e^{-t/\tau}},$$

avec $\tau = \frac{1}{\lambda}$ **la constante de temps** et N_0 le nombre de noyaux radioactifs initialement présents dans l'échantillon.

2. Demi- vie $t_{1/2}$

- La demi-vie, ou période radioactive, d'un nucléide radioactif est la durée au bout de laquelle la moitié des noyaux radioactifs initialement présents dans un échantillon s'est désintégrée (figure 4-4) : $\boxed{t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \approx \frac{0,693}{\lambda}}$ (2).

- Au bout d'une durée égale à n fois t_s, le nombre de noyaux radioactifs encore présents dans l'échantillon est :

$$N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda n t_{1/2}} = N_0 \cdot \left(e^{-\lambda t_{1/2}}\right)^n = N_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^n \text{. On a donc : } \boxed{N(t) = \frac{N_0}{2^n}}.$$

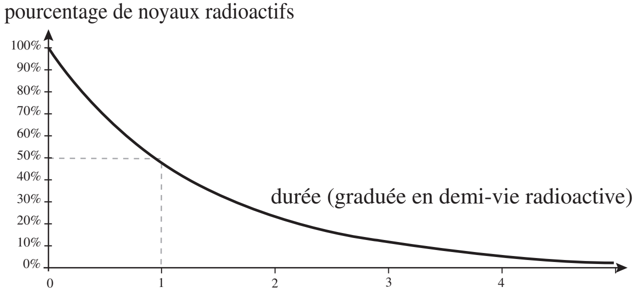

Fig. 4-4 : loi de décroissance radioactive

3. Activité d'un échantillon

- L'activité A mesure le nombre moyen de désintégrations par unité de temps. L'activité est exprimée en becquerels (Bq). Un becquerel correspond à une désintégration par seconde.

$$A(t) = \frac{(-\mathrm{d}N)}{\mathrm{d}t} = -\frac{\mathrm{d}\left(N_0 \mathrm{e}^{-\lambda t}\right)}{\mathrm{d}t} = \lambda N_0 \mathrm{e}^{-\lambda t}, \text{ soit } \boxed{A(t) = \lambda \cdot N(t)}.$$

D'après (2), on peut aussi écrire : $\boxed{A(t) = \ln 2 \cdot \dfrac{N(t)}{t_{1/2}}}$.

- Par suite, un échantillon d'activité initiale A_0 possède, au bout de n périodes, une activité : $\boxed{A(t) = \dfrac{A_0}{2^n}}$.

- $A(t)$ est l'opposé de la pente de la tangente à la courbe $N(t)$ à l'instant t.

Exemples d'application

1 Montrer que la formule $N = N_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$, dont la condition initiale est $N(t{=}0) = N_0$, se déduit de $\Delta N = -\lambda.N.\Delta t$.

Corrigé commenté

Indication : *considérez l'égalité comme une intégration de N_0 à N pour le membre de gauche et de 0 à t pour celui de droite.*

Si on considère une durée très petite $\mathrm{d}t$ alors l'expression (1) s'écrit sous la forme : $\mathrm{d}N = -\lambda.N.\mathrm{d}t$, soit : $\left(\frac{1}{N}\right) \cdot \mathrm{d}N = -\lambda.\mathrm{d}t$ (2). On intègre et on obtient :

$$\int_{N_0}^{N} \frac{1}{N} \cdot \mathrm{d}N = \int_0^t -\lambda \cdot \mathrm{d}t \text{, soit : } \ln \frac{N}{N_0} = -\lambda t \text{, d'où } \boxed{N = N_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)}.$$

2 Montrer que la formule $t_{1/2} = \dfrac{\ln 2}{\lambda}$ se déduit de $N = N_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$.

Corrigé commenté

Indication : *Cherchez t dans l'équation de départ en remplaçant N par $N_0/2$.*

Comme $N = \dfrac{N_0}{2}$, on a : $\dfrac{N_0}{2} = N_0 \cdot \exp(-\lambda t_{1/2})$, soit $\dfrac{1}{2} = \exp(-\lambda t_{1/2})$.

On obtient : $\mathrm{Ln}1 - \mathrm{Ln}2 = -\lambda t_{1/2}$, d'où $\ln 2 = \lambda t_{1/2}$ et donc $\boxed{t_{1/2} = \dfrac{\ln 2}{\lambda}}$.