

Structure de la matière

- Du macroscopique à l'élémentaire
- Structure d'un atome et classification périodique
- Les 4 états de la matière
- Les forces/interactions fondamentales
- Le « modèle standard »

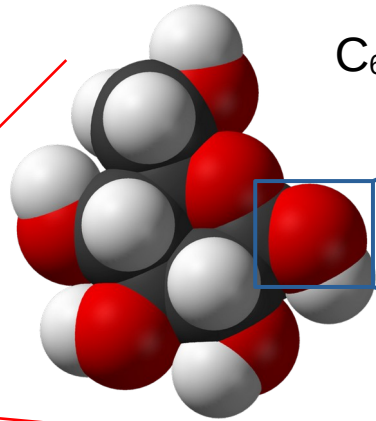
Notions utilisées :

1. Introduction

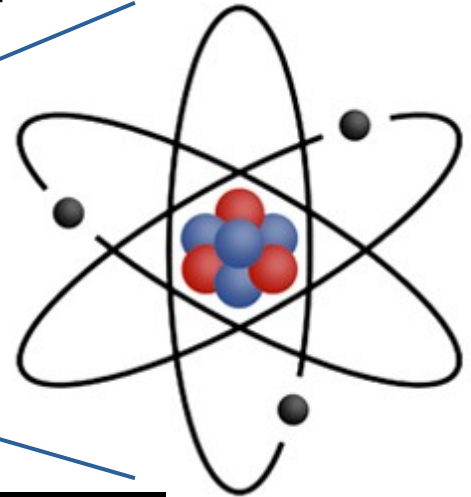
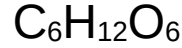
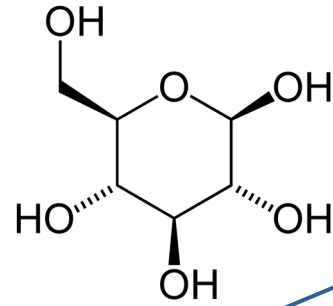
De la cellule à l'atome



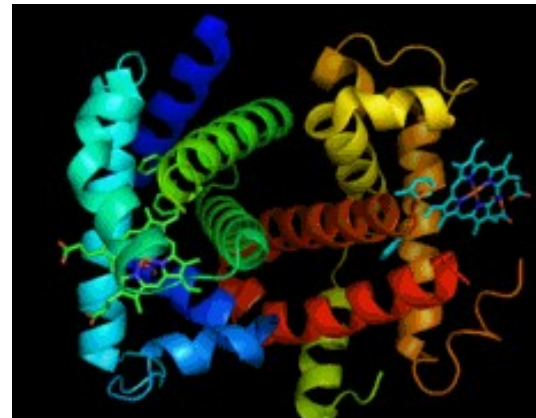
Cellule animale
(Russell Kightley)
 10^{-5} m



Molécule de glucose
 $\sim 10^{-9}$ m

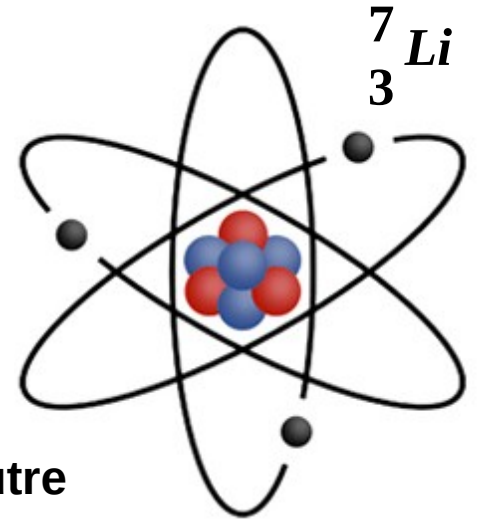


Atome
(CNRS)
 $\sim 10^{-10}$ m



Molécule d'hémoglobine

Structure de l'atome (1)



Atome de lithium

$$e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$$

- Un atome contient un **noyau (+)** et des **électrons (-)**
- Un noyau est caractérisé par 2 nombres :
 - **Z = nombre de protons** ($q=+e$) = nature de l'atome
 - **Egal au nombre d'électrons** ($q=-e$) – atome **électriquement neutre**
 - Exemple : l'atome d'oxygène a 8 protons (et 8 électrons)
 - **N = nombre de neutrons** ($q=0$)
 - Peut varier à Z constant : différence des « isotopes »
(Atomes avec le même Z mais des N différents)
 - **A = nombre de masse = Z + N**
 - Nombre de **nucléons** (protons + neutrons)
 - Permet de nommer les isotopes
 - carbone ($Z=6$) 12, 13 et 14
 - uranium ($Z=92$) 235 et 238

| | | | | | | |
|---|---------------|--------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | | | A Z | 16 8 O | 17 8 O | 18 8 O |
| éléments ↑ nombre de protons Z | 13 7 N | 14 7 N | 15 7 N | | | |
| | 12 6 C | 13 6 C | 14 6 C | | | |
| | $A - Z$ | nombre de neutrons | | | → | |
| | | isotopes (sosies) | | | | |

Les ions

Un « **ion** » est un atome ou une molécule qui perd ou gagne un ou plusieurs électrons

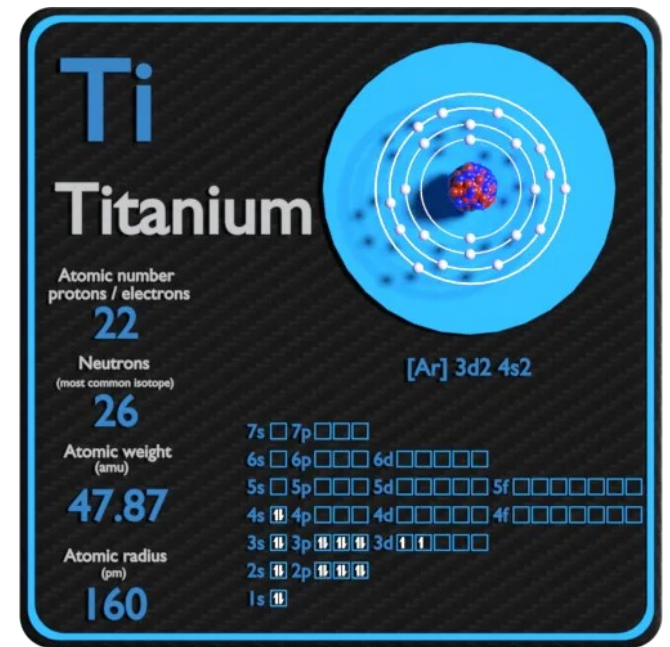
- N'est **plus électriquement neutre**
- **Cation** (+) / **anion** (-)
- Exemple :
 - Na^+ , Mg^{2+}
 - Cl^- , SO_4^{2-}

Convient pour la préparation des aliments des nourrissons

| Analyse (mg/l) | | | |
|--------------------------------|-------|--|-------|
| Calcium (Ca^{2+}) | : 0,8 | Hydrogénocarbonates (HCO_3^-) | : 3,6 |
| Sodium (Na^+) | : 6,7 | Sulfates (SO_4^{2-}) | : 2,0 |
| Magnésium (Mg^{2+}) | : 1,0 | Chlorures (Cl^-) | : 14 |
| Potassium (K^+) | : 0,2 | Nitrates (NO_3^-) | : 1,6 |

Extrait sec à 180°C : 40mg/l - pH : 5
Production de la Source des Montagnes d'Arrée
Source des MONTAGNES D'ARRÉE - ZA de Ty Douar - 29450 COMMANA

Structure de l'atome (2)



- Les **électrons** orbitent autour du **noyau**, organisés en « **couches** »
 - Couche 1 (« K ») : 2 électrons
 - Couche 2 (« L ») : 8 électrons
 - Couche 3 (« M ») : 8 électrons (+10)
 - ...
- Éléments classés dans une « **table périodique des éléments** »
 - Formalisée par Dmitri Mendeleïev en 1869 à **partir des propriétés chimiques** (la place représente la configuration électronique)
 - La légende veut que la table lui soit apparue en rêve (2 fois...)
 - A permis de **prédire l'existence d'éléments encore inconnus** : scandium (Z=21), gallium (Z=31), germanium (Z=32)...

Tableau périodique des éléments chimiques

- Approximation : n° de ligne = nb de couches

(En réalité, les couches ne se remplissent pas dans l'ordre, on commence la 4 avant d'avoir fini la 3, etc...)

- n° de la colonne = nb d'électrons sur la couche externe (propriétés chimiques d'un atome liées au nombre d'électrons de sa couche externe)

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|-------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|
| 1 | Hydrogène 1 H 1,00795 | | | | | | | | | | | II B | III B | IV B | V B | VI B | VII B | Hélium 2 He 4,002602 |
| 2 | Lithium 3 Li 6,9395 | Béryllium 4 Be 9,0121831 | | | | | | | | | | | Bore 5 B 10,8135 | Carbone 6 C 12,0106 | Azote 7 N 14,006855 | Oxygène 8 O 15,99940 | Fluor 9 F 18,99840316 | Néon 10 Ne 20,1797 (6) |
| 3 | Sodium 11 Na 22,98976928 | Magnésium 12 Mg 24,3055 | III A | IV A | V A | VI A | VII A | VII | | | I B | II B | Aluminium 13 Al 26,9815385 | Silicium 14 Si 28,085 (1) | Phosphore 15 P 30,97376209 | Soufre 16 S 32,0675 | Chlore 17 Cl 35,4515 | Argon 18 Ar 39,948 (1) |
| 4 | Potassium 19 K 39,0983 (1) | Calcium 20 Ca 40,078 (4) | Scandium 21 Sc 44,955908 (5) | Titane 22 Ti 47,867 (1) | Vanadium 23 V 50,9415 (1) | Chrome 24 Cr 51,9961 (6) | Manganèse 25 Mn 54,938044 | Fer 26 Fe 55,845 (2) | Cobalt 27 Co 58,933194 | Nickel 28 Ni 58,6934 (4) | Cuivre 29 Cu 63,546 (3) | Zinc 30 Zn 65,38 (2) | Gallium 31 Ga 69,723 (1) | Germanium 32 Ge 72,630 (8) | Arsenic 33 As 74,921595 | Sélénium 34 Se 78,971 (8) | Brome 35 Br 79,904 | Krypton 36 Kr 83,798 (2) |
| 5 | Rubidium 37 Rb 85,4678 (3) | Strontium 38 Sr 87,62 (1) | Yttrium 39 Y 88,90584 | Zirconium 40 Zr 91,224 (2) | Niobium 41 Nb 92,90637 | Molybdène 42 Mo 95,95 (1) | Technétium 43 Tc [98] | Ruthénium 44 Ru 101,07 (2) | Rhodium 45 Rh 102,90550 | Palladium 46 Pd 106,42 (1) | Argent 47 Ag 107,8682 (2) | Cadmium 48 Cd 112,414 (4) | Indium 49 In 114,818 (1) | Étain 50 Sn 118,710 (7) | Antimoine 51 Sb 121,760 (1) | Tellure 52 Te 127,60 (3) | Iode 53 I 126,90447 | Xénon 54 Xe 131,293 (6) |
| 6 | Césium 55 Cs 132,905452 | Baryum 56 Ba 137,327 (7) | Lanthanides 57-71 | Hafnium 72 Hf 178,49 (2) | Tantale 73 Ta 180,94788 | Tungstène 74 W 183,84 (1) | Rhénium 75 Re 186,207 (1) | Osmium 76 Os 190,23 (3) | Iridium 77 Ir 192,217 (3) | Platine 78 Pt 195,084 (9) | Or 79 Au 196,966569 | Mercur 80 Hg 200,592 (3) | Thallium 81 Tl 204,3835 | Plomb 82 Pb 207,2 (1) | Bismuth 83 Bi 208,98040 | Polonium 84 Po [209] | Astato 85 At [210] | Radon 86 Rn [222] |
| 7 | Francium 87 Fr [223] | Radium 88 Ra [226] | Actinides 89-103 | Rutherfordium 104 Rf [267] | Dubnium 105 Db [268] | Seaborgium 106 Sg [269] | Bohrium 107 Bh [270] | Hassium 108 Hs [277] | Meitnérium 109 Mt [278] | Darmstadtium 110 Ds [281] | Roentgenium 111 Rg [282] | Copernicium 112 Cn [285] | Nihonium 113 Nh [286] | Flerovium 114 Fl [289] | Moscovium 115 Mc [289] | Livermorium 116 Lv [293] | Tennessee 117 Ts [294] | Oganesson 118 Og [294] |

- nom de l'élément (gaz, liquide ou solide à 0°C et 101,3 kPa)
- numéro atomique
- symbole chimique
- masse atomique relative [ou celle de l'isotope le plus stable]
- [CIAAW "Atomic Weights 2013" + rev. 2015]

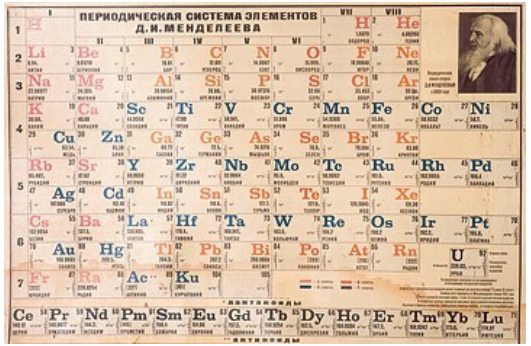
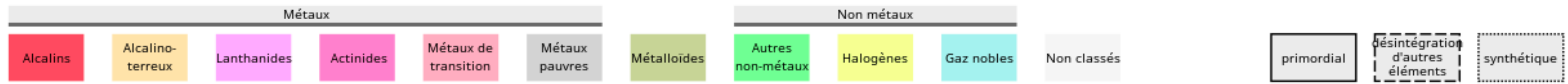


Table originale



Les **liaisons** entre atomes

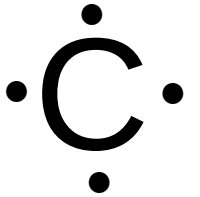
- **Règle de l'octet** : un atome « aime » avoir **8 électrons** sur sa couche externe (de **valence**)



- Détermine ses propriétés chimiques

- Sauf 1ère ligne de la table périodique : H, He

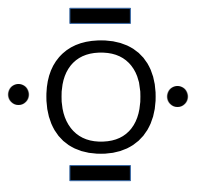
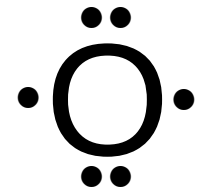
- 2 électrons (règle du « duet »)



- Electrons propres : électrons de « valence »

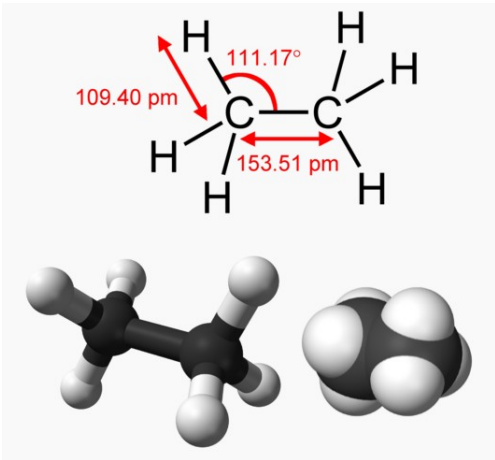
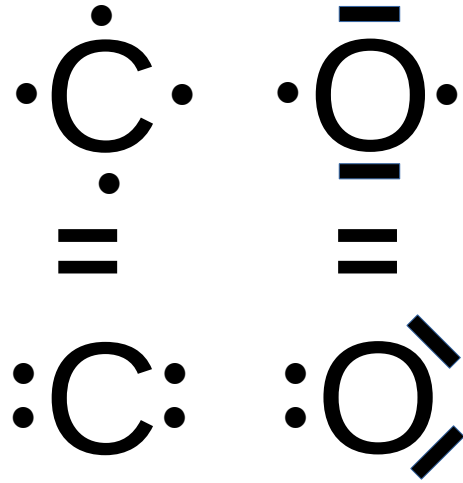
- ou partagés : **liaisons « covalentes »**

= mise en commun d'électrons

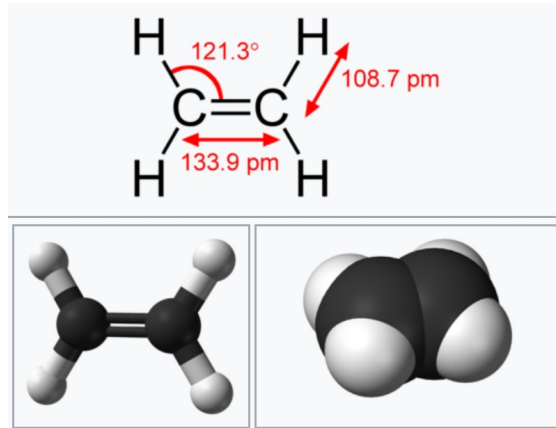


Les molécules

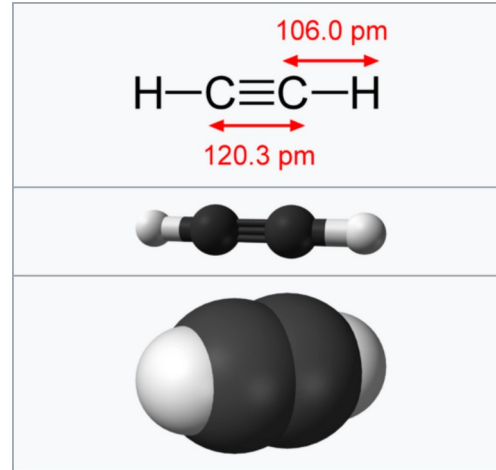
- Assemblages d'atomes liés par des **liaisons covalentes (simples, doubles ou triples)**
- Exemple : le carbone (4 électrons de valence)



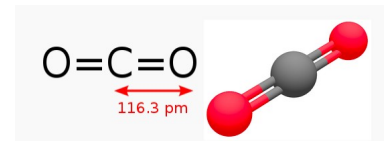
éthane



éthène (éthylène)



éthyne (acétylène)



dioxyde de carbone

Les 4 états de la matière (1)

- **L'état solide**

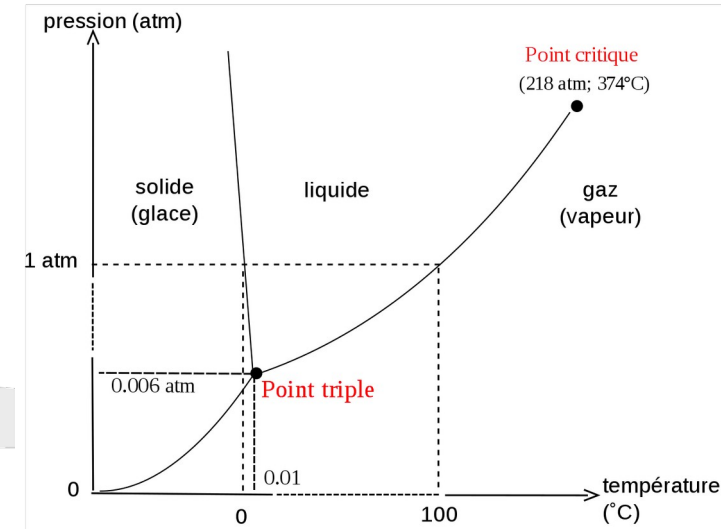
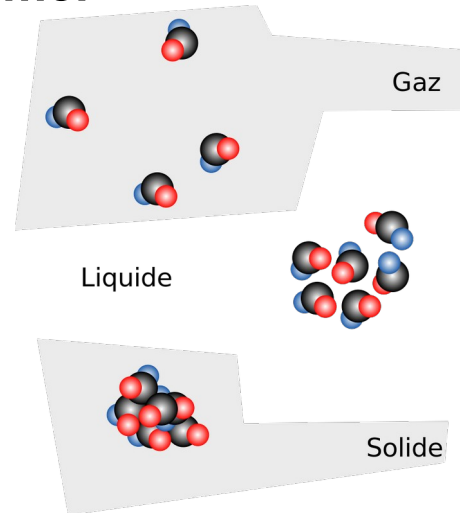
- A une **forme propre** et un **volume propre**
- **Transmet les forces sans se déformer**

- **L'état liquide**

- **Pas de forme propre/déformable**
- **Transmet les pressions**
- Les particules restent proches

- **L'état gazeux**

- **ni forme propre, ni volume propre**
 - **tend à occuper tout le volume disponible**
- Les particules sont très faiblement liées

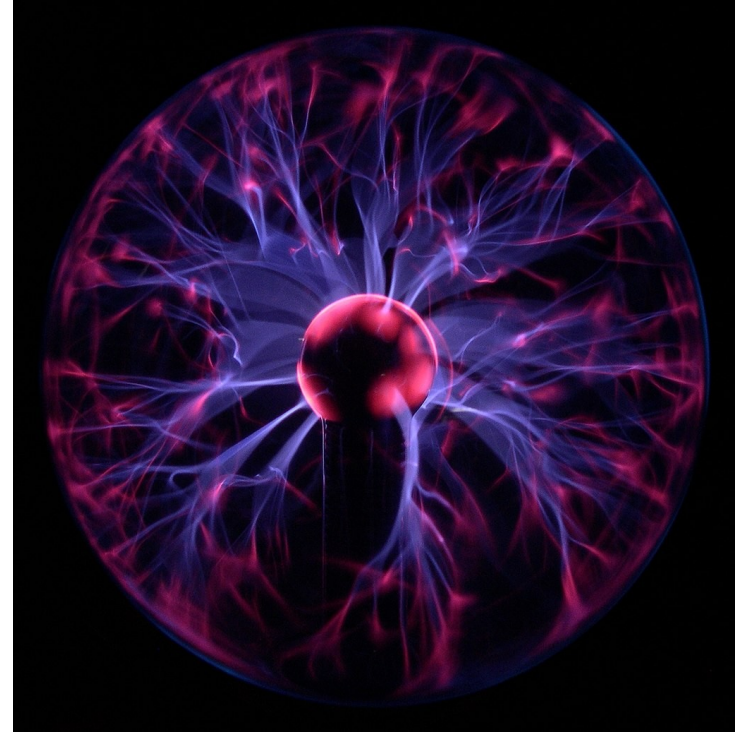


Les 4 états de la matière (2)

Les plasmas représentent **plus de 99 % de la matière ordinaire** dans l'Univers

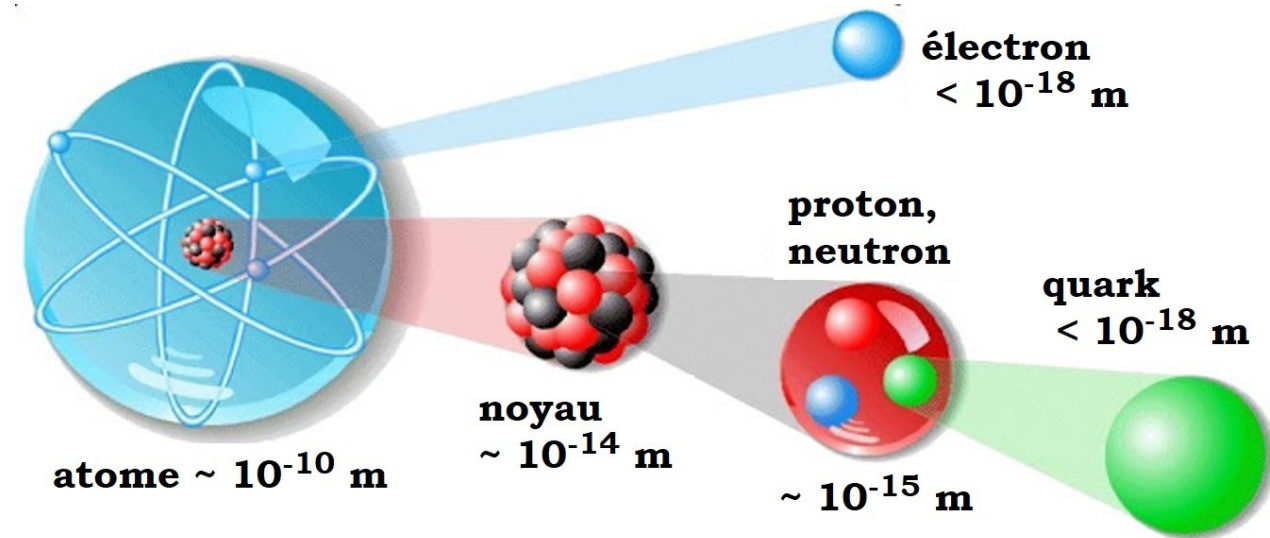
Exemple :

Plasma d'électrons et d'ions
(gaz ionisé conducteur)



« Lampe à plasma »

De l'atome aux particules élémentaires



$$m_e = 9,109 \times 10^{-31} \text{ kg}$$

$$m_P \approx m_N = 1,67 \times 10^{-27} \text{ kg} \approx 1840.m_e$$

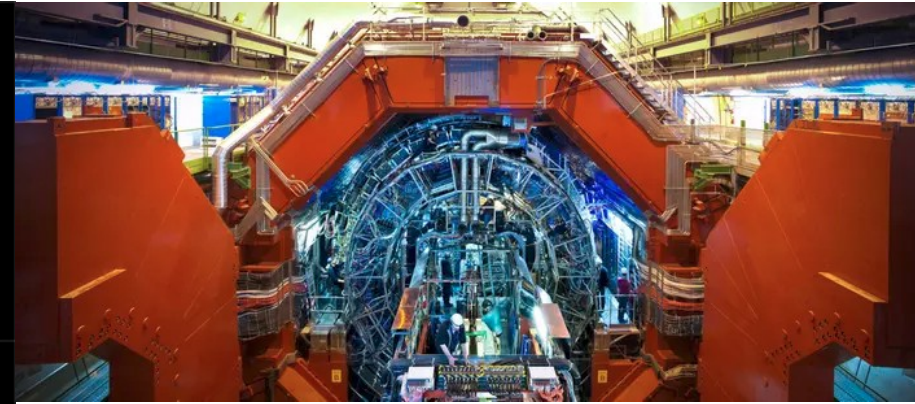
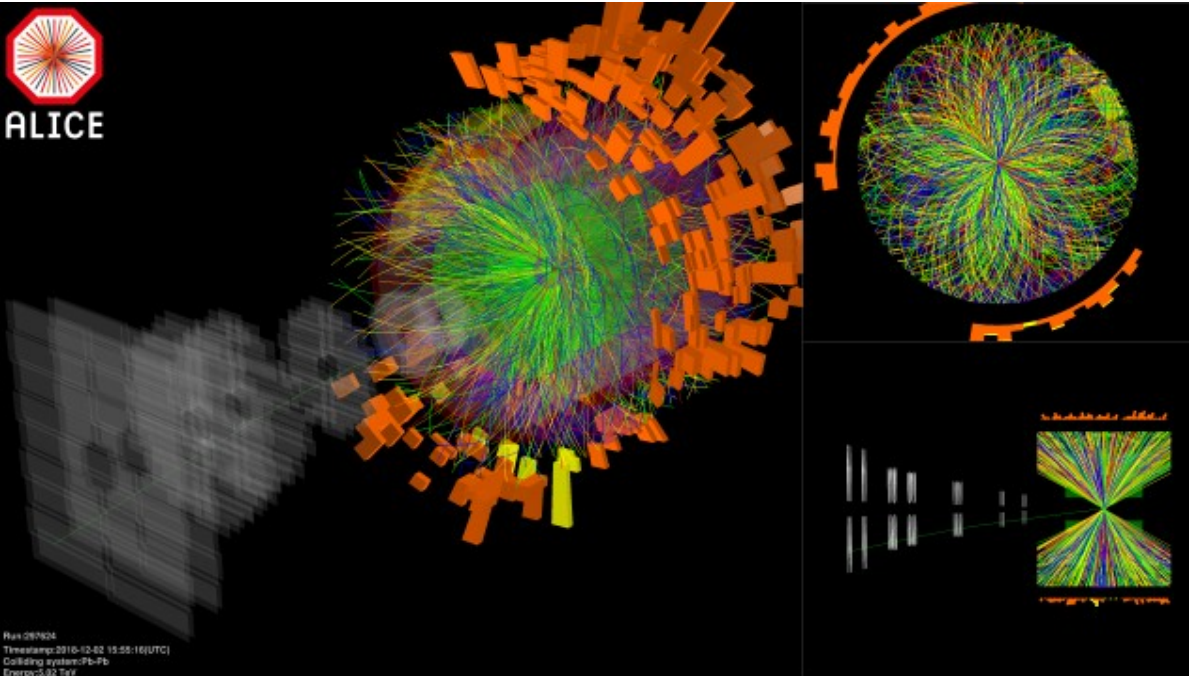
- 99,98 % de la masse de l'atome de lithium sont dans le noyau
- Attention, on ne peut pas dire que 99,9 % de la matière sont vides...
- **Quarks et électrons = particules « élémentaires »**
 - indivisibles
 - de taille inconnue

Les 4 états de la matière (3)

Le plasma de quarks et de gluons

Les quarks et les gluons ne sont plus confinés dans des noyaux

À très haute énergie/température : 10^{12} K, soit 10^5 fois la T_p du Soleil



Détecteur ALICE au CERN
(collisions d'ions)

Images : CERN

Les forces fondamentales

Elles gouvernent les **interactions** entre les particules

Elles sont transmises par des « **bosons vecteurs** »

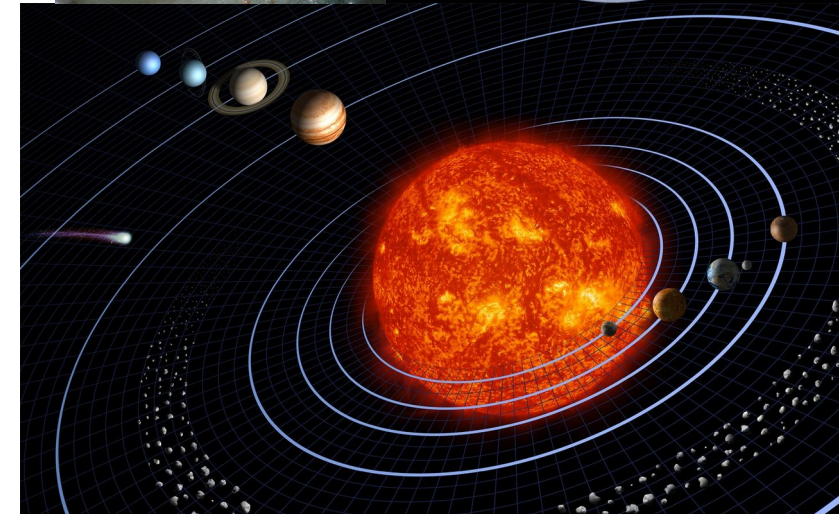
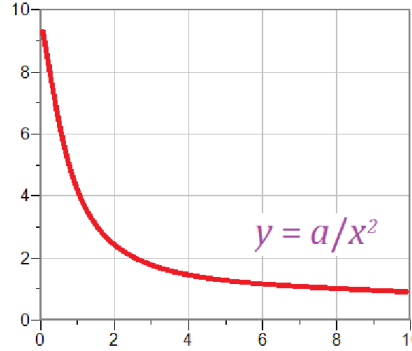
| Interaction | Théorie courante | Médiateurs | Masse (GeV/c ²) | Puissance relative approximative | Rayon d'action (m) | Dépendance de distance |
|-------------------|----------------------------------|-----------------------|-----------------------------|----------------------------------|-----------------------|-----------------------------------|
| Forte | Chromodynamique quantique (QCD) | huit gluons | 0 | 1 | $2,5 \times 10^{-15}$ | $\frac{1}{r^7}$ |
| Électromagnétique | Électrodynamique quantique (QED) | photon | 0 | 10^{-2} | ∞ | $\frac{1}{r^2}$ |
| Faible | Théorie électrofaible | W^+ , W^- , Z^0 | 80, 80, 91 | 10^{-5} | 10^{-18} | $\frac{1}{r^5}$ à $\frac{1}{r^7}$ |
| Gravitation | Relativité générale | graviton (postulé) | 0 | 10^{-40} | ∞ | $\frac{1}{r^2}$ |

La force gravitationnelle

$$\vec{F}_{1 \rightarrow 2} = -G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2} \cdot \vec{e}_{12} = -\vec{F}_{2 \rightarrow 1}$$

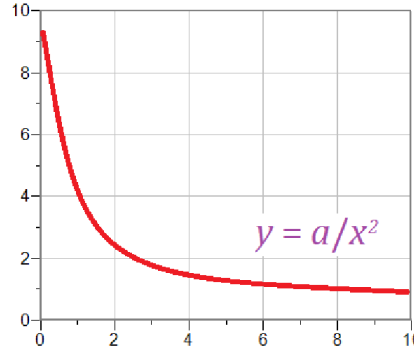
$G = 6,674 \times 10^{-11} \text{ N.m}^2.\text{kg}^{-2}$
constante gravitationnelle

- S'exerce **entre 2 objets massifs**
- **Toujours attractive**
- Force en « **1 sur r^2** » : **portée infinie**
- Responsable de :
 - La gravité terrestre
 - Les marées
 - différence entre les 2 faces de la Terre
 - La formation des planètes et des étoiles
 - L'existence de systèmes liés
 - Terre-Lune, Système Solaire, galaxies
- **Très faible intensité** mais l'emporte *in fine* sur les autres forces dans les phénomènes astrophysiques
 - Notamment dans la vie d'une étoile



La force électromagnétique

- S'exerce entre des charges électriques
- Force en « 1 sur r^2 » :
 - portée infinie
 - Très intense à courte distance
- Peut être :
 - **Attractive** (charges opposées)
 - **Répulsive** (charges de même signe)



$$\vec{F}_{1 \rightarrow 2} = 4 \pi \cdot \epsilon_0 \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2} \cdot \vec{e}_{12} = -\vec{F}_{2 \rightarrow 1}$$

$$\epsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12} \text{ A}^2 \cdot \text{s}^4 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$$

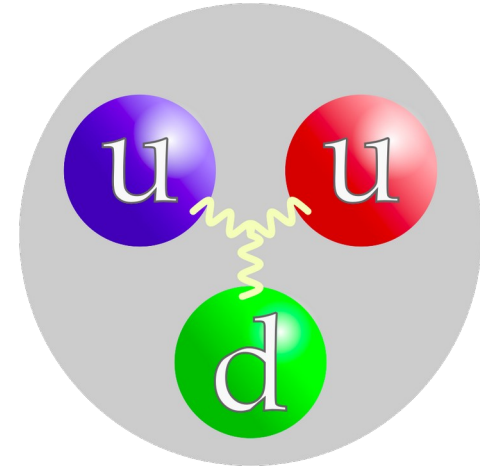
permittivité du vide



- Responsable de :
 - Phénomènes électriques/électrostatiques
 - La cohésion des atomes
 - (électrons autour des noyaux)
 - L'existence des molécules
 - Liaisons atomiques

La force (nucléaire) forte

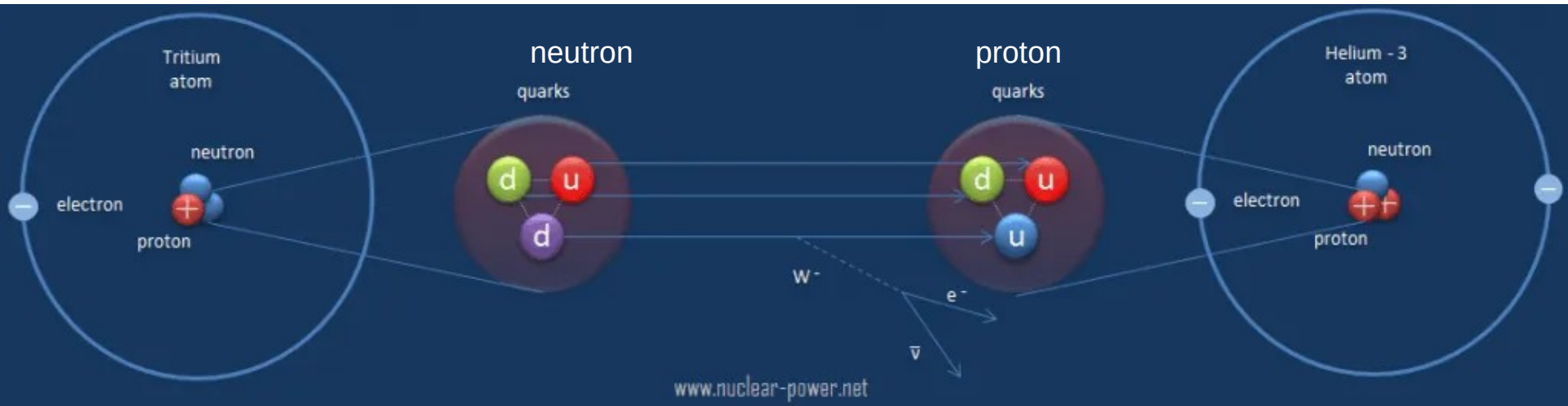
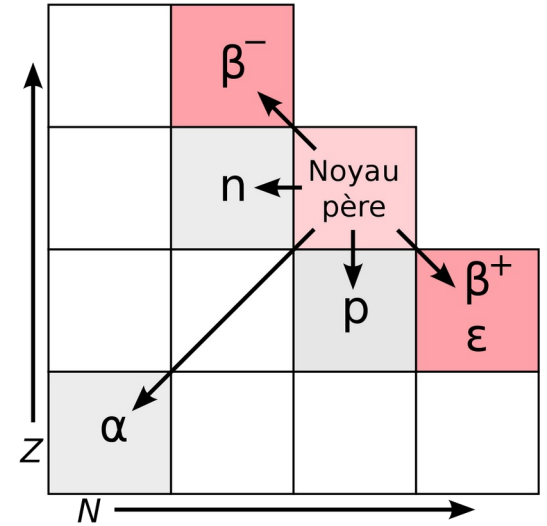
- **Force électrique répulsive très importante** dans un noyau
 - Car protons chargés positivement
 - \Rightarrow le noyau **ne devrait pas être stable**
- La FF permet la **cohésion des noyaux**
 - et des nucléons (protons et neutrons)
 - S'oppose à la force électrostatique répulsive
- **Très intense**, d'où son nom
- **Très courte portée** : 10^{-15} m (noyau)



Représentation de la force forte dans un proton (uud)

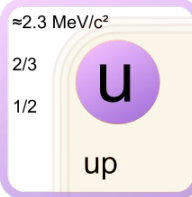
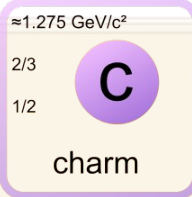


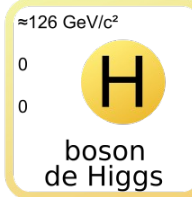
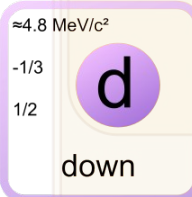

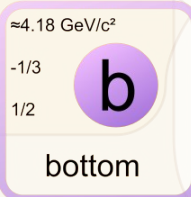
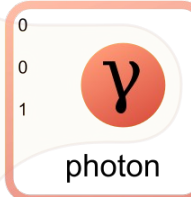
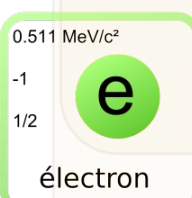
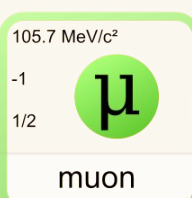

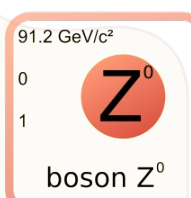
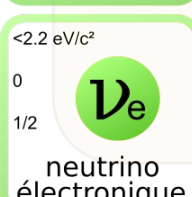


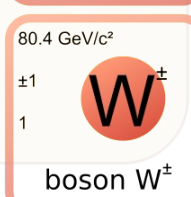
La force (nucléaire) faible

- Peut **transformer** une particule en une autre
- À l'origine de certains types de **radioactivité**
 - β^- (un neutron est transformé en proton) : émission d'un e^-
 - β^+ (un proton est transformé en neutron) : émission d'un e^+
 - **Capture électronique ϵ** : un proton absorbe un $e^- \rightarrow$ neutron
 - Permet la **nucléosynthèse dans une étoile**
- **Très courte portée** : $10^{-17} - 10^{-18}$ m



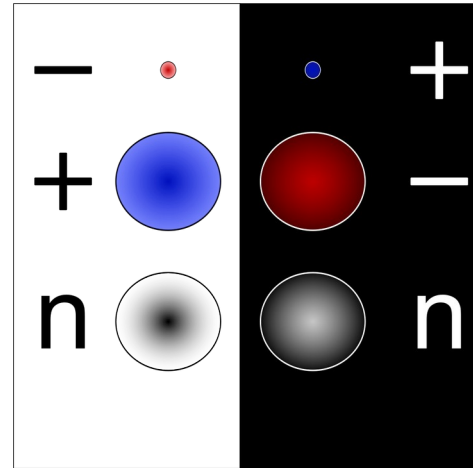
Le « modèle standard »

Ensemble des **particules élémentaires** et des **bosons vecteurs** qui composent toute la matière connue

| | | | | | |
|---------|--|---|--|---|---|
| LEPTONS | masse → $\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$ charge → $2/3$ spin → $1/2$  up | masse → $\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$ charge → $2/3$ spin → $1/2$  charm | masse → $\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$ charge → $2/3$ spin → $1/2$  top | masse → 0 charge → 0 spin → 1  gluon | masse → $\approx 126 \text{ GeV}/c^2$ charge → 0 spin → 0  boson de Higgs |
| | masse → $\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$ charge → $-1/3$ spin → $1/2$  down | masse → $\approx 95 \text{ MeV}/c^2$ charge → $-1/3$ spin → $1/2$  strange | masse → $\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$ charge → $-1/3$ spin → $1/2$  bottom | masse → 0 charge → 0 spin → 1  photon | |
| | masse → $0.511 \text{ MeV}/c^2$ charge → -1 spin → $1/2$  électron | masse → $105.7 \text{ MeV}/c^2$ charge → -1 spin → $1/2$  muon | masse → $1.777 \text{ GeV}/c^2$ charge → -1 spin → $1/2$  tau | masse → $91.2 \text{ GeV}/c^2$ charge → 0 spin → 1  boson Z^0 | BOSONS DE JAUGE |
| | masse → $< 2.2 \text{ eV}/c^2$ charge → 0 spin → $1/2$  neutrino électronique | masse → $< 0.17 \text{ MeV}/c^2$ charge → 0 spin → $1/2$  neutrino muonique | masse → $< 15.5 \text{ MeV}/c^2$ charge → 0 spin → $1/2$  neutrino tauique | masse → $80.4 \text{ GeV}/c^2$ charge → ± 1 spin → 1  boson W^\pm | |

Ne sont pas représentés :

- Les **antiparticules** des quarks et des leptons (charge opposée)



Comparaison de la charge des particules (à gauche) et celle des antiparticules (à droite) ; avec de haut en bas : électron et positron, proton et antiproton, neutron et antineutron (wikipedia)

- Le **graviton** (pas encore détecté)