

## REACTIONS NUCLEAIRES

### I. noyau atomique :

#### 1.1 constituant du noyau d'un atome:

Le **noyau** d'un atome est composé de petites particules appelées des nucléons pouvant être des protons et/ou des neutrons.

- **Les protons** : leur nombre dans un noyau est noté Z et appelé nombre de charge ou numéro atomique ; chaque proton a une masse  $m_p = 1,0073 u = 1,673 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$  et une charge  $q_p = e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ .
- **Les neutrons** : leur nombre dans un noyau est noté N. La masse d'un neutron est  $m_n = 1,0087 u = 1,675 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ , la charge d'un neutron est nulle.

Le nombre total de nucléons d'un noyau noté A est appelé nombre de masse :  $A = Z + N$ .

► L'unité de masse atomique notée u est le douzième de la masse d'un atome de carbone 12 :  $1 u = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ .

#### 1.2 Grandeurs du noyau :

- Le noyau d'un atome peut être assimilé à une sphère de rayon  $r = 1,4 \cdot 10^{-15} \sqrt[3]{A}$  en m ou encore  $r = 1,4 \sqrt[3]{A}$  en fm (femtomètre) :  $1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$ , A représente le nombre de masse.
- La masse d'un noyau est sensiblement égale à la masse de l'atome correspondant.

#### 1.3 Nucléides :

On désigne par nucléide l'ensemble des noyaux des atomes d'un même élément ayant la même valeur de Z et la même valeur de A. On le note par  ${}^A_Z X$ . Exemples :  ${}^{12}_6 C$  ;  ${}^{238}_{92} U$  ;  ${}^1_1 H$ .

On distingue :

- Les nucléides isotopes : Ce sont des nucléides qui ont la même valeur de Z mais des valeurs différentes de A : ( ${}^A_Z X$  et  ${}^{A'}_Z X$ ) ; exemples :
  - Les isotopes du carbone :  ${}^{12}_6 C$  ;  ${}^{13}_6 C$  ;  ${}^{14}_6 C$ , le plus abondant est le  ${}^{12}_6 C$  (98,89%).
  - Les isotopes de l'uranium :  ${}^{235}_{92} U$  ;  ${}^{238}_{92} U$  ;  ${}^{239}_{92} U$ , le plus abondant est  ${}^{238}_{92} U$  (99,3 %).
  - Les isotopes de l'oxygène :  ${}^{16}_8 O$  ;  ${}^{17}_8 O$  ;  ${}^{18}_8 O$ , le plus abondant est  ${}^{16}_8 O$  (99,76 %).
- Les nucléides isobares : Ce sont des nucléides qui ont la même valeur de A mais des valeurs différentes de Z : ( ${}^A_Z X$  et  ${}^A_{Z'} Y$ ) ; exemple :  ${}^{14}_6 C$  ;  ${}^{14}_7 N$
- Les nucléides isotones : Ce sont des nucléides qui ont des valeurs différentes de A et de Z mais ayant le même N :  ${}^A_Z X$  et  ${}^{A'}_{Z'} Y$  avec  $A - Z = A' - Z' = N = N'$  ; exemple :  ${}^{13}_6 C$  ;  ${}^{14}_7 N$

#### 1.4 Relation d'Einstein : équivalence masse-énergie :

En 1905, Einstein a postulé : " Une particule de masse m, au repos, possède l'énergie  $E = mc^2$ ". C est la célérité de la lumière dans le vide de valeur  $C = 3 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$ .

► Unités usuelles :

- d'énergie : l'électronvolt :  $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$
- de masse : l'énergie de masse de l'unité de masse atomique est :  $1 u \cdot c^2 = 931,5 \text{ MeV} \Rightarrow 1 u = 931,5 \text{ MeV}/c^2$ .

#### 1.5 Stabilité d'un noyau :

##### 1.5.1- défaut de masse du noyau :

La masse m d'un noyau est toujours inférieure à la somme des masses de ses différents nucléons  $\{Z \cdot m_p + (A - Z) \cdot m_n\} > m$ . La différence de masse est appelée défaut de masse et notée :  $\Delta m = [Z \cdot m_p + (A - Z) \cdot m_n - m]$

##### 1.5.2- énergie de liaison d'un noyau :

Au défaut de masse  $\Delta m$  correspond une énergie de masse appelée énergie de liaison du noyau et notée :

$$E_L = \Delta m \cdot c^2 = [Z \cdot m_p + (A - Z) \cdot m_n - m] \cdot c^2$$

**Définition** : L'énergie de liaison d'un noyau est l'énergie libérée lors de la formation de ce noyau au repos à partir de ses nucléons initialement séparés au repos.

##### 1.5.3- énergie de liaison par nucléon :

Pour comparer la stabilité des noyaux on définit leur énergie de liaison par nucléon :

$$\frac{E_L}{A} = \frac{\Delta m \cdot c^2}{A} = \frac{[Z \cdot m_p + (A - Z) \cdot m_n - m] \cdot c^2}{A}$$

Un noyau est d'autant plus stable que son énergie de liaison par nucléon est élevée :

- Pour les noyaux stables  $\frac{E_L}{A} > 8 \text{ MeV/nucléon}$ ;
- Pour les noyaux instables  $\frac{E_L}{A} < 8 \text{ MeV/nucléon}$ .

#### Exercice d'application :

On considère les nucléides :  ${}^{12}_6 C$  ;  ${}^{12}_5 B$  ;  ${}^{12}_7 N$

1- Calculer l'énergie de liaison par nucléon du carbone.

On donne :

- Masse du noyau  ${}^{12}_6 C$  :  $11174,7 \text{ MeV}/c^2$
- Masse du proton p :  $938,3 \text{ MeV}/c^2$
- Masse du neutron n :  $939,6 \text{ MeV}/c^2$

2- Comparer la valeur trouvée à celle de  ${}^{12}_5 B$  :  $6,7 \text{ MeV/nucléon}$  et à celle de  ${}^{12}_7 N$  :  $6,2 \text{ MeV/nucléon}$ . Conclure.

### II. Réactions nucléaires spontanées : la radioactivité

#### 2.1- Définition :

La radioactivité est la propriété spécifique d'un noyau instable d'émettre un rayonnement (constitué de particules) au cours de sa transformation appelée désintégration.

### **2.2- propriétés :**

La désintégration radioactive est un phénomène aléatoire, spontané, inéluctable, et indépendant des paramètres extérieurs.

Au cours de ces réactions, le noyau radioactif, dit noyau père, donne naissance à un noyau fils et à une particule.

### **2.3- Observation des rayonnements émis :**

L'observation se fait en utilisant un champ magnétique uniforme ou un champ électrique uniforme. Cette observation montre qu'il existe quatre types de rayonnement :

- Un rayonnement de particules  $\alpha$  chargées positivement ;
- Un rayonnement de particules  $\beta^-$  chargées négativement ;
- Un rayonnement de particules  $\beta^+$  chargées positivement et
- Un rayonnement  $\gamma$  d'ondes électromagnétiques.

### **2.4- Détection des rayonnements radioactifs :**

Il existe de nombreuses méthodes pour détecter un rayonnement radioactif : les scintillations des substances fluorescentes, l'ionisation de l'air, la mise en évidence dans une chambre d'ionisation, le compteur de Geiger-Müller, la chambre de Wilson.....

### **2.5 Equation bilan des réactions nucléaires :**

#### **2.5.1- lois de conservation :**

• **Lois de Soddy** : Lors d'une désintégration nucléaire, il y a conservation du nombre de charge  $Z$  et du nombre de nucléons  $A$ .

La désintégration d'un noyau  $X$  (appelé noyau père) conduit à un noyau  $Y$  (appelé noyau fils) et à l'expulsion d'une particule  $P$  (particule  $\alpha$  ou  $\beta$ ).

L'équation de la désintégration s'écrit :  ${}^A_ZX \rightarrow {}^A_1Y + {}^A_2P$

Les lois de conservation de **Soddy** s'écrivent:

\* **Loi de conservation du nombre de masse  $A$  :**  $A = A_1 + A_2$  \* **Loi de conservation du nombre de charges  $Z$  :**  $Z = Z_1 + Z_2$

Lors d'une désintégration nucléaire il y'a conservation de la quantité de mouvement et conservation de l'énergie totale du système.

#### **2.5.2- Rayonnement $\alpha$ ou radioactivité $\alpha$ :**

a) **Définition** : Des noyaux sont dits radioactifs  $\alpha$  s'ils émettent des noyaux d'hélium  ${}^4_2He$ . Le noyau de l'atome d'hélium porte deux charges positives. On ne les représente pas.

#### **b) Equation de la réaction de désintégration $\alpha$ :**

D'après les lois de conservation de Soddy, l'équation s'écrit :  ${}^A_ZX \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}Y + {}^4_2He$

La radioactivité  $\alpha$  concernent les noyaux lourds ( $A > 200$ ).

Ex : L'uranium 238 est un noyau radioactif  $\alpha$  :  ${}^{238}_{92}U \rightarrow {}^{234}_{90}Th + {}^4_2He$  (noyau fils : thorium)

Le radon 222 est un noyau radioactif  $\alpha$  :  ${}^{222}_{86}Rn \rightarrow {}^{218}_{84}Po + {}^4_2He$  (noyau fils : polonium).

#### **c) Caractéristiques des particules $\alpha$ :**

Ces particules sont arrêtées par quelques centimètres d'air d'épaisseur ou par une feuille de papier, mais elles sont très ionisantes et donc dangereuses ; (Elles ne sont pas dangereuses pour la peau mais elles sont dangereuses par absorption interne: inhalation, ingestion).

#### **d) Conservation de la quantité de mouvement :**

Supposons que le noyau-père est initialement au repos ; soient  $\vec{v}_\alpha$  et  $\vec{v}_Y$  les vitesses respectives de la particule  $\alpha$  et du noyau-fils  $Y$ . La quantité de mouvement du système est donc conservée :

$m_\alpha \vec{v}_\alpha + m_Y \vec{v}_Y = \vec{0}$  ; le noyau fils recule alors par rapport à la particule  $\alpha$ .

#### **e) Conservation de l'énergie totale :**

Soit  $\Delta m$  le défaut de masse du système:  $\Delta m = m_X - (m_Y + m_\alpha)$ , l'énergie disponible dans la désintégration est  $E_d = \Delta m \cdot c^2$ .

Cette énergie est emportée par le noyau fils  $Y$  et la particule  $\alpha$  sous forme cinétique :  $E_C + E_{C_\alpha} = E_d$ .

**Remarque** : en utilisant ces deux dernières lois de conservation on montre que :  $E_{C_\alpha} = \frac{m_Y E_d}{m_\alpha + m_Y}$  et  $E_{C_Y} = \frac{m_\alpha E_d}{m_\alpha + m_Y}$  à

partir des relations suivantes :  $\frac{v_Y}{v_\alpha} = \frac{m_\alpha}{m_Y}$  et  $\frac{E_{C_Y}}{E_{C_\alpha}} = \frac{m_\alpha}{m_Y}$

**Exemple** : Calculer l'énergie cinétique des particules émises lors de la désintégration  $\alpha$  d'un noyau de radium 226 en noyau de radon 222. On donne :  $m({}^{226}_{88}Ra) = 225,9770 \text{ u}$ ,  $m({}^{222}_{86}Rn) = 221,9702 \text{ u}$ ,  $m({}^4_2He) = 4,0015 \text{ u}$ , ( $1 \text{ u} = 931,5 \text{ MeV}/c^2$ ).

#### **2.5.3- rayonnement ou radioactivité $\beta^-$ :**

##### **a) Définition :**

Des noyaux sont dits radioactifs  $\beta^-$  s'ils émettent des électrons  ${}^0_{-1}e$ .

##### **b) Equation de la réaction de désintégration. :**

D'après les lois de conservation de **Soddy** l'équation s'écrit :  ${}^A_ZX \rightarrow {}^A_{Z+1}Y + {}^0_{-1}e + {}^0_0\bar{\nu}$  avec  ${}^0_0\bar{\nu}$  antineutrino, particule de masse nulle et de charge nulle mais possède de l'énergie.

**Exemple** : le cobalt 60 est un noyau radioactif  $\beta^-$ . Son équation de désintégration s'écrit :  ${}^{60}_{27}Co \rightarrow {}^{60}_{28}Ni + {}^0_{-1}e + {}^0_0\bar{\nu}$

**Remarque** : Il n'y a pas d'électrons dans le noyau, mais le noyau peut en émettre en transformant un neutron excédentaire en un électron et un proton suivant le bilan :  ${}^1_0n \rightarrow {}^1_1p + {}^0_{-1}e$  ;  $Z$  augmente d'une unité et  $N$  diminue d'une unité,  $A$  reste constant.

### c) Caractéristiques de la particule $\beta^-$ :

Les particules  $\beta^-$  sont assez peu pénétrantes. Elles sont arrêtées par quelques millimètres d'aluminium.

### d) Bilan énergétique :

Désintégration  $\beta^-$  :  ${}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z+1} Y + {}^0_{-1} e + {}^0_0 \bar{\nu}$  ;  $E_d = [m({}^A_Z X) - m({}^0_{-1} e) - m({}^A_{Z+1} Y)] \cdot c^2$

Cette énergie est emportée par l'électron et l'antineutrino sous forme cinétique.

**Exemple :** désintégration  $\beta^-$  du cobalt 60 en nickel 60.

$m({}^{60}_{27} Co) = 59,9190 \text{ u}$ ,  $m({}^{60}_{28} Ni) = 59,9154 \text{ u}$ ,  $m({}^0_{-1} e) = 5,49 \cdot 10^{-4} \text{ u}$

${}^{60}_{27} Co \rightarrow {}^{60}_{28} Ni + {}^0_{-1} e + {}^0_0 \bar{\nu}$ ;  $E_d = [m({}^{60}_{27} Co) - m({}^0_{-1} e) - m({}^{60}_{28} Ni)] \cdot c^2$ ;

$E_d = (59,9190 - 5,49 \cdot 10^{-4} - 59,9154) \times 931,5 = 2,842 \text{ MeV} = E_{c\nu} + E_{ce}$

### 2.5.4- rayonnement ou radioactivité $\beta^+$

#### a) Définition :

Des noyaux sont dits radioactifs  $\beta^+$  s'ils émettent des positons  ${}^0_{+1} e$ . Ce sont des

t (temps)	0	$t_{1/2}$	$2t_{1/2}$	$3t_{1/2}$	$4t_{1/2}$
N (nombre de noyaux restant)	$N_0$	$N_0/2$	$N_0/4$	$N_0/8$	$N_0/16$

particules  $\beta^+$  portant une charge +e.

#### b) Equation de la désintégration :

D'après les lois de conservation de Soddy l'équation

s'écrit :  ${}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z-1} Y + {}^0_{+1} e + {}^0_0 \nu$  avec  ${}^0_0 \nu$  neutrino.

Exemple : le phosphore 30 est un noyau radioactif  $\beta^+$  :  ${}^{30}_{15} P \rightarrow {}^{30}_{14} Si + {}^0_{+1} e + {}^0_0 \nu$

**Remarque :** Cette radioactivité ne concerne que des noyaux artificiels, obtenus par des réactions nucléaires, qui possèdent trop de protons. Un proton excédentaire se transforme en un positon et un neutron suivant le bilan :  ${}^1_1 p \rightarrow {}^1_0 n + {}^0_{+1} e$   
N augmente d'une unité et Z diminue d'une unité, A reste constant.

**c) Caractéristiques de la particule  $\beta^+$  :** Ces particules ont une durée de vie très courte car lorsqu'elles rencontrent un électron, les deux particules s'annihilent pour donner de l'énergie sous forme d'un rayonnement électromagnétique  $\gamma$  suivant le bilan :  ${}^0_{-1} e + {}^0_{+1} e \rightarrow \gamma$

**2.5.5- rayonnement  $\gamma$  :** Le noyau fils est en général obtenu dans un état excité (niveau d'énergie élevé), il est noté  $Y^*$ . Cet état est instable, le noyau se désexcite en évacuant cette énergie excédentaire, en émettant un rayonnement électromagnétique  $\gamma$  (particules très énergétiques appelées photons). Equation d'une émission  $\gamma$  :  $Y^* \rightarrow Y + \gamma$

### 2.6 Loi de décroissance radioactive :

Soient  $N_0$  le nombre de noyaux radioactifs à la date  $t=0$  et  $N$  le nombre de noyau restant à la date  $t$ . Le nombre de noyau qui se désintègre pendant l'intervalle de temps noté  $(-dN/dt)$  est proportionnelle à  $N$ . La constante de proportionnalité notée  $\lambda$  est caractéristique du noyau radioactif considéré. Elle est appelée constante radioactive du noyau considéré, son unité est l'inverse de celui du temps. On a alors :  $-dN = \lambda N dt$ . Par intégration, on obtient la relation :  $N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$ ,

• **Temps de demi-vie  $t_{1/2}$  :** La demi-vie, notée  $t_{1/2}$ , d'un corps radioactif est le temps au bout duquel la moitié des noyaux présents au départ s'est désintégrée. Elle s'exprime en secondes dans le système international

• **Relation entre temps de demi-vie et constante radioactive :**  $t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$ .

• **Courbe de décroissance radioactive :**

Sur cette courbe, la constante de temps  $\tau$  est l'abscisse du point d'intersection de la tangente à la courbe à  $t=0$  avec l'axe des abscisses; on a  $\tau = \frac{1}{\lambda}$ .

La connaissance du nombre de noyaux restant à l'instant  $t$  noté  $N(t)$ , de  $N_0$  et de  $\lambda$  permet de déduire  $t$  : on a  $t = -\frac{\ln(\frac{N}{N_0})}{\lambda}$

• **Activité d'un échantillon radioactif :**

On appelle l'activité  $A$  d'un échantillon radioactif le nombre de désintégrations effectuées par unité de temps :  $A = -\frac{dN}{dt} = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = \lambda N$ . On en déduit que  $A(t) = A_0 e^{-\lambda t}$  avec  $A_0 = \lambda N_0$ .

L'activité s'exprime en Becquerels (Bq). On utilise parfois le curie (Ci) :  $1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$ .

**Remarque :**  $1 \text{ Bq} = 1 \text{ dés/ seconde}$  ; le nombre de désintégration est alors le produit de l'activité par la durée de la désintégration. L'activité dépend du nucléide choisi.

**Remarque :** les courbes  $\ln N = f(t)$  et  $\ln A = g(t)$  sont des droites affines de pente  $-\lambda$ .

### 2.7 Familles radioactives :

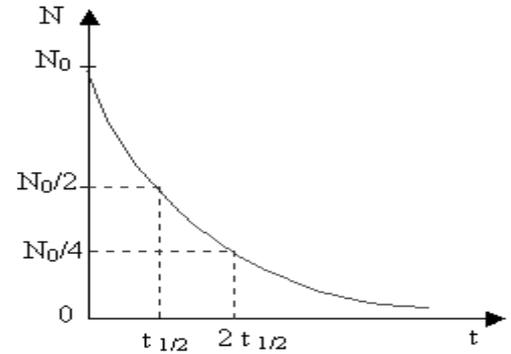
Une famille radioactive est l'ensemble des noyaux instables issu du même noyau instable initial et qui, par désintégrations successives aboutit au même noyau stable. Il existe quatre familles : celle de l'uranium 235 :  ${}^{235}_{92} U$ ; celle de l'uranium 238 :  ${}^{238}_{92} U$ ; celle du Thorium 232 :  ${}^{232}_{90} Th$  et celle du Neptunium 239 ;  ${}^{239}_{93} Np$ . Du noyau instable initial au noyau stable final il faut un certain nombre de désintégration  $\alpha$  et  $\beta$ .

### III- Les réactions nucléaires provoquées :

#### 3.1 Définition :

Une réaction nucléaire est dite provoquée lorsqu'un noyau cible est frappé par un noyau projectile et donne naissance à de nouveaux noyaux.

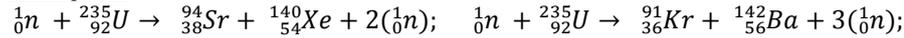
#### 3.2 Fission nucléaire :



**Définition:** La fission est une réaction nucléaire provoquée au cours de laquelle un noyau lourd stable "fissile" donne naissance à deux noyaux plus légers sous l'impact d'un neutron.

Plusieurs réactions de fission de l'uranium 235 sont possibles:

**Exemple:0**



### **3.3 Fusion nucléaire :**

**Définition:** La fusion nucléaire est une réunion de deux noyaux légers pour former un noyau plus lourd.

**Exemple :**  ${}_1^2\text{H} + {}_1^3\text{H} \rightarrow {}_2^4\text{He} + {}_0^1n;$

### **3.4- bilan énergétique :**

➤ Pour la fission, étudions la réaction utilisée par une centrale nucléaire :

la fission de l'uranium 235.  ${}_0^1n + {}_{92}^{235}\text{U} \rightarrow {}_{38}^{94}\text{Sr} + {}_{54}^{140}\text{Xe} + 2({}_0^1n)$

$m({}_{92}^{235}\text{U}) = 234,9935 \text{ u}; m({}_{38}^{94}\text{Sr}) = 93,8945 \text{ u}; m({}_0^1n) = 1,0087 \text{ u}; m({}_{54}^{140}\text{Xe}) = 139,8920 \text{ u}$

$E_d = [m({}_{92}^{235}\text{U}) + m({}_0^1n) - m({}_{38}^{94}\text{Sr}) - m({}_{54}^{140}\text{Xe}) - 2.m({}_0^1n)] \cdot c^2 (\Delta m = 0,1983 \text{ u})$

$E_d = (234,9935 - 93,8945 - 139,8920 - 1,0087) \times 931,5 = 184,7 \text{ MeV} :$

Cette énergie est énorme par rapport à la combustion de pétrole. 1 kg d'uranium fournit autant d'énergie que 2 000 Tonnes de pétrole.

➤ Pour la fusion, prenons l'exemple de 2 noyaux d'hélium 3 :  ${}_2^3\text{He} + {}_2^3\text{He} \rightarrow {}_4^4\text{He} + 2({}_1^1p);$

$m({}_2^3\text{He}) = 3,0149 \text{ u}; m({}_4^4\text{He}) = 4,0015 \text{ u}; m({}_1^1p) = 1,0073 \text{ u}; \Delta m = 0,00137 \text{ u}$

$E_d = [2.m({}_2^3\text{He}) - m({}_4^4\text{He}) - 2.m({}_1^1p)] \cdot c^2 = (2 \times 3,0149 - 4,0015 - 2 \times 1,0073) \times 931,5 = 12,76 \text{ MeV}.$

Remarque : Par nucléon, la fusion libère plus d'énergie que la fission.

### **III- Applications :**

La radioactivité offre de nombreuses applications dont la datation des objets archéologiques par le carbone 14 et la radiographie en médecine.

Les réactions nucléaires ont pour application principale la production d'énergie dans les centrales nucléaires.

COLLECTION MOBAMA 2020