

CHAPITRE 11 : LES RÉACTIONS NUCLÉAIRES

Les deux usages les plus connus des réactions nucléaires sont ceux de la production d'énergie (centrales nucléaires) et de la dissuasion nucléaire (bombes atomiques). On oublie bien souvent que les réactions nucléaires sont également utilisées dans le domaine de l'imagerie médicale et du soin.

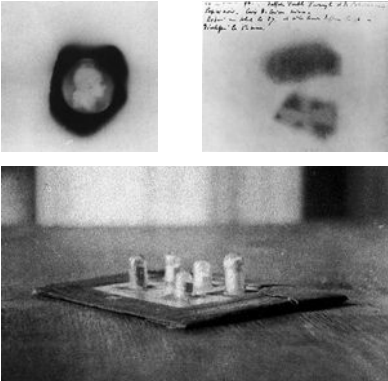
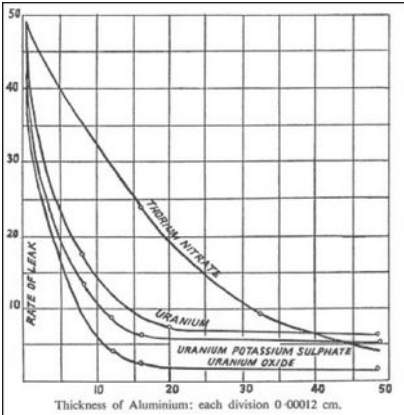
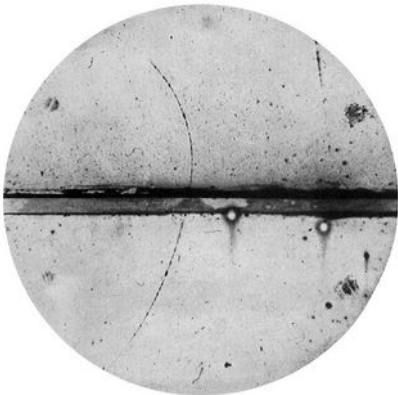
Quels sont les noyaux radioactifs utilisés en médecine ? Comment se désintègrent-ils ? Sur quelle échelle de temps ? En libérant quelle quantité d'énergie ?

Une scintigraphie du bassin →



1 Un peu d'histoire des sciences

Comme de nombreux domaines des sciences, la découverte et la compréhension de la radioactivité se sont étalées sur des décennies et ont été l'œuvre de plusieurs scientifiques de nationalités différentes communiquant entre eux à travers des lettres, des articles scientifiques, des congrès ...

		
Photos de 1896 de Becquerel mettant en évidence le phénomène de radioactivité	Reproduction du graphique original de Rutherford signant la découverte des rayonnements α et β en 1899	Pierre et Marie dans leur laboratoire de l'actuel ESPCI à Paris vers 1903
		
Photographie de Carl David Anderson en 1932 de la 1 ^{ère} trace laissée par un positron dans une chambre à brouillard	7 ^e congrès Solvay de physique de 1933 sur la structure et les propriétés des noyaux atomiques. On peut apercevoir Frédéric et Irène Joliot-Curie, Marie Curie, Ernest Rutherford, Enrico Fermi, James Chadwick, Wolfgang Pauli, Paul Dirac, ...	

4 décennies de radioactivité en 1 frise

Le physicien français Henri Becquerel constate que les sels d'uranium émettent un rayonnement invisible qu'il nomme « rayons uraniques ». Il vient de découvrir la radioactivité.

1896

La physicienne et chimiste polonaise Marie Skłodowska associée à son futur mari le physicien français Pierre Curie établissent que la radioactivité est une propriété exclusivement atomique.

1897

Le physicien et chimiste néo-zélandais Ernest Rutherford découvre que les rayons uraniques sont en réalité composés de deux type de rayonnements qu'il nomme alpha et bêta. Il montre également que la radioactivité des éléments s'accompagne de leur désintégration.

1899

Le physicien britannique Joseph John Thomson prouve expérimentalement que ce qui est appelé « rayons cathodiques » depuis les années 1850 est en réalité un faisceau de particules chargées négativement : des électrons.

1900

Les travaux du chimiste britannique Frederick Soddy, du physicien Allemand Hans Geiger et d'Ernest Rutherford permettent de prouver que les particules alpha sont en réalité des noyaux d'hélium 4.

1903

Le physicien français Paul Villard identifie un troisième type de radioactivité : le rayonnement gamma.

1911

Ernest Rutherford découvre que le « noyau d'hydrogène » est présent dans d'autres noyaux comme celui de l'azote. Il en déduit que le noyau d'hydrogène est composé d'une unique particule, chargé positivement, qu'il nomme proton.

1919

Ernest Rutherford découvre que les atomes sont constitués d'un noyau, de charge positive et extrêmement petit.

1932

Le physicien italien Enrico Fermi explique la radioactivité bêta moins comme la transformation d'un neutron en proton par l'émission d'un électron ainsi qu'une particule encore hypothétique proposée par le physicien autrichien Wolfgang Pauli : le neutrino.

1934

1^{ère} observation d'un positron par le physicien américain Carl David Anderson. L'existence de cette « anti-électron » de charge opposée à l'électron fut proposée par le physicien britannique Paul Dirac en 1928

1932

Les physiciens français Frédéric et Irène Joliot-Curie mettent en évidence un nouveau type de radioactivité nommée bêta plus. Les particules bêta plus de charge opposée à l'électron mais de même masse correspondent au positron.

1934

Le physicien britannique James Chadwick démontre que les rayons « ultra pénétrants » issus de la fusion de l'hélium 4 et du béryllium 9 sont en réalité un faisceau de particules de masse égale à celle du proton mais de charge nulle. : des neutrons.

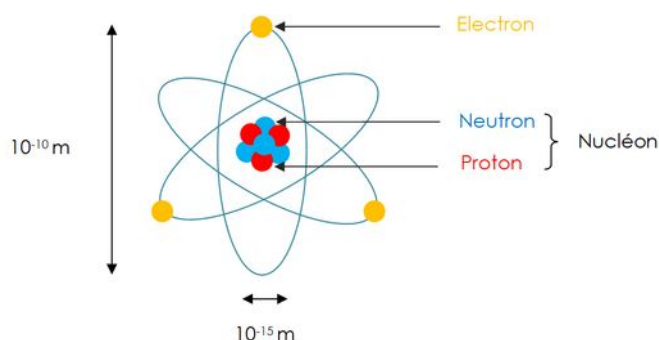
1938

Le chimiste allemand Otto Hahn (et la physicienne autrichienne Lise Meitner !) mettent en évidence la fission nucléaire de l'uranium.

2 Les noyaux des atomes

2.1 Composition des noyaux

Un atome possède un diamètre de l'ordre de 10^{-10} m. Il est composé d'un **noyau** (ou nucléide) dont le diamètre est de l'ordre du femtomètre soit 10^{-15} m. Ce dernier est entouré d'un **nuage électronique** composé d'électrons.



Le noyau contient **Z protons** et **N neutrons** soit **A = Z + N nucléons** au total. Comme un atome est électriquement neutre, son nuage électronique contient Z électrons.

	A nucléons		
	Z protons	N neutrons	Z électrons
Masse (kg)	m_n	m_n	m_e
Charge (C)	+ e	0	- e

Données :

- valeur de la masse d'un nucléon (proton ou neutron) : $m_n = 1,67 \times 10^{-27}$ kg
- la masse d'un électron est négligeable devant celle d'un nucléon : $m_e \sim m_n / 2000$
- valeur de la charge élémentaire : $e = 1,6 \times 10^{-19}$ C

Z est appelé **numéro atomique**, il correspond au numéro de la case de l'atome dans le tableau périodique. **A** est appelé **nombre de masse** car c'est le nombre de nucléons qui permet de calculer la masse de l'atome (quasiment égale à celle de son noyau).

2.2 Notation symbolique

À l'écrit, un noyau est représenté par sa notation symbolique $\boxed{\begin{smallmatrix} A \\ Z \end{smallmatrix} X}$.

Par exemple le carbone 14 a pour symbole C, pour numéro atomique $Z = 6$ et il possède $A = 14$ nucléons. Sa notation symbolique est ${}^{14}_6\text{C}$.



La notation symbolique des particules est la suivante :

- proton : ${}_1^1p$
- neutron : ${}_0^1n$
- électron : ${}_{-1}^0e^-$
- positron (anti-particule de l'électron) : ${}_{+1}^0e^+$

2.3 Notion d'élément chimique et d'isotopes

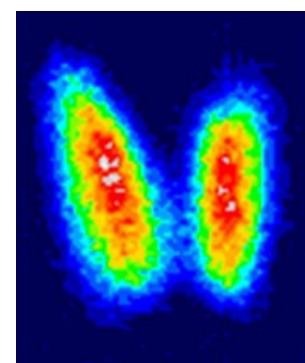
Tous les atomes et les ions qui possèdent le **même nombre de protons** – c'est-à-dire le même numéro atomique Z – appartiennent au **même élément chimique**. Deux noyaux qui ont le même nombre de protons mais pas le même nombre de neutrons N (donc de nucléons A) sont dits **isotopes**.

Application 1 : L'élément chimique iode est présent à l'état naturel sous forme d'iode 127 exclusivement. Cependant en médecine nucléaire ce sont des radionucléides synthétiques, fabriqués dans des accélérateurs, qui sont utilisés. En curiethérapie, pour traiter un cancer de la prostate, les médecins utilisent des implants d'iode 125. En revanche pour réaliser une image de la thyroïde par scintigraphie on lui préfère l'iode 131.



Implants en titane contenant de l'iode 125

1. Donne la composition (nucléons, neutrons, protons) puis la notation symbolique de chacun des 3 noyaux cités ci-dessus.
2. Ces 3 noyaux sont-ils isotopes ?



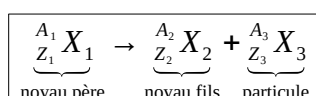
Scintigraphie d'une thyroïde normale

3 La radioactivité

3.1 Équation de désintégration nucléaire

Un noyau radioactif (ou radionucléide) peut se désintégrer c'est le phénomène de **radioactivité**. Ce phénomène est **spontané**, **aléatoire** et **inéductible**.

L'équation d'une réaction de désintégration radioactive s'écrit en utilisant les notations symboliques des noyaux impliqués.



Lors d'une transformation nucléaire, l'élément chimique de départ se désintègre en un autre élément chimique. La loi de conservation des éléments chimiques établie par Lavoisier, valable en chimie, n'est plus valable en physique nucléaire.

Elle est remplacée par la loi de Soddy :

« Lors d'une transformation nucléaire,
il y a conservation de la charge électrique et du nombre de nucléons. »

Mathématiquement, avec les notations ci-dessus, on peut écrire :

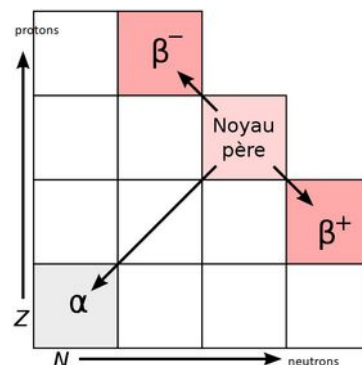
- $Z_1 = Z_2 + Z_3$ (conservation de la charge électrique)
- $A_1 = A_2 + A_3$ (conservation du nombre de nucléons)

3.2 Les différentes radioactivités

Type de radioactivité	Type de particule émise	Symbole du rayonnement associé	Caractéristiques
Alpha	Noyau d'hélium 4 ${}^4_2\text{He}$	α	Très dangereux mais peu pénétrants
Bêta moins	Électron ${}^0_{-1}e$	β^-	Dangereux et pénétrants
Bêta plus	Positron ${}^0_{+1}e$	β^+	Annihilation quasi-immédiate ${}^0_{+1}e + {}^0_{-1}e \rightarrow 2\gamma$
Gamma	Pas de particule (rayonnement électromagnétique)	γ	Dangereux et très pénétrants

Exemples :

- désintégration alpha : ${}^{210}_{84}\text{Po} \rightarrow {}^{206}_{82}\text{Pb} + {}^4_2\text{He}$
- désintégration β^- : ${}^{14}_6\text{C} \rightarrow {}^{14}_7\text{N} + {}^0_{-1}e^-$
- désintégration β^+ : ${}^{11}_6\text{C} \rightarrow {}^{11}_5\text{B} + {}^0_{+1}e^+$
- radioactivité γ : ${}^{222}_{86}\text{Rn}^* \rightarrow {}^{222}_{86}\text{Rn} + \gamma$



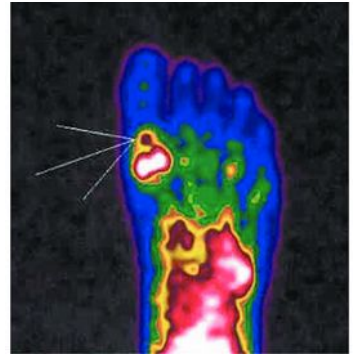
- La radioactivité β^+ correspond à la conversion d'un proton en neutron au sein du noyau avec émission d'un positron (antiparticule de l'électron) : ${}_1^1p \rightarrow {}_0^1n + {}^0_{+1}e^+$
- La radioactivité β^- correspond à la conversion d'un neutron en proton au sein du noyau avec émission d'un électron : ${}_0^1n \rightarrow {}_1^1p + {}^0_{-1}e^-$
- La désintégration α correspond à l'allègement du noyau père de 4 nucléons (2 protons + 2 neutrons)

★ Vidéo : La vallée de la stabilité (vidéo du CEA)

★ Complément : Diagramme de Segré interactif, le tableau périodique des physiciens nucléaires.



Application 2 : En imagerie médicale, le radionucléide le plus utilisé est le technétium 99 métastable noté $^{99}_{43}\text{Tc}^*$. Il se désexcite rapidement en émettant un rayon gamma ce qui permet de réaliser des scintigraphies osseuses par exemple. Pour mesurer l'étendue d'une tumeur maligne dans le cadre d'un cancer du sein on préférera utiliser le fluor 18 radioactif β^+ qui se désintègre en oxygène 18. En curiethérapie, pour détruire une tumeur, on peut utiliser le ruthénium 106 mais on lui préfère souvent l'iridium 192. Ils sont tous les deux émetteurs β^- .



1. Écris les équations de désintégration radioactive de tous les radionucléides cités dans le texte.

3.3 Evolution d'un échantillon radioactif dans le temps

3.3.1 Evolution du nombre de radionucléides

La désintégration d'un radionucléide est aléatoire. En revanche l'évolution du nombre de noyaux radioactifs d'un échantillon pur, contenant un grand nombre de ces radionucléides identiques, est parfaitement prévisible.

Notons $N(t)$ le nombre de radionucléides dans un échantillon pur. La petite diminution $dN(t)$ du nombre de noyaux radioactifs pendant un petit temps dt est proportionnelle aux nombre de noyaux $N(t)$ que l'échantillon contient. On peut écrire :

$$\frac{dN(t)}{dt} = -\lambda \times N(t) \quad \text{avec } \lambda \text{ (lambda) la constante de radioactivité}$$

La solution de cette équation différentielle est de la forme :

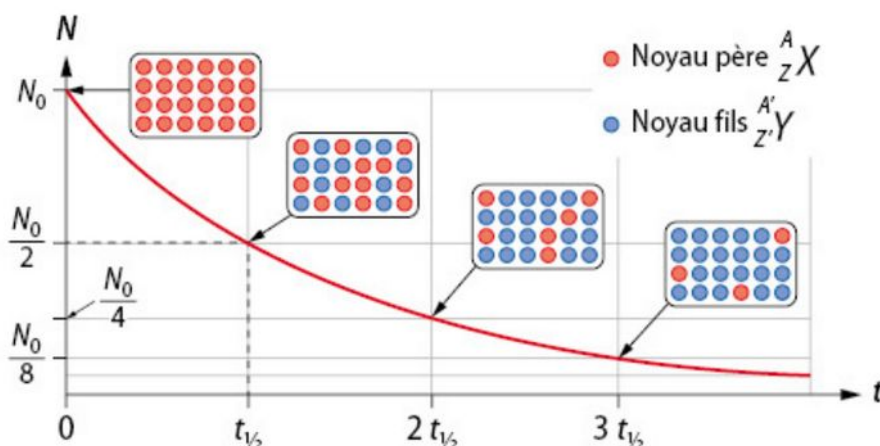
$$N(t) = N_0 \times e^{-\lambda \times t}$$

Avec :

- $N(t)$ le nombre de noyaux radioactifs (non encore désintégrés) à l'instant t
- N_0 le nombre de noyaux radioactifs initial à l'instant $t = 0$ s.
- t le temps (en s)
- λ la constante de radioactivité (en s^{-1}) dépendante du radionucléide constituant l'échantillon

La **demie-vie** d'un radionucléide, notée $t_{1/2}$, est la **durée** au bout de laquelle la **moitié des radionucléides** de cet échantillon est **désintégrée** :

$$N(t_{1/2}) = \frac{N_0}{2}$$



Remarque : On peut montrer que $t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$

3.3.2 Définition et évolution de l'activité

Le **nombre de désintégrations** moyen ayant lieu **en 1 seconde** est appelée **activité**. Elle est notée **A(t)** et s'exprime en **Becquerel (Bq)**.

C'est en fait l'opposée de la dérivée du nombre de radionucléides par rapport au temps :

$$A(t) = -\frac{dN(t)}{dt}$$

En dérivant l'expression de N(t), on obtient :

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

Avec :

- A(t) l'activité radioactive de l'échantillon à l'instant t
- A₀ l'activité initiale de l'échantillon à l'instant t = 0 s.
- t le temps (en s)
- λ la constante de radioactivité (en s⁻¹) propre au radionucléide constituant l'échantillon

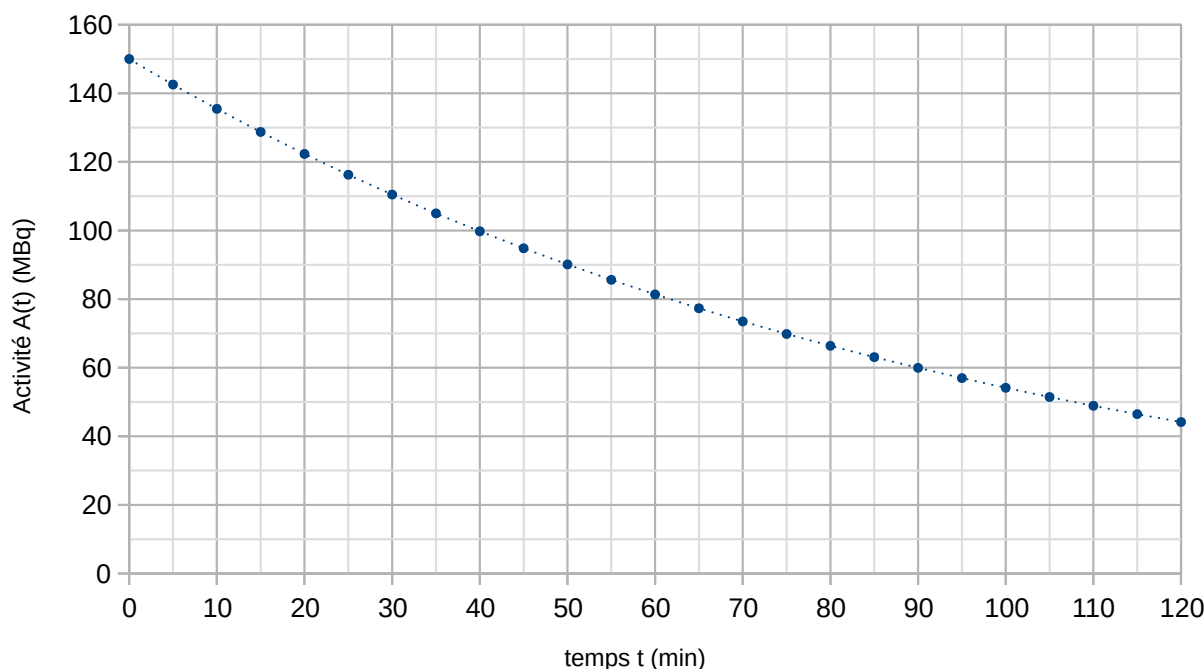
Remarque : On peut montrer que $A_0 = \lambda \times N_0$. L'activité initiale de l'échantillon est proportionnelle au nombre de radionucléides qu'il contient.

La **demi-vie** $t_{1/2}$ d'un radionucléide est donc également le **temps au bout duquel l'activité** d'un échantillon de ce radionucléide est **divisée par 2** :

$$A(t_{1/2}) = \frac{A_0}{2}$$

Application 3 : Le gallium ^{68}Ga est un isotope à courte vie se désintégrant par émission de positron en zinc 68 (stable). Il est utilisé en tomographie par émission de positrons pour détecter d'éventuelles tumeurs. On le trouve sous forme de solution injectable dosée à 20 MBq/mL ce qui signifie que 1 mL de solution a une activité de 20 MBq juste après sa synthèse. Une telle solution injectable peut se conserver environ 4 h. L'activité recommandée à injecter à un patient de 70 kg est de 150 MBq environ.

Courbe de décroissance radioactive du gallium 68 (activité initiale $A_0 = 150$ MBq)



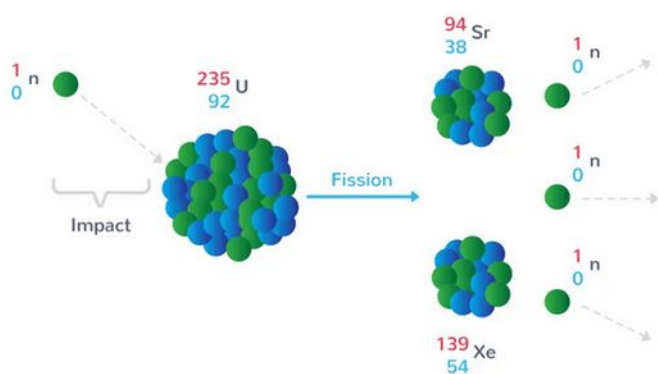
Donnée :

- Masse d'un atome de gallium 68 : $m_{\text{Ga}} = 1,13 \cdot 10^{-22}$ g

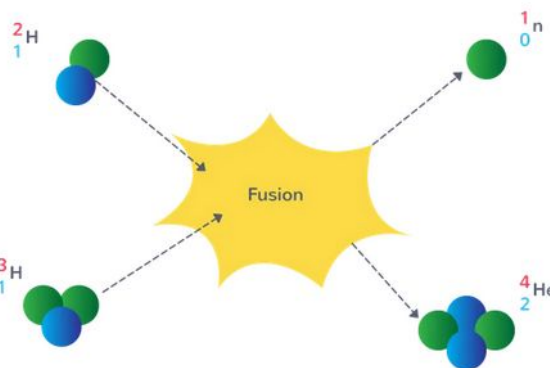
1. Calcule le volume de solution de gallium 68, en mL, qu'il faut injecter à un patient de 70 kg pour lui administrer l'activité recommandée.
2. Détermine graphiquement le temps de demi-vie $t_{1/2}$ du gallium 68.
3. Déduis en sa constante de radioactivité λ .
4. Calcule la masse de gallium 68 nécessaire pour obtenir une activité initiale de 150 MBq.
5. Pour une dose d'activité initiale 150 MBq, calcule son activité au bout d'un temps $t = 4$ h. Exprime le résultat en pourcentage de l'activité initiale puis justifie que le flacon ne peut pas se garder plus de quelques heures.

4 Énergie et transformations nucléaires

Les transformations nucléaires peuvent être des désintégrations radioactives mais aussi des réactions de fission ou de fusion.



Fission de l'uranium 235



Fusion de l'hydrogène 2 et de l'hydrogène 3

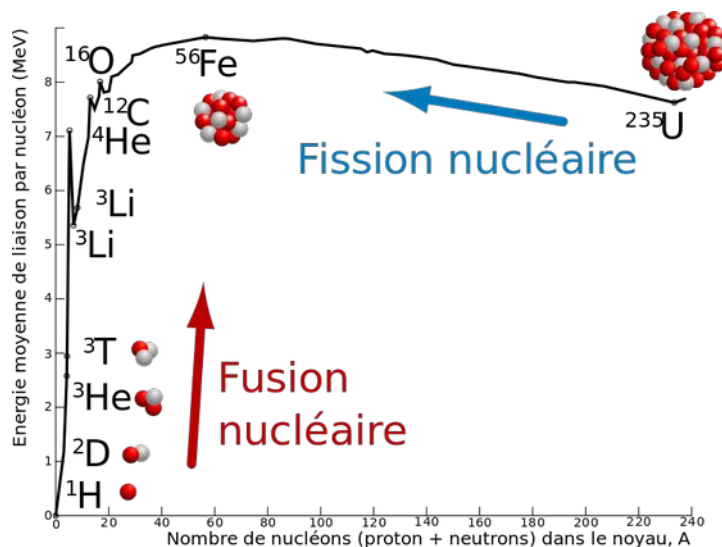
Lors de ces transformations, si la masse des produits est inférieure à celle des réactifs, on parle de **déficit de masse** Δm : $\Delta m = m_{\text{produits}} - m_{\text{réactifs}}$. L'énergie libérée lors d'une transformation nucléaire s'écrit :

$$E = |\Delta m| \times c^2$$

Avec :

- Δm le déficit de masse en kg
- $c = 3,00 \cdot 10^8$ m/s la célérité de la lumière dans le vide
- E l'énergie libérée en J.

Remarque : 1 électronvolt = 1 eV = $1,6 \cdot 10^{-19}$ J



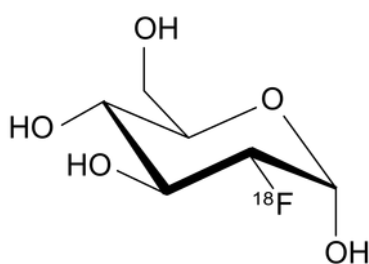
Complément ; la courbe d'Aston

Si l'énergie de liaison par nucléon augmente, la réaction nucléaire libère de l'énergie.

La fission des éléments les plus lourds jusqu'au fer libère de l'énergie.

La fusion des éléments les plus légers jusqu'au fer libère également de l'énergie.

Application 4 : Le fluor 18 utilisé en scintigraphie est émetteur β^+ . Le positron qu'il émet se désintègre au contact d'un électron pour émettre 2 rayons gamma selon la réaction de désintégration suivante : $e^+ + e^- \rightarrow 2\gamma$. Les 2 rayons gamma emportent chacun la moitié de l'énergie libérée et sont détectés par des gamma caméras.



fluorodésoxyglucose (^{18}F)



Gamma caméra

Données :

- Masse d'un positron et d'un électron: $m_e = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$
- Un rayon gamma n'est pas une particule mais un rayonnement, sa masse est nulle et sa longueur d'onde est inférieure à 10^{-10} m .
- Relation entre énergie et longueur d'onde d'un rayonnement : $E = \frac{h \times c}{\lambda}$
- valeur de la constante de Planck : $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ kg.m.s}^{-1}$

1. Calcule le défaut de masse de la réaction de désintégration d'un positron au contact d'un électron.
2. Déduis en l'énergie libérée par cette désintégration et l'énergie de chacun des rayons gamma émis. Exprime le résultat en J puis en eV.
3. Vérifie qu'il s'agit bien de rayon gamma en calculant leur longueur d'onde

★ Complément : le spectre des ondes électromagnétiques en longueur d'onde, fréquence et énergie et les différents domaines et leurs utilisations.

[illegible]

