

# **Le Noyau de l'Atome**

*mise à jour 2017*

Marie-Paule Bassez  
<http://chemphys.u-strasbg.fr/mpb>

# Plan

1. Introduction
2. Les Forces dans le Noyau
3. Les particules élémentaires
4. Le Diagramme de Stabilité Nucléaire
5. La loi de Désintégration Nucléaire
6. Des Applications Biomédicales
7. La Fusion et la Fission Nucléaires

# 1. Introduction

Les noyaux des atomes sont constitués de **nucléons**: protons et neutrons.

**Z** est le nombre de protons (ou électrons). C'est le **numéro atomique**.

**N** est le **nombre de neutrons**.

**A** est le **nombre de masse**. C'est le nombre total de nucléons:  $A = Z + N$

Des **isotopes** sont des atomes qui ont même **Z** et  $\neq A$ :  ${}^{12}_6\text{C}$  et  ${}^{14}_6\text{C}$

Il existe donc plusieurs isotopes pour un même élément.

Un **élément** représente l'ensemble des atomes avec le même **Z**.

Chaque isotope d'un élément est un **nucléide**, symbolisé par:  ${}^A_Z\text{X}_N$

**X** est le **symbole chimique** de l'élément; "nucléide" est aussi utilisé pour le noyau de l'isotope.

Des **isomères** ont même **Z**, **N**, **A** mais existent dans des états excités

${}^{60}_{27}\text{Co}_{33}$   $T = 5,26$  ans      et       ${}^{60m}_{27}\text{Co}_{33}$   $T = 10,48$  min

Des **isobares** ont même **A** et  $\neq Z$ :  ${}^{14}_6\text{C}_8$        ${}^{14}_7\text{N}_7$

Des **isotones** ont même **N**:  ${}^{14}_6\text{C}_8$        ${}^{15}_7\text{N}_8$        ${}^{16}_8\text{O}_8$

# 2. Les Forces dans le Noyau

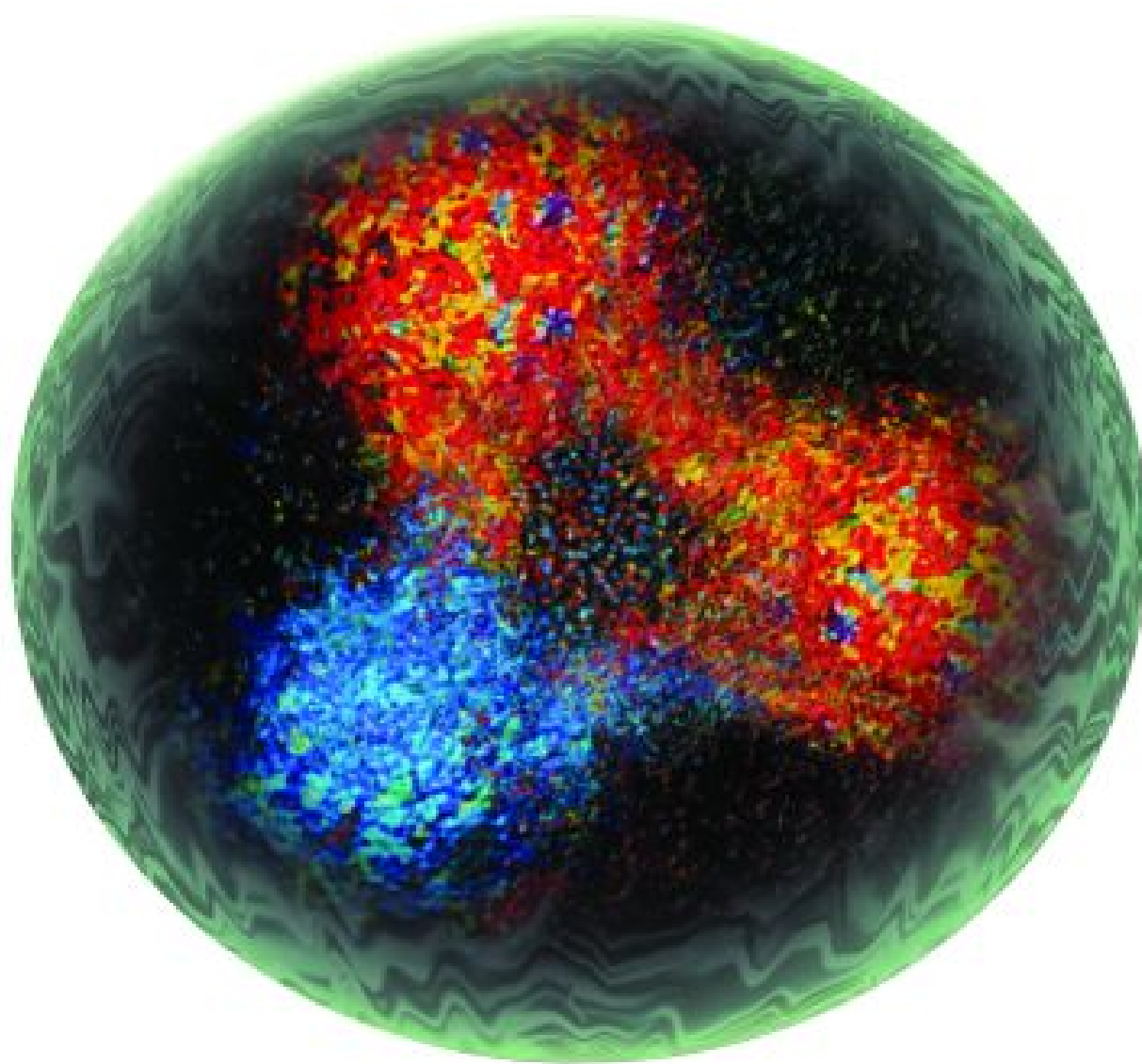
Il existe trois types de force dans les noyaux:

- L'**interaction électromagnétique**, s'applique à toute particule ayant une charge électrique (protons). Intensité relative =  $10^{-2}$ . Interaction coulombienne répulsive. Elle est portée par les photons.
- L'**interaction forte** portée par les gluons permet de lier les quarks entre eux pour former des hadrons (dont protons et neutrons). Elle a la plus forte intensité.  $I_r = 1$ . Elle permet la cohésion du proton en confinant les quarks à l'intérieur. Elle augmente avec la distance contrairement aux interactions électromagnétique et gravitationnelle, mais sa portée est faible:  $\sim 10^{-15}$  m (diamètre du noyau).
- L'**interaction faible**. Int. faible,  $I_r \sim 10^{-7}$  ( $I_r \text{ Gr} \sim 10^{-36}$ ). Elle agit à l'intérieur des nucléons en transformant un nucléon en un autre avec émission  $\beta$ . Portée  $10^{-18}$  m.

**La stabilité d'un noyau dépend de la compétition entre ces trois forces.**

Au dessus d'un certain nombre de protons (92) les noyaux sont instables, ils sont artificiels et inconnus dans la nature. Dans le tableau de Mendeleiev, les éléments naturels s'arrêtent à  ${}_{92}^{238}\text{U}$ . Les noyaux avec  $84 \leq Z \leq 92$  sont naturels et radioactifs, ceux avec  $Z \leq 83$  sont naturels et stables.

*photothèque du CNRS*



Proton =  
1 quark down  
2 quarks up

(neutron:2u,1d)

Dans le modèle de la chromodynamique quantique (Nobel 2004), le proton et le neutron sont constitués d'un ensemble quarks, antiquarks et gluons. Cette image est une représentation du modèle de **particules à l'intérieur d'un proton**. Il y aurait 6 quarks et 6 antiquarks. Seuls les quarks up (haut) et down (bas) seraient stables. Le quark u aurait une charge  $+2/3$ , le d  $-1/3$ ;  
Donc: charge(proton):  $-1/3 + 2/3 + 2/3 = +1$ ; charge(neutron):  $-1/3 - 1/3 + 2/3 = 0$

# 3. Les Particules Élémentaires

## Particules de matière: ( $S_{1/2}$ )

### Leptons

**électron**  $Q (-1)e$ ,  $m$  faible  
neutrinos électroniques  $Q_0, m \sim 0$

qui constituent la matière de notre environnement

muon et neutrinos muoniques  
tau et neutrinos tauiques

### Quarks

**quark haut (up)**  $Q (+2/3)e$ ,  $m$  faible, stable  
**quark bas(down)**  $Q (-1/3)e$ ,  $m$  faible, stable

q étrange(strange) et q charme(charm)  
q beau(beauty, bottom) et q sommet(top)

---

## Particules d'interaction: ( $S_1$ )

**photon**  $m(0) Q(0)$ : I. électromagn.; **gluon**  $g$   $m(0) Q(0)$ : I. nucléaire forte  
**boson Z**  $m(F) Q(0)$ , **W**  $m(F) Q(\pm 1)$ : Inter. nucléaire faible;  
**graviton** (Inter. gravitationnelle)

**boson de Higgs** ( $S_0, Q_0, m_F$ ) à l'origine de la masse des particules subatomiques.

---

$S$ =spin,  $Q$ =charge élect.,  $e$ =charge élect. élémentaire= $1.602 \cdot 10^{-19}C$ , charge de l'électron= $-e$ ,  $m_f$ =masse faible,  $m_F$ =masse élevée

# La masse des particules

- \* Ex: au temps du big bang, les particules Z et W sont sans masse et se déplacent à la vitesse de la lumière. A  $10^{-10}$ s, lors de la «*brisure de symétrie électrofaible*» Z et W interagissent avec le champ de Higgs et son boson; elles sont ralenties et acquièrent une masse. (Nobel 2013). 3000 chercheurs pour l'expérience ATLAS et 3000 pour l'exp. CMS, ont participé à la découverte du boson de Higgs au LHC du CERN, annoncée le 04/07/2012. Ils ont regardé «*toutes les signatures possibles de la désintégration du boson de Higgs*», dont un ensemble de 2 photons.
- \* Le modèle standard n'explique que 5% de la masse totale de l'univers. 27% est de la matière noire; il existe aussi de l'énergie noire, inconnue, qui fait accélérer l'expansion de l'univers.
- \* La nouvelle physique de la supersymétrie associe une particule supersymétrique à chaque particule.

\* Au contraire de la masse du deutérium qui est inférieure à la masse des nucléons, la masse du proton est très supérieure à celle des 3 quarks dont la somme ne représente que 1% de la masse du proton. Donc il existe une autre source de la masse, qui serait une transition de phase, une autre brisure spontanée de symétrie qui serait celle de la symétrie chirale et qui serait à l'origine de la masse des objets macroscopiques.

Remarque prononcée par un auditeur de la conférence:

*Le boson de Higgs, Nobel de physique* à l'ENS, Paris, Juil.2015

<https://www.youtube.com/watch?v=n3CK74LKXks&t=158s>

\* **Suppl.:**

\* Mécanisme de Brout/Englert/Higgs, BEH qui explique comment les particules acquièrent leur masse.

\* Revue Elementaire: <http://elementaire.lal.in2p3.fr> 2005-2016

\* Nobel 1969, 2004, 2013



# 4. Le Diagramme de Stabilité Nucléaire

Il existe:

- Des **isotopes naturels stables**.
- Des **isotopes naturels radioactifs instables**, qui changent de structure par désintégration nucléaire: ce sont des **radioisotopes**. Il y a transmutation d'un élément en un autre élément.
- Des **isotopes artificiels radioactifs instables**, qui sont obtenus par bombardement avec des particules. Leur durée de vie est très courte.

Sur le **diagramme de stabilité nucléaire**: la **vallée de stabilité** représente les nucléides (isotopes) stables, non radioactifs. De chaque côté sont distribués les nucléides instables.

Jusque  **$Z \simeq 20$** ,  $n = p$  et  $A \simeq 2Z$ , pour les nucléides stables.

Pour  **$Z > 20$** , toujours:  $n > p$  et  $A > 2Z$

$N/Z \simeq 1.5$  aux environs des noyaux stables les plus lourds: Pb et Bi

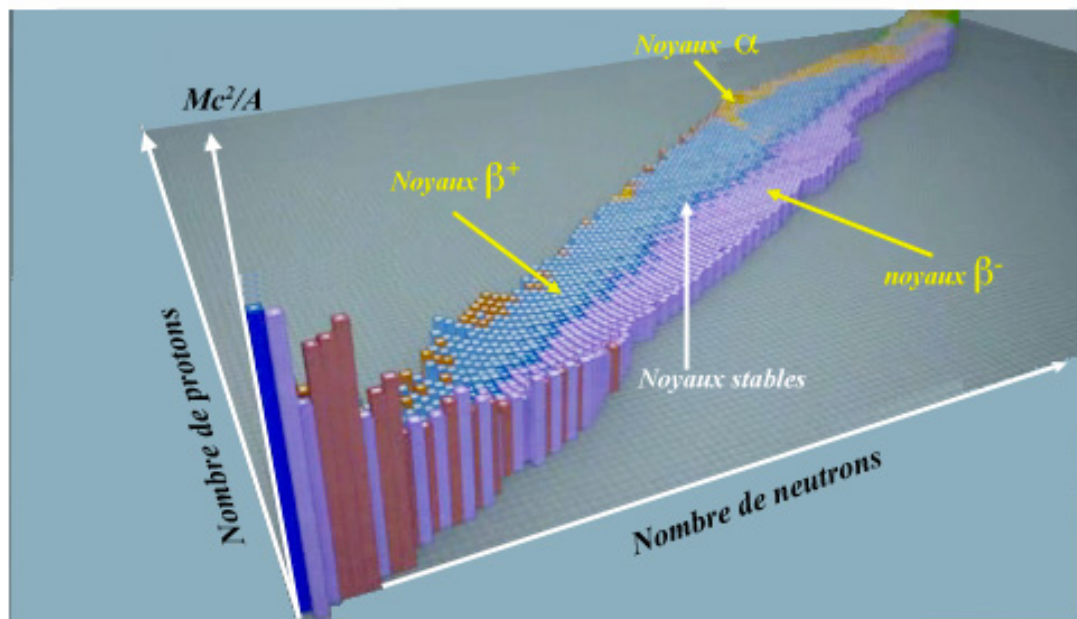
Supplement:

[http://www.in2p3.fr/actions/formation/PhyAuDet14/Cours\\_phynu\\_vol2.pdf](http://www.in2p3.fr/actions/formation/PhyAuDet14/Cours_phynu_vol2.pdf)

Dans la nature, il existe environ 330 nucléides (noyaux naturels stables et radioactifs) qui appartiennent à environ 90 éléments différents.

Plusieurs milliers d'autres nucléides sont obtenus artificiellement.

Suppl\*\* : film: <http://irfu.cea.fr/la-vallee-de-stabilite/>



<http://www.laradioactivite.com/site/pages/lavalleedestabilite.htm>

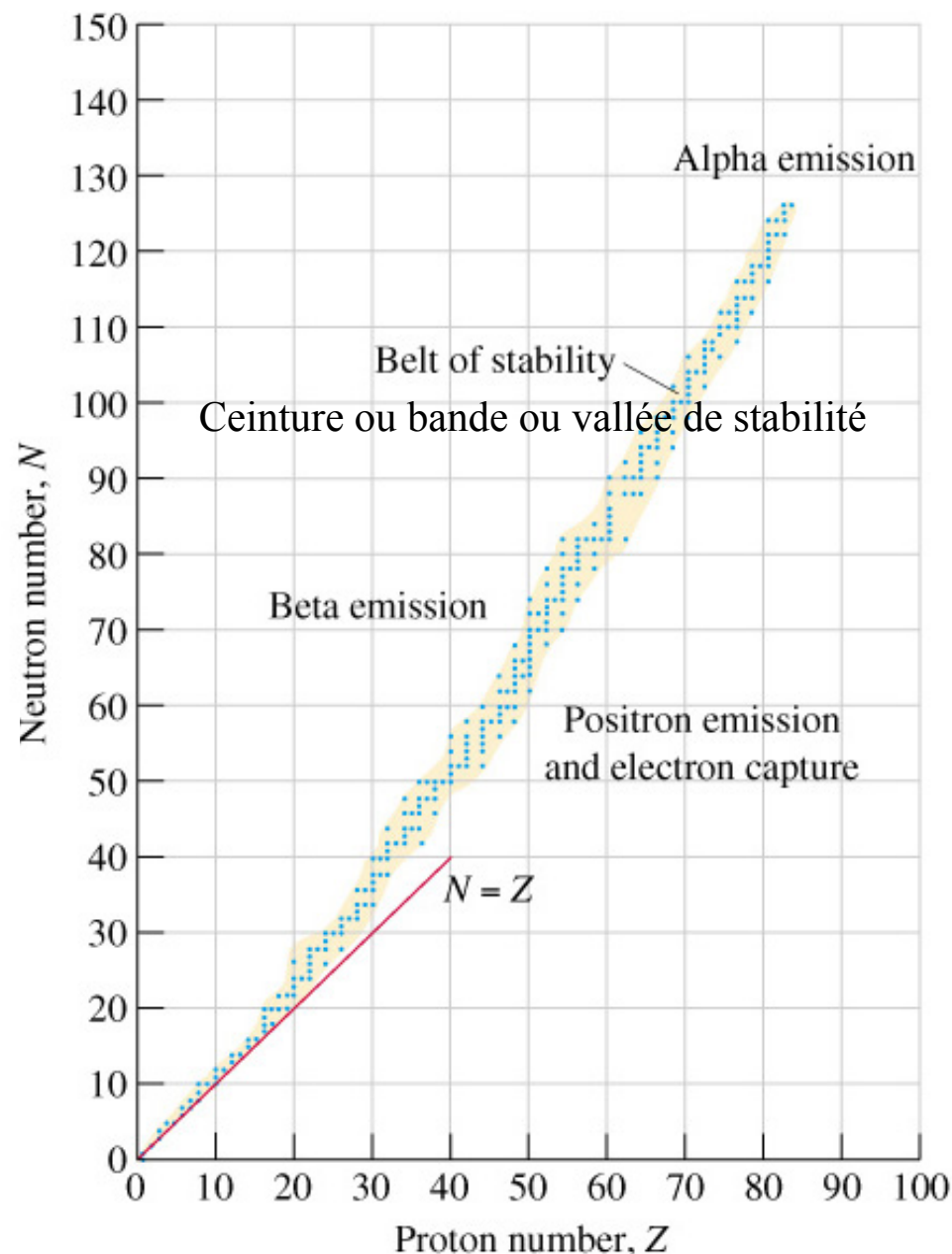
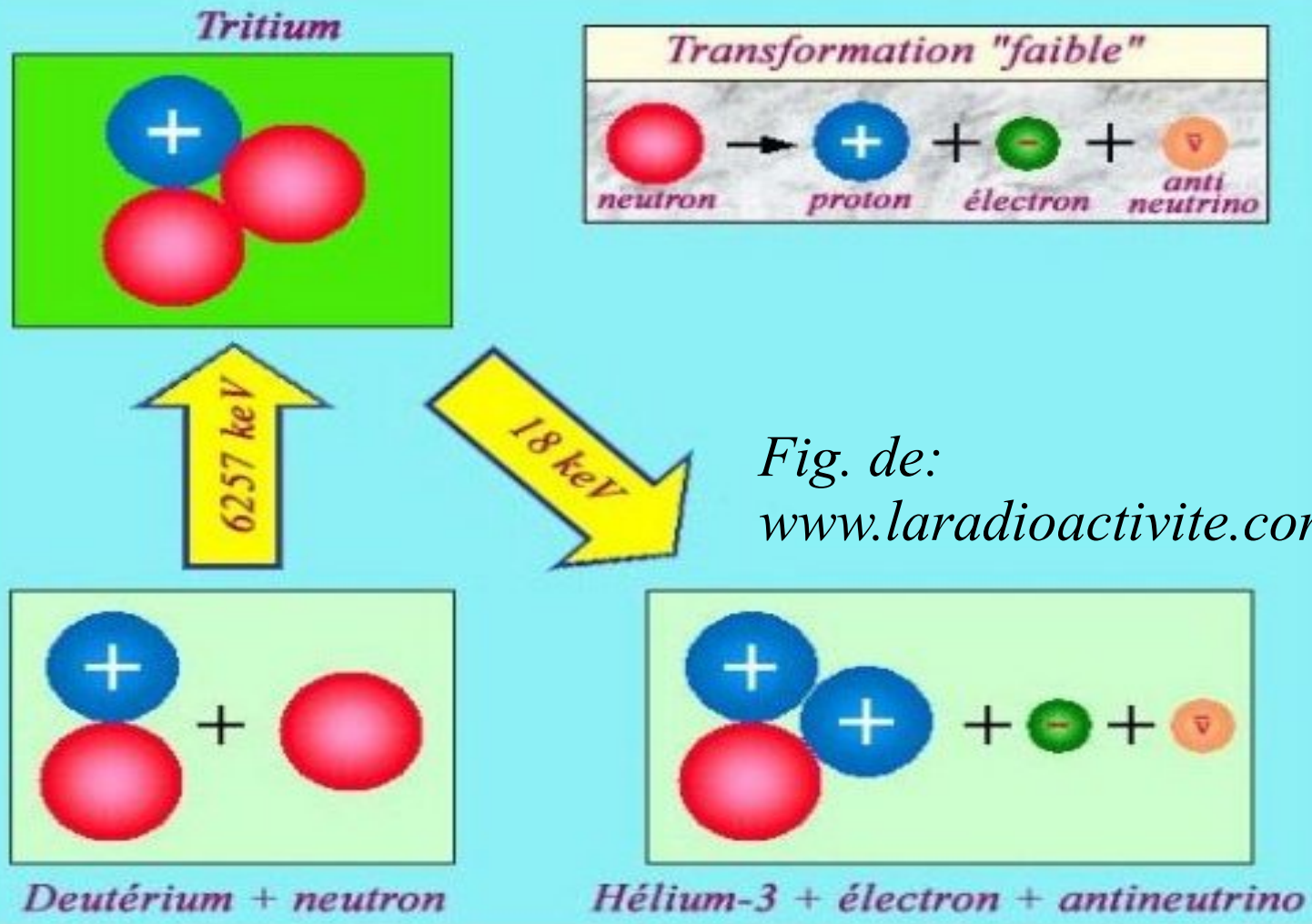


Fig. **Diagramme de stabilité nucléaire**  
Autre diagramme:  $A=f(Z)$



C'est la force faible qui rend le tritium instable.

Fig. de:  
[www.laradioactivite.com](http://www.laradioactivite.com)

- Le deutérium se transforme en tritium par capture radiative (capture d'un neutron et émission  $\gamma$ ):  ${}^1_0n + {}^2_1H \rightarrow {}^3_1H + \gamma$  qui peut s'écrire:  $D(n,\gamma)T$

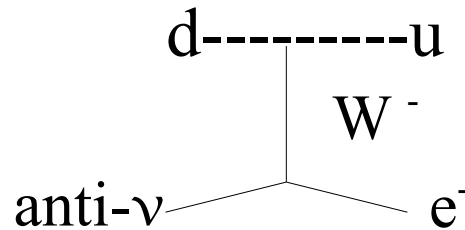
Ce qui se produit à  $\sim 100s$  après le big bang, quand  $T(\text{univers}) = \sim 1GK$

- Le tritium, le plus simple des noyaux radioactifs, se transforme en hélium-3 dans une désintégration  $\beta^-$  avec émission de 18 keV:



## Mécanisme de la désintégration radioactive

\* Le mécanisme de désintégration nucléaire  $\beta^-$  se fait par l'intermédiaire du boson lourd  $W^-$  (weak<sup>-</sup>) qui est le porteur de l'interaction de désintégration entre les quarks, cad porteur de l'interaction faible. Il porte la charge électrique de l'électron et il se transforme en un électron et un anti-neutrino.



\* Il en est de même pour la désintégration  $\beta^+$  qui se fait par l'intermédiaire du boson lourd  $W^+$  qui porte la charge e positive et qui se transforme en un positron et un neutrino.

\* Les bosons lourds  $W^\pm$ , weak, sont porteurs de l'interaction faible. Les bosons sans masse g, gluons, sont porteurs de l'interaction forte. La masse de W est  $80,4 \text{ GeV}/c^2$  alors que m du proton est  $0,9 \text{ GeV}/c^2$

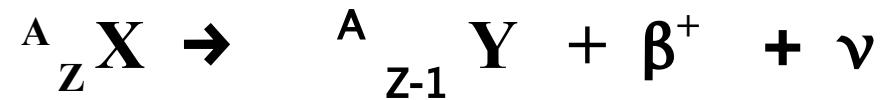
\* **Suppl:** *'Higgs, the theory of weak interaction'* Univ Edinburgh, Fev2014  
<https://www.youtube.com/watch?v=cXhxIOQ5Btg>

• Au dessous de la bande de stabilité:  $p > n$  ou  $p/n > 1$   
désintégration  $\beta^+$

un proton se transforme en un neutron, avec émission d'un positron (positon ou anti-électron)  $m = m(e^-)$   $q > 0$



un neutrino est une particule de masse infiniment petite et de charge nulle.



La radioactivité  $\beta^+$  est la désintégration d'un proton en un neutron, par interaction faible. Un quark up du nucléon "proton" se désintègre en un quark down, un positron et un neutrino électronique. Il reste dans le nucléon, deux quarks down et un quark up. Le proton devient un neutron.

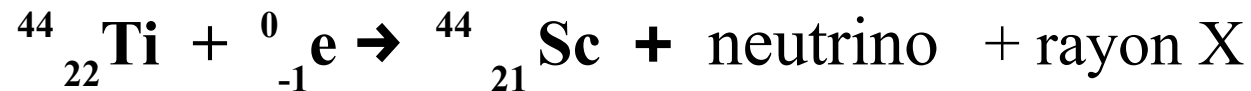
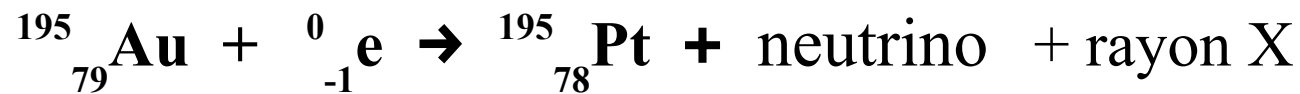
Les positrons se combinent très rapidement avec les électrons, en  $10^{-9}$  s; l'énergie résultante est émise sous forme de **rayons  $\gamma$** .

## capture d'électron

le noyau capture un  $e^-$  interne K du nuage (ou cortège) électronique:



(l'électron capturé est remplacé par un électron plus externe, un rayonnement X est émis).



Dans les 2 cas:  $\Delta Z = -1$ ,  $Z \downarrow$  et A ne change pas. En général, pour  $Z > 80$ , le processus de capture d'électrons domine; pour  $Z < 30$ , le processus d'émission de positrons domine et pour  $30 < Z < 80$ , les 2 types de processus sont observés.

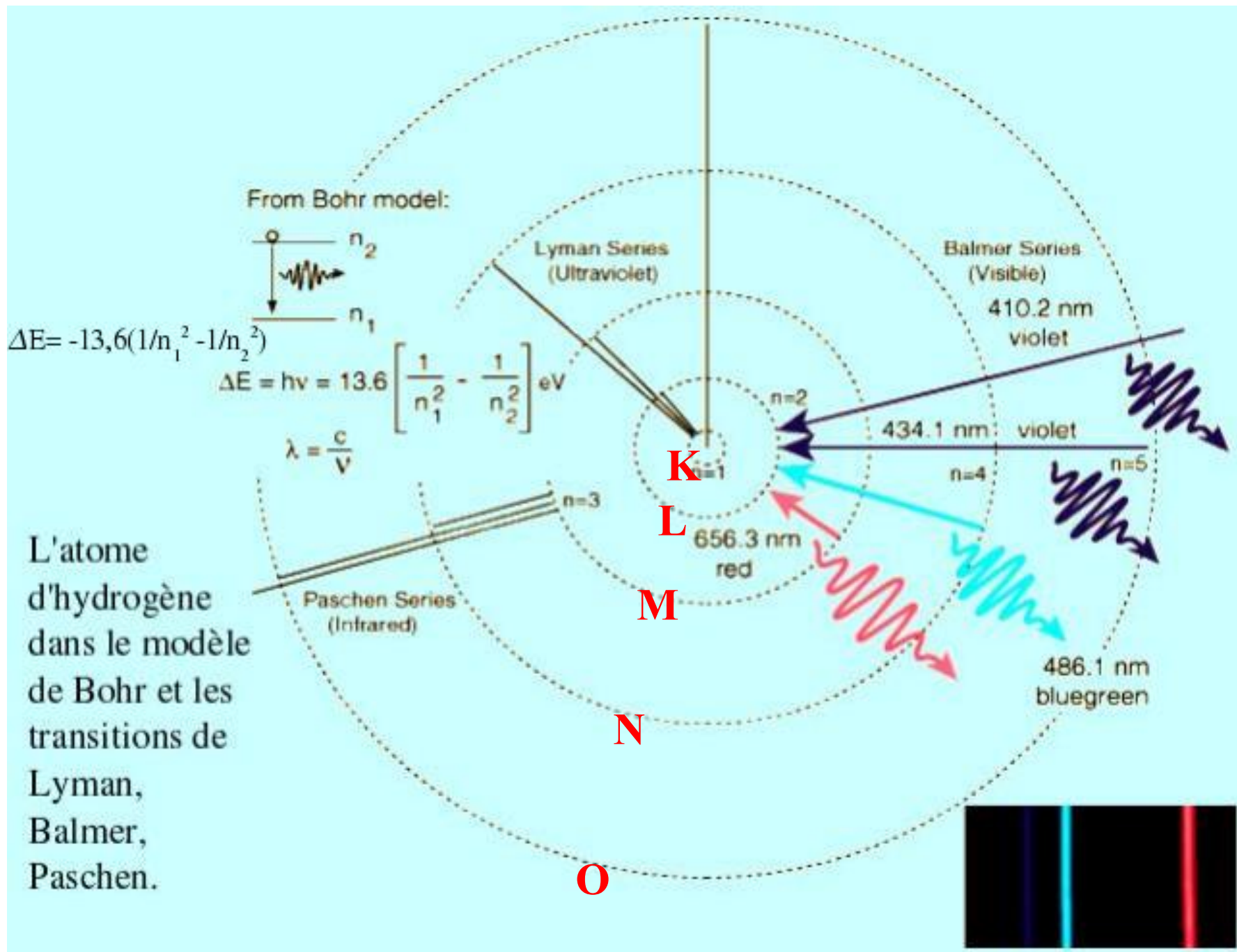


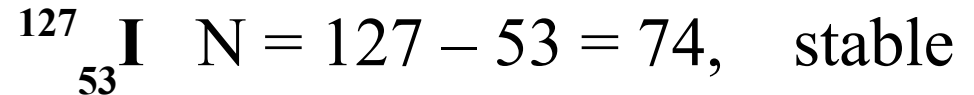
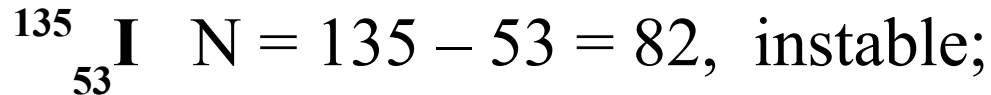
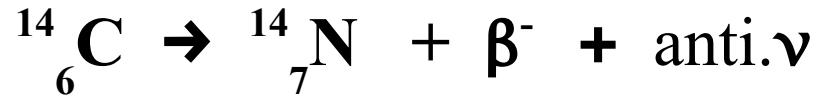
Fig. Les couches électroniques K, L, M, N, O, d'un atome cf chapitre "Les modèles de l'atome" parag.4: le modèle de Bohr

- Au dessus de la bande de stabilité: excès de neutrons:  $n > p$  ou  $n/p > 1$

## désintégration $\beta^-$



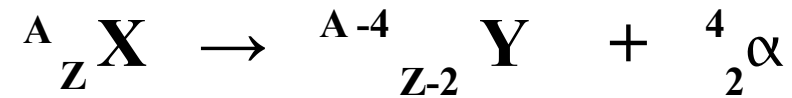
$${}^0_{-1}\mathbf{\beta} = {}^0_{-1}\mathbf{e} = \mathbf{\beta}^- \quad (= \mathbf{\beta}) = \text{électron émis par le noyau}$$



Dans ce cas, un quark down du nucléon “neutron” se désintègre en un quark up, un électron et un anti-neutrino électronique. Il reste dans le nucléon, deux quarks up et un quark down. Le neutron devient un proton.



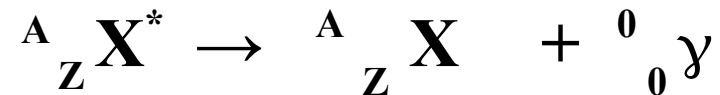
- A partir de Z=84 (polonium), tous les noyaux sont instables et radioactifs. Ils se désintègrent avec **émission  $\alpha$**  ( ${}^4_2\text{He}^{++}$  ou  ${}^4_2\alpha$  ou 2 p et 2n = noyau d'hélium).



En dessous de Z=60, il existe peu d'émissions  $\alpha$ .

- La désexcitation gamma

Souvent les noyaux formés sont dans un état excité:



$$60 \text{ keV} < \text{énergie d'un photon } \gamma < 3 \text{ MeV} = 3000 \text{ keV}$$

$$1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 96,485 \text{ kJ.mol}^{-1}$$

rem:

$$10 \text{ keV} < \text{énergie d'un photon X après C.E.} < 100 \text{ keV}$$

Le retour à l'état fondamental de l'élément excité peut se faire en passant par plusieurs états excités. Il y a émission de plusieurs rayonnements  $\gamma$ .

ex:  ${}^{60}_{27}\text{Co}$        $E \gamma_1 = 1,17 \text{ MeV}$        $E \gamma_2 = 1,33 \text{ MeV}$

• **La désintégration par paliers  $\alpha$  et  $\beta$**  se fait jusqu'à l'obtention d'un noyau stable. C'est une **série ou famille de nucléides radioactifs**.

Famille de l'uranium 238:  ${}_{92}^{238}\text{U} \rightarrow {}_{82}^{206}\text{Pb}$  (période de  ${}^{238}\text{U}$ :  $4,5 \cdot 10^9$  ans)

Famille de l'uranium 235:  ${}_{92}^{235}\text{U} \rightarrow {}_{82}^{207}\text{Pb}$  (période de  ${}^{235}\text{U}$ :  $7,0 \cdot 10^8$  ans)

Famille du thorium:  ${}_{90}^{232}\text{Th} \rightarrow {}_{82}^{208}\text{Pb}$  (période de  ${}^{232}\text{Th}$ :  $1,4 \cdot 10^{10}$  ans)

On obtient 3 isotopes stables du plomb.

Dans la désintégration de l'  ${}^{238}\text{U}$  les émissions  $\alpha$  dominant. Elles diminuent le nombre de nucléons par 4. Les émissions  $\beta^-$  ne changent pas ce nombre.

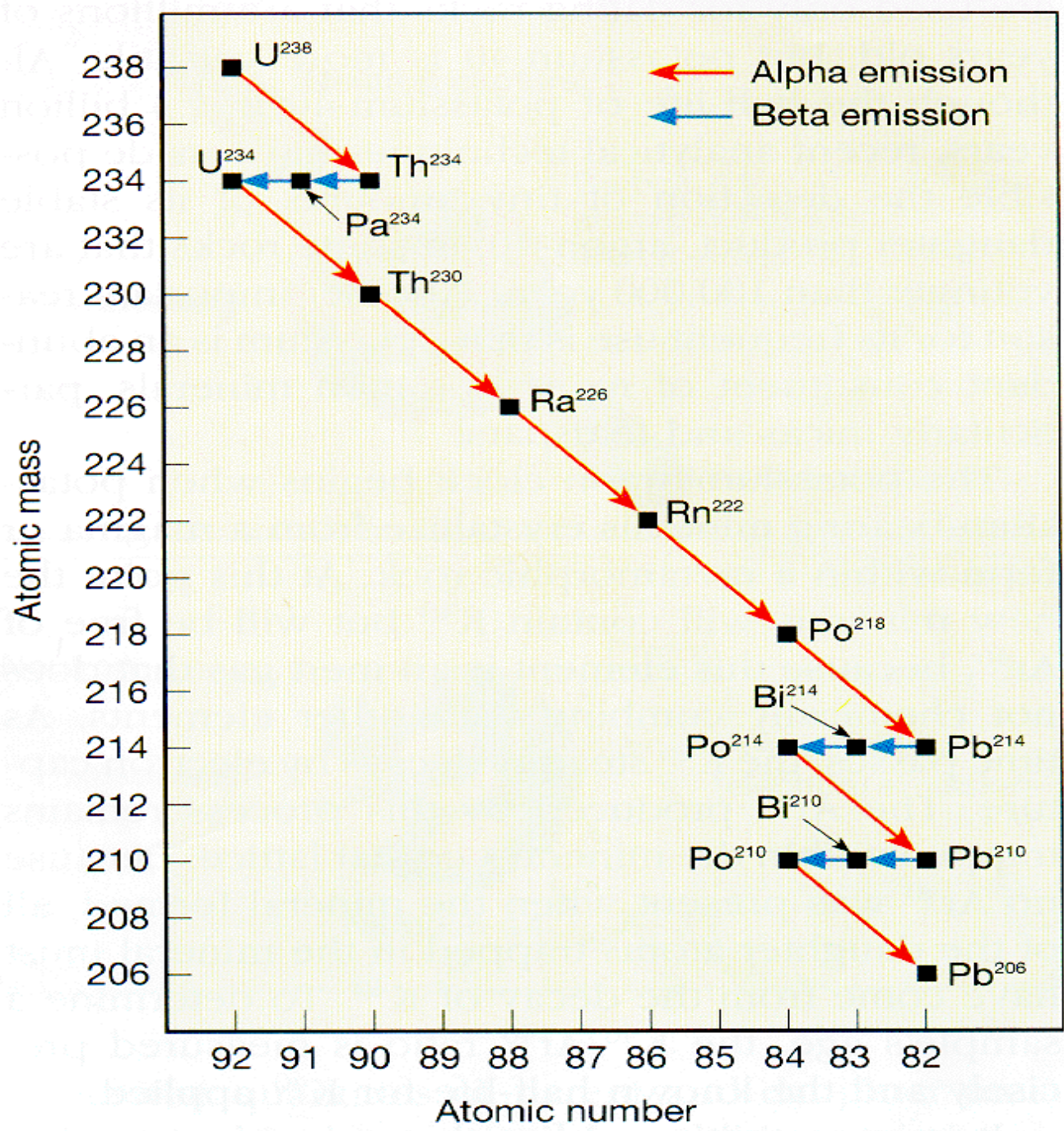
Donc, dans une filiation, le nombre de nucléons diminue par un multiple de 4.

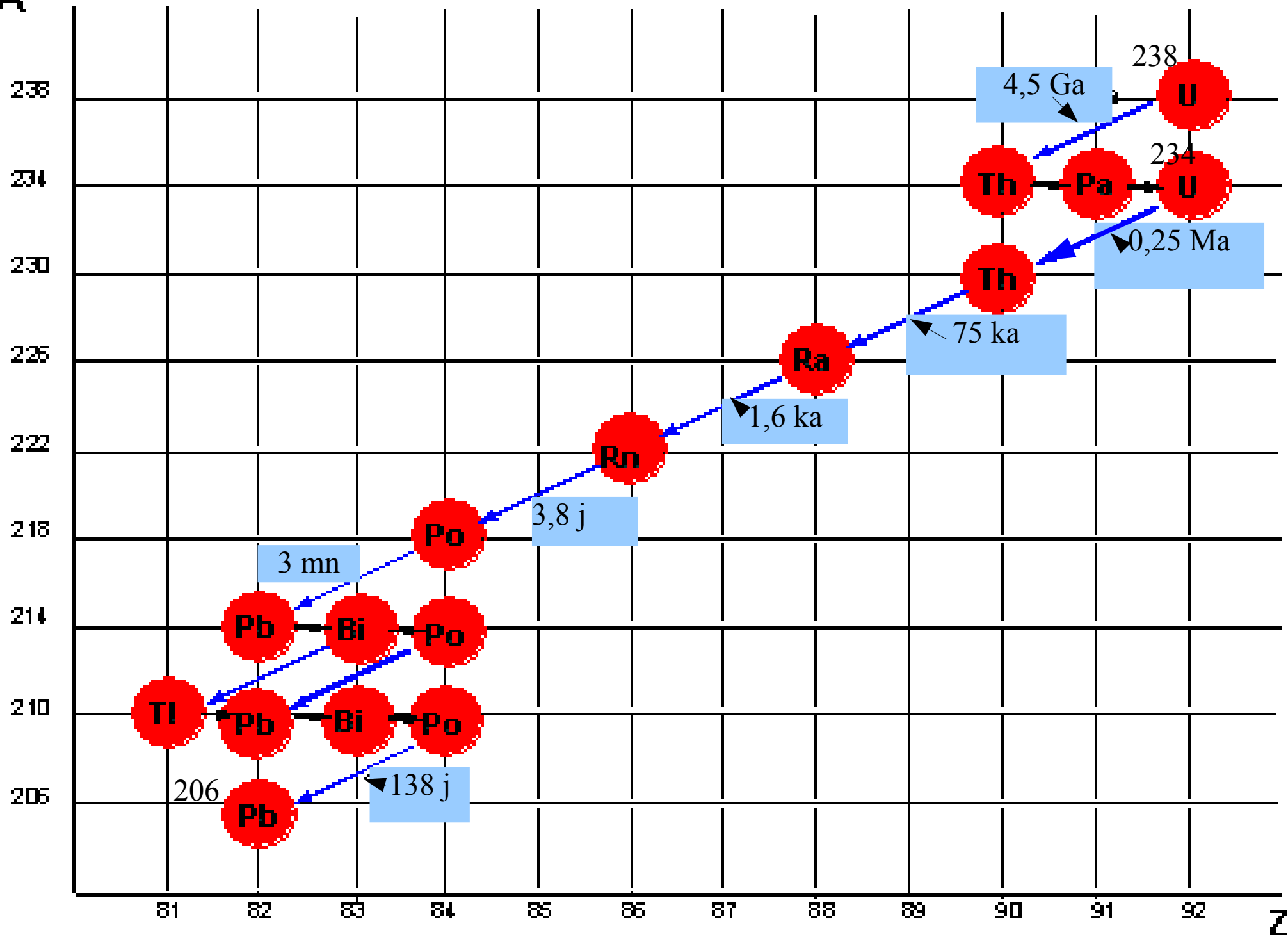
$238 - 206 = 32 = 4 \times 8$       Il existe 8 désintégrations  $\alpha$ .

$235 - 207 = 28 = 4 \times 7$       et       $232 - 208 = 24 = 4 \times 6$

fig. Filiation radioactive de l'uranium 238

seul  $^{206}\text{Pb}$  est stable



**A**

# 5. Loi de Désintégration Radioactive

Un noyau radioactif ne change pas jusqu'au moment où il se désintègre. L'instant d'avant, il est tel qu'il a toujours été, l'instant d'après, il n'existe plus. On dit qu'il ne “vieillit” pas. Il est impossible de prédire l'évolution d'un noyau. On établit une loi de probabilité de la durée de vie d'un noyau radioactif.

A l'échelle microscopique, chaque particule a un comportement erratique et il faut considérer un grand nombre de noyaux à l'échelle macroscopique (de l'ordre du nombre d'Avogadro:  $6,02 \cdot 10^{23}$ ), pour calculer une quantité moyenne.

Il en est de même pour le comportement des gaz. A l'échelle microscopique chaque molécule a un comportement erratique: mouvement brownien. A l'échelle macroscopique, on établit des lois d'évolution simples.

**Un processus fondamentalement aléatoire conduit à un comportement macroscopique obéissant à une loi simple.**

Le **nombre dN de désintégrations nucléaires** qui se produisent dans une quantité de matière donnée, durant un intervalle de temps infiniment petit dt à partir du temps t, est proportionnel à l'intervalle dt et au nombre d'atomes radioactifs N(t) présents à l'instant t, selon:  $dN = -\lambda \cdot N(t) \cdot dt$

C'est une loi cinétique du premier ordre.

$\lambda$  est la constante radioactive, caractéristique du radionucléide. ( $s^{-1}$ )

$$\int \frac{dN}{N} = \int -\lambda \cdot dt \quad \ln N = -\lambda \cdot t + c$$

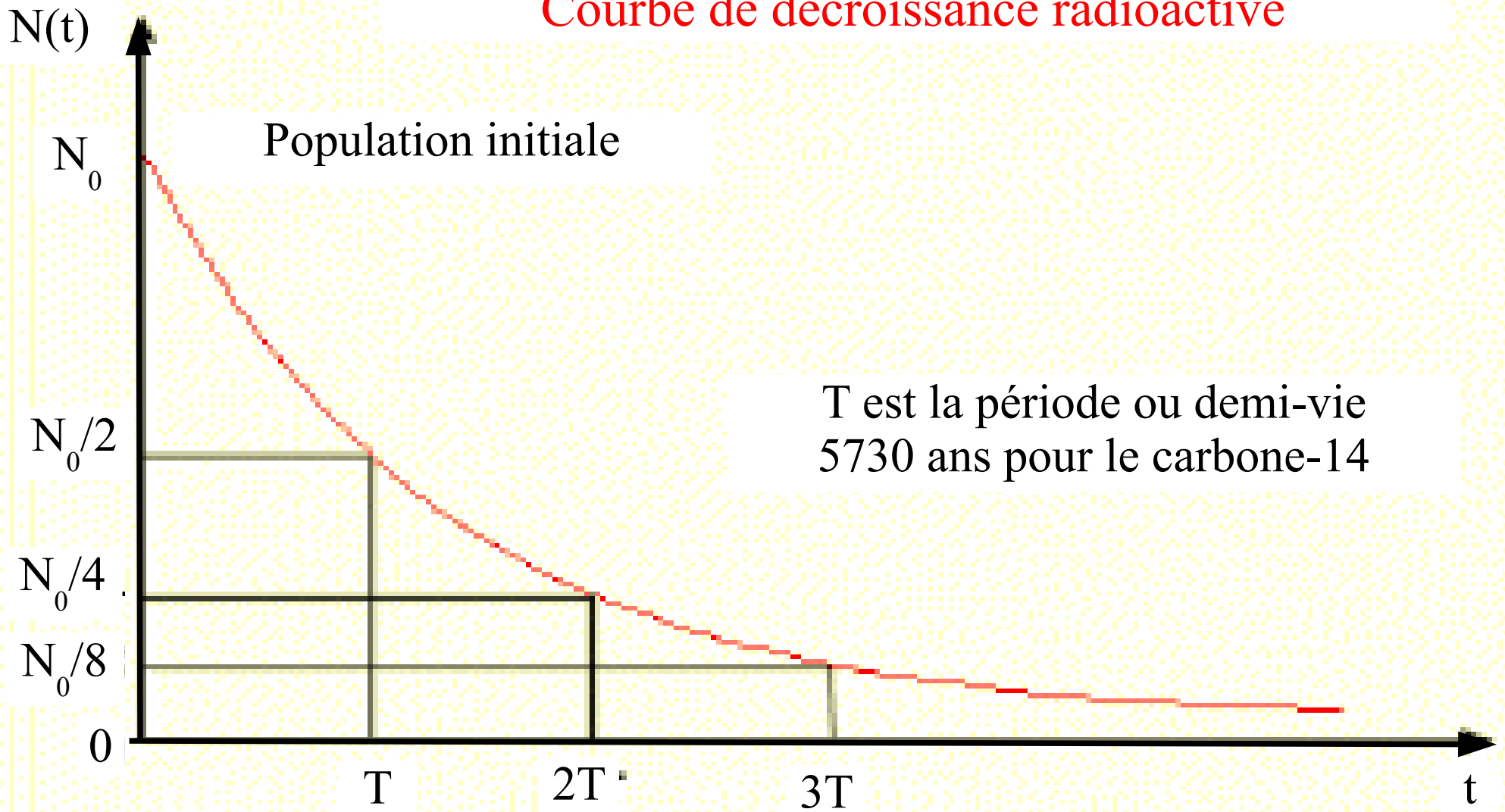
à  $t = 0$   $N = N_0$   $\ln N_0 = c$  et  $\ln N = -\lambda \cdot t + \ln N_0$   $\ln N/N_0 = -\lambda \cdot t$

$$N = N_0 \exp(-\lambda \cdot t)$$

La **période radioactive T** ou **demi-vie  $t_{1/2}$**  d'un radionucléide est le temps nécessaire pour que la moitié des noyaux radioactifs présents initialement se soit désintégrée.  $N(T) = N_0 / 2 = N_0 \exp(-\lambda \cdot T)$   $\lambda \cdot T = \ln 2$

$$t_{1/2} = T = \ln 2 / \lambda = 0,693 / \lambda$$

# Courbe de décroissance radioactive



$N_0$   $N_0/2$   $N_0/4$   $N_0/8$   $N_0/16$   $N_0/32$   $N_0/64$   $N_0/128$   $N_0/256$   $N_0/512$   $N_0/1024$

$N_0/1024 = N_0/2^{10}$  Il faut 10 périodes pour que le nombre de noyaux instables soit divisé par 1000.

<b>Isotope</b>	<b>demi-vie</b>	<b>Isotope</b>	<b>demi-vie</b>
Sr-82	25.36 jours	I-122	3.6 minutes
Sr-83	1.35 jours	I-123	13.2 heures
Sr-84	Stable	I-124	4.2 jours
Sr-85	64.84 jours	I-125	60.1 jours
Sr-85m	1.27 heures	I-126	13.0 jours
Sr-86	Stable	I-127	Stable
Sr-87	Stable	I-128	25.0 minutes
Sr-87m	2.8 heures	I-129	$1.57 \cdot 10^7$ ans
Sr-88	Stable	I-130	12.4 heures
<b>Sr-89</b>	<b>50.52 jours</b>	<b>I-131</b>	<b>8.0 jours</b>
Sr-90	29.1 années	I-132	2,3 heures
Sr-91	9.5 heures	I-133	20,8 heures
Sr-92	2.71 heures	I-134	52,6 minutes
Sr-93	7.4 minutes	I-135	6,6 heures
		I-136	1,4 minutes

**Suppl:** [chimicalelements.com](http://chimicalelements.com) ; [laradioactivite.com](http://laradioactivite.com)



<b>Isotope</b>	<b>demi-vie</b>
H-1	stable
H-2 =D	stable
H-3 =T	12,3 ans
C-11	20,3 minutes
C-12	stable
C-13	stable
C-14	5730 ans
C-15	2,5 secondes
F-18	1,8 heures
F-19	stable
Na-22	2,6 ans
Na-23	stable
Na-24	14,96 heures

## Activité d'un radioélément

L'activité  $A$  d'un radioisotope est le nombre de désintégrations qui se produisent par unité de temps (s) dans une quantité donnée de ce radioisotope. C'est la vitesse de désintégration de ce radioisotope.

$$A = - dN / dt = v$$

$$dN = -\lambda.N(t) . dt \quad \text{donc} \quad A = \lambda.N \quad \text{et} \quad \ln A / A_0 = \ln N / N_0 = -\lambda. t$$

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

L'activité diminue de moitié après une période.

unité: le **Becquerel** ( **Bq** )

$$1 \text{ Bq} = 1 \text{ désintégration. s}^{-1} \text{ (dps)}$$

ancienne unité: le Curie (Ci)

$$1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq} = \text{activité de 1 g de radium.}$$

**Activité spécifique**: nombre de noyaux qui se désintègrent par s et par g de l'isotope radioactif.

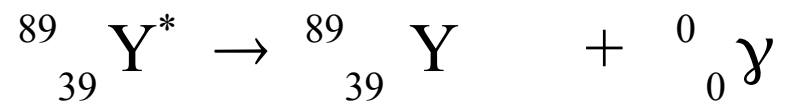
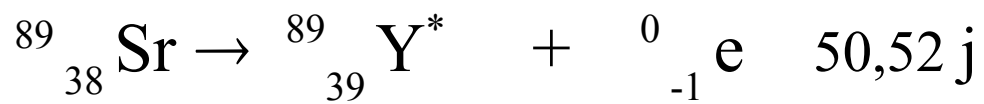
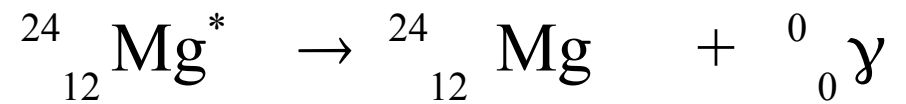
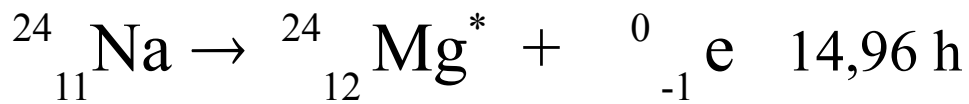
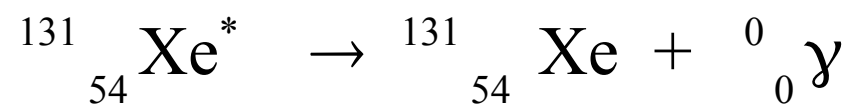
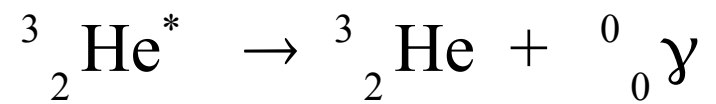
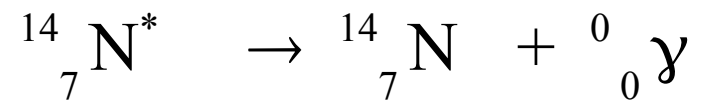
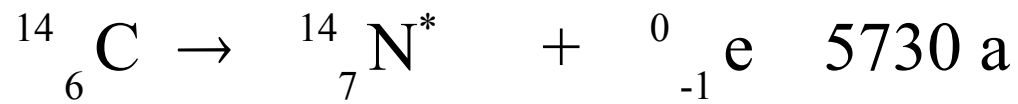
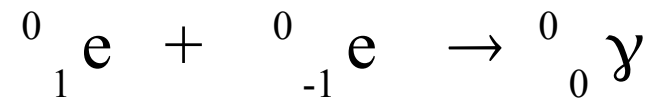
# 6. Applications Biomédicales

## ex: Marquage radioactif

Une molécule est marquée quand un atome, sous la forme d'un isotope stable, est remplacé par un isotope radioactif du même élément. On peut ainsi suivre l'évolution de la molécule dans l'organisme. Cette méthode est utilisée pour les études de métabolisme des médicaments et pour les études de fonctionnement des organes.

Les radio-isotopes les plus utilisés sont le fluor-18, le carbone-14, l'hydrogène-3 (tritium), l'iode-131, le sodium-24 et le strontium-89. Ces radio-isotopes sont des émetteurs gamma consécutivement à une émission bêta .

**Suppl:** //chimge.unil.ch

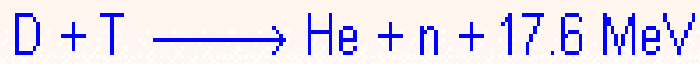
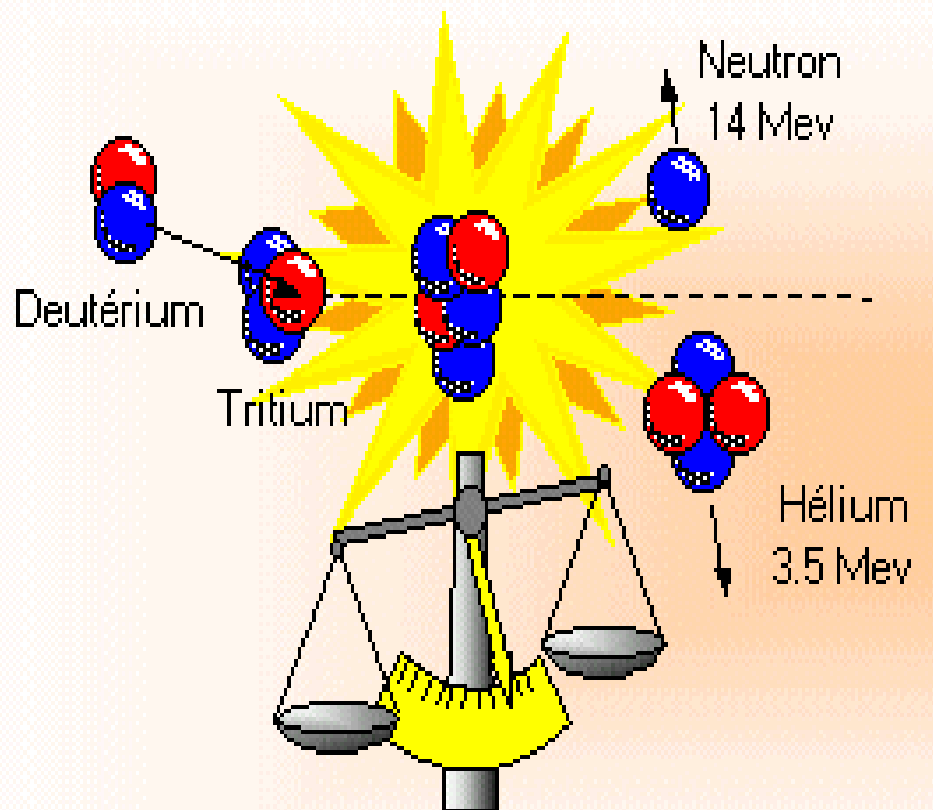


Grâce à l'émission de rayons  $\gamma$ , on peut étudier le **flux sanguin** dans le corps humain en utilisant le radio-isotope **sodium-24** administré sous forme de sel **NaCl** (le cation  $\text{Na}^+$  est transporté par le sang) ou la croissance des **os** par le radio-isotope **strontium-89** administré sous forme de **SrCl<sub>2</sub>** (le cation  $\text{Sr}^{2+}$  peut remplacer le cation  $\text{Ca}^{2+}$  dans les os).

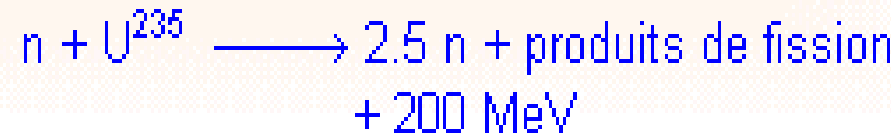
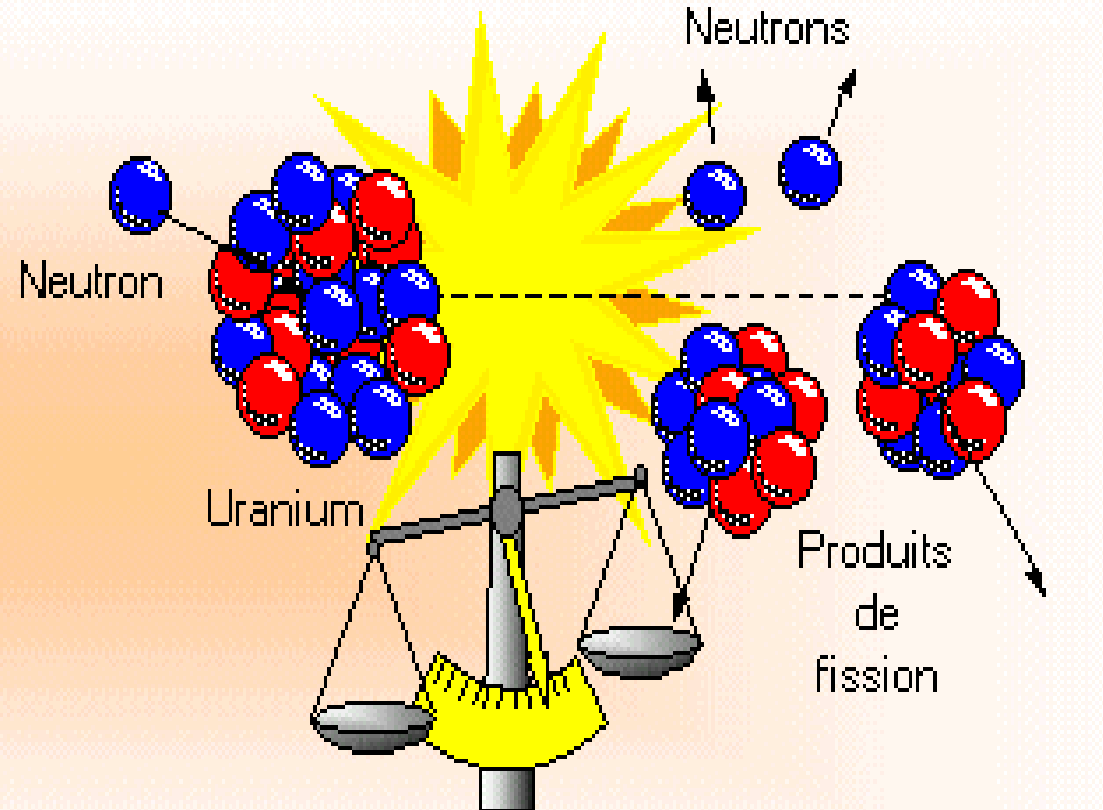
De même, le radio-isotope **iode-131**, administré sous forme de **NaI**, peut être utilisé pour étudier le fonctionnement de la glande thyroïde en mesurant la vitesse par laquelle la **glande thyroïde** absorbe l'anion iodure. Le radioisotope **iode-123** est utilisé pour étudier la circulation du sang dans le cerveau et **l'activité cérébrale**.

Il faut  $10 \times 14,96 \text{ h} = \sim 6$  jours pour que le nombre de noyaux radioactifs de Na-24 soit divisé par 1000. Il faut  $\sim 1,5$  ans pour le Sr-89 et  $\sim 3$  mois pour l'iode-131.

# 7. La Fusion et la Fission Nucléaires



fusion



fission

Entre l'état initial et l'état final un peu de masse a disparu. Ce défaut de masse apparaît sous la forme de l'énergie:  $E = mc^2$

Objectif d'**ITER** (International Thermonuclear Experimental Reactor): à Cadarache. Maîtriser la fusion entretenue d'un plasma deutérium-tritium sur des temps longs.

**Suppl:** //www-fusion-magnetique.cea.fr

//irfm.cea.fr

**Energie nucléaire de liaison** = énergie qu'il faut fournir au noyau pour le dissocier en nucléons isolés. C'est la valeur absolue de l'énergie libérée lors de la formation du noyau.

+ En/nucléon est élevée, + le noyau est stable.

La courbe  $\text{En.nucléon}^{-1} = f(A)$ , présente un **pic au niveau du  $^{56}\text{Fe}$**  du Co et du Ni. Les forces d'attraction entre nucléons de ces éléments sont les plus importantes. **Le fer est l'élément le plus stable.**  $\Rightarrow$  gde abondance du Fe dans l'Univers.

Les étoiles de masse  $> 1,4 m(\text{soleil})$  forment des éléments par fusion dans un modèle en pelure d'oignon. La température augmente de l'extérieur de l'étoile  $\sim 10^7 \text{ K}$ , vers le centre  $\sim 10^{10} \text{ K}$  permettant ainsi la fusion de l'hydrogène en hélium puis en élément de plus en plus lourd: C, O, Ne..jusqu'au Si et au Fe qui se concentre au centre. C'est la **nucléosynthèse stellaire.**

L'uranium-235 a une  $\text{En.nucléon}^{-1}$  plus faible, et a tendance à subir une fission. Au contraire les éléments en dessous du Fe ont tendance à fusionner.

**Energie nucléaire de liaison** = énergie qu'il faut fournir au noyau pour le dissocier en nucléons isolés. C'est la valeur absolue de l'énergie libérée lors de la formation du noyau.

+  $E_n/\text{nucléon}$  est élevée, + le noyau est stable.

La courbe  $E_n.\text{nucléon}^{-1} = f(A)$ , présente un **pic au niveau du  $^{56}\text{Fe}$**  du Co et du Ni. Les forces d'attraction entre nucléons de ces éléments sont les plus importantes. **Le fer est l'élément le plus stable.**

⇒ gde abondance du Fe dans l'Univers.

Les étoiles de masse  $> 1,4 m(\text{soleil})$  forment des éléments par fusion dans un modèle en pelure d'oignon. La température augmente de l'extérieur de l'étoile  $\sim 10^7$  K, vers le centre  $\sim 10^{10}$  K permettant ainsi la fusion de l'hydrogène en hélium puis en élément de plus en plus lourd: C, O, Ne...jusqu'au Si et au Fe qui se concentrent au centre. C'est la **nucléosynthèse stellaire**.

L'uranium-235 a une  $E_n.\text{nucléon}^{-1}$  plus faible et a tendance à subir une fission. Au contraire les éléments en-dessous du fer ont tendance à fusionner.



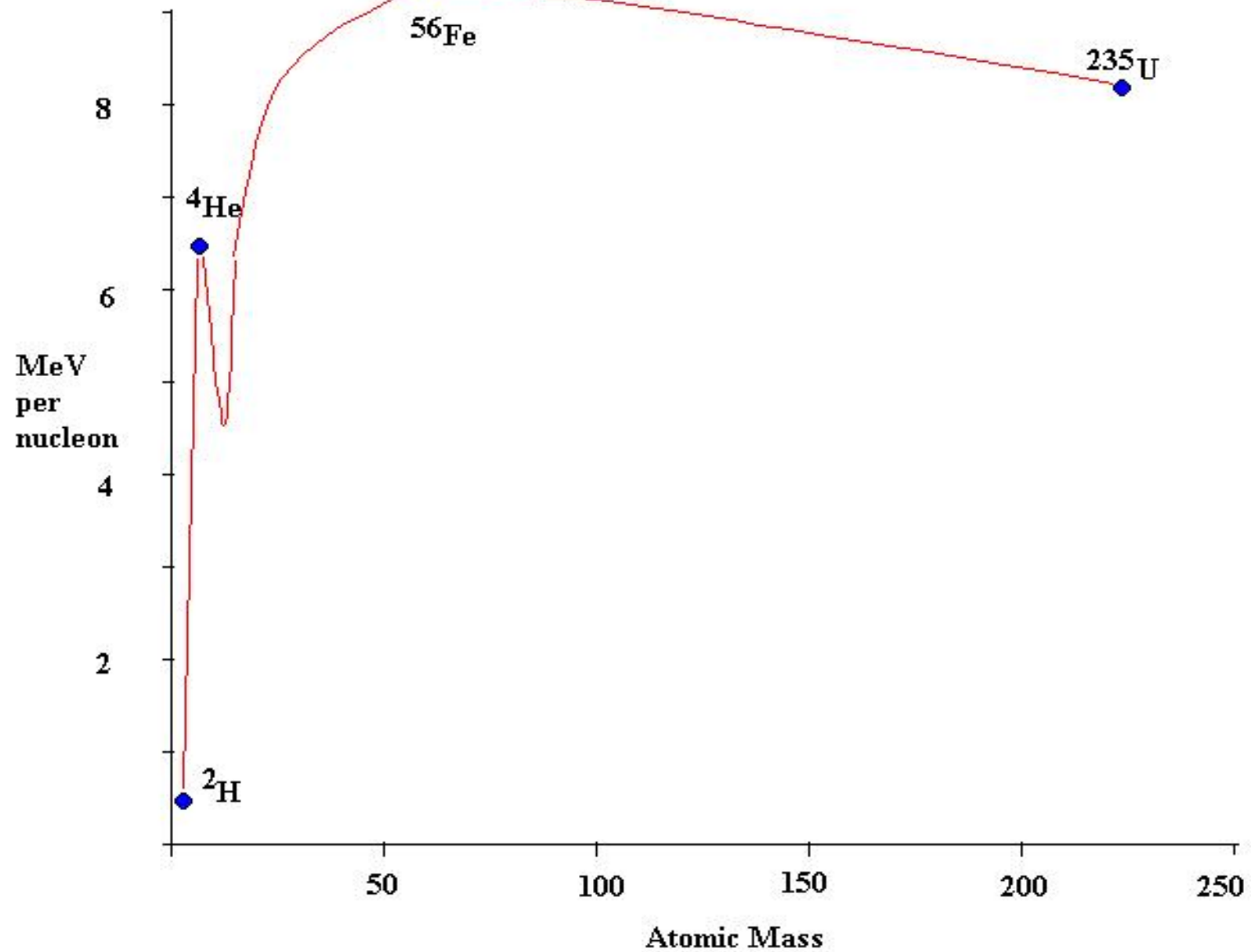
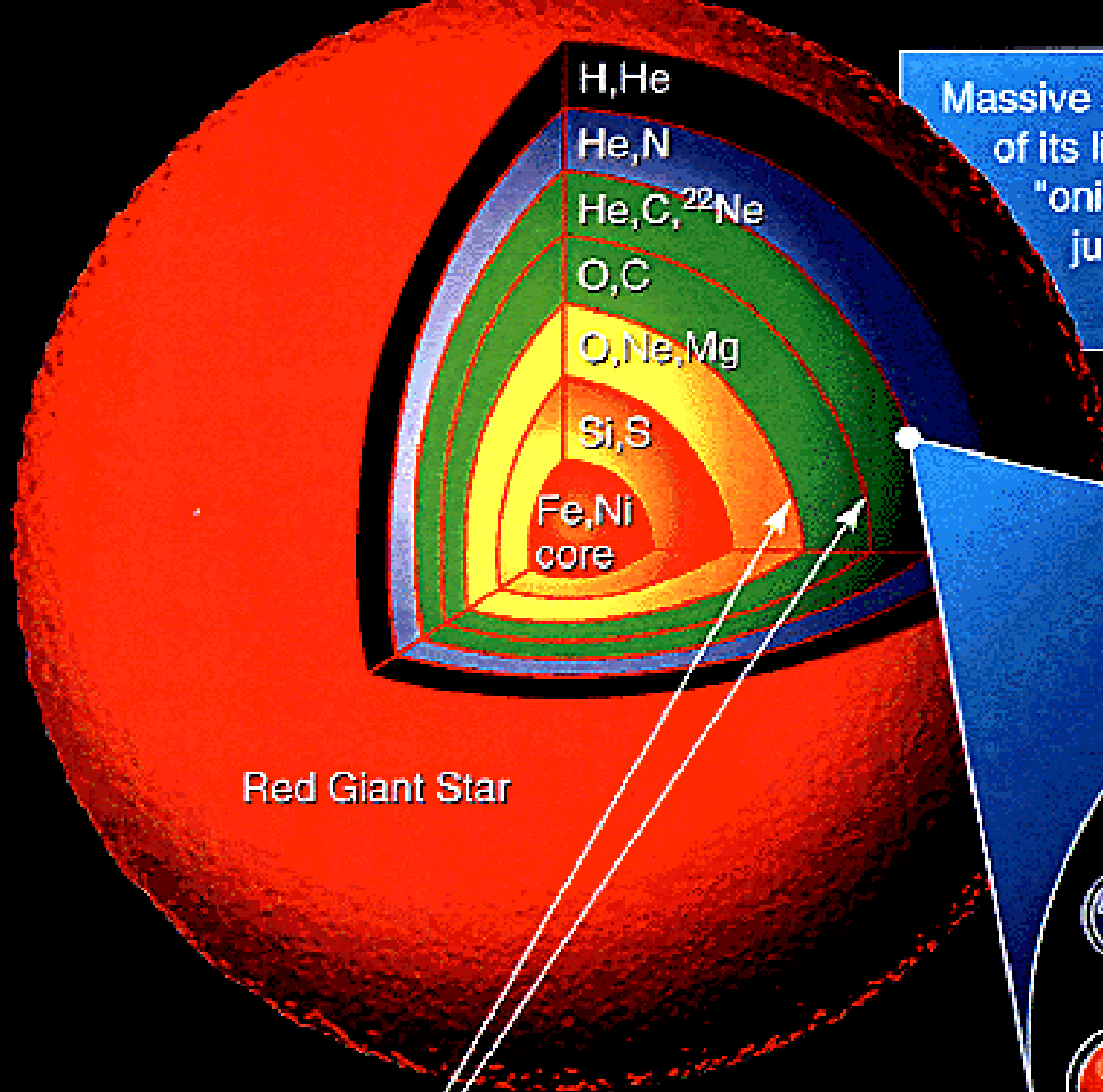


Fig: Energie nucléaire de liaison par nucléon en fonction de A, la masse atomique.

Wikipedia  
Domaine public  
Nucleosynthesis  
in a red  
supergiant/2008

Massive star near the end  
of its lifetime has an  
"onion-like" structure  
just prior to exploding  
as a supernova



Red Giant Star

Nuclear burning occurs at the  
boundaries between zones

Example of nuclear reactions  
that build neutron-rich isotopes

