# Noyaux radioactifs, rayonnements α, β, γ. Réactions nucléaires : réaction de fission, de fusion.

La radioactivité, le nucléaire sont des termes souvent mentionnés dans la vie courante. À quoi cela correspond-t-il au juste? Le but de cette leçon est de donner les principales caractéristiques du phénomène de radioactivité et le principe de son utilisation pour produire de l'énergie.

## I. Propriétés générales du noyau.

### A) Rappels sur la structure atomique. Notion d'isotope.

Probablement inutile. À caser en introduction...

Nous avons vu dans les cours précédents, voire l'année précédente, que la matière était constituée à partir d'un nombre fini d'éléments chimiques, la plus petite partie caractéristique de cet élément étant l'atome.

Chacun de ces atomes est constitué d'un nuage d'électrons gravitant autour d'un noyau composé de protons et de neutrons, le nombre de protons étant égal au nombre d'électrons pour conserver la neutralité. Un élément est caractérisé par le nombre d'électrons ou, ce qui revient au même, de protons qui constituent son atome ; ce nombre est noté $Z$.

On voit donc que le nombre de neutrons n'est *a priori* soumis à aucune contrainte. Deux atomes différents du même élément pourraient donc contenir un nombre différent de neutrons. C'est effectivement ce qui se produit. On appelle ***isotopes*** deux atomes de même $Z$ et dont le nombre de neutrons diffère (du grec *isos* « même » et *topos* « lieu », puisqu'ils occupent la même case dans la classification périodique).

La majorité des éléments (sauf le fluor) possèdent plusieurs isotopes naturels ; ils sont caractérisés par le nombre total de nucléons, noté A, en plus de $Z$.

On appelle nucléide tout noyau d'isotope ; un nucléide est noté ${}^{A}_{Z}X$, où $Z$ et A ont été définis ci-dessus et où X est le symbole chimique de l'élément $Z$.

### B) Énergie de cohésion du noyau.

Comme on l'a vu, le noyau est composé d'un certain nombre de protons. Or, ces protons sont tous chargés positivement ; selon les lois de l'électrostatique, ils se repoussent donc ; pourtant, le noyau est une entité stable.

Ce fait s'explique par l'existence d'un autre type de forces, appelé ***interaction forte***, de très courte portée mais d'intensité très supérieure à la force de répulsion électrostatique et qui stabilise cette association de protons et de neutrons. C'est cette force qui est responsable de l'existence des noyaux atomiques.

On définit l'énergie de liaison d'un nucléide comme l'énergie qu'il faut fournir pour transformer le noyau au repos en l'ensemble de ses constituants à l'infini les uns des autres, au repos. Elle est toujours positive. On définit aussi l'énergie moyenne de liaison par nucléon, comme le rapport entre la grandeur ci-avant et le nombre A de nucléons, qui permet de comparer les noyaux entre eux.

On peut montrer que l'énergie « libérée » en associant les nucléons pour former les noyaux varie avec le nombre de nucléons considéré, donc d'un nucléide à l'autre. En moyenne, elle est de l'ordre de 8 MeV par nucléon (1 eV : énergie acquise par un électron initialement au repos accéléré par une tension de 1 V, soit $1\ \text{eV} = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ J). À titre de comparaison, l'énergie de répulsion électrostatique entre deux protons du noyau est de l'ordre de 1 MeV (en prenant une distance de 1 fm = $10^{-15}$ m).

### C) Lien entre énergie et masse : relation d'Einstein.

On définit l'unité de masse atomique comme étant égale à un douzième de la masse du

nucléide $^{12}_{6}C$. On conçoit donc que la masse d'un nucléon soit de l'ordre de l'unité atomique (u. a.).

On peut montrer que, quel que soit le nucléide considéré, sa masse est inférieure à la masse des particules qui le constituent prises isolément. Ainsi, $m_{H} = 6{,}64 \cdot 10^{-27}$ kg ; $m_{p} = 1{,}672\,6 \cdot 10^{-27}$ kg et $m_{n} = 1{,}674\,9 \cdot 10^{-27}$ kg. On vérifie aisément l'assertion précédente.

Albert EINSTEIN a postulé que cette différence de masse correspondait à la différence d'énergie entre les deux systèmes considérés ; il y donc équivalence entre la masse et l'énergie. Cette équivalence est donnée par la célèbre relation $E = mc^2$.

## II) Les réactions de désintégration radioactive.

L'énergie de cohésion par nucléon varie d'un noyau à l'autre ; on peut montrer qu'elle est maximale pour les nucléides du centre de la classification périodique (Fe, Pb,...). Il existe donc des nucléides plus stables que d'autre ; la radioactivité est la transformation spontanée de nucléides instables.

### A) Caractères généraux.

Ce phénomène, découvert par BECQUEREL à la fin du siècle dernier (1896), est inévitable, totalement aléatoire (il n'y a aucun moyen de savoir au bout de combien de temps un noyau atomique va se désintégrer) et complètement indépendant de l'environnement atomique. Du fait de ce caractère aléatoire, on est obligé de faire appel à un modèle statistique, sur un échantillon comportant un nombre important d'atome. Il a fallu attendre la découverte du noyau (RUTHERFORD, 1912) pour l'expliquer de façon satisfaisante.

On peut caractériser une désintégration radioactive par deux informations : le type de rayonnement émis lors de la désintégration et la demi-vie du nucléide envisagé, qui est le temps nécessaire pour que la radioactivité d'un échantillon du nucléide considéré diminue de moitié. On constate expérimentalement que cette durée est indépendante de la masse d'échantillon étudiée ; elle ne dépend que du nucléide considéré. Elle peut être très variable : de plusieurs milliards d'années (4,5 pour $^{238}U$) à quelques fractions de seconde (0,3 µs pour $^{212}Po$). On définit de plus l'activité d'un échantillon radioactif comme le nombre de désintégrations par seconde dans cet échantillon, mesuré en becquerel (Bq).

Toutes les réactions radioactives respectent trois règles fondamentales : la conservation de la charge, la conservation de l'énergie et la conservation du nombre de nucléons.

La majorité de ces réactions nucléaires peuvent se répartir en trois familles de réactions[1] suivant la nature des particules émises au cours de la désintégration :

la radioactivité $\alpha$ ;

la radioactivité $\beta^+$ ;

la radioactivité $\beta^-$.

Dans tous les cas, la réaction s'accompagne de l'émission de photons de grande énergie appelés photons $\gamma$, provenant des désexcitations du noyau fils. Ce rayonnement électromagnétique est très énergétique et très pénétrant : il faut quelques centimètres de plomb ou plusieurs mètres de béton pour l'absorber ; il est responsable de la majorité des effets nocifs de la radioactivité. Étant de même nature que la lumière, il se propage à la même vitesse.

### B) Les différents types de radioactivité.

#### 1) Radioactivité $\alpha$.

On appelle ainsi l'ensemble des désintégrations à l'origine de l'émission de particules $\alpha$, c'est-à-dire de noyaux d'hélium. On l'observe pour les nucléides lourds, possédant un excès de protons et de neutrons. Le bilan général d'une telle réaction s'écrit, en accord avec les règles énoncées précédemment :

$$^{A}_{Z}X \rightarrow ^{A-4}_{Z-2}Y + ^{4}_{2}He + \gamma.$$

Le noyau fils, produit de la désintégration du noyau père, le précède donc de deux cases

dans la classification périodique. Se désintègrent ainsi, par exemple :

$^{226}_{88}Ra \rightarrow ^{222}_{86}Rn + ^{4}_{2}He$ ;

$^{238}_{92}U \rightarrow ^{234}_{90}Th + ^{4}_{2}He$.

Le rayonnement $\alpha$ est très dangereux, car fortement ionisant ; heureusement, il est très peu pénétrant : une feuille de papier suffit pour s'en protéger.

2) Radioactivité $\beta^-$.

Dans cette catégorie, les nucléides se désintègrent en émettant des électrons (particules $\beta$, chargées négativement), résultant de la décomposition d'un neutron en proton. Afin de respecter la conservation de l'énergie, on est obligé de tenir compte de l'apparition d'une autre particule, appelée antineutrino électronique et notée $\bar{\nu}$ ; les antineutrinos sont des particules de masse extrêmement faible (voire nulle), non-chargées, qui interagissent peu avec la matière. Ce type de radioactivité est observé pour les noyaux possédant un excès de neutrons[2]. Le bilan général en est, selon les règles évoquées plus haut :

$^{A}_{Z}X \rightarrow ^{A}_{Z+1}Y + ^{0}_{-1}e + ^{0}_{0}\bar{\nu} + \gamma$.

Le noyau fils suit donc le noyau père d'une case dans la classification périodique. Le $^{14}_{6}C$ se désintègre de cette façon, ainsi que le $^{32}_{15}P$.

Le rayonnement $\beta$ ainsi formé est moyennement énergétique, ionisant. Il est relativement pénétrant : il faut une feuille d'aluminium pour s'en protéger.

3) Radioactivité « artificielle » $\beta^+$.

Les nucléides de cette famille, trop riches en protons, se désintègrent en positrons (antiparticules des électrons, de même propriété physique, la charge (opposée) exceptée). Là encore, la conservation de l'énergie impose l'apparition d'une autre particule, le neutrino électronique noté $\nu$. Le bilan général est donc :

$^{A}_{Z}X \rightarrow ^{A}_{Z-1}Y + ^{0}_{+1}e + \nu + \gamma$.

Le noyau fils précède donc le noyau père d'une case dans la classification périodique. Cette radioactivité est dite artificielle, car elle a été observée pour la première fois sur un nucléide artificiel : $^{30}_{15}P$ (inventé par Frédéric et Irène Joliot-Curie en 1934) ; toutefois, on connaît maintenant des nucléides naturels qui se désintègrent suivant ce mode, mais ce n'est observé que dans les étoiles[3].

C) Quelques applications de la radioactivité.

1) Datations.

Comme la loi de décroissance d'une population radioactive est immuable, parfaitement connue et totalement indépendante des conditions extérieures, il est naturel de vouloir s'en servir comme horloge, en particulier pour de longues échelles de temps (archéologie, géologie, astronomie,...). Cela suppose bien évidemment de connaître la teneur en élément étudié au moment de la fermeture du système.

Ainsi, on peut utiliser la détermination de la teneur en $^{14}C$ d'un fossile pour en connaître la date, sachant que la teneur en $^{14}C$ d'un être vivant est constante tant qu'il vit et directement liée à la teneur en $^{14}C$ de l'air. On suppose pour cela qu'au moment de sa mort, le système est fermé (plus d'ajout de carbone, quel qu'il soit). Dans ce cas, après le temps T (où T est la demi-vie du $^{14}C$), la quantité de $^{14}C$ contenue dans l'échantillon a diminué de moitié ; des trois-quarts après 2T,... Bien évidemment, cette méthode n'est applicable que pour des échantillons assez jeunes, dans lesquels restent de faibles quantités de $^{14}C$, soit pour des temps de l'ordre de quelques T. Comme T = 5 730 ans, et étant donnée la faible abondance du $^{14}C$, on peut remonter jusqu'à environ 50 à 500 siècles suivant la nature de l'échantillon et la précision de mesure que l'on peut atteindre
à titre de comparaison, la civilisation sumérienne date d'environ 3 000 avant Jésus-Christ (soit 50 siècles environ) et est une des premières civilisations connues... Cette méthode est donc

surtout utilisable en archéologie et paléontologie récente.

Ce principe est utilisé avec plusieurs couples, suivant la période à laquelle on veut remonter : couples $^{87}Rb/^{87}Sr$, $^{147}Sm/^{143}Nd$, $^{40}K/^{40}Ar$ (par réaction de capture électronique : inverse d'une désintégration $\beta^-$ il se désintègre aussi en $^{40}Ca$ : $\beta^+$)...

### 2) Utilisation des rayonnements émis.

Elle peut se faire dans plusieurs buts : thérapeutique (radiothérapie), prophylactique (stérilisation des aliments), diagnostique (scintigraphies),...

On peut quantifier l'importance de la dose reçue selon plusieurs systèmes. La façon la plus simple est de quantifier l'énergie d'origine radioactive reçue par unité de masse (encore appelée « dose absorbée ») ; l'unité en est le gray ($1\ Gy = 1\ J \cdot kg^{-1}$). Cependant, les effets sur un organisme étant très variable suivant la nature du rayonnement reçu, on préfère définir des équivalents de dose biologique en multipliant cette valeur par une constante d'autant plus grande que le rayonnement a d'effet biologique. L'unité ainsi définie est le sievert (Sv).

## III. La radioactivité comme source d'énergie.

D'après les exemples précédents, la désintégration radioactive s'accompagne d'émission d'énergie, cette énergie provenant de l'interaction forte ; toutefois, elle est inexploitable directement car il est impossible de contrôler le phénomène. Peut-on trouver d'autres réactions faisant intervenir l'instabilité des noyaux et permettant de fournir de l'énergie ?

L'étude de la courbe d'Aston, donnant l'énergie moyenne par nucléon en fonction du nucléide considéré, montre que les noyaux très légers et très lourds sont moins stables que les noyaux des éléments intermédiaires. Il est donc pensable que les noyaux « extrêmes » peuvent réagir de façon à donner les noyaux centraux, en dégageant de l'énergie.

### A) La fission nucléaire.

Elle correspond à la réalisation de cette hypothèse pour les noyaux lourds. En effet, certains de ces noyaux sont aptes à se scinder en deux nucléides plus stables et quelques neutrons. De tels noyaux sont dits fissiles ; c'est ainsi le cas de $^{238}_{92}U$ (pour donner $^{136}_{52}Te + ^{99}_{40}Zr$ et trois neutrons) utilisé en datation géologique : dénombrement des traces dans le réseau cristallin.

En pratique, on préfère provoquer la fission en envoyant des neutrons [4] d'énergie adéquate sur un noyau fissile bien choisi, comme l'uranium 235. Les produits de réaction sont divers ; il se forme de toute façon suffisamment de neutrons pour entretenir la réaction, voire l'emballer (bombe A). Parmi les nombreuses réactions possibles, on peut citer : $^{235}_{92}U + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{94}_{38}Sr + ^{140}_{54}Xe + 2\,^{1}_{0}n$ (+ environ 200 MeV). Seuls quelques noyaux sont aptes à donner ces réactions nucléaires : $^{235}_{92}U$ et $^{239}_{94}Pu$ principalement (mais pas $^{238}U$, isotope le plus abondant de l'uranium, ce qui oblige à l'enrichir en $^{235}U$ par traitement).

### B) La fusion nucléaire.

C'est la mise en pratique de l'hypothèse pour l'autre moitié de la courbe : on fusionne deux petits noyaux pour en former de plus stables. Ce processus a lieu naturellement au cœur des étoiles ; il a pu être réalisé de façon incontrôlée (bombes H) et les recherches sont actives pour en faire une source d'énergie utilisable sur Terre.

Les recherches portent principalement sur la réaction suivante :

$^{2}_{1}H + ^{3}_{1}H \rightarrow ^{4}_{2}He + ^{1}_{0}n$ (+ 17 MeV).

La grande difficulté est de réussir à confiner suffisamment les noyaux pour vaincre les forces de répulsions qui s'exercent entre eux ; ceci ne peut être réalisé qu'à de fortes températures et pressions. Ces conditions sont réalisées en laboratoire par utilisation de laser ou confinement magnétique (projet du Tokamak), mais pendant des temps encore trop courts pour amorcer la réaction (2 min, contre les 15 min nécessaires théoriquement).

# Notes

1. Il existe d'autres types de désintégration, non envisagés ici, ce qui fait que l'on classe habituellement les désintégrations radioactives en deux grandes familles : désintégrations anisobariques, dans lesquelles A varie (émission $\alpha$, fission spontanée, émission de proton ou de neutron) et désintégrations isobariques, dans lesquelles A ne varie pas (émissions $\beta^+$ et $\beta^-$, capture électronique).

2. Il n'y a pas apparemment d'explication simple de l'instabilité des noyaux trop riches en neutrons. La raison la plus simple est le fait que, dans le noyau, on peut définir des niveaux d'énergie tout comme pour les électrons, niveaux distincts pour les neutrons et les protons et chacun pouvant être occupé par deux particules au plus (ce sont des fermions). S'il y a beaucoup plus de neutrons que de protons, on va remplir des niveaux d'énergie élevée pour les neutrons, plus élevée que le premier niveau vide de protons. Il va donc être stabilisant d'émettre un neutron ou, plus fréquemment, de transformer un neutron en proton.

3. Ces désintégrations sont soit supposées par calculs théoriques, soit observées par leurs produits : rayonnement $\gamma$, très intense du fait de l'annihilation du positron avec un électron ; rayonnement de freinage des particules chargées émises (les trajectoires sont courbées, dans des sens différents suivant la charge, ce qui conduit à des rayons X de propriétés différentes). Il me semble aussi que l'on a mis en évidence dans certaines météorites des isotopes dont on explique la formation seulement comme cela (?).

4. Pas de renseignement sûr sur l'origine du premier neutron, mais plusieurs hypothèses :
— intervention des neutrons solaires ;
— fission spontanée de $^{238}U$. Cela correspond à l'émission d'une dizaine de neutrons par seconde et par kg d'uranium, ce qui me semble peu pour amorcer sachant que $^{235}U$ représente 3% de l'échantillon, que la section efficace est faible et que $^{238}U$ absorbe bien les neutrons (pour donner finalement $^{239}Pu$). Cette explication, associée à la précédente, est toutefois la seule envisageable pour expliquer l'existence de réacteurs naturels fossiles (au Congo) ;
— utilisation d'une source de neutrons, par exemple un atome se désintégrant par émission de neutrons (un des isotopes de l'inde possède cette propriété).

# Bibliographie


* Tous les livres de première S.
* Mc Quarrie ; Rock. *Chimie générale*, 3e édition. De Boeck Université, 1992, chap. 24 p. 850.
  La leçon est quasiment faite dedans!
* Vidal, Philippe. *Géochimie*. Dunod collection géosciences, 1994, p. 49 92.
  Pour des exemples d'application en datation, plus originaux que la datation au carbone 14.