

## C3: Réactions nucléaires, radioactivité et fission

### 1. Définitions

#### a) Nucléides (= noyaux atomiques)

Les nucléides renferment les nucléons: les protons (portant une charge élémentaire +e) et les neutrons (charge nulle).

Symbole :  $\boxed{\begin{matrix} A \\ Z \\ X \end{matrix}}$

A est le nombre de masse et représente le nombre de nucléons.

Z est le nombre atomique et représente le nombre de charges positives élémentaires ou le nombre de protons = nombre d'électrons de l'atome neutre

N est le nombre de neutrons.

On a :  $\boxed{N = A - Z}$

Exemples :

${}^4_2\text{He}$  renferme 4 nucléons : 2 protons et  $4 - 2 = 2$  neutrons.

${}^{238}_{92}\text{U}$  renferme 92 protons et  $238 - 92 = 146$  neutrons.

Chaque nucléide à une masse nucléaire précise : <http://www.periodensystem-online.de>

	<b>1 u</b> unité de masse atomique	<b>Neutron</b>	<b>Proton</b>	<b>Electron</b>
<b>Charge (C)</b>		0	$e = 1,6022 \cdot 10^{-19}$	-e
<b>Masse (kg)</b>	$1,6605 \cdot 10^{-27}$	$1,674 \cdot 10^{-27}$	$1,672 \cdot 10^{-27}$	$9,109 \cdot 10^{-31}$
<b>Masse (en u)</b>	1	1,008 665	1,007 276	0,000 548 6
<b>Energie au repos (MeV)</b>	931,5	939,6	938,3	0,511

#### b) Quantité de matière n et nombre d'Avogadro $N_A$

Elle caractérise la quantité de matière (Stoffmenge) contenue dans un corps.

Unité : la mole (mol) est la quantité de matière d'un système contenant autant d'entités élémentaires qu'il y a d'atomes dans 12 grammes de carbone 12.

Le nombre d'Avogadro constitue le nombre d'entités (atomes, molécules) contenues dans une quantité de matière de 1 mole, donc

$$N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{mol}}$$

**c) Unité de masse atomique (1 u)**

1 u est la masse correspondant à  $\frac{1}{12}$  de la masse d'un atome de  $^{12}\text{C}$ .

Comme la masse d'une mole ( $6,02 \cdot 10^{23}$ ) atomes de  $^{12}\text{C}$  vaut 12g on obtient :

$$1u = \frac{1g}{N_A} = \frac{0,001kg}{6,02 \cdot 10^{23}} = 1,661 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

Valeur précise de u :  $1u = 1,660\,540 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

**d) Masse molaire  $\mathcal{M}$ , masse atomique M et masse nucléaire m**

Elle constitue la masse d'une mole d'atomes ou de molécules, donc de  $6,02 \cdot 10^{23}$  atomes ou molécules.  $\mathcal{M} = \frac{\text{masse de l'échantillon } m}{\text{quantité de matière } n}$  en kg/mol.

P.ex.  $^{35}_{17}\text{Cl}$  :  $\mathcal{M} = 0,034969 \text{ kg/mol} = \mathbf{34,969} \text{ g/mol}$ .

La masse molaire exprimée en g/mol a la même valeur que la masse atomique exprimée en u.

Masse atomique  $M(^{35}_{17}\text{Cl}) = \frac{M}{N_A} = 5,806 \cdot 10^{-23} \text{ g} = 5,806 \cdot 10^{-26} \text{ kg} = \mathbf{34,969} \text{ u}$

Application : calcul du nombre d'atomes dans un échantillon de masse m :

$$N = \frac{m}{M} \text{ avec masse en } \underline{\text{kg}} \text{ et } M \text{ en } \underline{\text{kg}}.$$

Attention distinguer :

Masse atomique:  $M(\text{He4}) = 4,002\,603 \text{ u}$  et  $M(\text{Cl35}) =$

Masse nucléaire :  $m_{\alpha} = M(\text{He4}) - 2m_e = 4,001\,506 \text{ u}$   $m(\text{Cl35}) =$

**f) Isotopes d'un élément chimique**

Noyaux d'un même élément chimique, mais renfermant des nombres de neutrons différents.

Exemples :

- $^{35}_{17}\text{Cl}$  contient 17 protons et 18 neutrons, constitue 75% du chlore naturel;
- $^{37}_{17}\text{Cl}$  contient 17 protons, mais 20 neutrons et constitue 25% du chlore naturel.
- $^{238}_{92}\text{U}$  (99 % de l'U naturel) et  $^{235}_{92}\text{U}$  (1% de l'U naturel)
- $^1_1\text{H}$  hydrogène;  $^2_1\text{H}$  deutérium;  $^3_1\text{H}$  tritium.

La masse atomique des isotopes est indiquée dans les tableaux :  $m_{\text{nucl}} = M_{\text{atomique}} - Z \cdot m_e$   
[http://physik.diekirch.org/1er/1993AWMass\\_1.pdf](http://physik.diekirch.org/1er/1993AWMass_1.pdf) Unités de masse atomique : u !!

## 2. Lois de conservation

Dans toutes les réactions nucléaires (radioactivité naturelle ou artificielle, bombardement par des particules, fission, fusion,...), un noyau atomique est transformé, on observe que les grandeurs suivantes sont conservées :

- la somme énergie-masse;
- le nombre de nucléons;
- la charge électrique;
- la quantité de mouvement;
- le moment cinétique (grandeur caractérisant l'état de rotation).

## 3. Déficit de masse

Dans les réactions nucléaires, la masse n'est pas conservée, mais la somme **masse plus équivalent en masse de l'énergie** est conservée.

Le déficit de masse  $\Delta m$  est la différence entre la masse des particules initiales et celle des particules finales.

Le déficit de masse apparaît sous forme d'énergie de réaction:  $E = \Delta m \cdot c^2$

### **Exemple : réaction d'annihilation**

1 électron et 1 positron s'annihilent et donnent naissance à deux photons de même énergie partant dans des sens diamétralement opposés.

L'énergie des deux particules est :

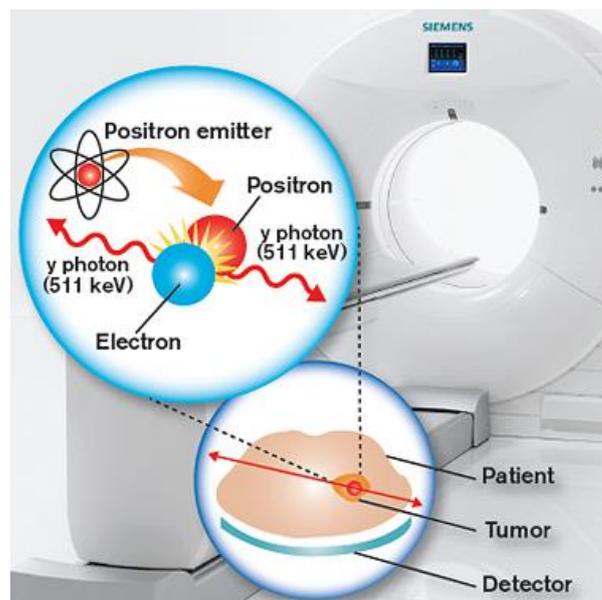
$$2 E_0 = 2 m_0 c^2 = 2 \cdot 511 \text{ keV.}$$

L'énergie de chaque photon est donc 511 keV.

Cette radiation est caractéristique dans les réactions d'annihilation.

*Application : tomographe à positrons (PET)*

*On utilise une molécule radioactive  $\beta^+$  attachée à du glucose pour afficher les organes anormalement actifs*



## 4. Radioactivité

### a) Définition

On appelle radioactivité la transformation de noyaux atomiques au cours desquelles un rayonnement est émis.

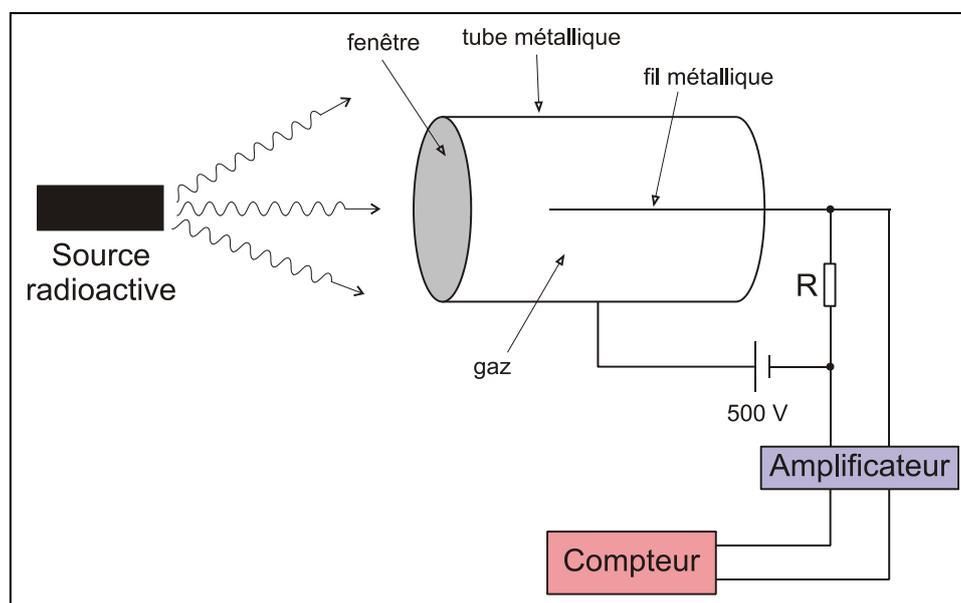
Ces rayonnements sont par exemple

- des particules matérielles: rayons **alpha**, composés de noyaux  ${}^4_2\text{He}$  (ou  ${}^4_2\alpha$ ); rayons **bêta**, composés d'électrons  ${}^0_{-1}\text{e}$  (ou  ${}^0_{-1}\beta^-$ ) ou de positrons  ${}^0_1\bar{\text{e}}$  (= antiélectrons) ( ${}^0_1\beta^+$ ); neutrons ( ${}^1_0\text{n}$ ); protons ( ${}^1_1\text{p}$ ).
- des rayons **gamma** ( $\gamma$ ) constitués de photons de très grande énergie (très grande fréquence)

La **radioactivité naturelle** est celle qui existe naturellement dans la nature.

La **radioactivité artificielle** est celle obtenue par bombardement de noyaux atomiques par des particules (neutrons, protons, particules  $\alpha$ , électrons, positrons, ...).

### b) Détecteur de rayonnement radioactif: le compteur Geiger-Müller



Le principe de fonctionnement est basé sur l'effet ionisant du rayonnement radioactif. Chaque rayon  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  peut ioniser le gaz à l'intérieur du tube. Il apparaît alors un courant électrique de courte durée à travers le gaz et la résistance R. Aux bornes de celle-ci naît alors une impulsion de tension qui est amplifiée et envoyée vers un haut-parleur ("bip-bip") et un compteur d'impulsions. Malheureusement un compteur Geiger-Müller ne renseigne pas sur la nature et l'énergie des rayonnements.

## 5. Types de radioactivité

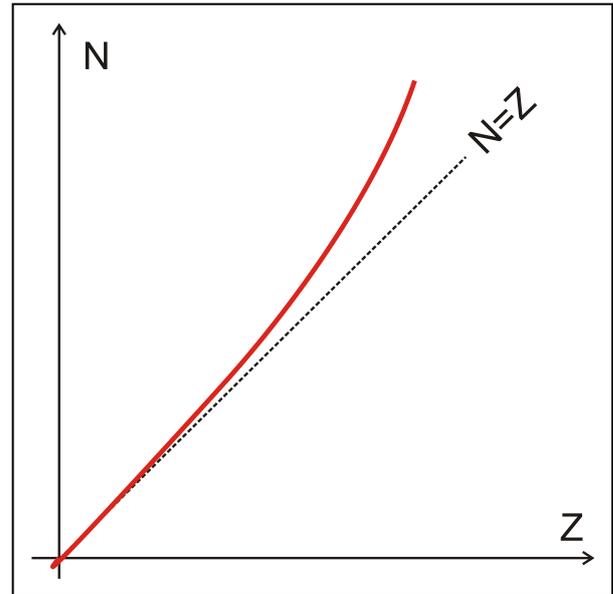
### a) Courbe de stabilité

La courbe de stabilité des nucléides indique l'allure du nombre de neutrons en fonction du nombre de protons pour les presque 300 nucléides stables connus.

En principe les noyaux stables entourent la courbe de près tandis que les noyaux radioactifs s'en écartent davantage.

Les noyaux ont tendance à se rapprocher par l'émission de rayonnements radioactifs.

Carte de nucléides existents en  $(Z,N)$  comme ici ou plus souvent  $(N,Z)$  même 3D.



Link construire un noyau: [http://chimie.ostralo.net/entites\\_chimiques/](http://chimie.ostralo.net/entites_chimiques/)

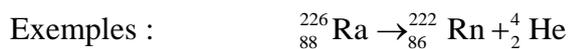
### b) Activité alpha

Certains noyaux lourds ( $N+Z > 200$ ) émettent des particules alpha.



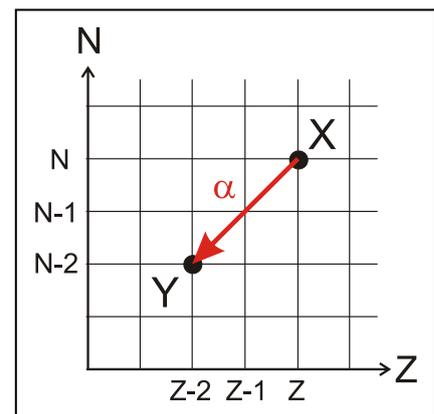
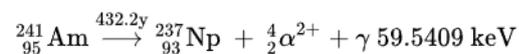
Le nucléide X est appelé "noyau père", le nucléide Y "noyau fils".

X et Y correspondent à des éléments chimiques différents.



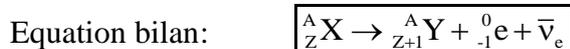
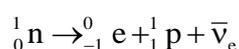
Le noyau fils est dans un état excité et émet un photon gamma de 186keV.

Americium-241 decays mainly via [alpha decay](#), with a weak [gamma ray](#) byproduct. The  $\alpha$ -decay is shown as follows:

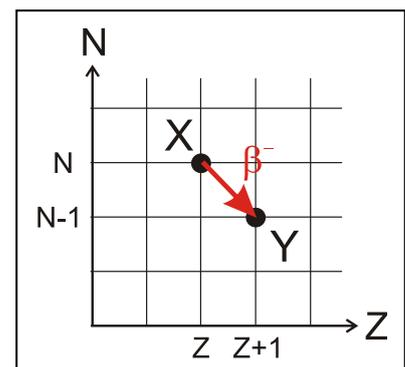
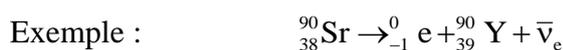


### c) Activité $\beta^-$

Dans les atomes avec un surplus de neutrons (situés à gauche de la courbe de stabilité), 1 neutron se décompose en un proton et *un antineutrino électronique* suivant l'équation :



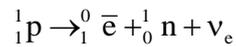
X et Y correspondent à des éléments chimiques différents.



L'antineutrino garantit la conservation de la quantité de mouvement et de l'énergie.

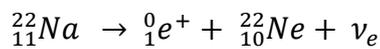
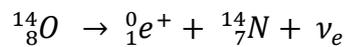
### d) Activité $\beta^+$

Les noyaux avec trop de protons (ou trop peu de neutrons, donc situés à droite de la courbe de stabilité) émettent un positron qui provient de la décomposition d'un proton en un positron, un neutron et un *neutrino électronique*:



X et Y correspondent à des éléments chimiques différents.

Exemples :

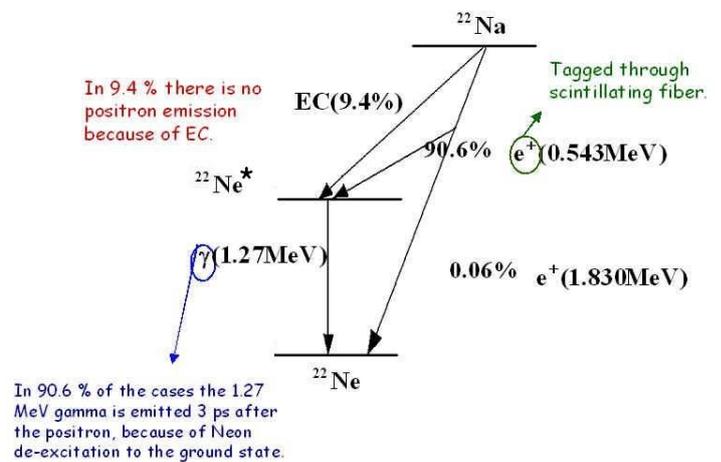
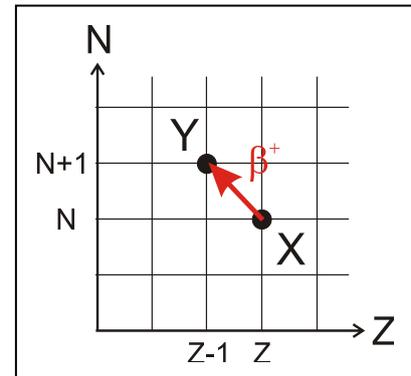
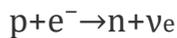


Le neutrino garantit la conservation de la quantité de mouvement et de l'énergie.

Pour compliquer la chose plusieurs voies de désintégration parallèles sont possibles.

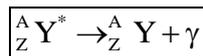
*Remarque en dehors du programme :*

*Certains isotopes se transforment par capture d'un électron interne (EC) par un proton du noyau (pas au programme).*



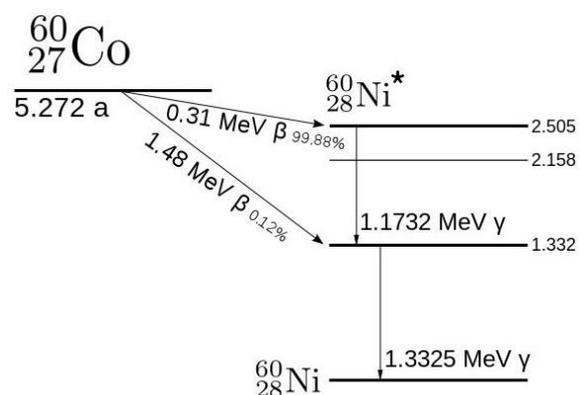
### e) Activité $\gamma$

Après une transformation radioactive du noyau, le noyau fils est souvent dans un état excité (\*) et se désexcite en émettant un (ou plusieurs) photons de haute énergie (gamma).



### f) Remarques

- Toutes les désintégrations sont accompagnées d'une libération d'énergie !
- Il existe d'autres types de radioactivité : émission de protons, neutrons, ...
- **Les neutrinos et antineutrinos électroniques sont des particules de charge électrique nulle, de masse au repos très petite, et n'interagissant que très peu avec la matière.**



## 6. Loi de la désintégration radioactive

La désintégration radioactive est un **phénomène aléatoire** qui aura lieu avec une certaine probabilité. Lorsqu'un noyau se désintègre, il est transformé en un autre nucléide, qui peut être radioactif ou non.

### a) Loi de décroissance radioactive

Le but est de déterminer l'évolution statistique du **nombre de nucléides radioactifs présents** dans un échantillon.

Si à l'instant  $t = 0$  on a  $N_0$  noyaux radioactifs, après un certain temps  $t$  il reste  $N(t) < N_0$ .

Soit  $dN$  le **nombre de noyaux qui se désintègrent** dans un intervalle de temps  $dt$ .

$dN$  est d'autant plus grand que:

1. le nombre  $N$  de noyaux radioactifs présents est plus grand:  $dN \sim N$
2. la durée  $dt$  de l'intervalle de temps est plus grande:  $dN \sim dt$

Par suite :  $dN \sim N \cdot dt$

Donc :  $dN = -\lambda N dt$

$\lambda$  est la **constante de désintégration**. Unité :  $s^{-1}$ . Elle représente la probabilité de désintégration par seconde.

Le signe  $-$  indique que le nombre  $N$  de noyaux diminue, donc  $dN < 0$ .

On a donc l'équation différentielle suivante :  $\frac{dN}{N} = -\lambda dt$

Afin de résoudre cette équation différentielle on intègre à gauche et à droite :

$$\int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = -\lambda \cdot \int_0^t dt$$

On obtient :

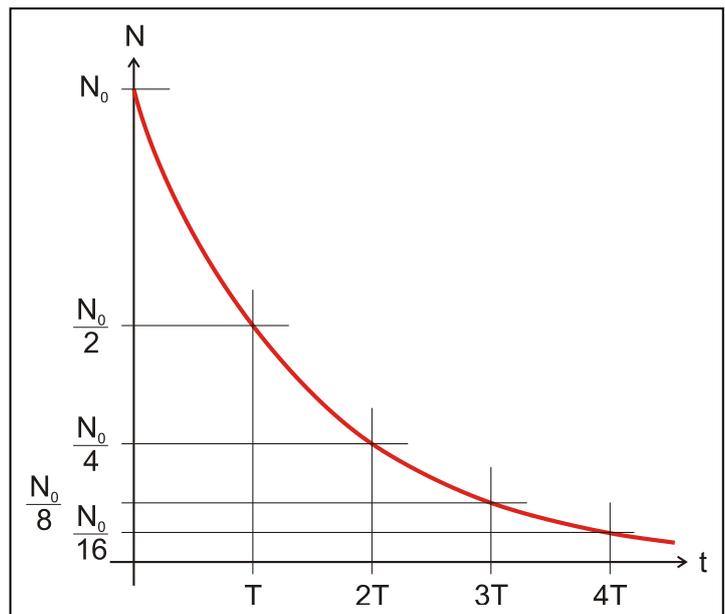
$$[\ln N]_{N_0}^N = -\lambda \cdot [t]_0^t$$

Finalement :

$$\ln N(t) - \ln N_0 = -\lambda \cdot (t - 0)$$

$$\ln \left( \frac{N(t)}{N_0} \right) = -\lambda t$$

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



<https://phet.colorado.edu/fr/simulation/legacy/beta-decay>

<https://phet.colorado.edu/fr/simulation/legacy/alpha-decay>

### c) Demi-vie T d'un radioélément

On appelle demi-vie T (ou période radioactive) d'un radioélément le temps au bout duquel le nombre N a diminué de moitié.

$$\text{En } t = T, \text{ on a } N(T) = N_0/2, \text{ donc: } N(T) = \frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T}$$

$$\text{Cette relation fournit : } -\ln 2 = -\lambda \cdot T \Leftrightarrow \boxed{T = \frac{\ln 2}{\lambda}} \text{ ou : } \boxed{\lambda = \frac{\ln 2}{T}}$$

Suivant leur stabilité, la demi-vie des noyaux radioactifs peut aller de quelques millisecondes jusqu'à des milliards d'années. Elle est caractéristique pour chaque nucléide.

*Exemples de quelques demi-vies :*

$${}_{88}^{226}\text{Ra}(\alpha): \quad T = 1590 \text{ a (années)} \qquad {}_{92}^{238}\text{U}(\alpha): \quad T = 4,5 \cdot 10^9 \text{ a}$$

$${}_{86}^{222}\text{Rn}(\alpha) \quad T = 3,825 \text{ d (jours)} \qquad {}_{19}^{40}\text{K}(\beta^-): \quad T = 1,3 \cdot 10^9 \text{ a}$$

$$\text{neutron (instable):} \quad T = 702 \text{ s}$$

$$\text{proton (stable):} \quad T \text{ est infini}$$

## 7. Activité d'une source radioactive

### a) Définition

L'activité A d'une source radioactive est le nombre de noyaux radioactifs qui se désintègrent par seconde.

C'est aussi le nombre de particules ou de photons émis par unité de temps.

Si dans un intervalle de temps dt, dN atomes se sont désintégrés, l'activité vaut :

$$\boxed{A = -\frac{dN}{dt}}$$

**Unité : 1 becquerel = 1 Bq = 1 s<sup>-1</sup>**

A l'aide de la loi de la désintégration on obtient :

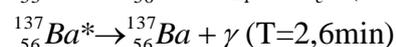
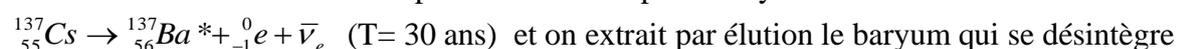
$$A = -\frac{dN}{dt} = -\frac{d}{dt}(N_0 e^{-\lambda t}) = \lambda N_0 e^{-\lambda t}$$

$$\boxed{A = \lambda N} \text{ et en posant } A_0 = \lambda N_0, \text{ on obtient: } \boxed{A = A_0 e^{-\lambda t}}$$

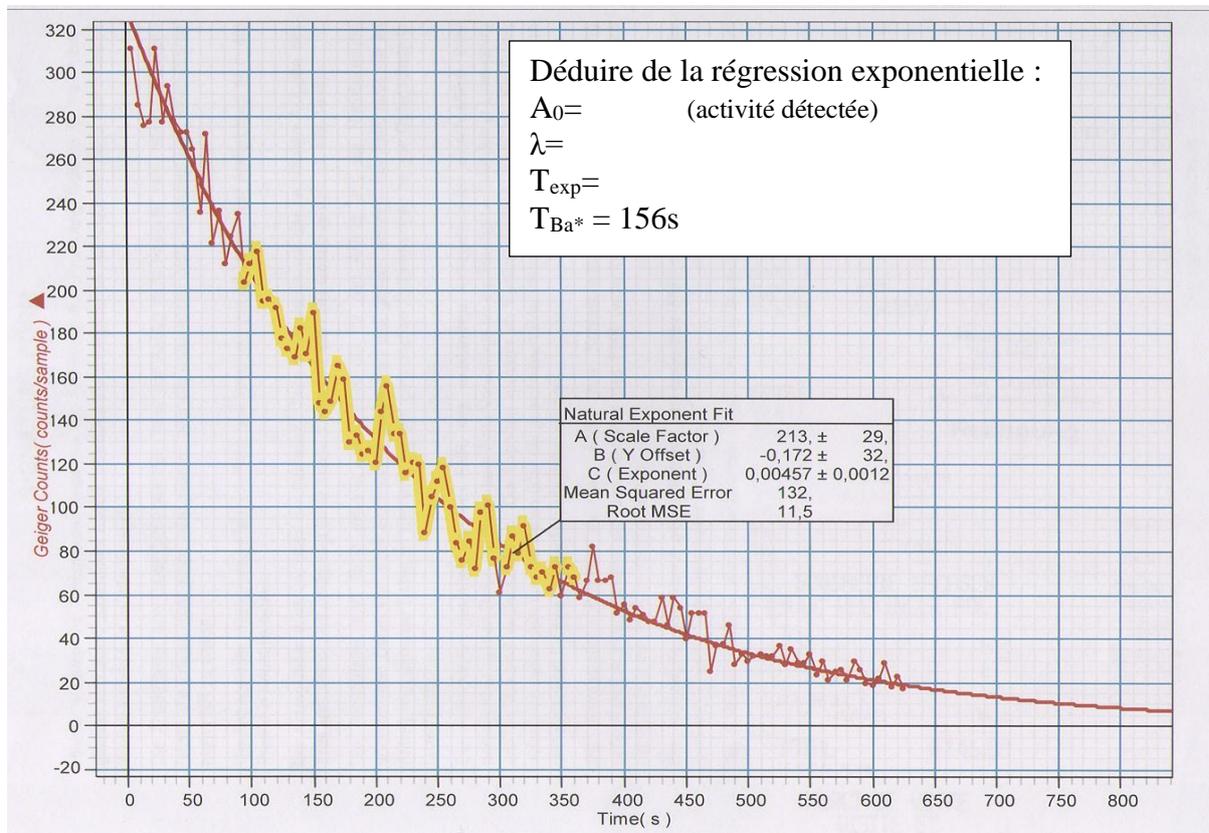
### b) Applications

- **Expérience avec baryum excité**

On utilise du césium radioactif pour créer un istope de baryum métastable :



\* = signifie qu'après l'émission  $\beta^-$  le noyau du baryum fils est excité est libère de l'énergie sous forme d'un photon  $\gamma$ . C'est cette durée de vie assez courte pour la radioactivité  $\gamma$  qu'on mesure. <http://www.spectrumtechniques.com/products/sources/isotope-generator-kit/>



### Datation en archéologie :

L'isotope C-14 est radioactif  $\beta^-$  avec une demi-vie de 5730 années.  $^{14}_6\text{C}$  est créé dans l'atmosphère par bombardement par rayons cosmiques. Il est ensuite absorbé par les plantes sous forme de dioxyde de carbone. A la mort des plantes, l'absorption cesse et le carbone C-14 se désintègre au cours du temps. L'activité renseigne sur la date de la mort de l'organisme.

Exemple : Dans un échantillon de carbone prélevé sur une momie, l'activité du C-14 a diminuée à la valeur 60 % de la valeur initiale. Calculer la date de la mort de la personne.

$$\text{On a: } A = 0,60 \cdot A_0 = A_0 e^{-\ln 2 \cdot \frac{t}{T}}$$

$$\text{Et: } t = -T \cdot \frac{\ln 0,60}{\ln 2} = 4\,222 \text{ y}$$

Terminologie allemande/anglaise:

$\lambda =$  constante de désintégration = Zerfallskonstante = decay constant (1/s)

$T =$  période radioactive = demi-vie = Halbwertszeit = half life (s)

$A =$  activité = Aktivität = activity (Bq=1/s) (1Ci=3,7 · 10<sup>10</sup> Bq)

Rem :  $\tau = 1/\lambda =$  durée de vie moyenne = mittlere Lebensdauer = mean life time (s)



## 9. Défaut de masse et énergie de liaison

### a) Introduction Helium

Calculons la masse d'un noyau  ${}^4_2\text{He}$  de 2 manières :

- à partir de la masse des constituants (2 neutrons + 2 protons)
- à partir de la masse atomique des tables où on retranche  $Z$  masses d'électrons.

masse des constituants	masse mesurée du noyau
$2m_p = 2.0146 \text{ u}$	masse de l'atome = $4.0026 \text{ u}$
$2m_n = 2.0174 \text{ u}$	$-2m_e = -0.0011 \text{ u}$
total: $4.0320 \text{ u}$	total: $4.0015 \text{ u}$

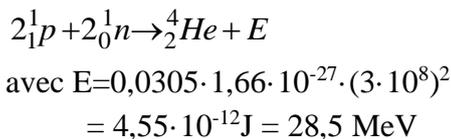
On constate que la masse des particules constituantes est supérieure à la masse de l'atome !

Pour le  ${}^4_2\text{He}$ , ce défaut de masse vaut  $\Delta m = 4.0320 - 4.0015 = 0.0305 \text{ u}$

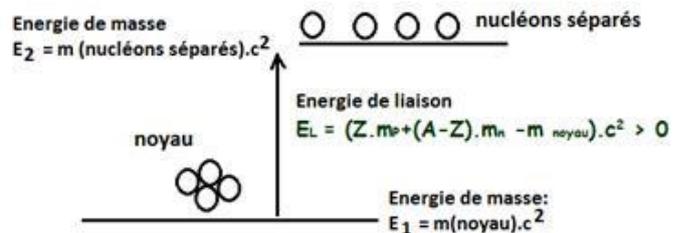
Or d'après la conservation masse-énergie d'Einstein, la masse perdue doit être transformée en énergie. Ainsi, la formation du noyau d'hélium est accompagnée d'un **dégagement d'énergie**

$$E = \Delta mc^2$$

Par analogie à une réaction chimique la réaction de formation de l'hélium s'écrit :



Cette énergie libérée lors de la formation du noyau à partir de neutrons et de protons est appelée énergie de liaison du noyau d'Hélium.



### b) Energie de liaison d'un noyau atomique

Ceci vaut pour tous les noyaux. On constate que la somme des masses des  $A$  nucléons composant un noyau atomique est toujours supérieure à la masse du noyau  ${}^A_Z\text{X}$ . Le noyau possède donc moins de masse et d'énergie que les nucléons pris séparément : le noyau est plus stable que les nucléons. Les noyaux atomiques doivent leur cohésion à la **force d'interaction forte** entre nucléons.

**Défaut de masse :**  $\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - m_x > 0$

Pour séparer tous les nucléons du noyau, il faut donc fournir au noyau l'énergie  $\Delta m \cdot c^2$ .

Cette énergie représente l'**énergie de liaison  $E_L$  du noyau**:

$$E_L = \Delta m \cdot c^2$$

$E_L$  est aussi l'énergie qui est libérée si on construit un noyau atomique à partir des nucléons.

Pour pouvoir comparer la stabilité des différents noyaux on calcule l'**énergie de liaison par nucléon**, qui représente donc l'énergie moyenne de liaison par nucléon :

$$\xi = \frac{E_L}{A}$$

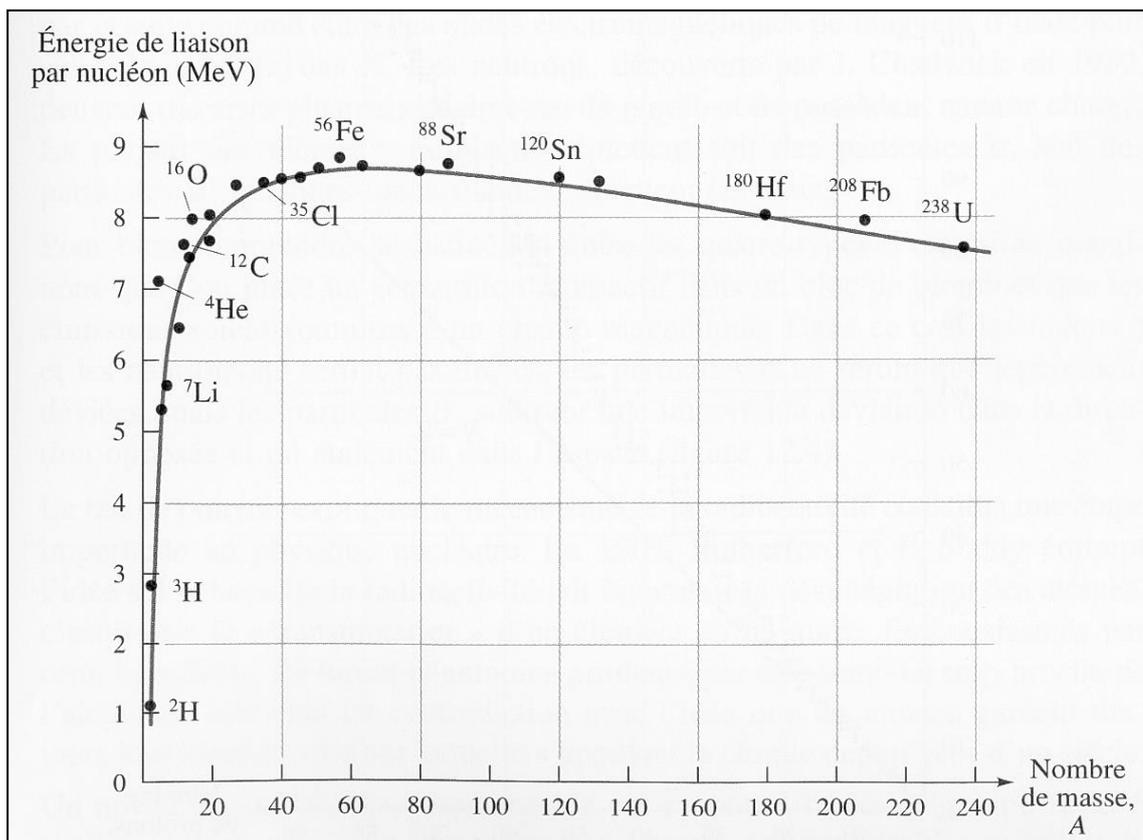
c) Courbe de l'énergie de liaison par nucléon  $\xi = \frac{E_L}{A}$ :

Les nucléides les plus stables sont ceux pour lesquels il faut beaucoup d'énergie pour extraire un nucléon : ces nucléides se trouvent donc proches du maximum de la courbe. Le maximum est atteint pour le Ni-62, pour lequel l'énergie de liaison par nucléon vaut 8.795 MeV. Le fait que le fer se trouve assez proche du maximum explique son abondance dans l'univers !

La courbe montre que les noyaux stables sont ceux dont le nombre de masse n'est ni trop petit, ni trop grand ( $20 < A < 190$ ).

La figure montre que les nucléides instables ont deux possibilités pour évoluer vers des états de plus grande stabilité, selon qu'il s'agit de noyaux lourds ou légers :

- certains **noyaux lourds** (comme par exemple l'U-235) peuvent se briser pour donner naissance à deux noyaux plus légers et situés dans la zone de stabilité : c'est la **réaction nucléaire de fission**.
- certains **noyaux légers** (comme par exemple le H-1, H-2, H-3) ont la possibilité de « fusionner » en un seul noyau situé plus haut sur la courbe et donc plus stable : c'est la **réaction nucléaire de fusion**.



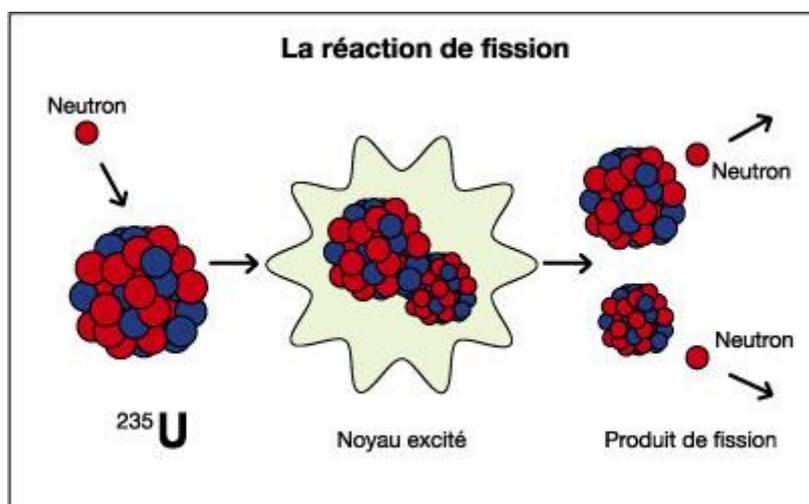
H. Benson 3 Ondes, Optique, Physique Moderne

**Applications numériques :**

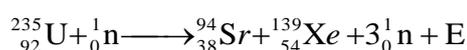
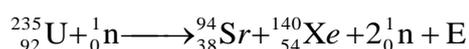
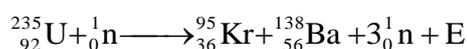
- Calculer l'énergie de liaison par nucléon pour l'He-4
- Le  ${}_{26}^{56}\text{Fe}$  a une masse atomique de 55.934936 u. Calculer son énergie de liaison et son énergie de liaison par nucléon en MeV!

## 10. Fission nucléaire

Quelques noyaux lourds ont la propriété d'éclater en deux noyaux plus légers lors du choc avec un neutron : c'est une réaction nucléaire **provoquée**, qui, contrairement à la radioactivité, ne se passe pas de manière spontanée. La figure suivante montre cette réaction de manière schématisée :



**Exemples :** Un neutron lent peut s'introduire dans un noyau d'uranium-235 et y rester. Le noyau excité se scinde en deux fragments suivant une multitude de possibilités dont ici 3 :



Les neutrons sortant de cette réaction sont des neutrons rapides et peuvent donner lieu à une nouvelle fission nucléaire si on les ralentit (neutrons thermiques).

L'énergie libérée est :

$$E = (m_{\text{réactifs}} - m_{\text{produits}}) \cdot c^2 = [(m_{\text{U}} + m_{\text{n}}) - (m_{\text{Sr}} + m_{\text{Xe}} + 3m_{\text{n}})] \cdot c^2$$

Données masses **atomiques** pour faire le calcul :

U235	235,043 922 u	Xe139	138,918 788 u	Sr94	93,915 365 u
------	---------------	-------	---------------	------	--------------

**Simulation :** <https://phet.colorado.edu/fr/simulation/legacy/nuclear-fission>

- **Propriétés :**

- Les neutrons qui provoquent la fission sont des neutrons lents, on les appelle aussi **neutrons thermiques** ( $E_{\text{cin}} < 0.1 \text{ eV} \rightarrow v \approx 300 \text{ m/s}$ )
- On dit qu'un nucléide est **fissile** s'il est capable de subir la réaction de fission, L'**U-235** est le plus important des nucléides fissiles. Il existe dans le mélange naturel dans la proportion de 0.7%, le reste étant de l'U-238. Le Pu-239 est également fissile, mais c'est un nucléide artificiel.
- Les réactions **nucléaires** sont **fortement exoénergétiques** : une réaction élémentaire libère environ 200 MeV. La fission d'1 kg d'uranium dégage autant d'énergie que la combustion de 2000 t de pétrole !!! En arrivant à contrôler l'énergie dégagée, on a pu construire des centrales nucléaires.
- L'U-235 est radioactif...mais attention : radioactivité et fission sont complètement indépendants : la radioactivité est spontanée, tandis que la fission nécessite un choc avec un neutron !

- **Réaction en chaîne**

En mars 1939, Leo Szilard et Walter Zinn trouvent expérimentalement qu'en moyenne, chaque réaction de fission libère 2 à 3 neutrons rapides. Si, par chocs successifs avec d'autres noyaux, la vitesse de ces neutrons diminue, alors chacun de ces neutrons peut provoquer une nouvelle fission, libérant 2 à 3 neutrons, et ainsi de suite. Il en résulte une réaction en chaîne où le nombre de fissions augmente rapidement en fonction du temps.

C'est l'existence de cette réaction en chaîne qui est à la base de la bombe atomique et des centrales nucléaires..

- **Applications**

fission contrôlée → réacteurs nucléaires

fission non-contrôlée → bombe atomique

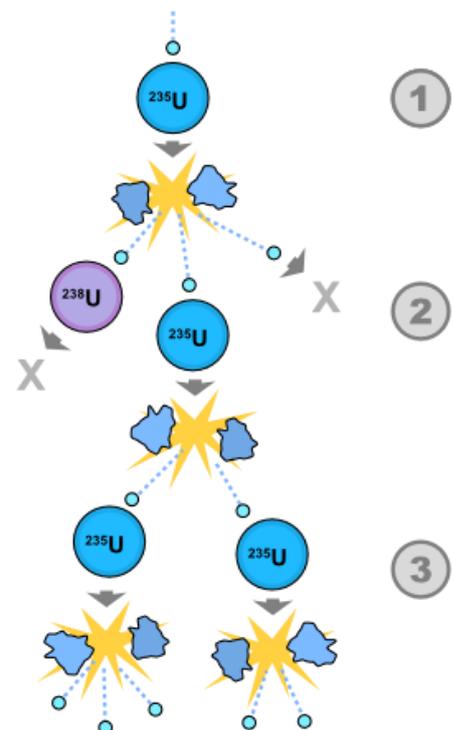


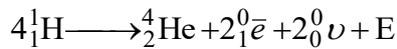
Illustration explique les différents cas (1/2) un noyau provoque une nouvelle fission (2/3) un noyau provoque deux fissions qui se présentent au cours de réaction.

La **masse critique** d'un matériau fissile est la quantité de ce matériau nécessaire au déclenchement d'une réaction nucléaire en chaîne de fission nucléaire. (p.ex 48kg  $^{235}\text{U}$ )

Video: attrapes souris & balles [https://www.youtube.com/watch?v=vjqIJW\\_Qr3c](https://www.youtube.com/watch?v=vjqIJW_Qr3c)

## 12. Fusion nucléaire

Exemple de fusion nucléaire : l'énergie solaire a pour origine la fusion de l'hydrogène selon le cycle de Bethe dont le bilan est :



La particule notée  ${}^0_{+1}e$  est un positon (= antiélectron) : de même masse que l'électron mais de charge opposée.

Le défaut de masses (nucléaire) est :

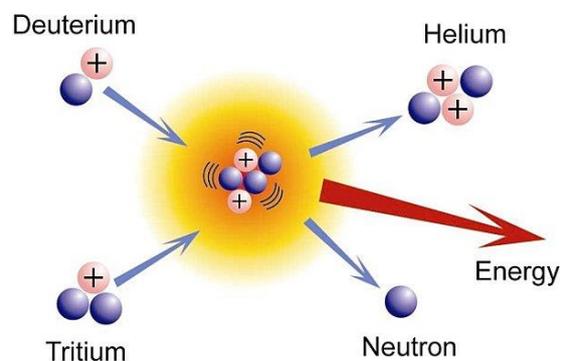
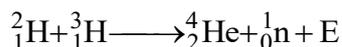
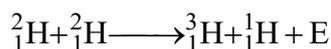
$$\Delta m = m_{\text{réactifs}} - m_{\text{produits}} = 4m_p - (m_{\text{He}} + 2m_e)$$

et l'énergie libérée

$$E = \Delta m \cdot c^2$$

Calculer pour trouver:  $E = 25,2 \text{ MeV}$ .

- **Autre exemples :**



- **Propriétés :**

- La masse des produits < masse initiale → la réaction de fusion libère énormément d'énergie : si 2 grammes de deutérium et 3 grammes de tritium fusionnaient, l'énergie libérée serait égale à  $1.7 \cdot 10^{12} \text{ J}$ , soit autant que la combustion de 50t de charbon, et 20 fois l'énergie libérée par la fission d'un gramme d'uranium 235 !!
- Pour provoquer cette réaction il faut que deux noyaux positifs se rencontrent. Ceci demande une grande vitesse (température) des noyaux.

Ainsi des réactions de fusion ont lieu

- 1) dans les étoiles (tel le Soleil)
- 2) dans une bombe à hydrogène : bombe à U crée la pression et la température nécessaire pour déclencher la fusion H
- 3) un réacteur de fusion thermonucléaire (p.ex. ITER) où on confine le plasma (température >  $10^8 \text{ K}$ ) à l'aide de champs magnétiques. (cf. photo sans et avec plasma)

