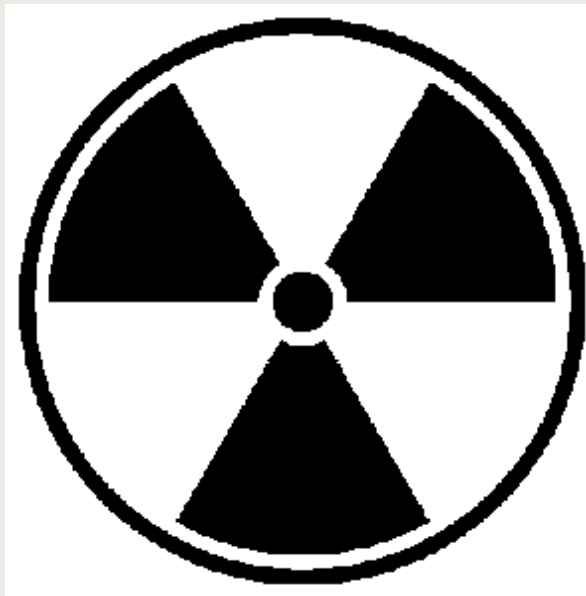


# BIOPHYSIQUE DES RADIATIONS

## LA RADIOACTIVITÉ



# LA RADIOACTIVITÉ

## I. LE NOYAU

- A. Classification des nucléides
  - 1. Classification chimique
  - 2. Classification physique
- B. Composition des nucléides
  - 1. Les nucléons
  - 2. Les particules élémentaires
- C. Énergie de liaison et défaut de masse
- D. Facteurs de stabilité
- E. Les forces nucléaires
  - 1. Les forces électrostatiques
  - 2. Les forces spécifiques du noyau
- F. Les réactions de fission et de fusion nucléaire
  - 1. La fusion
  - 2. La fission

# LA RADIOACTIVITÉ

## II. LES TRANSFORMATIONS RADIOACTIVES

### A. Généralités

### B. La radioactivité alpha

### C. Les transformations isobariques

1. Désintégration  $\beta^-$
2. Désintégration  $\beta^+$
3. Désintégration par capture électronique

### D. Les transformations isomériques

1. Radioactivité  $\gamma$
2. La conversion interne

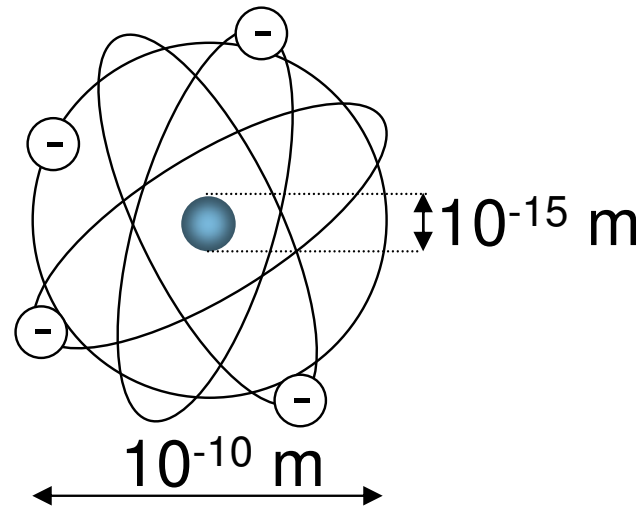
# I. LE NOYAU

## A. Classification des nucléides

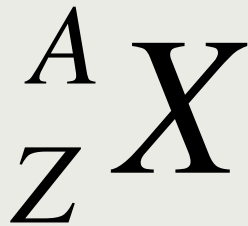
1. Classification chimique
2. Classification physique

# RAPPEL

L'atome a sa masse concentrée autour du noyau chargé + très dense autour duquel gravitent des électrons chargés -.



# RAPPEL



**A**: nombre de masse;  
nombre de nucléons

**Z**: numéro atomique;  
nombre de protons

Les protons sont chargés + et les neutrons n'ont pas de charge.

Les protons et les neutrons sont les nucléons.

Lorsque l'atome est neutre, le nombre de protons Z est égal au nombre d'électrons.

# I.A. La classification des nucléides

## I. LE NOYAU

- A. Classification des nucléides
  - 1. Classification chimique
  - 2. Classification physique
- B. Composition des nucléides
  - 1. Les nucléons
  - 2. Les particules élémentaires
- C. Énergie de liaison et défaut de masse
- D. Facteurs de stabilité
- E. Les forces nucléaires
  - 1. Les forces électrostatiques
  - 2. Les forces spécifiques du noyau
- F. Les réactions de fission et de fusion nucléaire
  - 1. La fusion
  - 2. La fission

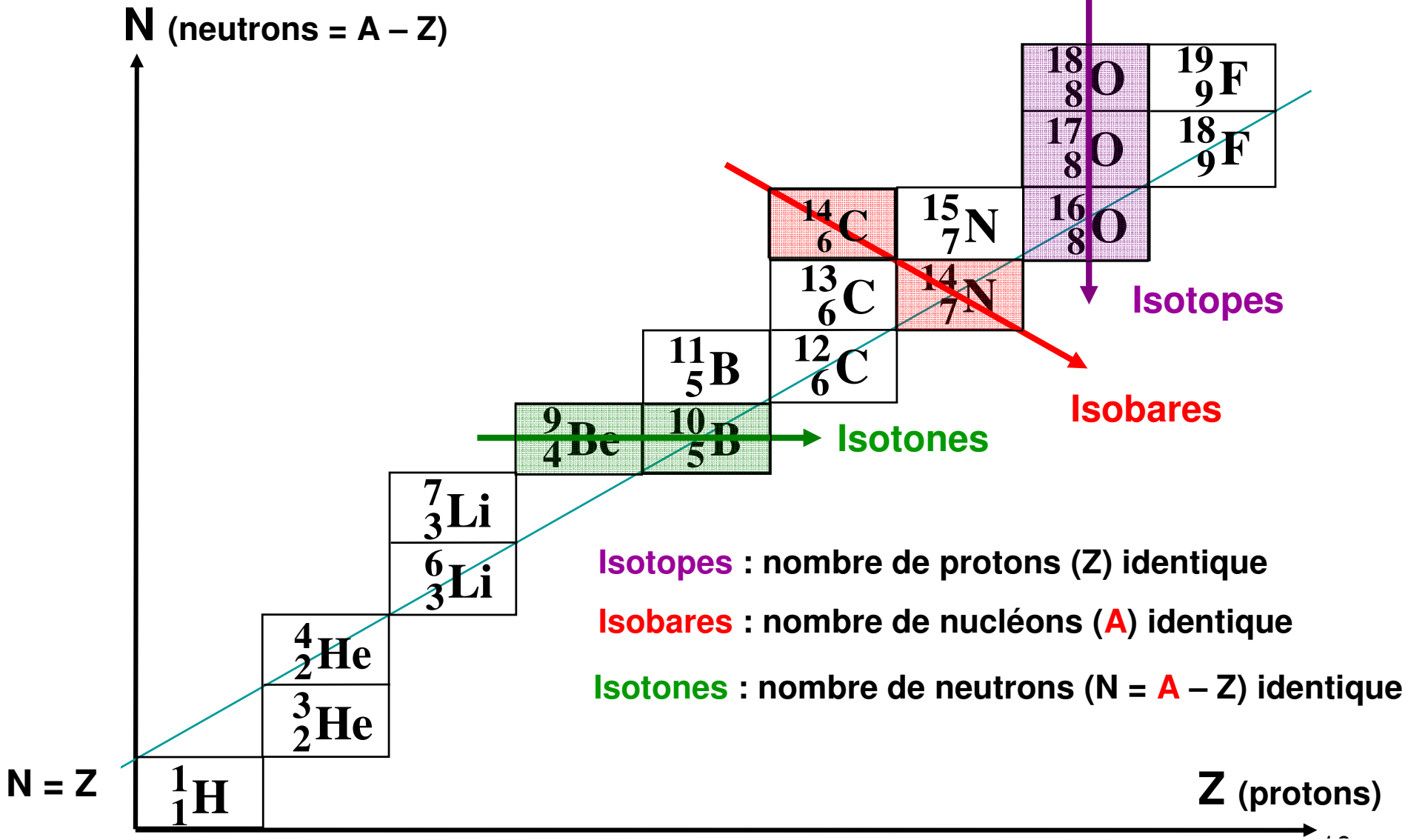
# CLASSIFICATION PÉRIODIQUE DES ÉLÉMENTS CHIMIQUES

CLASSIFICATION PÉRIODIQUE DES ÉLÉMENTS CHIMIQUES																							
1 1,00794 H <i>Hydrogène</i>	2 4,0026 He <i>Hélium</i>																						
3 6,941 Li <i>Lithium</i>	4 9,01218 Be <i>Béryllium</i>	14 12,0107 C <i>Carbone</i>	5 10,811 B <i>Bore</i>	6 12,0107 C <i>Carbone</i>	7 14,0067 N <i>Azote</i>	8 15,9994 O <i>Oxygène</i>	9 18,9984 F <i>Fluor</i>	10 20,1797 Ne <i>Neon</i>											18 39,948 Ar <i>Argon</i>				
11 22,9898 Na <i>Sodium</i>	12 24,305 Mg <i>Magnésium</i>																	13 26,9815 Al <i>Aluminium</i>	14 28,0855 Si <i>Silicium</i>	15 30,9738 P <i>Phosphore</i>	16 32,065 S <i>Soufre</i>	17 35,453 Cl <i>Chlore</i>	18 39,948 Ar <i>Argon</i>
19 39,0983 K <i>Potassium</i>	20 40,078 Ca <i>Calcium</i>	21 44,9559 Sc <i>Scandium</i>	22 47,867 Ti <i>Titane</i>	23 50,9415 V <i>Vanadium</i>	24 51,9961 Cr <i>Chrome</i>	25 54,9380 Mn <i>Manganèse</i>	26 55,845 Fe <i>Fer</i>	27 58,9332 Co <i>Cobalt</i>	28 58,6934 Ni <i>Nickel</i>	29 63,546 Cu <i>Cuivre</i>	30 65,38 Zn <i>Zinc</i>	31 69,723 Ga <i>Gallium</i>	32 72,63 Ge <i>Germanium</i>	33 74,9216 As <i>Arsenic</i>	34 78,96 Se <i>Sélénium</i>	35 79,904 Br <i>Brome</i>	36 83,798 Kr <i>Krypton</i>						
37 85,4678 Rb <i>Rubidium</i>	38 87,62 Sr <i>Strontium</i>	39 88,9058 Y <i>Yttrium</i>	40 91,224 Zr <i>Zirconium</i>	41 92,9064 Nb <i>Niobium</i>	42 95,96 Mo <i>Molybdène</i>	43 (98) Tc <i>Technétium</i>	44 101,07 Ru <i>Ruthénium</i>	45 102,905 Rh <i>Rhodium</i>	46 106,42 Pd <i>Palladium</i>	47 107,868 Ag <i>Argent</i>	48 112,411 Cd <i>Cadmium</i>	49 114,818 In <i>Indium</i>	50 118,71 Sn <i>Étain</i>	51 121,76 Sb <i>Antimoine</i>	52 127,6 Te <i>Tellure</i>	53 126,905 I <i>Iode</i>	54 131,293 Xe <i>Xénon</i>						
55 132,905 Cs <i>Césium</i>	56 137,327 Ba <i>Baryum</i>	72 178,49 Hf <i>Hafnium</i>	73 180,948 Ta <i>Tantale</i>	74 183,84 W <i>Tungstène</i>	75 186,207 Re <i>Rhénium</i>	76 190,23 Os <i>Osmium</i>	77 192,217 Ir <i>Iridium</i>	78 195,084 Pt <i>Platine</i>	79 196,967 Au <i>Or</i>	80 200,59 Hg <i>Mercure</i>	81 204,383 Tl <i>Thallium</i>	82 207,2 Pb <i>Plomb</i>	83 208,98 Bi <i>Bismuth</i>	84 (209) Po <i>Polonium</i>	85 (210) At <i>Astate</i>	86 (222) Rn <i>Radon</i>							
87 (223) Fr <i>Francium</i>	88 (226) Ra <i>Radium</i>	104 (266) Rf <i>Rutherfordium</i>	105 (268) Db <i>Dubnium</i>	106 (269) Sg <i>Seaborgium</i>	107 (270) Bh <i>Böhrerium</i>	108 (269) Hs <i>Hassium</i>	109 (278) Mt <i>Mittrichium</i>	110 (279) Ds <i>Darmstadtium</i>	111 (281) Rg <i>Röntgenium</i>	112 (285) Cn <i>Copernicium</i>	113 (284) Uut <i>Ununtrium</i>	114 (289) Fl <i>Flerovium</i>	115 (288) Uup <i>Ununseptium</i>	116 (293) Lv <i>Livermorium</i>	117 (294) Uus <i>Ununseptium</i>	118 (294) Uuo <i>Ununoctium</i>							
		57 138,906 La <i>Lanthane</i>	58 140,116 Ce <i>Cérium</i>	59 140,908 Pr <i>Praséodyme</i>	60 144,242 Nd <i>Néodyme</i>	61 (145) Pm <i>Prométhium</i>	62 150,36 Sm <i>Samarium</i>	63 151,964 Eu <i>Europium</i>	64 157,25 Gd <i>Gadolinium</i>	65 158,925 Tb <i>Terbium</i>	66 162,5 Dy <i>Dysprosium</i>	67 164,930 Ho <i>Holmium</i>	68 167,259 Er <i>Erbium</i>	69 168,934 Tm <i>Thulium</i>	70 173,054 Yb <i>Ytterbium</i>	71 174,967 Lu <i>Lutécium</i>							
		89 (227) Ac <i>Actinium</i>	90 232,038 Th <i>Thorium</i>	91 231,036 Pa <i>Protactinium</i>	92 238,029 U <i>Uranium</i>	93 (237) Np <i>Neptunium</i>	94 (244) Pu <i>Plutonium</i>	95 (243) Am <i>Americium</i>	96 (247) Cm <i>Curium</i>	97 (247) Bk <i>Berkélium</i>	98 (251) Cf <i>Californium</i>	99 (252) Es <i>Einsteinium</i>	100 (257) Fm <i>Fermium</i>	101 (258) Md <i>Mendelevium</i>	102 (259) No <i>Nobelium</i>	103 (262) Lr <i>Lawrencium</i>							

## I.A.1. Classification chimique des nuclides

C'est grâce au **numéro atomique Z** que sont classés chimiquement les éléments dans le tableau périodique de Mendeleïev.



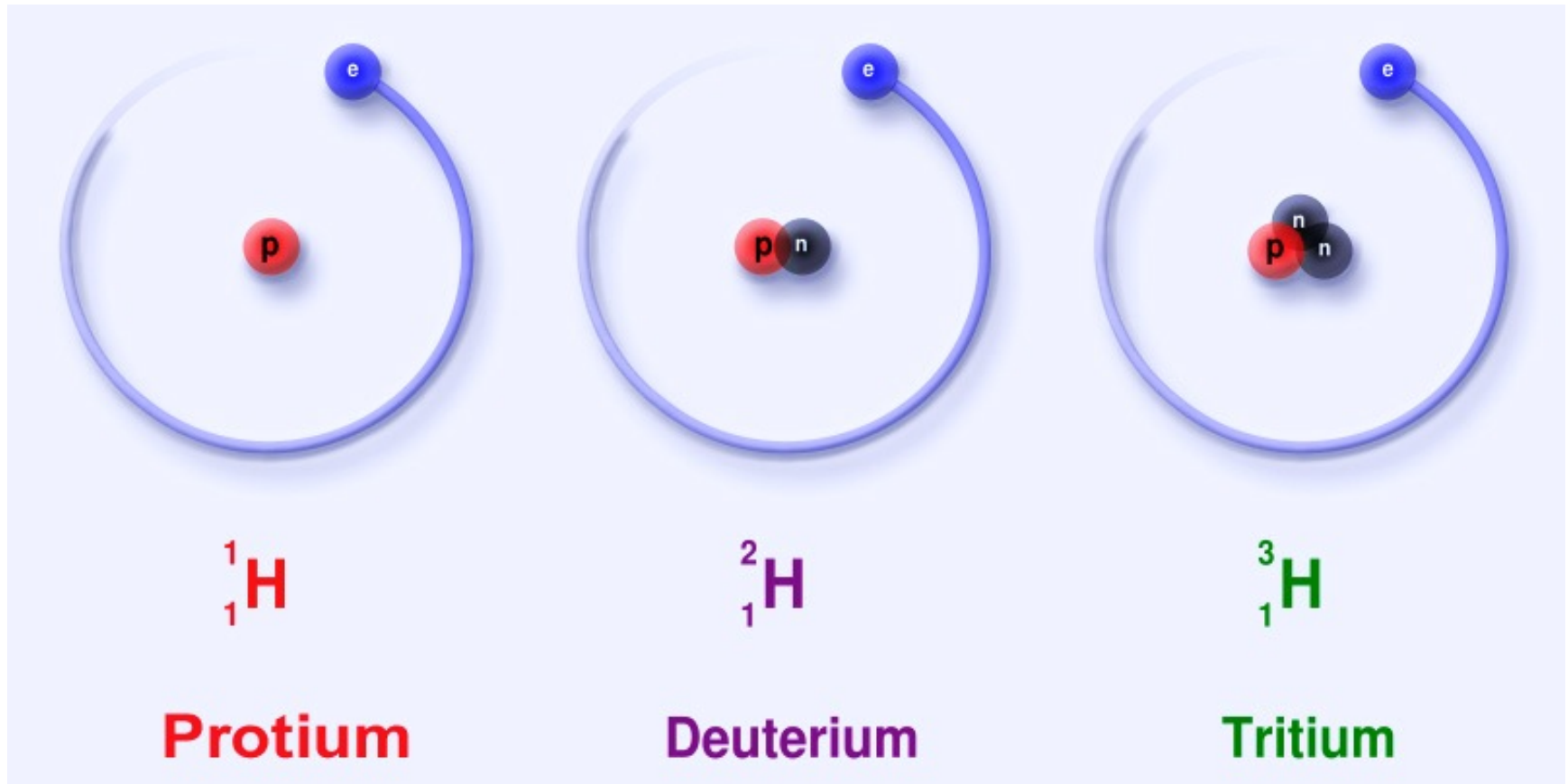


## I.A.2. Classification physique

### Les isotopes

**Définition**: ce sont les mêmes éléments, ils ont le même nombre de protons  $Z$  mais différent par leur nombre de neutrons.

## Exemple: les isotopes de l'hydrogène

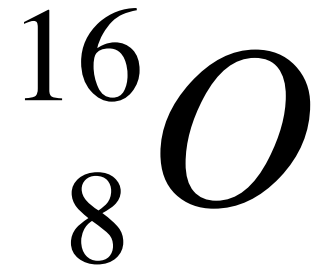
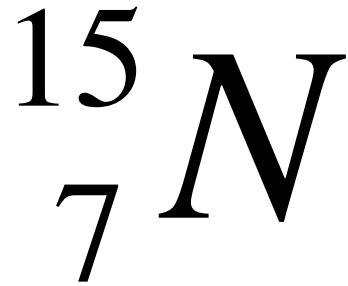
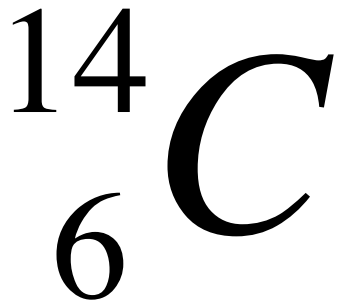


## I.A.2 Classification physique

### Les isotones

**Définition**: ce sont des éléments différents, ils ont le même nombre de neutrons  $N$  mais diffèrent par leur nombre de protons.

Exemple d'isotones

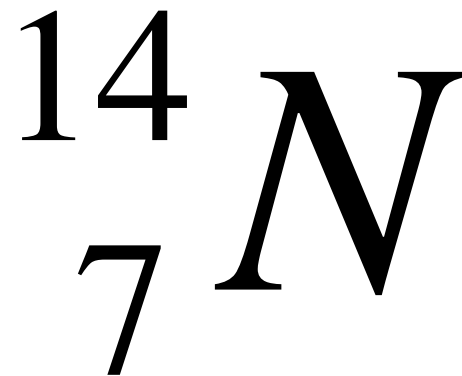
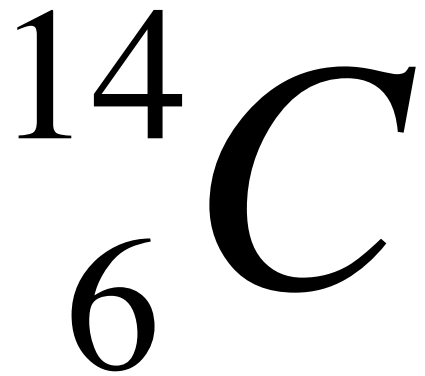


# I.A.2 Classification physique

## Les isobares

**Définition**: ce sont des éléments différents, ils ont le même nombre de nucléons  $A$  mais diffèrent par leur nombre de protons et de neutrons.

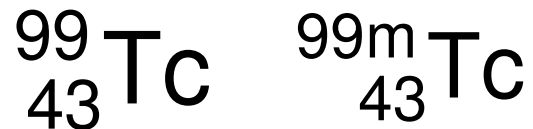
Exemple d'isobares



## I.A.2 Classification physique

Des isomères ont le même nombre de protons  $Z$  et de neutrons  $N$ . Ils se différencient par leur énergie interne:

Ex: le technétium stable et métastable



Le technétium métastable a un excès d'énergie nucléaire ce qui le rend instable.

# I.B. La composition des nucléides

## I. LE NOYAU

- A. Classification des nucléides      nucléaire
  - 1. Classification chimique
  - 2. Classification physique
- B. Composition des nucléides
  - 1. Les nucléons
  - 2. Les particules élémentaires
- C. Énergie de liaison et défaut de masse
- D. Facteurs de stabilité
- E. Les forces nucléaires
  - 1. Les forces électrostatiques
  - 2. Les forces spécifiques du noyau
- F. Les réactions de fission et de fusion nucléaire
  - 1. La fusion
  - 2. La fission

# I.B.1. Les nucléons

## Le proton

- Chargé positivement
- Noté de 2 façons différentes :  $1p$  ou  $H^+$
- Peut être stable à l'état libre hors du noyau.

# I.B.1. Les nucléons

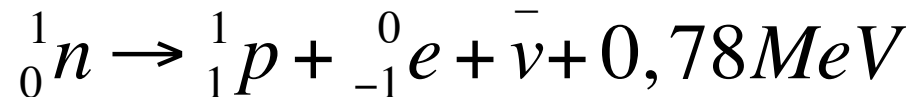
## Le Neutron

- N'a pas de charge électrique.
- Dans les transformations radioactives, il est noté  ${}_0^1n$
- Sa période radioactive est faible (~12min)

# I.B.1. Les nucléons

## Le Neutron

- À l'intérieur du noyau, le neutron est stable mais peut donner lieu, dans certaines conditions, à une réaction de transformation :



$\bar{\nu}$  est un antineutrino, particule de charge électrique nulle produite dans la désintégration  $\beta$  - nucléaire

- À l'extérieur du noyau, le neutron est toujours instable suivant la même réaction de transformation.

## I.B.2. Les particules élémentaires

Les particules élémentaires sont très petites et s'assemblent pour former les nucléons.

On distingue:

- ◆ Les leptons: ils peuvent se déplacer librement (électrons, neutrinos, antineutrinos...)
- ◆ Les quarks: ce sont les particules les plus connues à ce jour
  - Les quarks up:  $+2/3$  de la charge élémentaire
  - Les quarks down:  $-1/3$  charge élémentaire

## I.B.2. Les particules élémentaires

Chaque nucléon est composé de 3 quarks:

- ◆ Le proton: 2 quarks up et 1 quarks down ce qui lui donne sa charge positive.
- ◆ Le neutron: 1 quarks up et 2 quarks down, il n'a pas de charge.

# I.C. Défaut de masse et énergie de liaison

## I. LE NOYAU

- A. Classification des nucléides      nucléaire
  - 1. Classification chimique
  - 2. Classification physique
- B. Composition des nucléides
  - 1. Les nucléons
  - 2. Les particules élémentaires
- C. Énergie de liaison et défaut de masse
- D. Facteurs de stabilité
- E. Les forces nucléaires
  - 1. Les forces électrostatiques
  - 2. Les forces spécifiques du noyau
- F. Les réactions de fission et de fusion nucléaire
  - 1. La fusion
  - 2. La fission

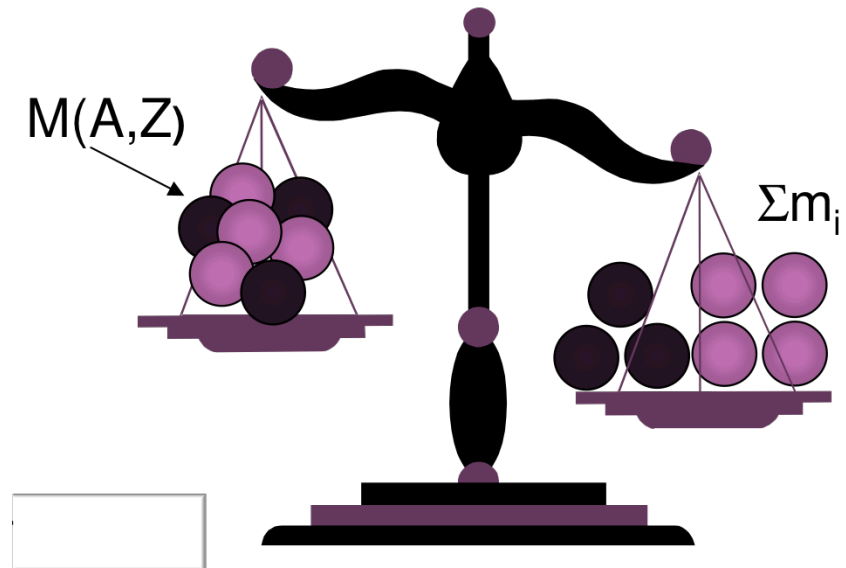
# I.C. Défaut de masse et énergie de liaison

La masse d'un **noyau constitué** est inférieure à **la somme des masses** de ses constituants

$$M(A,Z) < \sum m_i$$

- ◆ Le défaut de masse  $\Delta M(A,Z)$  est donc égal à la différence entre toutes les masses des constituants et la masse du noyau.
- ◆ C'est-à-dire « défaut de masse »

$$\Delta M(A,Z) = \sum m_i - M(A,Z)$$



# I.C. Défaut de masse et énergie de liaison

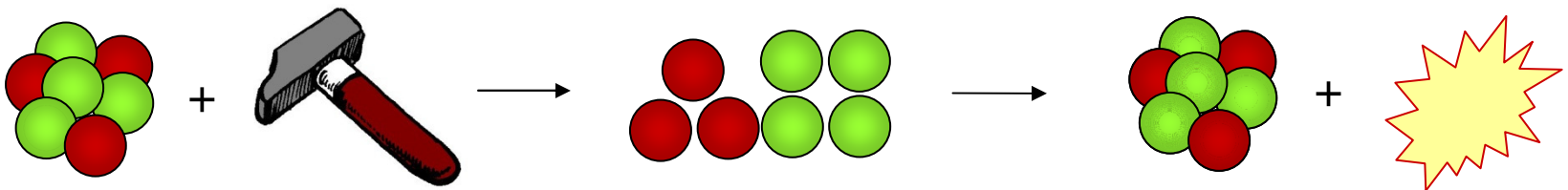
Ce **défaut de masse** peut aussi avoir une équivalence énergétique d'après l'équation:

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

Cette énergie équivaut à l'énergie de liaison des nucléons  $E_L$

$$E_L \text{ [MeV]} = 931.5 \times \Delta M \text{ [u]}$$

De plus, si l'on apporte à un noyau une énergie équivalente à l'énergie de liaison de ses nucléons, on peut le briser en ses différentes particules élémentaires.



# I.C. Défaut de masse et énergie de liaison

Le défaut de masse est lié à l'énergie de liaison des particules entre elles.

L'énergie de liaison des nucléons est l'énergie qu'il faut apporter à l'atome pour dissocier ses nucléons.

*On peut faire le lien avec les énergies de liaison des électrons: c'est l'énergie qu'il faut apporter aux électrons pour ioniser l'atome.*

# I.C. Défaut de masse et énergie de liaison

Les ordres de grandeur des différentes énergies de liaison

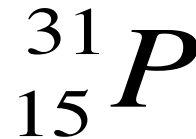
	<b>NOYAU</b> <i>Nucléons</i>	<b>ATOME</b> <i>Électrons</i>	<b>MOLÉCULE</b> <i>Atomes</i>
ÉNERGIE DE LIAISON	MeV	keV	eV

# Exemple d'application

## QCM CONCOURS 2005-2006

Calculer l'énergie de liaison par nucléon (MeV/nucléon) du noyau de phosphore-31 sachant que la masse atomique est  $M(31,15) = 30,9737u$ .

- A. 4,5
- B. 9,5
- C. 8,5
- D. 263
- E. 13



# Exemple d'application

Il faut utiliser les masses des nucléons :

${}_{15}^{31}\text{P}$	$(31-15) \times M_n = 16 \times M_n = 16 \times 1,009$ <b>= 16,144</b>
	$15 \times M_p = 15 \times 1,007$ <b>= 15,105</b>
$\Sigma M_{\text{nucléons}}$	<b>31,249</b>

On leur soustrait la masse du noyau:

$$31,249 - 30,974 = 0,275$$

# Exemple d'application

On déduit l'énergie de liaison du noyau:

$$E_L [\text{MeV}] = 931.5 \times \Delta M [u]$$

$$E_L = 931,5 \times 0,275$$

**On n'hésite pas à arrondir 931,5 à 900 ou à 1000! 😊**

$$900 \times 0,275 = 247,5 \text{ MeV}$$

Ce n'est pas fini! on n'oublie pas qu'on nous a demandé **l'énergie de liaison/nucléons...** On divise par le nombre de nucléons:

$$247/31 \approx 250/30 \approx 25/3 \approx 8,3$$

# Exemple d'application

QCM CONCOURS 2005-2006

Calculer l'énergie de liaison par nucléon (MeV/nucléon) du noyau de phosphore-31 sachant que la masse atomique est  $M(31,15) = 30,9737u$ .

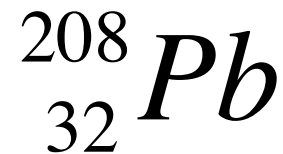
- A. 4,5
- B. 9,5
- C. 8,5
- D. 263
- E. 13

# Application

QCM CONCOURS 1993-1994: La masse atomique du plomb-32 est 207,9766 u, l'énergie de liaison moyenne de cet isotope du plomb exprimée en MeV/nucléon est:



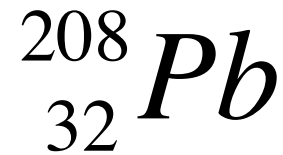
- A. 1,75
- B. 4,6
- C. 9,66
- D. 6,8
- E. 7,8



# Application

La masse atomique du plomb-32 est 207,9766 uma, l'énergie de liaison moyenne de cet isotope du plomb exprimée en MeV/nucléon est:

- A. 1,75
- B. 4,6
- C. 9,66
- D. 6,8
- E. 7,8



# Correction

La masse atomique du plomb-32 est 207,9766 uma, l'énergie de liaison moyenne de cet isotope du plomb exprimée en MeV/nucléon est:

- A. 1,75
- B. 4,6
- C. 9,66
- D. 6,8
- E. 7,8

# Correction

$$M_p \times Z = 1,007 \times 32 = 32,224$$

$$M_n \times (A-Z) = 1,009 \times (208-32) = 1,009 \times 176 = 177,584$$

$$\sum M_{\text{nucléons}} = 177,584 + 32,224 = 209,808$$

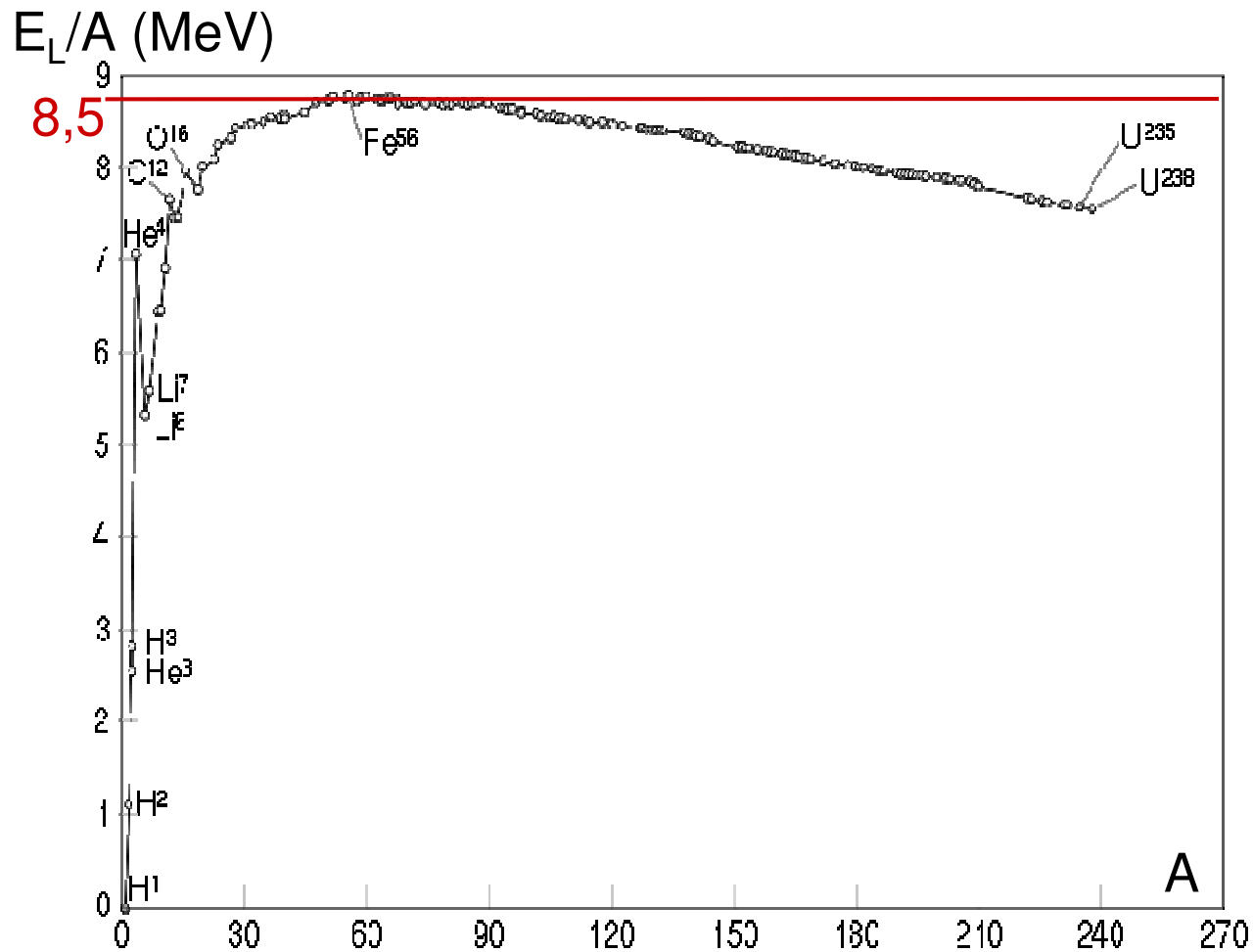
$$209,808 - M_{\text{noyau}} = 209,808 - 207,977 = 1,831$$

$$1,831 \times 900 = 1647,9 \approx 1648$$

On divise par le nb de nucléons:

$$1648/208 \approx 1600/200 \approx 8$$

→ 7,8 est la valeur la plus proche dans les propositions donc réponse E



# I.C. Défaut de masse et énergie de liaison.

Pour comparer les énergie de liaison on les rapporte au nucléon  $E_L/A$

# Exemple d'application

## QCM CONCOURS 2005-2006

Calculer l'énergie de liaison par nucléon (MeV/nucléon) du noyau de phosphore-31 sachant que la masse atomique est  $M(31,15) = 30,9737u$ .

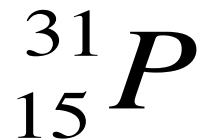
A. 4,5

B. ~~9,5~~

C. 8,5

D. ~~263~~

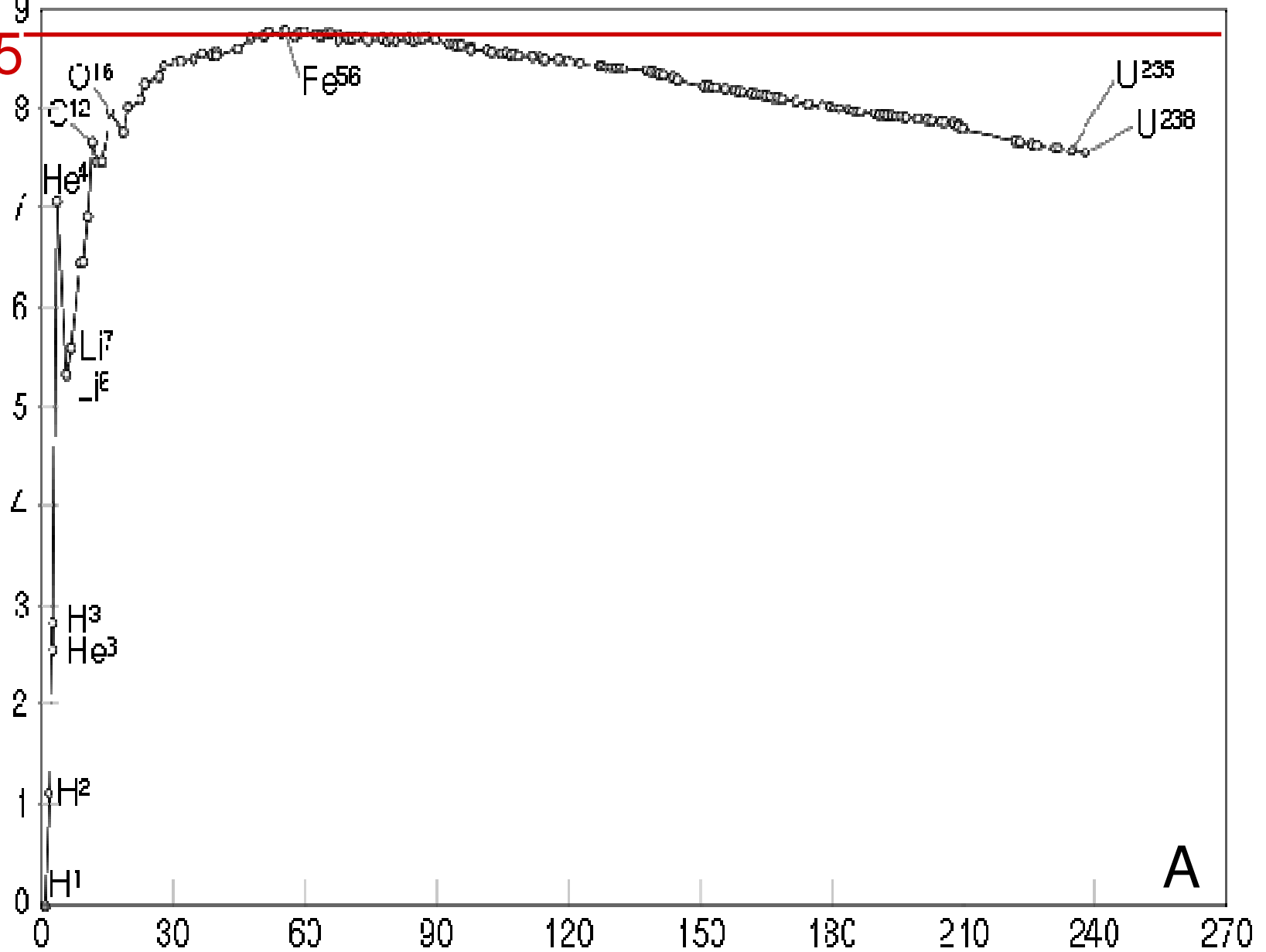
E. ~~13~~



*Si on regarde les propositions on peut déjà éliminer celles au dessus de 8,5 MeV/nucléon*

$E_L/A$  (MeV)

8,5



A

# I.D. Les facteurs de stabilité nucléaire

## I. LE NOYAU

- A. Classification des nucléides
  - 1. Classification chimique
  - 2. Classification physique
- B. Composition des nucléides
  - 1. Les nucléons
  - 2. Les particules élémentaires
- C. Énergie de liaison et défaut de masse
- D. Facteurs de stabilité
- E. Les forces nucléaires
  - 1. Les forces électrostatiques
  - 2. Les forces spécifiques du noyau
- F. Les réactions de fission et de fusion nucléaire
  - 1. La fusion
  - 2. La fission

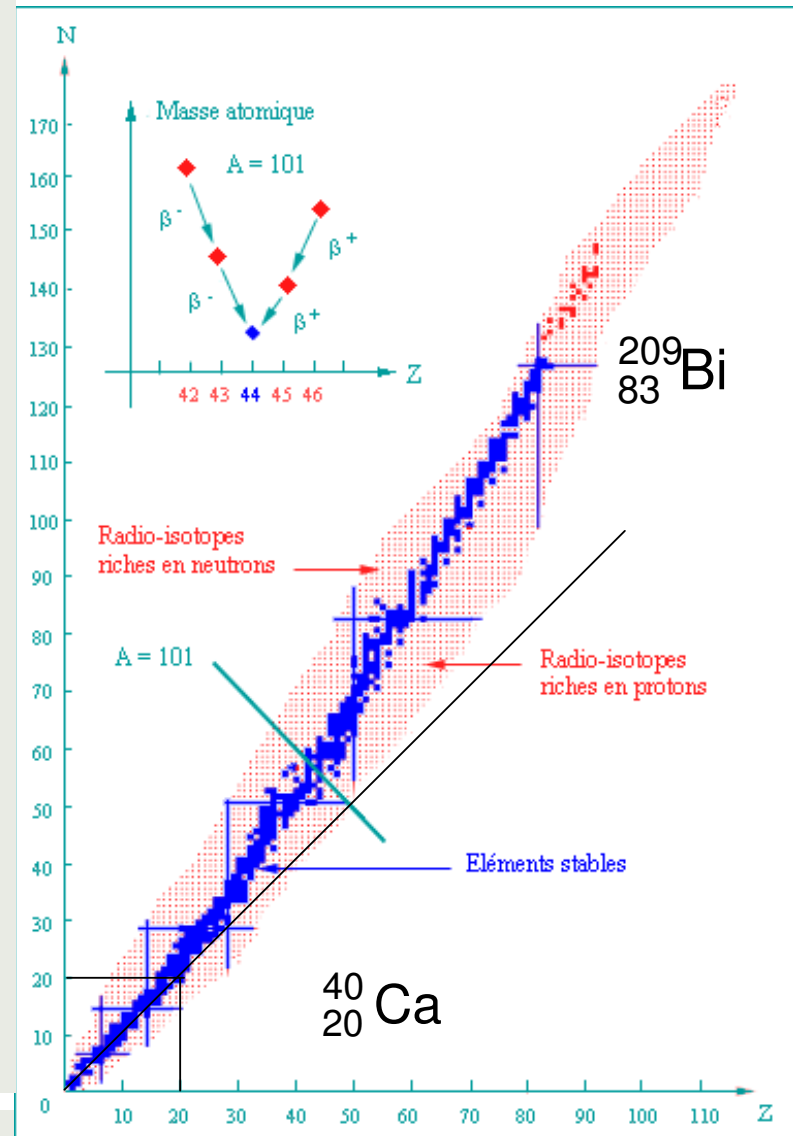
# I.D. Les facteurs de stabilité nucléaire

Pour les noyau légers ( $Z \leq 20$ ):

$$Z = N$$

Pour les noyaux lourds ( $Z > 20$ ):  $Z < N$ , plus de neutrons sont nécessaires pour que le noyau soit stable.

→ La vallée de stabilité s'élève, pour les noyaux lourds au dessus de la première diagonale  $Z=N$ .



# I.E. Les forces nucléaires

## I. LE NOYAU

- A. Classification des nucléides
  - 1. Classification chimique
  - 2. Classification physique
- B. Composition des nucléides
  - 1. Les nucléons
  - 2. Les particules élémentaires
- C. Énergie de liaison et défaut de masse
- D. Facteurs de stabilité
- E. Les forces nucléaires
  - 1. Les forces électrostatiques
  - 2. Les forces spécifiques du noyau
- F. Les réactions de fission et de fusion nucléaire
  - 1. La fusion
  - 2. La fission

# I.E. Les forces nucléaires

- ◆ Elles sont responsables de la cohésion du noyau.
- ◆ Leurs intensités correspondent à l'énergie moyenne de liaison du noyau.
- ◆ Elles sont liées aux interactions des nucléons entre eux.

# I.E.1. Les forces électrostatiques

Les forces électrostatiques ou coulombiennes sont des **forces répulsives** exercées entre protons.

Elles expliquent l'excès de neutrons à l'intérieur des noyaux lourds.

## I.E.2. Les forces nucléaires spécifiques

Les forces spécifiques du noyau s'exercent à des distance très faibles.

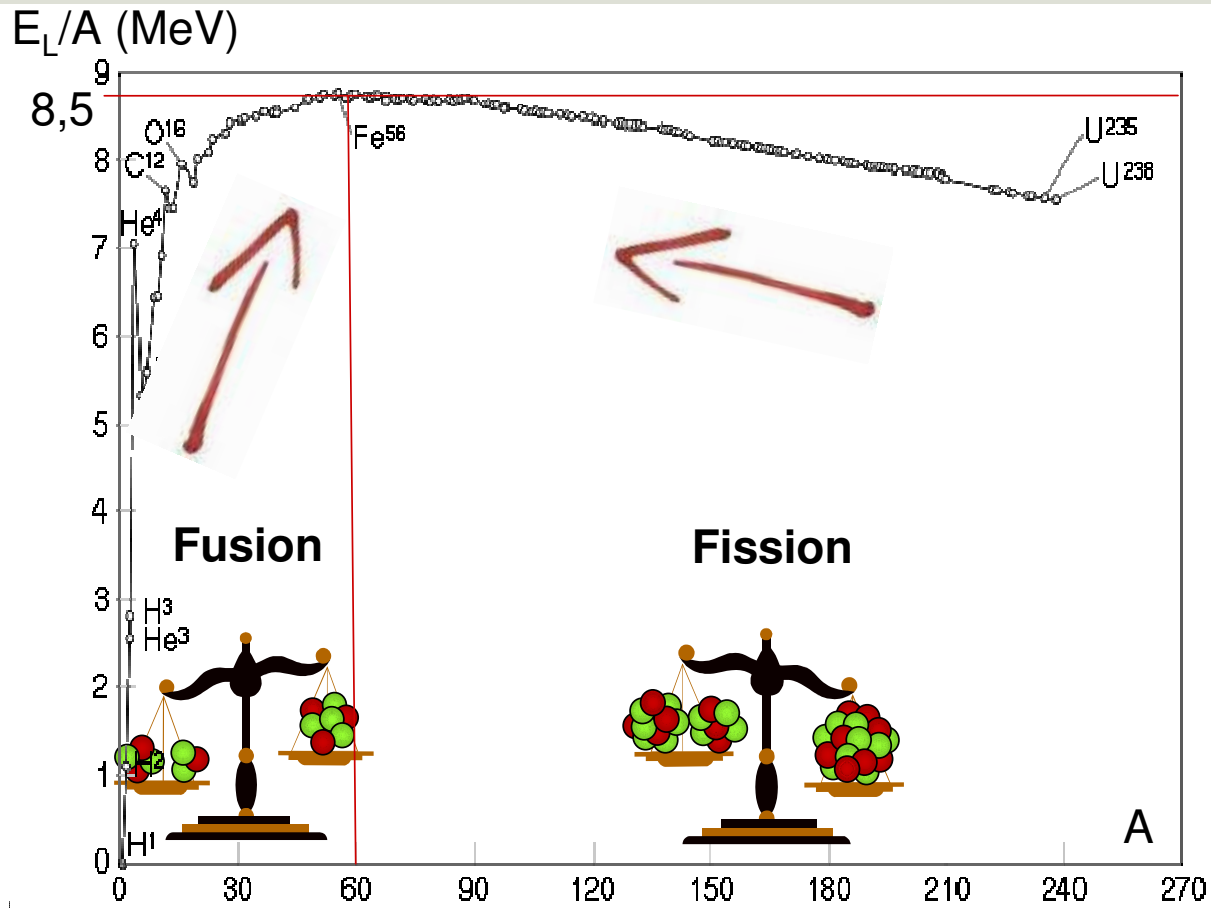
On distingue:

- ◆ Interaction faible: elle est répulsive et explique les transformations radioactives.
- ◆ Interaction forte: Force attractive qui assure la cohésion du noyau. Elle est  $\ggg$  force électrostatique. Elle est répulsive à très courte distance. Elle correspond à la mise en commun des particules qui s'appellent les **gluons**.

# I.F. Les réactions de fission et de fusion nucléaire

## I. LE NOYAU

- A. Classification des nucléides
  - 1. Classification chimique
  - 2. Classification physique
- B. Composition des nucléides
  - 1. Les nucléons
  - 2. Les particules élémentaires
- C. Énergie de liaison et défaut de masse
- D. Facteurs de stabilité
- E. Les forces nucléaires
  - 1. Les forces électrostatiques
  - 2. Les forces spécifiques du noyau
- F. Les réactions de fission et de fusion nucléaire
  - 1. La fusion
  - 2. La fission

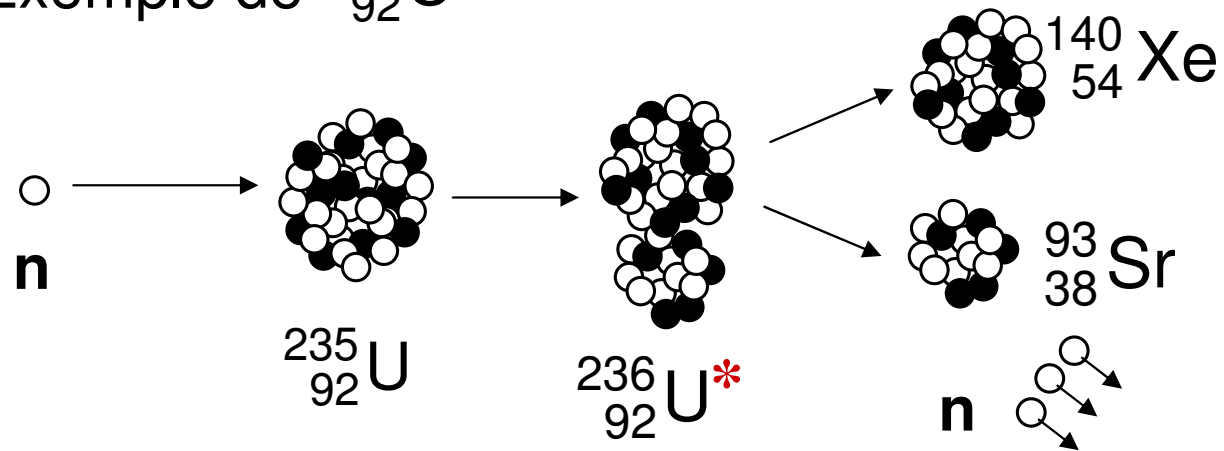


## I.F. les réactions de fusion et de fission nucléaire

La fusion de 2 petits noyau donne un noyau de masse plus petite donc plus stable.

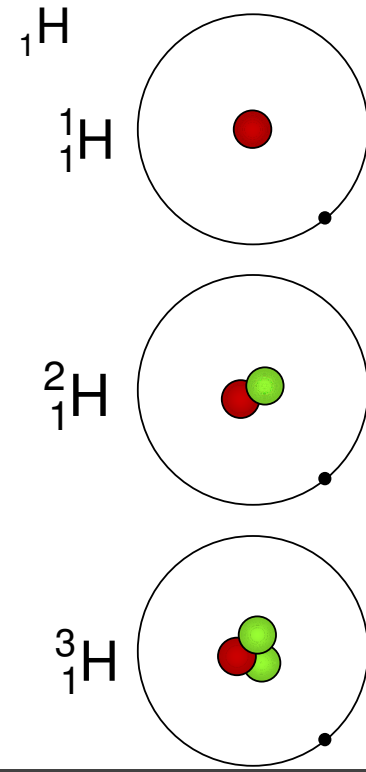
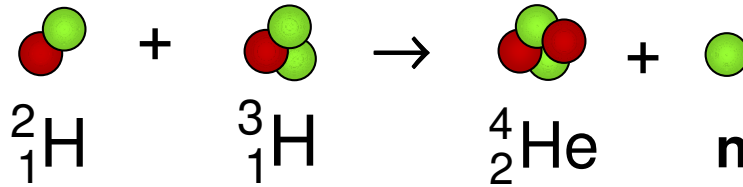
La fission d'un trop gros noyau en 2 noyaux plus petits permet un gain en stabilité.

- Exemple de  $^{235}_{92}\text{U}$



## I.F.1. La fission

- ① On bombarde le noyau d'uranium d'un neutron lent, qui devient alors **instable**.
- ② L'**instabilité du noyau** provoque sa fission en 2 noyaux plus petits et en 3 neutrons.
- ③ Ces 3 neutrons libérés seront réutilisés pour fissionner à nouveau: réaction en chaîne dans un réacteur nucléaire.



## I.F.2. La fusion

Dans cet exemple de fusion, on peut observer un processus où deux noyaux atomiques légers s'assemblent pour former un plus gros noyau et un seul neutron.

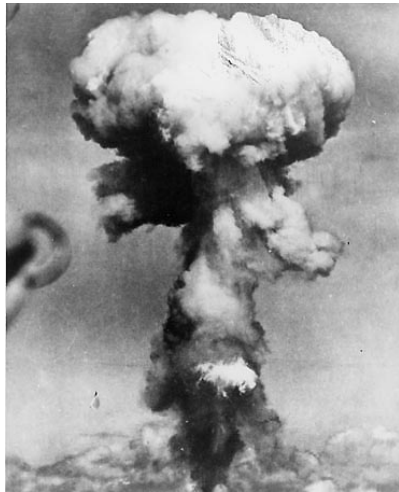
# Énergie libérée

- ◆ 1 réaction de fission libère  $7,2 \times 10^{10}$  J soit une énergie équivalente à 2 tonnes de pétrole.
- ◆ 1 réaction de fusion libère  $42,4 \times 10^{10}$  J soit une énergie équivalente à 12 tonnes de pétrole!

# Applications de la fission

explosives

## Bombe A

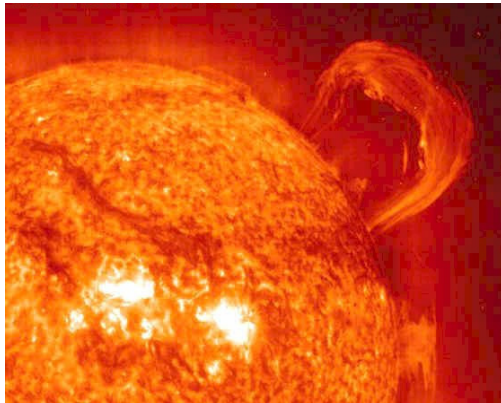


contrôlées

## Centrale nucléaire



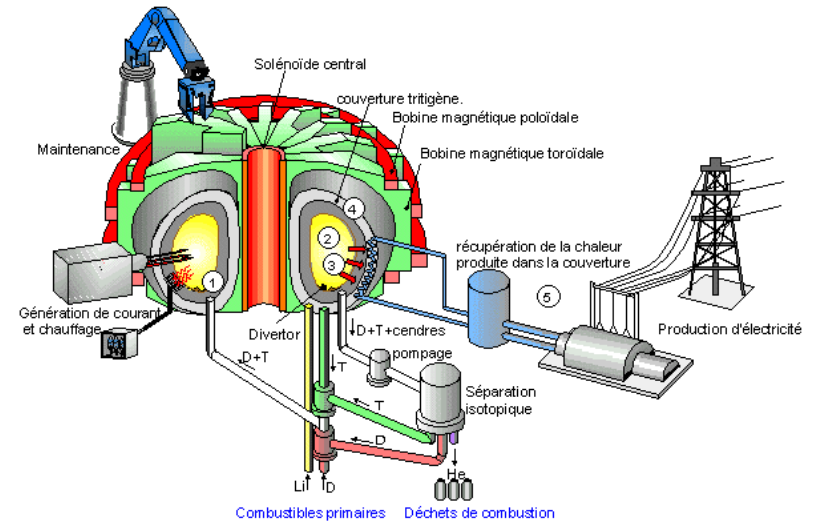
# Soleil



# Bombe H



# ITER



# Applications de la fusion

# LA RADIOACTIVITÉ

## II. LES TRANSFORMATIONS RADIOACTIVES

- A. Généralités capture électronique
- B. La radioactivité alpha
- C. Les transformations isobariques
  1. Désintégration  $\beta^-$
  2. Désintégration  $\beta^+$
  3. Désintégration par
- D. Les transformations isomériques
  1. Radioactivité  $\gamma$
  2. La conversion interne

## II. LES TRANSFORMATIONS RADIOACTIVES

**Définition**: Une transformation radioactive est une mutation ou une désintégration d'un noyau atomique.

Un noyau père se transforme en noyau fils de moindre masse.

Cette perte de masse entraîne une libération d'énergie sous forme d'émission d'une particule ou d'un photon.

# II.A. Généralités

## II. LES TRANSFORMATIONS RADIOACTIVES

### A. Généralités

capture électronique

### B. La radioactivité alpha

### C. Les transformations isobariques

1. Désintégration  $\beta^-$
2. Désintégration  $\beta^+$
3. Désintégration par

### D. Les transformations isomériques

1. Radioactivité  $\gamma$
2. La conversion interne

## II.A. Généralités

Les noyaux radioactifs instables vont se transformer en noyaux stables.

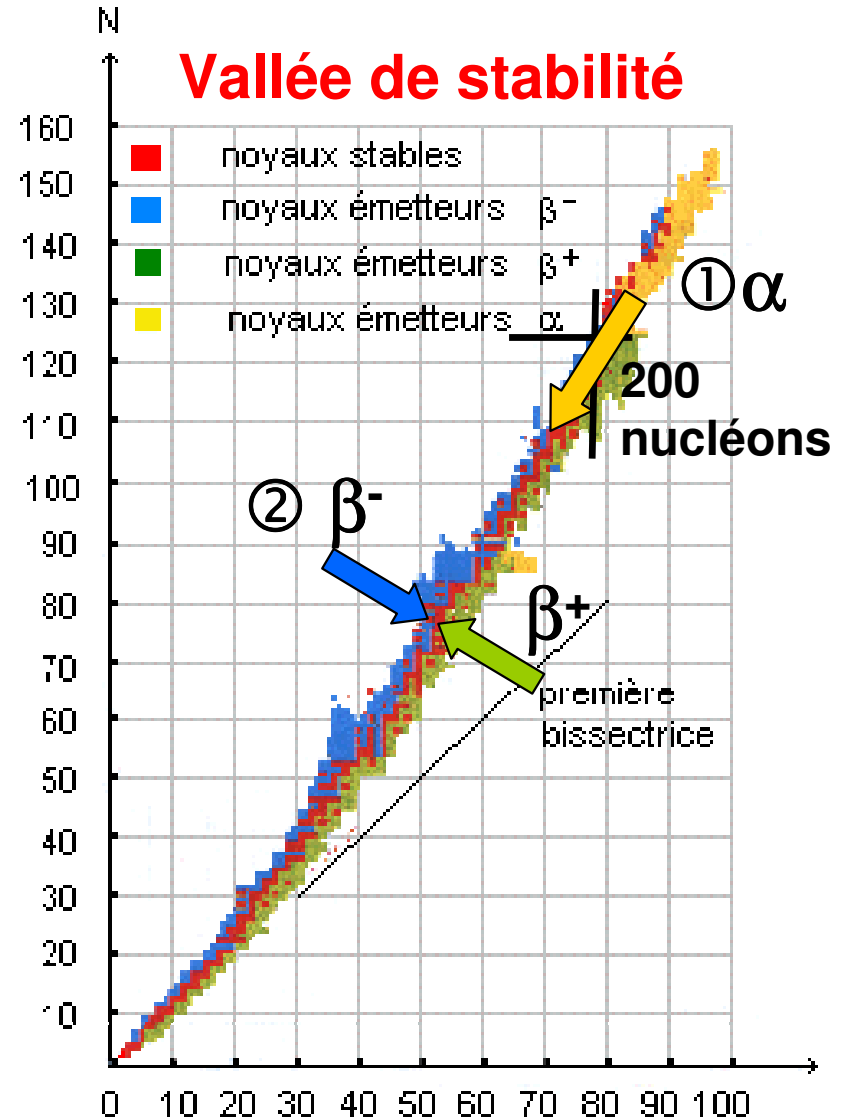
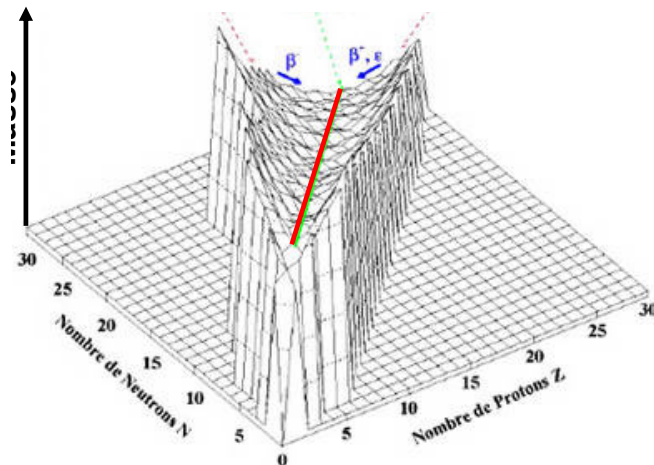
Selon le noyau d'origine on distingue:

- ◆ L'émission  $\alpha$
- ◆ Les transformations isobariques: transformation d'un neutron en proton.
  - Excès de neutrons  $\rightarrow$  émission  $\beta^-$
  - Excès de protons  $\rightarrow$  émission  $\beta^+$
- ◆ Les transformations isomériques: l'émission  $\gamma \rightarrow$  modification de l'énergie du noyau par désexcitation.

# II.A. Généralités

Les transformations radioactives entraînent une perte de masse et un gain de stabilité.

Les atomes de la vallée de stabilité ont une masse minimum.



## II.A. Généralités

### Les lois de conservation

- ◆ du nombre de nucléons  $A$  et de charges  $Z$
- ◆ de l'énergie totale du système
- ◆ de la quantité de mouvement (explique le spectre en énergie de la transformation)

## II.B. La radioactivité alpha

### II. LES TRANSFORMATIONS RADIOACTIVES

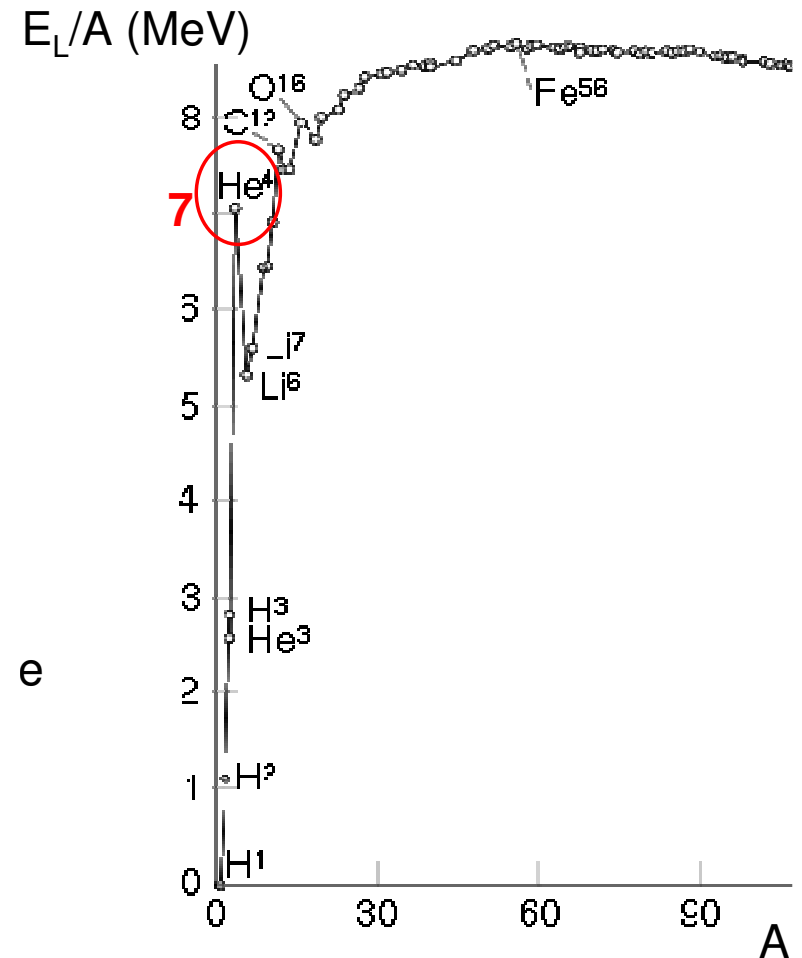
- A. Généralités capture électronique
- B. La radioactivité alpha
- C. Les transformations isobariques
  1. Désintégration  $\beta^-$
  2. Désintégration  $\beta^+$
  3. Désintégration par
- D. Les transformations isomériques
  1. Radioactivité  $\gamma$
  2. La conversion interne

## II.B. La radioactivité alpha

La particule alpha est un noyau d'Hélium (+++)

Le noyau d'Hélium est très stable: son énergie de liaison est de 7 MeV/nucléon.

*C'est le seul noyau complexe émis spontanément.*



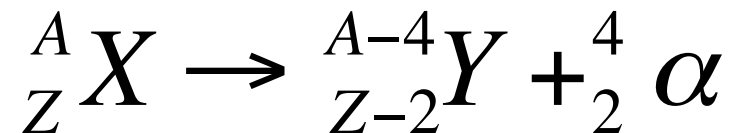
## II.B. La radioactivité alpha

La radioactivité alpha concerne les noyaux lourds.

La particule alpha est formée de **4 nucléons** : 2 protons et 2 neutrons. Elle n'a **pas d'électron**, elle a donc **2 charges positives**. C'est un noyau d'He (et non pas un atome +++).

## II.B. La radioactivité alpha: bilan masse énergie

### Réaction de désintégration



X: atome père

Y: atome fils, il s'agit d'un nouvel élément car Z change.

$\alpha$ : ou  $\text{He}^{++}$  ou  $\alpha^{++}$ ,  $M(4,2) = 4,0026 \text{ u}$

## II.B. La radioactivité alpha: bilan masse énergie

On soustrait à la **masse du noyau initial** les masses du **noyau fils** et de la **particule  $\alpha$** .

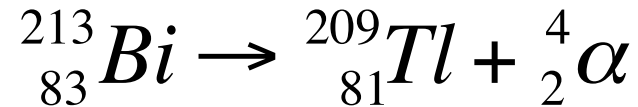
On obtient alors une différence de masse qui sera emportée sous forme d'énergie cinétique par la **particule  $\alpha$**  formée.

$$\Delta M = \mathcal{M}(A, Z) - \mathcal{M}(A-4, Z-2) - \mathcal{M}(4, 2)$$

## III.B. La radioactivité alpha: bilan masse énergie

### Application

Le Bismuth-213 se transforme en Thallium-209



On donne  $M(213,83)=212,9943$  u et  $M(209,81)= 208,9853$  u

Quelle est l'énergie libérée par cette transformation?

## II.B. La radioactivité alpha: bilan masse énergie

### Correction

$$\Delta M = \mathcal{M}(213,83) - \mathcal{M}(209,81) - \mathcal{M}(4,2)$$

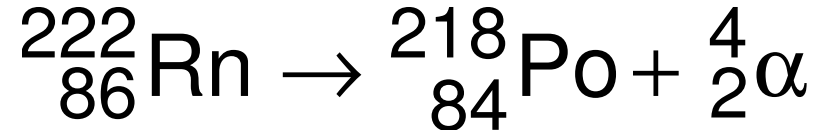
$$\Delta M = 212,9943 - 208,9853 - 4,0026 = \mathbf{0,0064}$$

$$E_d = 0,0064 \times 931,5 \approx \mathbf{6,0 \text{ MeV}}$$

## II.B. La radioactivité alpha: bilan masse énergie

### Application 2

Soit la transformation suivante:



On donne :

$$M(222, 86) = 222.0176 \text{ u}$$

$$M(218, 84) = 218.009 \text{ u}$$

$$M(4, 2) = 4.0026 \text{ u}$$

Quelle est l'énergie libérée par cette transformation ?

## II.B. La radioactivité alpha: bilan masse énergie

### Correction

$$\Delta M = 222.0176 - 218.009 - 4.0026$$

$$= 6.10^{-3} \text{ u}$$

$$E_d = 6.10^{-3} * 931.5 = \mathbf{5.6 \text{ MeV}}$$

## II.B. La radioactivité alpha: spectre en énergie

L'énergie disponible est libérée sous forme d'énergie cinétique partagée entre les 2 noyaux formés:

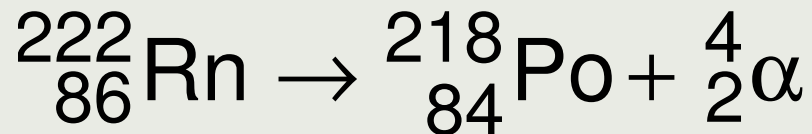
- ◆ L'énergie cinétique de la **particule  $\alpha$**
- ◆ L'énergie de « recul » du **noyau Y**.

Le noyau Y aura une **vitesse nulle** vu sa grande taille. Il ne va donc quasiment pas emporter d'énergie.

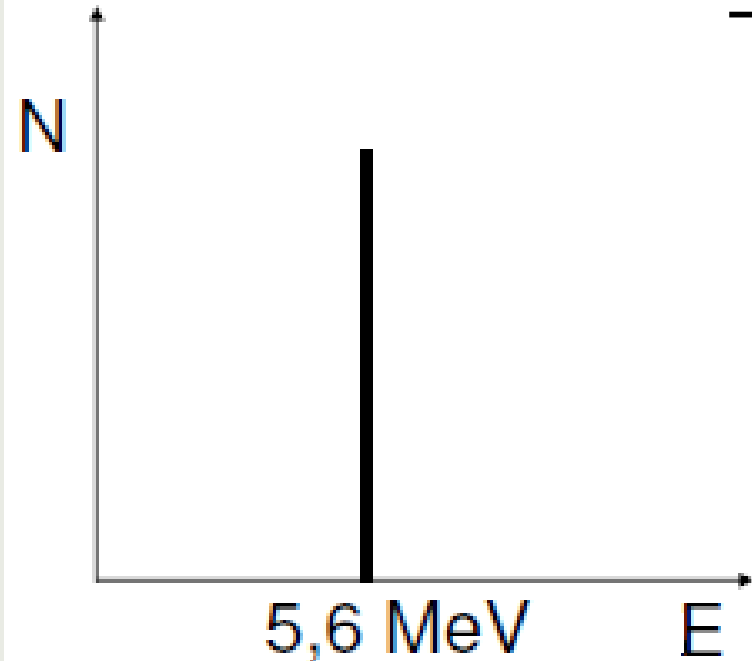
La particule  $\alpha$  emporte presque toute l'énergie libérée. Sa vitesse n'est tout de même pas relativiste.

## II.B. La radioactivité alpha: spectre en énergie

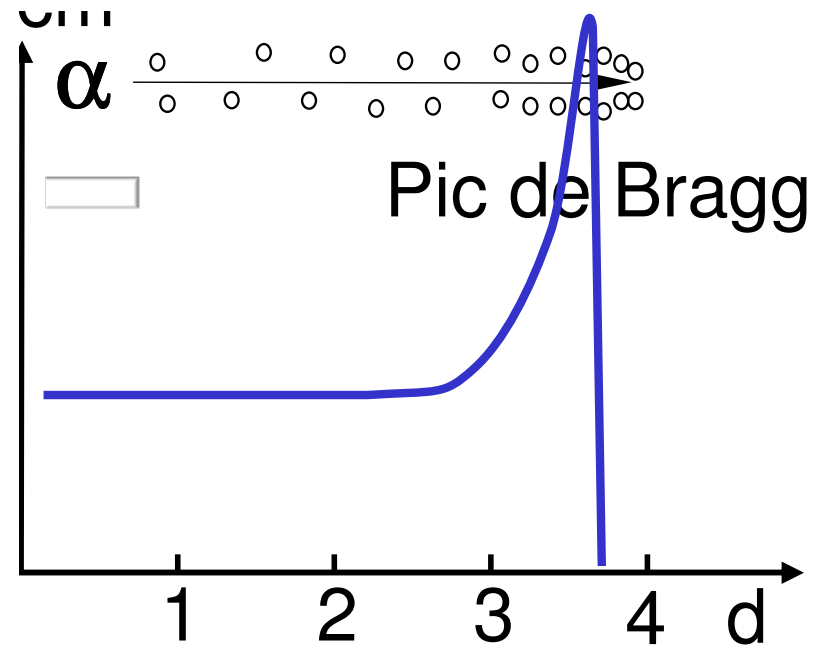
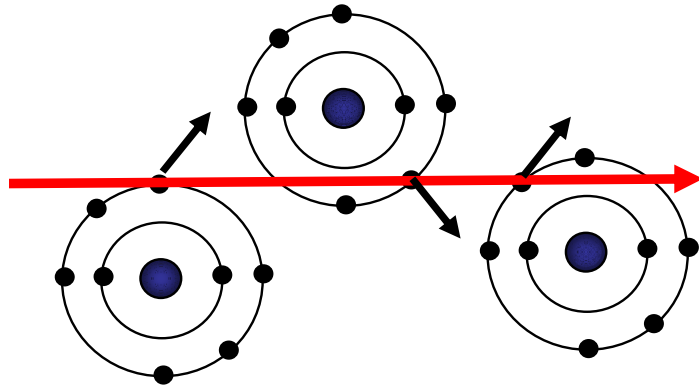
Dans l'exemple de l'application 2:



Le spectre présente une raie de 5,6 MeV correspondant à l'énergie libérée par la transformation.



$\alpha$



## II.B. La radioactivité alpha: parcours dans la matière

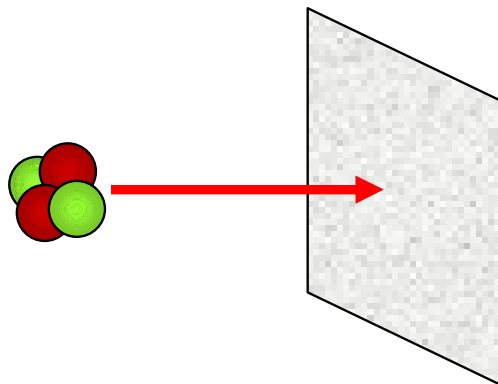
- Les particules  $\alpha$  sont lourdes et chargées, elles ont:
- ◆ Une vitesse faible (non relativiste)
  - ◆ Une trajectoire rectiligne
  - ◆ Elles exercent une attraction sur les  $e^-$  de par leurs charges positives entraînant d'importantes ionisations des atomes du milieu.

## II.B. La radioactivité alpha: **parcours dans la matière**

Leurs nombreuses interactions avec la matière entraîne une perte progressive de l'énergie des **particules  $\alpha$** .

Elles sont donc **très rapidement arrêtées par la matière.**

Une feuille de papier suffit pour les arrêter! 😊



## II.C. Les transformations isobariques

### II. LES TRANSFORMATIONS RADIOACTIVES

A. Généralités

B. La radioactivité alpha

C. Les transformations isobariques

1. Désintégration  $\beta^-$
2. Désintégration  $\beta^+$
3. Désintégration par capture électronique

D. Les transformations isomériques

1. Radioactivité  $\gamma$
2. La conversion interne

## II.C. Les transformations isobariques

### Définition

Ce sont des transformations à nombre de masse A constant, c'est la répartition neutrons/protons qui change. Le Z change, la transformation aboutit donc à un nouvel élément.

### Exemples

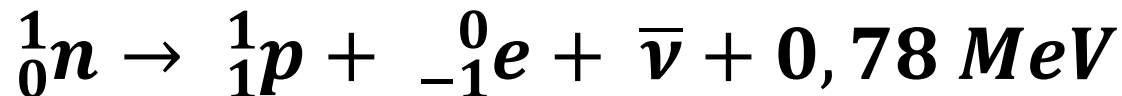
- ◆ Excès de neutrons:  $n \rightarrow p: Z \rightarrow Z+1$        ${}^{15}_6\text{C} \rightarrow {}^{15}_7\text{N}$
- ◆ Excès de protons:  $p \rightarrow n: Z \rightarrow Z-1$        ${}^{15}_8\text{O} \rightarrow {}^{15}_7\text{N}$

## II.C.1. La désintégration $\beta^-$

Elle concerne les noyaux ayant un excès de neutrons.

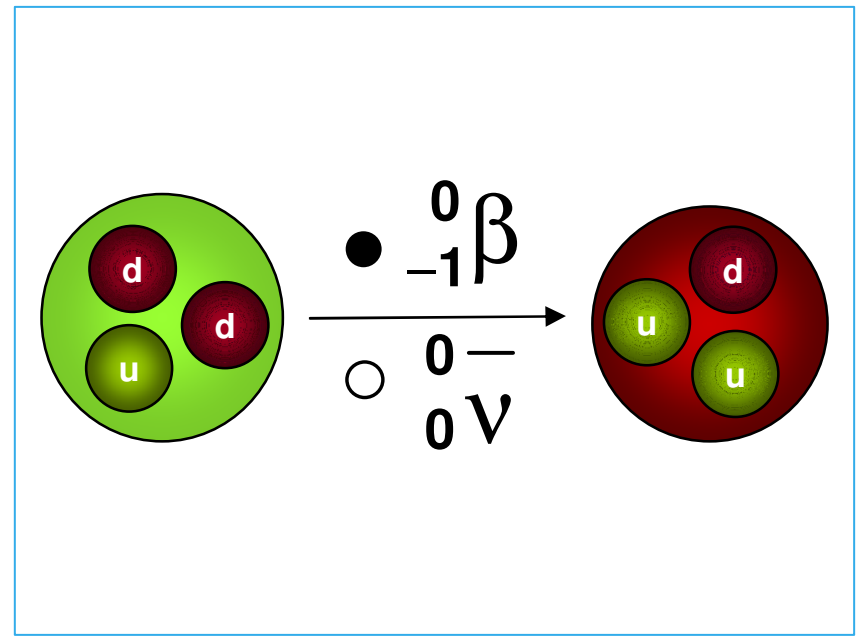
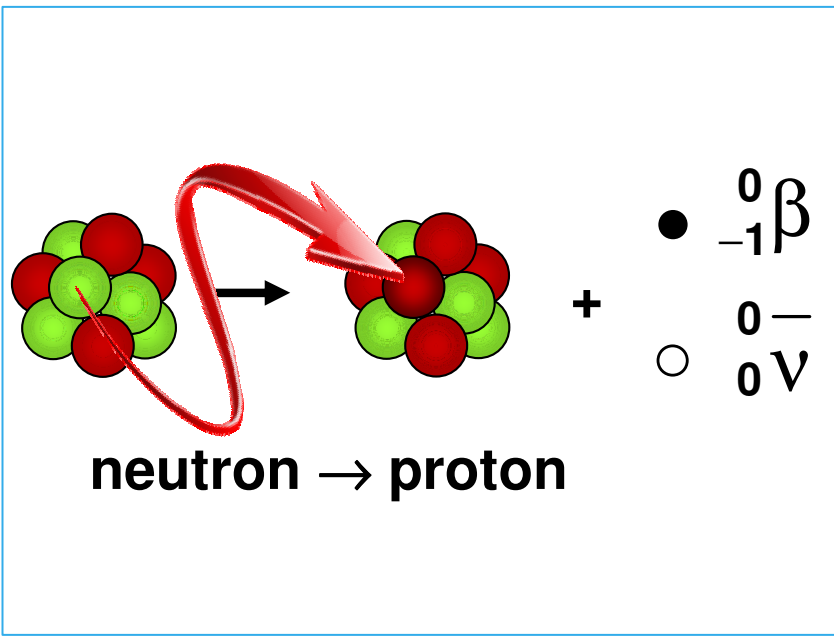


L'électron ne préexiste pas dans le noyau, il naît de la transformation d'un neutron en proton:



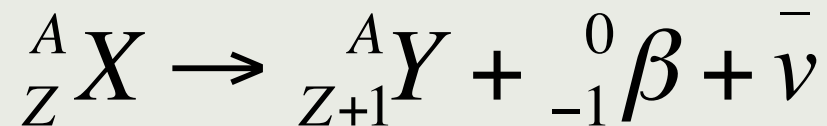
${}^0_0 \bar{\nu}$  est un antineutrino; de masse négligeable et de charge nulle.

La particule  $\beta^-$  peut être notée:  ${}^0_{-1} \beta$  ou  $\beta^-$  ou  ${}^0_{-1} e$  ou  $e$



## II.C.1. La désintégration $\beta^-$ : Bilan masse-énergie

Le bilan de la transformation est:



La transformation du neutron en proton résulte de l'inversion d'un quark.

## II.C.1. La désintégration $\beta^-$ : Bilan masse-énergie

Le défaut de masse est:

$$\Delta M = \mathcal{M}(A,Z) - Zm_e - [\mathcal{M}(A,Z+1) - (Z+1)m_e + m_e]$$

$$\Delta M = \mathcal{M}(A,Z) - \cancel{Zm_e} - \mathcal{M}(A,Z+1) + \cancel{(Z+1)m_e} - m_e$$

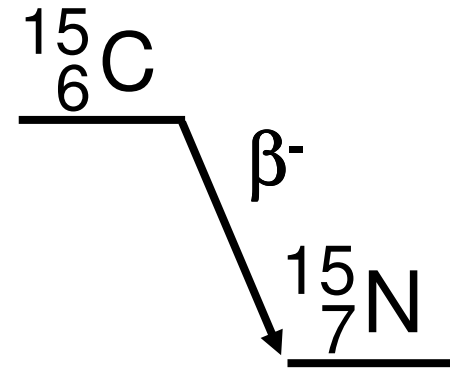
$$\Delta M = \mathcal{M}(A,Z) - \mathcal{M}(A,Z+1)$$

## II.C.1. La désintégration $\beta^-$

### Application

Soit la désintégration du **carbone-15** en **azote-15** avec:

$$\mathcal{M}(15,6) = 15,0105; \mathcal{M}(15,7) = 15,0001 \text{ u}$$



Quelle est l'énergie libérée?

## II.C.1. La désintégration $\beta^-$

Correction

$$\Delta M = 15,0105 - 15,0001 = \mathbf{0,0104 \text{ u}}$$

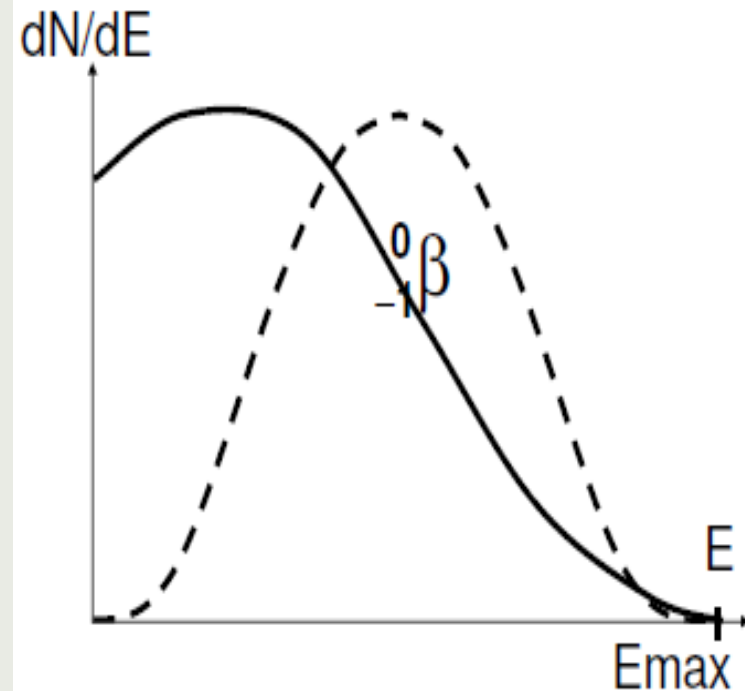
$$E_d = 0,0104 \times 931,5 = \mathbf{9,7 \text{ MeV}}$$

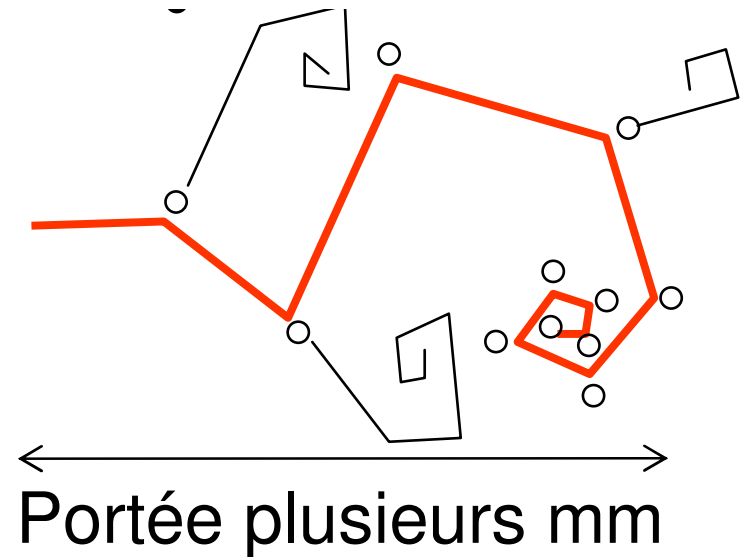
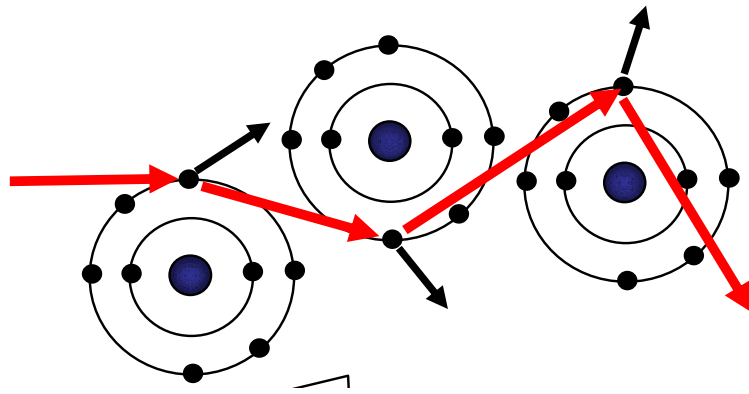
## II.C.1. La désintégration $\beta^-$ : spectre en énergie

L'énergie disponible va se répartir en énergie cinétique entre le noyau fils, la particule  $\beta^-$  et l'antineutrino.

Du fait de la masse du noyau fils, son énergie cinétique de recul sera **quasi nulle**.

L'énergie est donc partagée entre la particule  $\beta^-$  et l'antineutrino selon un spectre continu : seule la particule  $\beta^-$  est détectable.





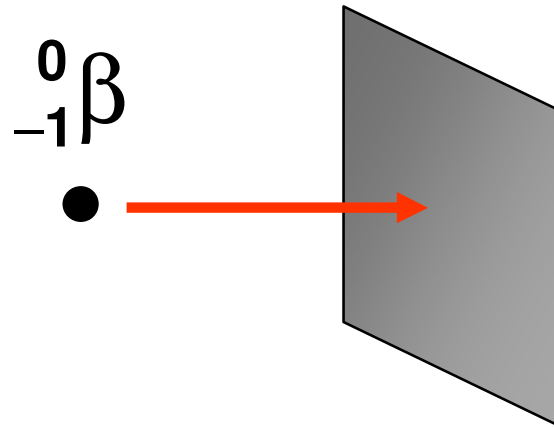
## II.C.1. La désintégration $\beta^-$ : parcours dans la matière.

Les particules  $\beta^-$  sont chargée, elles ont:

- ◆ Une vitesse rapide  $> 0,9c$  (particule relativiste)
- ◆ Une trajectoire non rectiligne induisant un long parcours pour une courte portée.
- ◆ Elles provoquent des ionisations par collision avec des électrons.

## II.C.1. La désintégration $\beta^-$ : parcours dans la matière.

Les  $\beta^-$  sont arrêtés par une feuille de métal

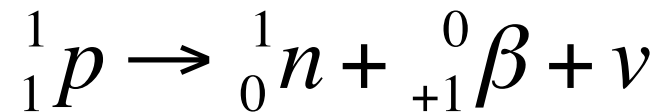


## II.C.2. La désintégration $\beta^+$

Elle concerne les noyaux ayant un excès de protons.

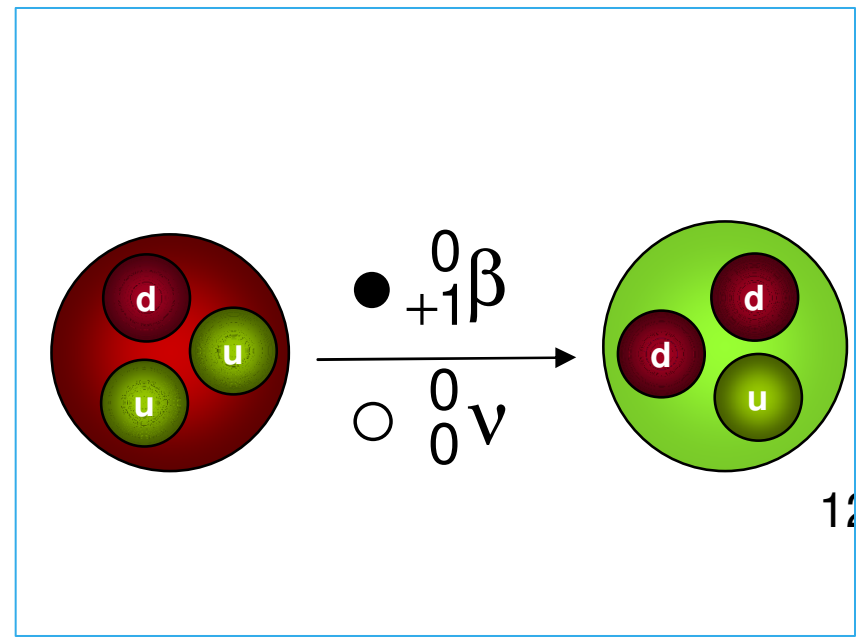
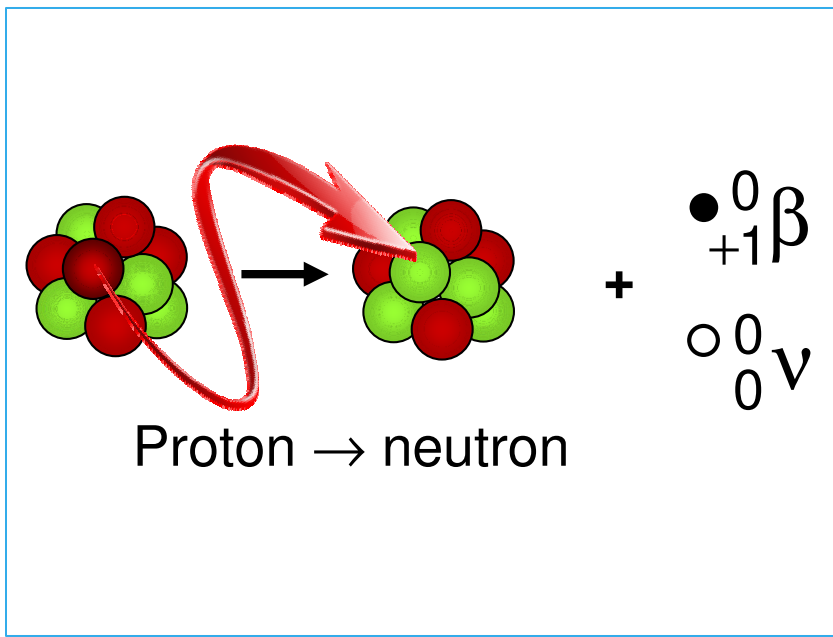


Le positon naît de la transformation spontanément impossible d'un proton en neutron:



$\nu$  est un neutrino; de masse négligeable et de charge nulle.

La particule  $\beta^+$  peut être notée:  ${}^0_{+1} \beta$  ou  $\beta^+$  ou  ${}^0_{+1} e$



## II.C.2. La désintégration $\beta^+$ : Bilan masse-énergie

Le bilan de la transformation est:



La transformation du proton en neutron résulte de l'inversion d'un quark.

## II.C.2. La désintégration $\beta^+$ : Bilan masse-énergie

Le défaut de masse est:

$$\Delta M = \mathcal{M}(A,Z) - Zm_e - [\mathcal{M}(A,Z-1) - (Z-1)m_e + m_e]$$

$$\Delta M = \mathcal{M}(A,Z) - Zm_e - \mathcal{M}(A,Z-1) + (Z-1)m_e - m_e$$

$$\Delta M = \mathcal{M}(A,Z) - \mathcal{M}(A,Z-1) - 2 m_e$$

$\Delta M$  ne peut pas être  $< 0$

donc  $\mathbf{M(A,Z) - M(A,Z+1) > 2 m_e}$ .

$$[M(A,Z) - M(A,Z+1)].931,5 > 2 \times 0,511 \text{ MeV} = 1,022 \text{ MeV.}$$

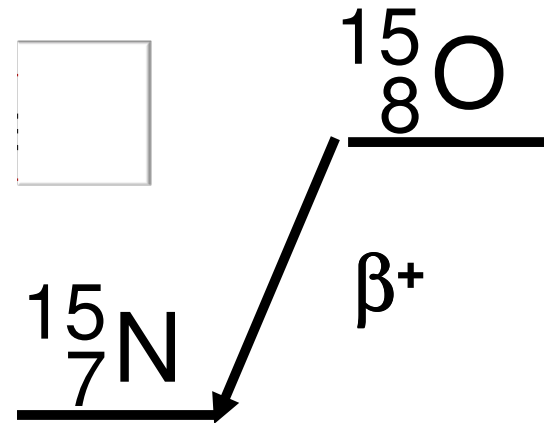
**Il y a un seuil. (+++)**

## II.C.2. La désintégration $\beta^+$ : Bilan masse-énergie

### Application

Soit la désintégration de l'oxygène-15 en azote-15 avec:

- ◆  $M(15,8) = 15,0030 \text{ u}$ ;
- ◆  $M(15,7) = 15,0001 \text{ u}$ ;
- ◆  $m_e = 0,00055 \text{ u}$



## II.C.2. La désintégration $\beta^+$ : Bilan masse-énergie

### Correction

$$\Delta M = 15,0030 - 15,0001 - 2 \times 0,00055 = \mathbf{0,0018 \text{ u}}$$

$$E_d = 0,0018 \times 931,5 = \mathbf{1,7 \text{ MeV}}$$

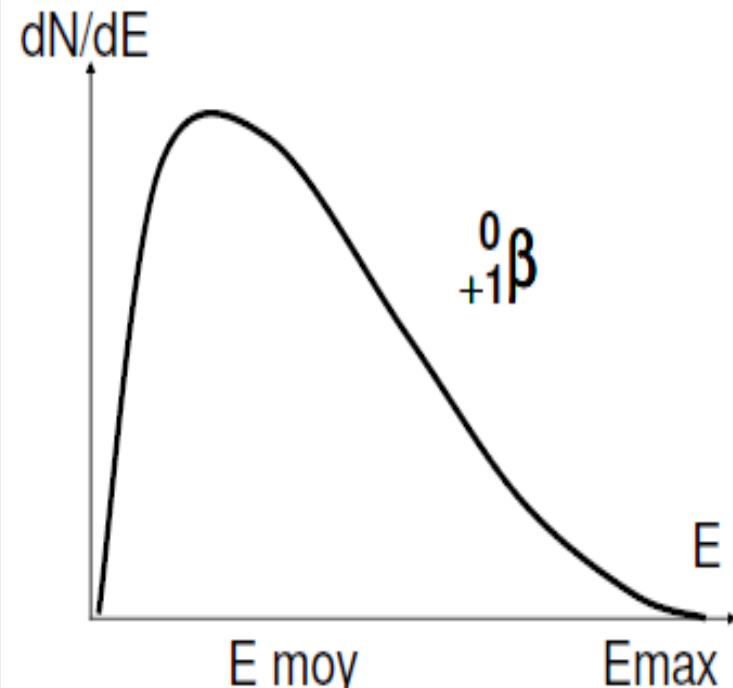
Le seuil de 1,022 MeV est respecté, la transformation  $\beta^+$  est possible.

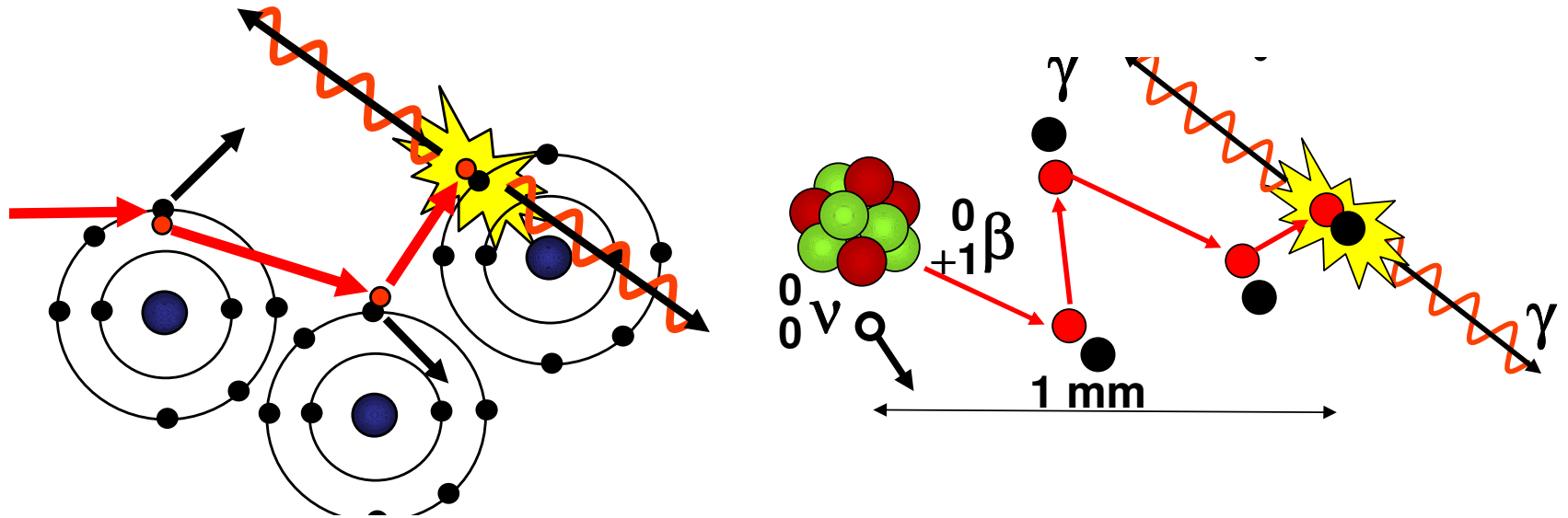
## II.C.2. La désintégration $\beta^+$ : spectre en énergie

L'énergie disponible va se répartir en énergie cinétique entre le noyau fils, la particule  $\beta^+$  et le neutrino.

Du fait de la masse du noyau fils, son énergie cinétique de recul sera **quasi nulle**.

L'énergie est donc partagée entre la particule  $\beta^+$  et le neutrino selon un spectre continu : seule la particule  $\beta^+$  est détectable.





## II.C.2. La désintégration $\beta^+$ : **parcours dans la matière.**

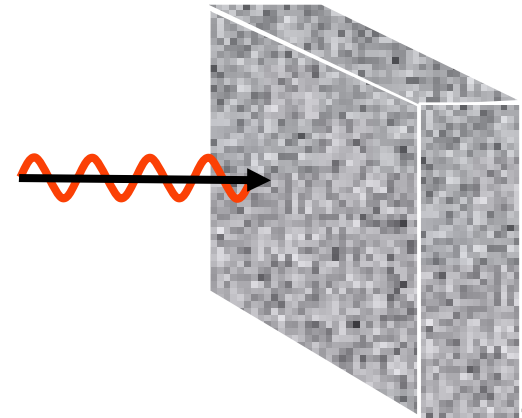
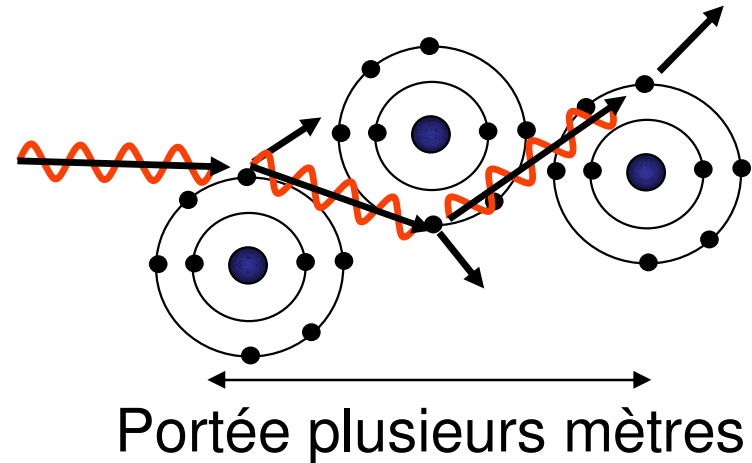
Les particules  $\beta^+$  sont chargées:

- ◆ Elles entrent en collision avec les électrons jusqu'à épuisement de l'énergie cinétique.
- ◆ Elle se « collent » aux électrons entraînant une annihilation: la collision provoque la disparition des particules convertissant leur masse en énergie libérée sous forme de **2 photons  $\gamma$**  de 511 keV.

## II.C.2. La désintégration $\beta^+$ : **parcours** dans la matière.

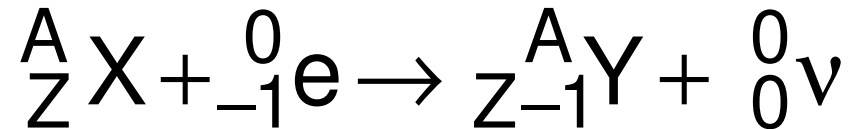
### Les photons $\gamma$

- ◆ Ont une portée de plusieurs mètres.
- ◆ Sont arrêtés par du plomb ou du béton.



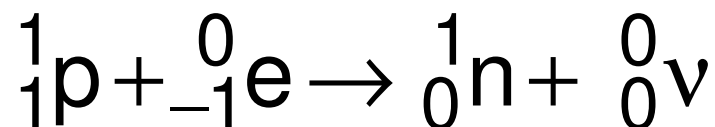
## II.C.3. La capture électronique

Elle concerne aussi les noyaux ayant un excès de protons.



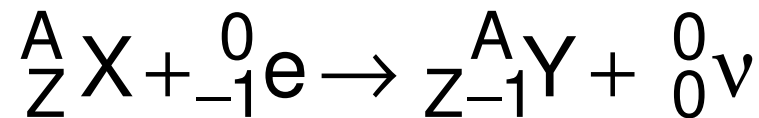
L'**électron** de la transformation est généralement prélevé sur la couche K.

On a l'annulation des charges par réaction entre le proton et l'électron aboutissant à la formation **neutrino**  $\nu$  et d'un **neutron**.



## II.C.3. La capture électronique: bilan masse / énergie

Le défaut de masse est:



$$\Delta M = \mathcal{M}(A,Z) - Zm_e + m_e - [\mathcal{M}(A,Z-1) - (Z-1)m_e]$$

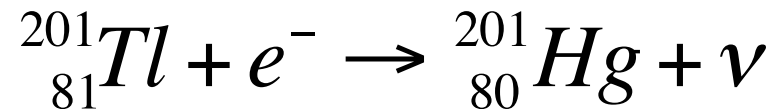
$$\Delta M = \mathcal{M}(A,Z) - \mathcal{M}(A,Z-1)$$

Pour que la transformation soit *possible* il faut que l'énergie libérée soit supérieure à  $|\mathbf{W}_K|$  (+++)

## II.C.3. La capture électronique: bilan masse / énergie

### Application

Soit la transformation suivante :



On donne :

$$W_k \text{ du } {}^{201}\text{Tl} = -85 \text{ keV}$$

$$\mathcal{M}(201, 81) = 200,97079$$

$$\mathcal{M}(201, 80) = 200,97028, \text{ Quelle est l'énergie libérée?$$

## II.C.3. La capture électronique: bilan masse / énergie

### Correction

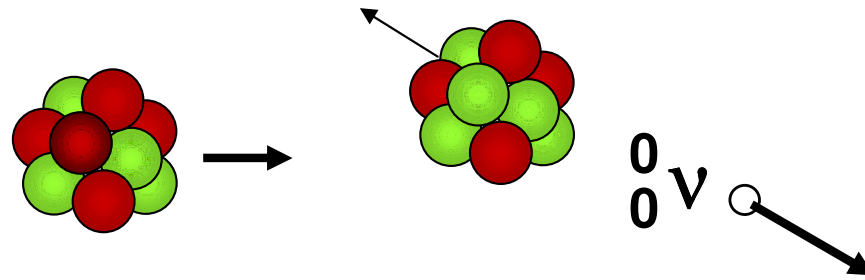
$$\Delta M = 200,97079 - 200,97028 = \mathbf{5.10^{-4} u}$$

$$E_d = 5.10^{-4} \times 931,5 = \mathbf{0,475 MeV}$$

L'énergie libérée est inférieure à 1,022 MeV: il n'y a pas de désintégration  $\beta^+$  possible.

L'énergie libérée est supérieure  $85 \text{ keV} = |W_K|$ : elle permet une **capture électronique**.

## II.C.3. La capture électronique: spectre en énergie



L'énergie disponible est emportée par le neutrino indétectable.

Du fait de la masse du noyau fils, son énergie cinétique de recul sera **quasi nulle**.

Il n'y a **pas de spectre détectable d'origine nucléaire**.

## II.C.3. La capture électronique: spectre en énergie

Quelle est l'énergie emportée par le neutrino?

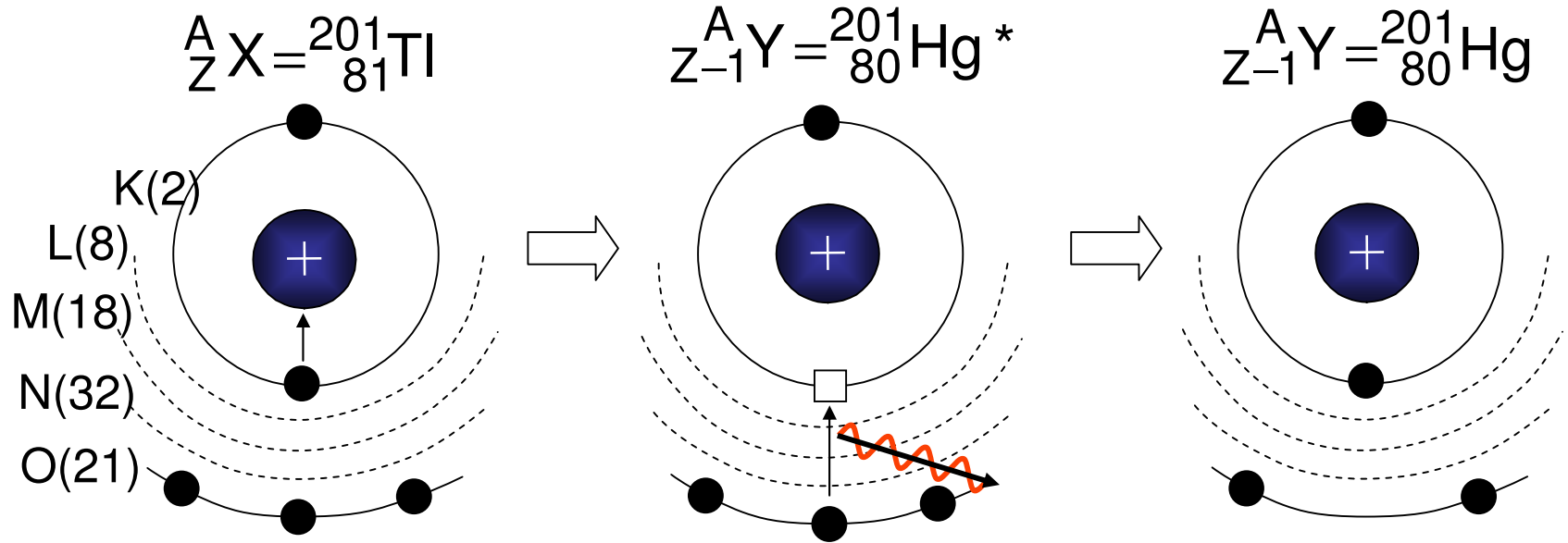
L'énergie cinétique du neutrino est environ égale à l'énergie libérée moins celle utilisée pour arracher l'électron de la couche K.

$$E_{C_{\text{neutrino}}} = E_d - |W_k|$$

Dans l'exemple précédent:

$$E_d = 475 \text{ keV} \ \& \ W_k = -85 \text{ keV}$$

$$E_c(\nu) = 475 - 85 = 390 \text{ keV}$$



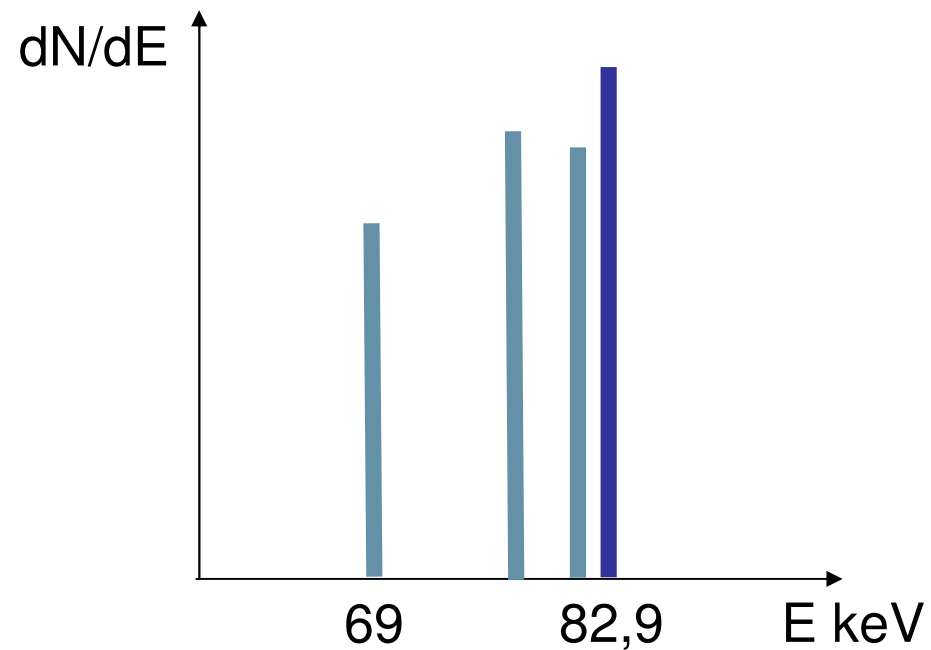
## II.C.3. La capture électronique: spectre en énergie

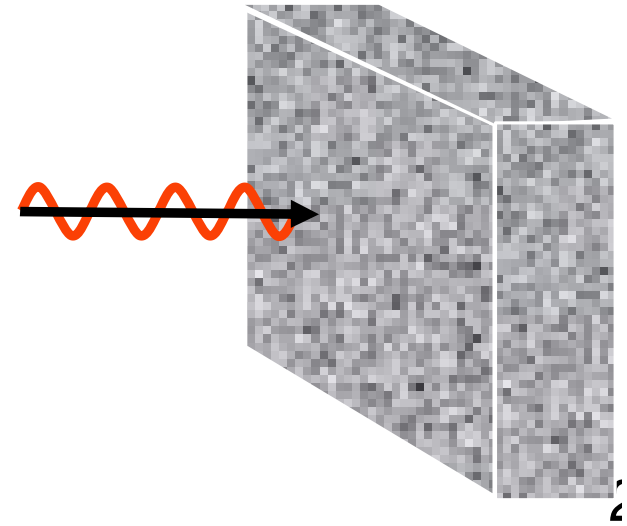
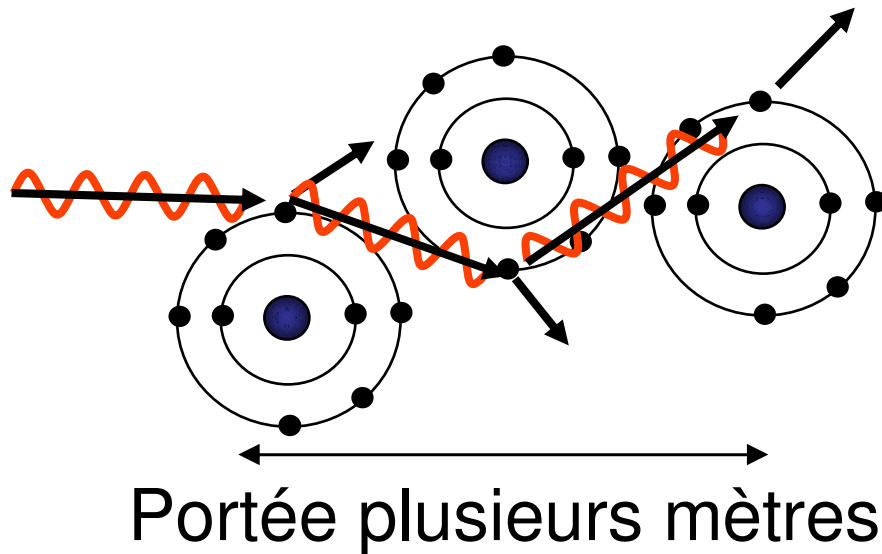
La capture d'un électron de la couche K entraîne un réarrangement atomique par photons de fluorescence et/ou électrons Auger.

## II.C.3. La capture électronique: spectre en énergie

Il y'a donc un spectre de raies d'origine atomique ( + + + ) lié à u réarrangements de Y (l'atome fils).

C'est le seul spectre détectable!





## II.C.3. La capture électronique: **parcours dans la matière**

Les photons de fluorescence ont une portée de plusieurs mètres.

Ils sont arrêtés par du plomb ou du béton.

## II.D. Les transformations isomériques

### II. LES TRANSFORMATIONS RADIOACTIVES

#### A. Généralités

#### B. La radioactivité alpha

#### C. Les transformations isobariques

1. Désintégration  $\beta^-$
2. Désintégration  $\beta^+$
3. Désintégration par capture électronique

#### D. Les transformations isomériques

1. Radioactivité  $\gamma$
2. La conversion interne

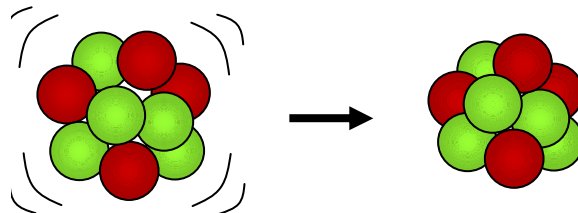
## II.D. Les transformations isomériques

Les transformations isomériques sont des transformations sans changement de nature du noyau;

La transformation porte sur les niveaux d'énergie des nucléons.

Certaines transformations isobariques ( $\beta$  ou CE), peuvent aboutir à un état intermédiaire où persiste un excédent d'énergie.

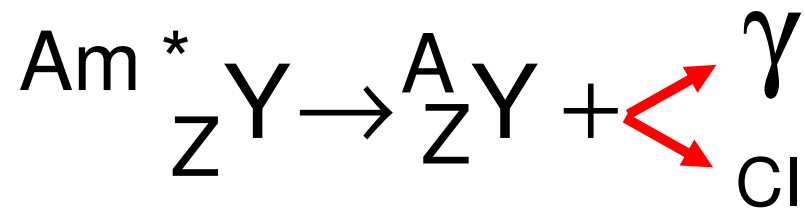
Les nucléons occupent alors des niveaux d'énergie supérieurs à ceux de l'état fondamental.

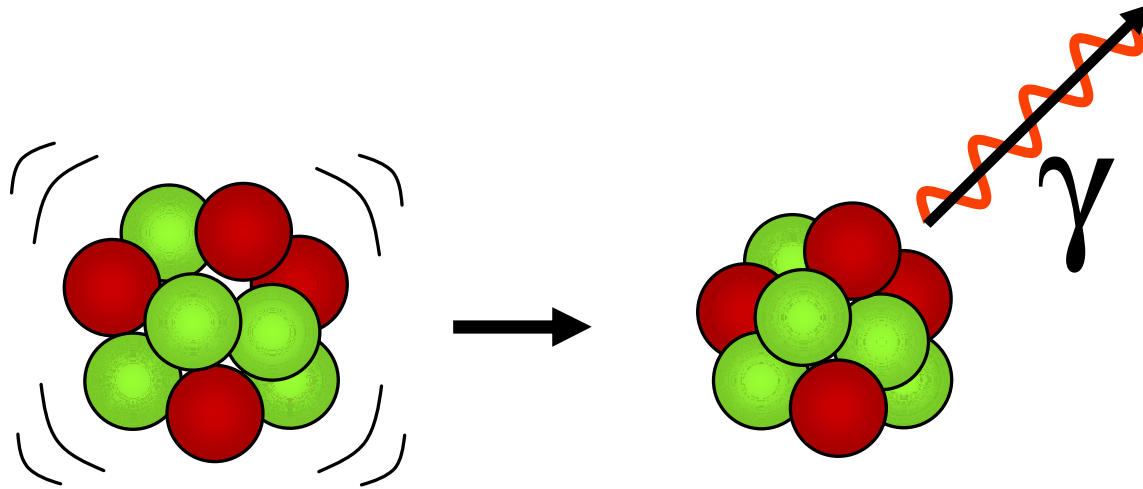


## II.D. Les transformations isomériques

L'excès d'énergie est libéré grâce à:

- ◆ L'émission d'un **photon gamma  $\gamma$** 
  - Si le noyau père est excité ou métastable  ${}^*mY$
- ◆ Un phénomène de **conversion interne**
  - Si le noyau père est excité ou métastable  ${}^*mY$



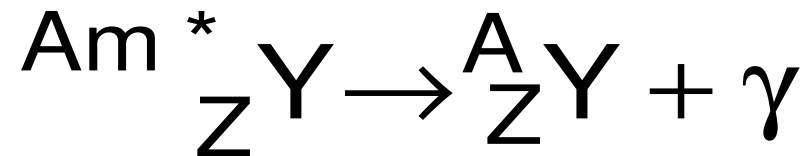


## II.D.1. La radioactivité gamma

Le noyau métastable ou excité retourne à son état fondamental par émission d'un photon gamma d'origine **nucléaire** (+++).

## II.D.1. La radioactivité gamma: bilan masse / énergie

On a le bilan suivant:



Le défaut de masse est :

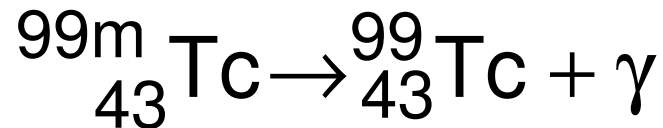
$$\Delta M = \mathcal{M}(A_m, Z) - Zm_e - [\mathcal{M}(A, Z) - Zm_e]$$

$$\Delta M = \mathcal{M}(A_m, Z) - \mathcal{M}(A, Z)$$

## II.D.1. La radioactivité gamma: bilan masse / énergie

### Application

Soit la transformation suivante:



On donne les masses:

$$M(99m,43) = 98,90655$$

$$M(99,43) = 98,90640$$

Quelle est l'énergie du photon gamma libéré?

## II.D.1. La radioactivité gamma: bilan masse / énergie

### Correction

$$\Delta M = 98,90655 - 98,90640 = \mathbf{0,00015 \text{ u}}$$

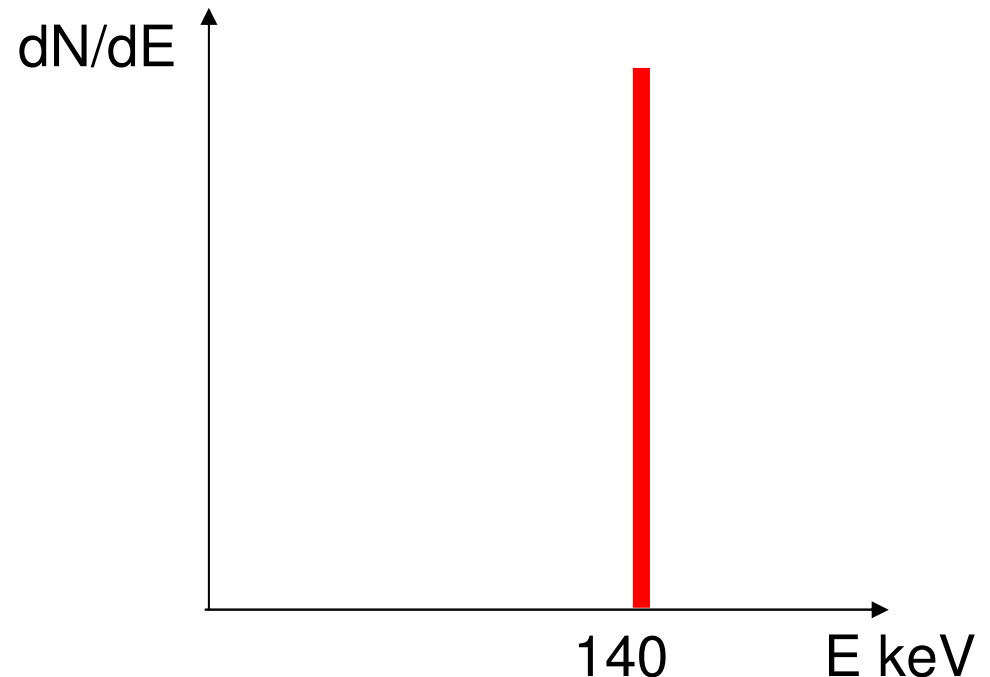
$$E_d = 0,00015 \times 931,5 = 0,14 \text{ MeV} = \mathbf{140 \text{ keV}}$$

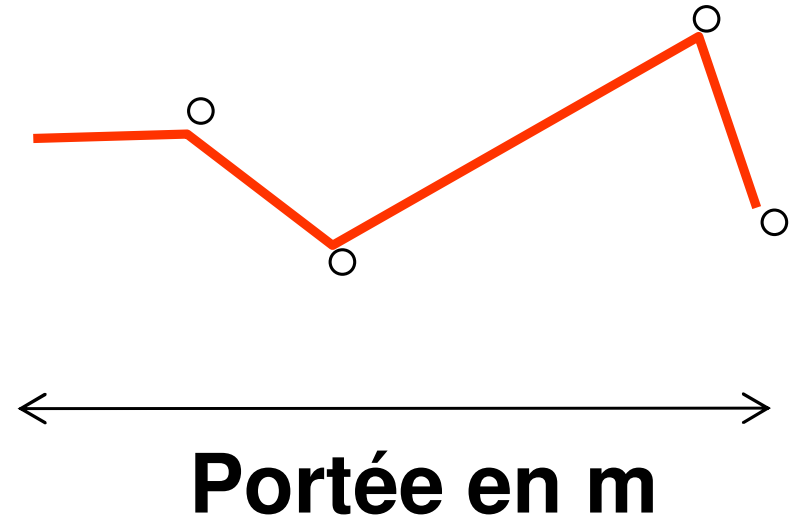
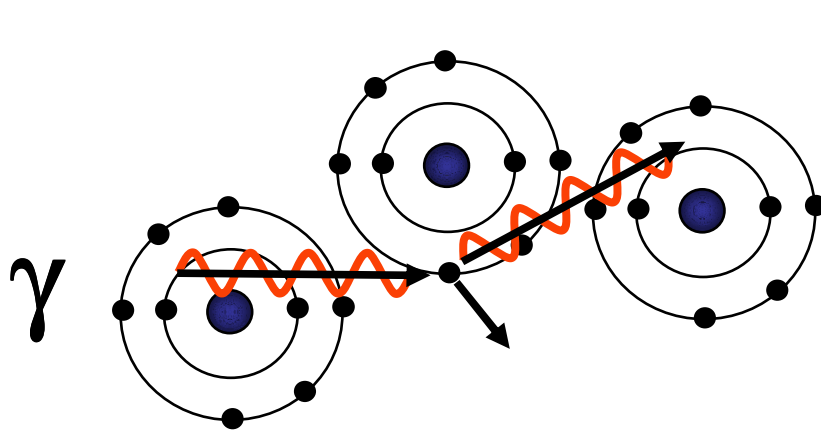
## II.D.1. La radioactivité gamma: spectre en énergie

L'énergie disponible est emportée par le photon gamma tel que:

$$E_{\text{gamma}} = h\nu = E_d$$

Le spectre est électromagnétique nucléaire de raie.





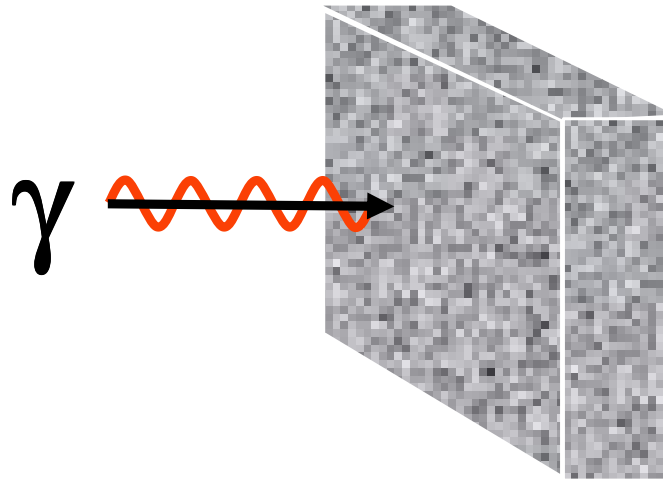
## II.D.1. La radioactivité gamma: **parcours** dans la matière

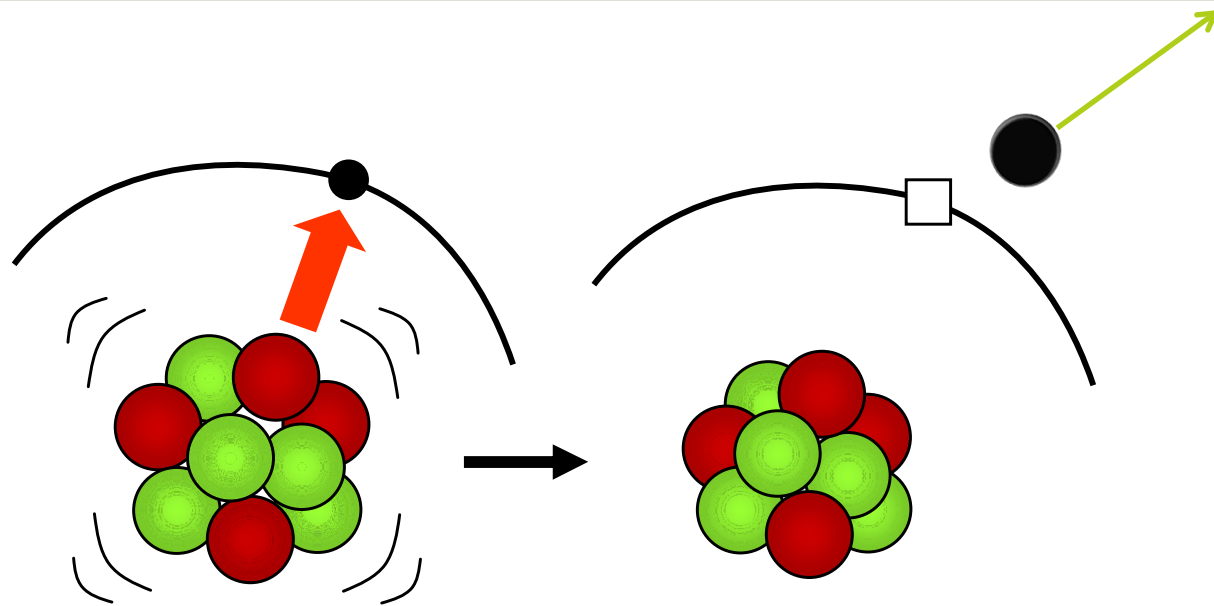
Le photon gamma est ionisant par interaction avec les électrons:

- ◆ L'effet photo-électrique
- ◆ La diffusion Compton
- ◆ La création de paire

## II.D.1. La radioactivité gamma: parcours dans la matière

Les gammas sont arrêtés par une épaisseur de béton ou de plomb.





## I.D.2. La conversion interne

L'énergie en excès du noyau excité est transmise à un électron de l'atome qui est alors **ionisé**.

## II.D.2. La conversion interne: bilan masse / énergie

La réaction de désintégration:



Le défaut de masse

$$\Delta M = \mathcal{M}(A_m, Z) - Zm_e - [\mathcal{M}(A, Z) - Zm_e]$$

$$\Delta M = \mathcal{M}(A_m, Z) - \mathcal{M}(A, Z)$$

## II.D.2. La conversion interne: bilan masse / énergie

### Application

Soit la désexcitation du  $^{137*}_{56}\text{Ba}$

Avec

$$\Delta M = 660 \text{ keV}$$

$$W_K(56\text{Ba}) = -37,4 \text{ keV} ; W_L(56\text{Ba}) = -5,6 \text{ keV}$$

Calculer les énergies cinétiques des électrons pouvant être ionisés..

## II.D.2. La conversion interne: bilan masse / énergie

### Correction

$$\Delta M = 660 \text{ keV}$$

$$W_k(56\text{Ba}) = -37,4 \text{ keV} ; W_L(56\text{Ba}) = -5,6 \text{ keV}$$

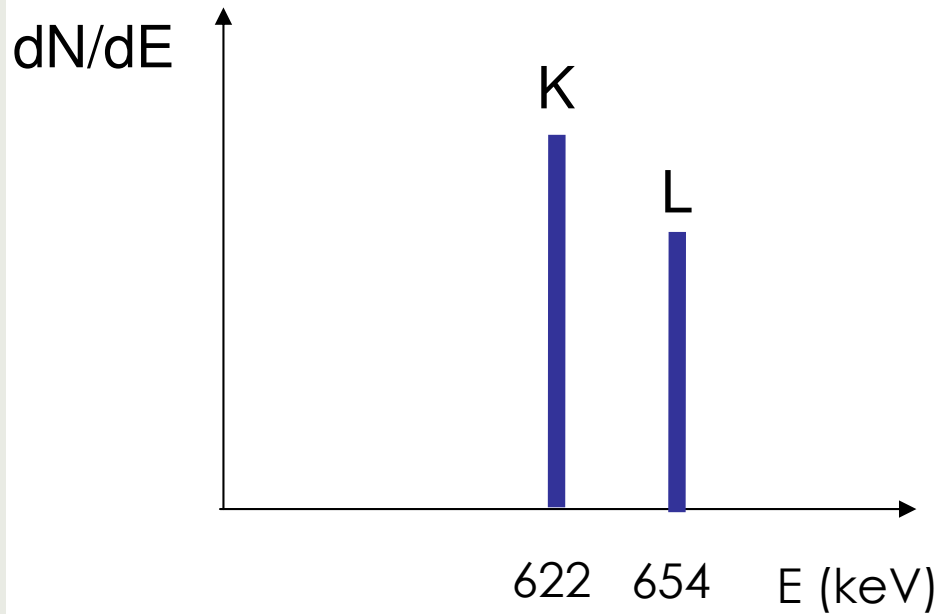
$$E_c(e_k) = 660 - 37,4 = \mathbf{622,6 \text{ keV}}$$

$$E_c(e_L) = 660 - 5,6 = \mathbf{654,4 \text{ keV}}$$

## II.D.2. La conversion interne: **spectre énergétique**

Il n'y a **pas de spectre nucléaire.**

Les réarrangements induits par la ionisation sont à l'origine d'un **spectre électronique atomique de raies.**



## II.D.2. La conversion interne: spectre énergétique

