

4 Stabilité et instabilité nucléaires

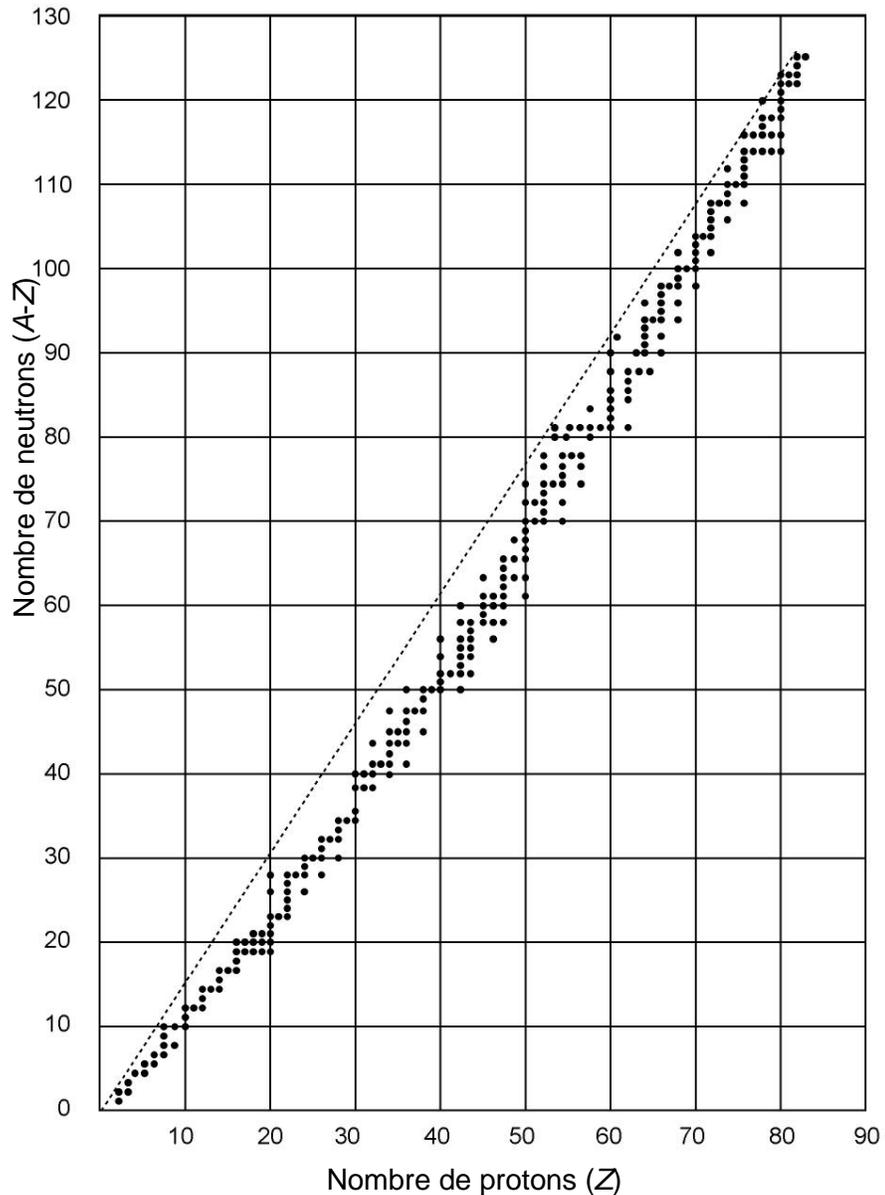


Figure 4.1

Évolution de $N (A-Z)$ en fonction de Z

Chaque point noir de la figure 4.1 représente un noyau stable. La présence de plus d'un point apparaît pour un même numéro atomique indique l'existence de plus d'un isotope stable. Ainsi, les deux points visibles pour le numéro atomique 1 représentent l'hydrogène, ^1H , et le deutérium, ^2H . Les trois points de numéro atomique 8 représentent les isotopes ^{16}O , ^{17}O et ^{18}O .

Si l'on observe la forme générale de la distribution, on constate que dans les noyaux légers le nombre de neutrons est presque le même que le nombre de protons. Il y a des exceptions, la plus notable étant le ^1H qui n'a qu'un seul proton. Le rapport neutrons/protons (N/Z , on pourrait aussi écrire $n:p$) dans les noyaux intermédiaires est plus élevé : environ 1,3. (Pour ^{103}Rh , $N/Z = 1,29$.) Ce rapport s'élève jusqu'à 1,5 pour les atomes lourds.

Par exemple, pour l'or, ^{197}Au , $N/Z = \frac{118}{79} = 1,5$.

En général, on peut dire qu'un noyau est instable si le rapport neutron-proton n'est pas dans cette fourchette. En effet, deux protons ne peuvent sans neutron former un noyau. Par exemple, le noyau de l'hélium 3 contient deux protons et un neutron. Cet unique neutron réussit à « diluer » la force électrique qui tend à éloigner les protons. Les neutrons permettent aux protons de rester agglutinés. À cause de la présence de neutrons, la force attractive à courte portée entre nucléons voisins excède la force électrique répulsive à longue portée entre les protons. Dans l'hélium 4, les deux neutrons et les deux protons forment un noyau dont les nucléons sont très liés.

L'ajout de neutrons n'augmente pas toujours la stabilité. On n'a jamais découvert de ^5He et la période du ^6He (élément qui a été observé) est inférieure à une seconde. En général, la présence de neutrons excédentaires augmente la stabilité, mais un nombre trop élevé cause l'instabilité. Dans l'état actuel des connaissances, on ne peut être plus précis.

Considérons, par exemple, le cuivre 64 ($Z = 29$). On ne le trouvera pas sur le graphique puisqu'il est instable. Or, il serait placé entre deux noyaux stables : le cuivre 63 et le cuivre 65. S'il est nécessaire pour la stabilité que le rapport N/Z soit dans la bonne gamme, cela ne garantit pas que le noyau soit stable. Notre seule certitude est que tout noyau qui n'est pas dans la bande de stabilité est instable. Le rapport proton-neutron d'un noyau stable doit être favorable. La plupart des noyaux — mais pas tous — dont le rapport N/Z tombe dans la bande de stabilité sont stables.

Nous avons déjà annoncé que tous les noyaux très lourds ($Z > 83$) étaient instables. Bien qu'ils puissent avoir un rapport N/Z favorable (et être stable du point de vue de la désintégration β), ils se désintégreront par l'émission d'une particule α , à cause de l'intensité de la force électrique répulsive. L'ajout de plus de neutrons dilue la

force électrique, ce qui peut prévenir la désintégration α , au prix de la désintégration β , causée par un rapport N/Z trop élevé.

4.1 Les noyaux riches en neutrons

Dans le cas des noyaux légers, il est assez facile d'obtenir un rapport N/Z défavorable en ajoutant un neutron à un noyau stable (par absorption de neutrons). En ajoutant, par exemple, un neutron à un noyau de ^{18}O , on obtient un atome de ^{19}O instable. On appelle *activation*, la transformation d'un atome stable en atome instable. L'absorption d'un neutron ne provoque pas toujours l'activation. Par exemple, l'ajout d'un neutron à ^1H , produit ^2H , un noyau stable.

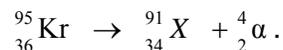
La fission d'un noyau lourd en deux noyaux de masse intermédiaire est une autre méthode permettant d'obtenir des noyaux riches en neutrons. Il est presque assuré que ces produits de fission seront instables. (Toutefois, un produit de fission stable pourrait naître d'une fission inégale.) Considérons la fission d'un noyau de ^{235}U dont le rapport N/Z est environ 1,55. Les noyaux issus de sa fission auront un rapport N/Z proche de 1,55, ce qui est trop élevé pour un noyau de masse intermédiaire. La ligne tirée de la figure 4.1 indique la position de tous les noyaux dont le rapport N/Z est proche de 1,5. Seuls les noyaux stables les plus lourds tombent sur cette ligne.

Par exemple, supposons que les deux produits de fission sont $^{95}_{36}\text{Kr}$ et

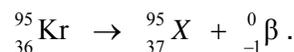
$^{139}_{56}\text{Ba}$. Si nous plaçons ces deux points sur le graphique, nous pouvons

constater qu'ils sont éloignés de la zone de stabilité. Ils se désintégreront en émettant une particule. Cette particule sera-t-elle un alpha ou un bêta? On peut essayer de le déduire. Supposons que le

$^{95}_{36}\text{Kr}$ soit un émetteur d'alpha, ainsi :



Où, dans le graphique, ce nouveau noyau tombera-t-il? Sera-t-il plus stable? moins stable? aussi stable? En fait, il sera aussi instable et, en conséquence, la désintégration par émission d'un alpha est improbable. Nous pouvons faire une deuxième tentative et essayer une désintégration bêta (ce qui souvent est un meilleur choix) :

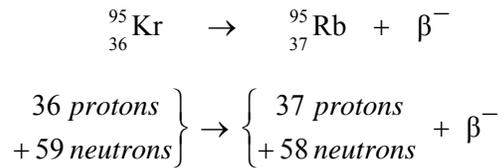


Où ce produit de filiation tombe-t-il sur le graphique? Il est mieux placé que le précédent. Nous pouvons donc présumer que l'émission

d'un bêta est plus probable. Les expériences confirment ce résultat. Puisque la plupart des produits de fission possèdent trop de neutrons, ils se désintègrent par émission d'un bêta. Certains produits de fission instables éjectent immédiatement un neutron à la suite d'un électron. (On les appelle neutrons retardés.) Aucun produit de fission n'émet de particules alpha.

4.2 Transformation des nucléons

Lors de l'éjection d'un bêta, le nombre de nucléons reste constant, bien qu'un nucléide se soit transformé. À l'intérieur du noyau, un neutron s'est transformé en proton.



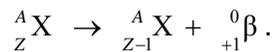
Le phénomène inverse se produit pour certains noyaux. Un proton peut se transformer en neutron en émettant un électron positif (un positron) ou en capturant un électron sur une orbite comme nous le décrivons plus loin.

4.3 Les noyaux pauvres en neutrons

Il existe plusieurs noyaux pauvres en neutrons (ils se trouvent sous la courbe de la figure 4.1), mais il est peu probable qu'on les retrouve dans les réacteurs CANDU. Quels types de particules, émettront-ils? On peut procéder par essai et erreur comme au paragraphe 4.1. Seront-ils des émetteurs de particules alpha? bêta? Il est facile de voir que ces deux choix ne sont pas satisfaisants.

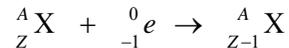
Ces noyaux pauvres en neutrons se désintégreront par émission d'un positron, la capture d'un électron ou les deux. Rappelons qu'un positron est un électron chargé positivement : hormis sa charge positive, il est identique à un électron. Au dernier chapitre, nous avons vu qu'un électron et un positron pouvaient s'annihiler mutuellement en émettant deux rayons γ .

Si dans l'équation de désintégration bêta, on remplace l'électron par un positron, on obtient :



Si, sur la figure 4.1, on localise ${}^A_{z-1}X$, on constate que ce noyau fils est plus proche de la région de stabilité que son noyau père, A_ZX .

Lors d'une capture électronique (aussi appelée capture K, parce que l'électron de la couche K est happé par le noyau), nous pouvons écrire :



Le noyau produit est le même que celui issu de l'émission d'un positron. Dans chaque cas, un proton du noyau a été transformé en neutron.

4.4 Noyaux lourds

Les noyaux dont le numéro atomique est supérieur à 83 peuvent se désintégrer de plusieurs façons. La plupart des noyaux lourds trouvés dans la nature émettent des particules α , certains émettent des particules β et seuls quelques-uns subissent une fission spontanée. Certains noyaux lourds artificiels émettent des positrons (ce qui est rare) ou se transforment par capture électronique (ce qui est plus probable).

4.5 Notions principales

- Le rapport N/Z , ou $n:p$, d'un noyau permet de prédire sa stabilité relativement à la désintégration β .
- Le rapport N/Z des noyaux légers avoisine 1/1, par exemple pour ${}^{16}\text{O}$, ${}^{12}\text{C}$ et ${}^5\text{B}$. Ce rapport augmente jusqu'à 1,5 pour les noyaux les plus lourds, par ex. : ${}^{235}\text{U}$ et ${}^{197}\text{Au}$.
- Les produits de fission ont habituellement un rapport N/Z trop élevé pour leur masse.
- Les noyaux soumis à un bombardement de neutrons, les absorbent et deviennent des nucléides riches en neutrons.
- Parfois l'émission d'un neutron retardé suit une désintégration β .

- Les noyaux pauvres en neutrons se désintègrent par l'émission d'un positron (un antiélectron) ou par capture électronique.
- Il existe plusieurs mécanismes de désintégration pour les noyaux lourds : α , β et fission spontanée.

4.6 Exercices

1. Pourquoi tous les noyaux, sauf le ^1H , comptent-ils des neutrons?
2. Prédisez le type de particules émis par les noyaux suivants en utilisant le graphique de la figure 4.1. Vérifiez vos réponses à l'aide du tableau des nucléides ou d'une table des isotopes.
 ^{90}Sr , ^{87}Br , ^{135}Xe , ^{135}I , ^{131}I , ^{149}Sm , ^{60}Co , ^{10}B , ^{16}N , ^{238}U , ^{239}Pu ,
 ^{64}Cu , ^{56}Mn , ^3H , ^{137}Cs .
3. Pour un noyau, quelle est la conséquence d'un rapport neutron/proton trop faible ou trop élevé?
4. Soit le noyau lourd naturel ^{238}U , écrivez les stades de la désintégration jusqu'à la production d'un noyau stable. Utilisez le graphique des nucléides. Vous pouvez répéter cet exercice en déduisant la chaîne de désintégration de ^{235}U .