

## LA RADIOACTIVITE

Dans ce chapitre, et le suivant, les phénomènes décrits sont liés aux noyaux des atomes et en aucun cas à leur cortège électronique. Il est **IMPORTANT** de bien comprendre :

- Qu'en *CHIMIE*, au cours des réactions observées, on assiste à des réarrangements de cortèges électroniques. Le noyau des atomes n'est **JAMAIS** modifié.
- Qu'en *PHYSIQUE NUCLEAIRE*, les réactions étudiées sont les réactions entre les noyaux des atomes (on ne se soucie pas du cortège électronique) ou entre des particules du noyau, et mettent en jeu des énergies un million ( $10^6$ ) de fois plus élevée (c'est pourquoi les réactions chimiques ne peuvent modifier les noyaux).

### I- LE NOYAU ATOMIQUE

#### 1) CONSTITUTION DU NOYAU

On peut donner des **ordres de grandeur** pour fixer les idées :

L'atome peut être assimilé à une sphère de rayon  $\approx 10^{-10}$  m (soit 0,1 nm)

Le noyau peut être lui-même assimilé à une sphère de rayon  $\approx 10^{-15}$  m (soit 1 fm - femptomètre -)

On constate donc que le rayon du noyau est  $\approx 10^5$  fois plus petit que celui de l'atome, ce qui traduit en volume, signifie que ( $V \propto R^3$ ) le volume du noyau est  $10^{15}$  fois plus petit que le volume de l'atome (un million de milliards), ce qui a son importance comme nous allons le voir.

L'atome est donc constitué d'un noyau et de son cortège électronique

Le noyau est lui-même constitué :

\* de protons, particules caractérisées par :  $q_p = +1,6 \cdot 10^{-19}$  C =  $-q_e^-$   
 $m_p = 1,6726 \cdot 10^{-27}$  kg

\* de neutrons, particules caractérisées par :  $q_n = 0$   
 $m_n = 1,6748 \cdot 10^{-27}$  kg

tandis que

\* *le cortège électronique*, lui, ne contient que les électrons :  
 $q_e = -1,6 \cdot 10^{-19}$  C  
 $m_e = 9,1091 \cdot 10^{-31}$  kg

Ainsi :  $m_p \approx 2000 m_e$  de même  $m_n \approx 2000 m_e$ . (ordre de grandeur intéressant à retenir...), on peut donc dire que la quasi-totalité de la masse d'un atome est dans son noyau, or celui-ci a un volume  $10^{15}$  fois plus faible que celui de l'atome :

#### **la matière est essentiellement vide**

*Par contre les différents états de la matière (solide, liquide, gaz) sont le résultat des liaisons entre cortèges électroniques (donc de « faibles » énergies), ce qui explique qu'on peut réaliser des changements d'état (par ex. solide  $\rightarrow$  liquide - la fusion -) par apport de faible énergie.*

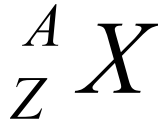
La notation d'un noyau se résume par :

**X** : symbole de l'élément chimique correspondant à ce noyau

**A** : nombre de masses du noyau, c'est le nombre total de nucléon (composants du noyau, indifféremment protons et neutrons) dans le noyau

**Z** : nombre de charges du noyau (ou nombre de protons du noyau)

**N** :  $A - Z =$  nombre de neutrons du noyau



Exemple :  ${}^{12}_6\text{C}$  : noyau de carbone possédant 12 nucléons dont 6 protons.

**On généralise** cette notation sur toutes les particules: par exemple, pour les particules « courantes » :

**neutron** :  ${}^1_0 n$    **proton** :  ${}^1_1 p$    **électron** :  ${}^0_{-1} e^-$    **positron** :  ${}^0_1 e^+$    **photon** :  ${}^0_0 \gamma$    **neutrino** :  ${}^0_0 \nu$

Cette généralisation consiste à donner un nombre « de masse » de 1 pour les particules lourdes (les « hadrons » qui peuvent subir une interaction forte : ce sont les nucléons, mais aussi d'autres particules comme les mésons, et les hypérons) et un nombre « de masse » de 0 pour les particules légères (tout ce qui n'est pas hadron : les électrons, les photons et un tas d'autres...).

Le nombre « de charge » donné est bien sûr celui qui traduit la charge de la particule (-1 pour l'électron, +1 pour le proton, 0 pour le neutron...).

## 2) QUELQUES DEFINITIONS

On appelle :

\* **Nucléide**, un ensemble de noyaux identiques (même A, même Z donc même N)

Ex : le nucléide  ${}^{12}_6\text{C}$

\* **Isotopes**, des noyaux de même Z mais de A différent (c à d : de N différents)

Ex : Les isotopes de l'hydrogène sont  ${}^1_1\text{H}$     ${}^2_1\text{H}$     ${}^3_1\text{H}$

Les isotopes du Carbone sont  ${}^{12}_6\text{C}$     ${}^{13}_6\text{C}$     ${}^{14}_6\text{C}$

Les isotopes naturels de l'Oxygène sont  ${}^{16}_8\text{O}$     ${}^{17}_8\text{O}$     ${}^{18}_8\text{O}$

*Remarque* : dans un atome, édifice neutre,  $n(e^-) = n(p) = Z$ , or, c'est ce nombre d'électrons qui confère à un élément ses propriétés chimiques, c'est pourquoi la distinction des différents isotopes (même Z) n'a pas d'intérêt en chimie.

\* **Isotones**, des noyaux de même N, mais de A et Z différents

Ex :  ${}^{56}_{26}\text{Fe}$     ${}^{58}_{28}\text{Ni}$

\* **Isobares**, des noyaux de même A, mais de Z différents

Ex :  ${}^{14}_6\text{C}$     ${}^{14}_7\text{N}$

De plus, vu la petitesse des masses des nucléons, on utilise une unité mieux adaptée :

\* **l'unité de masse atomique** (1 u.m.a.) :

comme par définition du nombre d'Avogadro on a  $6,02252 \cdot 10^{23}$  atomes  ${}^{12}_6\text{C}$  dans 12g de  ${}^{12}_6\text{C}$

$$1 \text{ uma} = \frac{(12 \cdot 10^{-3})}{12 * 6,02252 \cdot 10^{23}} = \boxed{1,66053 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 1 \text{ u ma}}$$

**REMARQUE IMPORTANTE** : avec ce choix d'unités, on pourrait s'attendre à avoir les masses des différents noyaux en nombre entier d'u.m.a. (par exemple le carbone 12 devrait avoir une masse de 12 u.m.a. . Il n'en n'est rien ! Nous allons voir ci-après qu'il y a **NECESSAIREMENT** un défaut de masse...)

## II ENERGIE DE COHESION DU NOYAU

Nous pouvons faire une remarque sur l'édifice qu'est le noyau :

les électrons du cortège électronique restent dans le voisinage du noyau du fait des forces électrostatiques (- ↔ +) d'attraction. Mais alors, pourquoi les protons du noyau ne se repoussent-ils pas ? Eh bien, il y a une autre force qui intervient entre les nucléons : **la force**

**forte**, elle est à très courte portée ( ne sort pas du noyau ) et beaucoup plus forte que la force électrostatique.

**(PETITES PRECISIONS :**

\* à l'heure actuelle, et dans l'Univers tel que nous le connaissons, la Physique distingue quatre interactions fondamentales ( c-à-d 4 types de forces ... )

<b>INTERACTION :</b>	Intensité relative	agit sur....	portée	Type de charge
<b>FORTE</b>	1	Quarks , hadrons	Courte $10^{-15}$ m	Couleur
<b>ELECTROMAGNETIQUE</b>	$10^{-2}$	Particules chargées électriquement	Infinie	Charge électrique
<b>FAIBLE</b>	$10^{-5}$	Electrons, neutrinos, quarks	$10^{-18}$ m	Charge faible
<b>GRAVITATIONNELLE</b>	$10^{-39}$	Toutes les particules	Infinie	masse

Ces 4 interactions devaient vraisemblablement être regroupées en une seule aux tous premiers instants de la naissance de l'Univers. C'est l'une des quêtes de la Physique que d'unifier ces 4 interactions en une seule.....)

\* sur la colonne la plus à droite du tableau , on peut remarquer qu'il existe plusieurs types de charges : pour la force forte → charge baryonique (couleur), pour la force électromagnétique → charge électrique (connue déjà...), pour la force faible → charge leptonique. **L'antiparticule** d'une particule est la même particule (même masse, même « taille »...) MAIS avec tous les nombres de charges inversés.....

Ainsi, l'antiparticule de l'électron est la particule de même masse que l'électron, mais de charge  $+1,6.10^{-19}$  C on l'appelle le **positron**, ou encore positon (CE N'EST EN AUCUN CAS LE PROTON DE MASSE BIEN PLUS ELEVEE! ).

Le photon est sa propre antiparticule ( $\gamma = \bar{\gamma}$ ), celle du neutrino ( $\nu$ ) est l'antineutrino ( $\bar{\nu}$ )....

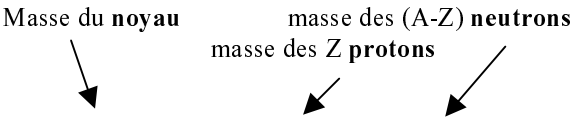
### 1) RELATION D'EINSTEIN (1905)

Les physiciens du noyau ont mis en évidence l'existence d'une force forte entre les nucléons, mais comment expliquer l'origine de cette force ? Quel en est l'apport énergétique ....?

Les masses des noyaux peuvent être mesurés avec une très grande précision, et on vérifie toujours que :

**« la masse d'un noyau stable (cf ci-après) est toujours inférieure à la somme des masses des nucléons qui le forment »**

La différence est appelée « Défaut de masse » :



$$\Delta m = [M(\text{noyau formé}) - \sum m_{\text{nucléons}}] = M({}^A_Z\text{X}) - (Z.m_p + (A-Z).m_n)$$

Avec ce choix, nous avons :  $\Delta m < 0$

C'est ce qui est sûrement la formule la plus célèbre de la Physique, **la relation d'Einstein**, qui permet de comprendre l'origine de ce défaut de masse :

$$E = m.c^2$$

où  $c = 3 \cdot 10^8$  m/s est une constante fondamentale - la vitesse de la lumière dans le vide - ainsi il existe de « l'énergie de masse ». Ou dit autrement, de la masse peut être transformée en énergie, et réciproquement, de l'énergie peut donner de la masse.

Dans le cas de la formation d'un noyau, il doit y avoir une production d'**énergie de cohésion**,  $\Delta E$  nécessaire pour que les nucléons restent ensemble, égale à la disparition de l'énergie de masse  $\Delta m \cdot c^2$

Ainsi :

$$\begin{array}{ccc} \text{Energie de cohésion} \longrightarrow & \Delta E = \Delta m \cdot c^2 & \longleftarrow \text{Vitesse de la lumière} \\ & & \text{dans le vide :} \\ & & c = 2,99792458 \cdot 10^8 \text{ m/s} \\ & \uparrow & \\ & \text{Défaut de masse} & \end{array}$$

Le défaut de masse représente, à un coefficient de proportionnalité près ( $c^2$ ) l'énergie de cohésion du noyau. Remarquons qu'avec la définition choisie ici pour le défaut de masse, celui-ci est toujours négatif, donc l'énergie de cohésion est elle aussi négative. Cette convention est parfaitement cohérente avec ce qui a été dit tout au long des cours de mécanique : **une énergie négative correspond à un système lié** (ici le noyau, mais aussi le système d'une planète et d'un satellite,...)

Autrement dit, pour séparer tous les nucléons du noyau, il faudrait lui **fournir** une énergie :

$$W = -\Delta E \quad \text{qui est bien } > 0$$

## 2) UNITES APPROPRIÉES

### \* **Unité d'énergie :**

le joule n'est pas une unité pratique dans le monde des particules, aussi définit-on l'électron-volt :

$$1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

c'est l'énergie potentielle d'une charge élémentaire ( $q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ ) soumise à une ddp de 1 Volt (en effet, cette énergie se calcule par :  $E_p = q \cdot (V_A - V_B) = 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1 = \dots$ )

Les énergies mises en jeu en chimie sont de l'ordre de l'eV (ainsi, dans l'atome d'hydrogène, l'énergie d'ionisation est de 13,6 eV) alors qu'en physique nucléaire, on utilise surtout le MeV :  $1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$  (on retrouve ce qui a été annoncé au début de ce chapitre, à savoir que les énergies sont 1 million de fois plus forte...)

### \* **Unité de masse :**

du fait de la relation  $\Delta E = \Delta m \cdot c^2$  on peut exprimer une masse en  $(\frac{\text{unité d'énergie}}{c^2})$  soit, en physique nucléaire en  $\text{MeV}/c^2$  (d'ailleurs, les physiciens du noyau vont même jusqu'à adopter un système d'unité où  $c = 1$ , et ainsi les masses et les énergies s'expriment toutes deux en MeV, ce qui ne sera pas fait ici...)

Ainsi :  $1 \text{ uma} = 1,66053 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

$$1 \text{ uma} = 1,66 \cdot 10^{-27} \cdot (3 \cdot 10^8)^2 \frac{J}{c^2} = 1,66 \cdot 10^{-27} \cdot \frac{(3 \cdot 10^8)^2}{1,6 \cdot 10^{-19}} \text{ MeV} / c^2 = 933,75 \text{ MeV} / c^2$$

avec les valeurs exactes on obtient :

$$1 \text{ uma} = 931,48 \text{ MeV} / c^2 = 1,66053 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

$$\begin{aligned} \text{et : } m_p &= 1,6726 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 1,007825 \text{ uma} = 938 \text{ MeV} / c^2 \\ m_n &= 1,6748 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 1,008665 \text{ uma} = 939 \text{ MeV} / c^2 \\ m_e &= 9,1091 \cdot 10^{-31} \text{ kg} = 5,486 \cdot 10^{-4} \text{ uma} = 0,511 \text{ MeV} / c^2 \end{aligned}$$

### Exemple :

calculer le défaut de masse du noyau d'hélium  ${}^4_2\text{He}$  sachant que sa masse est :  $M({}^4_2\text{He}) = 4,002603 \text{ u}$

$$\text{Rép : } \Delta m = M({}^4_2\text{He}) - (2m_p + 2m_n) = -0,030377 \text{ uma}$$

Ce qui correspond à une énergie de cohésion :  $\Delta E = -0,030377 \cdot (931,48) = -28,295 \text{ MeV}$

### 3) STABILITE DES NOYAUX

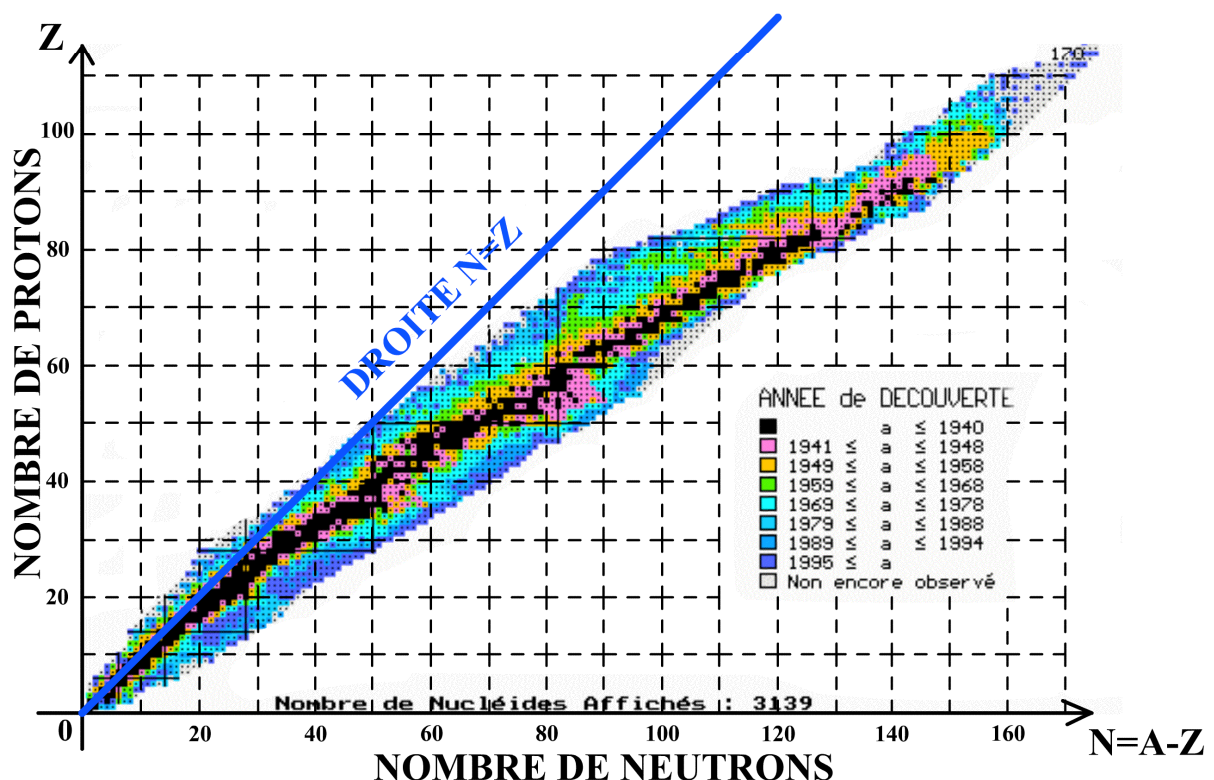
Un noyau est qualifié de stable s'il ne possède pas une tendance à se transformer, ou encore si ses nombres A et Z ne changent pas au cours du temps : **il n'est pas radioactif.**

S'il s'agit d'un noyau « naturel » (c-à-d existant dans la nature) on parle de radioactivité naturelle, si au contraire c'est un noyau résultant d'une fabrication par l'homme (par ex. les transuraniens) on parle de radioactivité artificielle.

Sur les 350 nucléides naturels, une soixantaine est instable.

**Tous les nucléides artificiels sont radioactifs.**

(En fait on connaît à peu près 1200 noyaux dont 274 sont stables)



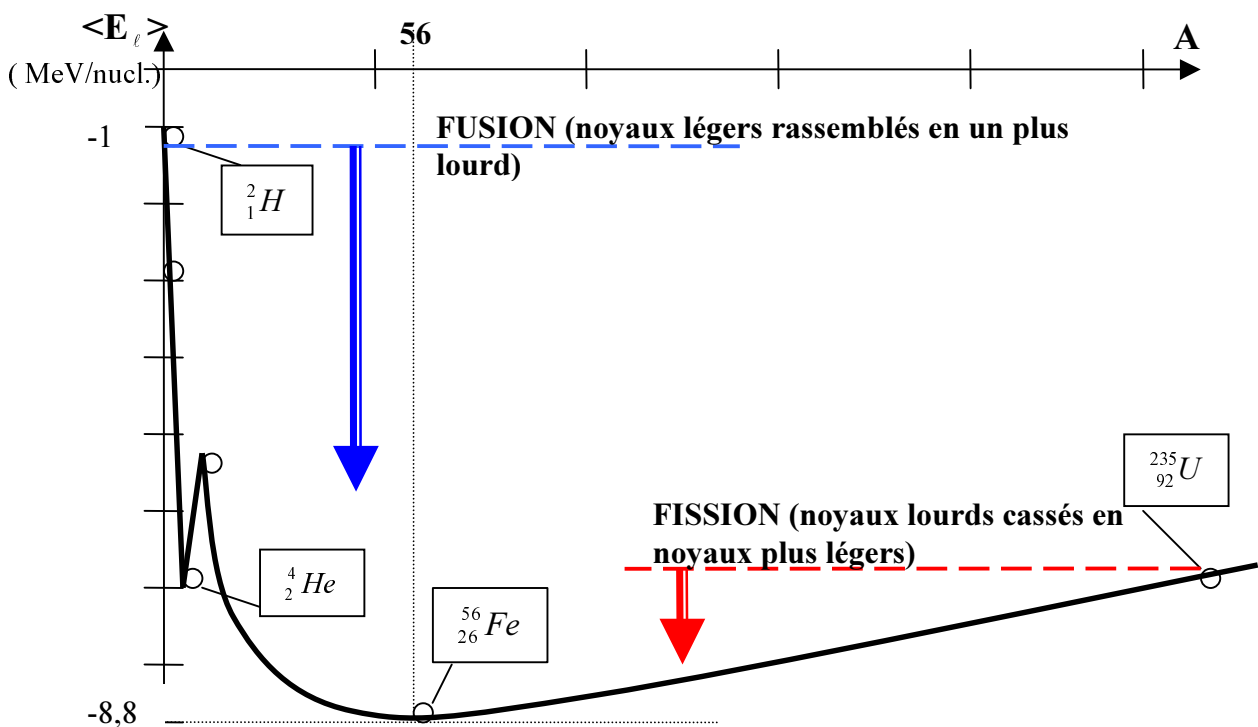
Sur la figure ci-dessus, on a le graphe  $Z = f(N)$  pour les noyaux stables :

- Pour les noyaux légers ( $Z < 20$ ) il y a une tendance à l'égalité du nombre de neutrons et du nombre de protons.
- A partir de  $Z > 20$  : la répulsion électrostatique des protons est contrecarrée par une « dilution », des protons dans des neutrons en nombre de plus en plus élevé

Afin d'avoir une idée de la stabilité des noyaux, on pourrait faire le graphe de l'énergie de cohésion des noyaux existants en fonction de leur nombre de masses « A ». **MAIS**, dans cette représentation un noyau léger aura forcément une énergie globale de cohésion plus faible qu'un noyau lourd, alors qu'*il n'est pas prouvé qu'un noyau léger est forcément moins stable qu'un noyau lourd...*

C'est pour cette raison que ASTON eut l'idée d'introduire l'**ENERGIE MOYENNE DE COHESION PAR NUCLEON** :

$$\langle E_c \rangle = \frac{\Delta E}{A}$$



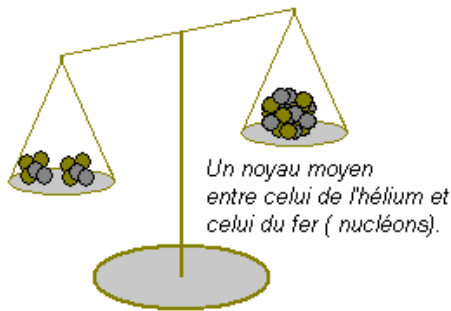
La courbe présente un minimum très aplati qui correspond aux nucléides les plus stables  $50 < A < 75$ , le minimum est pour le fer  ${}^{56}_{26}Fe$

Il faut en moyenne 8MeV pour arracher un nucléon d'un noyau (alors que quelques eV suffisent à enlever un électron de son cortège électronique).

Cette courbe permet aussi de comprendre les deux possibilités de production d'énergie à partir de réactions nucléaires : (fig.3).

\* **La fusion** : deux nucléides légers de faible énergie de liaison, peuvent donner un nucléide plus lourd et possédant une plus grande énergie de liaison (bombe H, le Soleil, ...)

\* **La fission** : un noyau très lourd bombardé par un projectile (neutron très souvent) est brisé en deux morceaux plus légers et plus stables (bombe A, centrales nucléaires, ...)

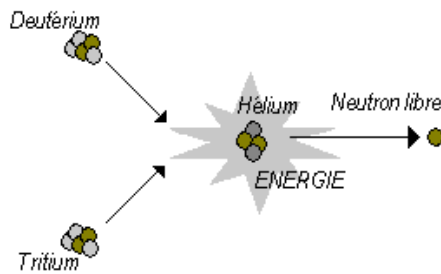


La somme des masses de deux petits noyaux est plus importante que la masse de leur noyau fusionné.



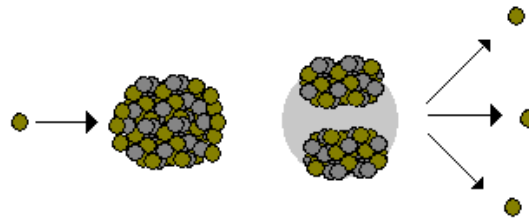
Par contre, à partir des atomes moyens le phénomène s'inverse : la masse de deux noyaux moyens est plus faible que celle de leur noyau fusionné, c'est pourquoi en cassant un gros noyau, on récupère de l'énergie.

Donc en fusionnant les deux petits noyaux, on récupère de l'énergie



Exemple d'une réaction de fusion

Cependant, la fission ne se réalise pratiquement jamais naturellement. Il faut amener un peu d'énergie au noyau par l'intermédiaire d'un neutron pour qu'il se casse.



Réaction de fission

### III LES REACTIONS NUCLEAIRES SPONTANÉES

Certains noyaux existants dans la nature ou créés artificiellement sont instables, leurs nombres A et/ou Z évoluent dans le temps. Ils se transforment par émission de rayonnements. Ces noyaux qualifiés de radioactifs évoluent vers un état énergétique plus stable.

Rutherford a montré à l'aide d'un champ magnétique intense, que les noyaux radioactifs (quels qu'ils soient) ne peuvent évoluer que selon **trois types de radioactivité seulement** :  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\gamma$ .

Ces trois types peuvent d'ailleurs avoir lieu simultanément ou en cascade.

Quelque soit le type de rayonnement envisagé, plusieurs lois de conservation sont satisfaites :

- **Conservation de la charge** :  $Z_{AVANT} = Z_{APRES}$
- **Conservation des nucléons** :  $A_{AVANT} = A_{APRES}$
- **Conservation de l'énergie** :  $E_{AVANT} = E_{APRES}$

Détaillons ces réactions nucléaires spontanées..

#### 1) RADIOACTIVITE $\alpha$

Les particules  $\alpha$  sont des noyaux d'Hélium :  ${}^4_2\text{He}$  :  $\alpha = {}^4_2\text{He}$

Ce sont des particules très lourdes facilement arrêtées : une feuille de papier suffit.

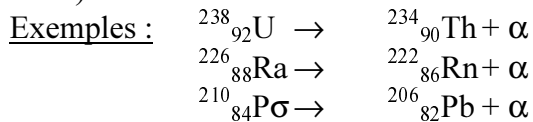
L'équation de la réaction est :  ${}^A_Z\text{X} \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}\text{Y} + \overset{\alpha}{\text{}^4_2\text{He}}$

Un noyau « père »  ${}^A_ZX$  se désintègre pour engendrer le noyau « fils »  ${}^{A-4}_{Z-2}Y$  et l'expulsion d'une particule «  $\alpha$  ».

On vérifie bien que :

- $A_{AVANT} = A$  et  $A_{APRES} = (A-4) + 4 = A$
- $Z_{AVANT} = Z$  et  $Z_{APRES} = (Z-2) + 2 = Z$

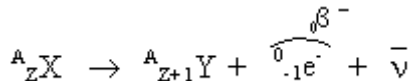
L'énergie totale est égale à la somme de l'énergie cinétique et de l'énergie de masse. Ainsi la particule «  $\alpha$  » emmène une certaine énergie cinétique avec elle, et cette énergie cinétique ne peut prendre n'importe quelle valeur, mais seulement certaines. Elle est quantifiée (quelques MeV) La radioactivité  $\alpha$  est le fait de certains noyaux lourds ( $A > 200$ )



## 2) RADIOACTIVITE $\beta$

Elle se manifeste de deux façons : (on ne parlera pas de la capture électronique dans ce cours)

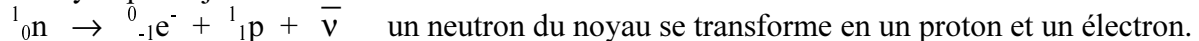
### a. la radioactivité $\beta^-$



une particule  $\beta^-$  est un électron. **ATTENTION : en aucun cas cet électron ne vient du cortège électronique**

la particule  ${}^0_0\bar{\nu}$  est un antineutrino (de masse ? si vous le savez, vous gagnez un prix Nobel...)

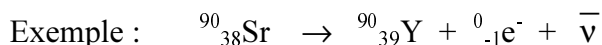
le noyau père éjecte un électron et un antineutrino selon :



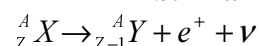
Là encore les lois de conservation sont satisfaites :  ${}^0_0\bar{\nu}$

- $A_{AVANT} = A$  et  $A_{APRES} = (A) + 0 + 0 = A$
- $Z_{AVANT} = Z$  et  $Z_{APRES} = (Z+1) - 1 + 0 = Z$

Avant 1933, la désintégration  $\beta^-$  semblait ne pas satisfaire la conservation de l'énergie, ce qui représentait une catastrophe pour les physiciens, pour qui cette conservation est nécessaire et vitale ... Pauli en 1933 émit l'hypothèse de l'existence d'une particule, le neutrino (petit neutre) qui emmenait la partie manquante de l'énergie. Ce n'est que bien plus tard que cette particule fut observée. La difficulté de son observation résulte dans le fait qu'elle n'interagit quasiment pas avec la matière, et il fallut attendre l'arrivée de détecteurs très sophistiqués.



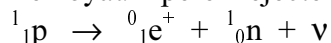
### b. La radioactivité $\beta^+$



une particule  $\beta^+$  est un positron, antiparticule de l'électron (**là encore, totalement étranger au cortège électronique**)

la particule  ${}^0_0\nu$  est un neutrino

Le noyau « père » éjecte un positron (l'antiparticule de l'électron) et un neutrino :

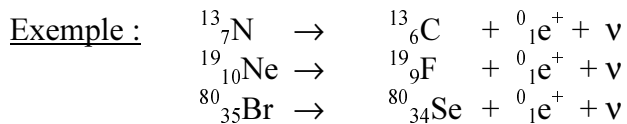


Cette radioactivité  $\beta^+$  ne s'observe généralement qu'avec des éléments artificiels.

Les trois lois de conservation sont là aussi satisfaites :

- $A_{AVANT} = A$  et  $A_{APRES} = (A) + 0 + 0 = A$
- $Z_{AVANT} = Z$  et  $Z_{APRES} = (Z-1) + 1 + 0 = Z$

La conservation de l'énergie est là aussi satisfaite grâce à l'existence d'un neutrino.

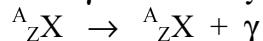


Les particules  $\beta$  ont des énergie de l'ordre du MeV et sont arrêtées par une faible épaisseur d'aluminium.

### 3) LA RADIOACTIVITE $\gamma$

C'est le rayonnement électromagnétique. Ce rayonnement électromagnétique a même nature que la lumière, les ondes radio, les rayons X, ...

Ici, la longueur d'onde est si courte (donc la fréquence si élevée) que ce rayonnement peut être considéré comme un jet de particules (de masse nulle) se déplaçant à la vitesse de la lumière : les **photons**. Cette désintégration  $\gamma$  laisse le noyau inchangé :



et suit très souvent les radioactivités  $\alpha$  et  $\beta$ .

Une particule  $\gamma$  est un photon (masse NULLE !)

Les trois lois de conservation sont satisfaites :

- $A_{AVANT} = A$  et  $A_{APRES} = A + 0 = A$
- $Z_{AVANT} = Z$  et  $Z_{APRES} = Z + 0 = Z$

A noter que le noyau ne change pas d'identité, mais seulement d'état énergétique. On parle de processus radiatif.

**REMARQUE :** les processus décrits ici,  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\gamma$  peuvent se suivre en cascade et dans n'importe quel ordre.....Seule l'étude expérimentale permet de le savoir ! ( cf TP et la source de césium utilisée).

## IV ASPECT STATISTIQUE DE LA RADIOACTIVITE

### 1) DESINTEGRATION DU NOYAU

Plus un être vivant avance dans la vie, plus sa probabilité de mourir augmente : un homme de quatre-vingts ans a une plus forte probabilité de mourir au cours de l'année qu'un garçon de dix ans. Il n'en est pas de même pour un noyau : sa désintégration est totalement aléatoire, on ne peut que lui donner une certaine probabilité de se désintégrer. Ainsi, la probabilité qu'un noyau se désintègre entre les instants « t » et « t + dt » est :

$$P = \lambda \cdot dt \quad \text{où}$$

**$\lambda$  : constante radioactive caractéristique du nucléide considéré, et indépendante du temps.**

Ce qui signifie qu'un noyau radioactif de cent mille ans a, à chaque instant la même probabilité de se désintégrer qu'un noyau qui viendrait de se former. C'est pourquoi on dit que les noyaux ne vieillissent pas. Il est impossible de prévoir quand, un noyau précis va se désintégrer. Il a simplement telle chance (ou telle probabilité) de le faire.

## 2) DESINTEGRATIONS POUR UNE COLLECTION DE NOYAUX

Les échantillons, même très petits à notre échelle, sont toujours constitués d'un très grand nombre de noyaux (de l'ordre de  $10^{23}$  noyaux). On peut alors écrire des lois statistiques qui feront intervenir des valeurs moyennes (les résultats des détecteurs fluctueront autour de ces valeurs moyennes). Ainsi, pour un nombre moyen de noyaux radioactifs  $\bar{N}_t$ , présents à l'instant « t » il en disparaît pendant « dt » :

$$d\bar{N}_t = -\bar{N}_t \cdot \lambda \cdot dt \quad (\text{signe « - » car disparition})$$

équation différentielle que l'on résout ainsi :

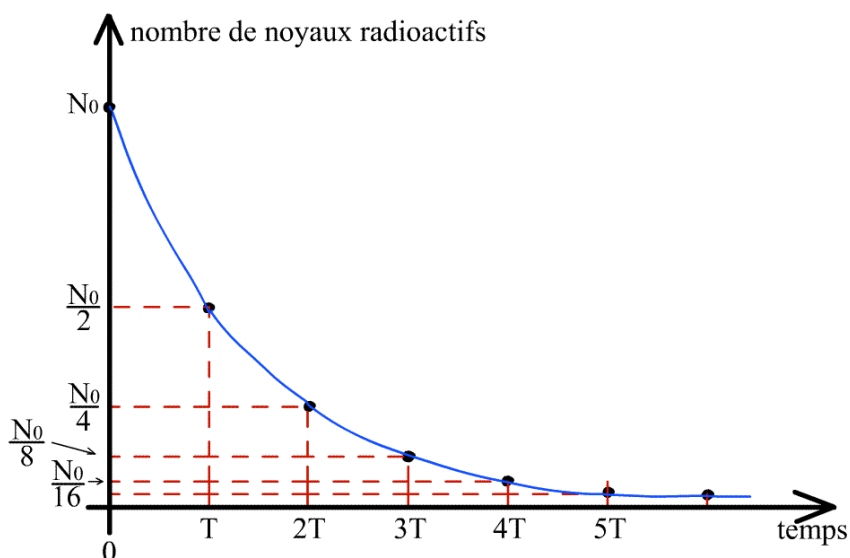
on appelle  $\bar{N}_0$  le nombre moyen de noyaux radioactifs à  $t = 0$

$$\frac{d\bar{N}_t}{\bar{N}_t} = \lambda \cdot dt \implies \int_{\bar{N}_0}^{\bar{N}_t} \frac{d\bar{N}}{\bar{N}} = \int_{t'=0}^{t'=t} \lambda \cdot dt' \implies [\ln(\bar{N})]_{\bar{N}_0}^{\bar{N}_t} = \lambda \cdot (t - 0)$$

et qui donne la loi de décroissance radioactive :

$$\bar{N}_t = \bar{N}_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$$

LOI DE DECROISSANCE RADIOACTIVE :



on définit alors :

- **La période d'un nucléide :**

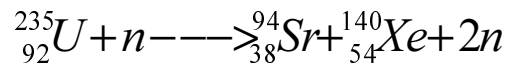
C'est le temps au bout duquel le nombre de noyaux est divisé par deux. Il suffit de résoudre l'équation :

$$\frac{\bar{N}_0}{2} = \bar{N}_0 e^{-\lambda T} \implies T = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda} \text{ s}^{-1}$$

- **L'activité d'un nucléide**

C'est le nombre moyen de désintégrations par seconde. Il suffit de dériver l'expression de  $\bar{N}_t$  et d'en prendre l'opposé (afin de garder une quantité positive). On note  $A_0$  l'activité de la source à un instant initial  $t = 0$  ( $A_0 = \lambda \cdot N_0$ )





à noter que les 2 neutrons produits peuvent à leur tour provoquer de nouvelles fissions ce qui rend la réaction de fission exploitable du point de vue énergétique.

### 3) LA FUSION

Deux éléments légers, ayant une énergie de liaison par nucléon faible, fusionnent pour donner un élément plus lourd ayant une énergie de liaison par nucléon plus élevée, donc plus stable : la réaction fournit alors une grande quantité d'énergie.

## VI DANGERS DE RADIONUCLEIDES

### ABSORPTION DES PARTICULES ET DU RAYONNEMENT

Ejectés du noyau qui se désintègre, les particules et les photons, dont l'énergie est de l'ordre du MeV, peuvent traverser la matière inerte ou vivante. Ces projectiles entrent en collision avec les atomes ou les molécules qui constituent la matière traversée.

Au cours du choc, la perte d'énergie cinétique provoque des ionisations ou même des réactions nucléaires. On peut définir le *parcours moyen* d'un ensemble de particules dans une substance donnée comme la distance moyenne parcourue par ces particules avant d'être arrêtées. Ce parcours moyen dépend de la nature des particules, de leur énergie cinétique initiale et de la substance traversée.

- A- **Les particules  $\alpha$  sont facilement arrêtées.** On admet qu'une feuille de papier suffit à l'arrêter.
- B- **Légères, les particules  $\beta$  peuvent subir de nombreuses collisions successives avant d'être arrêtées** ; celles-ci sont plus pénétrantes que les particules  $\alpha$ , mais moins ionisantes. Leur parcours moyen est inversement proportionnel à la masse volumique de la substance traversée. Une feuille d'aluminium de 5 mm d'épaisseur permet d'arrêter les particules  $\beta$ , dont l'énergie cinétique est inférieure à 2 MeV.
- C- **Les rayons  $\gamma$  sont très pénétrants.** Plutôt qu'un parcours moyen, on détermine, pour un matériau donné, l'épaisseur de *demi-absorption*, c'est-à-dire l'épaisseur qui absorbe, en moyenne, la moitié des photons incidents. En TP nous avons vu que des rayons  $\gamma$  peuvent traverser une épaisseur de 20 mm de plomb (et il en existe de beaucoup plus énergétiques...)
- D- **Les neutrons sont très pénétrants.** Ils interagissent plus ou moins avec les noyaux selon la substance traversée, provoquant d'autres réactions nucléaires et par des chocs avec des noyaux légers (noyaux d'Hydrogène, par exemple) que par des chocs avec des noyaux lourds. Ils ont en effet l'avantage d'être neutre, et donc de ne pas subir la répulsion du noyau lors de leur approche.

### 1) EFFETS BIOLOGIQUES

En traversant la matière vivante, les particules  $\alpha$  et  $\beta$  et les rayonnements  $\gamma$  provoquent des ionisations ou des excitations, d'atomes, susceptibles d'entraîner des réactions chimiques anormales.

Quelques heures ou même quelques années après une exposition au rayonnement, des réactions secondaires peuvent apparaître; des macromolécules fondamentales au niveau cellulaire (ARN, ADN) sont touchés. Des altérations morphologiques sont observées, notamment des effets génétiques; des cellules sont détruites ou leur processus de division altéré.

Lors de retombées radioactives, les nucléides sont absorbés par les plantes et se retrouvent ainsi dans la chaîne alimentaire. Les aliments ingérés véhiculent des radionucléides émetteurs  $\alpha$ ,  $\beta$  ou  $\gamma$ , qui peuvent alors atteindre n'importe quelle cellule de l'organisme. C'est la raison du grand émoi suscité par la catastrophe de Tchernobyl du 25 avril 1986, où des quantités importantes d'isotopes radioactifs (iodes, cobalt, césium, ...) furent émises puis véhiculées par les vents sur une grande partie de l'Europe occidentale.

## 2) GRANDEURS ET UNITES UTILISEES EN RADIOPROTECTION

- **SIEVERT** (Sv): unité légale de mesure des **effets biologiques** de la radioactivité. Cette unité prend en compte **les dommages biologiques** spécifiques de chaque particule. Le sievert correspond au dommage biologique crée par le dépôt d'un gray par les particules de moindre nocivité. A remplacé depuis 1986 une autre unité d'équivalent de dose: le REM (rem)  
1 sievert = 100 rem
- **GRAY** (Gy): unité légale de mesure de **l'énergie déposée** dans la matière par des particules de radioactivité. Le gray correspond au dépôt d'un joule par kilogramme de matière.  
A remplacé depuis 1986 une autre unité de dose absorbée: le RAD (rad)

1 gray = 1 joule/kg = 100 rad

Si un individu à été exposé à plusieurs types de rayonnements, le dose reçue est la somme des doses partielles exprimées. On a défini certaines doses maximales admissibles, compte tenu de l'état actuel de nos connaissances ; ces doses ne sont pas susceptibles de causer des troubles appréciables, mais elles sont néanmoins toujours remises en question.

Pour fixer les idées, voici quelques valeurs caractéristiques :

- dose individuelle due à la radioactivité naturelle (tellurique et cosmique) :1 à 5 mSv.an<sup>-1</sup> ;
- limite réglementaire pour le personnel des centrales nucléaires :50 mSv.an<sup>-1</sup> ;
- limite réglementaire pour la population :5 mSv.an<sup>-1</sup> ;
- dose reçue lors d'une radiographie pulmonaire :20  $\mu$ Sv ;
- dose entraînant la mort dans les heures qui suivent :100 Sv.

Principales sources d'irradiation en France :

<p style="text-align: center;"><b>Irradiations d'origine humaine</b> <b>(dose moyennes annuelles en <math>\mu</math>Sv)</b></p>
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Voyages aériens	1	Ecart individuel considérable ; atteint 2500 à 5000 pour les équipages des avions
Montres à cadran lumineux	5	Atteint 100 pour certains types de montres
Divers (engrais phosphatés, télévision, combustion du charbon, ...)	10	
Voisinage d'une centrales nucléaire	20	Petites variations en fonction des lieux d'habitation ; atteint 40 pour toute personne vivant à proximité immédiate de la centrale
Irradiations autres que médicales ou militaires	40	
Radiologie médicale	1000	Ecart individuel considérable selon l'âge et la fréquence des examens radiologiques

Conséquence sur l'organisme :

<b>Doses (Sv)</b>	<b>Effets (dose unique)</b>
1000	Mort dans les minutes qui suivent
100	Mort dans les heures qui suivent
10	Mort dans les mois qui suivent
7	90% de mortalité dans les mois qui suivent
6	Troubles sanguins et digestifs graves, diarrhées et vomissements, risques de perforations intestinales
4 à 2,5	Nausées, vomissements, vertiges dès la fin de l'irradiation, modification de la formule sanguine, risques mortels élevés en cas d'infection
2	10% de mortalité dans les mois qui suivent
1,5 à 1	Troubles digestifs légers, épilation partielles, fatigabilité persistante ( plusieurs fois ), augmentation significative des cas de cancers, stérilité permanente chez la femme, stérilité pendant 2 à 3 ans chez homme
A partir de 0,05	Modification de la formule sanguine

## VII UTILISATION DES RADIONUCLEIDES

### 1) INDUSTRIE

\* La *gammagraphie* ne diffère en rien, dans son principe, de la radiographie par rayon X : l'image (recueillie sur une plaque photographique) d'une pièce métallique soumise à un rayonnement  $\gamma$  révèle et décèle les défauts d'un organe. Toutes les soudures des cuves des

réacteurs nucléaires sont contrôlées à l'aide de ce procédé. Ses avantages principaux sont la fiabilité et l'autonomie de la source ( $^{60}\text{Co}$ ,  $^{192}\text{Ir}$ ), de dimensions réduites.

\* La *bêta*graphie (utilisation du rayonnement  $\beta$ ) permet l'examen d'objets minces, le contrôle d'épaisseurs, etc.

## **2) MEDECINE ET BIOLOGIE**

a- *Traitement des tumeurs par irradiation* : Le rayonnement  $\gamma$  émis par un corps (le cobalt 60, par exemple) permet de détruire les cellules localisées dans la tumeur cancéreuse.

b- *Traitement d'une tumeur par voie métabolique*. On prépare des molécules marquées par un émetteur  $\beta$  et susceptible d'être fixées sélectivement par les tissus pathologiques. On traite de cette façon l'hyperthyroïdie, le cancer du corps thyroïde et de la maladie de Vaquez (ou polyglobulie), au moyen du phosphore radioactif.

c- *Scintigraphie*. Les radionucléides sont utilisés comme traceurs. Ils participent au métabolisme de la même façon que les éléments naturels auxquels ils sont mélangés. Par exemple, l'iode  $^{131}\text{I}$  va être absorbé au même titre que l'iode naturel. On pourra donc suivre le cheminement de l'iode au cours de son assimilation et contrôler le fonctionnement de la glande thyroïde qui synthétise et sécrète les hormones iodées responsable de nombreuses actions au niveau des cellules. On peut également étudier la morphologie d'un organe rendu radioactif par fixation d'un radioélément émetteur  $\gamma$  ou  $\beta$ . Grâce à divers détecteurs, on obtient une véritable image de l'organe. La chirurgie du cerveau utilise merveilleusement ces méthodes : le phosphore radioactif se localise dans les tumeurs difficiles à distinguer du tissu sain ; le chirurgien peut alors cerner au cours de l'opération même, à l'aide de compteurs Geiger spéciaux sensibles à l'émission  $\beta$ .

d- L'analyse chimique utilise couramment les radioéléments. Le dosage fondé sur la radioactivité est sensible, simple et rapide. On peut ainsi doser des éléments à l'état de traces ( $10^{-10}\text{mol}^{-1}$ ), non dosables chimiquement : hormones de croissance, insuline dans le sang, etc.

e- *Radiostérilisation*. Des milliers d'articles (seringues, pansements, draps, prothèses, ...) sont stérilisés à l'aide de rayon  $\gamma$ , qui tue les microorganismes.

## **3) AGRONOMIE ET AGROALIMENTAIRE**

a- *Modification génétique*. Une irradiation de végétaux peut provoquer des changements génétiques importants. On a ainsi obtenu des pailles de blé, d'orge et de riz mieux adaptées à la moisson mécanique et plus résistantes à la verse.

b- *Conservation des denrées*. Une irradiation  $\gamma$  permet de détruire les insectes dans les denrées stockées et les microorganismes dans les œufs, la viande, etc. c'est aussi un traitement antigerminatif puissant (pommes de terre).

c- *L'utilisation de traceurs* a permis de faire progresser les connaissances en matière d'absorption ou de transport de minéraux. Par exemple, des atomes de phosphore radioactif incorporés dans un engrais se comporteront dans une plante de la même façon que les atomes stables de phosphore. L'agronome pourra ainsi suivre à la trace l'assimilation de l'engrais par la plante et en déduire son efficacité, la date la plus favorable pour le répandre sur le sol, etc.