

Chapitre 10: Réactions nucléaires, radioactivité et fission

1. Définitions

a) Nucléides

Un **nucléide** est un type de noyau atomique caractérisé par le nombre de protons et de neutrons qu'il contient ainsi que par l'état d'énergie nucléaire dans lequel il se trouve.

(Il se différencie ainsi de l'isotope qui n'est identifié que par son nombre de protons et de neutrons. Il peut ainsi exister plusieurs nucléides pour un même isotope.)

Les noyaux atomiques renferment les **nucléons**: les protons p (portant une charge élémentaire positive e) et les neutrons n (de charge nulle).

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

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 c'est-à-dire le nombre de protons.

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.

	neutron n	proton p	électron é
Quantité de charge Q en C	0	$e = 1,602 \cdot 10^{-19}$	-e
Masse m en kg	$1,6749 \cdot 10^{-27}$	$1,6726 \cdot 10^{-27}$	$9,1094 \cdot 10^{-31}$
Masse m en u	1,008 7	1,007 3	0,000 548 58
Énergie au repos E_0 en MeV	939,57	938,28	0,511 00

b) Quantité de matière n

La quantité de matière n (encore appelée nombre de mole) caractérise le nombre d'entités élémentaires (atomes, molécules, ...) contenue dans un corps.

Unité S. I. : la mole (1 mol)

1 mol est la quantité de matière d'un système contenant autant d'entités élémentaires qu'il y a d'atomes dans 0,012 kilogramme (c'est-à-dire 12 g) de carbone-12.

c) Nombre d'Avogadro N_A (constante d'Avogadro)

Le nombre d'Avogadro N_A constitue le nombre d'entités élémentaires contenues dans une quantité de matière de 1 mole:

$$N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$$

Les entités élémentaires doivent être spécifiées et peuvent être des atomes, des molécules, des ions, des électrons, d'autres particules ou des groupements spécifiés de telles particules.

d) Masse molaire M

La masse molaire M constitue la masse d'une mole d'atomes ou de molécules, c'est-à-dire de $6,022 \cdot 10^{23}$ atomes ou molécules.

Unité S.I.: $1 \frac{\text{kg}}{\text{mol}}$

A partir de la masse molaire on peut calculer la masse d'un atome, m_0 :

$$m_0 = \frac{M}{N_A}$$

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

$$N = \frac{m}{m_0} = \frac{mN_A}{M}$$

e) Unité de masse atomique (1 u)

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

12 g de ^{12}C renferment une quantité de matière de 1 mole et se composent donc de $6,022 \cdot 10^{23}$ atomes. On obtient :

$$1 u = \frac{1}{12} \frac{M}{N_A} = \frac{1}{12} \cdot \frac{0,012 \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1}}{6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}} = 1,660 5 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

f) Isotopes d'un élément chimique

Les isotopes sont des types de noyau atomique d'un même élément chimique (même nombre de protons Z), 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_1H hydrogène; ^2_1H deutérium; ^3_1H tritium.

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 A;
- la charge électrique;
- la quantité de mouvement p;
- le moment cinétique L (grandeur caractérisant l'état de rotation).

3. Défaut 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 défaut de masse, noté Δm , est la différence entre la masse des particules initiales et celle des particules finales : **défaut de masse** $\Delta m = m_{\text{initiale}} - m_{\text{finale}}$

On doit tenir compte de la masse au repos des particules : $E_0 = m_0 c^2$.

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)

4. Radioactivité

a) Définition

On appelle radioactivité la transformation de noyaux atomiques instables dans d'autres noyaux au cours desquelles un rayonnement ionisant (émission de particules de matière et/ou d'énergie) est émis.

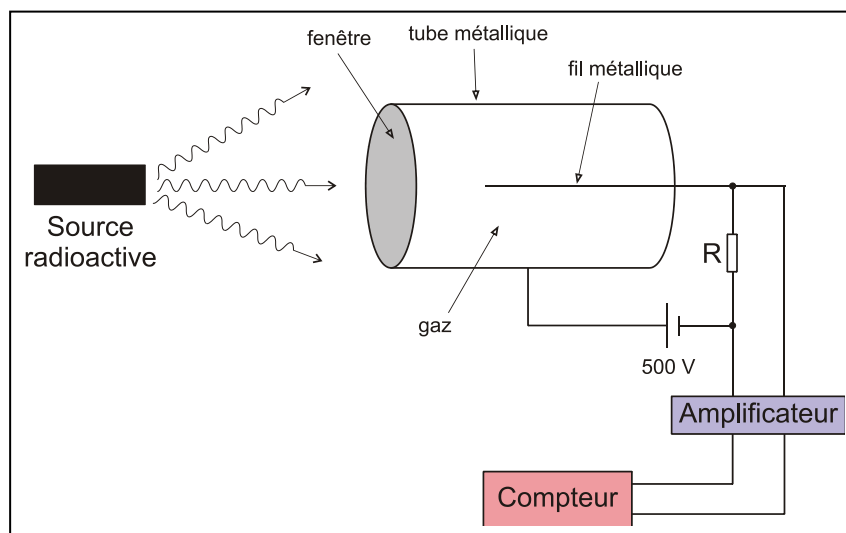
Ces rayonnements sont par exemple

- des rayons gamma (γ) constitués de photons de très grande énergie (très grande fréquence);
- 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 (${}^1_1\text{p}$ ou ${}^1_1\text{H}$).

La **radioactivité naturelle** est celle qui existe naturellement dans la nature : rayonnement terrestre et cosmique.

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

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



Le principe de fonctionnement est basé sur l'**effet ionisant** du rayonnement radioactif encore appelé **rayonnement ionisant**. Chaque ionisation d'une molécule de gaz à l'intérieur du tube provoquée par le rayonnement fait apparaître 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.

Le nombre d'impulsions enregistré est proportionnel au nombre de noyaux radioactifs de la source qui se sont désintégrés. Malheureusement un compteur Geiger-Müller (G-M) ne renseigne pas sur la nature et l'énergie des rayonnements.

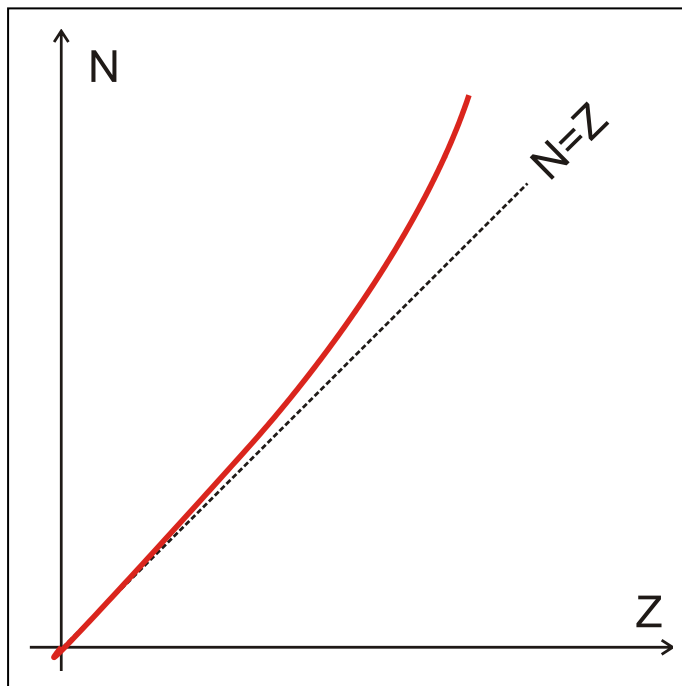
5. Types de radioactivité

a) Courbe de stabilité

La courbe de stabilité des nucléides (courbe rouge sur le diagramme N-Z) indique l'emplacement approximatif des nucléides stables.

En principe les **noyaux stables** (environ 300) entourent la courbe de près tandis que les **noyaux instables (noyaux radioactifs, radionucléides)** (environ 3000) s'en écartent davantage.

En se **désintégrant**, les **noyaux radioactifs** se rapprochent de la courbe de stabilité par **l'émission de rayonnement ionisant énergétique**.



b) Désintégration alpha

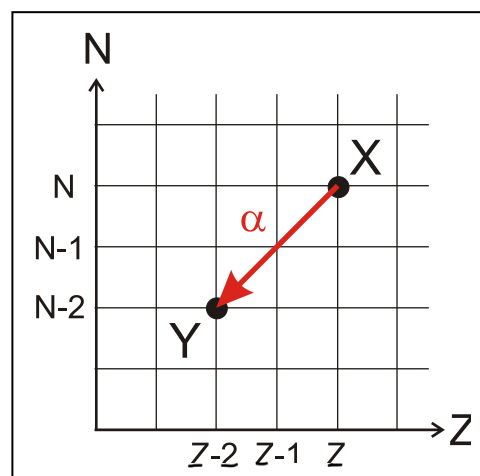
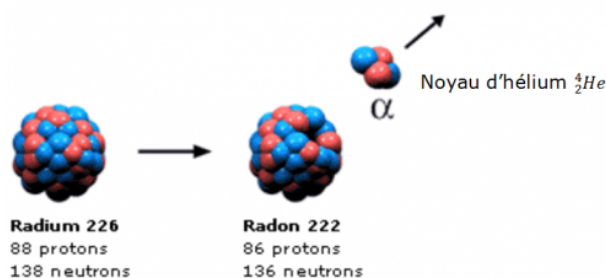
Certains radionucléides lourds ($N+Z > 200$) émettent des particules alpha (ou noyaux d'hélium-4).

Equation bilan :
$${}^A_Z X \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2} Y + {}^4_2 \text{He}$$

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

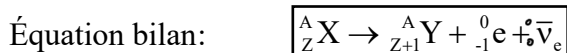
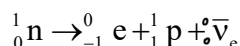
X et Y correspondent à des éléments chimiques différents.

Exemple :
$${}^{226}_{88} \text{Ra} \rightarrow {}^{222}_{86} \text{Rn} + {}^4_2 \text{He}$$

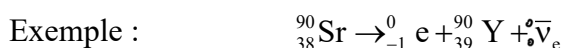


c) Désintégration β^-

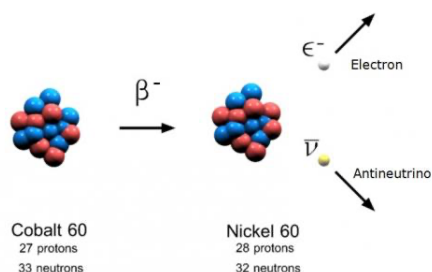
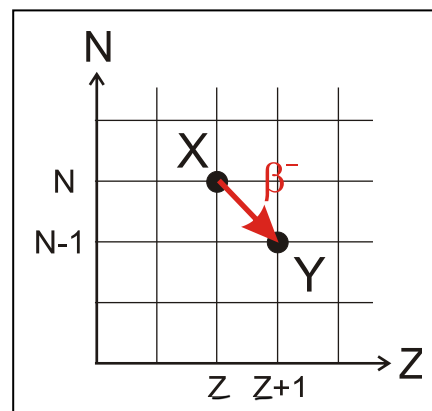
Les radionucléides avec un excès de neutrons (situés à gauche de la courbe de stabilité) émettent un électron et un antineutrino électronique qui proviennent de la décomposition d'un neutron en un proton, un électron et un antineutrino électronique suivant l'équation :



X et Y correspondent à des éléments chimiques différents.

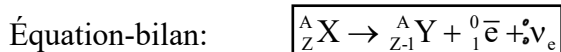
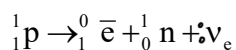


L'antineutrino électronique garantit les conservations de la quantité de mouvement et de l'énergie.



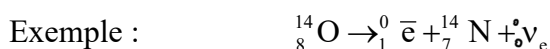
d) Désintégration β^+

Les radionucléides avec un excès de protons (ou un défaut de neutrons), donc situés à droite de la courbe de stabilité, émettent un positron (= antiélectron) qui provient de la décomposition d'un proton en un positron, un neutron et un neutrino électronique :

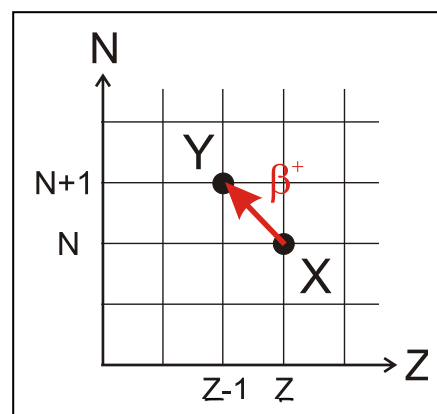


X et Y correspondent à des éléments chimiques différents.

La particule notée ${}_1^0\bar{\text{e}}$ est un positron (ou positon ou antiélectron) : de même masse (m_e) que l'électron mais de charge opposée (+e).

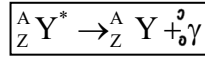


Le neutrino électronique garantit les conservations de la quantité de mouvement et de l'énergie.



e) Désintégration γ

Après une transformation radioactive du noyau, le noyau fils est généralement dans un état excité (*) c'est-à-dire il possède un excès d'énergie et se désexcite en émettant un (ou plusieurs) photons gamma de haute énergie.



f) Remarques

- Toutes les désintégrations radioactives sont accompagnées d'une libération d'énergie : cette énergie est contenue dans le rayonnement émis (énergie cinétique des particules ou énergie du photon) et transférée au corps qui l'absorbe (ionisation de la matière, destruction de liaisons chimiques, échauffement local, ...) !
- Il existe d'autres types de radioactivité : émission de protons, de neutrons, capture électronique (= capture K) ...
- Les **neutrinos** : ${}^0_0\nu_e$ et **antineutrinos** : ${}^0_0\bar{\nu}_e$ électroniques sont des particules de charge électrique nulle, de masse au repos extrêmement petite ($< 2,2 \text{ eV}/c^2$), se déplaçant à des vitesses proches de celle de la lumière dans le vide c et n'interagissant que très faiblement avec la matière.

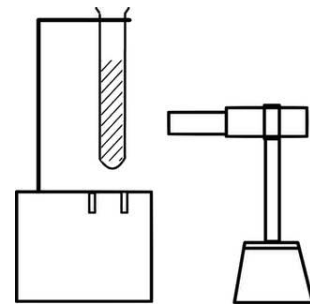
6. Loi de la désintégration radioactive

La désintégration radioactive d'un noyau instable est un **phénomène aléatoire** : chaque désintégration est un événement indépendant et **on ne peut pas prévoir à quel moment un noyau donné va subir une désintégration**. Lorsqu'un noyau radioactif se désintègre, il est transformé en un autre noyau qui peut être soit radioactif à son tour soit être stable.

La désintégration d'un noyau radioactif **est indépendante des conditions physiques** (température, pression, ...) dans lequel il se trouve et **de son état chimique** (libre ou lié dans des molécules).

a) Expérience avec un générateur d'isotopes Cs/Ba

Le nucléide césium-137 : ${}^{137}_{55}\text{Cs}$ est un émetteur de β^- . Il se désintègre en baryum-137 : ${}^{137}_{56}\text{Ba}$ qui lui est un émetteur de photons gamma d'énergie 662 keV. Une solution éluante permet d'extraire le baryum-137 que l'on introduit dans un tube à essai placé devant un compteur Geiger-Müller. Le compteur G-M détecte des impulsions par seconde que l'on appelle **taux de comptage z** (mesuré en coups par seconde : cps).



On observe que le taux de comptage z décroît d'abord rapidement, ensuite plus lentement en fonction du temps t . Ce taux de comptage z est proportionnel **au nombre de désintégrations par seconde** (c'est à dire à l'activité A de la source).

En analysant la courbe de décroissance, on peut constater qu'après une certaine durée de temps $T_{1/2}$, le taux de comptage et donc le nombre de désintégrations par seconde a diminué de moitié. On trouve $T_{1/2} = 2,55$ min. Après le même intervalle de temps $T_{1/2}$ le nombre de désintégrations par seconde a de nouveau diminué de moitié. L'expérience fournit une décroissance exponentielle du nombre de noyaux radioactifs.

b) Loi de décroissance radioactive

Le but est de déterminer l'évolution statistique au cours du temps du nombre N de noyaux atomiques **d'un même radionucléide** ${}^A_Z X$ **donné**, contenus dans un échantillon.

Condition initiale : A l'instant $t = 0$, l'échantillon comprend $N = N_0$ noyaux radioactifs.

A l'instant t , il y en a N .

A l'instant $t + dt$ il n'y en a plus que $N + dN < N$ (où $dN < 0$).

Ainsi : $-dN$ est le **nombre de noyaux radioactifs qui se désintègrent** lors de l'intervalle de temps dt .

On peut affirmer que $-dN$ 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 : $-dN \sim N dt \Leftrightarrow dN = -\lambda N dt$

où : $\lambda > 0$ est la **constante de désintégration caractérisant le radionucléide**;

son unité S. I. est $1/s = s^{-1}$.

λ représente la probabilité de désintégration par seconde

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

Afin de résoudre cette équation différentielle on détermine la primitive à gauche et à droite du signe d'égalité.

$$\int \frac{dN}{N} = -\lambda \int dt$$

On obtient :

$$\ln N = -\lambda t + C$$

La constante d'intégration s'obtient à l'aide de la condition initiale :

si $t=0$, $N=N_0$:

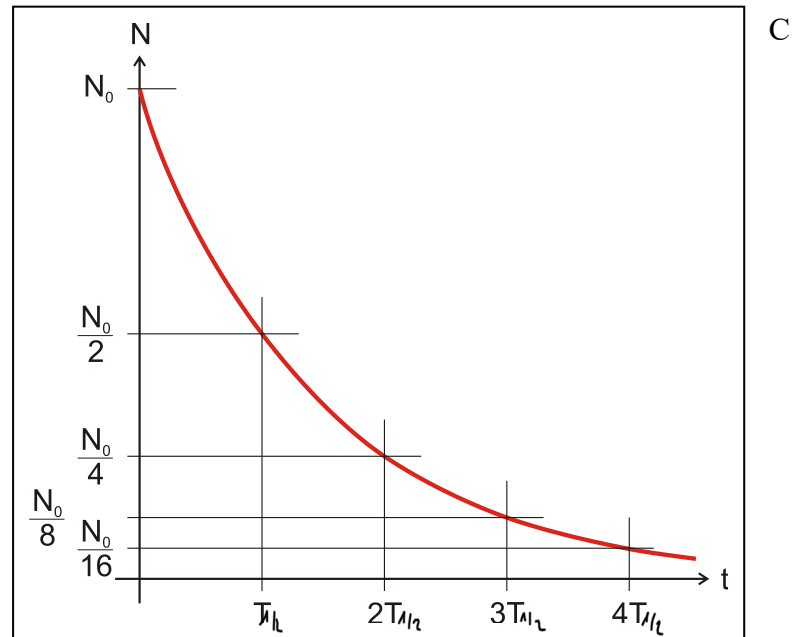
On obtient : $C = \ln N_0$

Finalement :

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

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

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



c) Demi-vie $T_{1/2}$ d'un radionucléide

On appelle demi-vie $T_{1/2}$ d'un radionucléide la durée de temps au bout duquel le nombre N de noyaux radioactifs a diminué de moitié.

La demi-vie des nucléides radioactifs peut s'étendre de fractions de secondes jusqu'à des milliards d'années. Elle est une caractéristique du radionucléide en question.

Exemples de quelques demi-vies :

$${}_{88}^{226}\text{Ra}(\alpha): \quad T_{1/2} = 1590 \text{ y (years=années)} \quad {}_{92}^{238}\text{U}(\alpha): \quad T_{1/2} = 4,5 \cdot 10^9 \text{ y}$$

$${}_{86}^{222}\text{Rn}(\alpha) \quad T_{1/2} = 3,825 \text{ d (days=jours)} \quad {}_{19}^{40}\text{K}: \quad T_{1/2} = 1,3 \cdot 10^9 \text{ y}$$

$$\text{neutron (instable)}: \quad T_{1/2} = 702 \text{ s}$$

$$\text{proton (stable)}: \quad T_{1/2} \text{ est quasi infini } (> 6 \cdot 10^{33} \text{ y})$$

d) Relation entre demi-vie $T_{1/2}$ et constante radioactive λ :

A l'instant $t = 0$, il existe N_0 noyaux radioactifs.

A l'instant $t = T_{1/2}$ il n'y a plus que $N(t=T_{1/2}) = \frac{N_0}{2}$ noyaux radioactifs.

$$\text{Ainsi :} \quad N(t=T_{1/2}) = \frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda t} = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}}$$

$$\text{En simplifiant par } N_0: \quad e^{-\lambda T_{1/2}} = \frac{1}{2}.$$

$$\text{En prenant le logarithme :} \quad -\lambda T_{1/2} = -\ln 2.$$

$$\text{Finalement :} \quad T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \text{ respectivement } \lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}}$$

e) Interprétation de l'expérience avec un générateur d'isotopes Cs/Ba

Le nombre de désintégrations par seconde s'écrit :

$$-\frac{dN}{dt} = N_0 \lambda e^{-\lambda t} > 0$$

Il décroît suivant la même loi exponentielle que la décroissance radioactive!

La durée $T_{1/2} = 2,55 \text{ min}$ représente ainsi la demi-vie du barium-137.

La constante de désintégration du barium-137 vaut :

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} = \frac{\ln 2}{2,55 \cdot 60 \text{ s}} = 4,43 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$$

7. Activité d'une source radioactive**a) Définition**

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

C'est aussi le nombre de particules ou de photons émis par unité de temps (1s).

Si dans un intervalle de temps dt , $-dN$ noyaux radioactifs se sont désintégrés, l'activité vaut :

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

Unité S.I. : 1 becquerel = 1 Bq = 1 désintégration/s = 1 s⁻¹

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

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

$$\boxed{A = \lambda N}$$

En posant $A_0 = \lambda N_0$,

on obtient: $\boxed{A = A_0 e^{-\lambda t}}$

b) Applications

- Datation en archéologie :** Le radionucléide C-14 est radioactif β^- avec une demi-vie de $T_{1/2} = 5730$ années. $^{14}_6\text{C}$ est créé dans l'atmosphère par bombardement de l'azote par des neutrons des rayons cosmiques. Le carbone-14 est ensuite absorbé par les plantes sous forme de dioxyde de carbone. A la mort des plantes, l'absorption cesse et le carbone-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.

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

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

- Datation en géologie :** Plusieurs radionucléides peuvent être utilisés pour la datation de roches. Nous prenons le cas du plomb. Les radionucléides du plomb 206, 207 et 208 proviennent de la désintégration de l'uranium 238, 235 et du thorium.

Si on connaît le rapport du nombre de noyaux de plomb N' par rapport au nombre de noyaux d'uranium, on peut calculer la date du début de la désintégration de l'échantillon. Chaque noyau d'uranium disparu donne lieu après une série de désintégrations à un noyau de plomb (voir 8)).

Soit r le rapport du nombre de noyaux de plomb N' par rapport au nombre de noyaux d'uranium N :

$$r = \frac{N'}{N}$$

Le nombre initial de noyaux d'uranium est :

$$N_0 = N + N' = N + rN = (1+r)N$$

La loi de désintégration permet d'écrire :

$$N = (1+r)N \cdot e^{-\frac{\ln 2}{T}t}$$

On obtient :

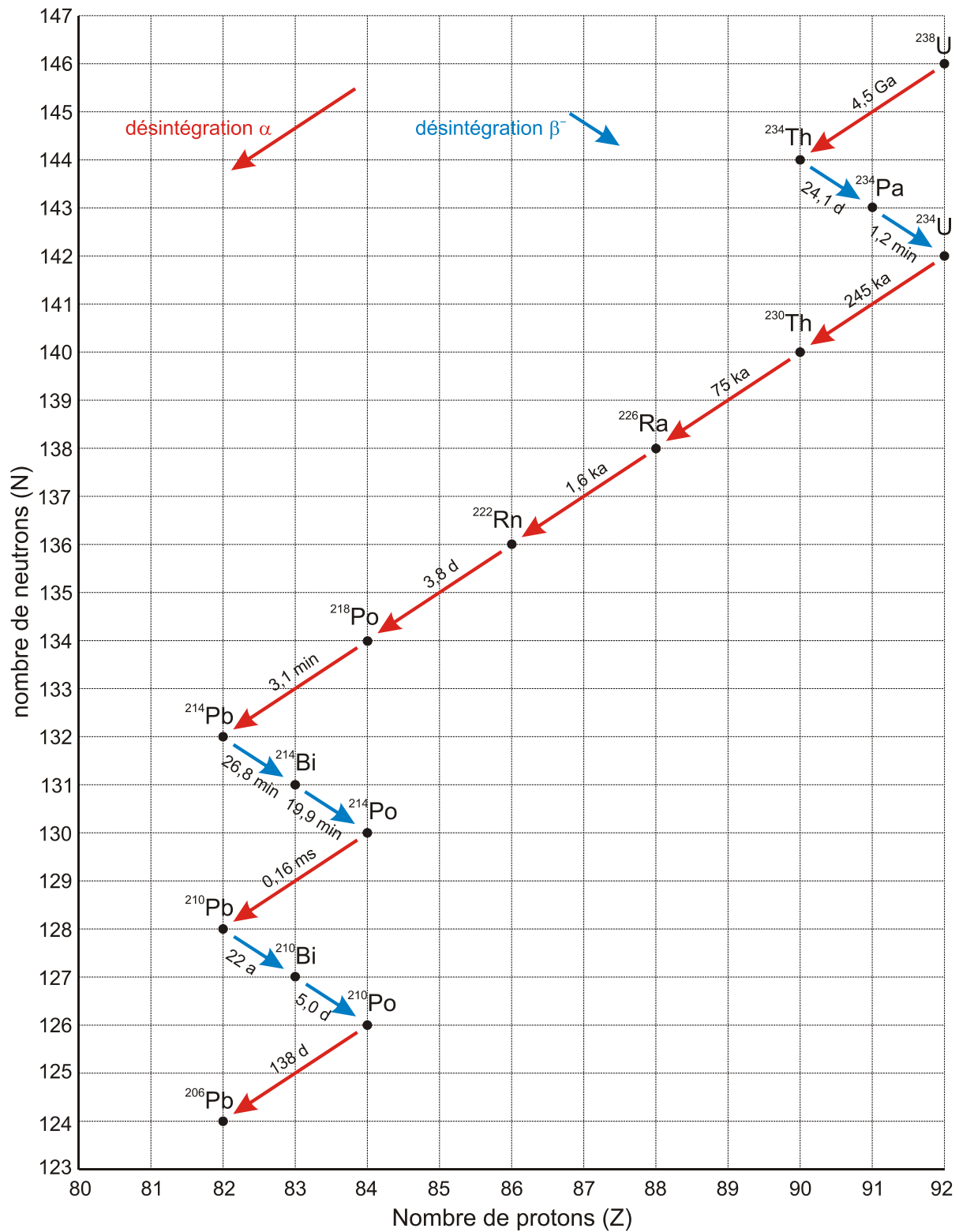
$$t = T \frac{\ln(1+r)}{\ln 2}$$

Application numérique : Pour l'uranium-238 : $T_{1/2} = 4,5 \cdot 10^9$ y.

Si on mesure : $r = 0,8$, l'échantillon aura un âge de $t = 3,8 \cdot 10^9$ y

8. Radioactivité naturelle

Dans la nature existent trois familles de désintégration radioactive dont voici celle de l'uranium-238. Sont indiquées également les demi-vies des radionucléides qui interviennent.



9. Défaut de masse et énergie de liaison

Les noyaux atomiques doivent leur cohésion à la **force d'interaction nucléaire forte** entre nucléons. C'est une force d'attraction à courte portée. Elle est de loin plus importante que les forces électriques répulsives.

Défaut de masse : On constate que la somme des masses des A nucléons composant un noyau atomique est toujours supérieure à la masse du noyau ${}^A_Z X$:

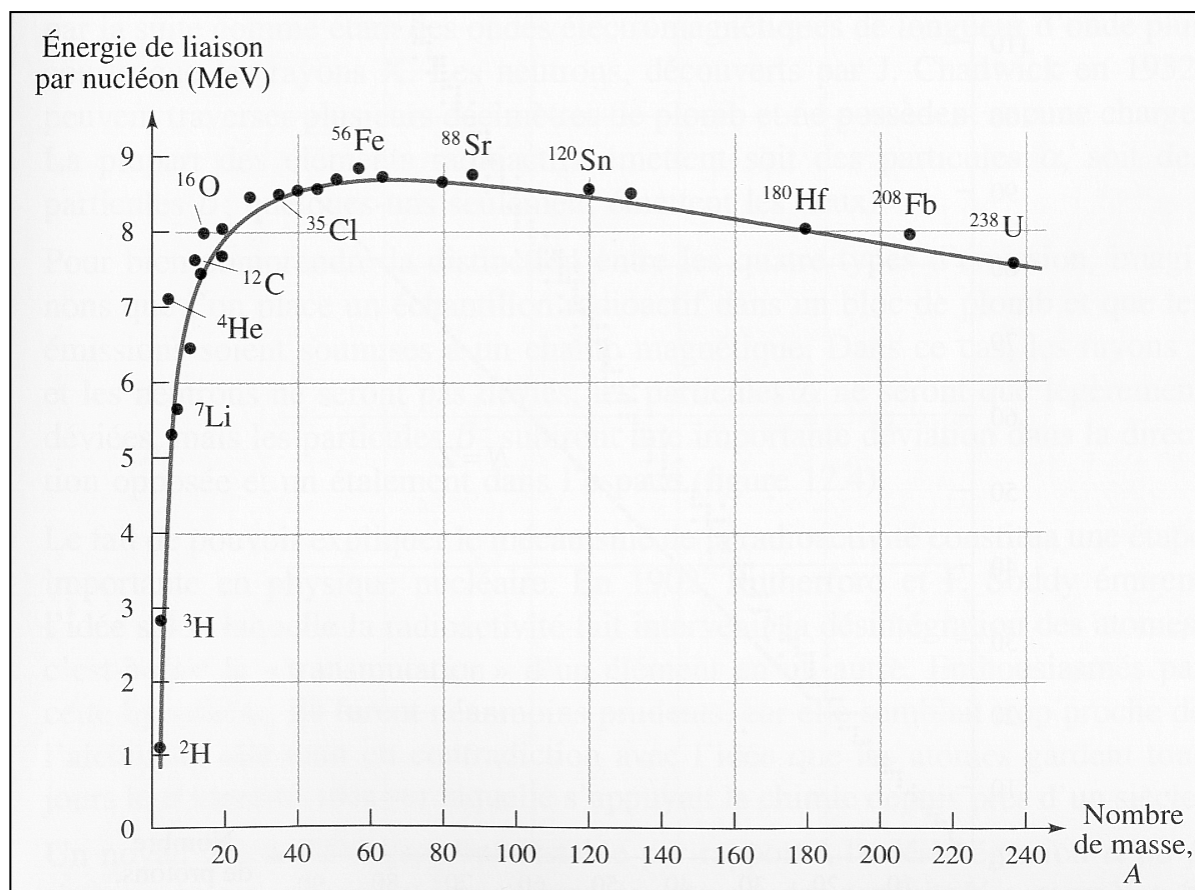
$$\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - m_X > 0$$

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

Cette énergie nécessaire à décomposer un noyau atomique en ses composantes (nucléons) 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 constitue un noyau atomique à partir de ses composantes (nucléons).

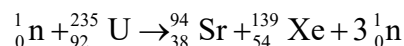
Courbe de l'énergie de liaison par nucléon ($\frac{E_L}{A}$):



Conséquence : On peut libérer de l'énergie en cassant des noyaux lourds : la **fission nucléaire** ou en constituant un noyau à partir de composantes : la **fusion nucléaire**.

10. Fission nucléaire

Exemple de fission nucléaire : un neutron lent (appelé neutron thermique ; vitesse inférieur à 2 200 m/s) 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 l'une est :



Les neutrons sortant de cette réaction sont des neutrons rapides et peuvent donner lieu à une fission nucléaire si on les ralentit (par collisions avec des atomes d'hydrogène).

L'énergie libérée est :

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

Application numérique :

$$m(\text{U-235}) = 234,9935 \text{ u}; \quad m(\text{Xe-139}) = 138,8892 \text{ u};$$

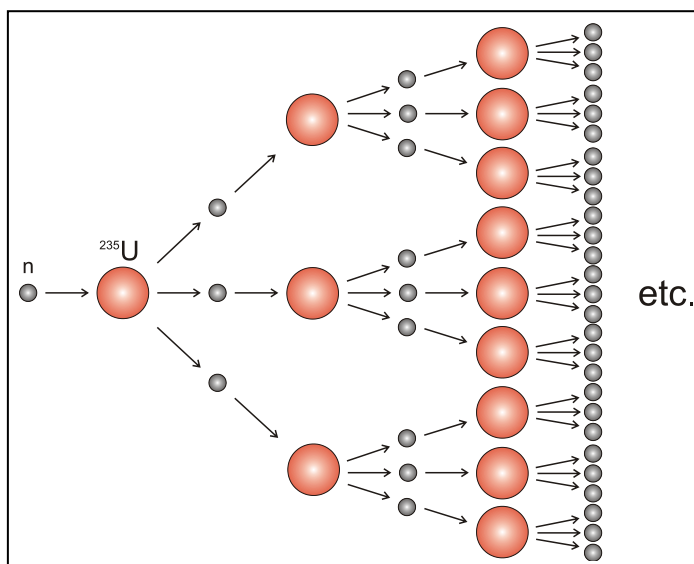
$$m(\text{Sr-94}) = 93,8945 \text{ u}; \quad m(\text{n}) = 1,0087 \text{ u},$$

Le défaut de masse $\Delta m = 0,1924 \text{ u}$ et l'énergie libérée lors de la réaction (pour un noyau d'uranium-235) vaut $E = \Delta m \cdot c^2 = 179 \text{ MeV}$.

Ainsi 1 kg d'U-235 peut libérer par fission une énergie de $4,59 \cdot 10^{26} \text{ MeV} = 73,5 \cdot 10^{12} \text{ J}$.
(Lors d'une combustion explosive, 1 kg d'essence libère une énergie de $47,3 \cdot 10^6 \text{ J}$)

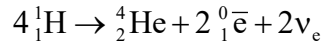
11. Réaction en chaîne

Lorsqu'on est en présence d'un nombre de noyaux U-235 assez important, les 2 ou 3 neutrons libérés dans la réaction précédente peuvent donner lieu à 2 ou 3 nouvelles fissions de U-235 et ainsi de suite. Il s'ensuit une réaction en chaîne où le nombre de fissions nucléaires augmente exponentiellement en fonction du temps.



12. Fusion nucléaire

- * L'énergie des étoiles (p.ex. soleil) a pour origine la fusion de l'hydrogène selon la réaction proton-proton (chaîne PP) (la réaction carbone-azote-oxygène (cycle C-N-O ou cycle de Bethe-Weizsäcker étant une autre possibilité) dont le bilan est :



L'énergie libérée vaut :

$$\Delta E = E_{\text{réactifs}} - E_{\text{produits}} = [4m_p - (m_{\text{He}} + 2m_e)]c^2$$

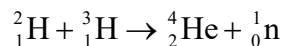
Application numérique:

$$m_p = 938,27 \text{ MeV}/c^2 ; m_{\text{He}} = 3727,4 \text{ MeV}/c^2 ; m_e = 0,511 \text{ MeV}/c^2 : \quad \Delta E = 24,7 \text{ MeV}$$

Lors de la fusion nucléaire (pour 4 noyaux d'hydrogène) la réaction libère donc une énergie de 24,7 MeV, à savoir une énergie de 6,2 MeV par noyau d'hydrogène.

Ainsi de 1 kg d'hydrogène peut libérer par fusion une énergie de $37,1 \cdot 10^{26}$ MeV respectivement $594 \cdot 10^{12}$ J

- * Dans les **réacteurs de fusion thermonucléaires** (JET, ITER) la recherche porte sur la réaction suivante :



Le nucléide ${}^2_1\text{H}$, appelé encore **deutérium** (noté D), est un isotope de l'hydrogène que l'on retrouve dans la nature à raison de 0,012 %.

Le nucléide ${}^3_1\text{H}$, appelé encore **tritium** (noté T), est produit artificiellement à partir du deutérium dans le réacteur même ($\text{D} + \text{D} \rightarrow \text{T} + \text{p}$).

Le problème actuel de cette recherche est le fait que la température doit être supérieure à 10^8 K (agitation thermique énorme !) afin que les particules puissent surmonter leur répulsion électrique. À de telles températures, les atomes sont complètement ionisés (c.-à-d., ils ont cédés tous leurs électrons) : leur état est appelé **plasma**.

Pour la **bombe H**, cette température est atteinte en utilisant une bombe à fission comme détonateur.