

CHAPITRE III : RADIOACTIVITÉ ET RÉACTIONS NUCLEAIRES

III.1 EQUIVALENCE MASSE-ENERGIE:

III.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 ΔE et sa variation de masse Δm 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.1.2. 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 Δm : $\Delta m = Z \cdot m_p + (A - Z) \cdot m_n - m_{\text{noyau}}$ ($\Delta m > 0$)

III.1.3. Energie de liaison et de cohésion des noyaux

III.1.3.1. 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.1.3.2. Energie de cohésion (B): Energie nécessaire à la destruction d'un noyau en ces constituants (N+P) selon la réaction : ${}^A_ZX + E_2 \longrightarrow Z+N$, cette énergie est positive et on peut écrire : $E_2 = -E_1$

III.1.3.31. 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. Pour connaître la stabilité d'un noyau, on calcule le rapport (énergie de cohésion)/(nombre de nucléons (A) soit E_2/A) . *Plus le rapport E_2/A est grand, plus le noyau est stable.*

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

III.1.4. Courbe d'Aston :

La courbe d'Aston représente $-E_l/A$ 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).

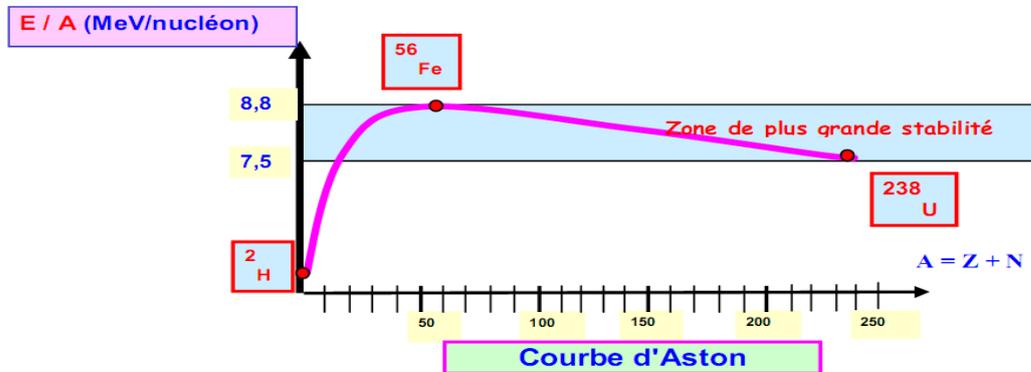


Fig.III.1.Courbe d'Aston

III.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) : $1 \text{ u} = 1.66 \cdot 10^{-27} \text{ m} \cdot \text{Kg}$

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.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.

Dans la nature, il existe des noyaux stables et d'autre instables ou radioactifs.

III.2.1. Radioactivité naturelle

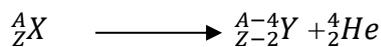
On appelle radioactivité naturelle la propriété de certains éléments de se désintégrer spontanément en émettant diverses radiations.

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}Co , ^{24}Na et ^{30}P .

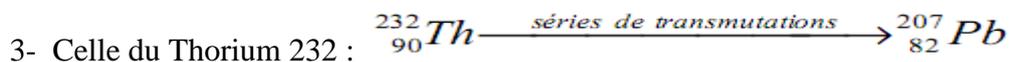
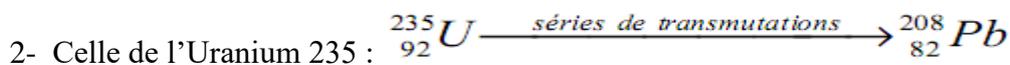
III.2.2. Loi de Soddy et Fajans

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



III.2.3. Familles radioactivités naturelles

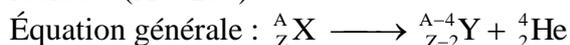
Au cours d'une désintégration le noyau obtenu peut être radioactif, il y a une série de nucléide qui apparaît l'un après l'autre et l'ensemble constitue une famille radioactive. Il existe trois (3) familles radioactives naturelles principales : isotope générateur \rightarrow isotope final.



III.2.4. Types de rayonnements (radioactivités)

a) Radioactivité α

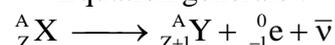
La radioactivité α correspond à l'émission de noyaux d'hélium ${}^4_2\text{He}$ (autrefois appelés rayons, ou particules, α avant la découverte de l'hélium) par certains noyaux. Ce type de radioactivité concerne les noyaux présentant un excès de nucléons et appelés « noyaux lourds » ($A > 200$).



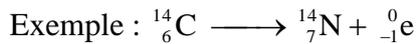
b) Radioactivité β^-

La radioactivité β^- correspond à l'émission d'électrons (autrefois appelés rayons, ou particules β 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 $\bar{\nu}$.



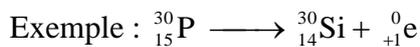
c) Radioactivité β^+

La radioactivité β^+ 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 β^+ sont situés au dessous de la vallée de stabilité.

La radioactivité β^+ 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 neutrino ν .

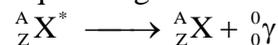


(Historique : 1^{er} nucléide artificiel créé en 1934 par I. et F. Joliot-Curie)

d) Radioactivité γ

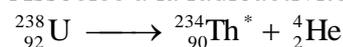
Si le noyau fils issu d'une désintégration radioactive α ou β est dans un état excité, l'excédent d'énergie est libéré sous forme de rayonnement électromagnétique γ de très haute fréquence (de l'ordre de 10^{20} Hz).

Équation générale :

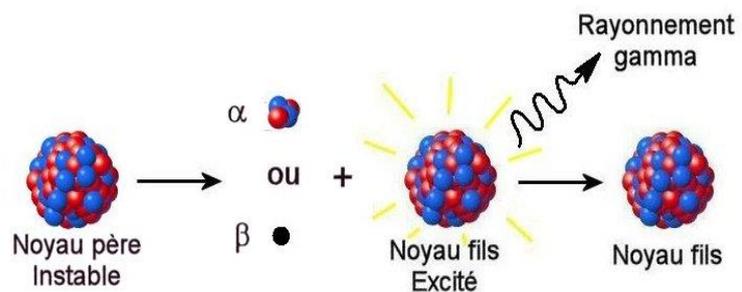
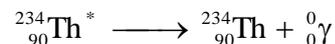


Exemple :

Associée à la radioactivité α



suivi de



III.2.5. 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 Δm correspondant à la libération de la quantité d'énergie donnée par la relation d'Einstein : $E = \Delta m \cdot c^2$

III.2.6. Aspect cinétique

III.2.6.1 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'

λ : constante de radioactivité de l'élément étudié

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 :

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

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

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.2.6.2. 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 :

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

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

$$\ln 2 = \lambda T$$

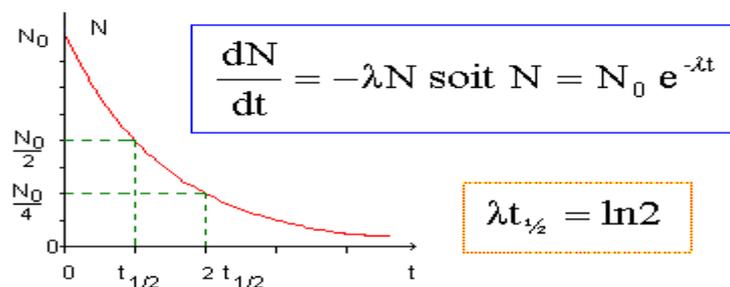
- La période T ne dépend pas du nombre initial des noyaux.
- La température et la pression n'affectent pas la valeur de T.
- La période caractérise un nucléide donné.

Exemples

^{14}C : T = 5700 ans

$^{226}_{88}\text{Ra}$ T = 1620ans

$^{15}_8\text{O}$ T = 125sec ondes



Mise en évidence de la période T

III.3. Réactions nucléaires artificielles

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

III.3. 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.



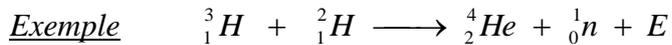
$$A > 200$$

$$72 < A < 162$$

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

III.3.2. 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.

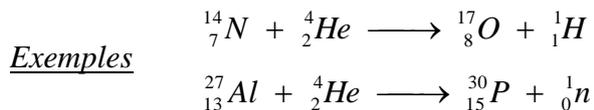


L'énergie libérée es considérable, mais la réaction demande une température très élevée \approx 1million °C.

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

III.3.3. Transmutations nucléaires

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



III.4. Applications de la radioactivité

a. 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}C , ^1H ,..) l'isotope (^{13}C , ^2H ,), ces isotopes peuvent être suivis grâce à leur rayonnement.

b. 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 rhyoïde et permet le traitement des goitres

c. Datation des roches :

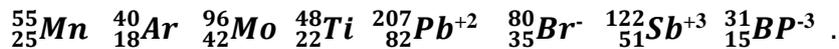
Détermination du rapport ^{206}Pb et ^{207}Pb dans un minerai d'uranium

d. Datation des pièces archéologiques

EXERCICES

Exercice 1 :

Quel est le nombre de neutrons, de protons et d'électrons présents dans chacun des atomes ou des ions suivants ?



Exercice 2 :

Quelles sont les propositions des 2 isotopes du bore ${}^{10}_5\text{B}$, ${}^{11}_5\text{B}$ à l'état naturel, sachant que la masse atomique moyenne du bore à l'état naturel est **10.811**.

Exercice 3 :

La masse atomique de ${}^{57}_{26}\text{Fe}$ est de 56, 9354 uma, et celle de ${}^{235}_{92}\text{U}$ est de 235.6439 u.

a/ Calculer l'énergie de cohésion par noyau, pour chaque nucléide, en joules et en MeV. **b/** Quel est le noyau le plus stable ? On donne en u : masse d'un proton : $m_p = 1,0078$; masse d'un neutron : $m_n = 1,0087$. ($1 \text{ u} = 1.66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$).

Exercice 4 :

En 1989, le satellite GALILEO a commencé son voyage vers Jupiter, qu'il a finalement atteint le 7 décembre 1995. Jupiter étant trop éloigné du soleil, l'énergie solaire ne peut être utilisée pour alimenter les instruments scientifiques. A la place, le satellite utilise l'énergie produite par la désintégration du plutonium ${}^{238}_{94}\text{Pu}$, qui est transformé en électricité.

- ${}^{238}\text{Pu}$ se désintègre en Uranium (U) en émettant des particules α . Ecrire l'équation nucléaire correspondante.
- La période du ${}^{238}\text{Pu}$ est $T = 86,6$ années. Le satellite GALILEO a décollé avec 19 kg de ${}^{238}\text{Pu}$, quelle est la masse de ${}^{238}\text{Pu}$ restant après les 7 années nécessaires pour atteindre Jupiter ?

Exercice 5 :

1-Un morceau de sarcophage isolé de l'air jusqu'à aujourd'hui, contient 60 % de $\text{C}(14)$ rapporté à l'air ambiant actuel. Quel est son âge ?

2-Un morceau de bois carbonisé trouvé dans une grotte et provenant d'un ancien feu de camp présente. A cause du carbone 14, une activité de 0.0125 Bq, alors qu'un échantillon actuel similaire possède une activité de 0.1Bq. A quelle époque la grotte était-elle habitée ?
 $t_{1/2}(\text{C}14) = 5760 \text{ ans}$