

# DU NOYAU ATOMIQUE AUX REACTIONS NUCLEAIRES (IPho et CG ; 11/14 ; lycée Hoche Versailles)

## 1. Structure du noyau de l'atome

### 1.1. Dimensions et masse

- 100 000 fois plus petit que l'atome, soit une dimension de l'ordre de  $10^{-15}$  m (fermi ou femtomètre, de symbole fm) ; le noyau d'hydrogène a un rayon de 1,2 fm ; celui d'uranium a un rayon de 7,4 fm

On obtient un bon ordre de grandeur du rayon d'un noyau de nombre de masse A par la relation  $r = r_0 \cdot A^{1/3}$  où  $r_0$  est le rayon du noyau d'hydrogène (on a supposé que les nucléons sont incompressibles et en contact)

- chargé positivement : constitué de **Z protons** (chargés positivement) et de **N neutrons** ( $q = 0$ ),  
soit au total **A = Z + N nucléons**

- contient pratiquement toute la masse de l'atome ; un électron est environ 2000 fois plus léger qu'un proton ou un neutron ; un proton et un neutron ont à peu près la même masse.

Il a été créé l'unité de masse atomique, notée u, pour exprimer facilement la masse des nucléons.

Par définition : **l'unité de masse atomique est égale à 1/12è de la masse d'un atome de  $^{12}_6\text{C}$**

$$1 \text{ u} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

Dans cette unité :  $m(p) \approx m(n) \approx 1 \text{ u}$  et donc **la masse du noyau** (et de l'atome) **ayant A nucléons est approximativement A (en u)**

La masse d'une mole de noyaux (ou d'atomes) est alors égale à peu près à A (en  $\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$ ).

La masse volumique d'un noyau est donc très grande : masse de l'atome concentrée dans un volume beaucoup plus petit que l'atome. Un calcul simple fait pour le noyau d'hydrogène donne pour résultat  $2,3 \cdot 10^{17} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  alors que la masse volumique de l'eau est  $1,0 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ . Une telle masse volumique ne se trouve dans aucun objet macroscopique sur Terre ; on ne la trouve que dans les étoiles à neutrons (étape de fin de vie de certaines étoiles).

### 1.2. Isotopes

Un noyau, dont l'atome a le symbole chimique X, est caractérisé par la notation conventionnelle  $^A_Z X$ .

A est le nombre de masse (ou nombre de nucléons) ; Z est le nombre de charge (ou nombre de protons ou numéro atomique).

La plupart des atomes d'un même élément chimique (caractérisé par le nombre Z) peut avoir des noyaux différents ; on appelle ces noyaux des isotopes.

**Exemples :** - pour l'élément hydrogène, il existe majoritairement  $^1_1\text{H}$  (hydrogène 1) et minoritairement  $^2_1\text{H}$  (hydrogène 2 ou deutérium) ; très minoritairement  $^3_1\text{H}$  (tritium)

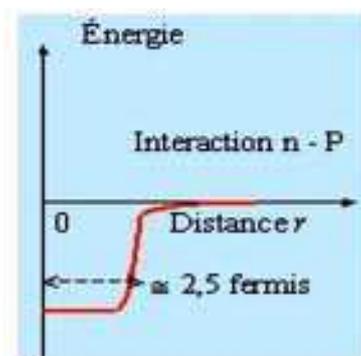
- pour l'élément chlore :  $^{35}_{17}\text{Cl}$  (75% dans la nature) et  $^{37}_{17}\text{Cl}$  (25% dans la nature), ce qui explique la masse atomique molaire de  $35,5 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$  pour l'élément chlore
- pour l'élément uranium : entre autres  $^{238}_{92}\text{U}$  et  $^{235}_{92}\text{U}$  (0,7% dans la nature)
- etc... car le phénomène d'isotopie est très courant

Sur Terre, la proportion d'isotopes d'un élément chimique est la même partout – sauf pour les isotopes du plomb (termes des familles radioactives – voir plus loin)

### 1.3. Cohésion du noyau : interaction forte

Les protons, à l'intérieur d'un noyau, subissent la répulsion électrostatique.

Les nucléons (protons et neutrons) sont soumis à une interaction attractive à très courte distance, appelée interaction forte, de portée de l'ordre de  $10^{-15}$  m qui assure la cohésion du noyau. Cette interaction ne peut être décrite par des relations aussi simples que les interactions gravitationnelle ou électrostatique (voir figure à droite).



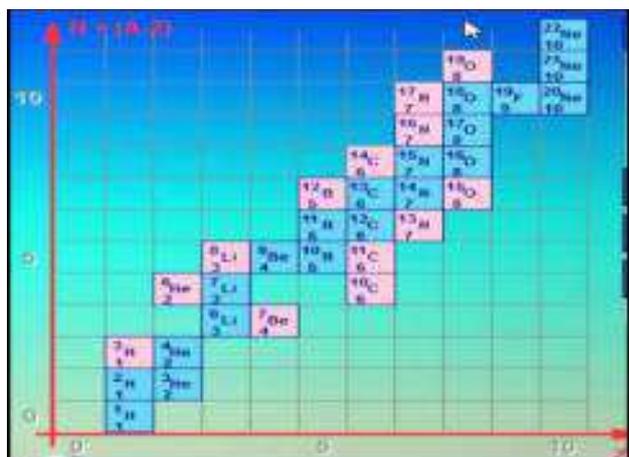
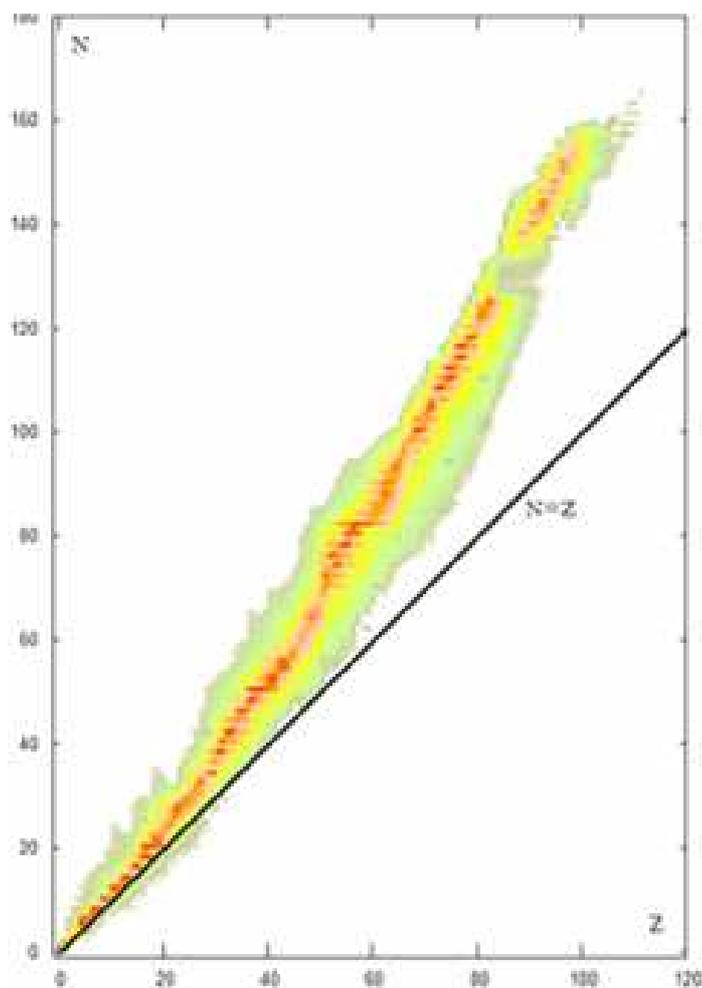
## Isotopes stables et instables

Certains isotopes sont instables ou radioactifs : ce sont des isotopes qui présentent un excès de protons ou de neutrons ou des deux. D'autres sont stables et donc non radioactifs.

Par exemple, le carbone 12 est stable tandis que le carbone 14 est radioactif et est utilisé pour la datation d'objets anciens.

On a regroupé dans un diagramme, appelé **diagramme N Z ou diagramme de Segré**, l'ensemble des noyaux stables et instables (voir ci-dessous). On peut constater que les noyaux instables sont situés de part et d'autre des noyaux stables (en rouge). Ceux-ci sont dans « la vallée de stabilité ».

Pour des valeurs de Z et N petites (de l'ordre de 20 au maximum), les noyaux stables ont autant de protons que de neutrons. Pour des valeurs plus grandes, N est supérieur à Z : l'interaction forte doit l'emporter sur la répulsion électrostatique pour assurer la cohésion des noyaux.



### 1.4. Niveaux d'énergie d'un noyau

De la même façon qu'un atome peut exister dans son état fondamental ou dans un état excité, un noyau présente un niveau fondamental et des niveaux excités. L'énergie d'un noyau est, elle aussi, quantifiée.

Les noyaux stables sont dans leur état fondamental. On peut obtenir des états excités soit par choc avec des particules très énergétiques, soit après une transformation radioactive (voir plus loin). Un noyau excité revient à son état fondamental en émettant un photon d'énergie beaucoup plus grande (environ  $10^6$  fois) qu'un photon émis par un atome. Il s'agit non pas d'un photon de lumière visible (ou IR ou UV ; cf spectres de raies des atomes) mais d'un photon  $\gamma$ .

**Rappel sur l'énergie d'un photon et la fréquence de la « lumière » associée :  $E = h \nu$**  où h est la constante de Planck et vaut  $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  J.s ;  $\nu$  est la fréquence de l'onde électromagnétique associée en hertz (Hz)

On peut aussi écrire  $E = hc / \lambda$  où  $\lambda$  est la longueur d'onde de l'onde électromagnétique associée et c la célérité de la lumière dans le vide.

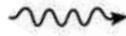
Cette énergie est souvent exprimée en électron-volt (eV) pour les niveaux d'énergie d'un atome.

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

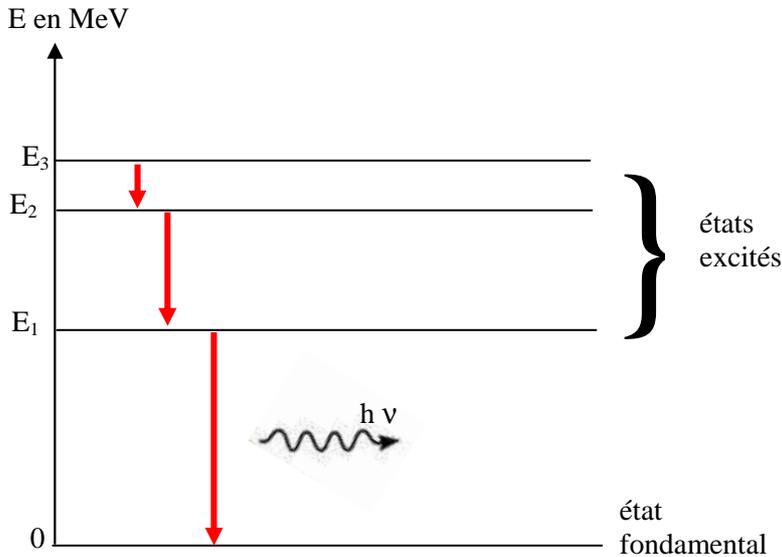
Pour les niveaux d'énergie d'un noyau, on utilise le mégaelectron-volt, ou MeV qui est plus adapté.

Une désexcitation nucléaire se symbolise de la même façon qu'une désexcitation atomique (voir ci-dessous) :

- on a placé un photon émis



- la flèche rouge symbolise la désexcitation ;
- pour la désexcitation d'un atome, les niveaux d'énergie sont en eV
- les traits horizontaux noirs symbolisent les niveaux d'énergie



## 2. Les transformations radioactives ou réactions nucléaires spontanées

Quelques dates essentielles :

- 1896 : découverte de la radioactivité par Becquerel sur des sels d'uranium
- 1898 : Pierre et Marie Curie étudient ce rayonnement inconnu sans en soupçonner les dangers et montrent qu'il n'est pas produit seulement par l'uranium mais aussi par le thorium et le polonium
- 1902 : à partir de plusieurs tonnes de minerai, ils extraient un décigramme de chlorure de radium
- 1903 : prix Nobel de physique pour Henri Becquerel, Pierre et Marie Curie
- 1906 : décès de Pierre Curie ; Marie continue ses recherches
- 1910 : Marie Curie a obtenu un gramme de radium ce qui lui vaut le prix Nobel de chimie en 1911
- 1934 : découverte de la radioactivité artificielle par Irène et Frédéric Joliot-Curie, après avoir créé un isotope artificiel du phosphore

Toutes les études menées ont montré qu'il existe plusieurs formes de radioactivité : alpha, bêta – et bêta + .

Les particules émises sont déviées par un champ électrique et un champ magnétique : elles sont donc chargées.

Les particules  $\alpha$  sont des noyaux  ${}^4_2\text{He}$  ; les particules  $\beta^-$  sont des électrons ; les particules  $\beta^+$  sont des positons, qui sont les antiparticules de l'électron (même masse, charges opposées)

Le plus souvent, ces rayonnements sont accompagnés de rayonnement  $\gamma$  qui est un rayonnement électromagnétique de très courte longueur d'onde et donc très énergétique. Ce rayonnement correspond à la désexcitation du noyau fils.

**Propriétés des transformations radioactives :**

- elles sont spontanées
- elles sont aléatoires
- elles sont inévitables
- elles sont indépendantes des paramètres habituels (pression, température)

Par rapport à ces transformations, nous ne sommes que des spectateurs qui ne peuvent avoir aucune action sur elles.

**Lois de conservation**

- conservation du nombre de nucléons
- conservation de la charge électrique
- conservation de l'énergie
- conservation de la quantité de mouvement

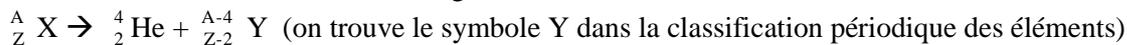
## Écriture d'une transformation radioactive



### 2.1. La radioactivité $\alpha$

#### 2.1.1. Equation et exemples

En utilisant les lois de conservation de la charge et du nombre de nucléons :



Cette radioactivité concerne les noyaux lourds ( $Z > 50$ )

Les particules  $\alpha$  produites ont des vitesses de l'ordre de 15000 à 20000 km/s ; elles sont peu pénétrantes et arrêtées par une feuille de papier ou une dizaine de centimètres d'air.

#### 2.2.2. Bilan énergétique

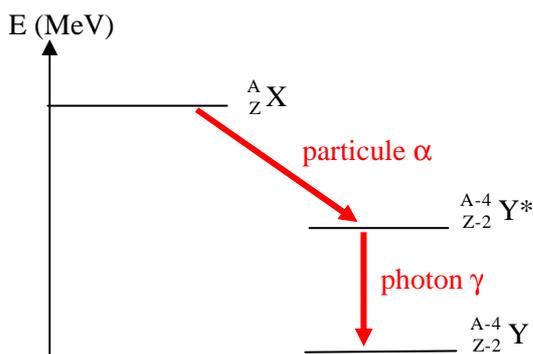
L'énergie libérée est due à une perte de masse  $\delta m$  ( $E = m c^2$ ) :

$$\delta m = m(X) - m(Y) - m({}^4_2 \text{He}) \quad ; \text{ l'énergie correspondante est de l'ordre de } 5 \text{ MeV par désintégration}$$

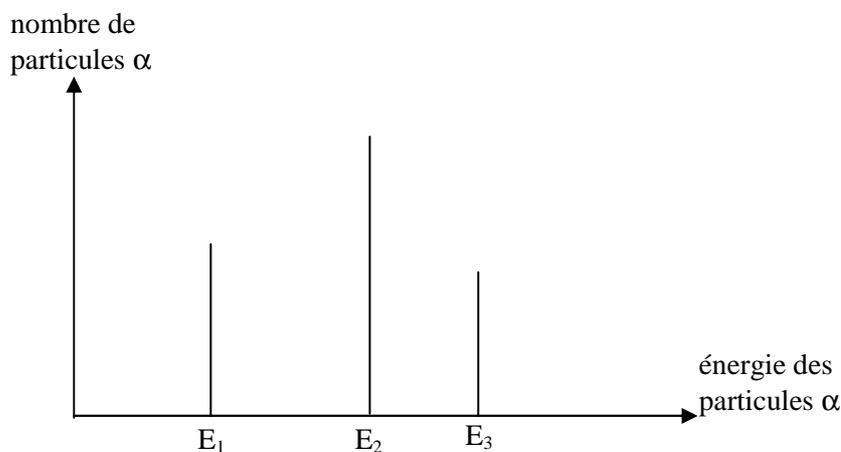
Cette énergie est emportée à 98% par la particule  $\alpha$

Souvent, le noyau fils est obtenu dans un état excité ( $Y^*$ ) ; il se désexcite ensuite par rayonnement  $\gamma$ .

#### 2.2.3. Schéma énergétique



Si il y a plusieurs niveaux d'énergie pour le noyau fils  $Y^*$ , on obtient un spectre de raies avec plusieurs valeurs de l'énergie des particules  $\alpha$ .



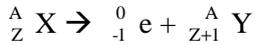
En pratique les raies sont un peu élargies avec des énergies voisines des  $E_i$ .

## 2.2. La radioactivité $\beta^-$

Cette radioactivité concerne les noyaux ayant un excès de neutrons. La particule émise est un électron de grande vitesse (de l'ordre de 0,9 c donc relativiste). Les électrons émis sont très pénétrants : ils peuvent parcourir plusieurs mètres dans l'air ou traverser plusieurs centimètres d'aluminium.

Les électrons émis ne proviennent pas du cortège électronique, mais d'une transformation d'un neutron en proton à l'intérieur du noyau, a priori :  ${}_0^1n \rightarrow {}_{-1}^0e + {}_1^1p$

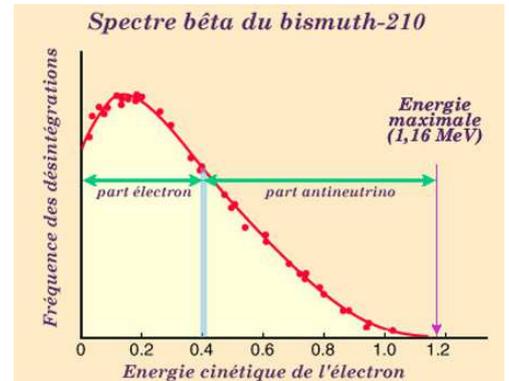
D'où l'écriture provisoire de l'équation de désintégration :



Dans le noyau :  ${}_0^1n \rightarrow {}_{-1}^0 e + {}_1^1p$

Cependant, l'observation du spectre d'énergie des électrons émis montra que ce spectre était continu, ce qui était en contradiction avec la conservation simultanée de l'énergie et de la quantité de mouvement.

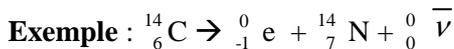
Cette contradiction fut levée (en 1931) par l'hypothèse de l'émission d'une autre particule, sans masse ni charge, l'antineutrino  $\bar{\nu}$ . Cette particule n'interagit quasiment pas avec la matière et est donc très difficile à détecter (elle ne fut détectée qu'en 1956).



L'énergie dégagée au cours de la réaction se partage entre l'électron et l'antineutrino, en différentes proportions, d'où l'obtention d'un spectre continu.

Comme l'émission  $\alpha$ , l'émission  $\beta^-$  est souvent suivie d'une émission  $\gamma$  car le noyau fils est souvent obtenu dans un état excité. On obtient un schéma énergétique similaire à celui de l'émission  $\alpha$ .

L'équation de désintégration s'écrit donc :  ${}_Z^A X \rightarrow {}_{-1}^0 e + {}_{Z+1}^A Y + {}_0^0 \bar{\nu}$  et dans le noyau :  ${}_0^1n \rightarrow {}_{-1}^0 e + {}_1^1p + {}_0^0 \bar{\nu}$

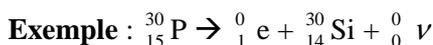


## 2.3. La radioactivité $\beta^+$

Cette radioactivité concerne les noyaux ayant un excès de protons. Au cours de cette désintégration, la particule chargée émise est un positon, antiparticule de l'électron. Cette désintégration s'accompagne de l'émission d'un neutrino  $\nu$  qui n'interagit lui non plus quasiment pas avec la matière.

Dans le noyau, un proton se transforme en un neutron, un positon et un neutrino :  ${}_1^1p \rightarrow {}_0^1n + {}_1^0e + {}_0^0\nu$

L'équation de désintégration s'écrit :  ${}_Z^A X \rightarrow {}_1^0 e + {}_{Z-1}^A Y + {}_0^0 \nu$



## 2.4. La radioactivité $\gamma$

Nous avons déjà vu que les émissions précédentes s'accompagnent le plus souvent d'émission  $\gamma$  car le noyau fils est émis dans un état excité.

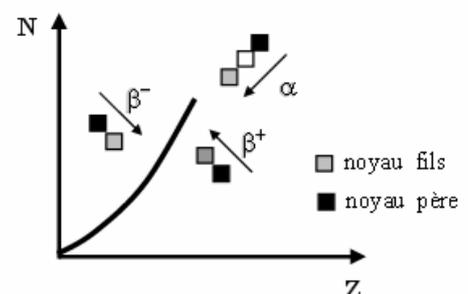
Ce rayonnement est très pénétrant ; il peut traverser plusieurs centimètres de plomb (le matériau absorbant le plus ce rayonnement et donc le meilleur protecteur)

Le photon  $\gamma$  emporte la quasi-totalité de l'énergie de désexcitation du noyau. Les spectres d'énergie des photons  $\gamma$  sont discontinus (spectres de raies) car les niveaux d'énergie des noyaux sont quantifiés.

## 2.5. Position des noyaux radioactifs dans le diagramme (N, Z)

On remarque dans le diagramme ci-contre (d'après lycée Tunis) que :

- les noyaux émetteurs  $\alpha$  sont à droite de la vallée de stabilité
- les noyaux émetteurs  $\beta^-$  sont à gauche de la vallée de stabilité
- les noyaux émetteurs  $\beta^+$  sont à droite de la vallée de stabilité





## 2.8. Demi-vie d'un noyau radioactif

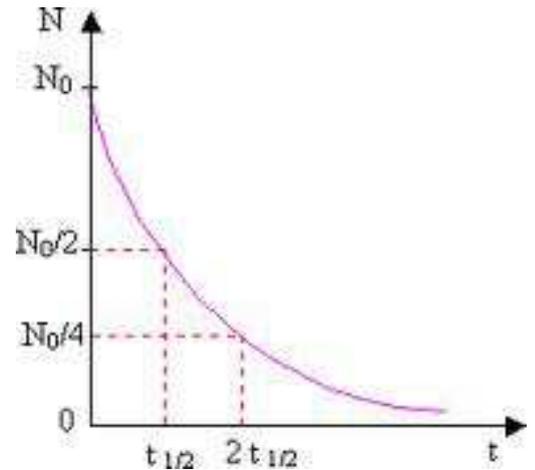
Très souvent, on ne donne pas la constante radioactive  $\lambda$  mais on donne la demi-vie (ou période dans d'anciens livres) d'un noyau radioactif. Cette demi-vie est notée  $t_{1/2}$  ou  $T$ .

Par définition, **la demi-vie d'un noyau radioactif est le temps nécessaire pour que la moitié des noyaux initialement présents ait disparu par désintégration.**

D'où la courbe ci-contre :

Il est facile de voir que la moitié des noyaux disparaît dès qu'il s'écoule une durée égale à la demi-vie.

La demi-vie peut aller d'une fraction de seconde à plusieurs millions d'années.



### Relation entre $\lambda$ et $t_{1/2}$

D'une part :  $N(t_{1/2}) = N_0 / 2$

D'autre part, d'après la loi de décroissance :  $N(t_{1/2}) = N_0 \exp(-\lambda t_{1/2})$

On en déduit :  $1/2 = \exp(-\lambda t_{1/2})$

En inversant cette égalité :  $2 = \exp(\lambda t_{1/2})$

Ce qui est équivalent à :  $\lambda t_{1/2} = \ln 2$

Cette relation permet de passer facilement de la demi-vie à la constante radioactive et réciproquement.

## 2.9. Activité d'une source radioactive

On entend souvent parler d'une source radioactive de ....becquerels (Bq).

Ce nombre indique l'activité de la source radioactive, c'est-à-dire **le nombre de désintégrations qui s'y produisent en une seconde.**

Cette notion ne s'applique qu'aux noyaux dont la demi-vie est suffisamment longue. Elle n'a pas de sens pour des noyaux dont la demi-vie n'est que d'une fraction de seconde.

### Relation entre l'activité $A$ et le nombre $N$ de noyaux :

$$A = - \frac{\partial N}{\partial t} \text{ si la durée } \delta t \text{ est courte } (\delta t \text{ petit devant } t_{1/2})$$

=> d'après le §2.7 en page 6 :  $A = \lambda N$  ;  $A$  en Bq et  $\lambda$  en  $s^{-1}$

### Evolution de $A$ en fonction du temps :

Comme l'activité  $A$  est proportionnelle au nombre  $N$  de noyaux, la loi de variation est aussi une décroissance exponentielle :

$$A = A_0 \exp(-\lambda t)$$

La forme de la courbe  $A(t)$  est la même que celle de la courbe  $N(t)$ .

Au bout d'une durée  $t_{1/2}$ , l'activité  $A$  est aussi divisée par 2.

## 2.10. Applications et dangers de la radioactivité

- **application à la datation d'objets anciens** : il faut adapter la méthode à l'âge supposé des objets ; par exemple, le carbone 14 a une demi-vie de 5600 ans ; il ne peut servir à dater un objet de plusieurs millions d'années car il ne reste plus de carbone 14 ; il faut choisir un autre isotope radioactif (voir méthodes en géologie)

- **applications médicales**

- **dangers** (vous trouverez cela facilement sur internet...)

**Dans la suite, nous laisserons de côté la radioactivité pour nous intéresser aux réactions nucléaires provoquées, les réactions de fission et de fusion. Nous retrouverons les bilans énergétiques des désintégrations radioactives à la fin.**

### 3. Energie de liaison d'un noyau

#### 3.1. Défaut de masse d'un noyau

Pour tous les noyaux, à l'exception du noyau  ${}^1_1\text{H}$ , la masse du noyau est inférieure à la masse des nucléons qui le constituent.

A vous de le vérifier pour le noyau  ${}^4_2\text{He}$  :  $m({}^4_2\text{He}) = 6,64472 \cdot 10^{-27}$  kg ;  $m(\text{p}) = 1,672623 \cdot 10^{-27}$  kg ;  
 $m(\text{n}) = 1,674929 \cdot 10^{-27}$  kg

Calculez aussi le défaut de masse  $\delta m$  (choisi comme étant positif). Attention, vous devrez garder suffisamment de chiffres sur votre calculatrice.

#### 3.2. Energie de liaison $E_l$

Cette énergie est positive. C'est l'énergie qu'il faut fournir à un noyau pour le briser en ses constituants, le noyau et les nucléons étant au repos.

L'énergie de liaison est reliée au défaut de masse par la relation :  $E_l = \delta m \cdot c^2$

Unités : énergie en joule, défaut de masse en kg,  $c = 3,00 \cdot 10^8$  m  $\cdot$  s $^{-1}$

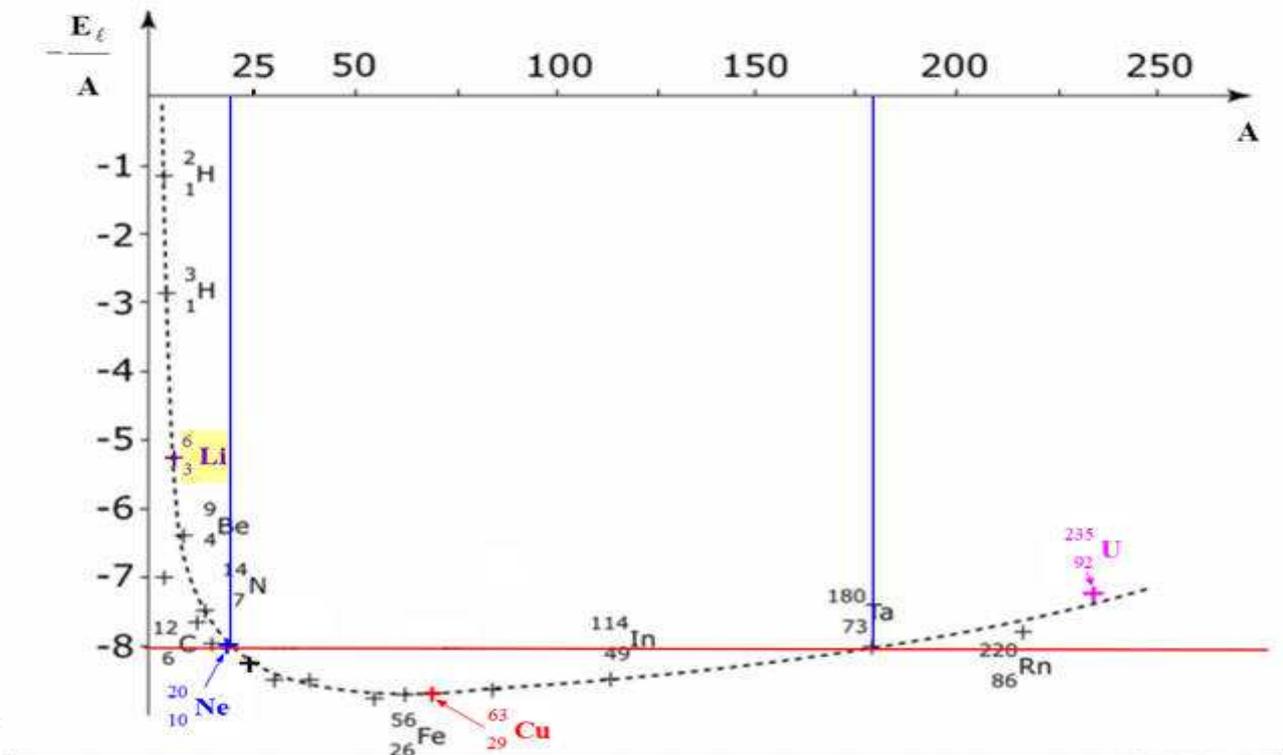
A vous de calculer l'énergie de liaison du noyau  ${}^4_2\text{He}$  en joule, puis en MeV (1 MeV =  $1,6 \cdot 10^{-13}$  J)

#### 3.3. Energie de liaison par nucléon $E_l / A$

unité : MeV/ nucléon

Plus un noyau a un nombre important de nucléons, plus l'énergie de liaison est grande. Pour comparer l'énergie de liaison d'un noyau à un autre, il faut rapporter cette énergie à un seul nucléon, d'où le calcul de  $E_l / A$ .

Pour comparer la stabilité de divers noyaux vis-à-vis des réactions de fission et de fusion, il a été tracé une courbe, appelée **courbe d'Aston**, qui représente  $-E_l / A$  en fonction de  $A$ .



Un noyau stable se trouve au plus bas de cette courbe (il a l'énergie de liaison par nucléon la plus grande), comme une balle laissée dans un très grand bol finit par se retrouver en bas. Pour un tel noyau, l'énergie de liaison par nucléon est au moins de 8 MeV/nucléon.

Un noyau lourd de numéro atomique supérieur à 170 a une énergie de liaison par nucléon plus petite : il est moins stable que les précédents et pourra donner lieu à des réactions de fission (détaillées ci-après).

Un noyau léger de numéro atomique inférieur à 20 a une énergie de liaison par nucléon plus petite : il est moins stable que les premiers et pourra donner lieu à des réactions de fusion nucléaire (détaillées ci-après).

Schématiquement :

- dans une réaction de fission, un gros noyau est heurté par un neutron, se casse en deux noyaux plus petits en libérant de l'énergie et au moins deux autres neutrons
- dans une réaction de fusion, deux petits noyaux fusionnent pour former un noyau plus gros en libérant de l'énergie

## 4. Fission nucléaire ou réaction nucléaire provoquée par capture neutronique

### 4.1. Réaction

**C'est l'éclatement d'un noyau lourd en deux noyaux plus légers sous l'impact d'un neutron lent.**

Le neutron doit être lent pour être absorbé par le **noyau fissile** ; il se forme alors un noyau instable qui évolue vers un état plus stable (deux noyaux plus légers appelés produits de fission) et deux ou trois neutrons, sans oublier de l'énergie. Si les neutrons sont trop rapides, ils « rebondissent » sur le noyau comme une balle sur un mur.

Les neutrons produits sont à leur tour capables de donner lieu à d'autres réactions de fission, d'où des réactions en chaîne.

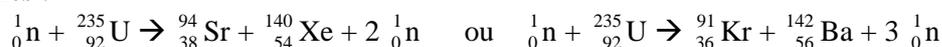
Si le processus n'est pas contrôlé, on aboutit à une explosion, comme les bombes atomiques A, ou les accidents de Tchernobyl et de Fukushima.

Dans les centrales nucléaires civiles, la température et donc le nombre de neutrons sont contrôlés. Des protections ont été prévues avec des barres de cadmium ou de bore, matériaux qui absorbent de nombreux neutrons.

(pour le détail des installations, voir schéma des centrales PWR, BWR, EPR....)

Les équations de réaction obéissent aux mêmes lois que les équations de la radioactivité.

**Exemples :**



Beaucoup d'autres noyaux peuvent être obtenus : en général, un des produits de fission a un nombre de charge voisin de 100 et l'autre a un numéro de charge voisin de 140. Ces produits de fission sont radioactifs ou émis dans un état excité et leur manipulation nécessite donc des précautions.

Les noyaux pouvant donner lieu à une fission sont appelés noyaux fissiles. Le plus important, car utilisé dans les centrales, est l'uranium 235 (cf ex ci-dessus)

Le  ${}_{90}^{227}\text{Th}$  et le plutonium 239 ( ${}_{94}^{239}\text{Pu}$ ) sont également fissiles. Le plutonium, noyau artificiel, est produit dans les centrales et participe au dégagement d'énergie par réactions de fission.

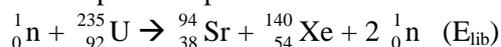
La fission a été beaucoup étudiée avant d'être utilisée dans les centrales nucléaires pour la production d'énergie, qui est leur finalité. Voyons maintenant pourquoi de l'énergie est libérée et comment faire un bilan d'énergie.

### 4.2. Bilan énergétique

En général, une réaction de fission libère 200 MeV environ par réaction, donc par noyau d'uranium 235.

Par comparaison avec l'énergie dégagée par une réaction chimique : la fission d'un kilogramme d'uranium 235 libère autant d'énergie que la combustion de 2000 tonnes de pétrole.

Prenons l'exemple de la première réaction écrite ci-dessus :



Bilan d'énergie :  $m(\text{réactifs}) \cdot c^2 = m(\text{produits}) \cdot c^2 + E_{\text{lib}}$

Cette énergie libérée est emportée essentiellement sous forme d'énergie cinétique par les produits et les deux neutrons. Par chocs, cette énergie est communiquée aux atomes et molécules voisins, ce qui, à l'échelle macroscopique, se traduit par une élévation de température.

On peut avoir à calculer cette énergie soit à partir des masses des noyaux intervenant dans la réaction, soit à partir des énergies de liaison par nucléon de ces noyaux.

Menons le calcul dans la seconde hypothèse, ce qui permettra de constater que c'est la différence d'énergie de liaison par nucléon dans les noyaux qui est à l'origine de l'énergie produite :

**Données :**

$$El / A ({}^{94}_{38}\text{Sr}) = 8,6 \text{ MeV/nucléon} ; El / A ({}^{140}_{54}\text{Xe}) = 8,3 \text{ MeV/nucléon} ; El / A ({}^{235}_{92}\text{U}) = 7,6 \text{ MeV/nucléon}$$

$$E_{\text{lib}} / c^2 = [m(\text{réactifs}) - m(\text{produits})]$$

$$= m ({}^{235}_{92}\text{U}) - m ({}^{94}_{38}\text{Sr}) - m ({}^{140}_{54}\text{Xe}) - m ({}_0^1\text{n})$$

Par ailleurs, la masse d'un noyau est obtenue à partir de la masse des nucléons le constituant et de l'énergie de liaison du noyau :

$$m ({}^{235}_{92}\text{U}) c^2 = 92 m(\text{p}) c^2 + 143 m(\text{n}) c^2 - El ({}^{235}_{92}\text{U})$$

$$\text{De même : } m ({}^{94}_{38}\text{Sr}) c^2 = 38 m(\text{p}) c^2 + 56 m(\text{n}) c^2 - El ({}^{94}_{38}\text{Sr})$$

$$\text{et : } m ({}^{140}_{54}\text{Xe}) c^2 = 54 m(\text{p}) c^2 + 86 m(\text{n}) c^2 - El ({}^{140}_{54}\text{Xe})$$

Par conservation du nombre de nucléons et de la charge électrique, il y a autant de protons avant et après réaction ; idem pour les neutrons ; il ne reste plus que les énergies de liaison :

$$E_{\text{lib}} = El ({}^{94}_{38}\text{Sr}) + El ({}^{140}_{54}\text{Xe}) - El ({}^{235}_{92}\text{U}) = 94 \cdot \frac{El}{A} ({}^{94}_{38}\text{Sr}) + 140 \cdot \frac{El}{A} ({}^{140}_{54}\text{Xe}) - 235 \cdot \frac{El}{A} ({}^{235}_{92}\text{U})$$

$$= 94 \times 8,6 + 140 \times 8,3 - 235 \times 7,6 = \mathbf{184 \text{ MeV}}$$

Par comparaison, la combustion d'un atome de carbone ou d'une molécule d'alcane léger libère environ 5 eV.

### 4.3. Noyaux fertiles

Certains noyaux, comme l'uranium 238, sont fertiles, c'est-à-dire peuvent engendrer, par réaction nucléaire, un noyau fissile :  ${}^{238}_{92}\text{U} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^{239}_{92}\text{U}$  suivi de  ${}^{239}_{92}\text{U} \rightarrow {}^0_{-1}\text{e} + {}^{239}_{93}\text{Np}$  (radioactivité  $\beta^-$ ) suivi de  ${}^{239}_{93}\text{Np} \rightarrow {}^0_{-1}\text{e} + {}^{239}_{94}\text{Pu}$

Dans les centrales, l'uranium 238, très majoritaire (97%) prend ainsi une part importante à la production d'énergie.

## 5. Fusion thermonucléaire

### 5.1. Réaction

C'est la **réunion de deux noyaux légers en un noyau plus lourd.**

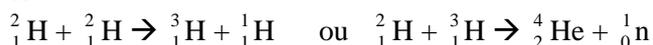
La réaction a lieu à condition de pouvoir vaincre la répulsion électrostatique entre les noyaux, donc de les rapprocher suffisamment près pendant suffisamment longtemps – ce qui nécessite une température très élevée, d'au moins 15 millions de degrés, voire plus suivant les réactions.

**Les réactions de fusion se produisent dans le coeur des étoiles, y produisant l'énergie.**

A l'heure actuelle, la fusion nucléaire n'est pas maîtrisée par l'Homme malgré les nombreuses études et essais réalisés depuis 1950 !

La difficulté est d'aboutir à un bilan d'énergie positif (produire plus d'énergie que ce qui a été consommé pour que la fusion se produise). En effet, tant le confinement des noyaux par laser (projet MEGAJOULE) que le confinement magnétique (projet ITER) consomment énormément d'énergie.

**Exemples :**



Le deutérium est présent en petite quantité dans l'eau (0,2% des noyaux d'hydrogène sur Terre) ; le tritium n'est quasiment pas présent sur Terre et doit être fabriqué par réaction nucléaire.

Les produits de fusion ne sont pas radioactifs, mais les neutrons produits peuvent cependant fabriquer quelques noyaux radioactifs.

## 5.2. Bilan énergétique

Le raisonnement et la méthode sont les mêmes que pour la réaction de fission ; une réaction de fusion produit de l'énergie car l'énergie de liaison par nucléon des noyaux produits est plus grande que celle des noyaux ayant fusionné.

Pour la réaction :  ${}^2_1\text{H} + {}^3_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^1_0\text{n}$ , le calcul montre que l'énergie libérée est de l'ordre de 17 MeV par réaction.

Si l'on veut comparer cette énergie à celle obtenue par une réaction de fission, il faut ramener l'énergie produite à l'unité de masse : 0,80 MeV/u pour la fission et 3,4 MeV/u pour la fusion, soit le même ordre de grandeur.

## 6. Bilan énergétique pour la radioactivité

Mêmes raisonnement et méthode que pour la fission et la fusion.

Pour la désintégration d'un noyau de radium, il est libéré une énergie de 4,9 MeV – mais la radioactivité est aléatoire ; cette énergie libérée n'est utilisée qu'à des fins médicales.

**Pour information : schéma d'une centrale PWR ou REP (France) en haut et d'une centrale BWR (Fukushima) en bas**

**Trouvez une différence importante dans le domaine de la sécurité !**

