

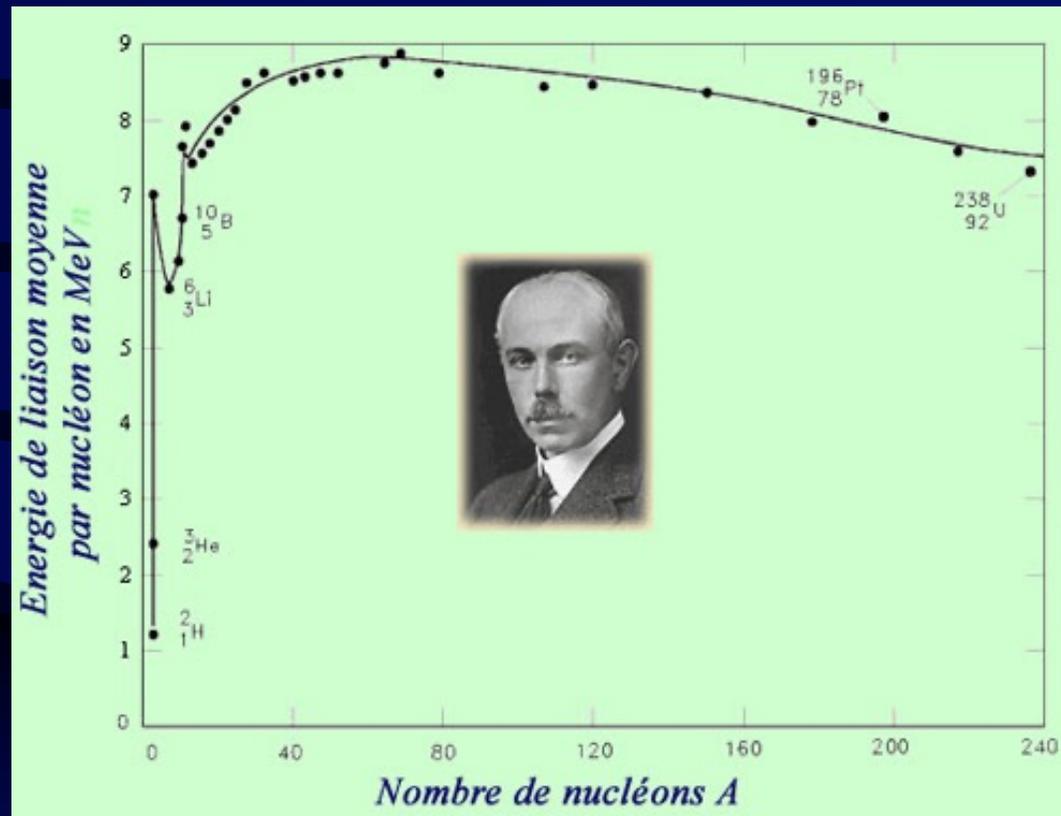
Fusion versus Fission

Christian Brisse

Albedo 38

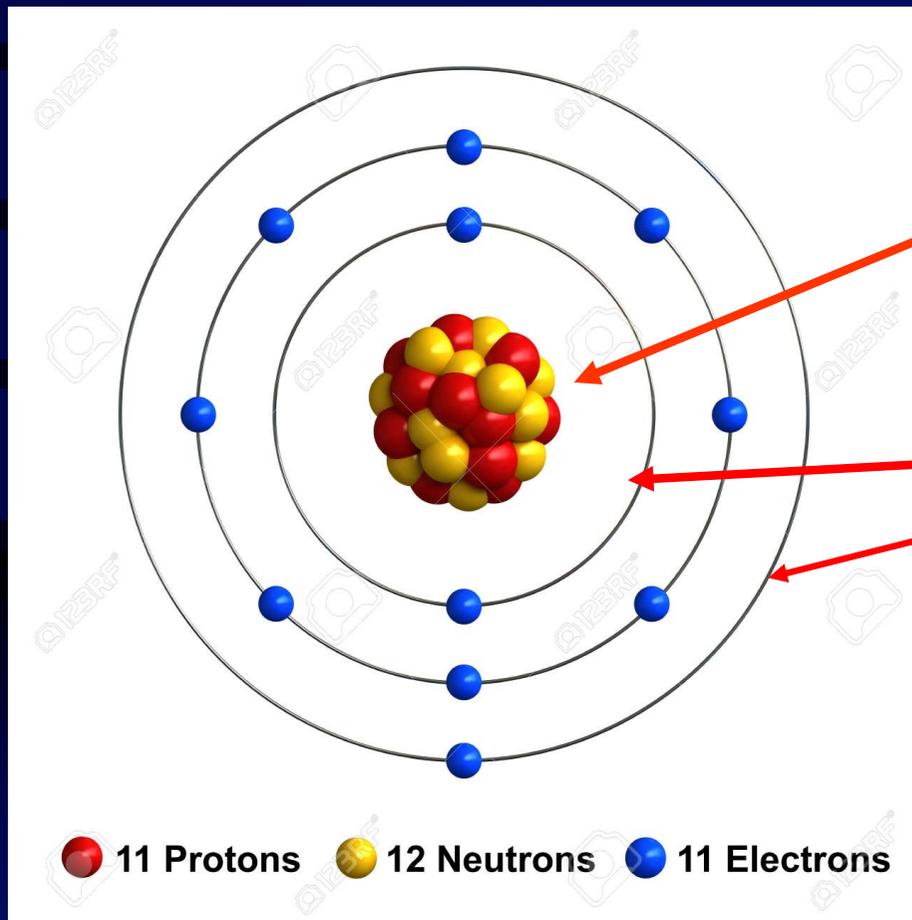
Nov 2022

Notre fil rouge: la courbe d'Aston



Rappel de la constitution de l'atome

exemple : l'atome de sodium Na



Noyau

Couches
électroniques

Le classement des éléments : le célèbre tableau périodique de Mendeleïev

Tableau périodique des éléments chimiques

Größe: 1 A 2 18
Période: 1 2 3 4 5 6 7

nom de l'élément (symbole, numéro atomique et état à 0°C et 101,3 kPa)
numéro atomique
symbole chimique
masse atomique relative (au 1/12 de l'atome de l'isotope le plus stable)
[CMAA] "Atomic Weights 2013" (nov. 2013)

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|----------------------------------|--|---------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|------------------------------|------------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|--|---------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|-----------------------------|--------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|
| 1 | 2 | | | | | | | | | | | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Hydrogène 1 H 1,00794 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | Helium 2 He 4,002602 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Lithium 3 Li 6,941 | Béryllium 4 Be 9,012182 | | | | | | | | | | | Bore 5 B 10,811 | Carbone 6 C 12,011 | Azote 7 N 14,0064 | Oxygène 8 O 15,9994 | Fluor 9 F 18,9984032 | Neon 10 Ne 20,1797 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Sodium 11 Na 22,98976928 | Magnésium 12 Mg 24,304 | | | | | | | | | | | Aluminium 13 Al 26,9815385 | Silicium 14 Si 28,0855 | Phosphore 15 P 30,973761998 | Soufre 16 S 32,065 | Chlore 17 Cl 35,453 | Argon 18 Ar 39,948 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Potassium 19 K 39,0983 | Calcium 20 Ca 40,078 | Scandium 21 Sc 44,955912 | Ti 47,867 | V 50,9415 | Cr 51,9961 | Manganèse 25 Mn 54,938044 | Fer 26 Fe 55,845 | Cobalt 27 Co 58,933194 | Nickel 28 Ni 58,6934 | Cuivre 29 Cu 63,546 | Zinc 30 Zn 65,38 | Gallium 31 Ga 69,723 | Germanium 32 Ge 72,630 | Arsenic 33 As 74,9216 | Sélénium 34 Se 78,9718 | Bromine 35 Br 79,904 | Krypton 36 Kr 83,798 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Rubidium 37 Rb 85,4678 | Strontium 38 Sr 87,62 | Yttrium 39 Y 88,90584 | Zirconium 40 Zr 91,224 | Niobium 41 Nb 92,90638 | Molybdène 42 Mo 95,94 | Technétium 43 Tc [98] | Ruthénium 44 Ru 101,07 | Rhodium 45 Rh 102,9055 | Palladium 46 Pd 106,42 | Argent 47 Ag 107,8682 | Cadmium 48 Cd 112,411 | Indium 49 In 114,818 | Étain 50 Sn 118,710 | Antimoine 51 Sb 121,760 | Tellure 52 Te 127,60 | Iode 53 I 126,90447 | Xénon 54 Xe 131,29 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Césium 55 Cs 132,905451962 | Baryum 56 Ba 137,327 | Lanthanides 57-71 | Hafnium 72 Hf 178,49 | Tantale 73 Ta 180,94788 | Tungstène 74 W 183,84 | Réhenium 75 Re 186,207 | Osmium 76 Os 190,23 | Iridium 77 Ir 192,222 | Platine 78 Pt 195,084 | Or 79 Au 196,966569 | Mercurie 80 Hg 200,592 | Thallium 81 Tl 204,3833 | Plomb 82 Pb 207,2 | Bismuth 83 Bi 208,9804 | Polonium 84 Po [209] | Astatoine 85 At [210] | Radon 86 Rn [222] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Francium 87 Fr [223] | Radium 88 Ra [226] | Actinides 89-103 | Réhenium 104 Rf [261] | Dubnium 105 Db [262] | Sébergium 106 Sg [266] | Berkélium 107 Bh [267] | Hassium 108 Hs [277] | Moscovium 109 Mc [288] | Darmstadtium 110 Ds [285] | Roentgenium 111 Rg [282] | Copernicium 112 Cn [285] | Nihonium 113 Nh [284] | Flerovium 114 Fl [289] | Moscovium 115 Mc [288] | Livermorium 116 Lv [293] | Tennessine 117 Ts [294] | Oganesson 118 Og [294] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <table border="1"> <tr> <td>Lanthane 57 La 138,9047</td> <td>Cérite 58 Ce 140,12</td> <td>Praseodyme 59 Pr 140,9076</td> <td>Néodyme 60 Nd 144,242</td> <td>Protactinium 61 Pa [231]</td> <td>Samarium 62 Sm 150,36</td> <td>Europium 63 Eu 151,964</td> <td>Gadolinium 64 Gd 157,25</td> <td>Terbium 65 Tb 158,92535</td> <td>Dyprosime 66 Dy 162,500</td> <td>Hoème 67 Ho 164,93032</td> <td>Érythreum 68 Er 167,259</td> <td>Thulium 69 Tm 168,93423</td> <td>Ytterbium 70 Yb 173,054</td> <td>Lutécium 71 Lu 174,967</td> </tr> <tr> <td>Actinium 89 Ac [227]</td> <td>Thorium 90 Th 232,0377</td> <td>Protactinium 91 Pa 231,036888</td> <td>Uranium 92 U 238,02891</td> <td>Néptunium 93 Np [237]</td> <td>Plutonium 94 Pu [244]</td> <td>Ameéricium 95 Am [243]</td> <td>Curium 96 Cm [247]</td> <td>Berkélium 97 Bk [247]</td> <td>Californium 98 Cf [251]</td> <td>Einsteinium 99 Es [252]</td> <td>Fermium 100 Fm [257]</td> <td>Mendelevium 101 Md [258]</td> <td>Noébohmium 102 No [259]</td> <td>Lanthanum 103 Lr [260]</td> </tr> </table> | | | | | | | | | | | | | | | | | | Lanthane 57 La 138,9047 | Cérite 58 Ce 140,12 | Praseodyme 59 Pr 140,9076 | Néodyme 60 Nd 144,242 | Protactinium 61 Pa [231] | Samarium 62 Sm 150,36 | Europium 63 Eu 151,964 | Gadolinium 64 Gd 157,25 | Terbium 65 Tb 158,92535 | Dyprosime 66 Dy 162,500 | Hoème 67 Ho 164,93032 | Érythreum 68 Er 167,259 | Thulium 69 Tm 168,93423 | Ytterbium 70 Yb 173,054 | Lutécium 71 Lu 174,967 | Actinium 89 Ac [227] | Thorium 90 Th 232,0377 | Protactinium 91 Pa 231,036888 | Uranium 92 U 238,02891 | Néptunium 93 Np [237] | Plutonium 94 Pu [244] | Ameéricium 95 Am [243] | Curium 96 Cm [247] | Berkélium 97 Bk [247] | Californium 98 Cf [251] | Einsteinium 99 Es [252] | Fermium 100 Fm [257] | Mendelevium 101 Md [258] | Noébohmium 102 No [259] | Lanthanum 103 Lr [260] |
| Lanthane 57 La 138,9047 | Cérite 58 Ce 140,12 | Praseodyme 59 Pr 140,9076 | Néodyme 60 Nd 144,242 | Protactinium 61 Pa [231] | Samarium 62 Sm 150,36 | Europium 63 Eu 151,964 | Gadolinium 64 Gd 157,25 | Terbium 65 Tb 158,92535 | Dyprosime 66 Dy 162,500 | Hoème 67 Ho 164,93032 | Érythreum 68 Er 167,259 | Thulium 69 Tm 168,93423 | Ytterbium 70 Yb 173,054 | Lutécium 71 Lu 174,967 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Actinium 89 Ac [227] | Thorium 90 Th 232,0377 | Protactinium 91 Pa 231,036888 | Uranium 92 U 238,02891 | Néptunium 93 Np [237] | Plutonium 94 Pu [244] | Ameéricium 95 Am [243] | Curium 96 Cm [247] | Berkélium 97 Bk [247] | Californium 98 Cf [251] | Einsteinium 99 Es [252] | Fermium 100 Fm [257] | Mendelevium 101 Md [258] | Noébohmium 102 No [259] | Lanthanum 103 Lr [260] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <p>Métaux: Alcalins, Alcalino-terreux, Lanthanides, Actinides, Métaux de transition, Métaux pauvres, Métaux lourds, Actinides non-métaux, Halogènes, Gaz nobles, Non classés.</p> <p>primordial, synthétique, découverte récente</p> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Les éléments sont classés par nombre de protons croissant 5

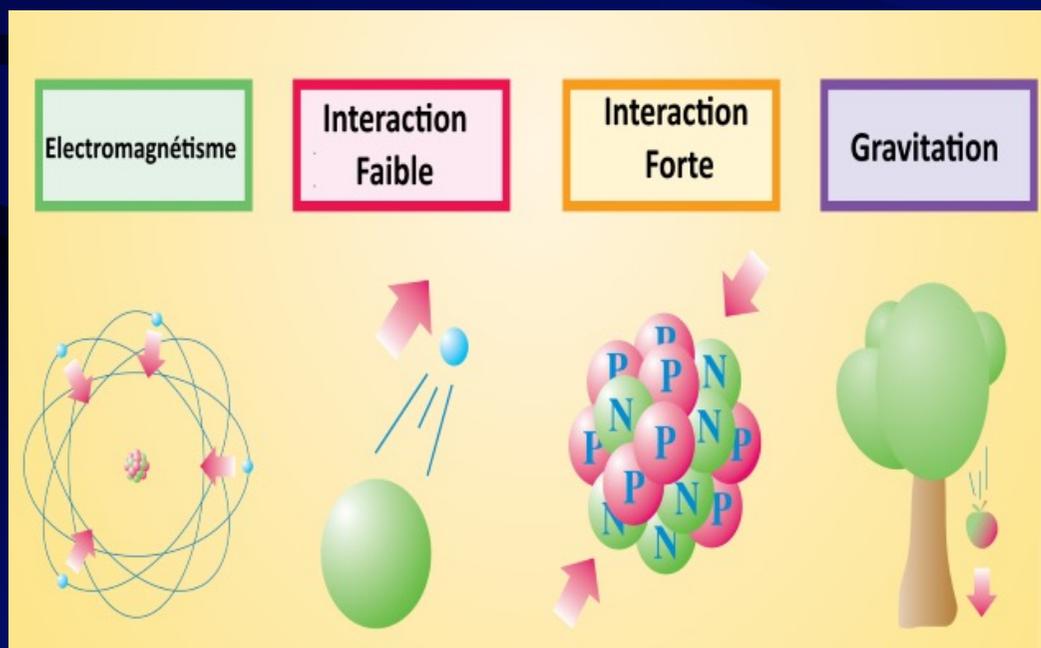
Les 4 forces fondamentales de la physique

- 1 - La Force Nucléaire Forte
- 2 - La Force Nucléaire Faible
- 3 - La Force Electromagnétique

Régit le monde de l'atome

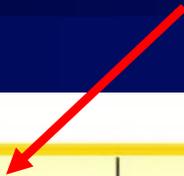
- 4 - La Force Gravitationnelle

Régit l'Univers



Les 4 forces ne sont pas identiques

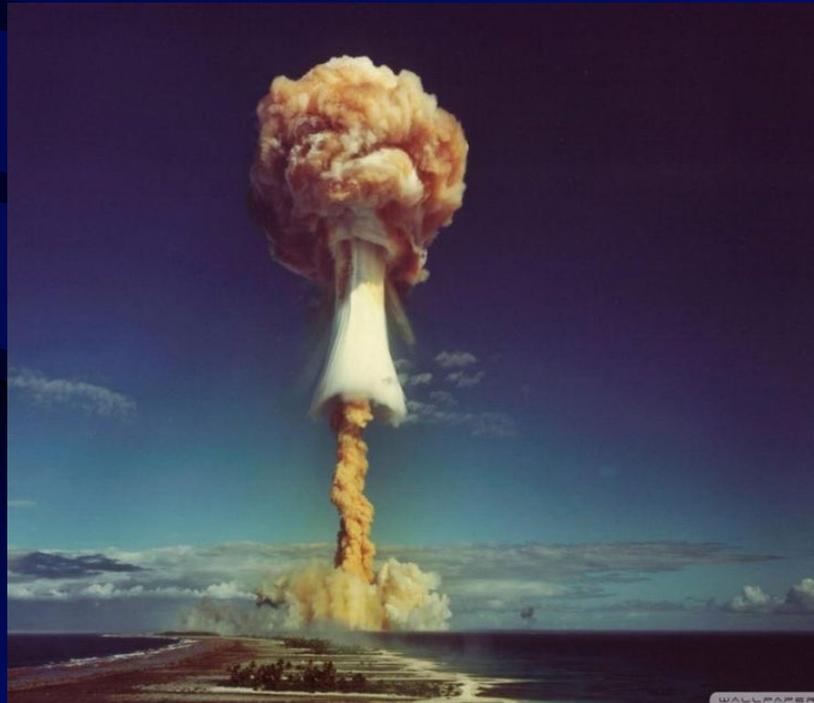
Vecteur= Boson



| FORCE | EXEMPLE | VECTEUR | PORTEE | INTENSITE [*] |
|-------------------|--------------------------|----------|--|------------------------|
| électromagnétique | atome, chimie | photon | infinie | 10^{-2} |
| faible | radioactivité, soleil | W and Z | très courte ($\sim 10^{-2}$ fermi) | 10^{-14} |
| forte | nucéaire | gluon | très courte (~ 1 fermi) | 1 |
| gravitationnelle | univers | graviton | infinie | 10^{-38} |

Une grande loi de Conservation du monde atomique: Equivalence Masse/Energie

$$\text{Einstein} \implies E = mc^2$$



Défaut de Masse

La Masse d'un système constitué d'éléments liés est toujours plus faible que la somme des masses des constituants pris séparément

**Exemple : défaut de masse dû à l'énergie gravitationnelle
le système Terre - Lune**

Masse de la Terre $M_T = 5,97 \cdot 10^{24}$ kg

Masse de la Lune $M_L = 0,0734 \cdot 10^{24}$ kg

Masse du système lié Terre-Lune =

$M_T + M_L - \text{énergie gravitationnelle}$

\implies d'où défaut de Masse = énergie gravitationnelle liant les deux corps = 10^{12} kg soit # 10^{-13} des masses ce qui est très faible.



Définition de l'unité de masse atomique (u.m.a)

Dans le monde subatomique les masses sont exprimées en u.m.a

$$1 \text{ u.m.a} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

Soit à peu près la masse du Proton ou du Neutron

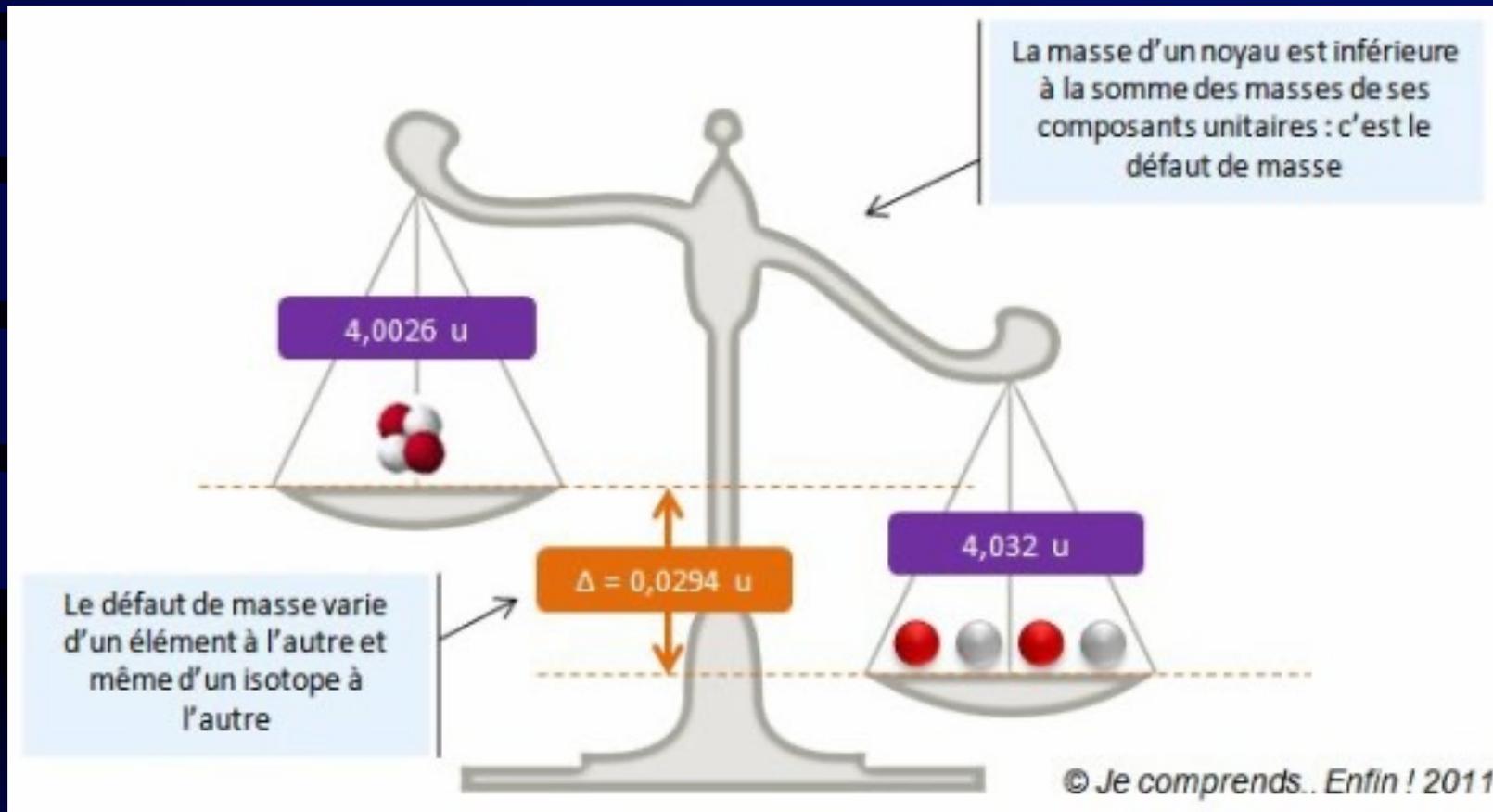
$$\text{Masse du proton} = 1,0073 \text{ uma}$$

$$\text{Masse du Neutron} = 1,0087 \text{ uma}$$

et le 1/12 éme de la masse du noyau du carbone C12

Soit encore 931,5 Mev (en équivalent électronvolt
d'après la relation d'Einstein $E = mc^2$)

Au niveau subatomique le défaut de masse est plus grand

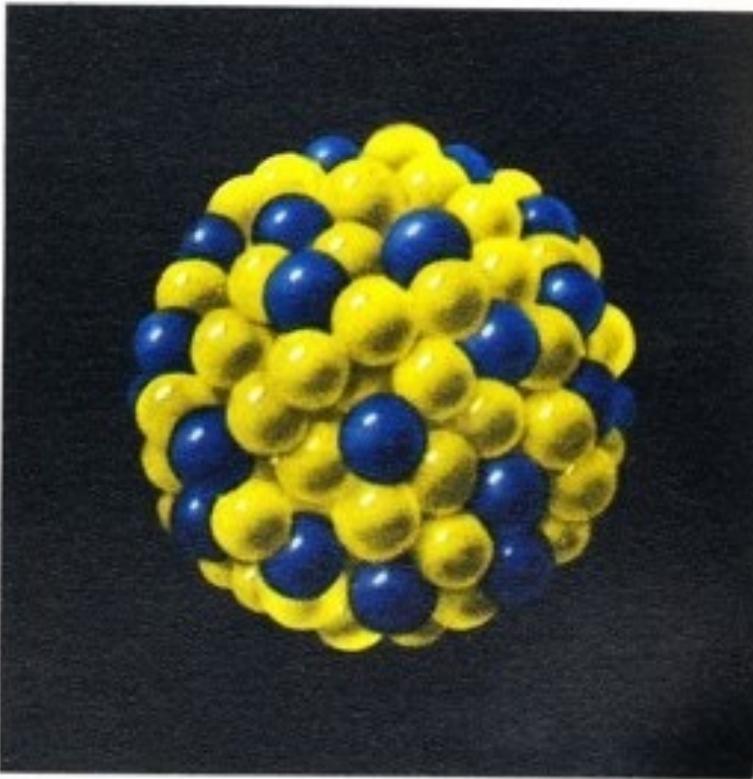


Exemple: Hélium 4

Pour l'Hélium 4 le défaut de masse dû à la liaison des nucléons est de l'ordre $0,0294/4 = 0,7 \%$ soit environ 7 Mev par nucléon.

Défaut de masse du noyau de l'U 238

Noyau d'uranium 238 :
92 protons, 146 neutrons



Masse de l'U238 = 238,05 uma
Masse des constituants
pris individuellement = 239,98 uma

D'où différence = 1,93 uma
représentant 0,8 % par nucléon
Soit 7,6 Mev par nucléon

*C'est équivalent à une perte de
2 nucléons sur 238*

Qu'en est-il pour les autres éléments ?

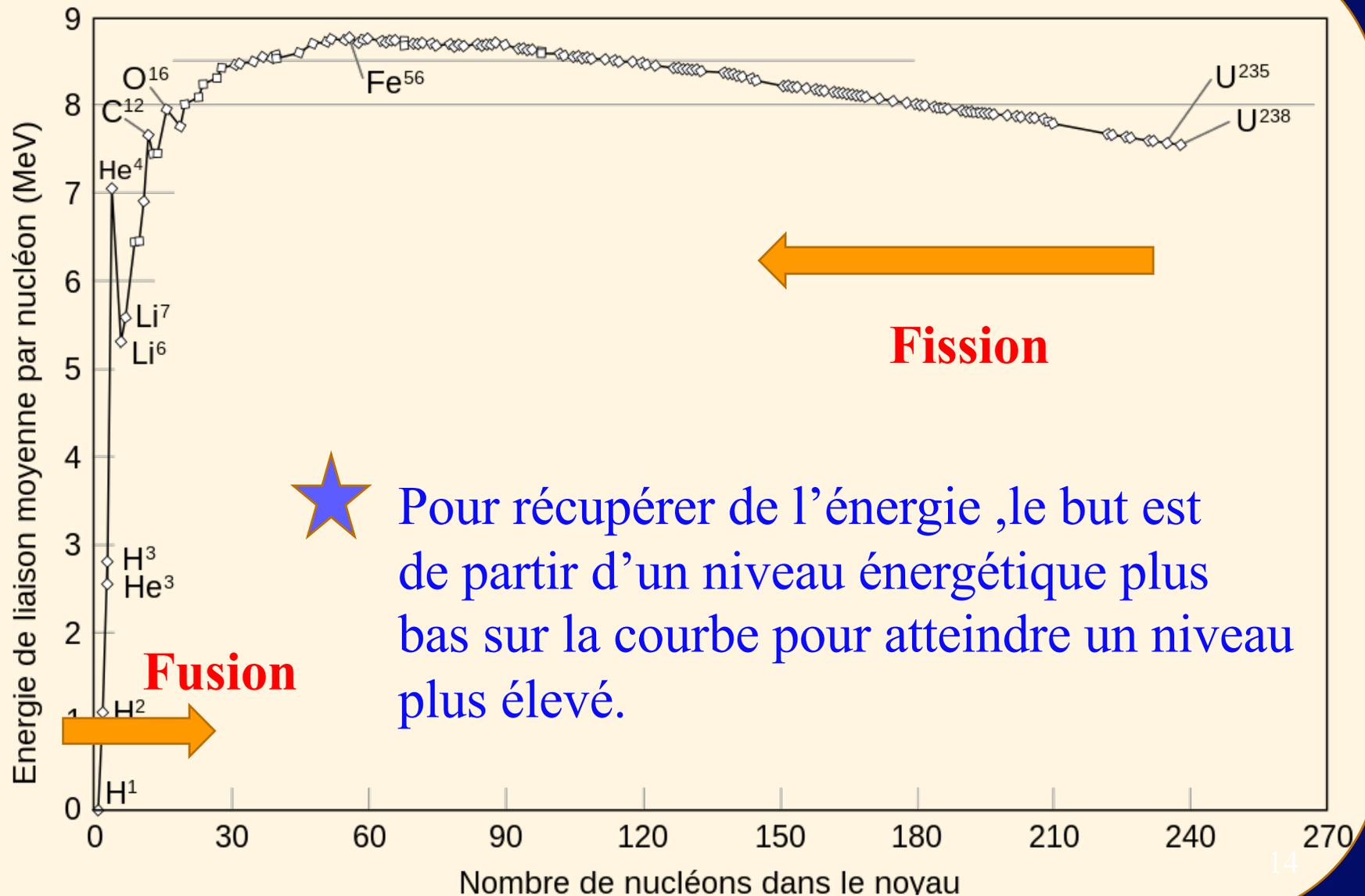
Le calcul du défaut de masse a été effectué pour chaque élément du Tableau de Mendeleiev

On a vu que pour U 238 on perdait l'équivalent de 2 nucléons.

Pour le carbone 12 on ne peut pas perdre 2 nucléons mais ce qui importe c'est la perte relative ramenée au nucléon

La courbe d'Aston donne pour chaque élément le défaut de masse par nucléon.

La courbe d'Aston



La position particulière du Fer sur la courbe d'Aston

Au vu de la courbe d'Aston:

- On pourrait théoriquement fusionner jusqu'au Fer (éléments plus légers que le Fer): cas des étoiles
- On pourrait théoriquement (mais pas pratiquement) fissionner jusqu'au Fer

Dans les deux cas le Fer est l'étape ultime de la stabilité nucléaire. Toute réaction à partir du Fer ne peut que consommer de l'énergie et non pas en produire.

D'où son importance dans l'évolution des étoiles et dans la constitution du noyau terrestre

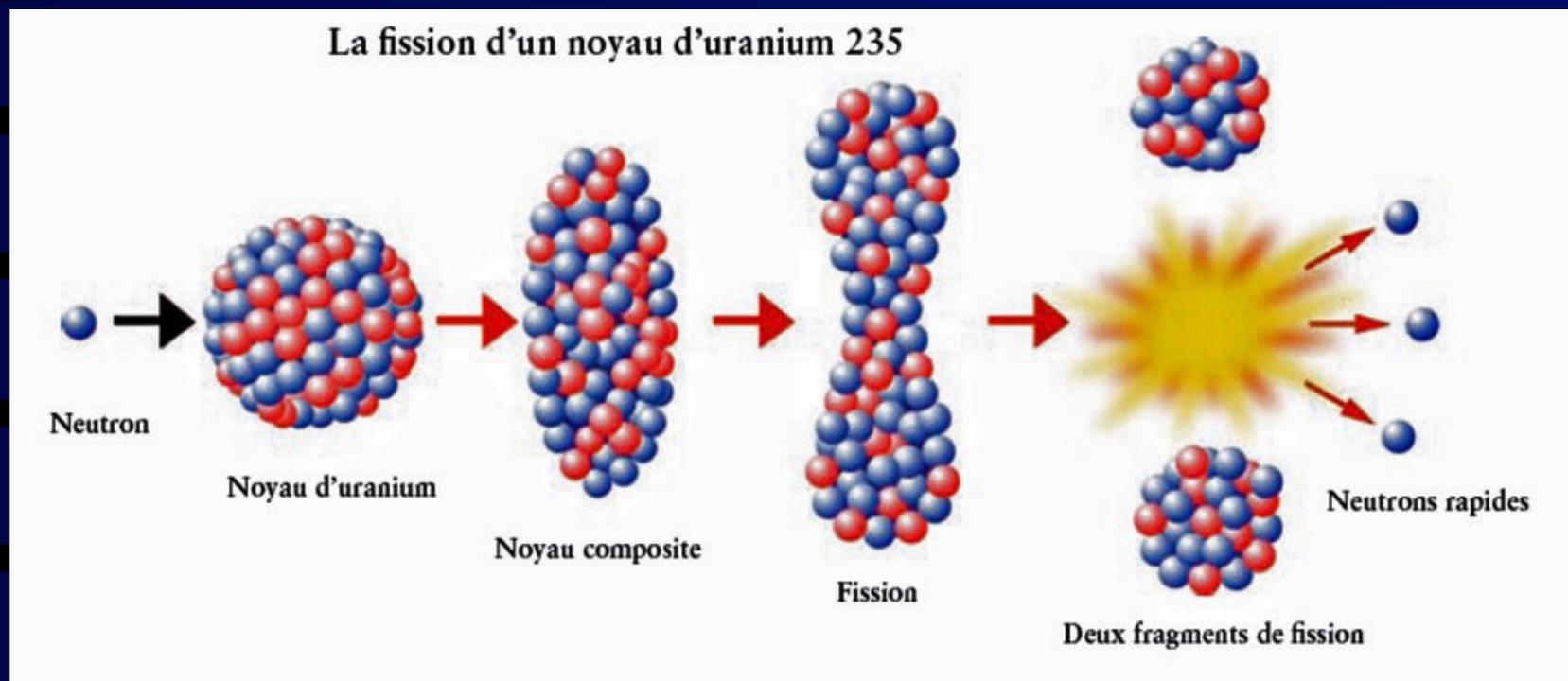
Composition chimique de l'Univers

| Nombre atomique | Élément | Fraction de masse en pourcentage | | Fraction de masse en partie par million |
|-----------------|-----------|----------------------------------|--------|---|
| 1 | Hydrogène | 73,9 % | 739000 |  |
| 2 | Hélium | 24 % | 240000 |  |
| 8 | Oxygène | 1 % | 10400 |  |
| 6 | Carbone | 0,5 % | 4600 |  |
| 10 | Néon | 0,1 % | 1340 |  |
| 26 | Fer | 0,1 % | 1090 |  |
| 7 | Azote | 0,1 % | 960 |  |
| 14 | Silicium | 0,07 % | 650 |  |
| 12 | Magnésium | 0,06 % | 580 |  |
| 16 | Soufre | 0,04 % | 440 |  |

D'où l'importance du Fer que l'on retrouve dans le noyau terrestre :

Champ Magnétique (protection de la terre, migrations animales...)

La Fission



Trois noyaux fissibles :

U235 : élément naturel (0,7% dans la nature)

Pu 239 : élément artificiel obtenu à partir de l'U238 (fertile)

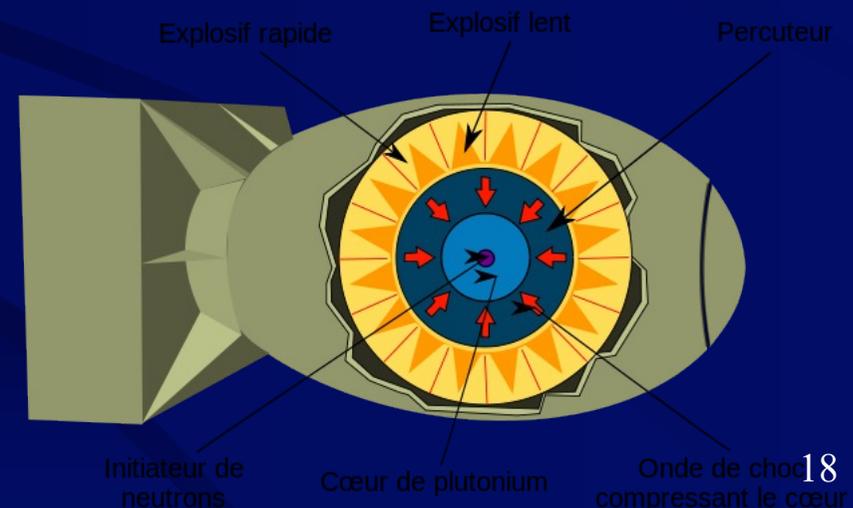
U233 : obtenu à partir du Thorium (fertile) (filère non-exploitée)

Mise en œuvre de la Fission

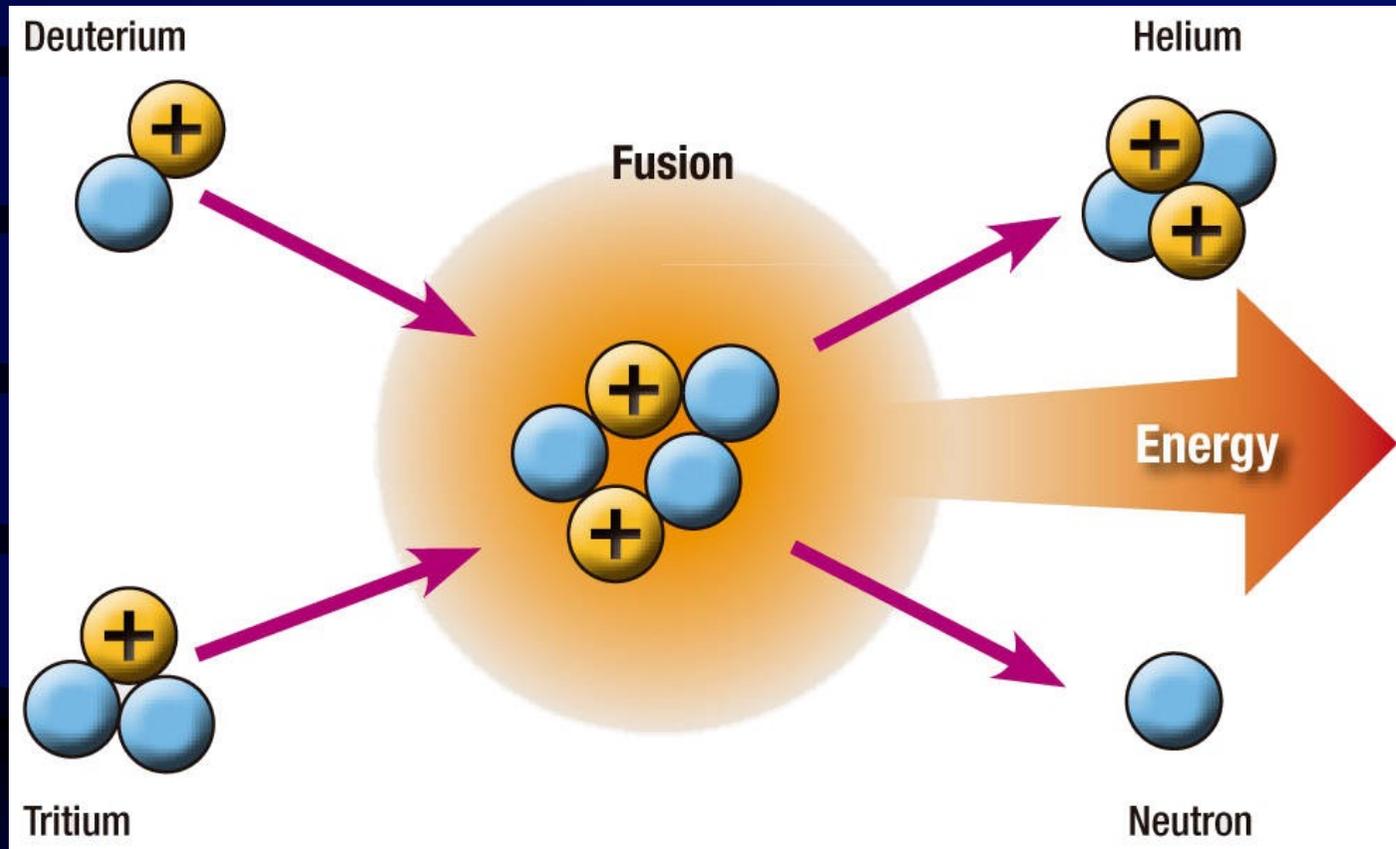
- De façon naturelle : Oklo au Gabon (2 milliards d'années)



- De façon artificielle par l'homme : réacteurs nucléaires et bombes



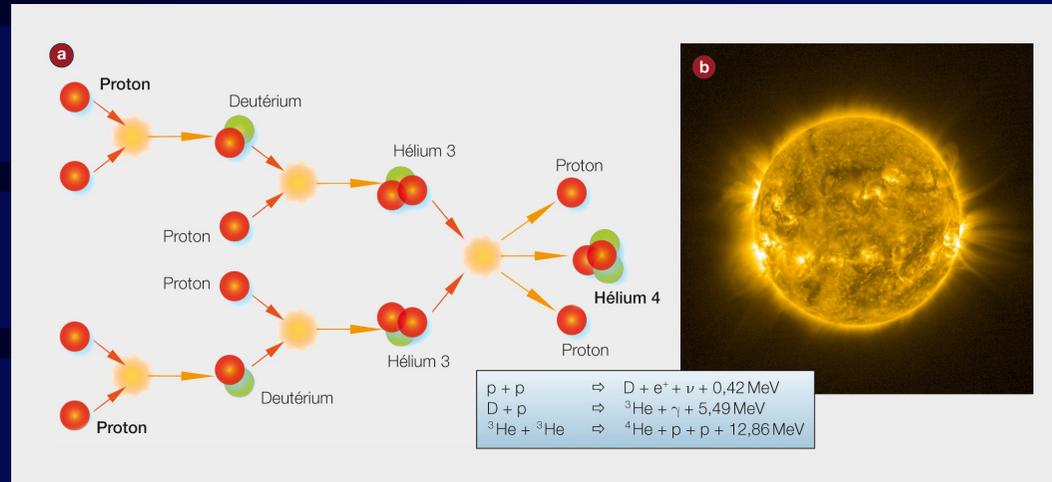
La Fusion



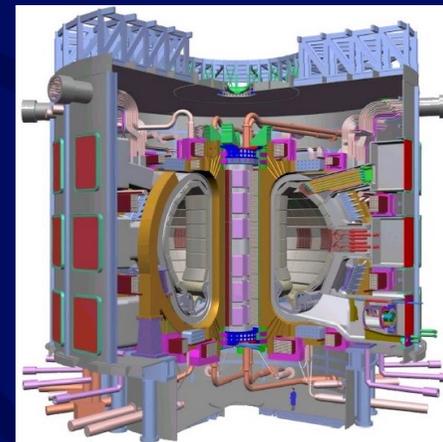
Exemple d'une réaction de fusion

Mise en œuvre de la Fusion

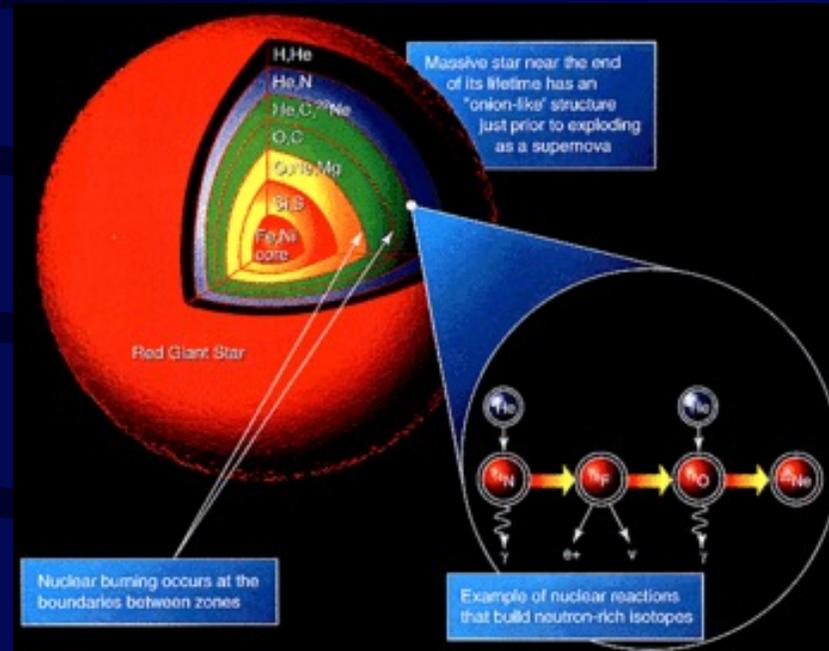
- De façon naturelle: les étoiles en général dont le Soleil



- -De façon artificielle par l'homme : projet ITER (Cadarache)



La Fusion et la vie des étoiles



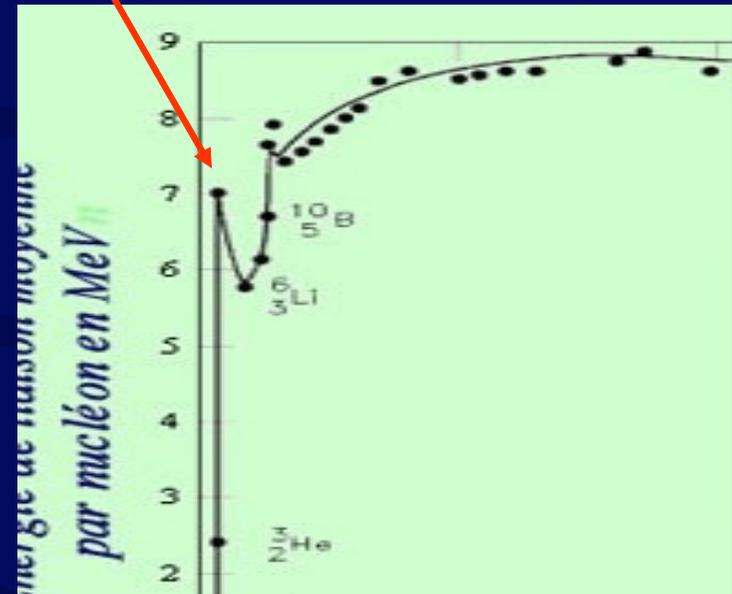
==> Nucléosynthèse des éléments chimiques

Le cas particulier de l'Hélium 4

L'évolution a failli s'arrêter !

- grande stabilité du Noyau He 4
- la fusion par rapprochement de 2 noyaux d'Hélium ne peut pas se faire.
- Mais "*miraculeusement*" un niveau excité du C12 correspond exactement à l'arrivée d'un troisième Hélium qui rend possible la fusion en C12 donc potentiellement la vie .

Position Hélium 4



**Je vous remercie
pour votre attention**