

---

# LE NOYAU



*TUT'FLIX – JANVIER 2022*

*Bastisotope*

- 1- Introduction et historique
- 2- Composition et classification
- 3- Energie de liaison et défaut de masse
- 4- Facteurs de stabilité nucléaire
- 5- Forces nucléaires
- 6- Réactions de fission et de fusion nucléaire

BIOPHYSIQUE  ELITE



# 1- Introduction et historique

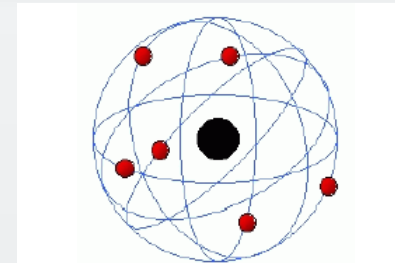
**Noyau = Nuclide = Nucléoïde**

- Antiquité :
  - **Démocrite** → notion d'atomes, particules élémentaires indivisibles et invisibles
  - **Aristote** → théorie des 4 éléments (feu / air / eau / terre)
- 1805 : **John Dalton** → sphère dure pleine de matière
- 1897 : **Thomson** → modèle de l'atome en pudding au raisin

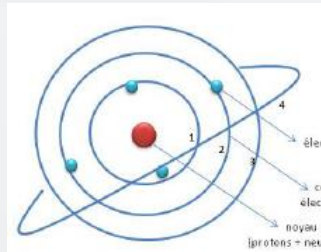


# 1- Introduction et historique

- XX<sup>ème</sup> siècle : modèles qui évoluent, faisant apparaître deux zones distinctes, le noyau (+) et le cortège électronique (-)
- **Rutherford** → électrons dans un nuage autour du noyau
- **Bohr** → couches électroniques occupées par des électrons d'énergies bien définies



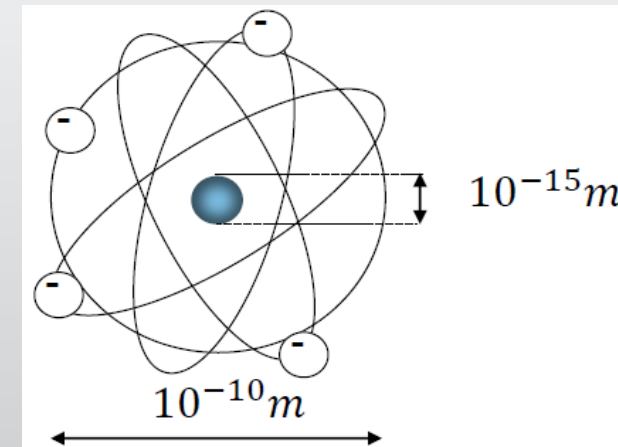
Le « nuage d'électron »  
du modèle de Rutherford



Le modèle « en  
couches » de Bohr

Résultats de l'expérience de Rutherford :

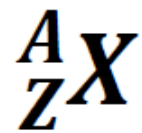
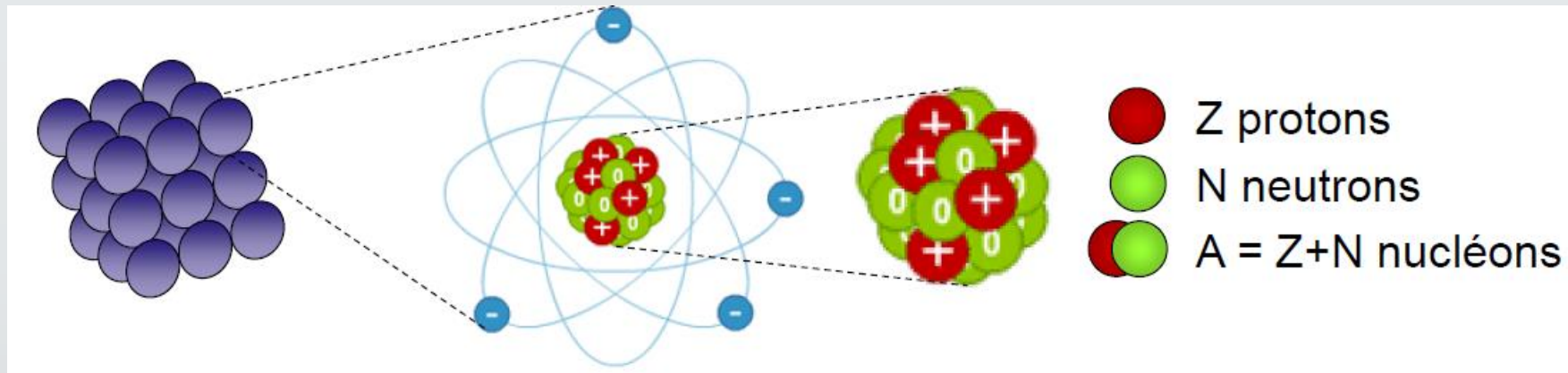
- Structure lacunaire de l'atome
- Petit noyau central et beaucoup de vide autour
- Modèle planétaire de l'atome
- Masse très faible des électrons
- Masse de l'atome principalement concentrée dans le noyau



- De nos jours : différents modèles plus sophistiqués, qui continuent d'évoluer

# 2- Composition et classification

## Nomenclature



A = nombre de masse

Z = numéro atomique

A = Nombre de masse = Nombre de nucléons

Z = Numéro atomique = Nombre de charges = Nombre de protons = Nombre d'électrons

N = Nombre de neutrons = A - Z

# 2- Composition et classification

## Classification en fonction du Z

- Classification périodique = Classification de Mendeleïev = Classification « chimique »

1 H						2 He
3 Li	4 Be					
11 Na	12 Mg					
19 K	20 Ca					

5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
13 Al					

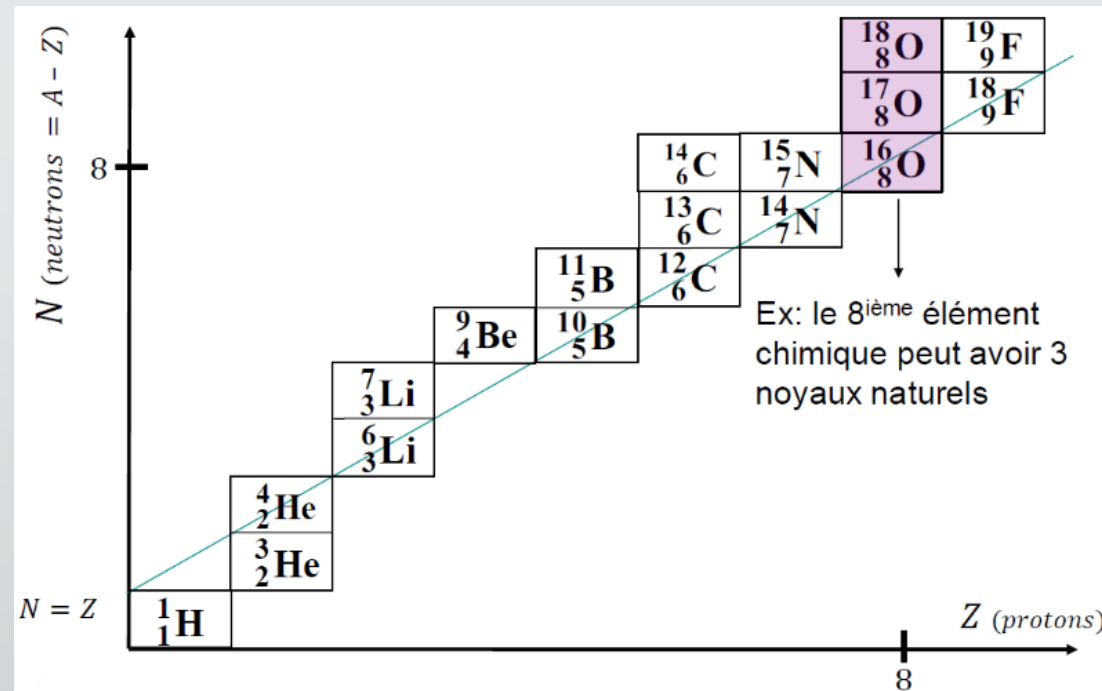
Ex: le 8<sup>ième</sup> élément chimique (8 électrons)

- Éléments classés par Z croissant, **Z est indissociable de l'élément chimique**
- Regroupement en colonne des éléments avec des propriétés physico-chimiques similaires

# 2- Composition et classification

## Classification en fonction du N

- **Table des nuclides**, bien plus adaptée à la physique nucléaire



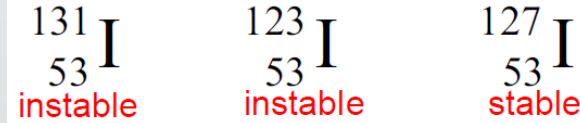
- Permet de classer tous les noyaux, **stables** et **radioactifs**

# 2- Composition et classification

## Classification en fonction du N

Des définitions très importantes :

- **Isotopes** : Deux nucléides avec le même nombre de protons  $Z$ , mais des  $A$  différents. Les isotopes sont indiscernables chimiquement.



- **Isobares** : Deux nucléides avec le même nombre de masse  $A$ , mais des  $Z$  différents. Deux isobares sont donc deux éléments chimiques différents.



- **Isotones** : Deux nucléides avec le même nombre de neutrons ( $A$  et  $Z$  sont différents). Deux isotones sont donc deux éléments chimiques différents.

# 2- Composition et classification

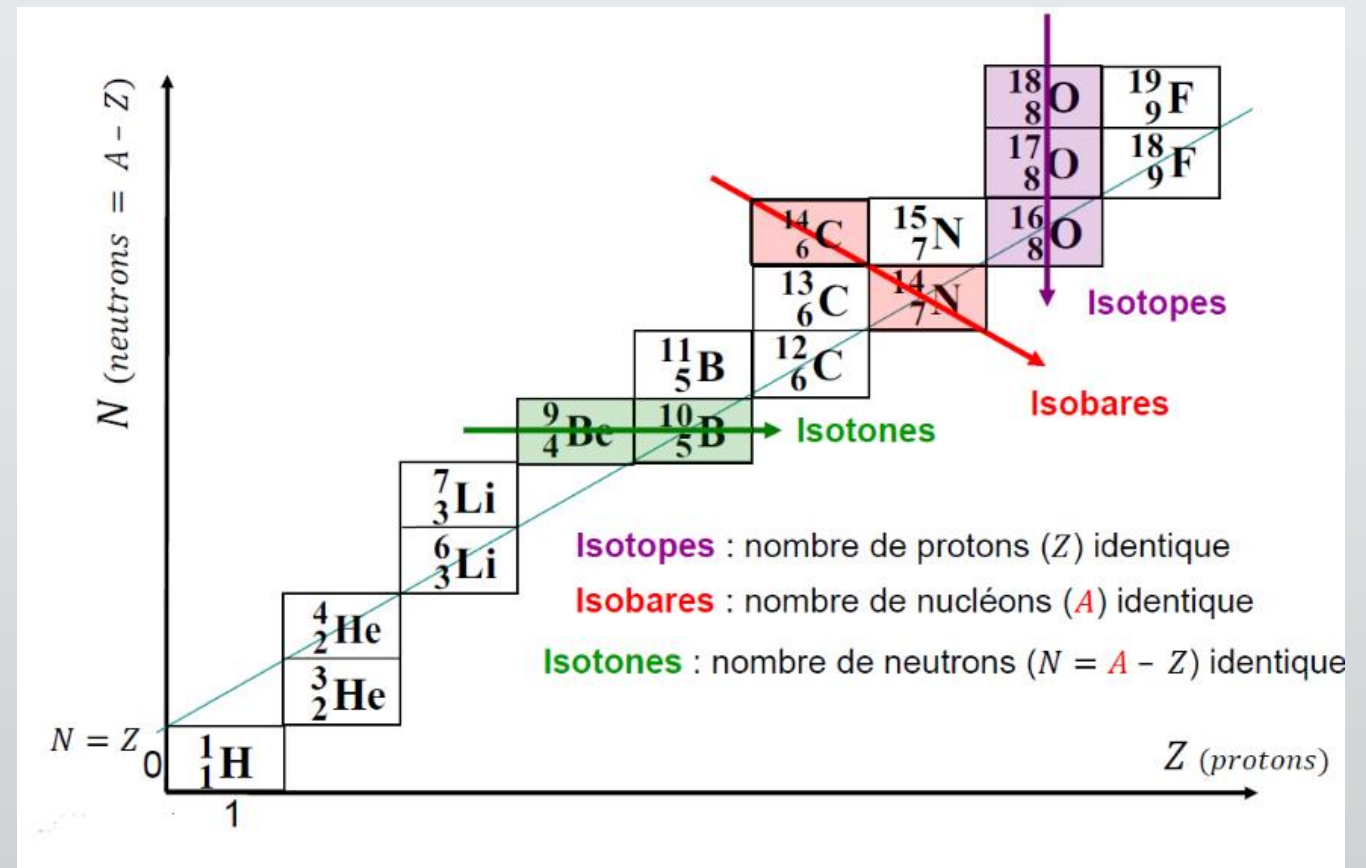
## Classification en fonction du N

Mnémono :

Isotopes : même nb de protons

Isobares : même A

Isotones : même N





# 2- Composition et classification

## Les nucléons

Rappel :  $A$  = Nombre de nucléons = Nombre de masse

Ainsi  $A$  est **la valeur entière la plus proche de la masse d'un atome** ( $u$ )

Exemples deux atomes:  ${}^{14}_7N$   $\mathcal{M}(14,7) = 14,003 u$   
 ${}^{16}_8O$   $\mathcal{M}(16,8) = 15,994 u$

Quelques conventions d'écriture :

$\mathcal{M}$  = masse d'un atome

$M$  = masse du noyau ( $M = \mathcal{M}(A, Z) - Zm_e$ )

$\Delta M$  = défaut de masse du noyau = énergie de liaison

• **Proton** : existe à l'état libre  $\rightarrow {}^1_1p$  ou  ${}^1_1H$  ou  $H^+$

• **Neutron** : instable en dehors du noyau  $\rightarrow {}^1_0n \rightarrow {}^1_1p + {}^0_{-1}e + \bar{\nu}$

# 2- Composition et classification

## Les particules élémentaires

Les particules élémentaires sont classées en 3 familles et 2 types

Parmi la **famille I** :

- Les **quarks** : **up** et **down**  
→ Prisonniers de particules plus grandes

$$u = +\frac{2}{3}e$$
$$d = -\frac{1}{3}e$$

- Les **leptons** : **électron** et **neutrino de l'électron**  
→ Libres de se déplacer

Autres particules élémentaires : les **Bosons**, qui sont des particules d'interaction.

	I	II	III	
mass...	2.4 MeV/c <sup>2</sup>	1.27 GeV/c <sup>2</sup>	171.2 GeV/c <sup>2</sup>	0
charge...	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
spin...	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
name...	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b>γ</b> photon
Quarks	4.8 MeV/c <sup>2</sup>	104 MeV/c <sup>2</sup>	4.2 GeV/c <sup>2</sup>	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom	<b>g</b> gluon
Leptons	<2.2 eV/c <sup>2</sup>	<0.17 MeV/c <sup>2</sup>	<15.5 MeV/c <sup>2</sup>	91.2 GeV/c <sup>2</sup>
	0	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	<b>ν<sub>e</sub></b> electron neutrino	<b>ν<sub>μ</sub></b> muon neutrino	<b>ν<sub>τ</sub></b> tau neutrino	<b>Z<sup>0</sup></b> Z boson
	0.511 MeV/c <sup>2</sup>	105.7 MeV/c <sup>2</sup>	1.777 GeV/c <sup>2</sup>	80.4 GeV/c <sup>2</sup>
	-1	-1	-1	±1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	<b>e</b> electron	<b>μ</b> muon	<b>τ</b> tau	<b>W<sup>±</sup></b> W boson
				Bosons de gauge

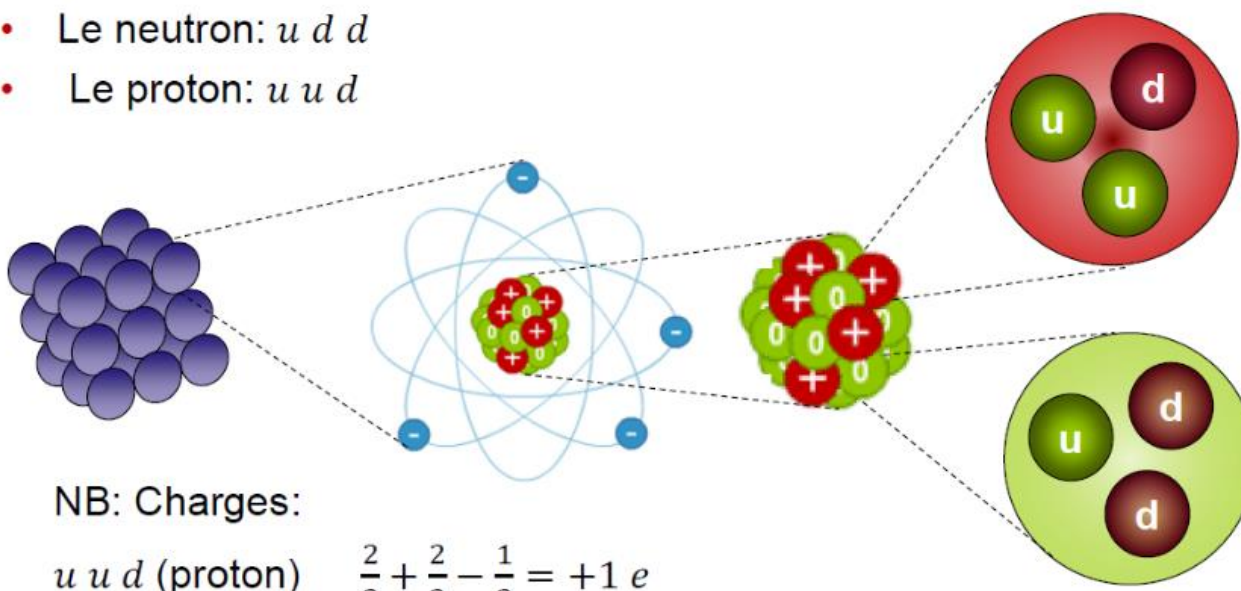
# 2- Composition et classification

## Les particules élémentaires

Les nucléons ne sont pas les particules les plus élémentaires de la matière, ils sont eux-mêmes composés de Quarks.

Les Quarks permettent aussi d'expliquer la charge des nucléons !

- Le neutron:  $u d d$
- Le proton:  $u u d$



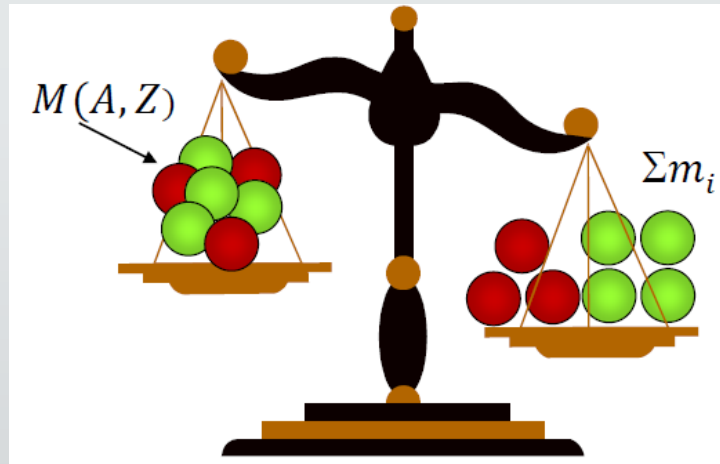
NB: Charges:

$u u d$  (proton)  $\frac{2}{3} + \frac{2}{3} - \frac{1}{3} = +1 e$

$u d d$  (neutron)  $\frac{2}{3} - \frac{1}{3} - \frac{1}{3} = 0 e$

# 3- Energie de liaison et défaut de masse

LA MASSE D'UN NOYAU CONSTITUÉ EST INFÉRIEURE A LA SOMME DES MASSES DE SES NUCLÉONS PRIS SÉPARÉMENT ++++



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

Défaut de masse : Différence entre la somme des masses des nucléons pris séparément et la masse du noyau constitué

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

# 3- Energie de liaison et défaut de masse

Attention QCM

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

Dans les données, on n'a pas la masse du noyau  $M(A, Z)$  mais celle de l'atome  $\mathcal{M}(A, Z)$

Pour rappel :  $M(A, Z) = \mathcal{M}(A, Z) - Zm_e$

Donc :

$$\Delta M = \sum m_i - (\mathcal{M}(A, Z) - Zm_e)$$

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

$$(\text{avec } \sum m_i = Zm_p + Nm_n)$$



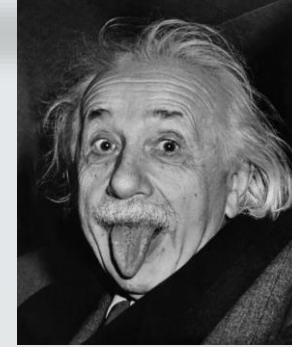
Pour gagner du temps, utiliser la masse de l'Hydrogène : 1 proton et 1 électron

Donc  $Zm(\text{Hydrogène}) = Zm_p + Zm_e$  ainsi il ne reste qu'à ajouter la masse des neutrons avant la soustraction.

# 3- Energie de liaison et défaut de masse

**Loi d'équivalence masse-énergie :**

*La masse c'est de l'énergie / L'énergie c'est de la masse*

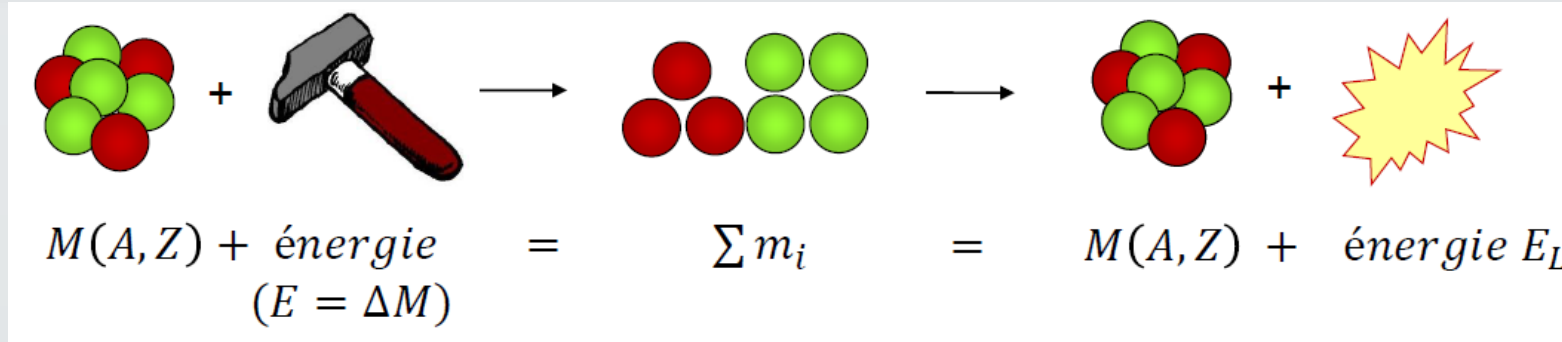


On peut donc exprimer notre défaut de masse en énergie, ce qui correspond à **l'énergie de liaison** !

Deux possibilités :

- $E_L = \Delta M \times c^2$  avec E en Joules,  $\Delta M$  en Kilogrammes et  $c = 3.10^8$  m/s
- $E_L = 931,5 \times \Delta M$  avec E en MeV et  $\Delta M$  en u

# 3- Energie de liaison et défaut de masse

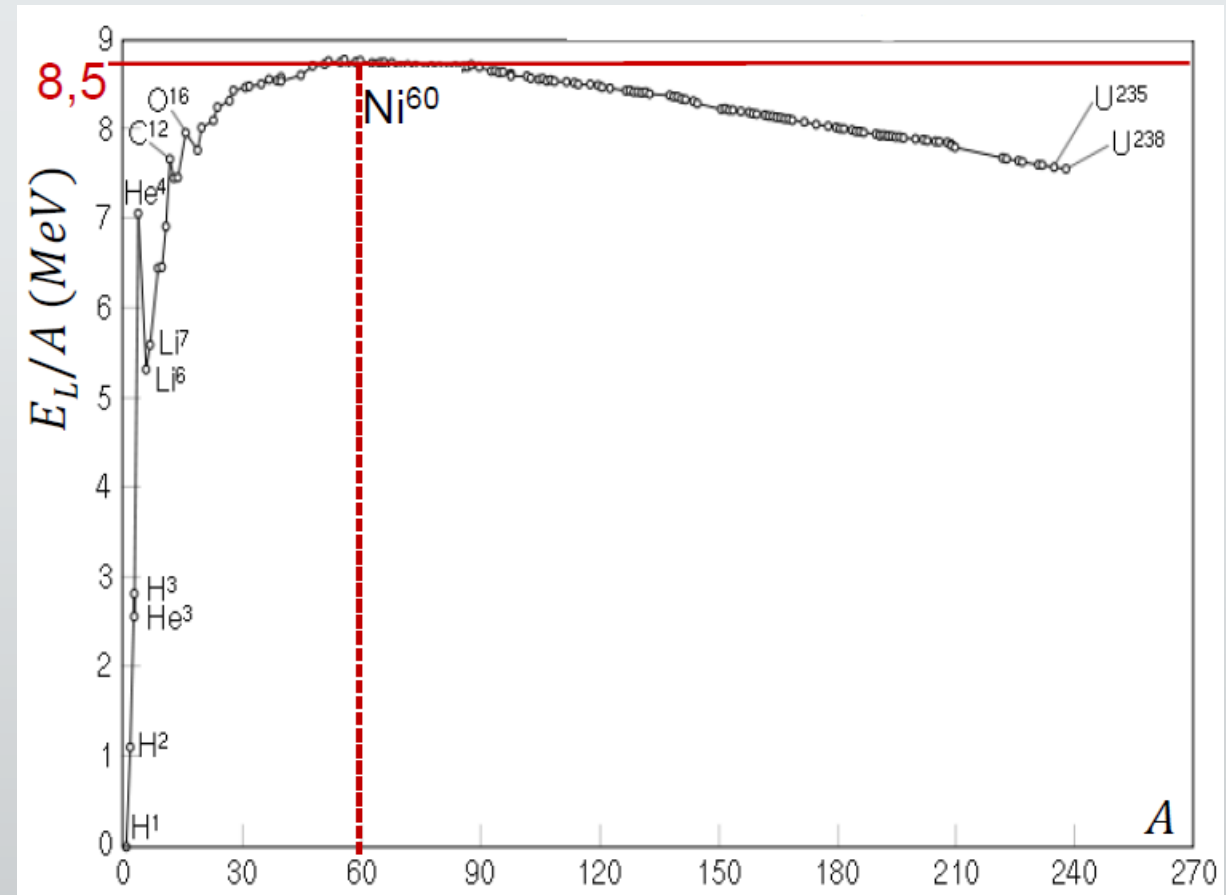


- L'énergie de liaison des nucléons d'un noyau correspond à **l'énergie qu'il faut fournir pour le dissocier**
- De l'ordre du **MeV** pour les nucléons

# 4- Facteurs de stabilité nucléaire

## L'énergie de liaison par nucléon

- Plus  $E_L/A$  est élevée, plus le **noyau est stable**
- Maximum 8,5 MeV ( $\text{Ni}^{60}$ )
- Les nombres magiques : 2, 8, 20, 50, 82...

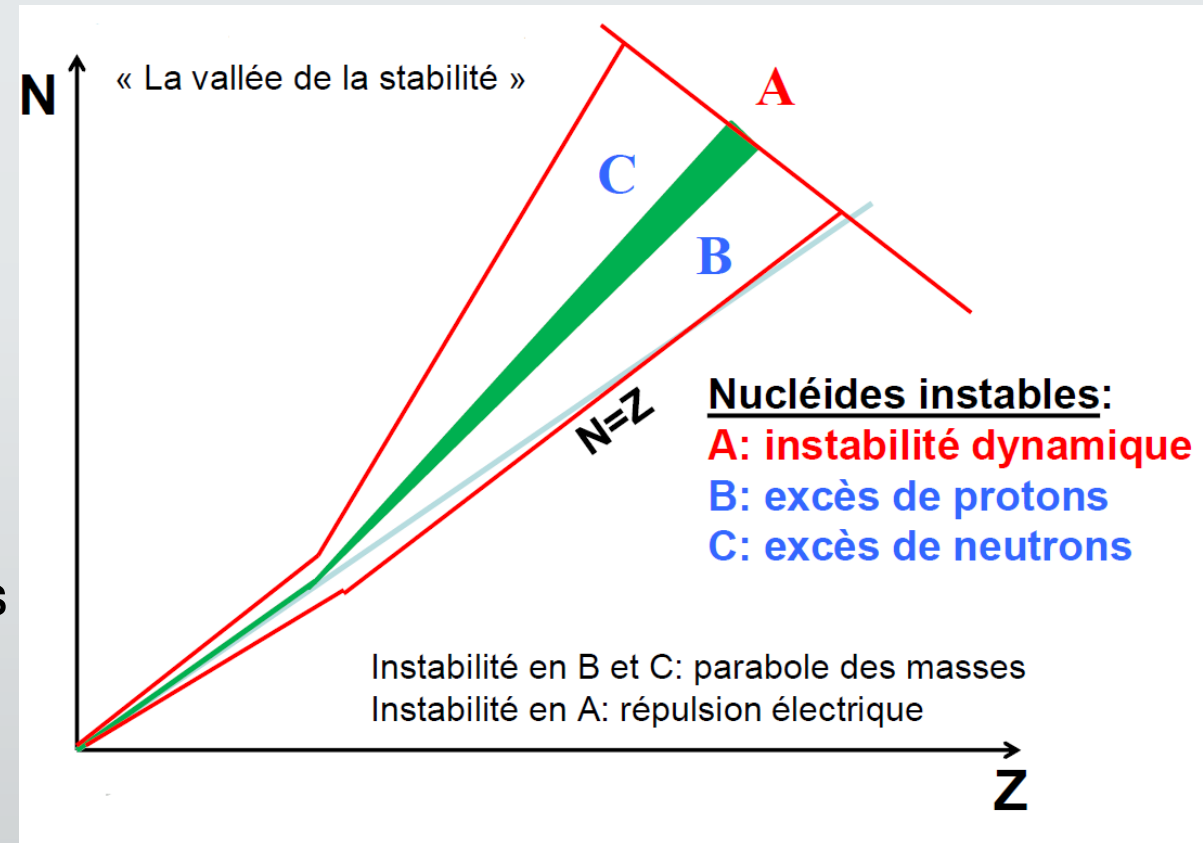




# 4- Facteurs de stabilité nucléaire

## Le nombre de neutrons

- Les noyaux dans la vallée de la **stabilité** :
  - Pour les noyaux **légers** :  $Z < 20 \rightarrow Z = N$
  - Pour les noyaux **lourds** :  $Z > 20 \rightarrow N > Z$
- Les noyaux **instables, radioactifs** :
  - Excès de **nucléons**  $\rightarrow$  radioactivité  $\alpha$
  - Excès de **proton/neutron**  $\rightarrow$  transformations **isobariques**



# 4- Facteurs de stabilité nucléaire

## Parité du nombre de nucléons

$Z$	$N$	$A$	Nbre de noyaux stables
<i>pair</i>	<i>pair</i>	<i>pair</i>	166
<i>pair</i>	<i>impair</i>	<i>impair</i>	55
<i>impair</i>	<i>pair</i>	<i>impair</i>	51
<i>impair</i>	<i>impair</i>	<i>pair</i>	5

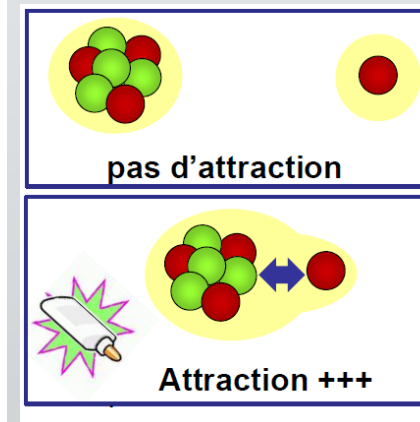
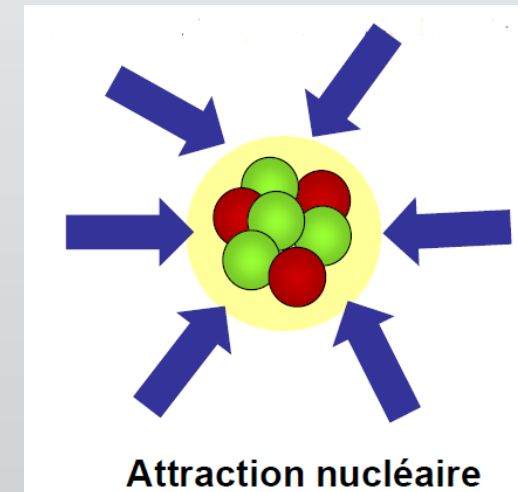
# 5- Forces nucléaires

## Définition

Les forces nucléaires sont liées aux **interactions des nucléons entre eux**, et sont **responsables de la stabilité ou de l'instabilité du noyau**.

## Interaction forte (nucléaire spécifique)

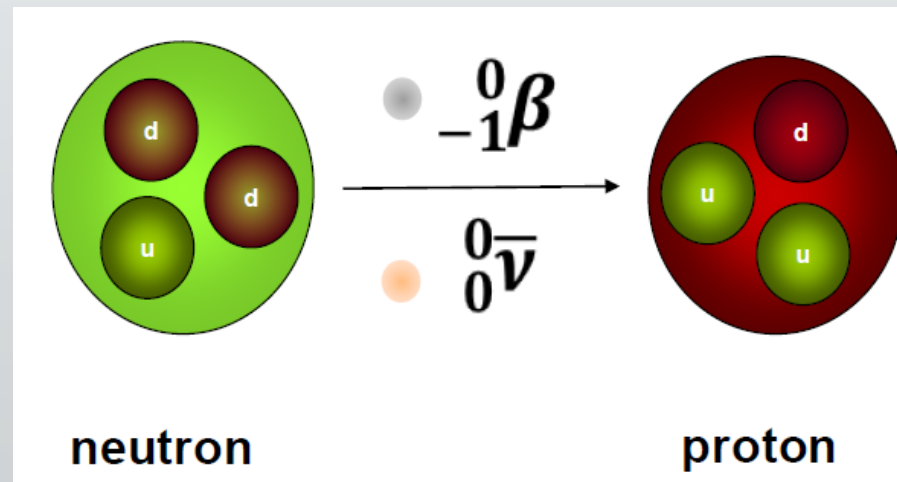
- **Attractive+++**
- Assure la cohésion du noyau
- S'exerce à **très courte distance ( $10^{-15}\text{m}$ )**
- 100 à 1000 plus forte que la force électrostatique
- Correspond à la mise en communication des **Gluons**



# 5- Forces nucléaires

## Interaction faible (nucléaire spécifique)

- Discrète, de faible intensité
- S'exerce à très courte distance ( $10^{-15}\text{m}$ )
- S'exerce à **l'intérieur même des nucléons++**
- Permet de **changer la composition d'un noyau++**



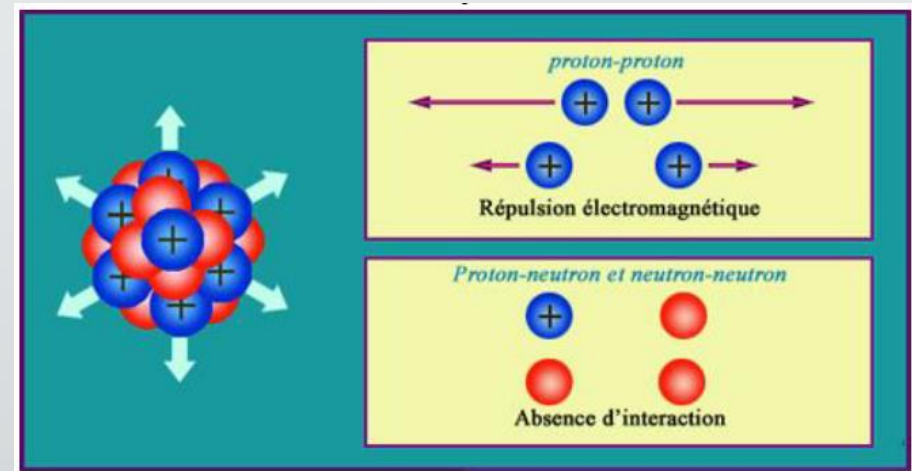
# 5- Forces nucléaires

## Force électrostatique (non spécifique du noyau)

Loi de Coulomb :

« L'intensité de la force électrostatique entre deux charges électriques est proportionnelle au produit des deux charges et est inversement proportionnelle au carré de la distance entre les deux charges. La force est portée par la droite passant par les deux charges. »

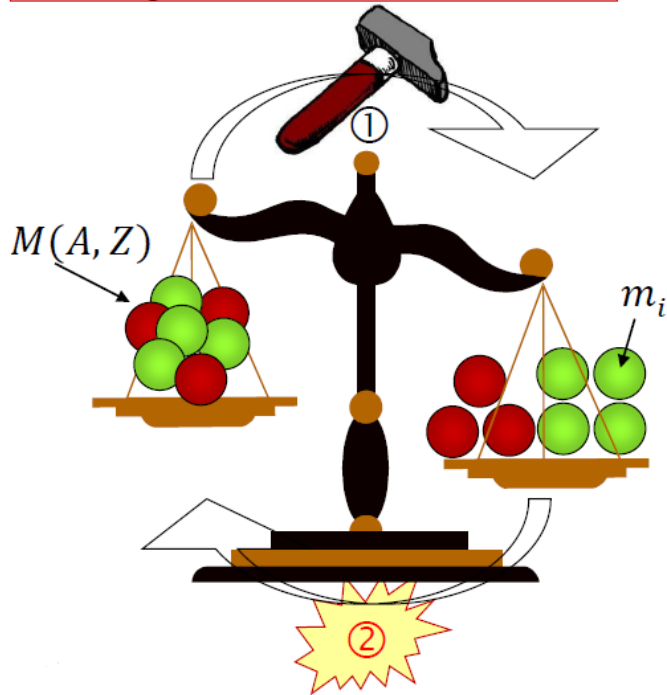
- De type coulombien en  $1/r^2$
- Concerne les **protons**, est donc **répulsive**
- Explique l'excès de neutrons des noyaux lourds



# 6- Réactions de fission et de fusion nucléaire

Au niveau des nucléons:

- ① Gain de masse = consommation d'énergie.
- ② Perte de masse = libération d'énergie.



**Fusion :**

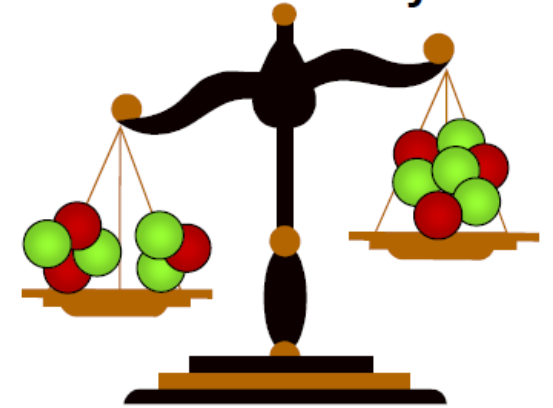
- Deux petits noyaux
- Noyau fils plus léger
- **Libération d'énergie**

**Fission :**

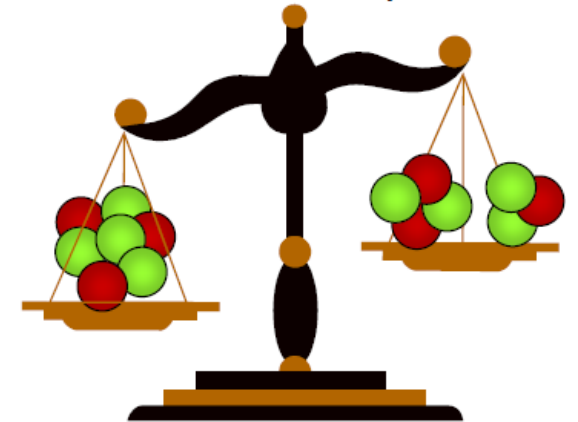
- Noyau lourd
- Produits plus légers
- **Libération d'énergie**

Contradiction ?

■ Au niveau de noyaux ?

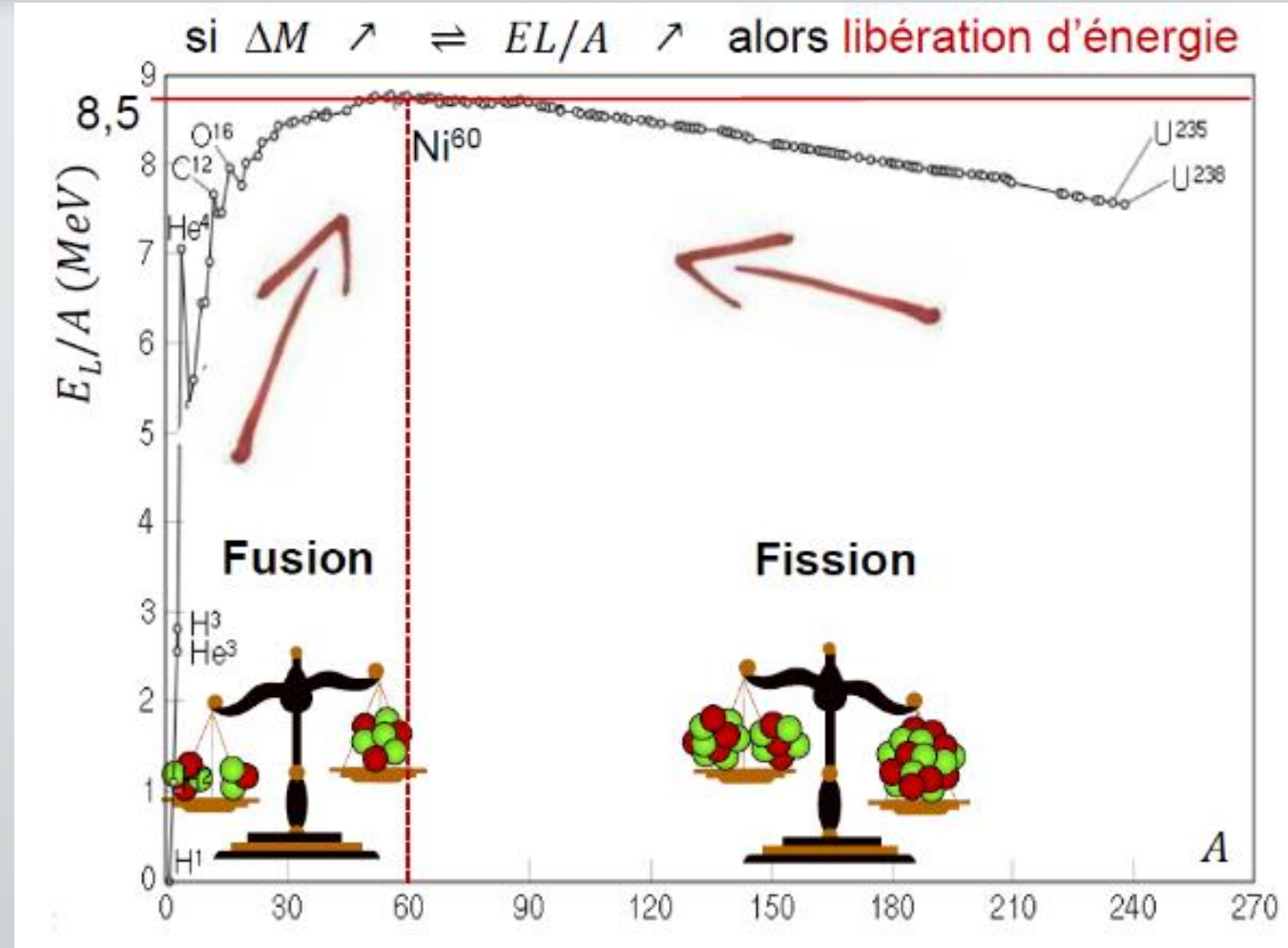


Fusion de 2 petits ?



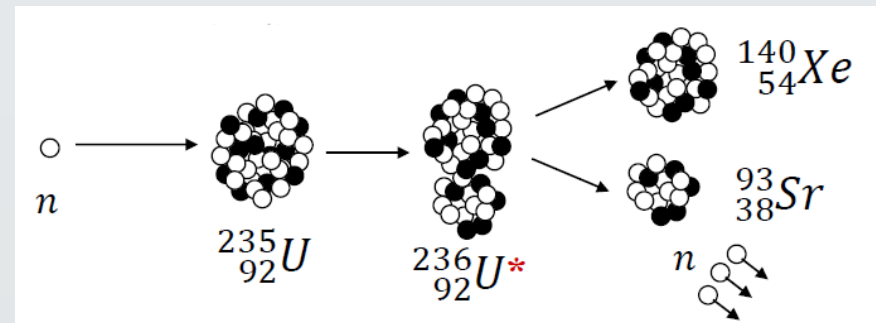
Fission d'un gros ?

# 6- Réactions de fission et de fusion nucléaire



# 6- Réactions de fission et de fusion nucléaire

## La fission nucléaire



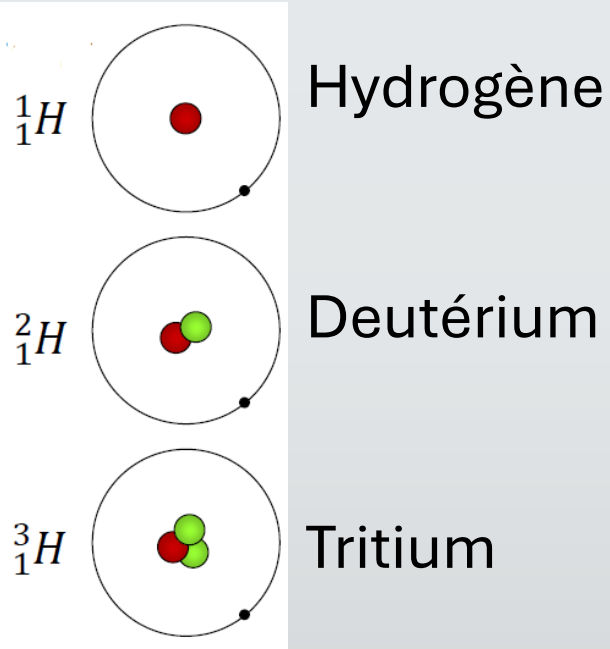
**Exemple de la fission de l'Uranium dans les centrales nucléaires**

	$^1_0n$	+	$^{235}_{92}\text{U}$	$\rightarrow$	$^{140}_{54}\text{Xe}$	+	$^{93}_{38}\text{Sr}$	+	$3^1_0n$
$E_{L/A}$	0		7,5		8,2		8,5		0
			$\times 235$		$\times 140$		$\times 93$		
$E_L (\Delta M)$	0		1762,5		1148		790,5		0
Total avant =		1762,5 MeV		après =		1938,5 MeV			
$\Delta E_L = 1938,5 - 1762,5 = 176 \text{ MeV}$									

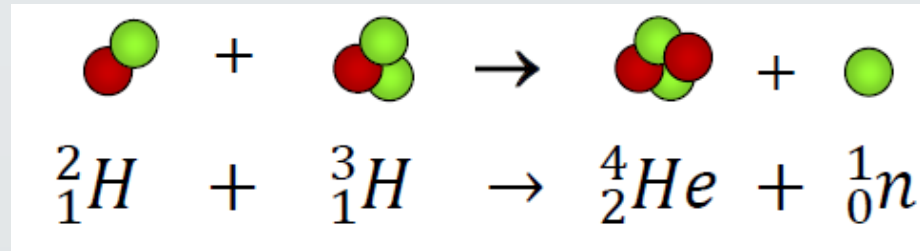


# 6- Réactions de fission et de fusion nucléaire

## La fusion nucléaire



Exemple de la fusion de 2 atomes d'Hydrogène



	${}^2_1H$	+	${}^3_1H$	$\rightarrow$	${}^4_2He$	+	${}^1_0n$
$E_{L/A} (MeV)$	1	+	2,8	$\rightarrow$	7		0
	$\times 2$		$\times 3$		$\times 4$		
$E_L (\Delta M)$	2		8,4		28		

Total avant = 10,4 MeV      après = 28 MeV

$\Delta E = 28 - 10,4 = 17,6 \text{ MeV libérés}$

# 6- Réactions de fission et de fusion nucléaire

## Attention QCM

Dans le cas où on ne donne pas les  $E_L/A$  mais les masses des atomes / particules, il faut **calculer le défaut de masse global**, puis utiliser la **loi d'équivalence-énergie** !



Exemple de la fusion des atomes d'Hydrogène :

Données (en u) :  $m(\text{deutérium}) = 2,0141$  //  $m(\text{tritium}) = 3,0160$  //  $m(\text{He}) = 4,0026$  //  $m(n) = 1,009$

	${}^2_1\text{H}$	+	${}^3_1\text{H}$	→	${}^4_2\text{He}$	+	${}^1_0\text{n}$
Masse (u)	2,0141		3,0160		4,0026		1,009
Masses totales (u)	5,0301				5,0116		
ΔM (u)	ΔM = 5,0301 – 5,0116 = 0,0185 u						
E libérée (MeV)	E(libérée) =931,5 x 0,0185 = <b>17,6 MeV</b>						

**Rappel :  $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$**

# 6- Réactions de fission et de fusion nucléaire

## Applications

### Fission :

- Bombe nucléaire
- Centrale nucléaire

*Explosives*

Bombe A



*Contrôlées*

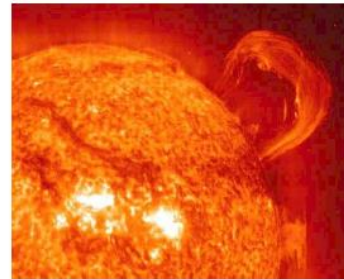
Centrale nucléaire



### Fusion :

- Naturellement au niveau du soleil
- Bombe Hydrogène
- Projet ITER pour produire de l'électricité

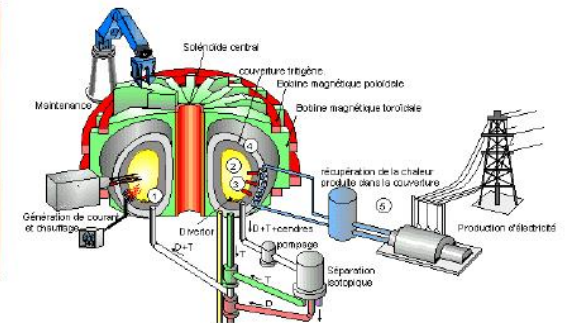
Soleil



Bombe H



ITER



International Thermonuclear Reactor

---

# FIN



*Hésitez pas à aller poser vos questions  
sur le forum !!*



# BIOPHYSIQUE ELITE

