

RÉACTIONS NUCLÉAIRES SPONTANÉES.

Les nucléides instables (cf. carte des nucléides et ligne de stabilité) sont susceptibles de se désintégrer en émettant des particules ; c'est le phénomène de radioactivité.

1. Généralités.

Dans une désintégration radioactive, un noyau-père (éventuellement dans un état excité) se transforme en un noyau-fils (éventuellement dans un état excité) en émettant un électron, un positron, un noyau d'hélium ; ces émissions sont en général accompagnées d'émission de photons (et éventuellement d'autres particules).

Dans toutes les désintégrations (comme dans toute réaction nucléaire), il y a conservation :

de la charge ; la somme des nombres de charge des produits est égale à la somme des nombres de charge des réactifs.

du nombre de nucléons ; la somme des nombres de masse des produits est égale à la somme des nombres de masse des réactifs.

de l'énergie ; l'énergie du système, somme des énergies de masse et des énergies cinétiques, se conserve.

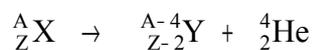
de la quantité de mouvement ; une désintégration peut être considéré comme l'éclatement d'un solide.

On appelle énergie disponible E_D la différence entre la somme des énergies de masse au repos des réactifs et la somme des énergies de masse au repos des produits.

2. Radioactivité α .

Caractéristique des noyaux lourds instables, elle consiste en l'émission d'un noyau d'hélium ${}^4_2\text{He}$.

Elle fait intervenir l'interaction forte.



L'énergie disponible vaut :

$$E_D = (M_{\text{père}} - M_{\text{fils}} - M_{\alpha}) c^2$$

Elle est essentiellement emportée par la particule α sous forme d'énergie cinétique (voir le document "explosion d'un solide" dans la section annexe).

Les noyaux père et fils peuvent être dans des états excités : il y a plusieurs valeurs possibles pour l'énergie disponible, le spectre en énergie cinétique des particules α est un spectre discret.

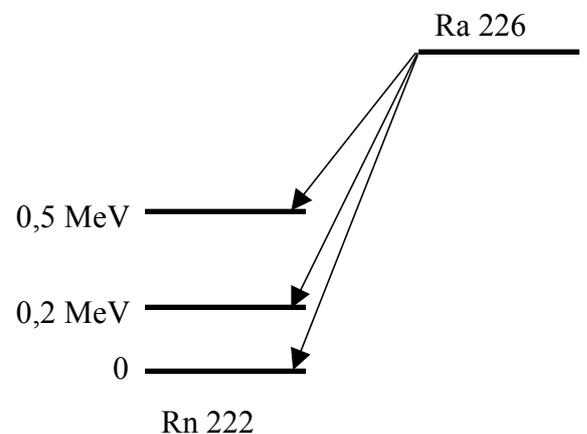
Par exemple, les énergies cinétiques mesurées de particules α au cours de la désintégration du Ra 226 sont rassemblées dans le tableau suivant :

E_c (MeV)	%
4,8	94,3
4,6	5,69
4,2	0,01

Ces résultats sont interprétés par le diagramme énergétique ci-contre.

${}^{226}_{88}\text{Ra} \rightarrow {}^{222}_{86}\text{Rn} + {}^4_2\text{He}$

${}^{223}_{90}\text{Th}$	${}^{224}_{90}\text{Th}$	${}^{225}_{90}\text{Th}$	${}^{226}_{90}\text{Th}$	${}^{227}_{90}\text{Th}$	${}^{228}_{90}\text{Th}$
${}^{222}_{88}\text{Ac}$	${}^{223}_{88}\text{Ac}$	${}^{224}_{88}\text{Ac}$	${}^{225}_{88}\text{Ac}$	${}^{226}_{88}\text{Ac}$	${}^{227}_{88}\text{Ac}$
${}^{221}_{86}\text{Ra}$	${}^{222}_{86}\text{Ra}$	${}^{223}_{86}\text{Ra}$	${}^{224}_{86}\text{Ra}$	${}^{225}_{86}\text{Ra}$	${}^{226}_{86}\text{Ra}$
${}^{220}_{84}\text{Fr}$	${}^{221}_{84}\text{Fr}$	${}^{222}_{84}\text{Fr}$	${}^{223}_{84}\text{Fr}$	${}^{224}_{84}\text{Fr}$	${}^{225}_{84}\text{Fr}$
${}^{219}_{82}\text{Rn}$	${}^{220}_{82}\text{Rn}$	${}^{221}_{82}\text{Rn}$	${}^{222}_{82}\text{Rn}$	${}^{223}_{82}\text{Rn}$	${}^{224}_{82}\text{Rn}$
${}^{218}_{80}\text{At}$	${}^{219}_{80}\text{At}$	${}^{220}_{80}\text{At}$	${}^{221}_{80}\text{At}$	${}^{222}_{80}\text{At}$	${}^{223}_{80}\text{At}$
${}^{217}_{78}\text{Po}$	${}^{218}_{78}\text{Po}$	${}^{219}_{78}\text{Po}$	${}^{220}_{78}\text{Po}$		

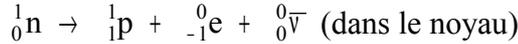


3. Radioactivité β .

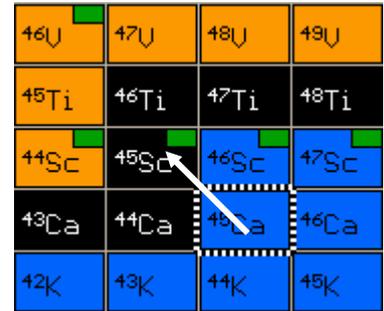
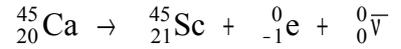
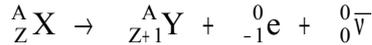
Caractéristique des noyaux éloignés de la ligne de stabilité par un excès (radioactivité β^-) ou un déficit (radioactivité β^+) du rapport neutrons / protons, elle consiste en l'émission d'un électron (radioactivité β^-) ou d'un positon (radioactivité β^+).

3.1. Radioactivité β^- .

La transformation, au sein du noyau, par interaction faible, d'un neutron en proton provoque l'émission d'un électron accompagné d'un antineutrino.

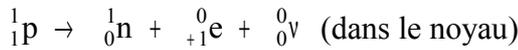


Le résultat de la transformation est traduit par l'équation suivante :

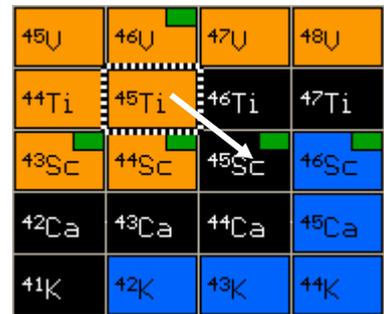


3.2. Radioactivité β^+ .

La transformation, au sein du noyau, par interaction faible, d'un proton en neutron provoque l'émission d'un positon accompagné d'un neutrino.

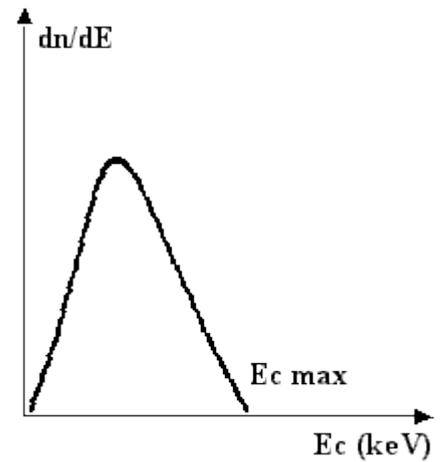


Le résultat de la transformation est traduit par l'équation suivante :



3.3. Spectre en énergie des particules émises.

Le spectre en énergie cinétique des électrons (ou des positrons) est continu, preuve que l'énergie disponible est distribuée, sous forme d'énergie cinétique, entre l'électron et l'antineutrino (ou le positon et le neutrino) ; c'est cette constatation qui a conduit Fermi à imaginer l'existence de celui-ci.

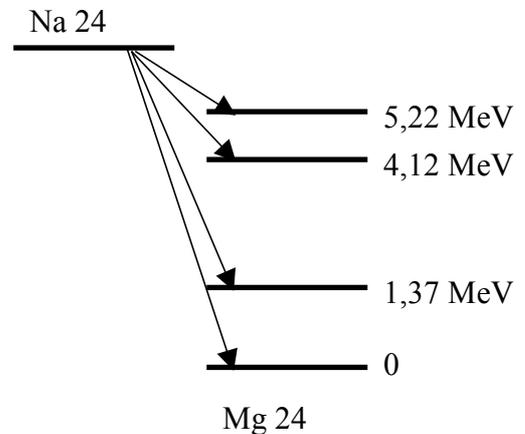


Le noyau-fils peut être obtenu dans un état excité. Le spectre en énergie cinétique peut alors avoir une allure plus complexe. Par exemple :



Il y a plusieurs valeurs possibles d'énergie disponible, donc plusieurs valeurs possibles pour l'énergie cinétique maximale E_{cmax} :

0,29 MeV ; 1,39 MeV ; 4,17 MeV ; 5,51 MeV

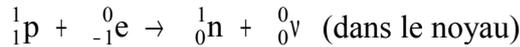


3.4. Annihilation des positrons.

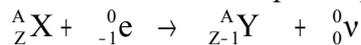
Au cours de l'émission d'un positon β^+ , celui-ci réagit rapidement avec un électron du milieu dans un processus d'annihilation avec création de deux photons de 0,511 MeV (cf création de paires).

4. Capture électronique.

La probabilité de présence des électrons du nuage électronique (de l'atome) à l'intérieur du noyau n'est pas nulle ; il est possible qu'un de ces électrons (le plus souvent un électron de la couche K, on parle alors de capture K) réagisse avec un proton par interaction faible, pour donner un neutron et un neutrino :

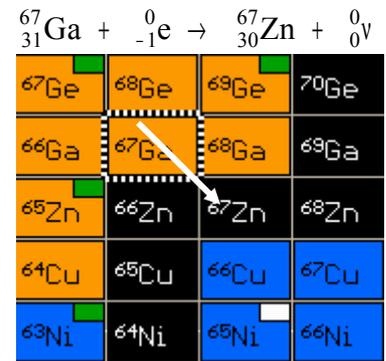


Le résultat de la transformation est traduit par l'équation suivante :



Le noyau fils obtenu est semblable à celui qui serait obtenu par une désintégration β^+ .

Le nuage électronique du noyau fils comporte alors une vacance électronique correspondant à l'électron capturé. On observe alors des réarrangements dans le cortège électronique de l'atome (émission de rayons X), avec éventuellement émission d'électrons "Auger".



5. Rayonnement γ et conversion interne.

5.1. Les photons γ .

Ils accompagnent tous les types de radioactivité cités précédemment, à chaque fois que le noyau fils est obtenu dans un état excité.



Plusieurs photons différents peuvent être libérés.

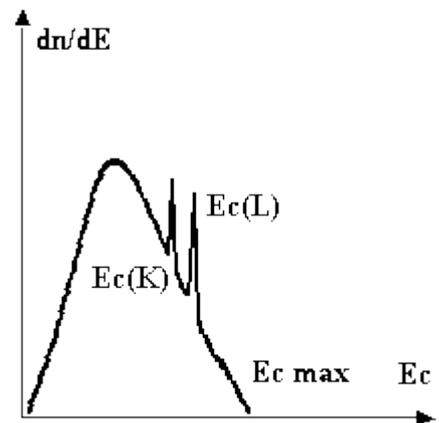
Les photons obtenus ont une énergie de quelques MeV.

5.2. Conversion interne.

Il est également possible que l'énergie libérée au cours du passage du noyau fils, dans son état excité vers son état fondamental, soit directement transférée au nuage électronique de l'atome "fils".

Dans ces conditions, il peut y avoir ionisation de l'atome (départ d'un électron de la couche K ou de la couche L) ; ces électrons ont des énergies bien déterminées.

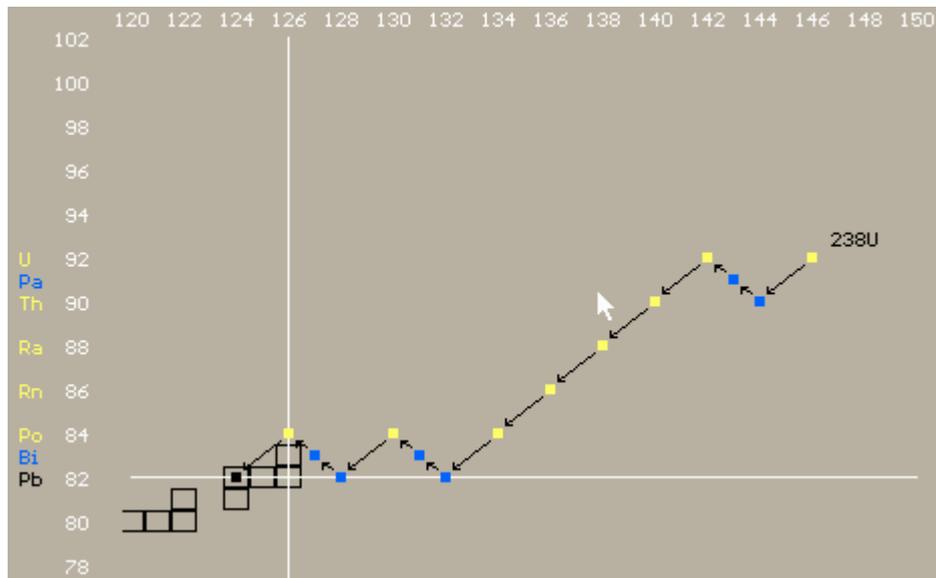
Dans le cas de la radioactivité β^+ , ils se superposent au spectre continu des énergies cinétiques des électrons émis au cours de la désintégration.



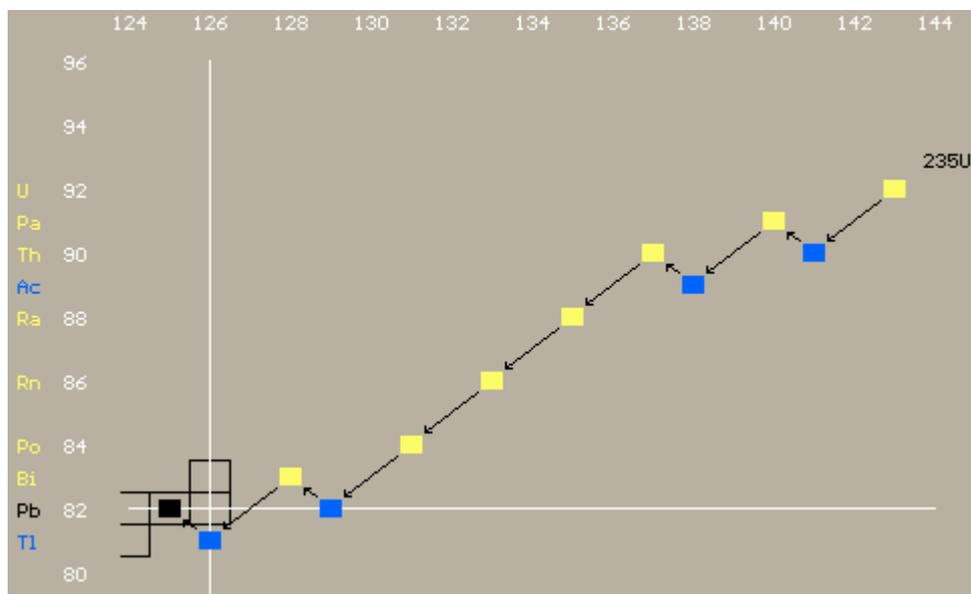
6. Filiation radioactives.

La radioactivité induit le passage d'un nucléide instable vers un nucléide plus stable, mais qui peut également être radioactif ; celui-ci se désintègre à son tour, et ainsi de suite, jusqu'à ce que le dernier nucléide obtenu soit stable.

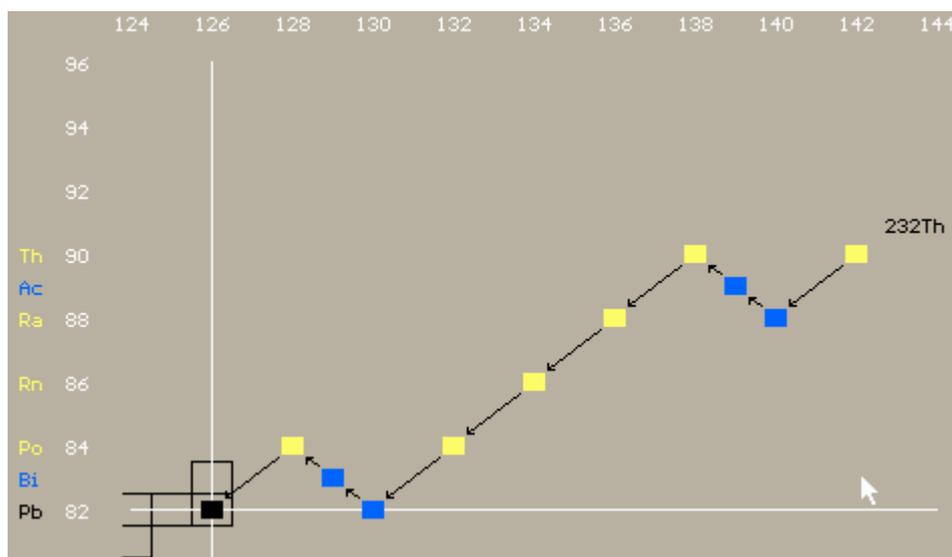
Un certain nombre de noyaux radioactifs naturels sont présents sur Terre bien que leur temps de vie soit court par rapport à l'âge de celle-ci. Ils sont issus de la descendance de trois noyaux lourds à très longue vie : l'uranium 235 dont la demi-vie vaut 0,70 milliards d'années ; l'uranium 238 dont la demi-vie vaut 4,47 milliards d'années ; le thorium 232 dont la demi-vie vaut 14,0 milliards d'années.



famille de l'Uranium 238



famille de l'Uranium 235



famille du Thorium 232

7. État radioactif.

Un nucléide instable possède une probabilité λdt de se désintégrer pendant une durée dt . Pour une population N très grande de noyaux, le nombre de désintégrations est proportionnel à cette probabilité et aux nombre de noyaux non désintégrés.

$$dN = -\lambda N dt$$

$A = \lambda N$ est l'activité de la source radioactive (en becquerel Bq ou en curie Ci ; 1 Ci = 37 GBq).

λ est la constante radioactive ; elle est caractéristique de chaque réaction de désintégration.

La population N (et l'activité λN) évoluent selon une loi exponentielle décroissante :

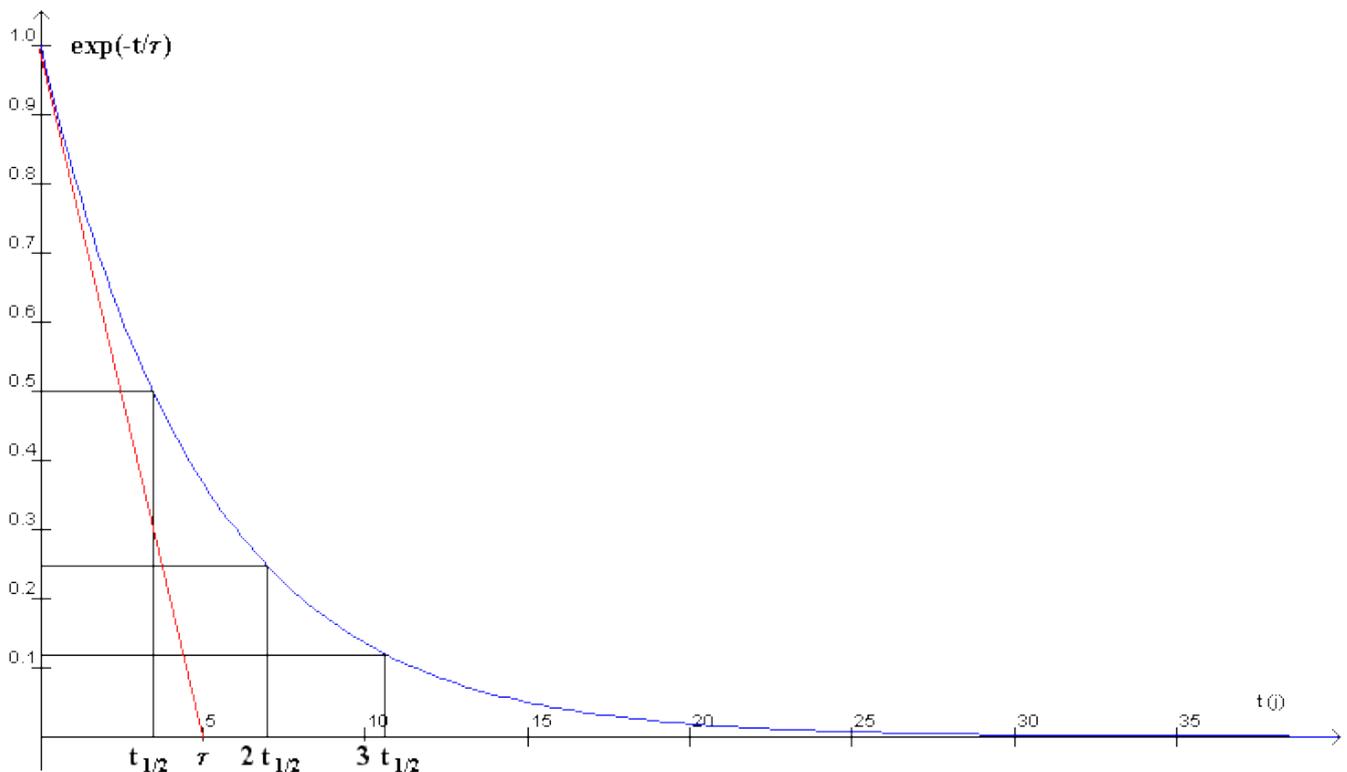
$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

La demi vie $t_{1/2}$ (ou période radioactive), durée pour laquelle la population (ou l'activité) est divisée de moitié.

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

La constante de temps τ correspond à la durée pour laquelle la population (ou l'activité) est divisée par e .

$$\tau = \frac{1}{\lambda}$$



8. Quelques nucléides radioactifs utilisés en médecine.

iode 131, iode 123, technétium 99, thallium 201, xénon 133, gallium 67 en scintigraphie

carbone 11, l'azote 13, l'oxygène 15 et fluor 18 en tomographie par émission de positrons

iridium 192 et césium 137 en thérapie.