

Un peu de Science pour comprendre le monde moderne

L'énergie dans tous ses états

[Bernard Remaud](#)

bernard.remaud@univ-nantes.fr
<https://www.un-peu-de-physique.fr>



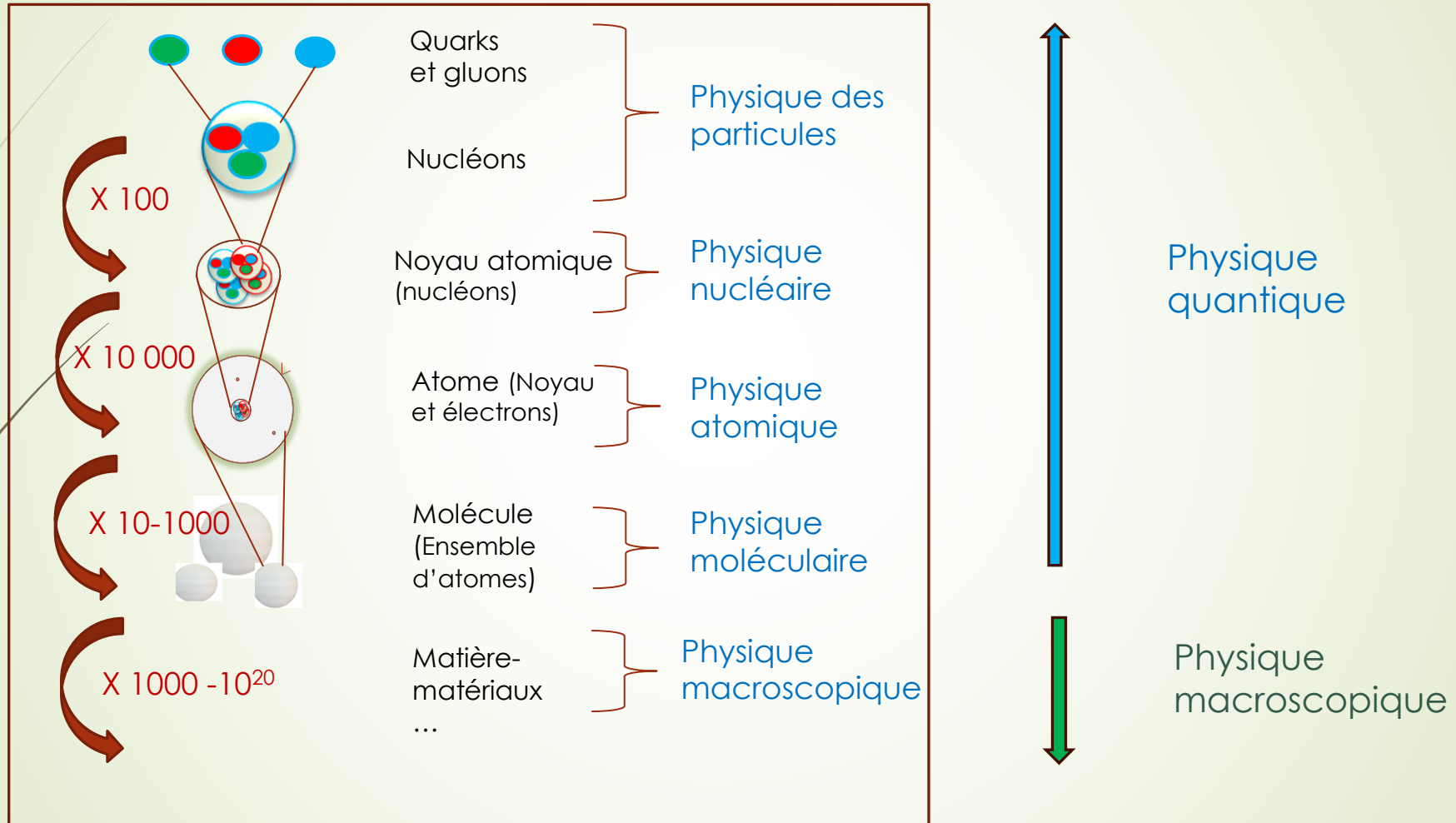
La chaîne YouTube



Le blog

L'énergie dans tous ses états

Ch 1 - Aux sources microscopiques
de l'énergie



Les 4 forces fondamentales

Le modèle du « Big Bang »

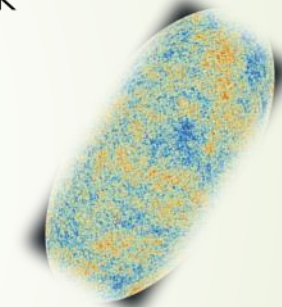
L'Univers a une « origine » : extrêmement confiné et chaud, il y a 13,8 milliards d'années

Ère de Planck

$$\begin{aligned} t &< 10^{-42} \text{ sec} \\ T &\approx 2 \cdot 10^{28} \text{ K (elvin)} \\ L &\approx 1,6 \cdot 10^{-36} \text{ m} \end{aligned}$$



« Mur » de Planck



Espace-temps

10^{-42} sec

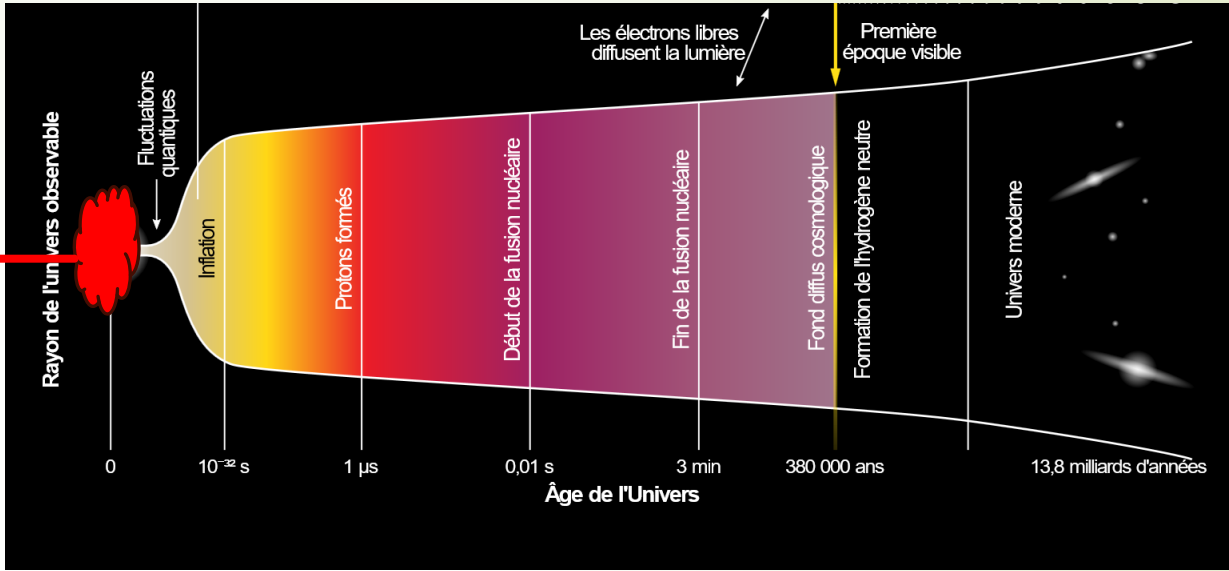
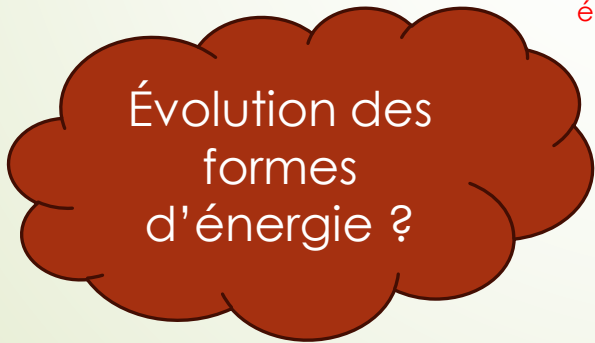
350 000 ans

Voir la [vidéo](#) récente sur l'histoire de l'Univers

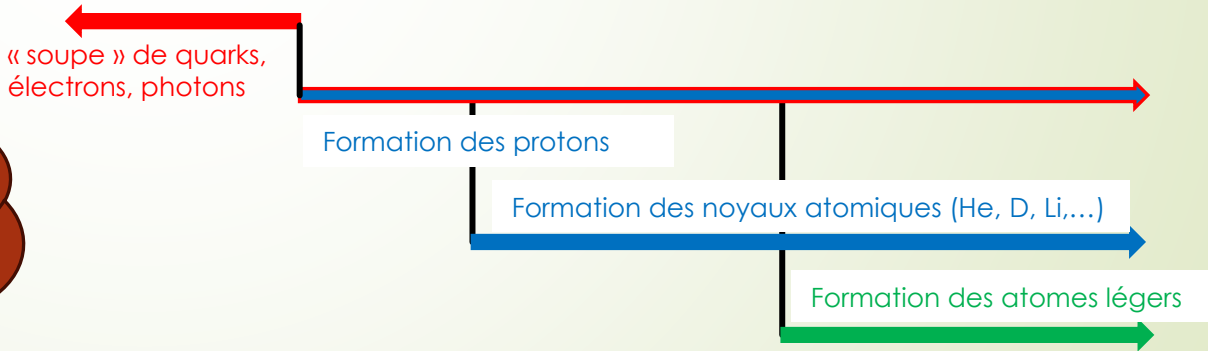
Ère de Planck $t < 10^{-42} s$
La quantité d'énergie de l'Univers est déterminée pour toujours

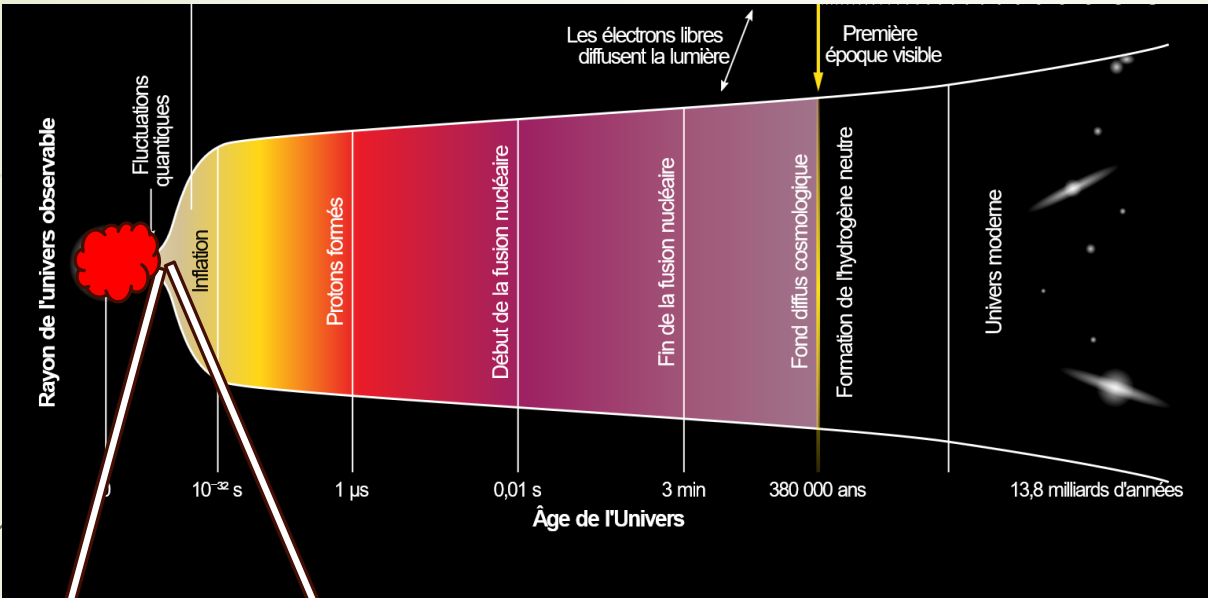
Densité d'énergie initiale
 $E_p = 46,3 \cdot 10^{112} J(ooule)/m^3$
La densité va décroître avec l'expansion de l'univers, mais le stock d'énergie ne changera pas

Densité estimée aujourd'hui
 $E_{présent} \sim 0,9 \cdot 10^{-10} J(ooule)/m^3$

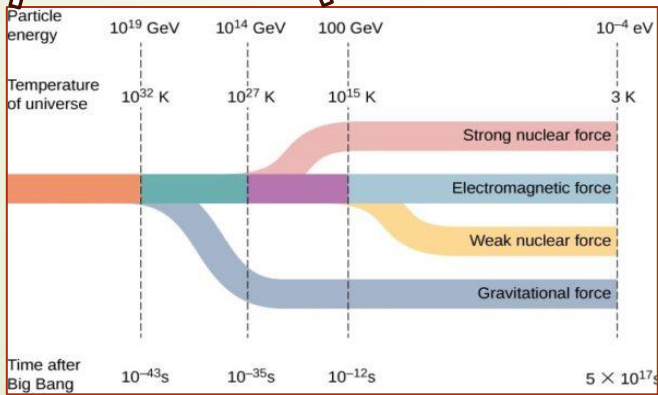


Histoire de l'Univers - Par National Science Foundation





Histoire de l'Univers - Par National Science Foundation



Un peu de Physique pour comprendre - L'énergie dans tous ses états

4 forces (sources d'énergie) dans l'Univers

- La gravitation
- Les 2 forces nucléaires (forte et faible)
- L'électromagnétisme

Ère de Planck

- une « force » unique dans un milieu extrêmement dense et chaud

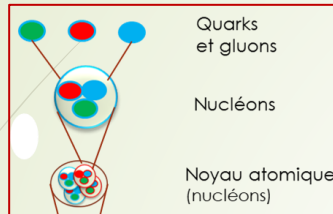
Ensuite

Les 4 forces se différencient pour donner les formes actuelles

Source Wikipédia : [Histoire et chronologie de l'Univers](#)

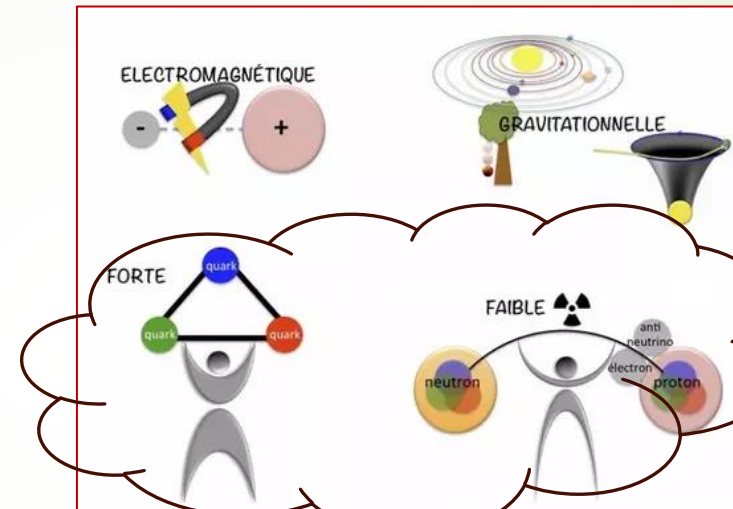
Les 4 forces fondamentales de l'univers

7



La complexité de notre univers macroscopique se réduit à 4 forces fondamentales dans l'infiniment petit

Elles sont les sources de toutes les formes d'énergie



Source xqatechno

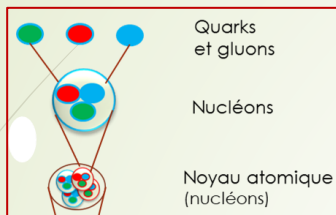
Très courte portée – infiniment petit

Gravitation : Newton 1680, Einstein 1917

Électromagnétisme : Maxwell 1850

Nucléaire forte : Gell-Mann 1960

Nucléaire faible : Fermi 1930, → 1960







Elles sont les sources de toutes les formes d'énergie à notre échelle

Les 4 forces fondamentales de l'univers

La complexité de notre univers macroscopique se réduit à 4 forces fondamentales dans l'infiniment petit

Les 4 interactions fondamentales

	Force	Fermions	Bosons	Portée	Charge	Intensité relative
	Gravitation Gravité, marées, trajectoire des planètes	Toutes les particules massives	graviton (?)	infinie	masse	10^{-39}
	Electromagnétique Presque tous les phénomènes de la vie courante	Leptons chargés et quarks	photon	infinie	Charge électrique	10^{-2}
	Forte Cohésion des noyaux atomiques	quarks	gluon	10^{-15} m	Charge de couleur	1
	Faible Radioactivité β , Soleil	leptons et quarks	W^+ , W^- , Z^0 bosons	10^{-18} m	Charge faible	10^{-7}

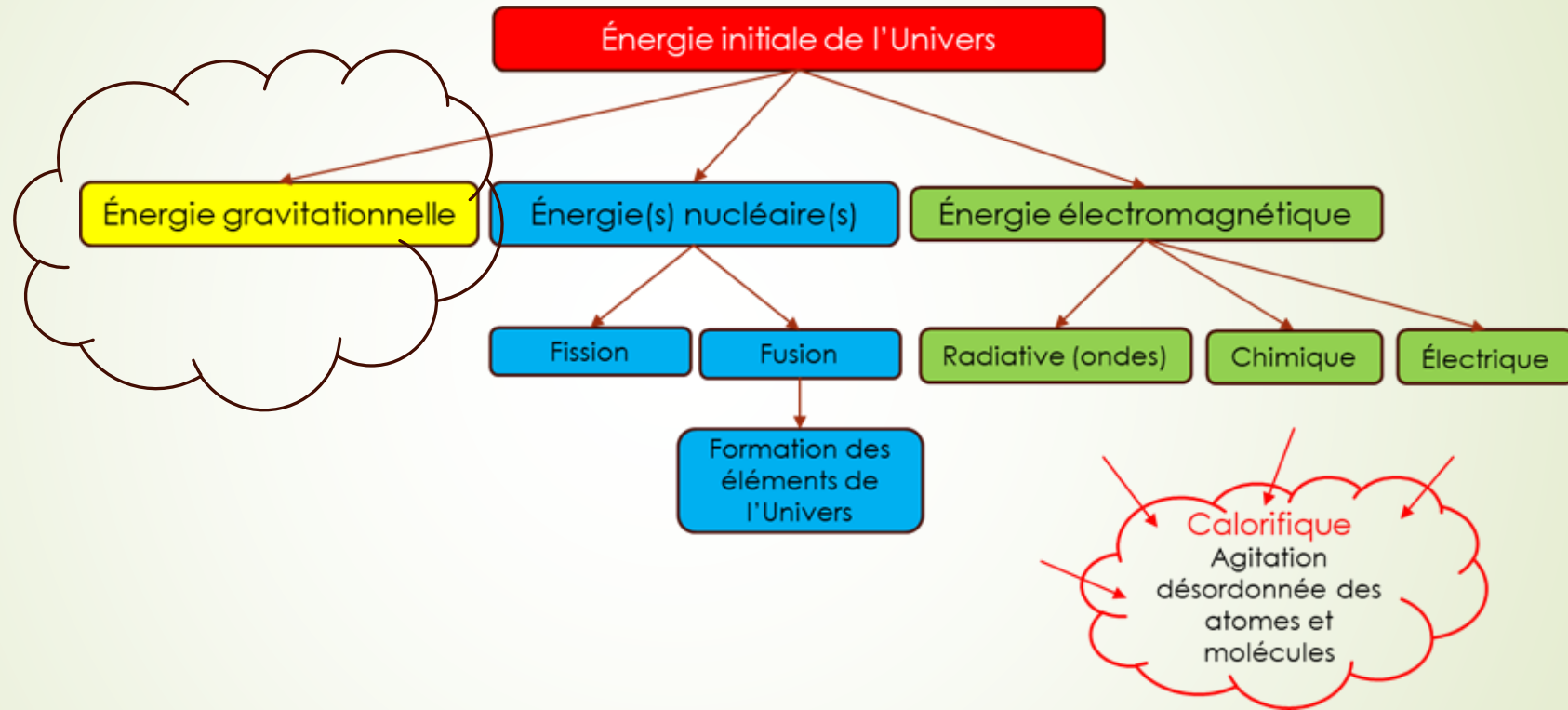
INRAE

Le document du bassin de l'Agglo

Culturesciencesphysique-ens-lyon

Pour en savoir plus : le [site du CEA](https://www.cea.fr) sur les 4 interactions fondamentales

- Quatre forces fondamentales sont les sources de l'énergie de l'univers, énergie constante depuis son origine



Toujours attractive
La plus faible des « forces »

Structure l'univers aux grandes
échelles

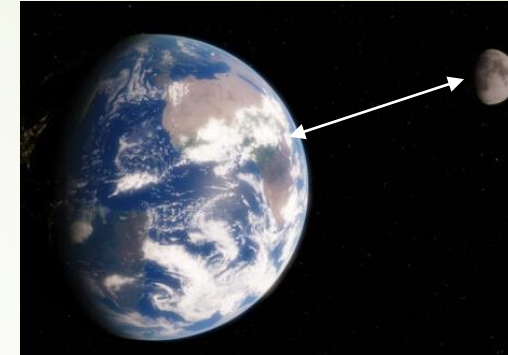
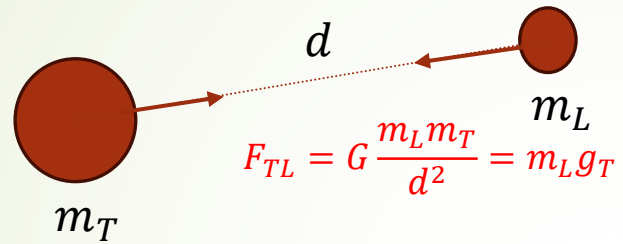


Source d'énergie sur Terre
(cycle de l'eau)



[Wikipedia](#)

Vision classique (Newton 1680)



Vision relativiste (Einstein 1917)



À nos échelles, l'approximation de Newton est largement suffisante

A diagram showing a satellite with solar panels orbiting Earth. The satellite is labeled "Satellite de masse m ". A red arrow labeled h indicates the height of the satellite above the Earth's surface. Below the diagram, the equation $E_{pot} = mgh \cong 9,8 m h$ is written in red.

Interaction très faible, nécessite des masses très importantes (cycle de l'eau,...)

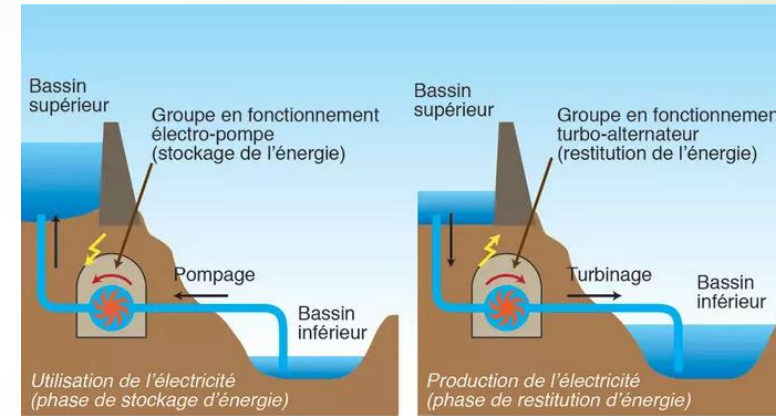


ailycivil.com

Graviticity

Stockage gravitationnel de l'énergie

Stockage gravitationnel de l'énergie



Exemple :

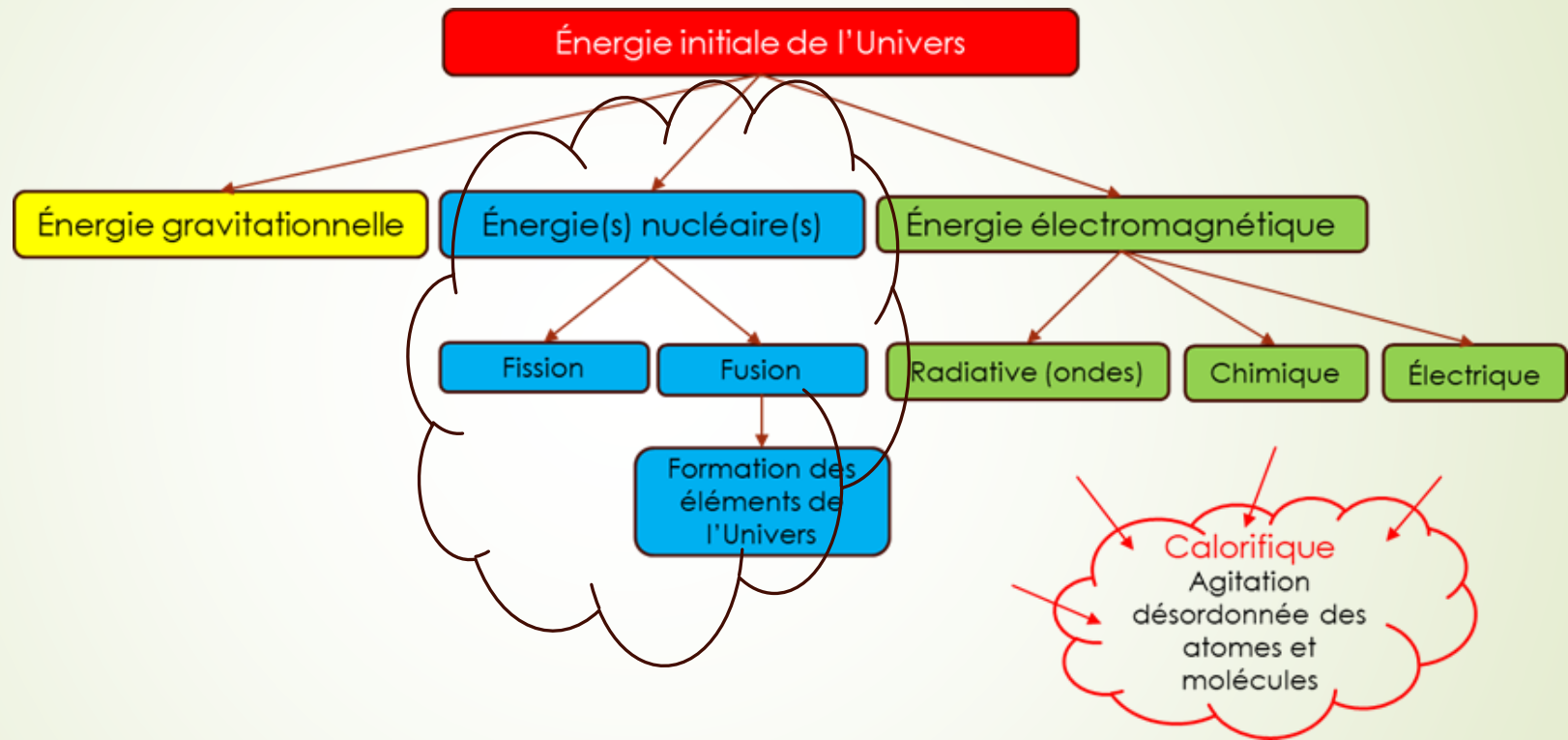
Stocker $P = 10 \text{ MW}$ de puissance électrique** dans un barrage de 100 mètres de hauteur :

$$\frac{P}{gh} \cong \frac{10^7}{10 \cdot 100} = 10^4 \text{ kg/s} ; \text{ soit } 10 \text{ m}^3/\text{s}$$

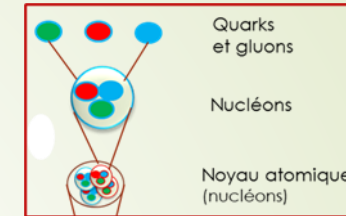
Sans compter les pertes (frottements, chaleur,...), 10 à 20%

** puissance moyenne d'un parc éolien terrestre

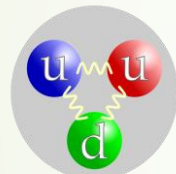
- Quatre forces fondamentales sont les sources de l'énergie de l'univers, énergie constante depuis son origine
- L'énergie gravitationnelle, toujours attractive mais très faible, n'intervient que dans l'interaction entre les grandes masses (cosmologie)



La plus forte des « forces »
Très courte portée (force de contact)

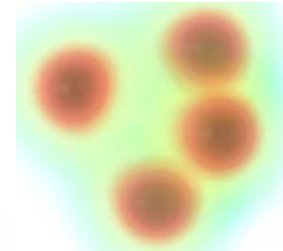


Création des nucléons au début de l'univers $10^{-32} \leftrightarrow 10^{-12}$ seconde après Big Bang



Wikipédia

Création des noyaux légers 3 à 20 secondes après Big Bang



In2p3-CNRS

Nucléosynthèse stellaire
De qq 100 millions (?) après le Big Bang à nos jours

Tableau Périodique des Éléments

99,99% de notre énergie sur Terre est d'origine nucléaire

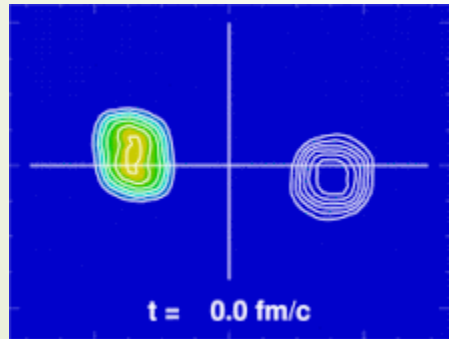
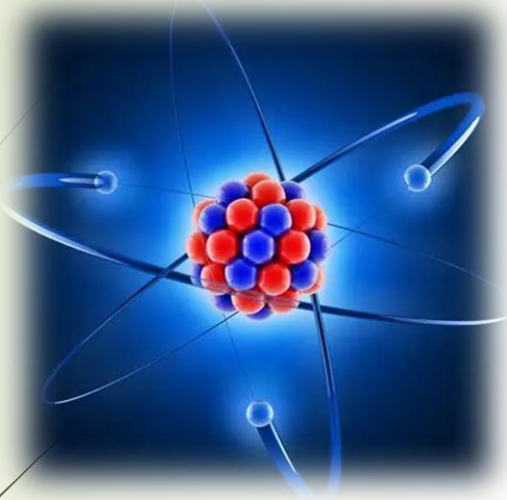
- Énergie du Soleil
- Géothermie (radioactivité)
- Centrales nucléaires (fission)

Futur (?)

- Centrale nucléaire (fusion)

Aux origines de l'énergie nucléaire (1)

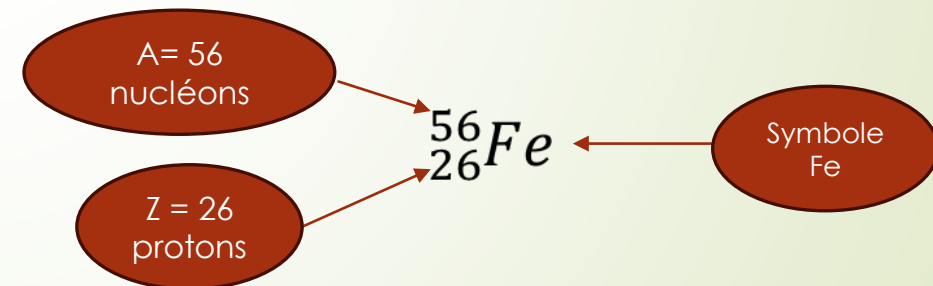
17



Le **noyau atomique** - une goutte de matière :

- Très **petit** (10^{-15} mètre de rayon - 0,000 000 000 000 001 m)
- Très **dense** (230.000 tonnes par millimètre cube)
- **Incompressible** mais **déformable**
- Composé de **Z protons** (qui lui donnent sa charge électrique) et de **N neutrons** (sans charge, de masse égale au proton). La **masse symbolique** $A = N+Z$

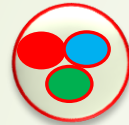
Le Fer : le noyau le plus stable 30 neutrons



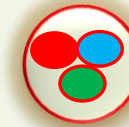
« Force nucléaire » dans les noyaux atomiques

18

Quelle force assure la cohésion des nucléons dans le noyau atomique ?



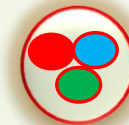
La force nucléaire forte confine (comme dans un sac) les quarks



La force nucléaire forte de courte portée s'étend un peu (bave) au-delà du proton (1 fermi = 10^{-15} mètre)

Proton

Neutron



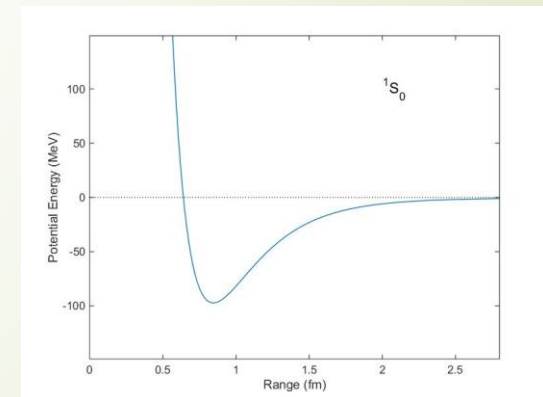
Trop éloignés, pas d'interaction (2 protons se repoussent car ils sont chargés positivement)



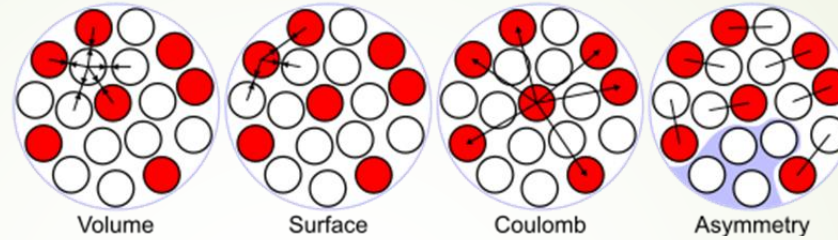
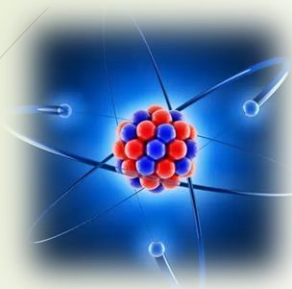
Proches (1 fermi), s'attirent violemment



Trop proches (1 fermi), se repoussent violemment



L'énergie d'un noyau atomique



Source Wikipedia:
Liquid drop model



proton



neutron

La force nucléaire « colle » les protons et neutrons (énergie attractive)



Chaque nucléon a une énergie liée au nombre de ses voisins proches (énergie attractive de **volume**)

Les nucléons en périphérie ont moins de voisins (énergie répulsive)



Chaque nucléon a une énergie liée au nombre de ses voisins proches (énergie répulsive de **surface**)

Les protons se repoussent : charge électrique de même signe (énergie répulsive)



Les protons (énergie répulsive **électrique - Coulomb**)

Conséquence de la mécanique quantique (principe de Pauli)



L'égalité du nombre des protons et neutrons est favorisée (**asymétrie**)

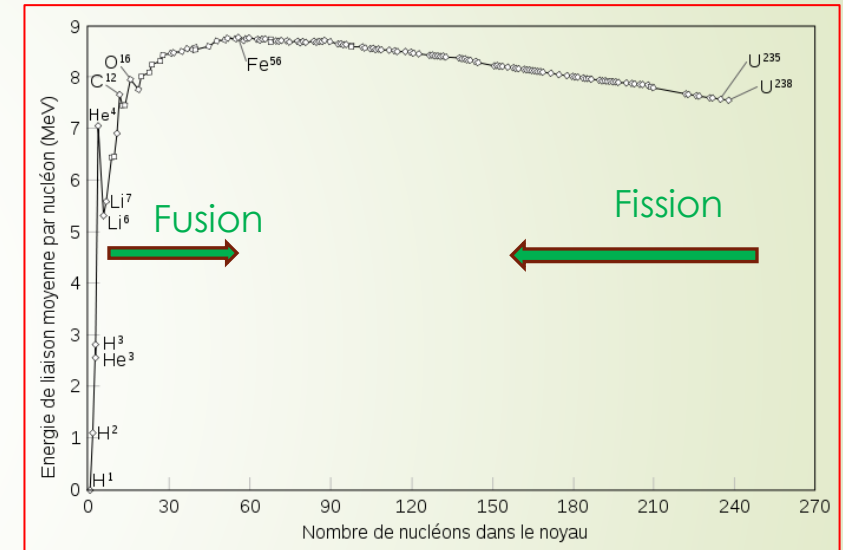
$$E(A, Z) = a_V A - a_S A^{\frac{2}{3}} - a_C \frac{Z^2}{A} - a_a \frac{(N - Z)^2}{A}$$

- Quatre forces fondamentales sont les sources de l'énergie de l'univers, énergie constante depuis son origine
- L'énergie gravitationnelle, toujours attractive mais très faible, n'intervient que dans l'interaction entre les grandes masses (cosmologie)
- Les forces nucléaires de très courte portée sont à l'origine de la cohésion de la matière et déterminent l'énergie des noyaux atomiques

$$E(A, Z) = a_v A - a_s A^{2/3} - a_c \frac{Z^2}{A^{1/3}} - a_a \frac{(N - Z)^2}{A}$$

Lorsque le noyau a peu de nucléons ($A \approx 10$), le terme de surface enlève de l'énergie de liaison

Lorsque le noyau a beaucoup de nucléons ($A \approx 200$), le nombre de protons augmente l'énergie de répulsion coulombienne et diminue l'énergie de liaison

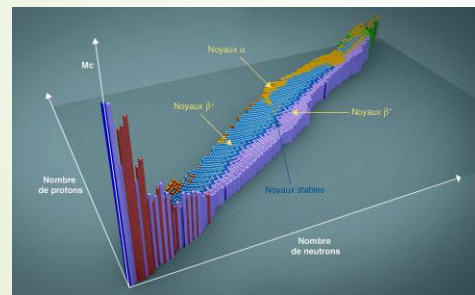
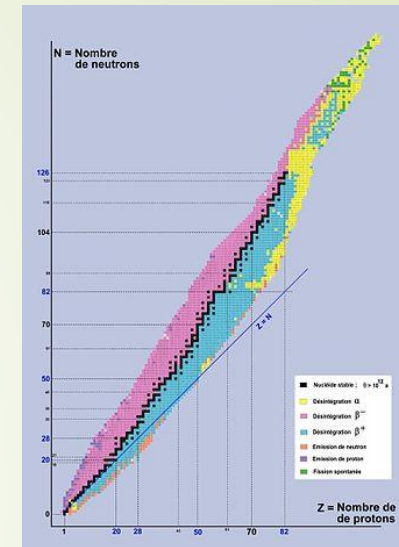


Wikipedia : <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0>

L'optimum est obtenu pour les **noyaux autour du Fer**, éléments les plus stables et les plus abondants sur Terre (noyau Nickel-Fer du globe terrestre)

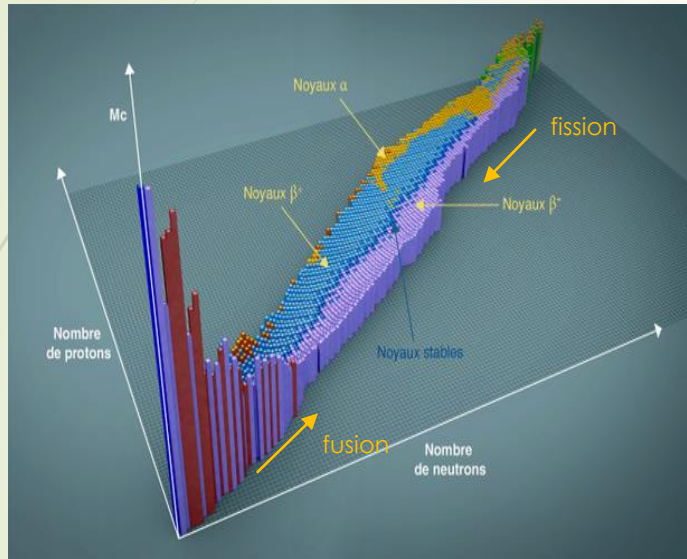
Il y a donc 2 sources d'énergie nucléaire : fusion de 2 noyaux légers (Soleil, projet ITER, bombe H), fission de noyaux très lourds (centrale nucléaire, bombe A)

Un noyau atomique est caractérisé par les nombres Z de ses protons et N de ses neutrons ($A=N+Z$).
Un noyau ne peut exister (sous forme stable ou radioactive) que pour un nombre limité de combinaison (Z,N). Cela dessine une carte des noyaux possibles que l'on nomme « vallée de stabilité nucléaire ».



Source : CEA irfu.cea.fr

Une remarquable vidéo, faite par le CEA, donne les éléments de base des propriétés des noyaux atomiques et de leur genèse au début de l'univers et dans les étoiles

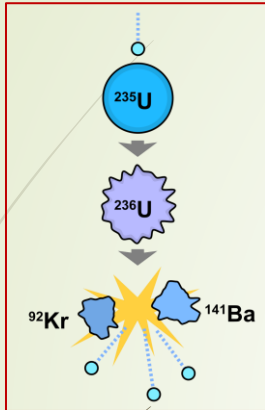


Source : CEA irfu.cea.fr

- Noyaux trop lourds (répulsion des protons) → **fission**
- Noyaux légers (trop d'énergie de surface) → **fusion**

- Noyaux trop lourds : émission de noyau d'hélium (2 protons et 2 neutrons) **radioactivité α**
- Noyaux trop riches en neutrons : **radioactivité β^-**
Neutron \rightarrow Proton⁺ + électron⁻ + antineutrino
- Noyaux trop riches en protons : **radioactivité β^+**
Proton⁺ \rightarrow Neutron + (anti)électron⁺ + neutrino

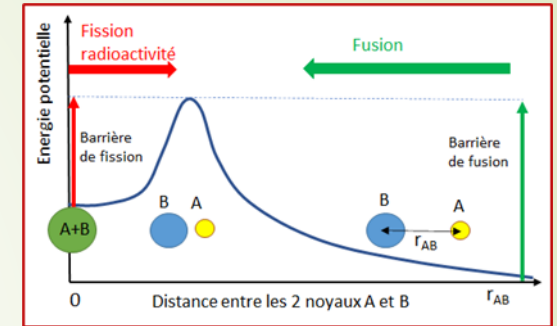
Et la radioactivité γ ! : le noyau est un objet quantique où ses protons/neutrons sont répartis en couches. Quand un nucléon excité descend vers un état stable, il émet de la lumière (photons)



Ex : fission d'un noyau d'uranium $^{235}_{92}\text{U}$ dans une centrale nucléaire. Noyau très peu radioactif (période 700 millions d'années)

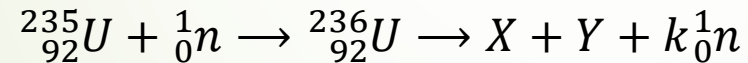


Avec environ 200 MeV d'énergie (cinétique) des fragments plus 2 MeV par neutron...



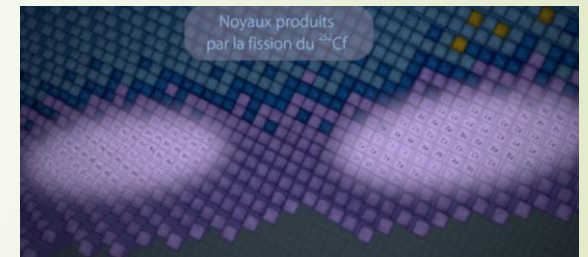
Énergie « produite » par fission d'un kg d' ^{235}U ** : $83 \cdot 10^{12}$ J(oule)/kg ; soit 83 TWh (1/5 production électricité en France 2022)

Oui mais, les réactions possibles sont multiples

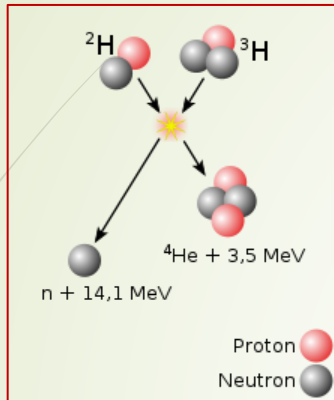


Et génèrent une multitude de produits radioactifs de durée de vie plus ou moins longues

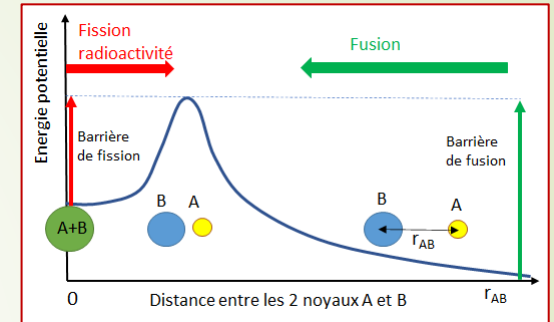
** Ne pas confondre avec la masse manquante selon $E = mc^2$: l'équivalence en masse de l'énergie produite par la fission d'un kg d' ^{235}U est de 1 gramme environ (voir plus loin)



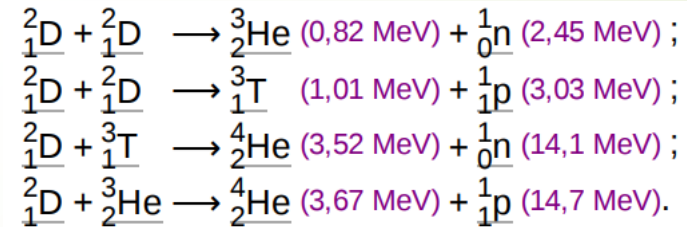
- Quatre forces fondamentales sont les sources de l'énergie de l'univers, énergie constante depuis son origine
- L'énergie gravitationnelle, toujours attractive mais très faible, n'intervient que dans l'interaction entre les grandes masses (cosmologie)
- Les forces nucléaires de très courte portée sont à l'origine de la cohésion de la matière et déterminent l'énergie des noyaux atomiques
- La **fission des noyaux lourds** est source d'énergie, avec production de nombreux noyaux fils radioactifs



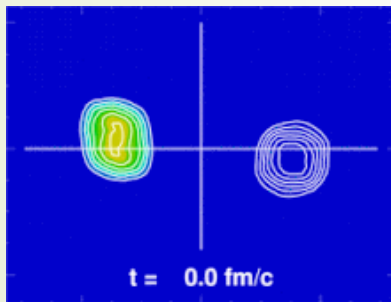
La fusion des noyaux légers → beaucoup d'énergie, très peu de déchets ; processus de création d'énergie dans les étoiles.
Mais, il faut passer la barrière coulombienne
 (Source Wikipédia [Fusion nucléaire](#))



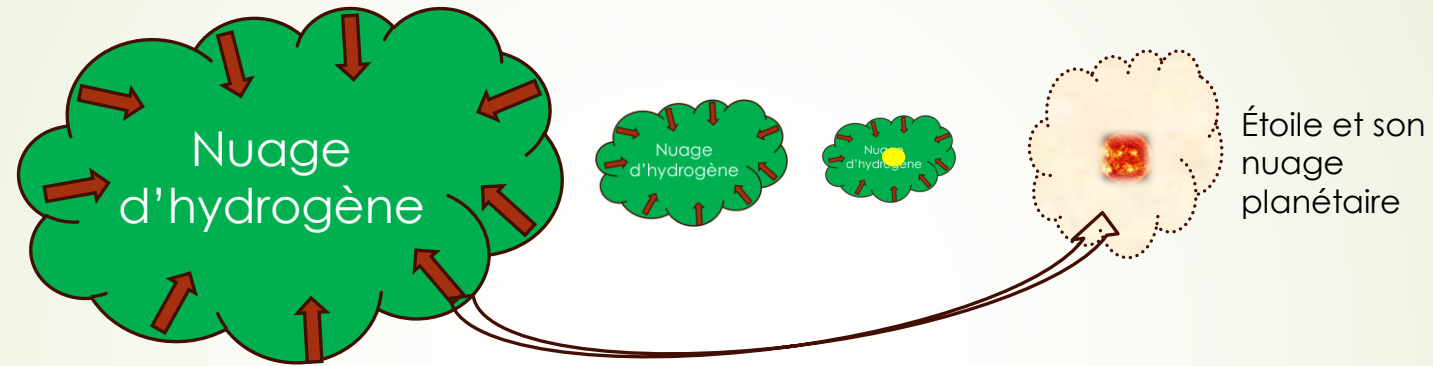
Les réactions les envisagées pour la production d'énergie :



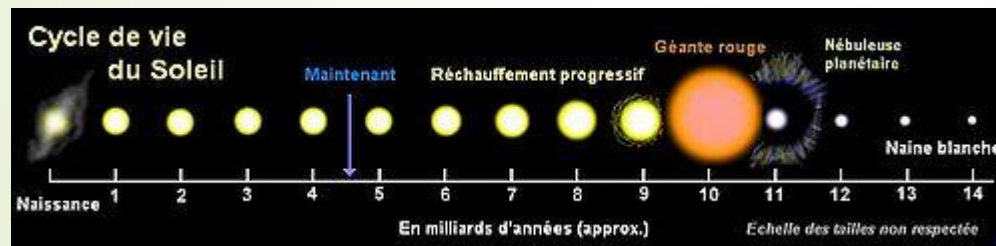
Le deutérium (D) est présent naturellement ; le Tritium (T) doit être synthétisé dans un réacteur nucléaire.



Les étoiles sont des centrales d'énergie de fusion et des fabriques de tous les éléments observables de l'Univers



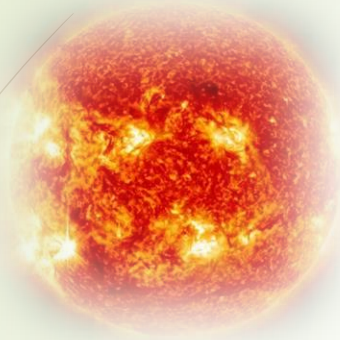
Une étoile fusionne d'abord les noyaux d'hydrogène (et ses isotopes), puis de carbone,... jusqu'au fer (fin de vie)



La fin de vie (explosive) de la plupart des étoiles provoque la synthèse (endothermique) des éléments plus lourds que le fer

H 1																	He 2								
Li 3	Be 4																	B 5	C 6	N 7	O 8	F 9	Ne 10		
Na 11	Mg 12																	Al 13	Si 14	P 15	S 16	Cl 17	Ar 18		
K 19	Ca 20	Sc 21	Ti 22	V 23	Cr 24	Mn 25	Fe 26	Co 27	Ni 28	Cu 29	Zn 30	Ga 31	Ge 32	As 33	Se 34	Br 35	Kr 36								
Rb 37	Sr 38	Y 39	Zr 40	Nb 41	Mo 42	Tc 43	Ru 44	Rh 45	Pd 46	Ag 47	Cd 48	In 49	Sn 50	Sb 51	Te 52	I 53	Xe 54								
Cs 55	Ba 56	Hf 72	Ta 73	W 74	Re 75	Os 76	Ir 77	Pt 78	Au 79	Hg 80	Tl 81	Pb 82	Bi 83	Po 84	At 85	Rn 86									
Fr 87	Ra 88																								
		La 57	Ce 58	Pr 59	Nd 60	Pm 61	Sm 62	Eu 63	Gd 64	Tb 65	Dy 66	Ho 67	Er 68	Tm 69	Yb 70	Lu 71									
		Ac 89	Th 90	Pa 91	U 92	Np 93	Pu 94	Am 95	Cm 96	Bk 97	Cf 98	Es 99	Fm 100	Md 101	No 102	Lr 103									

Source [Nucléosynthèse](#) (Wikipédia)



Soleil - Étoile (très) moyenne –
Naine Jaune au milieu (4 milliards d'année) de sa vie

- Rayon 696 342 km
- Masse $1,995 \cdot 10^{30}$ kg
- Température surface 5 800 K
- Température centre 15 000 000 K
- Flux énergie total $3,8 \cdot 10^{26}$ W
- Flux énergie en surface 64 MW/m²
- Perte de masse $4 \cdot 10^9$ kg/s

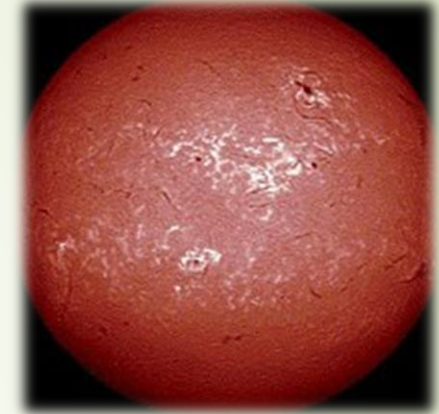
Soleil – source de >99% de l'énergie en flux et en stock de la planète Terre

Comment le Soleil transforme-t-il cette énergie (chaleur) en lumière ?

Une question récurrente dans l'Histoire

D'où le Soleil tire-t-il son énergie et sa durée de vie ?

- Le mécanisme de Kelvin-Helmoltz (fin XIX^{ème}): refroidissement et contraction d'un corps initialement très chaud → 8 900 000 ans
Très insuffisant pour concilier avec la géologie de la Terre
- Découverte de la radioactivité (1900) → possibilité de fusion au cœur (Jean Perrin)
- Théorie des cycles de fusion des noyaux légers (1930) : H. Bethe, S. Chandrasekhar

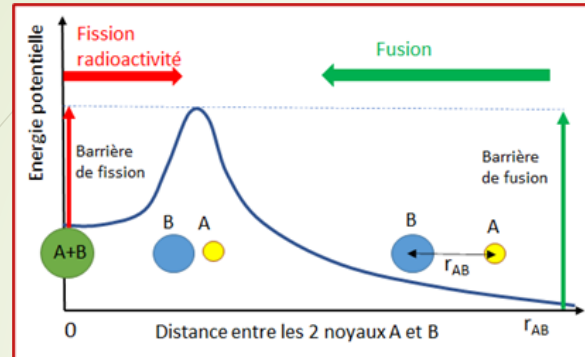


Pourquoi la Terre est-elle si chaude (énergie interne) ?

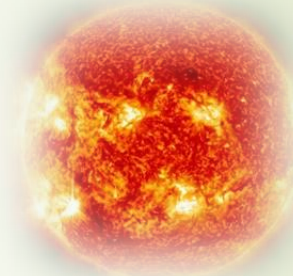
- Buffon : étude du refroidissement de boules de fer → 80 000 ans
Très insuffisant pour concilier avec la géologie
- Équation de la chaleur : lord Kelvin (1890) → 20 à 400 millions d'année
Incompatible avec évolution des espèces (Darwin)
- Découverte de la radioactivité (1900) → radioactivité naturelle + contraction gravitationnelle



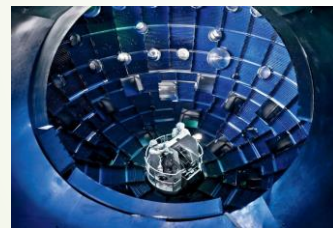
Lespritsorcier.org



Comment vaincre la barrière de fusion ?



- **Énergie thermique** (agitation + compression)
Atteindre des températures d'environ 10^7 K (10 000 000°)



Science et Vie

- **Confinement inertiel**
Tirs convergents de lasers de très haute puissance
Août 2023 : 3,15 mégajoules d'énergie de fusion en injectant dans les lasers 2,05 mégajoules d'énergie (LNL, Livermore USA)

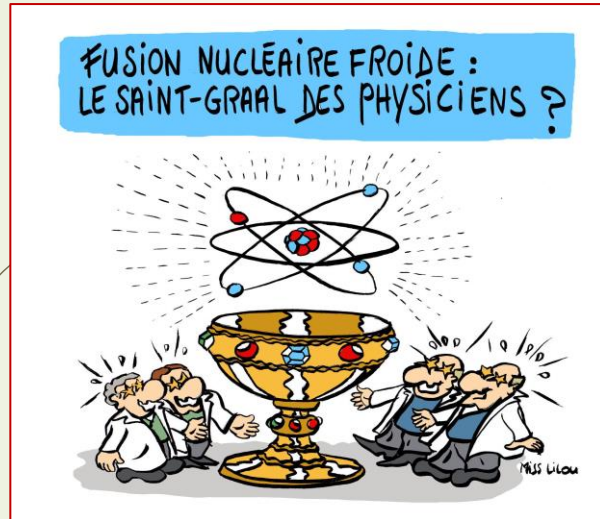
- **Confinement magnétique**
Plasma confiné par des champs magnétiques très puissants
ITER : objectif : 500 MW de puissance thermique pendant des durées de 400 à 600 secondes, pour une puissance thermique injectée dans le plasma de 50 MW, soit une multiplication par dix de la puissance thermique



ITER

La « fusion froide » : le réveil amer

Mars 1989 : 2 éminents physiciens (Université de l'Utah) affirment avoir découvert le moyen de générer de l'énergie de fusion à la température ambiante



Miss Lilou



Électrolyse de l'eau lourde D_2O avec des électrodes de palladium



Impossibilité de reproduire l'expérience avec ses 2 signatures :

- Dégagement d'énergie autre que chimique
- Rayonnements d'origine nucléaire : neutrons, gamma

Un des conséquences de la relativité générale

$$E = mc^2$$

Équivalence matière \leftrightarrow énergie (souvent mal comprise)

$$E(\text{Joule}) \sim 9 \cdot 10^{16} m(\text{kg})$$



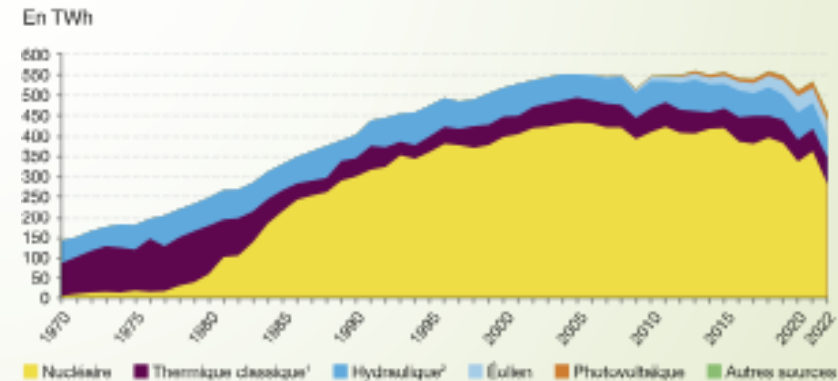
Equivalent matière de l'énergie libérée

- Bombe A, Hiroshima:
1 g de matière
- La plus grosse bombe H (russe),
2,5 kg de matière

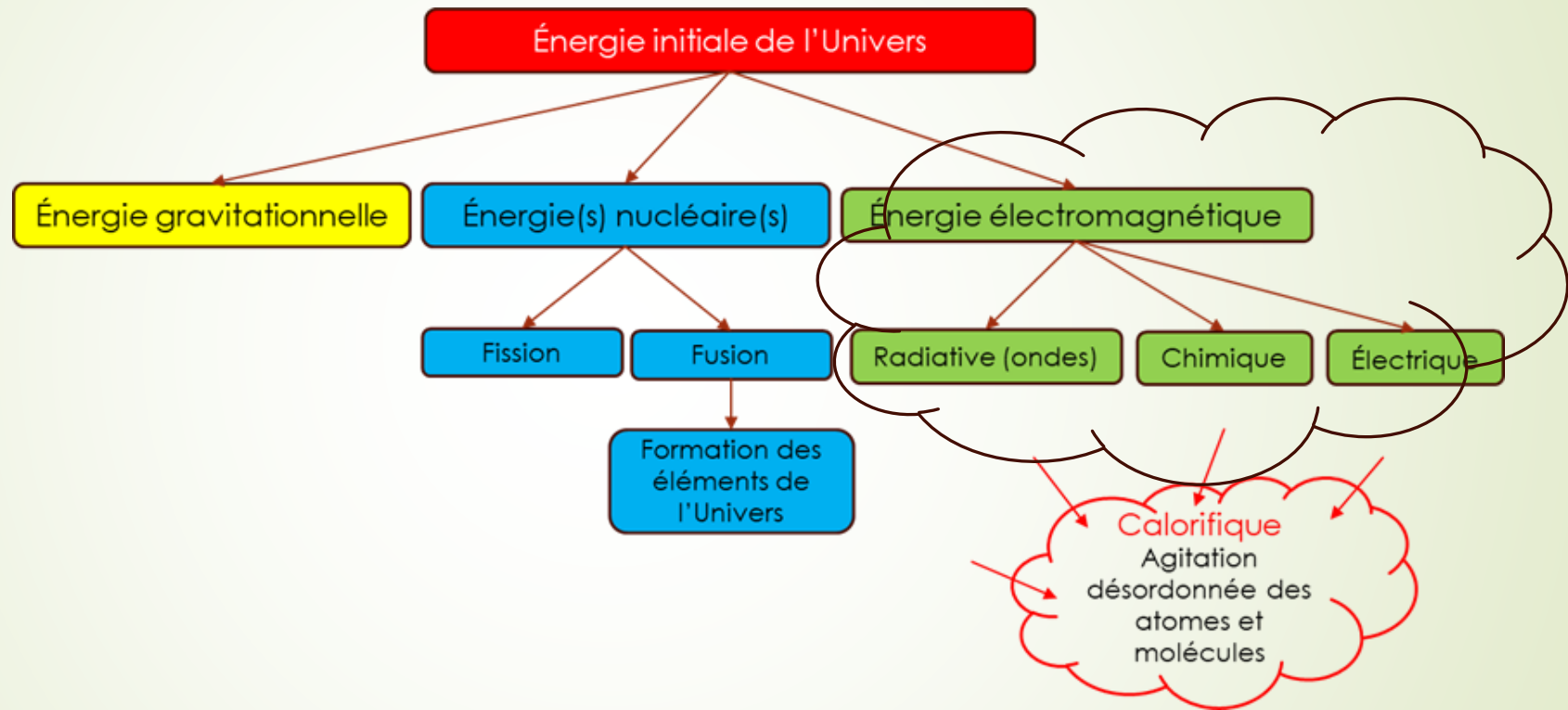
Production nette d'électricité française en 2022 :

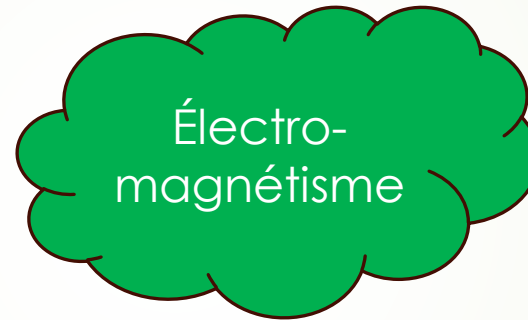
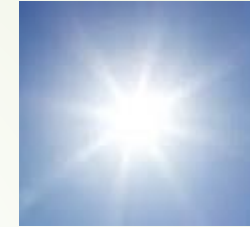
455 TWh soit $4,55 \cdot 10^{14}$ TWh

Équivalent \rightarrow 5 grammes de matière



- Quatre forces fondamentales sont les sources de l'énergie de l'univers, énergie constante depuis son origine
- L'énergie gravitationnelle, toujours attractive mais très faible, n'intervient que dans l'interaction entre les grandes masses (cosmologie)
- Les forces nucléaires de très courte portée sont à l'origine de la cohésion de la matière et déterminent l'énergie des noyaux atomiques
- La fission des noyaux lourds est source d'énergie, avec production de nombreux noyaux fils radioactifs
- La **fusion des noyaux légers** est source de l'énergie des étoiles (dont notre Soleil), avec la synthèse de tous les éléments constituant notre Univers


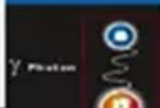






L'électromagnétisme dans l'infiniment petit est à l'origine

- De l'énergie **chimique** (propriétés des électrons dans les atomes)
- De l'énergie **électrique** (conduction des électrons dans les solides)
- De l'énergie **radiative** – lumière, ondes radios et X - (ondes électromagnétiques)

Les 4 interactions fondamentales

	Force	Fermions	Bosons	Portée	Charge	Intensité relative
	Gravitation Gravité, marées, trajectoire des planètes	Toutes les particules massives	graviton (?)	infinie	masse	10^{-39}
	Electromagnetique Presque tous les phénomènes de la vie courante	Leptons chargés et quarks	photon	infinie	Charge électrique	10^{-2}
	Forte Cohésion des noyaux atomiques	quarks	gluon	10^{-15} m	Charge de couleur	1
	Faible Radioactivité β , Soleil	leptons et quarks	W^+ , W^- , Z^0 bosons	10^{-18} m	Charge faible	10^{-7}

2010/2011

La découverte du boson de Higgs

13



Noyau atomique
(nucléons)

Physique
nucléaire

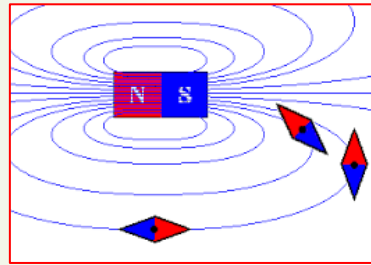
Atome (Noyau
et électrons)

Physique
atomique

- 1% d'intensité par rapport à la force nucléaire
- Portée infinie (énergie décroît en $1/r$)
- Attractive ou répulsive (selon la charge)
- Source de cohésion des atomes

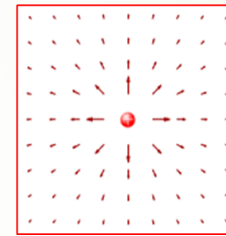
À l'origine des forces électriques et magnétiques

Un **aimant** crée un champ de forces **magnétiques**

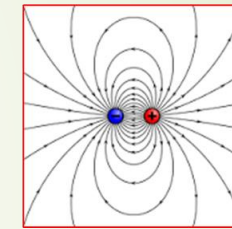


Une **charge électrique** crée un champ de forces **électriques**

Une charge positive

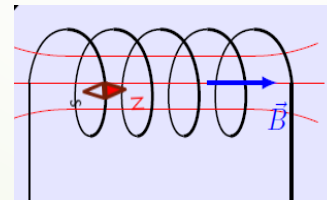
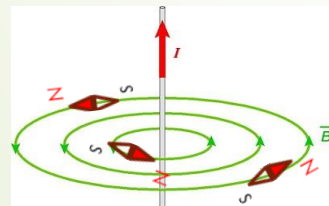


Deux charges: positive et négative



Un **courant continu** dans un fil

- Champ **magnétique** (loi d'Ampère)
- Pas de champ **électrique**



<http://ressources.unisciel.fr/>

Un champ est une propriété de l'espace autour d'une source électrique ou magnétique

38

Champs magnétique ou électrique (indépendants) :



Ligne à haute tension

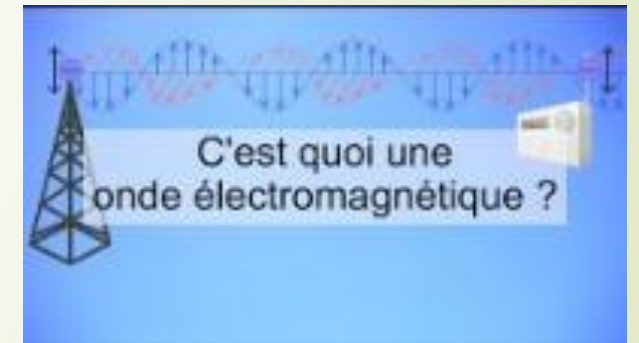
Créés par des courants continus ou lentement variables
(basses fréquences comme le courant alternatif à 50 Hz)

Une [vidéo didactique](#) sur ondes et champs

Ondes électro-magnétiques (champs électrique et magnétique couplés)



Créés par des courants de hautes fréquences (Plus de 100 000 Hz)



- Quatre forces fondamentales sont les sources de l'énergie de l'univers, énergie constante depuis son origine
- L'énergie gravitationnelle, toujours attractive mais très faible, n'intervient que dans l'interaction entre les grandes masses (cosmologie)
- Les forces nucléaires de très courte portée sont à l'origine de la cohésion de la matière et déterminent l'énergie des noyaux atomiques
- La fission des noyaux lourds est source d'énergie, avec production de nombreux noyaux fils radioactifs
- La fusion des noyaux légers est source de l'énergie des étoiles (dont notre Soleil), avec la synthèse de tous les éléments constituant notre Univers
- **Les forces électromagnétiques, à longue portée entre charges électriques positives ou négatives, sont à l'origine des ondes électromagnétiques (radio, lumière, rayons X,...)**

L'énergie électromagnétique
radiative (lumière)

Énergie initiale de l'Univers

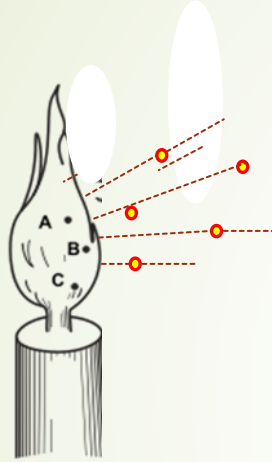
Énergie électromagnétique

Radiative (ondes)

Chimique

Électrique

Corpuscule



Descartes,
Newton

XVIII^{ème}

Planck
Einstein

XIX^{ème}

XX^{ème}

XVII^{ème}

Newton
Huygens

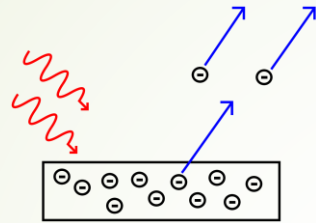
Young,
Fresnel,
Maxwell

Onde



La lumière est onde ET corpuscule

Effet photoélectrique (Einstein 1905)



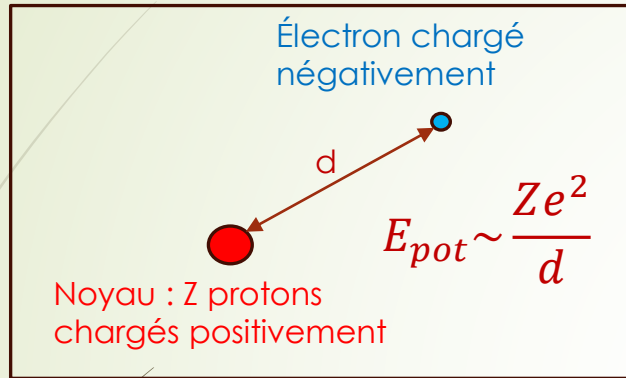
Pourquoi un seuil pour l'émission des électrons ?

Si $\nu < \nu_{critique}$ Rien , pas d'émission

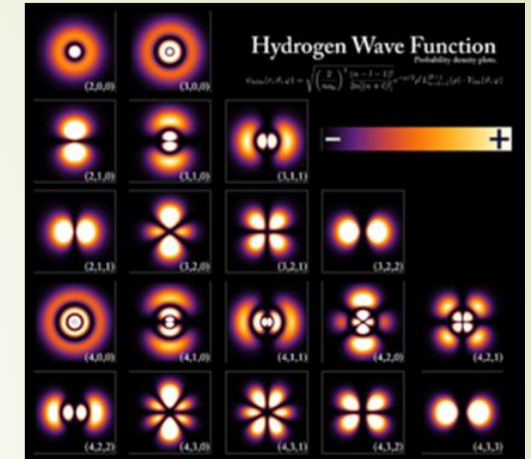
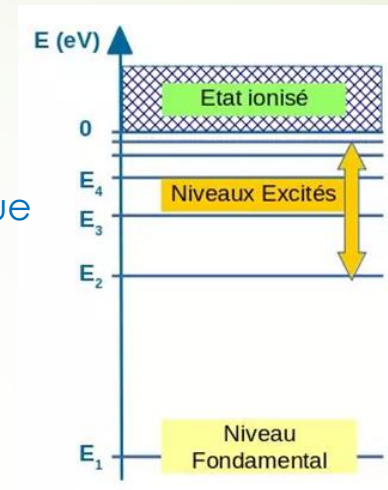
Si $\nu > \nu_{critique}$ émission d'électrons $E = h\nu - E_0$ ($h=6,626 \cdot 10^{-34}$

Joule)

Comme la lumière, les « particules quantiques » (électrons, photons) se propagent comme des ondes
Et interagissent avec la matière par paquets d'énergie (quanta, photons)

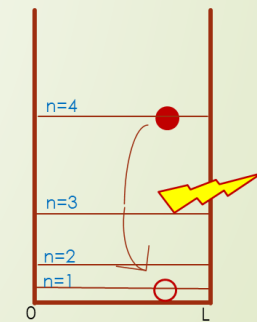
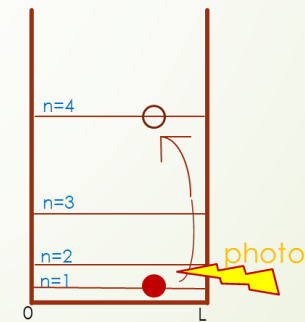


Mécanique quantique

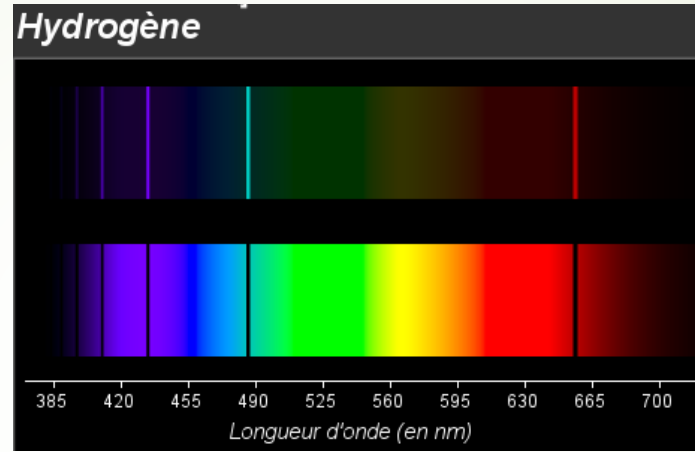
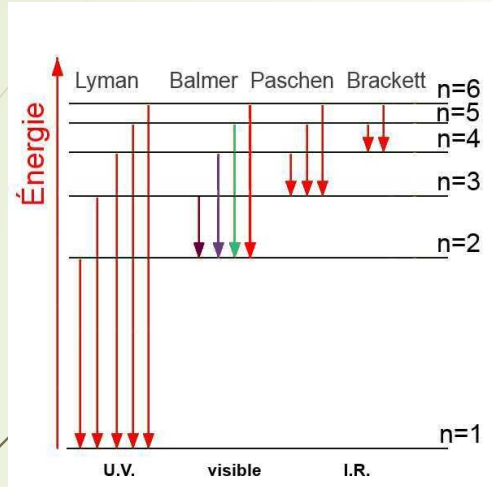


Les électrons dans les atomes ne peuvent occuper que des **états quantifiés (discrets) d'énergie**. Par interaction avec une onde électromagnétique (photon), ils peuvent passer d'un niveau d'énergie à un autre.

Absorption/émission spontanée
d'un photon entre 2 niveaux d'énergie E_1 et E_2



Les fréquences d'émission de l'hydrogène expliquées



La signature électromagnétique de l'hydrogène

[laboiteaphysique](http://laboiteaphysique.com)

Énergie de l'onde (lumière) émise

$$F_{(réquence)} = \frac{E_1 - E_2}{h}$$

Applications : lampes LED, lasers, scanners, etc...

Les **molécules** composées d'atomes dans leur état fondamental ont des modes collectifs d'excitation : vibration, torsion ou rotation
Avec des énergies quantifiées.

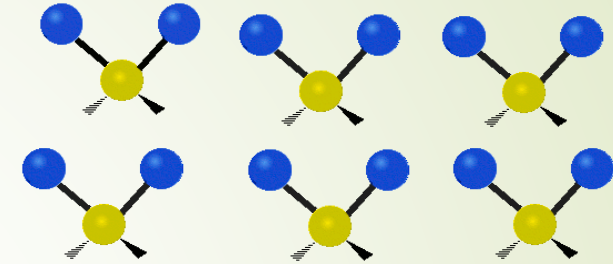
Ces états excités :

- peuvent être initiés par **absorption** d'ondes électromagnétiques à la bonne fréquence $h\nu$
- Ou se désexciter par **émission** d'onde de fréquence $h\nu$

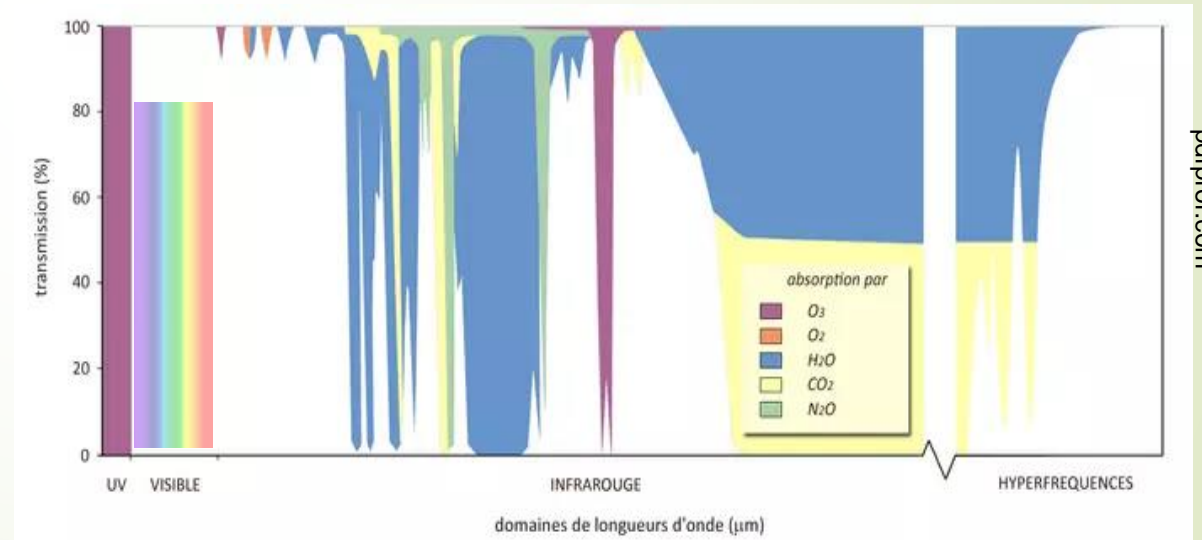


Le four à micro-ondes

Énergie d'excitation moléculaire



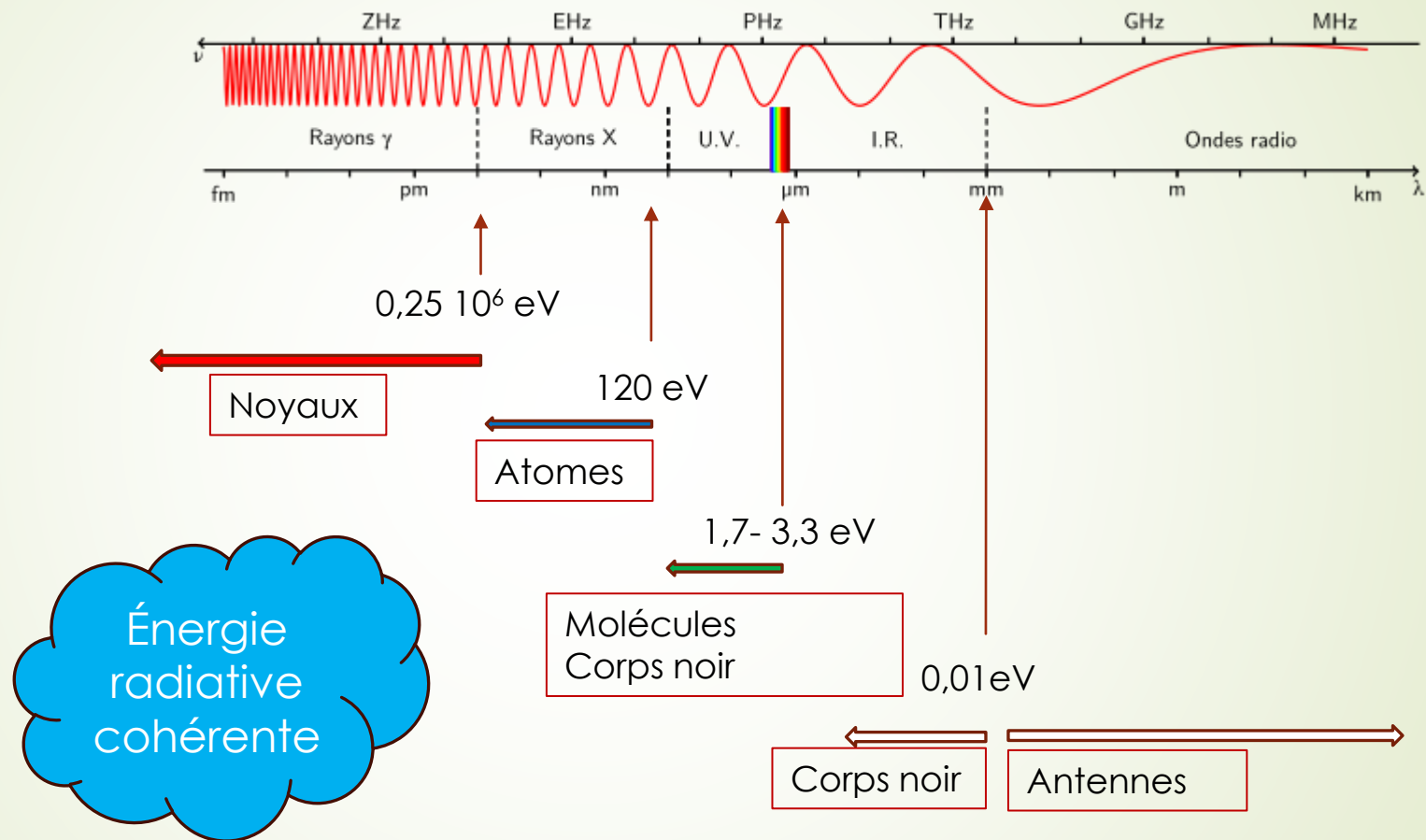
Modes de vibration d'une molécule – H₂O ou CO₂ (Wikipédia : [Vibration moléculaire](#))



L'atmosphère terrestre et l'effet de serre

Énergies des ondes électromagnétiques

46



- Quatre forces fondamentales sont les sources de l'énergie de l'univers, énergie constante depuis son origine
- L'énergie gravitationnelle, toujours attractive mais très faible, n'intervient que dans l'interaction entre les grandes masses (cosmologie)
- Les forces nucléaires de très courte portée sont à l'origine de la cohésion de la matière et déterminent l'énergie des noyaux atomiques
- La fission des noyaux lourds est source d'énergie, avec production de nombreux noyaux fils radioactifs
- La fusion des noyaux légers est source de l'énergie des étoiles (dont notre Soleil), avec la synthèse de tous les éléments constituant notre Univers
- Les forces électromagnétiques, à longue portée entre charges électriques positives ou négatives, sont à l'origine des ondes électromagnétiques (radio, lumière, rayons X,...)
- **Les changements d'états des électrons dans les atomes ou les excitations collectives des molécules, sont à l'origine de l'absorption ou de l'émission d'ondes électromagnétiques (énergie radiative cohérente)**

L'énergie électromagnétique
chimique

Énergie initiale de l'Univers

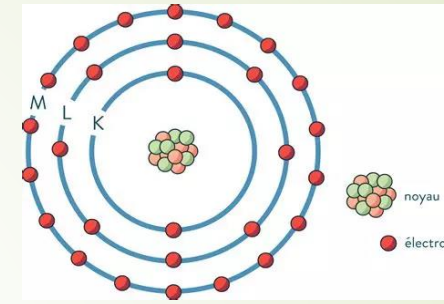
Énergie électromagnétique

Radiative (ondes)

Chimique

Électrique

Un atome neutre comporte autant de protons que d'électrons



Représentation imagée, mais **fausse**

La mécanique quantique implique que les électrons se répartissent en **couches** d'énergie ; chaque couche ne pouvant accueillir qu'un **nombre défini** d'électrons :

2 pour la couche la plus basse, 8 pour la suivante, etc.

→ Table de Mendeleïev

Tableau périodique des éléments chimiques

Les différents éléments atomiques résultent du remplissage successif de leurs niveaux d'énergie permis par les électrons : ce sont des **fermions** et, donc, vérifient le principe d'exclusion de Pauli.

Le tableau de Mendeleïev

PRINCIPE

Conçu en 1869 par le chimiste russe Dimitri Ivanovitch Mendeleïev, le tableau périodique classe tous les éléments chimiques selon leur numéro atomique et leurs propriétés chimiques. Quatre éléments ont été identifiés entre 2004 et 2010 et viennent d'être validés par l'Union internationale de chimie pure et appliquée (IUPAC).

Famille
Classement des éléments en fonction d'un comportement chimique proche.

- Non-métaux
- Métaux alcalins
- Métaux alcalino-terreux
- Métaux de transition
- Lanthanides (ou terres rares)
- Actinides
- Métaux pauvres
- Halogènes
- Gaz rares
- Métaux lourds

État physiques
Ne gaz Hq liquide Fe solide

Les données CEA Octobre 2016 N°21

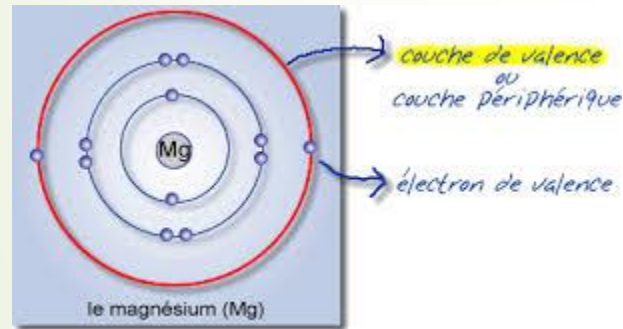
ATOMES

Toutes les animations et explications sur www.toutestquantique.fr

Dans leur état fondamental, les électrons occupent les couches d'énergie les plus basses. La dernière couche incomplète est la **couche de valence**.

Les réactions chimiques sont induites par des échanges d'électrons de valence. Selon le principe que la stabilité maximum d'un atome intervient lorsque ses couches ont complètes :

- Les atomes ayant une couche de valence **très incomplète** sont **donneurs** d'électrons
- Les atomes ayant une couche de valence **presque complète** sont **accepteurs** d'électrons
- Les atomes ayant leurs couches **complètes** sont **inertes** chimiquement (gaz rares)

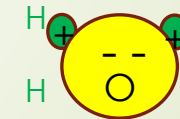


Colonne	famille	nombre d'électrons de valence
1	métaux alcalins	1
2	métaux alcalinoterreux	2
13	famille du bore	3
14	famille du carbone	4
15	famille de l'azote	5
16	famille de l'oxygène (chalcogènes)	6
17	halogènes	7
18	gaz rares	pleine (2 ou 8)

Source : unamur.be



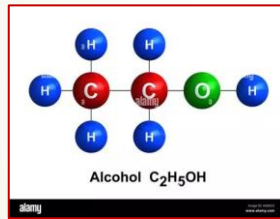
Exemple : La molécule d'eau H_2O → Les 2 atomes d'hydrogène H « donnent » leur électron de valence à l'oxygène O auquel il en manque 2



4 trous dans la couche de valence



Alcool éthylique



Structure d'une protéine

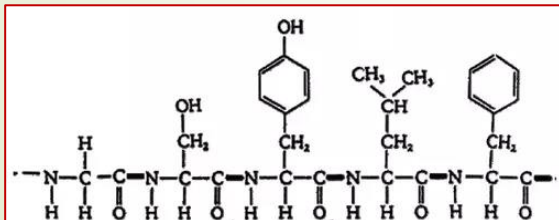


Tableau périodique des éléments chimiques

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18		
1 H 1,00794	2 He 4,002602											3 Li 6,941	4 Be 9,0121831	5 B 10,811	6 C 12,0107	7 N 14,00643	8 O 15,9994	9 F 18,9984032	10 Ne 20,1797
3 Na 22,98976928	4 Mg 24,304											13 Al 26,9815385	14 Si 28,0855	15 P 30,97376203	16 S 32,065	17 Cl 35,453	18 Ar 39,948		
19 K 39,0983	20 Ca 40,078	21 Sc 44,955912	22 Ti 47,8871	23 V 50,9415	24 Cr 51,9961	25 Mn 54,938044	26 Fe 55,845	27 Co 58,933194	28 Ni 58,6934	29 Cu 63,546	30 Zn 65,38	31 Ga 69,7231	32 Ge 72,630	33 As 74,9216	34 Se 78,9718	35 Br 79,904	36 Kr 83,798		
37 Rb 85,4678	38 Sr 87,62	39 Y 88,90584	40 Zr 91,224	41 Nb 92,90637	42 Mo 95,94	43 Tc 98,9062	44 Ru 101,072	45 Rh 102,9055	46 Pd 106,4218	47 Ag 107,8682	48 Cd 112,4118	49 In 114,818	50 Sn 118,710	51 Sb 121,757	52 Te 127,603	53 I 126,90547	54 Xe 131,29		
55 Cs 132,90545196	56 Ba 137,327	Lanthanides 57-71		72 Hf 178,49	73 Ta 180,94788	74 W 183,84	75 Re 186,207	76 Os 190,23	77 Ir 192,222	78 Pt 195,084	79 Au 196,966569	80 Hg 200,596	81 Tl 204,38	82 Pb 207,2	83 Bi 208,9804	84 Po 209	85 At 210	86 Rn 222	
87 Fr 223	88 Ra 226	Actinides 89-103		104 Rf 261	105 Db 262	106 Sg 263	107 Bh 264	108 Hs 265	109 Mt 266	110 Ds 267	111 Rg 268	112 Cn 269	113 Nh 270	114 Fl 271	115 Mc 272	116 Lv 273	117 Ts 274	118 Og 276	
		57 La 138,9047	58 Ce 140,116	59 Pr 140,90766	60 Nd 144,242	61 Pm 144,9126	62 Sm 150,36	63 Eu 151,964	64 Gd 157,25	65 Tb 158,92534	66 Dy 162,50015	67 Ho 164,93033	68 Er 167,259	69 Tm 168,93402	70 Yb 173,046	71 Lu 174,967			
		89 Ac 227	90 Th 232,0377	91 Pa 231,03688	92 U 238,02891	93 Np 237	94 Pu 244	95 Am 243	96 Cm 247	97 Bk 247	98 Cf 251	99 Es 252	100 Fm 257	101 Md 258	102 No 259	103 Lr 260			

Décarboner la Terre – Non
 Défossiliser l'économie - Oui

- Quatre forces fondamentales sont les sources de l'énergie de l'univers, énergie constante depuis son origine
- L'énergie gravitationnelle, toujours attractive mais très faible, n'intervient que dans l'interaction entre les grandes masses (cosmologie)
- Les forces nucléaires de très courte portée sont à l'origine de la cohésion de la matière et déterminent l'énergie des noyaux atomiques
- La fission des noyaux lourds est source d'énergie, avec production de nombreux noyaux fils radioactifs
- La fusion des noyaux légers est source de l'énergie des étoiles (dont notre Soleil), avec la synthèse de tous les éléments constituant notre Univers
- Les forces électromagnétiques, à longue portée entre charges électriques positives ou négatives, sont à l'origine des ondes électromagnétiques (radio, lumière, rayons X,...)
- Les changements d'états des électrons dans les atomes ou les excitations collectives des molécules, sont à l'origine de l'absorption ou de l'émission d'ondes électromagnétiques (énergie radiative cohérente)
- **L'énergie chimique résulte des échanges d'électrons périphériques entre les atomes**

L'énergie électromagnétique
électrique

Énergie initiale de l'Univers

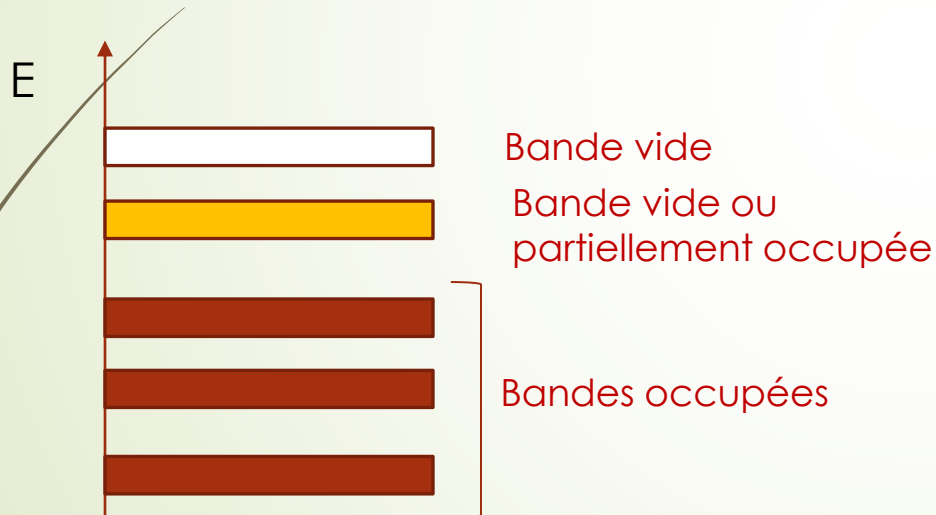
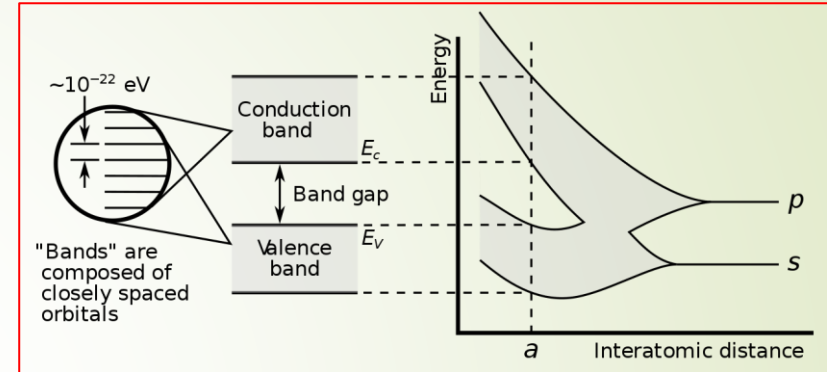
Énergie électromagnétique

Radiative (ondes)

Chimique

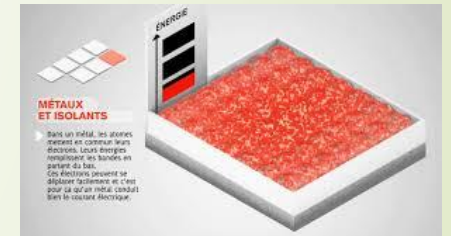
Électrique

Les atomes d'un réseau cristallin régulier constituent un **réseau de puits de potentiel** dont les niveaux d'énergie -dédoublés à l'infini- forment des **bandes de niveaux « permis »** séparées par des zones sans niveaux (**bandes interdites**)

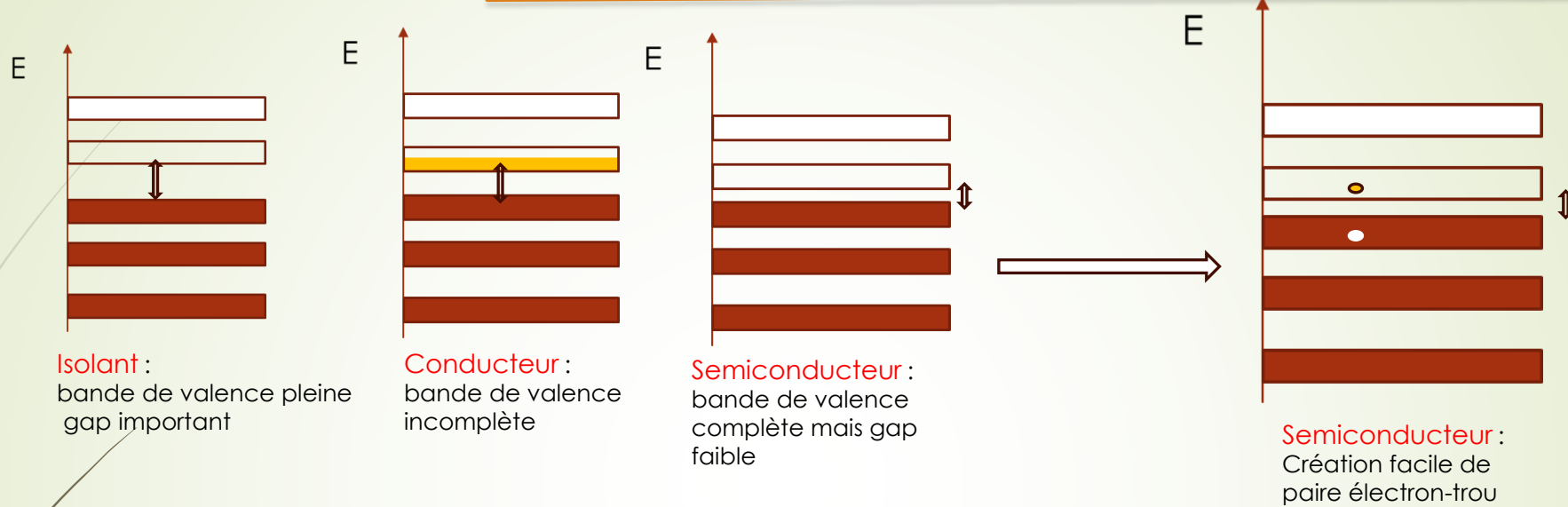


Les électrons des bandes partiellement occupées sont mobiles **et peuvent conduire le courant**

Les électrons des bandes occupées sont liés et non mobiles – **ils ne peuvent conduire le courant**



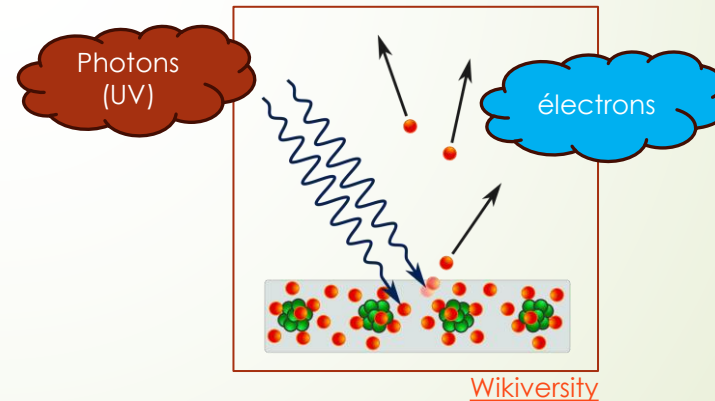
Effet photoélectrique



Effet photoélectrique



Ou introduire des impuretés (**dopant**) pour
modifier la structure de bandes → **transistor**



Pourquoi le courant électrique chauffe-t-il les fils conducteurs ?

Le courant électrique : mouvement des électrons dans les solides

Vitesse collective lente (40 cm/h pour une intensité de 1 A) + agitation thermique

Résistance au courant

Les chocs avec les atomes du solide

→ vibrations

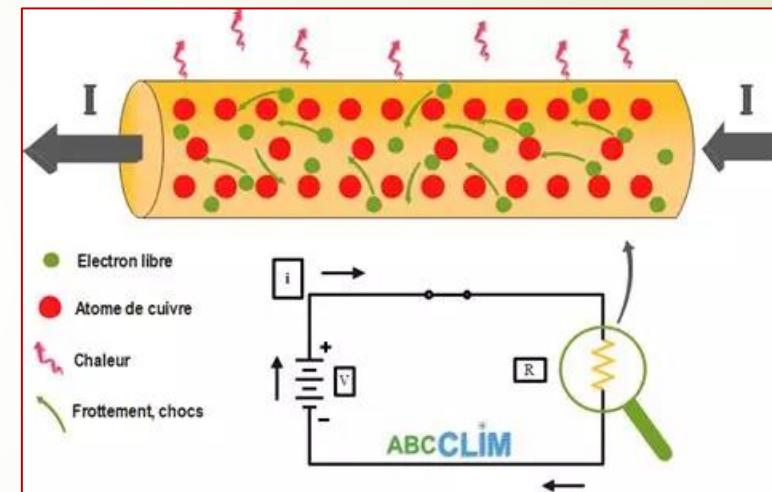
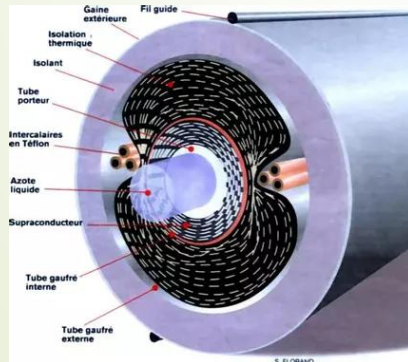
→ transfert d'énergie au solide

$$R(\text{ohm}) = \rho \frac{l}{S}$$

← Longueur du fil

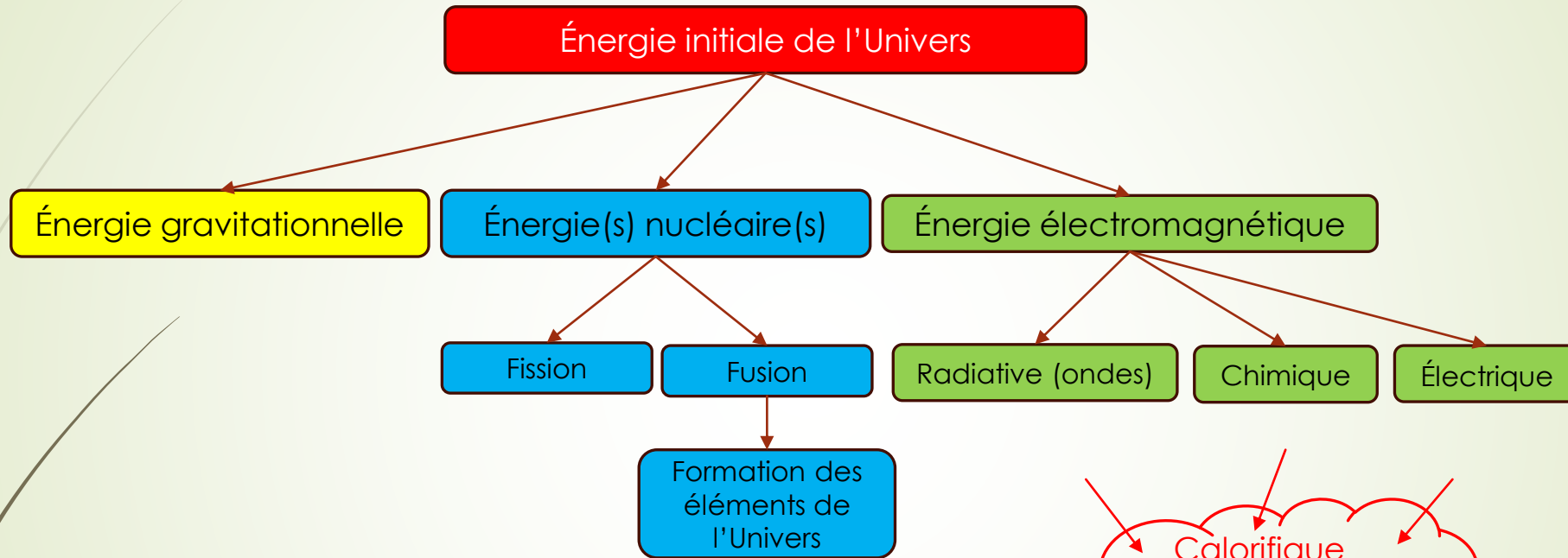
Dépend du métal/isolant

← section du fil

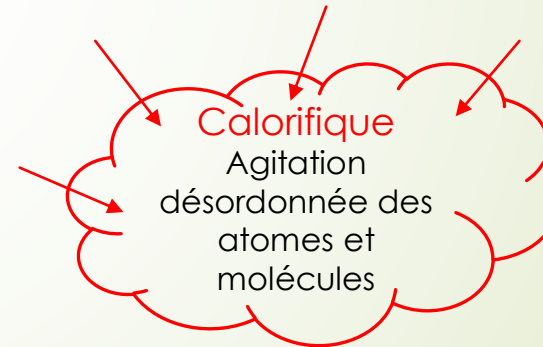


Les supraconducteurs $R = 0$, en dessous d'un seuil de température
 Au CERN alliage Niobium-Titane 10 K (-263°C)

- Quatre forces fondamentales sont les sources de l'énergie de l'univers, énergie constante depuis son origine
- L'énergie gravitationnelle, toujours attractive mais très faible, n'intervient que dans l'interaction entre les grandes masses (cosmologie)
- Les forces nucléaires de très courte portée sont à l'origine de la cohésion de la matière et déterminent l'énergie des noyaux atomiques
- La fission des noyaux lourds est source d'énergie, avec production de nombreux noyaux fils radioactifs
- La fusion des noyaux légers est source de l'énergie des étoiles (dont notre Soleil), avec la synthèse de tous les éléments constituant notre Univers
- Les forces électromagnétiques, à longue portée entre charges électriques positives ou négatives, sont à l'origine des ondes électromagnétiques (radio, lumière, rayons X,...)
- Les changements d'états des électrons dans les atomes ou les excitations collectives des molécules, sont à l'origine de l'absorption ou de l'émission d'ondes électromagnétiques (énergie radiative cohérente)
- Dans les solides, les électrons se répartissent en bandes d'énergie ; lorsque la bande la plus énergétique n'est pas complète, le matériau est conducteur



Le pont entre l'énergie microscopique et l'énergie à notre échelle



Formalisée au milieu du XIX^{ème} siècle par JC Maxwell pour l'étude **des gaz chauds**.
 À la suite des chocs, les molécules ont une vitesse aléatoire déterminée par une loi de probabilité

$$f(v) \sim v^2 e^{-\frac{mv^2}{2k_B T}}$$

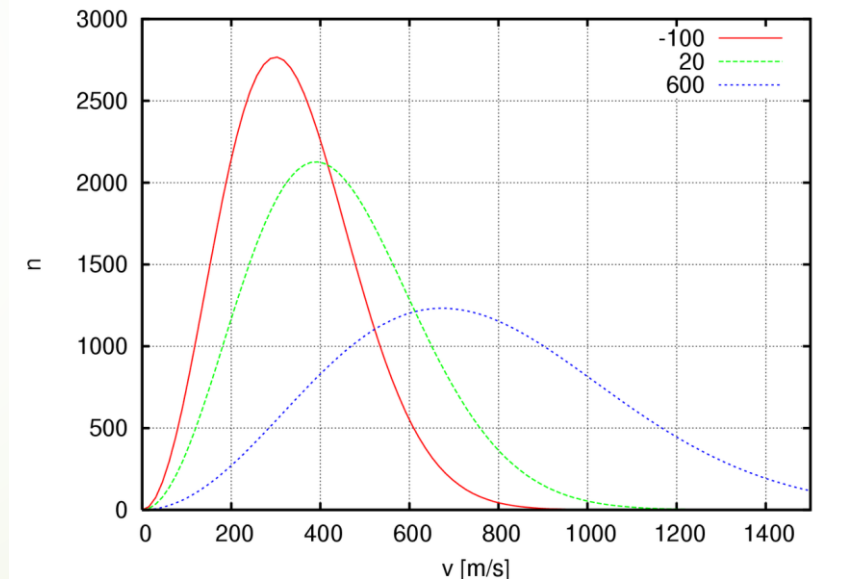
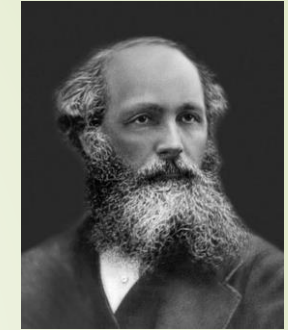
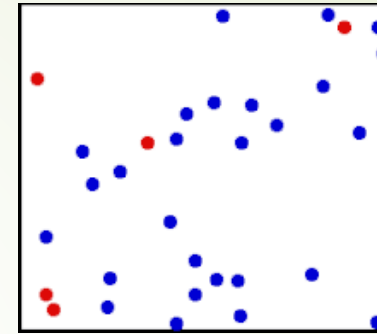
qui ne dépend que de la température T
 (m est la masse des particules et k_B une constante)

Température liée à la vitesse moyenne des molécules

$$\langle v \rangle^2 = \frac{3kT}{m}$$

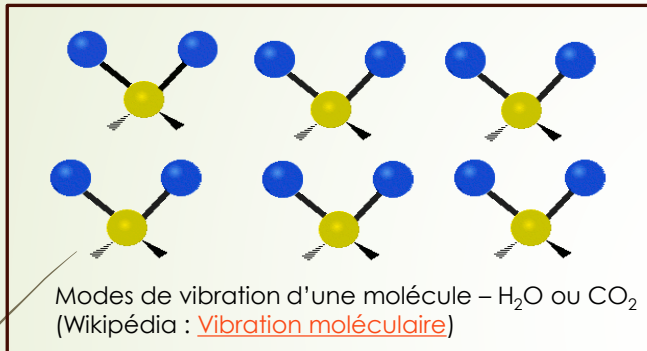
Chaleur = énergie cinétique des molécules (mouvement désordonné)

Qu'est-ce que la chaleur ?

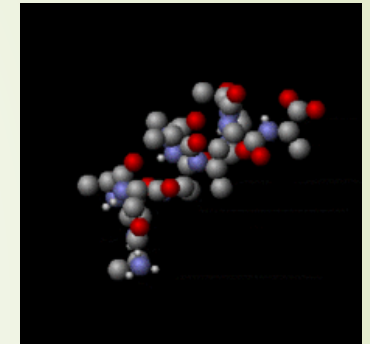


Distribution de la norme de la vitesse de molécules d'oxygène, à -100 °C , 20 °C et 600 °C ([Wikipédia](#))

Généralisation de la théorie des gaz (Maxwell-Boltzmann) à tous les corps chauds
 → **le corps noir** (qui absorbe toutes les longueurs d'onde)



Le monde de l'infiniment petit est agité de **mouvements désordonnés** dont l'énergie (quantifiée) ne dépend que de la température.



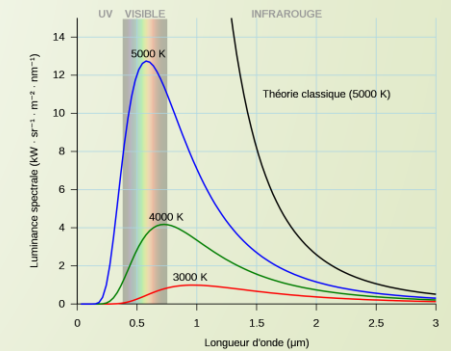
Un corps « noir » à une température T émet des ondes électromagnétiques dans tout le spectre (Loi de Planck):

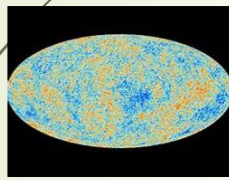
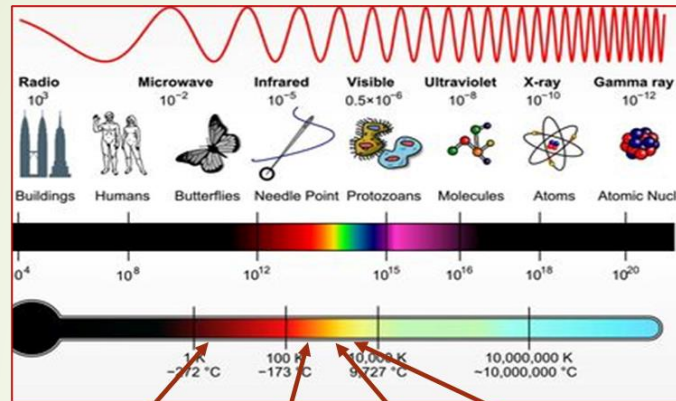
$$L_{\Omega, \nu}^c(\nu, T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$$



Les couleurs du fer chauffé

Le travail du métal





2,3° K



300° K



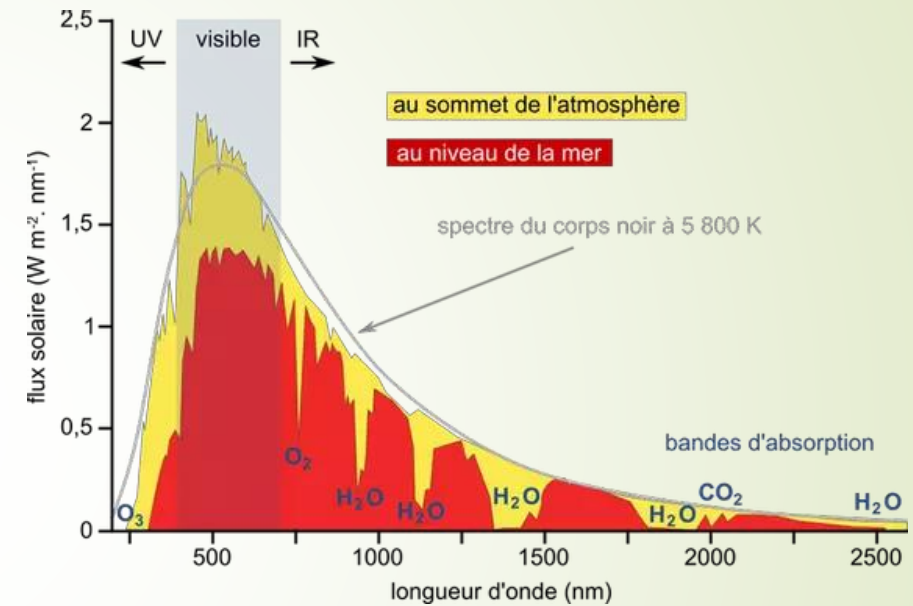
1 500° K



5 800° K

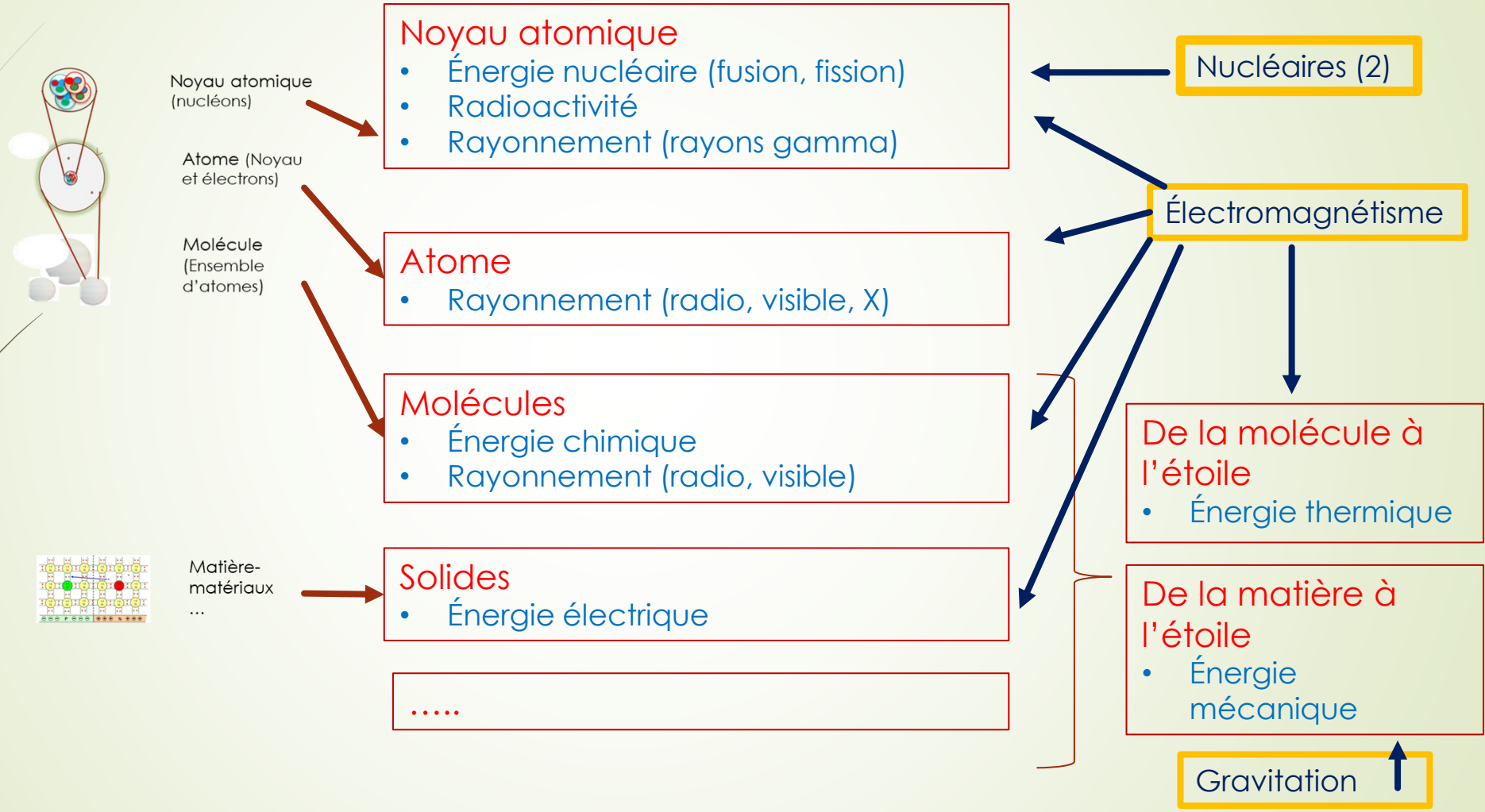
Fausses couleurs

Le corps humain émet des ondes dans l'infra-rouge



Le Soleil est un corps noir –imparfait– à une température de 5 800 K, dont le rayonnement est filtré par l'atmosphère.

- Quatre forces fondamentales sont les sources de l'énergie de l'univers, énergie constante depuis son origine
- L'énergie gravitationnelle, toujours attractive mais très faible, n'intervient que dans l'interaction entre les grandes masses (cosmologie)
- Les forces nucléaires de très courte portée sont à l'origine de la cohésion de la matière et déterminent l'énergie des noyaux atomiques
- La fission des noyaux lourds est source d'énergie, avec production de nombreux noyaux fils radioactifs
- La fusion des noyaux légers est source de l'énergie des étoiles (dont notre Soleil), avec la synthèse de tous les éléments constituant notre Univers
- Les forces électromagnétiques, à longue portée entre charges électriques positives ou négatives, sont à l'origine des ondes électromagnétiques (radio, lumière, rayons X,...)
- Les changements d'états des électrons dans les atomes ou les excitations collectives des molécules, sont à l'origine de l'absorption ou de l'émission d'ondes électromagnétiques (énergie radiative cohérente)
- Dans les solides, les électrons se répartissent en bandes d'énergie ; lorsque la bande la plus énergétique n'est pas complète, le matériau est conducteur
- L'énergie calorifique résulte de l'agitation désordonnée des atomes et des molécules (croissante avec la température); cette agitation est la source d'émission électromagnétiques (énergie radiative incohérente)



Gravitation

Nucléaires

Électro-
magnétiques

- **Quatre forces fondamentales** sont les sources de l'énergie de l'univers, énergie constante depuis son origine
- **L'énergie gravitationnelle**, toujours attractive mais très faible, n'intervient que dans l'interaction entre les grandes masses (cosmologie)
- Les **forces nucléaires** de très courte portée sont à l'origine de la cohésion de la matière et déterminent l'énergie des noyaux atomiques
- La **fission des noyaux lourds** est source d'énergie, avec production de nombreux noyaux fils radioactifs
- La **fusion des noyaux légers** est source de l'énergie des étoiles (dont notre Soleil), avec la synthèse de tous les éléments constituant notre Univers
- Les **forces électromagnétiques**, à longue portée entre charges électriques positives ou négatives, sont à l'origine des **ondes électromagnétiques** (radio, lumière, rayons X,...)
- Les changements d'états des électrons dans les **atomes** ou les excitations collectives des **molécules**, sont à l'origine de **l'absorption** ou de **l'émission d'ondes** électromagnétiques (énergie radiative **cohérente**)
- **Dans les solides**, les électrons se répartissent en bandes d'énergie ; lorsque la bande la plus énergétique n'est pas complète, le matériau est **conducteur**
- **L'énergie calorifique** résulte de l'agitation désordonnée des atomes et des molécules (croissante avec la température); cette agitation est la source d'émission électromagnétiques (énergie radiative **incohérente**)

Les caractéristiques des différentes formes d'énergie à notre échelle sont liées aux propriétés de l'énergie dans l'infiniment petit

Pour aller plus loin sur l'énergie?

Des vidéo conférences sur la chaîne YouTube : [la Science de Bernie](#)



Mon blog <https://un-peu-de-physique.fr/>
Des cours, des ressources...

Des podcasts sur Spotify : [La science de Bernie](#)



Des cours en ligne ou présentiels à l'Université
Permanente de Nantes : <https://up.univ-nantes.fr/>