



UE 2

Radioactivité - Généralités

Le noyau est central, il porte presque toute la masse de l'atome (99,9%). Il est très petit, son rayon est d'environ 10^{-14} m, et est composé de :

- A nucléons (neutrons + protons)
- Z protons p+
- (A-Z) neutrons n



L'énergie de liaison entre 2 niveaux électroniques n_1 et n_2 vaut :

$$|\Delta E| = b \times z^2 \times \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right)$$

avec $b = 13,6$ eV



L'excitation/absorption correspond à une acceptation d'énergie. On passe à un niveau d'énergie supérieur par absorption d'un rayonnement (OEM) de fréquence ν .

⚠ L'excitation est possible que si $h \nu = E$

L'émission/désexcitation correspond à une cession d'énergie. L'électron est dans un état excité, il descend rapidement dans un niveau d'énergie inférieur en cédant l'énergie en émettant un rayonnement (OEM).

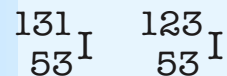
L'état de chaque électron est caractérisé par 4 nombres quantiques :

- n le nombre quantique principal
- l le nombre quantique azimutal
- m le nombre quantique magnétique
- s le nombre de spin

Le couple A et Z caractérise un nucléide.
Les électrons **Z** conditionnent les **propriétés chimiques**.
Les nucléons **A** conditionnent les **propriétés physiques**.

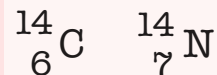
On appelle **isotopes**, 2 noyaux qui ont :

- Z identiques = **mêmes** propriétés **chimiques**
- A différents = propriétés **physiques différentes**



On appelle **isobares** 2 noyaux qui ont :

- Z différents = propriétés **chimiques différentes**
- A identiques = **mêmes** propriétés **physiques**



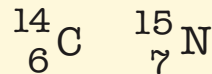
On appelle **isomères** 2 noyaux qui ont:

- **Même A et Z**
- Niveaux d'**énergie différents**

E_{min} = État fondamental
 $E > E_{\text{min}}$ = état excité

On appelle **isotones** 2 noyaux qui ont:

- Z différents = propriétés **chimiques différentes**
- Le **même nombre de neutrons** ($A - Z$)



La charge électrique s'exprime en : **1 C = 1 A.s**

L'énergie s'exprime en : **1 J = 1 N.m**

Charge nulle pour un neutron et un photon 0 C

Charge positive pour le proton et le positon $+ 1,6 \times 10^{-19}$ C

Charge négative pour l'électron $-1,6 \times 10^{-19}$ C



2



UE 2

Radioactivité - Transformations radioactives

L'énergie ΔE_m représente l'énergie disponible si l'on casse le noyau en ses constituants, ou à l'inverse, l'énergie à fournir pour créer le noyau à partir de ses constituants.

Fusion = créer un noyau

Fission = casser un noyau

La fusion est une source d'énergie importante:

Réaction Deutérium - Tritium

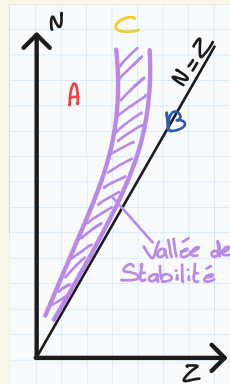
$\Delta E_{\text{fusion}} = \Delta E' - (\Delta E_1 + \Delta E_2) > 0 \Delta = 17,6 \text{ MeV}$

La réaction donne un noyau d'hélium, un neutron et de l'énergie mais pour cela il faut rompre chacun des 2 noyaux (déutérium et tritium) : on apporte dans chaque étape une certaine énergie pour casser le noyau en ses constituants.

Les noyaux instables sont répartis entre 3 zones d'instabilité autour de la vallée de stabilité :

- Zone A : nucléides instables par excès de neutrons
- Zone B : nucléides instables par excès de protons
- Zone C : nucléides instables par excès de nucléons

Les nucléides situés en dehors de la vallée de stabilité sont dits instables et appelés radioéléments.



La fission

^{235}U

On a un gros noyau d'uranium que l'on bombarde avec des neutrons ce qui va engendrer une fission des différents atomes et une émission de neutrons et particules. L'énergie libérée lors de cette réaction est énorme :

E libérée = 200 MeV/atome

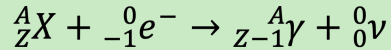
Soit 16TJ (10^{12}) pour 1 mole = 235g de ^{235}U

Transformations isobariques

L'émission β^+

Concerne les nucléides instables par excès de **protons**.

Lors de cette transformation, un neutron donne un positon et un neutrino.



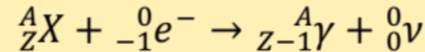
L'énergie ΔE est répartie de façon aléatoire entre l'énergie du neutrino et l'énergie cinétique du β^+ .

L'émission β^+ est associée à un phénomène d'annihilation $\beta^+ + e^- \rightarrow 2h\nu$ émis à 180° l'un de l'autre.

La capture électronique

Concerne les nucléides instables par excès de **protons**.

Un proton se combine à un électron pour donner un neutron et un neutrino.

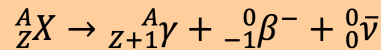


Après la capture électronique, la variance dans le cortège électronique va être comblée par un électron d'une couche périphérique. Libération soit par émission de photons X soit par électron d'Auger.

L'émission β^-

Concerne les nucléides instables par excès de **neutrons**.

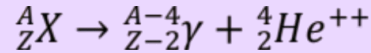
Lors de cette transformation, un neutron donne un proton, un électron et un antineutrino.



L'énergie ΔE est répartie de façon aléatoire entre l'énergie de l'antineutrino et l'énergie cinétique du β^- .

Transformations par partitions

Concerne les **nucléides** (zone C), les noyaux lourds avec excès de nucléons. Les forces de répulsion au sein de ces nucléides sont supérieures aux forces d'attraction. Cette transformation est liée à l'émission α .



Cette transformation a lieu spontanément.

Transformations isomériques

Émission γ

Les énergies correspondent aux transitions possibles (spectre de raies = un certain nombre de valeurs possibles).

Il y a trop d'énergie donc les électrons la libère sous forme de rayons γ en descendant sur la couche électronique inférieure.

Conversion interne

Transformation de l'énergie d'un électron d'une couche proche (donc K ou L) éjecté avec une énergie cinétique E_c :

$$E_c = \Delta E - E_I$$

On va avoir un spectre β^- de raies.





UE 2

Radioactivité - Transformations radioactives

Rayonnement α

Émission α : spectre mono énergétique

Très énergétique mais très peu pénétrant ($< 1/10\text{mm}$)

Rayonnement β^-

On peut obtenir des émission β^- avec :

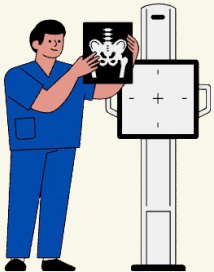
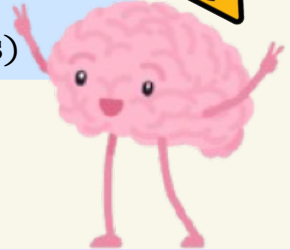
- Des émissions β^- classiques
- Des conversions internes
- Des électrons d'Auger

Énergétique (moins que les particules α), peu pénétrant (quelques millimètres)

Rayonnement β^+

Émission β^+ lors des transformations isobariques

Phénomène d'annihilation



Rayonnement X et γ

Peu énergétique, très pénétrant

- Émission de rayons X après un réarrangement électronique, après conversion interne ou après capture électronique.
- Émission de rayons γ après un réarrangement suite à une transition isomérique, ou après un phénomène d'annihilation.



UE 2

Radioactivité - Cinétique des transformations radioactives

Activité

L'activité A correspond au nombre de désintégration par unité de temps.

$$A = \frac{dN}{dt} = \lambda \times N$$

Dans le SI, elle est exprimée en Becquerel Bq (= une désintégration par seconde)

Historiquement elle était exprimée en Curie Ci, c'est l'activité de 1g de ^{226}Ra équivalent à $3,7 \times 10^{10}$ Bq = 37 GBq

$$\begin{aligned} 1 \text{ mCi} &= 10^{-3} \text{ Ci} \\ &= 3,7 \times 10^6 \text{ Bq} = 3,7 \text{ MBq} \end{aligned}$$

Décroissance radioactive

Un radioélément non stable se désintègre via l'émission ou non de particules et d'ondes électromagnétiques, de matière naturelle.

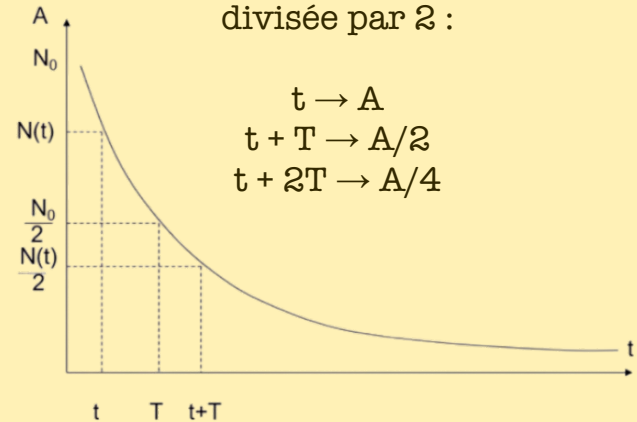
L'activité est proportionnelle au nombre de noyaux radioactifs N , et elle diminue exponentiellement au cours du temps selon la relation :

$$A = \lambda \times N = \lambda \times N_0 \times e^{-\lambda t}$$

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

$$\text{Car : } N = N_0 \times e^{-\lambda t}$$

T correspond à la période radioactive, après chaque période T , l'activité est divisée par 2 :



Relations

La constante radioactive λ et la période T (= demi-vie) sont reliées par la formule :

$$T = \frac{\ln(2)}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda}$$

Le nombre de noyaux N , la masse m et de la masse molaire M sont reliées par la formule :

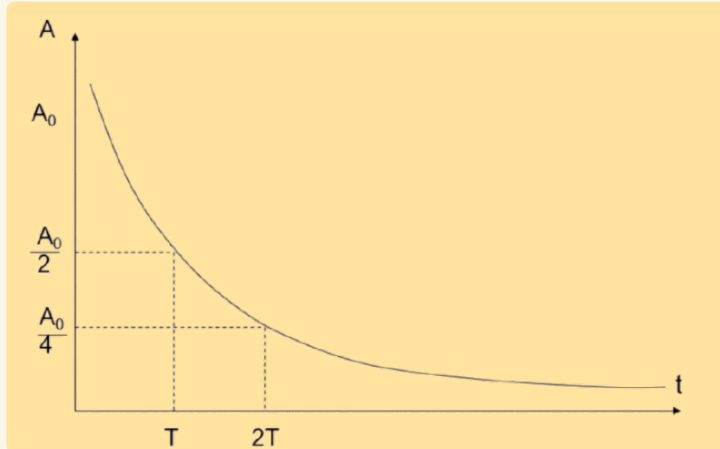
$$N = \frac{m}{M} \times Na = n \times Na$$

Demi-vie effective

Combine la demi-vie physique T_{phy} et la demi-vie biologique T_{bio} , pour estimer la durée de radioactivité dans l'organisme.

$$T_{\text{eff}} = \frac{T_{\text{phy}} \times T_{\text{bio}}}{T_{\text{phy}} + T_{\text{bio}}}$$

Utilisée en radioprotection, la période effective est cruciale pour doser l'exposition d'un patient en médecine nucléaire en prenant en compte l'élimination biologique du produit.



Handwritten signature

Cas particuliers de filiation

Les noyaux radioactifs présents dans les sols terrestres passent par plusieurs étapes avant d'arriver sur un élément stable. On peut dégager 3 grandes familles

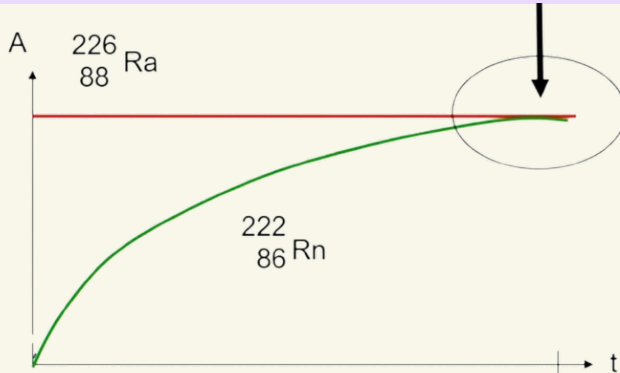
- Thorium 232
- Uranium 235
- Uranium 238

Cas particulier lorsque N_1 et N_2 ont des périodes très différentes.

$T_1 \gg T_2$ donc $\lambda_1 \ll \lambda_2$

Ce qui amène après un moment $A_2(t) = A_1(t)$, on parle d'**équilibre séculaire**

Exemple : Ra^{226} (1622 ans) et Rn^{222} (3,8 jours)



L'équilibre de régime est un équilibre séculaire à une échelle beaucoup plus petite:
 $T_1 > T_2$ et $\lambda_1 < \lambda_2$ ce qui amène après un moment à :

$$A_2(t) = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} A_1(t)$$

