

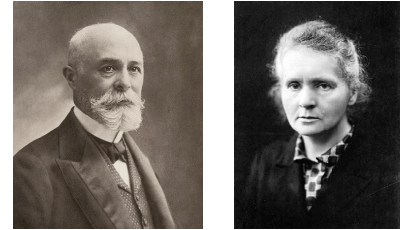
DM2 : Autour de l'énergie nucléaire

Introduction

La radioactivité est le phénomène physique par lequel des noyaux atomiques instables, dits radionucléides ou radioisotopes, se transforment spontanément en d'autres atomes, **désintégration**, en émettant simultanément des particules de matière (électrons, noyaux d'hélium, neutrons, etc.) et de l'énergie (photons et énergie cinétique).

L'émission de particules matérielles et immatérielles est appelée **rayonnement**. L'énergie de ces particules étant suffisante pour entraîner l'ionisation de la matière traversée, on parle de rayonnements ionisants.

La radioactivité a été découverte en 1896 par Henri BECQUEREL dans le cas de l'uranium, résultat qui fut très vite confirmée par Marie SKŁODOWSKA-CURIE pour le radium. Pour leurs travaux, ils recevront conjointement le prix NOBEL en 1903.

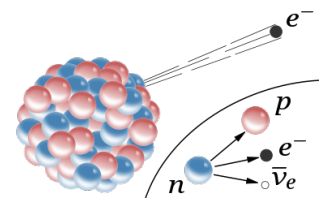


Comme tous les atomes, un atome radioactif est composé d'un noyau lui-même composé de nucléons (neutrons et protons) et d'un cortège d'électrons circulants à bonne distance du noyau en nombre égal à celui des protons : l'atome radioactif est équilibré en charge électrique. Cependant, un atome radioactif contient un **noyau instable** dont le nombre de nucléons ou la composition relative en protons et neutrons ne correspond pas à une situation stable. Le noyau de l'atome radioactif cherche à rallier la configuration stable la plus proche de sa composition en émettant des particules.

Les radioactivités

Par rapport au noyau de l'atome stable le plus voisin, le noyau de l'atome radioactif peut se trouver dans l'une des trois situations suivantes :

- **Excès de neutrons** : un neutron se transforme en un proton en émettant un électron et un anti-neutrino électronique. C'est le **rayonnement β^-** : ${}_0^1\text{n} \rightarrow {}_1^1\text{p} + e^- + \bar{\nu}_e$.

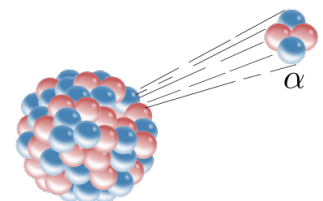


Remarque : Ce processus est plus "économique" que celle consistant à émettre un neutron puisqu'il permet de rallier plus efficacement la proportion stable neutron/proton. Le bilan électrique global reste neutre puisque la charge négative de l'électron émis est compensée par la charge positive augmentée du noyau.

- **Excès de protons** : un proton se transforme en neutron en émettant un positron (un anti-électron) et un neutrino. C'est le **rayonnement β^+** : ${}_1^1\text{p} \rightarrow {}_0^1\text{n} + e^+ + \nu_e$.

Remarque : Au cours du transit vers l'extérieur, le positron va interagir avec un électron, provoquant l'annihilation du couple électron/positron en une paire de photons γ . C'est un cas de rayonnement électromagnétique pur.

- **Excès de nucléons** : le noyau émet des particules α , c'est-à-dire un groupe de 2 neutrons + 2 protons correspondant à un noyau d'hélium ${}_2^4\text{He}$. C'est le **rayonnement α** : ${}_Z^AX \rightarrow {}_{Z-2}^{A-4}Y + {}_2^4\text{He}$.



L'énergie du rayonnement est majoritairement constituée par l'énergie cinétique de la particule α , qui est une particule massive. Sachant que la quantité de mouvement est conservée lors de l'expulsion de cette particule, une énergie cinétique non négligeable est communiquée au reste du noyau en désintégration.

Remarque : Au cours de son transit hors de l'atome au travers du cortège électronique, la particule alpha chargée positivement peut capter deux électrons. Si cela n'a pas été le cas elle capte deux électrons auprès des atomes voisins et les deux électrons excédentaires de l'atome initial compensent le bilan électrique total qui reste neutre.

- **Cas rarissime** de « super-excès » de neutrons : le noyau peut émettre directement des neutrons (particule non chargée donc capable de traverser le cortège électronique).

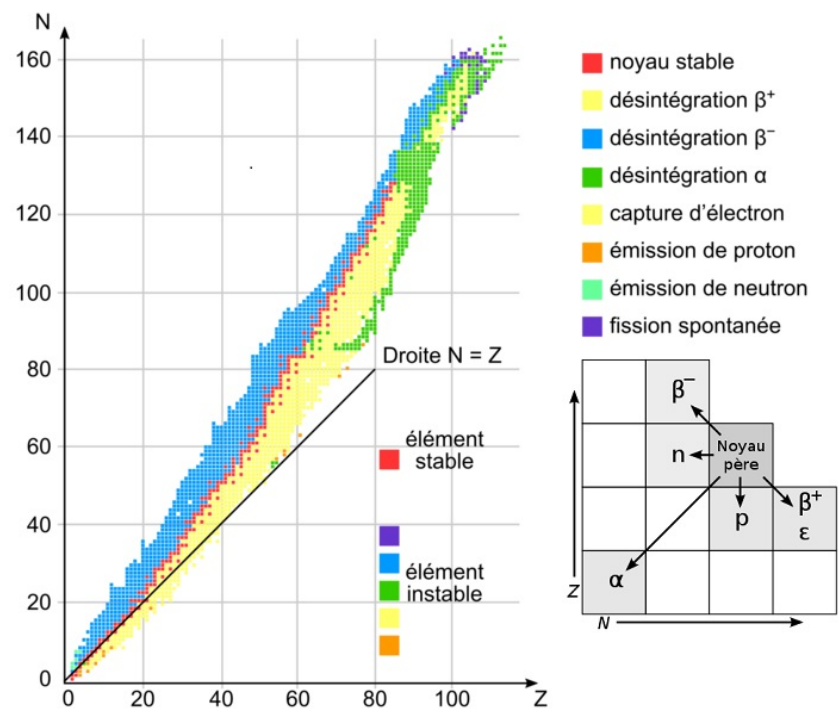
Ces désintégrations sont souvent accompagnées de l'émission de photons de haute énergie ou rayons γ , dont les longueurs d'onde sont généralement de l'ordre de 10^{-11} m ou inférieures, encore plus courtes que celles des rayons X. Cette émission γ résulte de l'émission de photons lors de transitions nucléaires, par réarrangement des charges internes du noyau nouvellement formé, ou bien de la couche profonde du cortège électronique perturbé.

1. Écrire les réactions bilan de la radioactivité β^- du cobalt ${}_{27}^{60}\text{Co}$, de la radioactivité β^+ du fluor ${}_{9}^{18}\text{F}$ et de la radioactivité α de l'uranium ${}_{92}^{238}\text{U}$. On précisera notamment l'élément obtenu.

Les produits de radioactivité étant souvent eux-mêmes radioactifs, d'une réaction initiale résulte généralement une succession de réactions nucléaires appelées **chaîne**, ou série, **radioactive**.

Seuls les noyaux instables subissent spontanément, sans intervention extérieure, une transformation nucléaire. Le caractère stable ou instable dépend du nombre Z de protons par rapport au nombre N de neutrons. Le diagramme (N, Z) ci-contre représente tous les noyaux connus sur Terre (2 800 environ) et permet d'identifier un noyau stable d'un noyau instable. La courbe rouge qui permet d'identifier les noyaux stables et qui se dessine sur le diagramme (N, Z) est appelée la **vallée de stabilité**. On remarque que plus le nombre $A = N + Z$ de nucléons est important, plus les noyaux stables s'éloignent de la droite $N = Z$.

Dans le diagramme (N, Z) , on peut représenter graphiquement les différents modes de désintégration : radioactivités α , β^- et β^+ , capture électronique ϵ , émission de neutron n et émission de proton p .



Activité des radioisotopes et impact sur la santé

Un radioisotope quelconque a autant de chances de se désintégrer à un moment donné qu'un autre radioisotope de la même espèce. La désintégration ne dépend pas des conditions physico-chimiques dans lesquelles le nucléide se trouve : la loi de désintégration radioactive est une loi statistique. Chaque radionucléide est caractérisé par une durée $t_{1/2}$, appelée **demi-vie**, au bout de laquelle la moitié d'un échantillon radioactif se sera désintégrée.

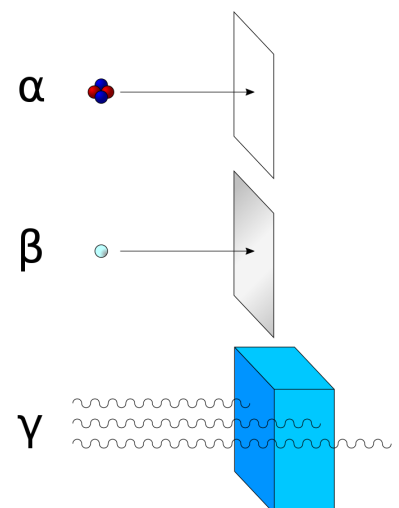
Remarque : L'évolution temporelle est exponentielle décroissante, si bien que, quelque soit l'instant initial choisi, la moitié des radionucléides de l'échantillon se désintégrera au bout de $t_{1/2}$.

L'activité d'une source radioactive se mesure en becquerels (Bq), unité correspondant au nombre de désintégrations par seconde. Cependant, cette grandeur dépend de la masse/du volume de la source considérée. Pour comparer les sources entre elles, on utilisera plutôt l'activité massique ou volumique, s'exprimant en Bq/m^3 ou en Bq/kg .

La dangerosité des sources radioactives est mesurée par des grandeurs appelées doses.

- La **dose absorbée** par la cible est définie comme l'énergie reçue par unité de masse de la cible, en joules par kilogramme, en grays ($1 \text{ Gy} = 1 \text{ J.kg}^{-1}$) dans le système SI.
- On définit également un **débit de dose**, c'est-à-dire l'énergie absorbée par kilogramme et par unité de temps, mesurée en grays par seconde (Gy/s).
- La **dose équivalente**, notée H , pour laquelle chaque rayonnement doit être pondéré pour tenir compte de sa nocivité respective. L'unité SI est le sievert (Sv).

Les rayonnements ionisants provoquent tous, au sein de la matière, des ionisations et des excitations, plus ou moins nocives pour la matière et la vie. Les particules α sont arrêtées par une feuille de papier. Les particules β sont arrêtées par une feuille d'aluminium. Le rayonnement γ est atténué (mais jamais arrêté) par de grandes épaisseurs de matériaux denses (écran en plomb, par exemple).



L'uranium

L'uranium est le 48^e élément naturel le plus abondant dans la croûte terrestre. Son abondance est supérieure à celle de l'argent, comparable à celle du molybdène ou de l'arsenic, mais quatre fois inférieure à celle du thorium, autre élément radioactif. Il se trouve partout à l'état de traces, y compris dans l'eau de mer.

C'est un métal lourd radioactif (émetteur α) de demi-vie très longue ($\simeq 4,5$ milliards d'années pour l'uranium 238 et $\simeq 700$ millions pour l'uranium 235). Sa radioactivité, additionnée à celle de ses descendants dans sa chaîne de désintégration, développe une puissance de $0,082 \text{ W}$ par tonne d'uranium, ce qui en fait, avec le thorium 232

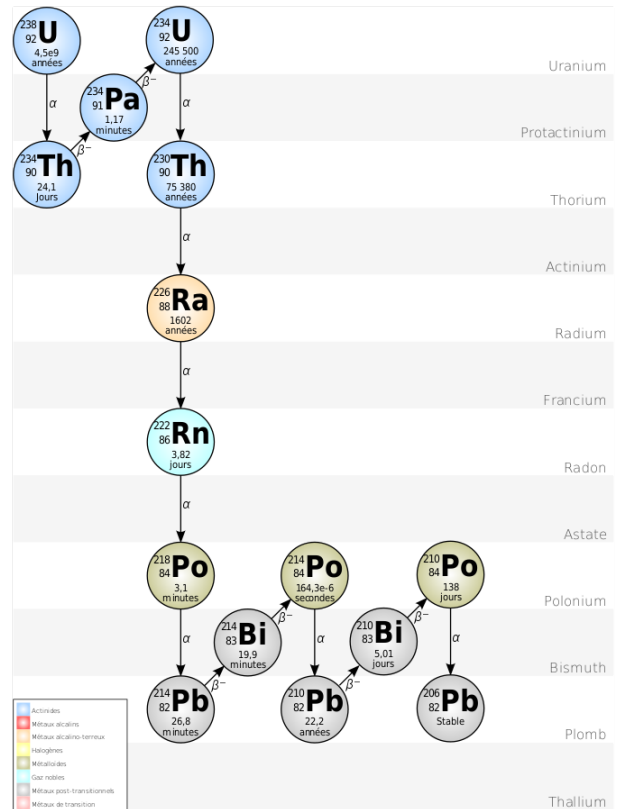
(quatre fois plus abondant, mais trois fois moins radioactif) et le potassium 40, la principale source de chaleur qui tend à maintenir les hautes températures du manteau terrestre, en ralentissant son refroidissement par diffusion.

On donne les masses atomiques des produits de la radioactivité α de l'uranium : $m(^{238}\text{U}) = 238,0507826 \text{ u}$, $m(^{234}\text{Th}) = 234,0436 \text{ u}$ et $m(\alpha) = 4,0015 \text{ u}$. On rappelle que $1 \text{ u} = 1,66054 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$.

- Déterminer le nombre N d'atomes d'uranium 238 présent dans un 1 g d'uranium 238 pur.
- Exprimer la demi-vie de l'uranium 238 en secondes puis en déduire l'activité A , le nombre de désintégrations par seconde, dans 1 g d'uranium pur.
- L'affirmation : "Un gramme d'uranium 238 présente une radioactivité de 12434 Bq" est-elle correcte ?

L'uranium naturel, quand il est chimiquement purifié (essentiellement composé de ^{235}U et de ^{238}U en équilibre avec leurs descendants), a une activité spécifique de l'ordre de 25 Bq/mg.

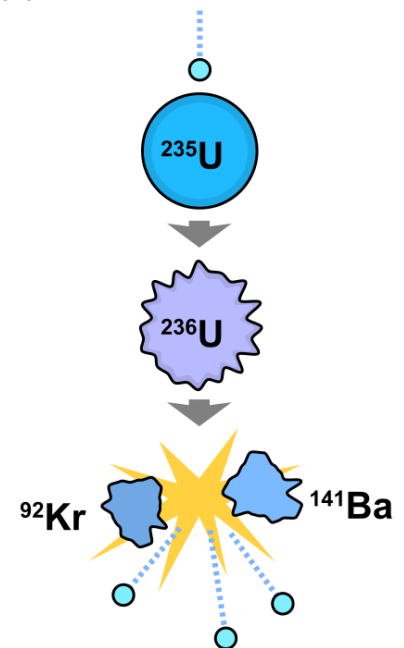
- Déterminer la variation de masse Δm correspondant à la radioactivité α de l'uranium 238.
- En utilisant la célèbre formule d'EINSTEIN $E = mc^2$, en déduire l'énergie E_α libérée sous forme de chaleur par une réaction. On exprimera cette valeur en joules puis en méga électron-volts ($1 \text{ MeV} = 1,602 \cdot 10^{-13} \text{ J}$).
- En considérant l'activité, déterminer la puissance \mathcal{P} dissipée, en watts, par 1 g d'uranium pur. Ce résultat est-il cohérent avec la valeur proposée, par tonne, dans le préambule ?



Fission

La fission nucléaire est le phénomène par lequel un noyau atomique lourd (c'est-à-dire formé d'un grand nombre de nucléons comme l'uranium, le plutonium, etc.) est scindé en deux ou plus nucléides plus légers. Cette réaction nucléaire s'accompagne de l'émission de neutrons (en général deux ou trois) et d'un dégagement d'énergie très important ($\simeq 200 \text{ MeV}$ par atome fissionné), beaucoup plus que celui des réactions chimiques ou de la radioactivité naturelle. L'émission de neutrons peut, par la suite, entraîner une réaction en chaîne, phénomène mis en œuvre dans les centrales nucléaires pour la production d'électricité et dans les bombes atomiques.

L'isotope ^{235}U est le seul isotope fissile naturel. Sa fission libère une énergie voisine de 200 MeV par atome fissionné, dont 10 MeV d'énergie non récupérable, communiquée aux neutrinos produits lors de la fission. Le plutonium 239, descendant de la chaîne de désintégration de l'uranium 238 en présence de neutrons, est également un noyau fissile intervenant dans les centrales nucléaires. On dit que l'uranium 238 est un noyau fertile car il peut produire des noyaux fissiles.



- Écrire la réaction de fission correspondant à l'absorption d'un neutron par l'uranium 235 et formant du krypton 92 et baryum 141. Combien de neutrons sont formés pour la réaction en chaîne ?
- Déterminer l'énergie E_{fission} libérée par perte de masse lors de la réaction de fission. On donne $m(^{235}\text{U}) = 235,0439299 \text{ u}$, $m(^{92}\text{Kr}) = 91,926156 \text{ u}$, $m(^{141}\text{Ba}) = 140,914411 \text{ u}$ et $m(^1_0\text{n}) = 1,0086649 \text{ u}$.
- En déduire l'énergie dissipée par la fission d'un gramme d'uranium 235.
- Sachant que la combustion d'un kilogramme de pétrole libère une énergie $E_{\text{pétrole}} = 45 \text{ MJ}$ sous forme de chaleur, déterminer la masse m de pétrole qu'il faudrait brûler pour produire autant d'énergie que la fission d'un gramme d'uranium 235. Commenter.

La part principale de l'énergie libérée lors de la fission est constituée par l'énergie cinétique des deux atomes créés. Elle s'accompagne de l'émission d'un ou de plusieurs neutrons rapides qui ont une énergie cinétique élevée, de

l'ordre de 2 MeV. Ces derniers peuvent réagir avec d'autres noyaux qu'ils rencontrent et sont soit diffusés, c'est-à-dire renvoyés dans une direction différente, soit absorbés.

La probabilité qu'une rencontre entre un neutron lent (basse énergie) et un atome fissile donne lieu à la fission de l'atome est environ 200 fois plus élevée que dans le cas où le neutron est rapide, possédant une énergie élevée voisine de son énergie initiale. Tant que la probabilité d'absorption reste faible, les neutrons se conservent pratiquement en nombre, mais leur énergie décroît peu à peu à chaque diffusion.

On peut montrer que les noyaux sont d'autant plus efficaces pour ralentir les neutrons que leur masse est faible, proche de celle du neutron. C'est en particulier le cas de l'eau ordinaire (qui contient de l'hydrogène, le meilleur des modérateurs/ralentisseurs de neutrons), l'eau lourde (eau dans laquelle n'a été conservé, grâce à une séparation isotopique, que l'isotope lourd de l'hydrogène, le deutérium) ou encore le graphite (carbone pur). Avec un modérateur efficace, les neutrons se ralentissent jusqu'à ce que leur énergie cinétique soit à peu près égale à l'énergie d'agitation thermique du milieu diffusant ($\simeq 20$ meV à la température de 300 K).

