

**III.1. Radioactivité et Réactions Nucléaires****III.1.1. Equivalence masse énergie :****III.1.1.1. Relation d'Einstein :**

En 1905, en élaborant la théorie de la relativité restreinte, Einstein postule que la masse est une des formes de l'énergie : Un système au repos, de masse  $m$  possède une énergie de masse :  **$E = m \cdot c^2$  (Relation d'équivalence masse-énergie)**

avec  $E$  : énergie de masse en joules (J),  $m$  : masse en kilogrammes (kg),  $c$  : vitesse de la lumière dans le vide ( $c = 3,0 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$ )

Conséquence : Si le système (au repos) échange de l'énergie avec le milieu extérieur, (par rayonnement ou par transfert thermique par exemple), sa variation d'énergie  $\Delta E$  et sa variation de masse  $\Delta m$  sont liées par la relation :  **$\Delta E = \Delta m \cdot c^2$**

\* Si  $\Delta m < 0$  alors  $\Delta E < 0$ , le système cède de l'énergie au milieu extérieur et sa masse diminue.

\* Si  $\Delta m > 0$  alors  $\Delta E > 0$ , le système reçoit de l'énergie du milieu extérieur et sa masse augmente.

**III.1.1.2. Défaut de masse du noyau**

On a constaté en mesurant les masses que la masse du noyau atomique est inférieure à la somme des masses des protons  $m_p$  et des neutrons  $m_n$  qui le constituent :

$$m_{\text{noyau}} < Z \cdot m_p + (A - Z) \cdot m_n$$

Cette différence est appelée défaut de masse  $\Delta m$  :

$$\Delta m = Z \cdot m_p + (A - Z) \cdot m_n - m_{\text{noyau}} \quad (\Delta m > 0)$$

**III.1.1.3. Energie de liaison et de cohésion des noyaux**

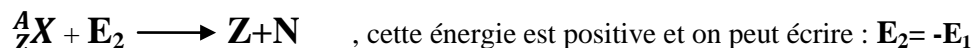
**III.1.1.3.a. Energie de liaison (E) :** Energie nécessaire à la formation d'un noyau quelconque à partir de ces nucléons (P+N). La formation du noyau est décrite par la réaction suivante :



La formation d'un noyau nécessite, en général, une énergie négative.

**III.1.1.3.b. Energie de cohésion (B):**

Énergie nécessaire à la destruction d'un noyau en ces constituants (N+P) selon la réaction :

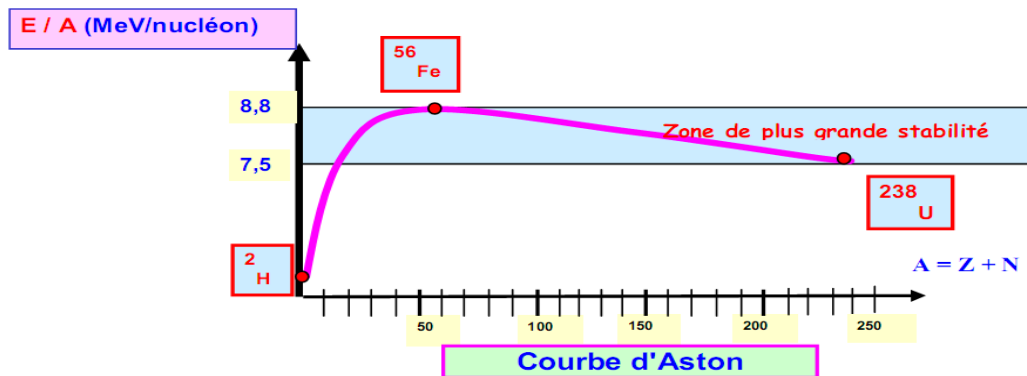
**III.1.1.3.c. Energie de cohésion par nucléon**

L'énergie de cohésion  $E_2$  est fonction du nombre de nucléons (A) du noyau, plus ce nombre est grand, plus l'énergie de cohésion est grande, et donc plus le noyau est stable. Pour connaître la stabilité d'un noyau, on calcule le rapport (énergie de cohésion)/(nombre de nucléons (A) soit B/A). Exemple de stabilité de différents noyaux : Plus le rapport  $E_2/A$  est grand, plus le noyau est stable.

Atomes	Stabilité du $E_2/A$
${}^7_3\text{Li}$	5,37 MeV
${}^{16}_8\text{O}$	7,72 MeV
${}^{56}_{26}\text{Fe}$	8,55 MeV
${}^{235}_{92}\text{U}$	7,39 MeV

#### III. III.1.1.4. Courbe d'Aston :

La courbe d'Aston représente  $-E_1/A$  en fonction de A (nombre de nucléons). Elle permet de visualiser facilement les noyaux les plus stables, ceux-ci se trouvent au bas du graphe comme le noyau de fer. (A entre 20 et 195). Deux processus différents sont possibles pour les noyaux instables: (atomes légers : fusion et atomes lourds : fission).



#### III.1.1.5. Unités de mesure

Les unités de mesure usuelles ne sont pas adaptées au monde subatomique.

**a. L'unité de masse atomique (u.m.a) :**  $1 \text{ u} = 1.66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

**b. L'électron-volt :** L'électron-volt est l'énergie acquise par un électron accéléré par une différence de potentiel de 1 volt. La variation de l'énergie cinétique de l'électron étant égale au produit de la charge de l'électron par la différence de potentiel, on trouve que :  $1 \text{ eV} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

On utilise souvent des multiples de l'électron-volt :  $1 \text{ KeV} = 10^3 \text{ eV}$ ,  $1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$ ,  $1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$ . Lors du calcul du bilan d'énergie de masse  $Q$ , les masses sont souvent exprimées en u.m.a. alors qu'on cherche à exprimer  $Q$  en MeV. On peut montrer que :

$$1 \text{ u.m.a} \cdot c^2 = 931.5 \text{ MeV}$$

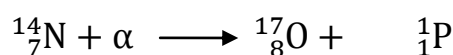
#### III.1.1.6. Réactions nucléaires (Fission et fusion):

##### a) Réactions nucléaires provoquées :

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

Les lois de conservation de Soddy sont vérifiées.

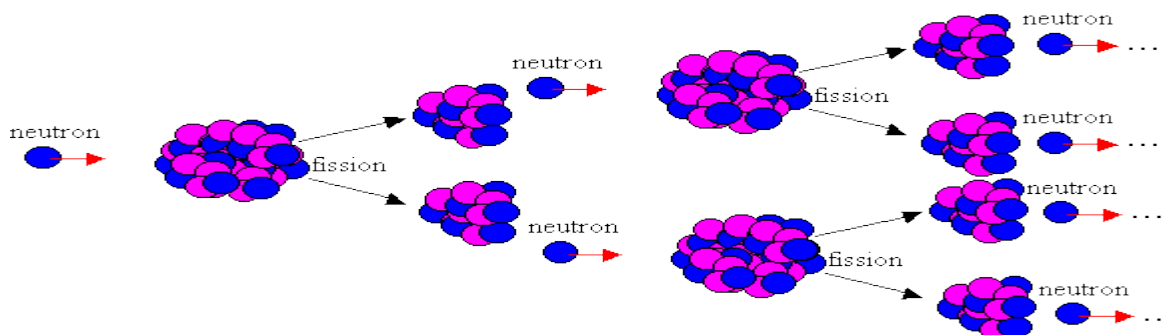
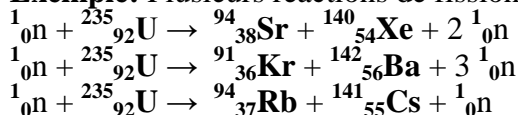
**Exemple :** Expérience de Rutherford en 1919 : le bombardement de noyaux d'azote avec des particules  $\alpha$  provoque la formation de noyaux d'oxygène et de protons.



##### b) La fission nucléaire: réaction en chaîne :

**Définition:** La fission est une réaction nucléaire provoquée au cours de laquelle un noyau lourd "fissile" donne naissance à deux noyaux plus légers.

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

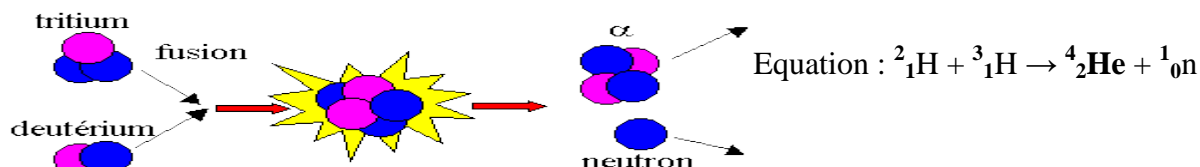


Les neutrons émis lors de la fission peuvent provoquer la fission d'autres noyaux. Si le nombre de neutrons émis lors de chaque fission est supérieur à 1, une réaction en chaîne peut se produire et devenir rapidement incontrôlable (bombe à fission : bombe "A" d'Hiroshima). Dans une centrale nucléaire, la réaction en chaîne est contrôlée par des barres mobiles qui plongent dans le réacteur entre les barres de "combustible" pour absorber une partie des neutrons émis. On peut ainsi contrôler la quantité d'énergie produite par les réactions de fission. Pour amorcer une fission, il faut apporter une quantité minimale d'énergie au système.

### c) La fusion nucléaire :

#### Définition:

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



L'énergie libérée au cours d'une fusion est considérable. La fusion n'est possible que si les deux noyaux possèdent une grande énergie cinétique pour vaincre les forces de répulsion électriques.

La fusion se produit naturellement dans les étoiles. Dans une bombe thermonucléaire (appelée bombe H), la fusion nucléaire est incontrôlée et explosive. Elle est très intéressante pour produire de l'énergie, mais on ne la maîtrise pas suffisamment pour produire de l'électricité.

## III.2. Radioactivité

La radioactivité a été découverte par Becquerel en 1886. Il découvrit que le sulfate d'uranyle et de potassium  $\text{K}_2\text{UO}_2(\text{SO}_4)_2$  émettait un rayonnement capable d'impressionner une plaque photographique. Les noyaux de certains atomes sont susceptibles d'être le siège de transformations, appelées transmutations qui peuvent être spontanées (naturelles) ou provoquées (réactions nucléaires). Parmi la centaine d'éléments connus seul les 83 premiers (à l'exception du Technétium ( $Z=43$ ) et du Prométhium ( $Z=61$ )) possèdent au moins un isotope stable.

La nature il existe des noyaux stables et d'autre instables ou radioactifs.

### III.2.1. Radioactivité Naturelle

On appelle radioactivité naturelle la propriété de certains éléments de se désintégrer spontanément en émettant diverses radiations.

Un élément chimique manifeste une radioactivité naturelle si le rapport  $A-Z/Z \geq 1.5$

Cependant, il reste des atomes radioactifs qui ne vérifient pas cette condition  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{24}\text{Na}$  et  $^{30}\text{P}$ .

#### III.2.1.1. Loi de Soddy et Fajans

Dans une transformation radioactive il y a conservation du nombre total de nucléons et de la charge globale.



1- Conservation du nombre total de nucléons :  $A=A'+4 \Rightarrow A'=A-4$

2- Conservation de la charge :  $Z=Z'+2 \Rightarrow Z'=Z-2$

#### III.2.1.2. Familles Radioactives Naturelles

Au cours d'une désintégration le noyau obtenu peut être radioactif, il y a une série de nucléide qui apparaissent l'un après l'autre et l'ensemble constitue une famille radioactive. Il existe trois (3) familles radioactives naturelles principales : isotope générateur  $\rightarrow$  isotope final.

1- Celle de l'Uranium 238 :  ${}^{238}_{92}\text{U} \xrightarrow{\text{séries de transmutations}} {}^{206}_{82}\text{Pb}$

2- Celle de l'Uranium 235 :  ${}^{235}_{92}\text{U} \xrightarrow{\text{séries de transmutations}} {}^{207}_{82}\text{Pb}$

3- Celle du Thorium 232 :  ${}^{232}_{90}\text{Th} \xrightarrow{\text{séries de transmutations}} {}^{208}_{82}\text{Pb}$

#### III.2.1.3. Types De Rayonnements (Radioactivités)

##### a) Radioactivité $\alpha$

La radioactivité  $\alpha$  correspond à l'émission de noyaux d'hélium  ${}^4_2\text{He}$  (autrefois appelés rayons, ou particules,  $\alpha$  avant la découverte de l'hélium) par certains noyaux. Ce type de radioactivité concerne les noyaux présentant un excès de nucléons et appelés « noyaux lourds » ( $A > 200$ ).

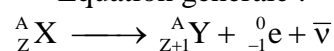
Équation générale :  ${}^A_Z\text{X} \longrightarrow {}^{A-4}_{Z-2}\text{Y} + {}^4_2\text{He}$

Exemple :  ${}^{238}_{92}\text{U} \longrightarrow {}^{234}_{90}\text{Th} + {}^4_2\text{He}$

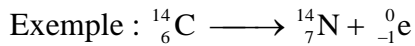
##### b) Radioactivité $\beta^-$

La radioactivité  $\beta^-$  correspond à l'émission d'électrons (autrefois appelés rayons, ou particules  $\beta$  avant la découverte de l'électron) par certains noyaux. Ce type de radioactivité concerne les noyaux présentant un excès de neutrons.

Équation générale :



On omettra l'antineutrino  $\bar{\nu}$ .



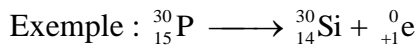
### c) Radioactivité $\beta^+$

La radioactivité  $\beta^+$  correspond à l'émission de positrons (ou positons) par certains noyaux. Les positrons sont les antiparticules des électrons. Ce type de radioactivité concerne les noyaux présentant un excès de protons. Les noyaux radioactifs  $\beta^+$  sont situés au dessous de la vallée de stabilité.

La radioactivité  $\beta^+$  existe surtout pour les nucléides artificiels (préparés dans des réacteurs nucléaires ou dans les accélérateurs de particules). Elle est extrêmement rare pour les nucléides naturels.



On omettra le neutron  $\nu$ .



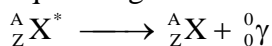
(Historique : 1<sup>er</sup> nucléide artificiel créé en 1934 par I. et F. Joliot-Curie)

### d) Désexcitation $\gamma$

Si le noyau fils issu d'une désintégration radioactive  $\alpha$  ou  $\beta$  est dans un état excité, l'excédent d'énergie est libéré sous forme de rayonnement électromagnétique  $\gamma$  de très haute fréquence (de l'ordre de  $10^{20}$  Hz).

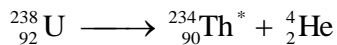
Un noyau dans un état excité est représenté avec un astérisque en exposant à droite.

Équation générale :

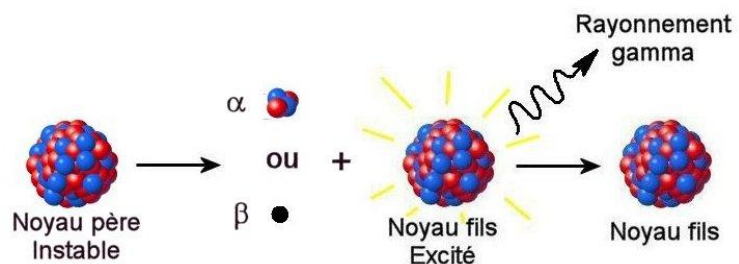
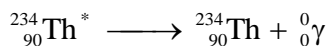


Exemple :

Associée à la radioactivité  $\alpha$

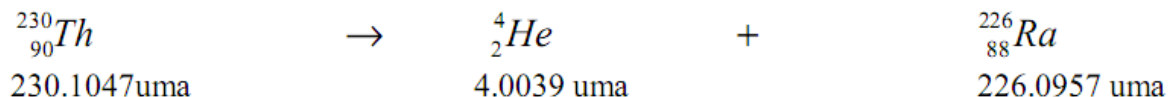


suivi de



#### III.2.1.4. Aspect énergétique

Dans la radioactivité, il y a conservation du nombre total de nucléons et de la charge globale. Ceci n'implique aucunement la conservation de la masse, au contraire les transmutations radioactives s'accompagnent toujours d'une perte de masse  $\Delta m$  correspondant à la libération de la quantité d'énergie donnée par la relation d'Einstein :  $E = \Delta m \cdot c^2$



La désintégration d'une mole d'atomes s'accompagne d'une perte de masse de  $\Delta m = 0.0051$  uma

$E = 0.0051 \cdot 1.66 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \cdot 9 \cdot 10^{16} \text{ m}^2/\text{s}^2 = 0.076194 \cdot 10^{-11} \text{ J/atom} = 0.076194 \cdot 10^{-11} / 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ eV}$

$E = 4.76 \text{ MeV / atome}$ . Cette énergie sert à accélérer les particules  $\alpha$  émises.

### III.2.2.Aspect cinétique

### III.2.3.Loi de désintégration radioactive

Cette loi s'applique aussi bien aux nucléides radioactifs naturels qu'aux nucléides radioactifs artificiels.

Dans un échantillon donné, le nombre d'atomes radioactifs varie avec le temps.

La désintégration radioactive ne dépend ni de la pression ni de la température ni des combinaisons chimiques dans lesquelles les atomes radioactifs sont impliqués.

Quand le nucléide formé n'est pas radioactif  $A \longrightarrow B$  ; (A radioactif, B stable), On a :

$$A = -\frac{dN}{dt} = \lambda N \quad A : \text{activité absolue, c'est le nombre de désintégration par unité de temps}$$

$N$  : nombre d'atomes radioactifs au temps ' $t$ '

$\lambda$ : constante de radioactivité de l'élément étudié

### III.2.3.1.Evolution au cours du temps

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda N \Rightarrow \int_{N_0}^{N_t} -\frac{dN}{N} = \lambda \int_0^t dt$$

$$\ln \frac{N_t}{N_0} = -\lambda t \quad \Rightarrow \quad \underline{N_t = N_0 e^{-\lambda t}}$$

$N_0$  : nombre d'atomes initial

$N_t$  : nombre d'atomes restant au temps ' $t$ '

Le nombre de noyaux ou d'atomes radioactifs décroît exponentiellement avec le temps.

1 mole d'un élément radioactif a une masse  $M$  :

$$\begin{aligned} M &\longrightarrow N_A \text{ atomes} \\ m(g) &\longrightarrow N \text{ atomes} \end{aligned} \quad \Rightarrow \quad N_0 = \frac{m_0}{M} N_A \quad \text{et} \quad N_t = \frac{m_t}{M} N_A$$

$$\frac{m_t}{M} N_A = \frac{m_0}{M} N_A e^{-\lambda t} \quad \Rightarrow \quad \underline{m_t = m_0 e^{-\lambda t}}$$

### Unités de A :

A est exprimée en :

- désintégrations par seconde (dps) ou Becquerels (Bq)
- désintégrations par minute (dpm)
- Curies (Ci)

Une source de 1 Curie subit  $3,7 \cdot 10^{10}$  dps (1 g de Rd a une activité  $A = 1$  Ci)

### III.2.3.2.Période radioactive :

Certains nucléides radioactifs restent stables pendant des milliards d'années, d'autres se décomposent en une fraction de seconde.

Un processus de désintégration est caractérisé par la période T.

La période T ou temps de demi-vie  $t_{1/2}$  est le temps nécessaire pour que la moitié de la substance se désintègre :

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T} \quad \left( N_{t_{1/2}} = \frac{N_0}{2} \right)$$

$$\frac{1}{2} = e^{-\lambda T} \Rightarrow \ln \frac{1}{2} = -\lambda T \quad \Rightarrow \quad T = \frac{\ln 2}{\lambda} \quad \text{ou} \quad T = \frac{0,693}{\lambda}$$

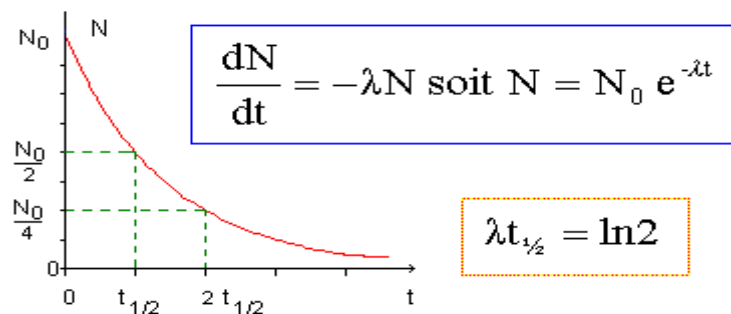
$$\ln 2 = \lambda T$$

- La période T ne dépend pas du nombre initial des noyaux.
- La température et la pression n'affectent pas la valeur de T.
- La période caractérise un nucléide donné.

#### Exemples

$$^{14}\text{C} : T = 5700 \text{ ans} \quad \quad \quad ^{226}_{88}\text{Ra} \quad T = 1620 \text{ ans}$$

$$^{40}\text{K} : T = 1,3 \cdot 10^9 \text{ ans} \quad \quad \quad ^{15}_8\text{O} \quad T = 125 \text{ secondes}$$



Mise en évidence de la période T

### III.2.4. Réactions nucléaires artificielles

Ces réactions se produisent lorsqu'on bombarde des noyaux par des particules subatomiques telles que : proton, neutron, électron, hélions ...

#### III.2.4.1. Réaction de fission

La réaction de fission est la rupture de certains noyaux lourds en 2 fragments de masses comparables, sous l'impact d'un projectile (neutron en général) et libération d'une grande énergie.



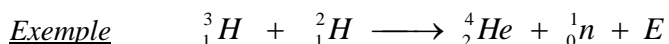
$$A > 200$$

$$72 < A < 162$$

Une fois amorcée, la réaction se poursuit d'elle-même et l'énergie libérée soudainement est explosive (bombe atomique).

### III.2.4.2. Réaction de fusion

C'est la réunion de 2 noyaux très légers en un noyau plus lourd avec expulsion d'un neutron ou d'un proton et libération d'une très grande énergie.

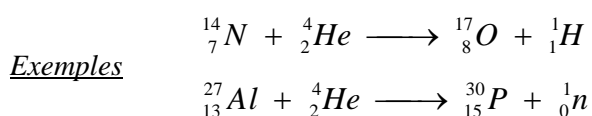


L'énergie libérée est considérable, mais la réaction demande une température très élevée  $\approx 1$  million  $^{\circ}\text{C}$ .

La bombe d'hydrogène est une application directe de ces réactions thermonucléaires). Le contrôle de l'énergie libérée n'est pas encore résolu.

### III.2.4.3. Transmutations nucléaires

Ces réactions produisent des nucléides de nombre de masse très voisin de celui du nucléide qui a servi de cible.



### III.2.5. Applications de la radioactivité

#### 1) En chimie :

- Détermination des structures moléculaires ;
- Mécanismes des réactions
- Etude des phénomènes d'absorption et de diffusion ;
- Contrôle de l'efficacité des méthodes de séparation et de purification ;
- Mesures de la solubilité de corps réputés insolubles ; Etude des métabolismes parmi lesquelles : l'établissement du cycle du carbone dans la photosynthèse chlorophyllienne et la biosynthèse de l'hémoglobine

En introduisant dans une molécule à la place d'un atome déterminé ( $^{12}\text{C}$ ,  $^1\text{H}$ , ...) l'isotope ( $^{13}\text{C}$ ,  $^2\text{H}$ , ...), ces isotopes peuvent être suivis grâce à leur rayonnement.

#### 2) En médecine et biologie :

Utilisation des radioisotopes pour le diagnostic et le traitement des maladies et pour fournir de précieux renseignements sur le mécanisme des réactions biologiques.

L'iode 131 diminue l'hyperactivité de la thyroïde et permet le traitement des goitres

#### 3) Datation des roches :

Détermination du rapport  $^{206}\text{Pb}$  et  $^{207}\text{Pb}$  dans un minerai d'uranium

#### 4) Datation des pièces archéologiques :