

Le Tableau Périodique des éléments chimiques

Groupe → I A		Tableau périodique des éléments chimiques																VIII A											
Période ↓ 1																		18											
1	Hydrogène 1 H 1,007975																	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																	Aluminium 13 Al 26,9815385	Silicium 14 Si 28,085 (1)	Phosphore 15 P 30,97376200	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	Mercury 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]	Meitnerium 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]										
		Lanthane 57 La 138,90547	Cérium 58 Ce 140,116 (1)	Praséodyme 59 Pr 140,90766	Néodyme 60 Nd 144,242 (3)	Prométhium 61 Pm [145]	Samarium 62 Sm 150,36 (2)	Europium 63 Eu 151,964 (1)	Gadolinium 64 Gd 157,25 (3)	Terbium 65 Tb 158,92535	Dysprosium 66 Dy 162,500 (1)	Holmium 67 Ho 164,93033	Erbium 68 Er 167,259 (3)	Thulium 69 Tm 168,93422	Ytterbium 70 Yb 173,045	Lutécium 71 Lu 174,9668													
		Actinium 89 Ac [227]	Thorium 90 Th 232,0377	Protactinium 91 Pa 231,03588	Uranium 92 U 238,02891	Neptunium 93 Np [237]	Plutonium 94 Pu [244]	Américium 95 Am [243]	Curium 96 Cm [247]	Berkélium 97 Bk [247]	Californium 98 Cf [251]	Einsteinium 99 Es [252]	Fermium 100 Fm [257]	Mendélévium 101 Md [258]	Nobélium 102 No [259]	Lawrencium 103 Lr [266]													
Métaux																				Non métaux									
Alcalins		Alcalino-terreux	Lanthanides	Actinides	Métaux de transition	Métaux pauvres	Métalloïdes	Autres non-métaux	Halogènes	Gaz nobles	Non classés		primordial		désintégration d'autres éléments		synthétique												

Le Tableau Périodique des éléments chimiques

I – Les particules élémentaires

II – Les 4 interactions fondamentales

III – La formation des atomes

IV – La stabilité des atomes

V – Les modèles de l'atome

VI – Structure électronique des atomes

VII – Structure du Tableau périodique

VIII – Propriétés périodiques des éléments chimique

I – Les particules élémentaires

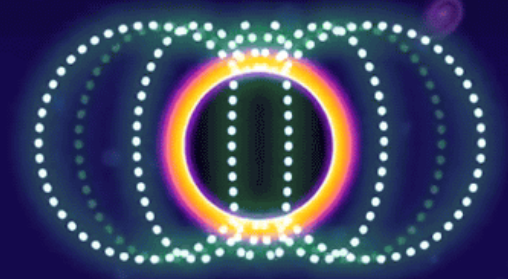
Les 3 propriétés « intrinsèques » des particules



Mass



Spin



Charge

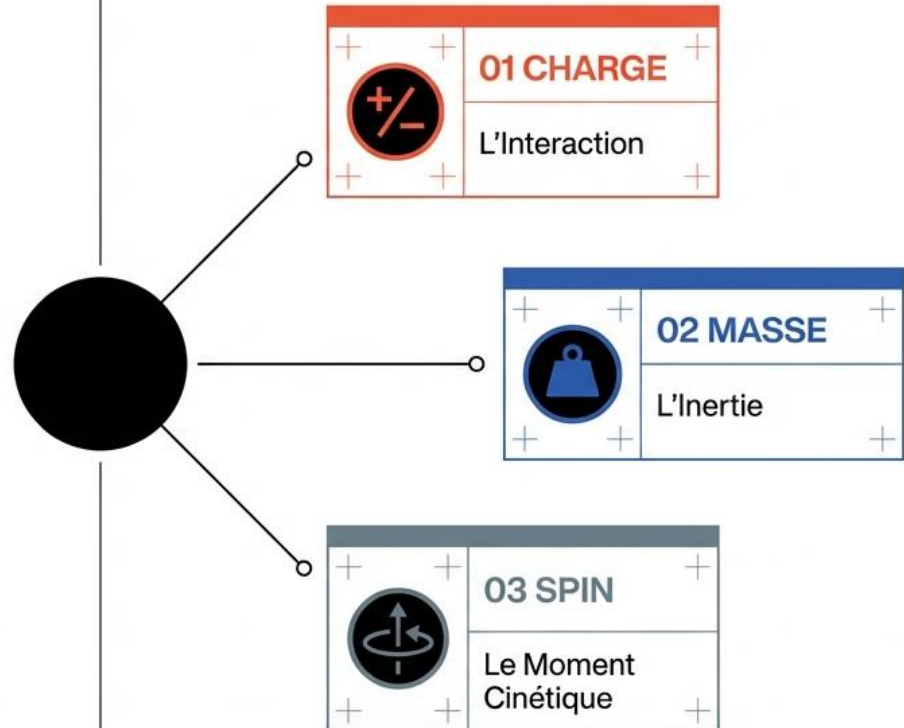
I – Les particules élémentaires

Scientific Editorial

La carte d'identité quantique

Chaque particule de l'univers est définie, catégorisée et gouvernée par trois caractéristiques immuables. Ce sont les coordonnées de son existence.

1. La Charge Électrique
2. La Masse
3. Le Spin



I – Les particules élémentaires

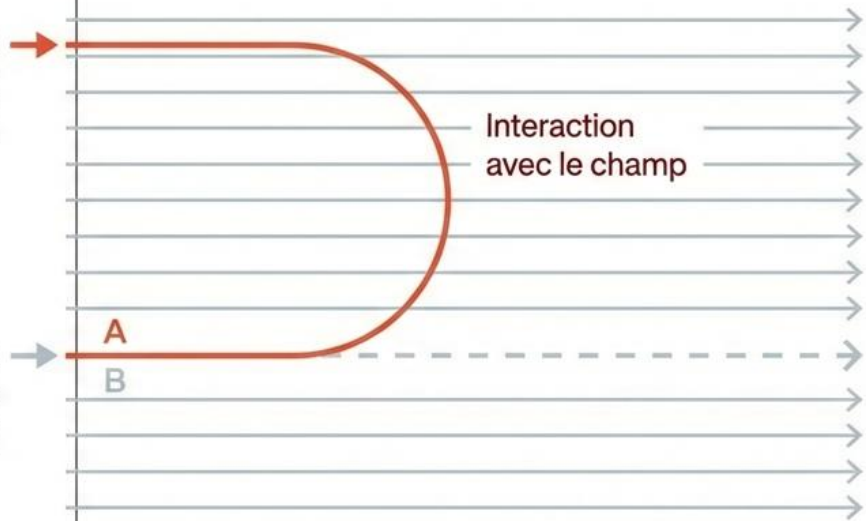
1. La Charge Électrique

La sensibilité à la force électromagnétique

La charge n'est pas simplement du « plus » ou du « moins ». C'est la propriété qui détermine comment une particule réagit à un champ électromagnétique. Sans charge, une particule est invisible à l'électricité et au magnétisme.

Particule
Chargée
(Sensible)

Particule
Neutre
(Invisible)



I – Les particules élémentaires

Unité de la charge électrique : Le Coulomb (C)

L'architecte de la structure atomique

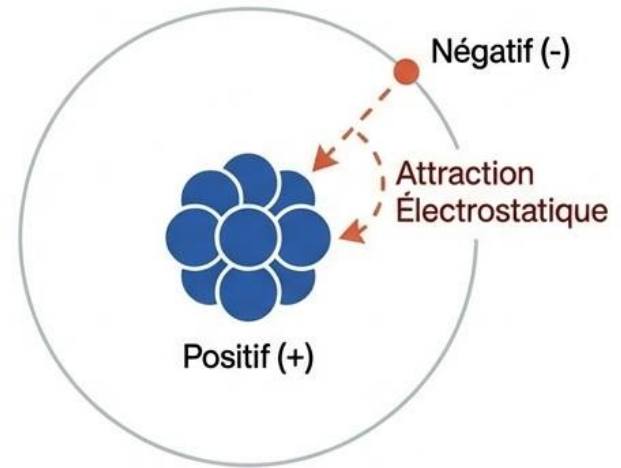
La charge existe sous deux formes opposées : positive et négative. Cette dualité crée les forces d'attraction et de répulsion qui permettent aux électrons de se lier aux noyaux.

C'est la charge électrique qui assure la cohésion de toute la matière visible autour de nous.

Elementary charge

$$e = 1.602176634 \times 10^{-19} \text{ C}$$

$-1e$ $+1e$



I – Les particules élémentaires

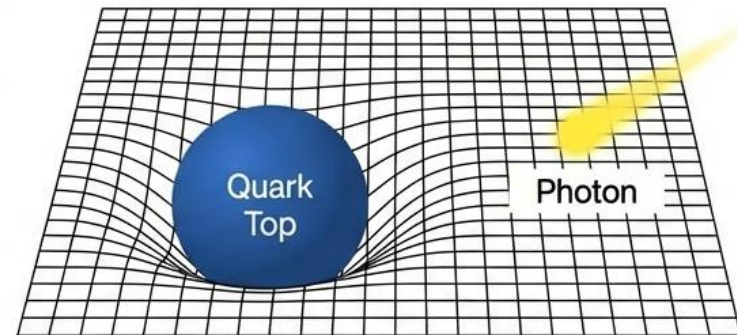
Unité de la masse : (**kg**)

2. La Masse

La mesure de l'inertie

En physique des particules, la masse est la résistance qu'oppose un objet à tout changement de mouvement. C'est aussi une forme d'énergie condensée, régie par l'équivalence $E=mc^2$.

Certaines particules, comme le photon, sont sans masse et condamnées à voyager éternellement à la vitesse de la lumière.



Forte Inertie
Vitesse < c

Aucune Inertie
Vitesse = c

I – Les particules élémentaires

Masse et unités de masse

$$E = mc^2 \quad \text{--->} \quad m = E / c^2 \quad (\text{J} / c^2)$$

♦ Conversion énergie

$$1 \text{ eV} = 1,60 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$E = mc^2 \quad \text{--->} \quad m = E / c^2 \quad (\text{eV} / c^2)$$

2 – Unité de masse atomique (u ou uma)

$$1 \text{ u} = \frac{1}{12} \text{ de la masse de l'atome } ^{12}\text{C}$$

$$1 \text{ u} = 1,6605 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 931,5 \text{ MeV} / c^2$$

I – Les particules élémentaires

Masse de l'électron, du proton et du neutron

Conversion masse–énergie (particules élémentaires)

Particule	Masse (kg)	Masse (u)	Énergie de masse E_0 (J)	Énergie de masse (MeV)
Électron (e^-)	$9,11 \times 10^{-31}$	$5,49 \times 10^{-4}$	$8,19 \times 10^{-14}$	0,511 MeV
Proton (p)	$1,67 \times 10^{-27}$	1,0073	$1,50 \times 10^{-10}$	938,3 MeV
Neutron (n)	$1,675 \times 10^{-27}$	1,0087	$1,51 \times 10^{-10}$	939,6 MeV

I – Les particules élémentaires

Scientific Editorial

3. Le Spin

Le moment cinétique intrinsèque

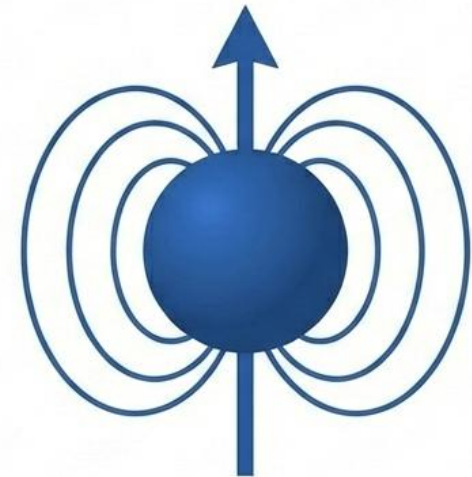
Le spin est une propriété purement quantique. Bien que le nom suggère une rotation, la particule ne « tourne » pas physiquement sur elle-même.

Il s'agit plutôt d'une orientation angulaire intrinsèque, une signature magnétique propre à la particule dès sa création.

Correction



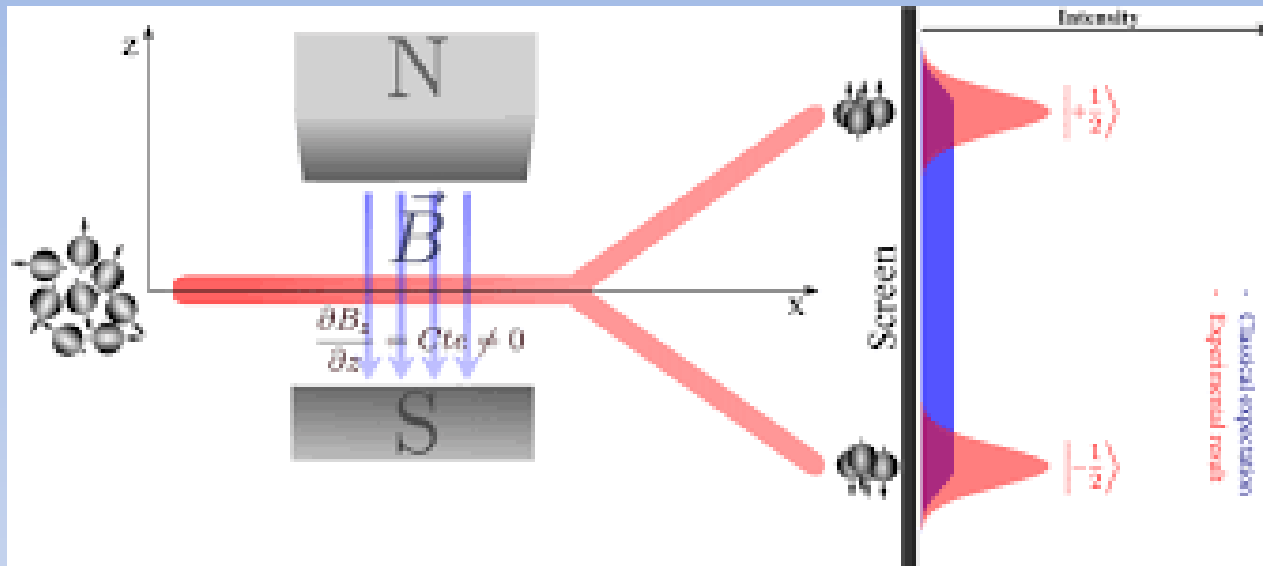
Analogie Classique
(Faux)



Réalité Quantique
(Moment Intrinsèque)

I – Les particules élémentaires

Expérience de Stern et Gerlach - 1922



Plaque commémorative de l'expérience portant l'effigie des deux physiciens au siège de la Physikalische Verein à Francfort-sur-le-Main

I – Les particules élémentaires

Le Spin des Particules : Une Propriété Fondamentale

Le spin est une caractéristique intrinsèque et fondamentale des particules élémentaires, cruciale pour comprendre le magnétisme de la matière.



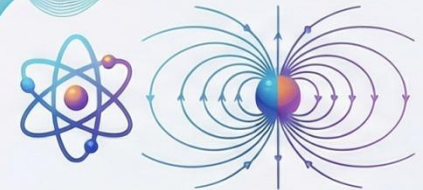
Moment Cinétique Intrinsèque

Le spin décrit comment l'état d'une particule change lors d'une rotation.



Propriété Fondamentale

C'est une caractéristique de base d'une particule, comme sa masse ou sa charge.



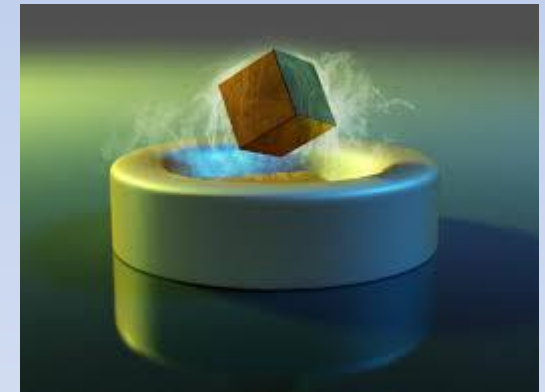
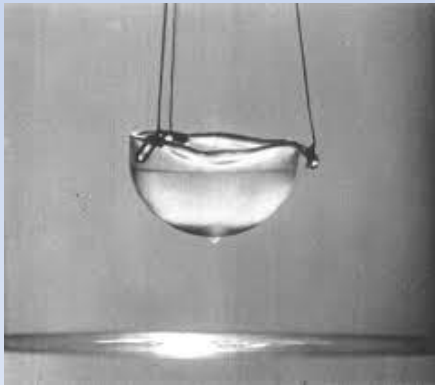
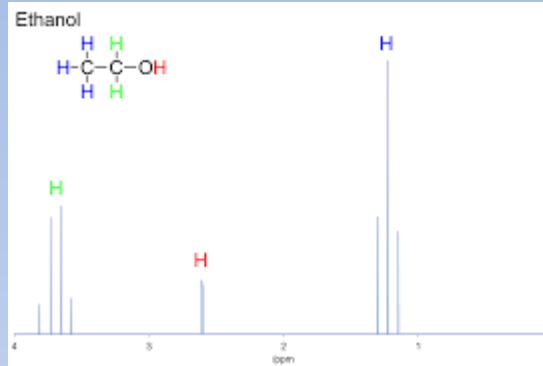
Origine du Magnétisme

À l'échelle subatomique, le spin est responsable des propriétés magnétiques.

I – Les particules élémentaires

Le spin - Applications :

- *Spectro RMN*
- *IRM*
- *Laser*
- *Supraconductivité*
- *Superfluidité*
- *Ordinateur quantique : qbit*



I – Les particules élémentaires

Scientific Editorial

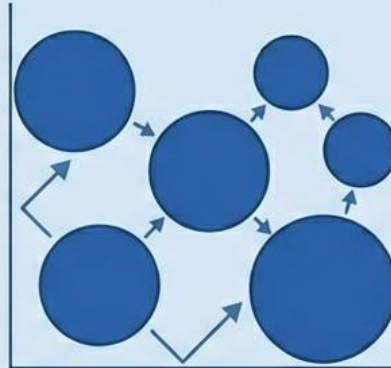
La classification par le Spin

La valeur du spin divise l'univers des particules en deux grandes familles fondamentales :

FERMIONS

Spin $1/2$ (Matière)

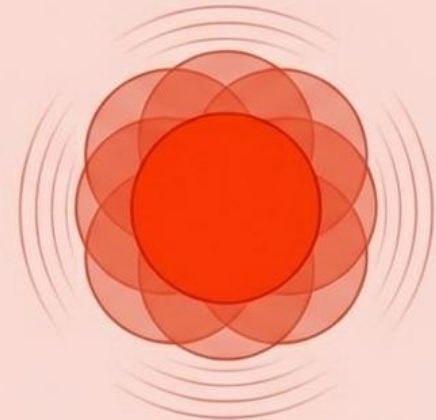
Ils occupent de l'espace et ne peuvent se superposer (Principe d'exclusion).



BOSONS

Spin Entier (Forces)

Ils peuvent s'empiler au même endroit et former des champs de force.



I – Les particules élémentaires

Scientific Editorial

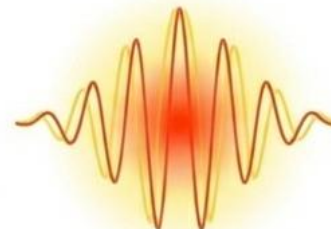
Comparatif : L'identité par les chiffres

L'ÉLECTRON



Charge : -1
Masse : Faible
Spin : $1/2$ (Matière)

LE PHOTON



Charge : 0
Masse : 0
Spin : 1 (Force)

En modifiant ces trois paramètres, nous passons d'une particule de matière tangible (électron) à un pur grain de lumière (photon).

I – Les particules élémentaires

Trois nombres pour tout décrire

Tout ce que nous voyons, touchons et expérimentons émerge de la combinaison de ces trois caractéristiques élémentaires.

Charge / Masse / Spin

0
1
0
0

0010 0100101101
00110 010111010
0110 1111100101
0000 0100100210
1100 1010111001

La Charge dicte l'interaction.

1
1
0
1

1100 1010100101
0111 0101001010
0011 0100101001
00000 101131000

La Masse dicte l'existence.

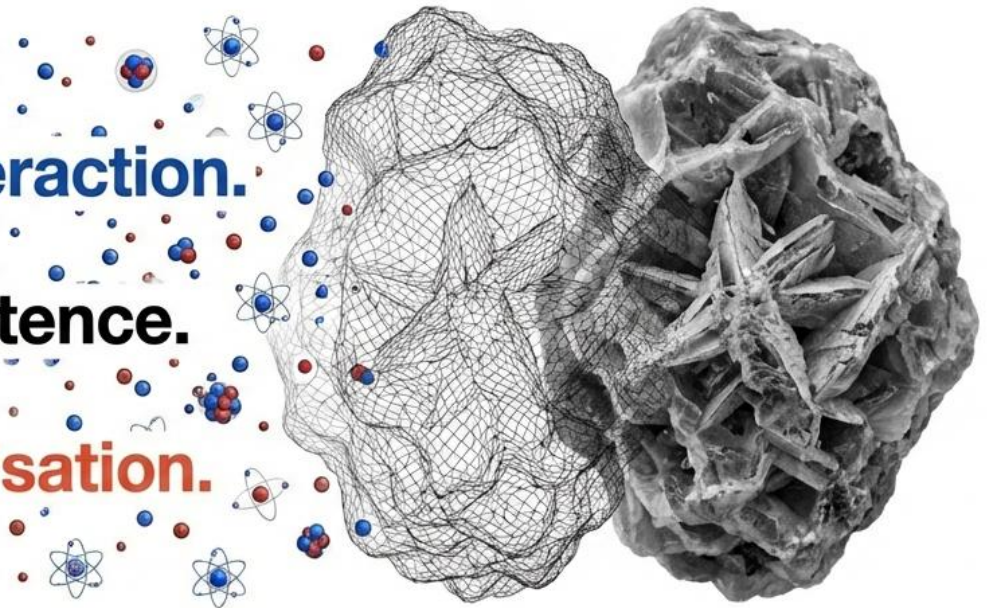
1
1
0
1

0100 2010100101
0110 0101010110
0100 0101101001
0010 0100010001

Le Spin dicte l'organisation.

1
0
1

0010 1010100110
01100010101011
0100 0101010100
0011 0100110110



I – Les particules élémentaires

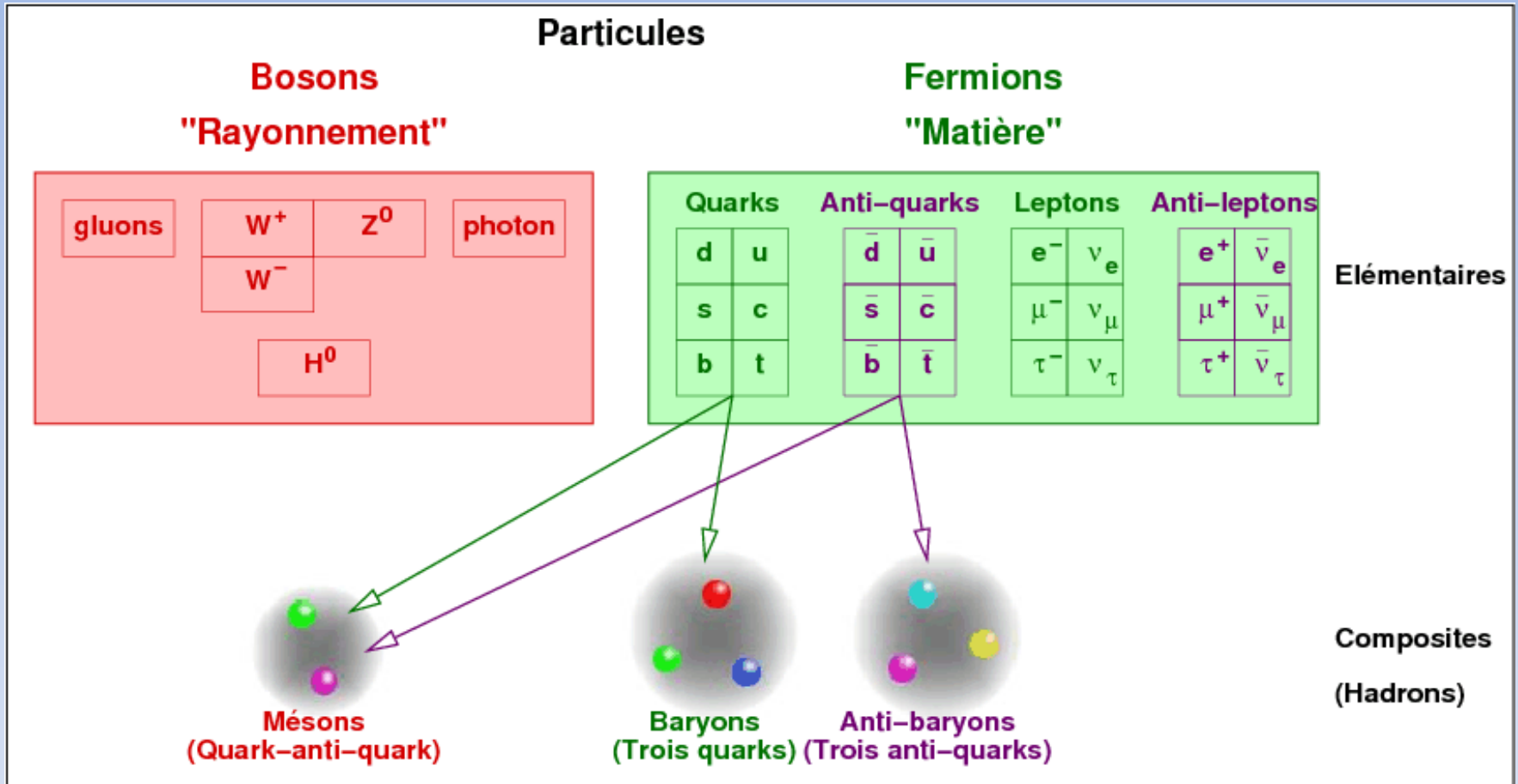
Modèle standard, particules élémentaires

trois générations de matière (fermions)				interactions / forces (bosons)	
	I	II	III		
masse	$\approx 2.16 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.273 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 172.57 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 125.2 \text{ GeV}/c^2$
	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
charge	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
QUARKS	u up	c charm	t top	g gluon	H boson de Higgs
	$\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 93.5 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.183 \text{ GeV}/c^2$	0	
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0	
LEPTONS	$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.77693 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 91.188 \text{ GeV}/c^2$	
	-1	-1	-1	0	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
BOSONS DE JAUGE	e électron	μ muon	τ tau	Z boson Z	
	$< 0.8 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 18.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 80.3692 \text{ GeV}/c^2$	
	0	0	0	± 1	
BOSONS VECTEURS	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
BOSONS SCALAIRES	ν_e neutrino électronique	ν_μ neutrino muonique	ν_τ neutrino tauique	W boson W	
	$< 0.8 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 18.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 80.3692 \text{ GeV}/c^2$	
	0	0	0	± 1	
BOSONS SCALAIRES	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	

BOSONS SCALAIRES

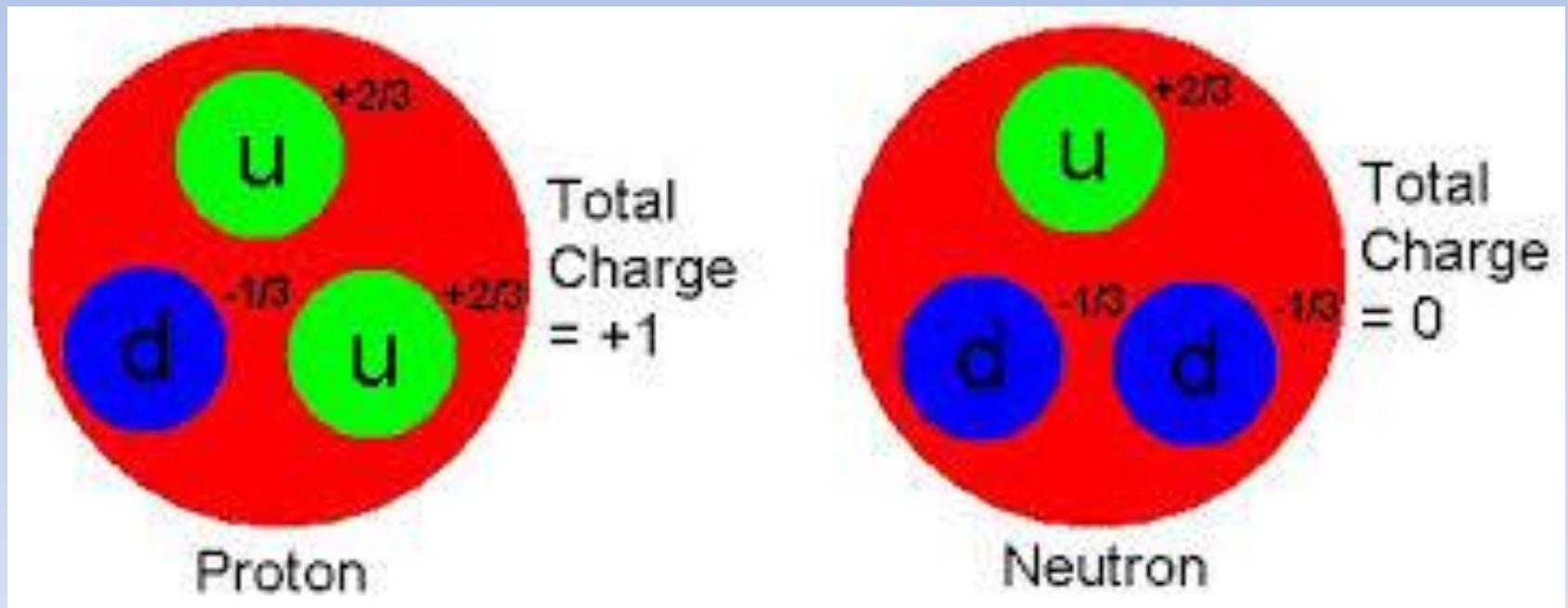
BOSONS DE JAUGE
BOSONS VECTEURS

I – Les particules élémentaires



I – Les particules élémentaires

- Les éléments chimiques du Tableau périodique constituent la « matière baryonique »
- Baryon = Hadron constitué de 3 quarks



I – Les particules élémentaires

Fermions

Leptons (spin 1/2)

Electron (Charge -1)	e^-	Electron Neutrino (Charge 0)	ν_e
Tau (Charge -1)	T	Tau Neutrino (Charge 0)	T_e
Muon (Charge -1)	μ	Muon Neutrino (Charge 0)	ν_μ

Quarks (spin 1/2)

Bottom Quark (Charge -1/3)	b	Up Quark (Charge 2/3)	u
Down Quark (Charge -1/3)	d	Top Quark (Charge 2/3)	t
Strange Quark (Charge -1/3)	s	Charm Quark (Charge 2/3)	c

Baryons (spin 1/2 2/3)

Proton (Charge +1)	P^+
Anti Proton (Charge -1)	$\bar{P}^-$
Neutron (Charge 0)	N^0
Lambda (Charge 0)	Λ^0
Omega (Charge -1)	Ω^-

Measons (spin 0, 1)

Pion (Charge +1)	π^+
Kaon (Charge -1)	K^-
Rho (Charge +1)	ρ^+
B-zero (Charge 0)	B^0
Eta-c (Charge 0)	η_c

- ❖ Any member of a group of subatomic particles having odd half-integral angular momentum (spin 1/2, 3/2).
- ❖ Fermions obey the Pauli exclusion principle, which forbids more than one particle of this type from occupying a single quantum state.
- ❖ Fermions include nuclei of odd mass number.

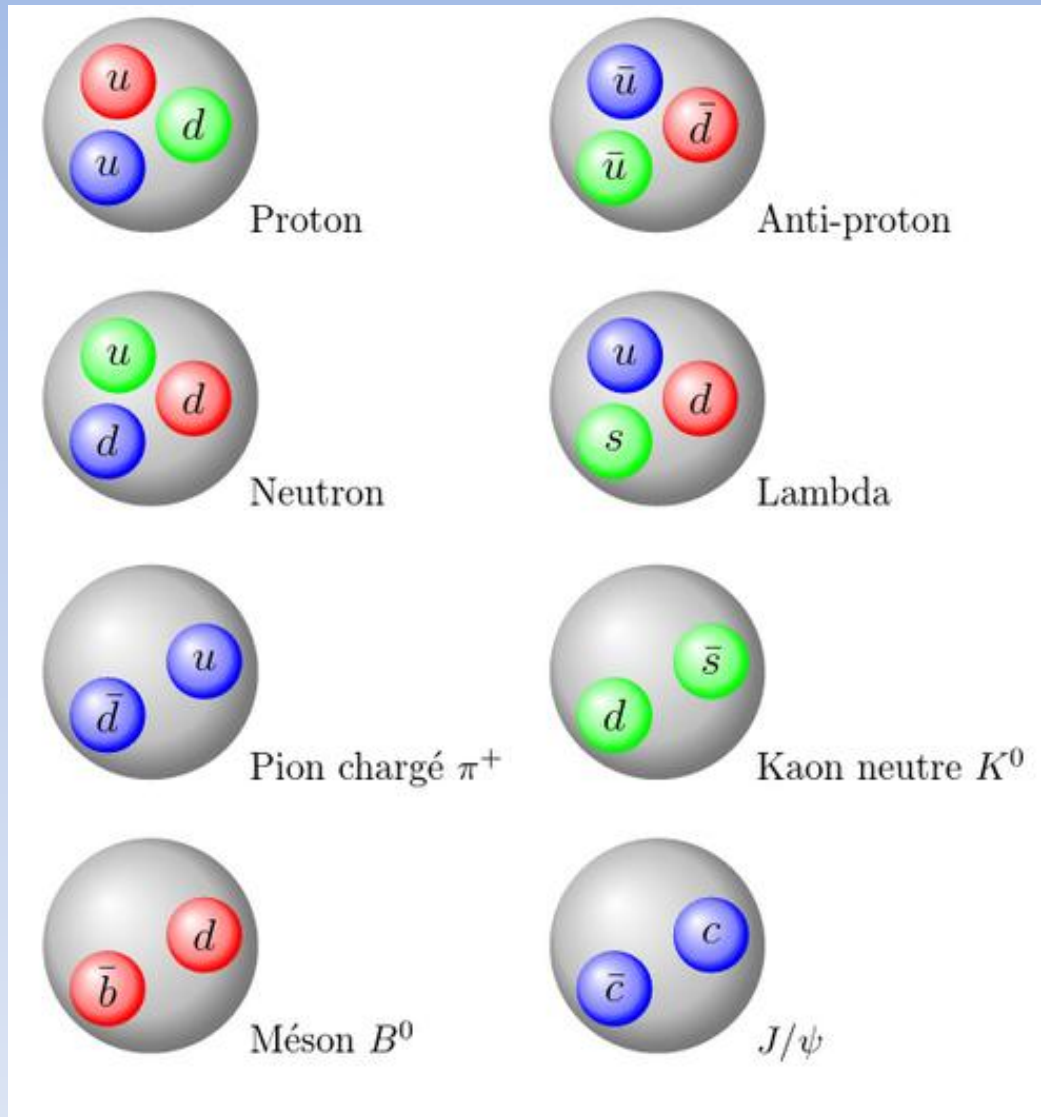
Bosons (spin 1)

Photon (Charge 0)	γ
W ⁻ Boson (Charge -1)	W^-
W ⁺ Boson (Charge 1)	W^+
Z ⁰ Boson (Charge 0)	Z^0
Gluon? (Charge 0)	g

- ❖ Subatomic particle with integral spin (i.e., angular momentum in quantum-mechanical units of 0, 1, etc.)
- ❖ Bosons (force carriers) differ significantly from fermions in that there is no limit to the number that can occupy the same quantum state.

2nd September 2009

I – Les particules élémentaires



II – Les 4 interactions fondamentales

Le « modèle standard de la physique des particules »

Le **modèle standard de la physique des particules** (en abrégé "modèle standard") est la théorie actuelle qui permet d'expliquer **tous les phénomènes observables à l'échelle des particules**.

Le modèle standard englobe donc toutes les **particules connues** ainsi que les **trois interactions** ayant un effet à l'échelle des particules :

- 1) L'[interaction électromagnétique](#)
- 2) L'[interaction nucléaire forte](#)
- 3) L'[interaction nucléaire faible](#)

Le modèle standard permet donc d'expliquer **tous les phénomènes naturels** sauf la [gravitation](#)

Le « modèle standard de la physique des particules »

Historique

- **1948** - l'électrodynamique quantique ou Quantum ElectroDynamics ([QED](#))
(*théorie quantique et relativiste de l'interaction électromagnétique*).
- **1954** - N. Yang et R. Mills généralisent la « QED → les théories de champs de jauge
(*Les théories de Yang-Mills sont le socle mathématique du modèle standard.*)
- **1961** - S. L. Glashow : première tentative d'unification des **interactions nucléaire faible** et **électromagnétique** en une théorie [électrofaible](#)
- **1967** - S. Weinberg et A. Salam modifient ce modèle en y incorporant mécanisme de Higgs et le boson [BEH](#) (R. Brout, F. Englert et P. Higgs)
 - Permet de donner une masse aux particules de la théorie.
 - Elle prédit l'existence des bosons $W^{\pm}$ et Z^0 (*Découverts en 1983*)
- **1970** - S. L. Glashow, J. Iliopoulos et L. Maiani
 - intègrent les quarks à la théorie électrofaible
 - prédisent l'existence du quatrième quark, le « **quark charme** » ou « **quark c** ».

Le « modèle standard de la physique des particules »

Historique

1970 - La **chromodynamique quantique (Q.C.D.)** est formulée pour décrire l'**interaction nucléaire forte** entre **quarks** via l'échange de **gluons**.

Le modèle standard est achevé et prend alors sa forme moderne :

- Particules de matière : quarks et leptons
- Particules médiatrices : photons, bosons W et Z, gluons

2012 - la dernière particule prédite par le modèle standard, le boson BEH, est observée au **LHC**.

II – Les 4 interactions fondamentales

Les 25 particules élémentaires du modèle standard

12 fermions de spin 1/2 qui sont les **particules de "matière"**, séparées en deux catégories :

- 6 quarks et leurs anti-quarks, qui forment des particules composites : les hadrons
- 6 leptons et leurs anti-leptons.

12 bosons de spin 1 qui sont les **particules de "rayonnement"** et qui sont les vecteurs des différentes interactions :

- 8 gluons qui transmettent l'interaction forte,
- les W⁺ et W⁻ qui transmettent l'interaction faible,
- le Z⁰ qui transmet une forme de l'interaction faible provenant de l'interaction électrofaible,
- le photon qui transmet l'interaction électromagnétique.

1 boson de spin 0, le H⁰ boson BEH

Permet de :

- « unifier » les **interactions faible et électromagnétique** et donner une **masse** aux **bosons W et Z⁰**
- donner une **masse** aux **fermions** élémentaires par l'interaction **BEH**.

Modèle standard, particules élémentaires

trois générations de matière (fermions)						interactions / forces (bosons)	
I		II		III			
masse	≈2.16 MeV/c ²	≈1.273 GeV/c ²	≈172.57 GeV/c ²	0	≈125.2 GeV/c ²		
charge	2/3	2/3	2/3	0	0		
spin	1/2	1/2	1/2	1	0		
	u up	c charm	t top	g gluon	H boson de Higgs		

II – Les 4 interactions fondamentales

1) L'[interaction électromagnétique](#)

Q.E.D. ou comment agissent les photons ?

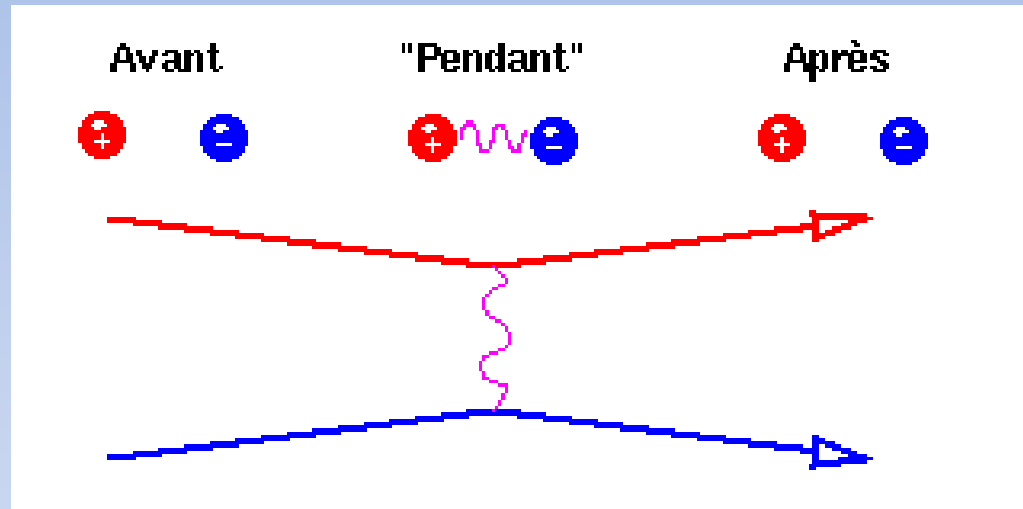


Schéma d'échange d'un *photon* (en magenta) entre *deux fermions* de charges électriques opposées (en rouge et bleu).

Le temps va de la gauche vers la droite.

II – Les 4 interactions fondamentales

1) L'interaction électromagnétique

Q.E.D. ou comment agissent les photons ?

- En l'**électrodynamique quantique** (QED), l'interaction électromagnétique est expliquée comme l'**échange de photons** entre fermions élémentaires possédant une **charge électrique** $q > 0$ ou $q < 0$.
- Le photon est donc le **vecteur de l'interaction électromagnétique**.
- Le photon n'ayant pas lui même de charge électrique (il est neutre), les particules qui échangent des photons conservent leur charge électrique
- La **masse du photon** étant nulle, la portée de l'interaction électromagnétique est **infinie**.
- Le neutrino n'ayant pas de charge électrique, c'est le seul fermion élémentaire qui n'est pas sensible à l'interaction électromagnétique.

II – Les 4 interactions fondamentales

2) L'interaction nucléaire forte

Q.C.D. ou comment agissent les gluons ?

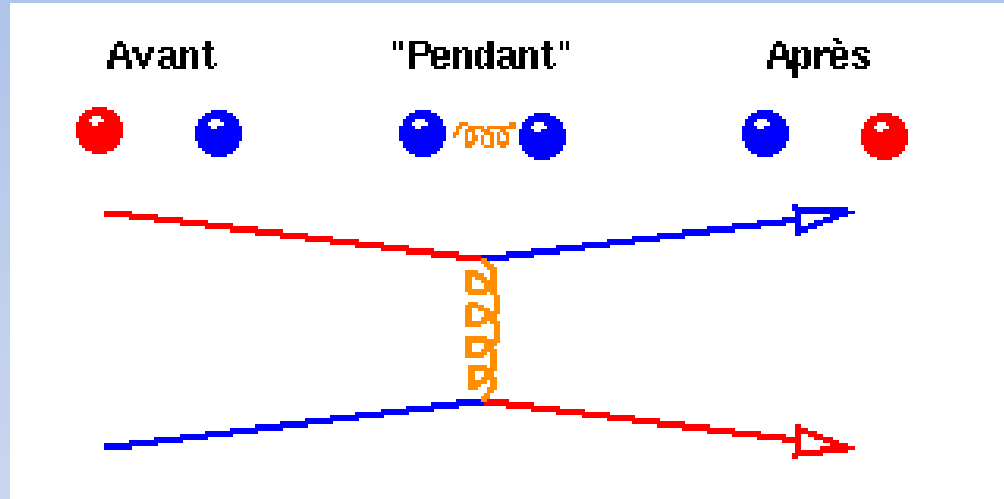


Schéma d'échange d'un **gluon** (en orange) entre **deux quarks** de « **charges de couleur** » différentes.

L'échange du gluon permet aux deux quarks d'échanger leurs « **couleurs** ».

Le temps va de la gauche vers la droite. «

II – Les 4 interactions fondamentales

2) L'interaction nucléaire forte

Q.C.D. ou comment agissent les gluons ?

- En **chromodynamique quantique** (QCD), l'interaction forte est expliquée comme l'échange de gluons entre fermions élémentaires possédant une **charge de couleur**.
- Les gluons sont donc les **vecteurs de l'interaction forte**.
- Il existe 8 gluons de « charges de couleur » différentes : **R V B** (des combinaisons d'une couleur et d'une anti-couleur).
- Seuls les quarks possèdent une charge de couleur, les leptons sont donc **neutres** vis à vis de l'interaction nucléaire forte, ils n'y sont donc pas sensibles.
- La **masse des gluons** est nulle, mais comme ils portent une charge de couleur et donc peuvent interagir entre eux, la portée de l'interaction forte n'est pas infinie, elle est **de l'ordre de 10^{-15}m !**
- **les quarks ne peuvent pas être libres** : Origine du **confinement** des quarks à l'intérieur des **hadrons**

II – Les 4 interactions fondamentales

2) L'interaction nucléaire forte

Les particules directement observables sont donc les hadrons, c'est à dire des états liés de plusieurs **quarks**.

Ces hadrons doivent être "**blancs**", c'est à dire avoir une **charge de couleur nulle**.

On peut donc avoir :

- des baryons, qui contiennent **trois quarks** : un rouge, un vert et un bleu, le total est donc le blanc (et aussi les anti-baryons avec un anti-quark anti-rouge, un anti-vert et un anti-bleu),
- des mésons qui contiennent **un quark** d'une couleur (rouge, vert ou bleu) et **un anti-quark** de l'anti-couleur correspondante, le total étant aussi l'absence de couleur.



II – Les 4 interactions fondamentales

3) L'interaction nucléaire faible

Comment agissent les bosons W^+ , W^- et Z^0 ?

- Dans la **théorie électrofaible**, l'interaction faible présente deux aspects :
 - l'interaction faible par **courants chargés** où les **vecteurs** de l'interaction sont les W^+ et W^- ,
 - l'interaction faible par **courant neutre** où le **vecteur** de l'interaction est le Z^0 .
- Ces deux formes de l'interaction faible agissent entre **tous les fermions élémentaires**,
- C'est la seule interaction à laquelle est sensible le neutrino.
- La **masse des W et du Z^0** est très élevée (80 GeV pour les W et 91 GeV pour le Z^0), la portée de l'interaction faible est donc très courte, **de l'ordre de 10^{-18} m** !
- Les W ont une **charge électrique** non nulle $\rightarrow$ lors de l'échange d'un W , les fermions changent de charge électrique et ils changent aussi de **saveur** (on appelle la "**saveur**" d'un fermion sa nature : électron, neutrino, quark u, quark d, etc...).

II – Les 4 interactions fondamentales

3) L'[interaction nucléaire faible](#)

Exemple : la désintégration radioactive β^-

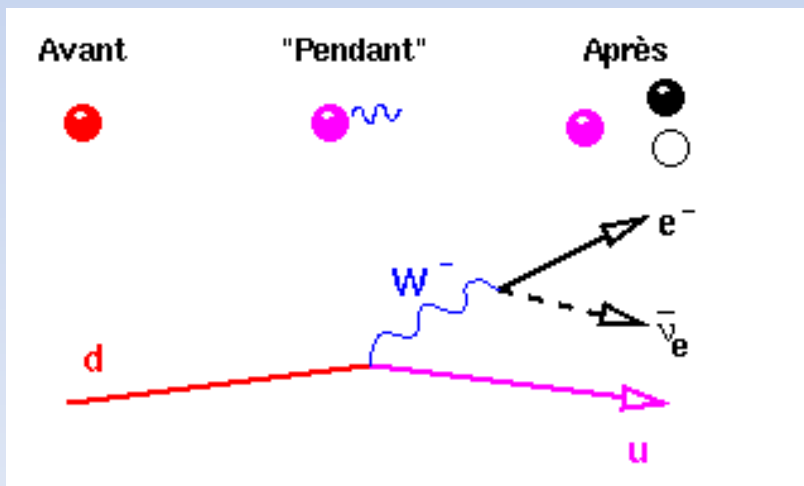
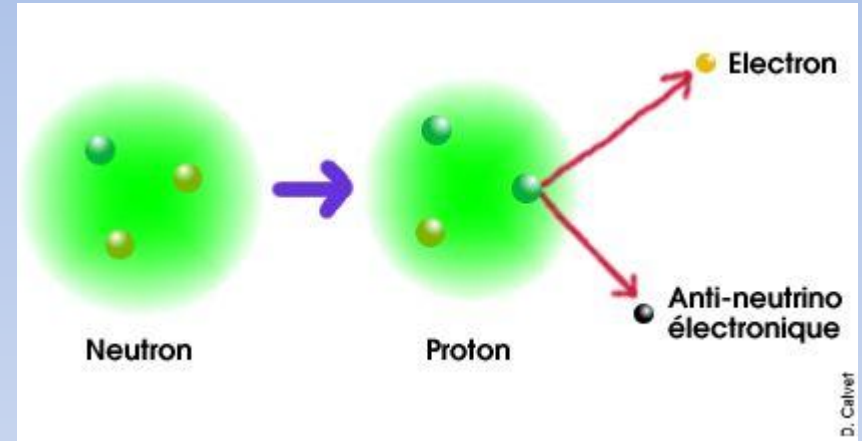
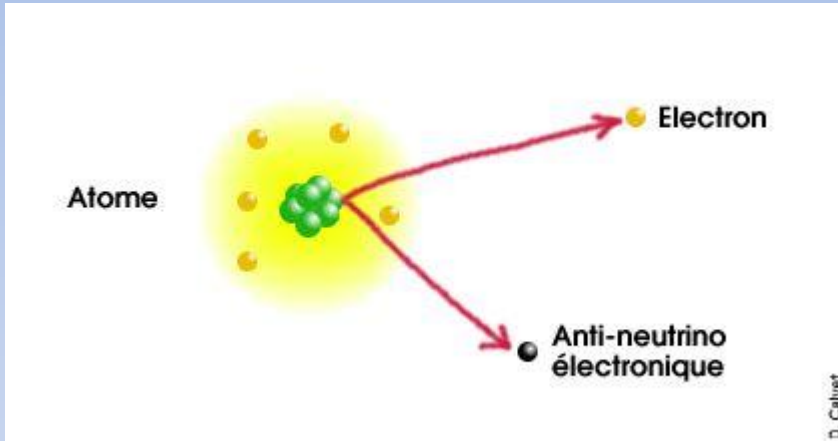
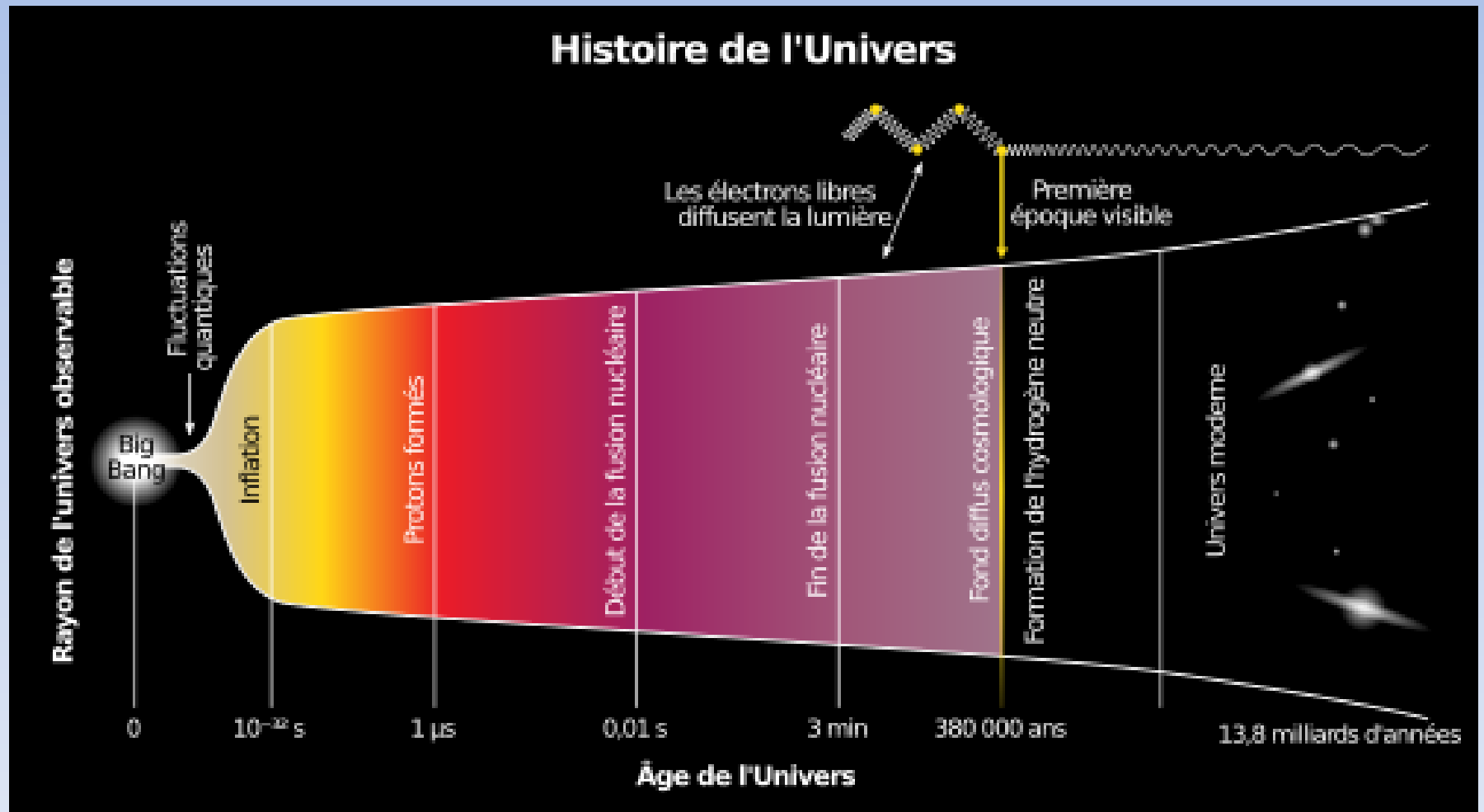


Schéma de désintégration d'un **quark d** (en rouge) en un **quark u** (en magenta) avec émission d'un W^- (en bleu) qui se matérialise en un **électron** (en noir) et un **anti-neutrino électronique** (en blanc).

III – La formation des atomes

*Une « brève » histoire de l'univers : la nucléosynthèse primordiale
(3 minutes !)*



III – La formation des atomes

Une « brève » histoire de l'univers – Les différentes ères

1) Ère de Planck $t < 10^{-43}$ s

- Toutes les interactions fondamentales sont unifiées.
- La gravitation est quantique.

2) Ère de grande unification 10^{-43} s $< t < 10^{-36}$ s

- La gravitation est séparée, mais les autres interactions sont encore unifiées.
- Apparition possible de mécanismes expliquant l'asymétrie matière–antimatière.

3) Ère de l'inflation 10^{-36} s $< t < 10^{-33}$ s

- Expansion extrêmement rapide de l'univers d'un facteur 10^{26} .
- Explique l'homogénéité et la géométrie quasi plate de l'Univers.

4) Ère électrofaible 10^{-36} s $< t < 10^{-12}$ s

- Interaction électromagnétique et interaction faible unifiées.
- Particules sans masse effective (avant le Boson de Higgs).

III – La formation des atomes

Une « brève » histoire de l'univers – Les différentes ères

5) Transition électrofaible $t \approx 10^{-12}$ s

- Le champ de Higgs acquiert une valeur non nulle.
- Les bosons W et Z deviennent massifs.
- Séparation entre interaction faible et électromagnétique.
- L'Univers est alors un **plasma de particules élémentaires** extrêmement énergétiques.

6) Ère des quarks (**plasma quark-gluon**) 10^{-12} s $< t < 10^{-6}$ s

- Univers rempli de **quarks** et **gluons libres**.
- Interaction forte dominante.

7) Ère hadronique $t \approx 10^{-6}$ s

- **Confinement** des **quarks** $\rightarrow$ Hadrons
- Formation des **protons** et **neutrons**.

III – La formation des atomes

Une « brève » histoire de l'univers – Les différentes ères

8) Ère leptonique $10^{-6} \text{ s} < t < 1 \text{ s}$

- Protons et neutrons existent.
- Les photons existent
- Électrons, positrons, neutrinos dominent la dynamique.
- Protons et neutrons se transforment encore l'un en l'autre via l'interaction faible :



- Fixation progressive du rapport neutron/proton.

9) Ère des neutrinos découplés $t \approx 1 \text{ s}$ ($T = 10^{10} \text{ K}$)

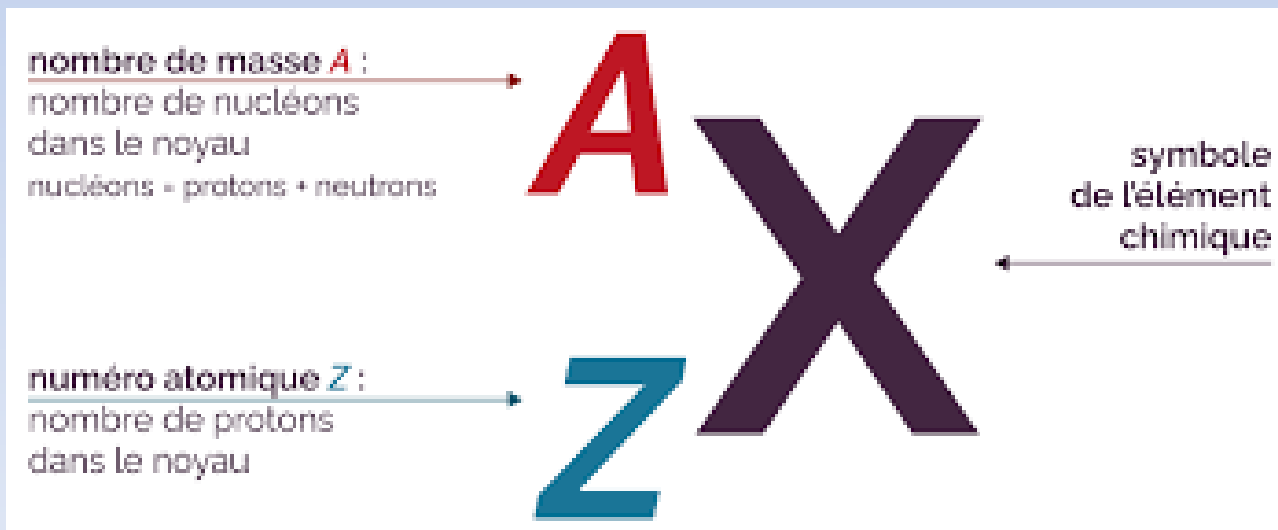
- Les neutrinos cessent d'interagir avec la matière.
- Le rapport n/p devient à peu près stable, autour de 1 neutron pour 6 protons.
- L'Univers est encore trop chaud pour que les noyaux stables se forment durablement : les photons détruisent immédiatement les noyaux dès qu'ils apparaissent.

III – La formation des atomes

Une « brève » histoire de l'univers – Les différentes ères

10) Ère de la nucléosynthèse primordiale $t < 3$ min

- La température devient assez basse ($T < 10^9$ K) pour que le deutérium **D** soit stable.
- **Formation des noyaux légers** (*Fusion nucléaire*) : ^2H , ^3He , ^4He et ^7Li
- Un **élément chimique** est défini par son **numéro atomique Z** (Nombre de Protons)
- **L'isotope** d'un **élément chimique** est caractérisé par la **composition de son noyau** (Protons + Neutrons)



III – La formation des atomes

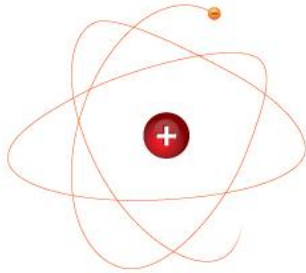
10) Ère de la nucléosynthèse primordiale $t < 3 \text{ min}$

L'élément Hydrogène $H \rightarrow Z=1$



ÉLUCID

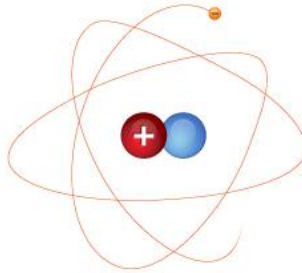
Les 3 isotopes de l'hydrogène



Hydrogène-1 : protium
(Hydrogène ordinaire)



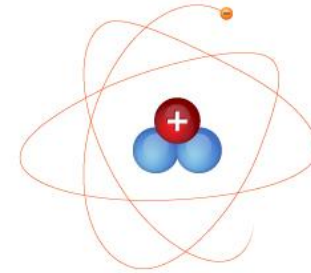
Masse atomique	Abondance	Stable
1	99,985 %	OUI



Hydrogène-2 : deuterium
(Hydrogène lourd)



Masse atomique	Abondance	Stable
2	0,015 %	OUI



Hydrogène-3 : tritium
(Hydrogène radioactif)

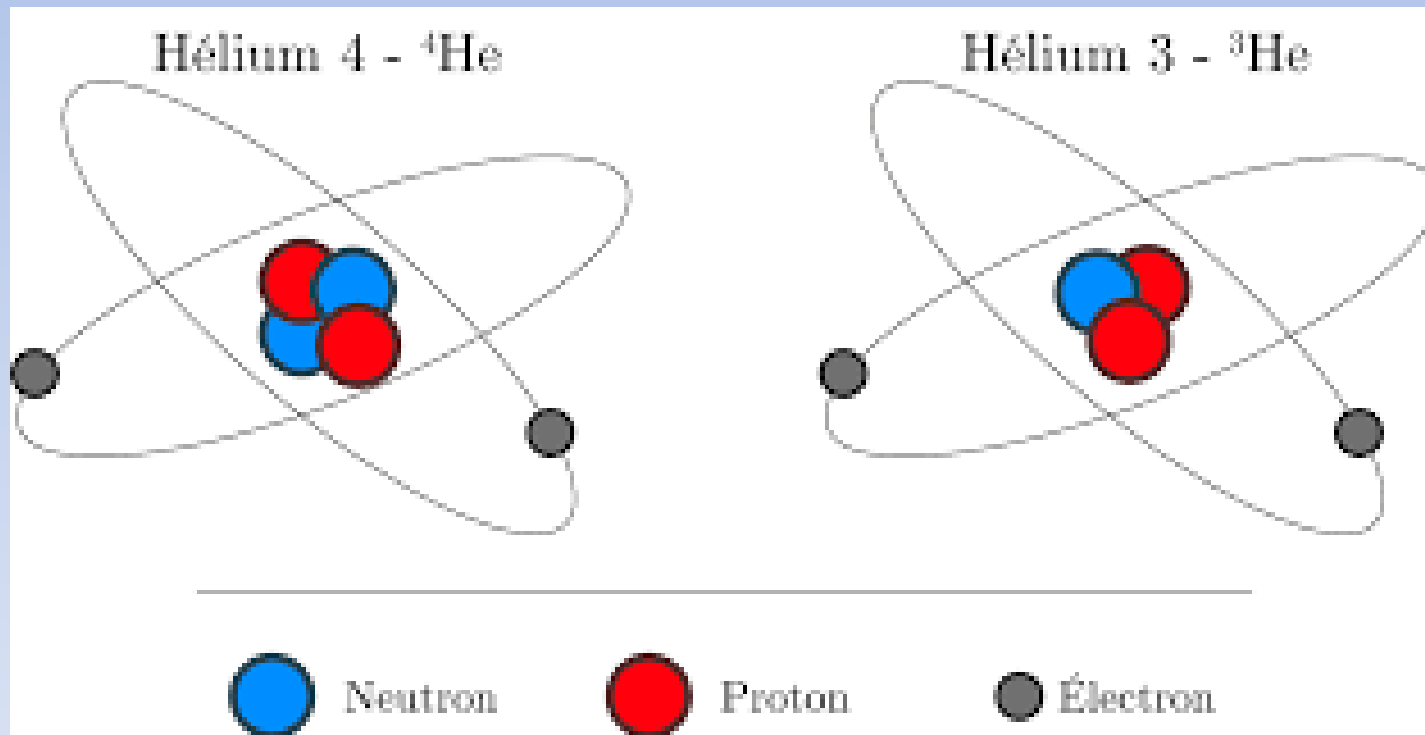


Masse atomique	Abondance	Stable
3	≈ 0 % (traces)	NON

III – La formation des atomes

10) Ère de la nucléosynthèse primordiale $t < 3 \text{ min}$

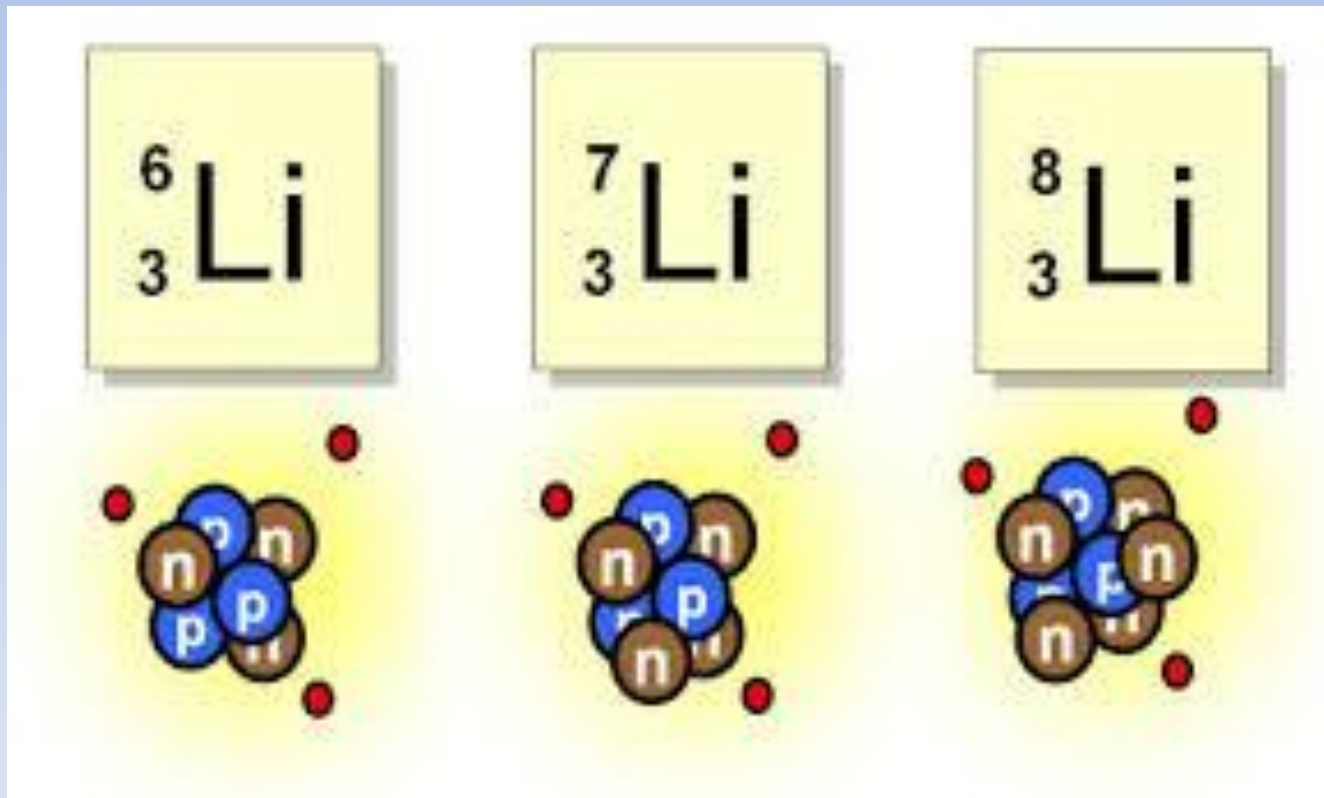
L'élément Hélium He → $Z=2$



III – La formation des atomes

10) Ère de la nucléosynthèse primordiale $t < 3 \text{ min}$

L'élément Lithium Li $\rightarrow$ **Z=3**



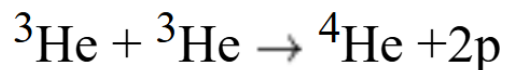
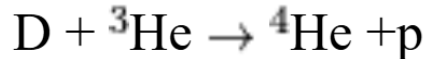
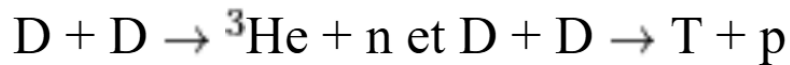
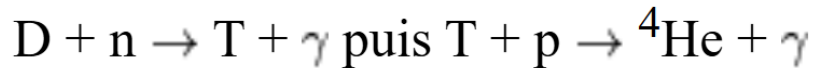
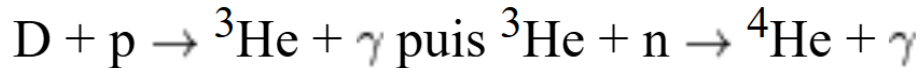
III – La formation des atomes

10) Ère de la nucléosynthèse primordiale $t < 3 \text{ min}$

- Réaction de formation du deutérium

$p + n \rightarrow D + \gamma$, où γ est un photon résultant de la réaction.

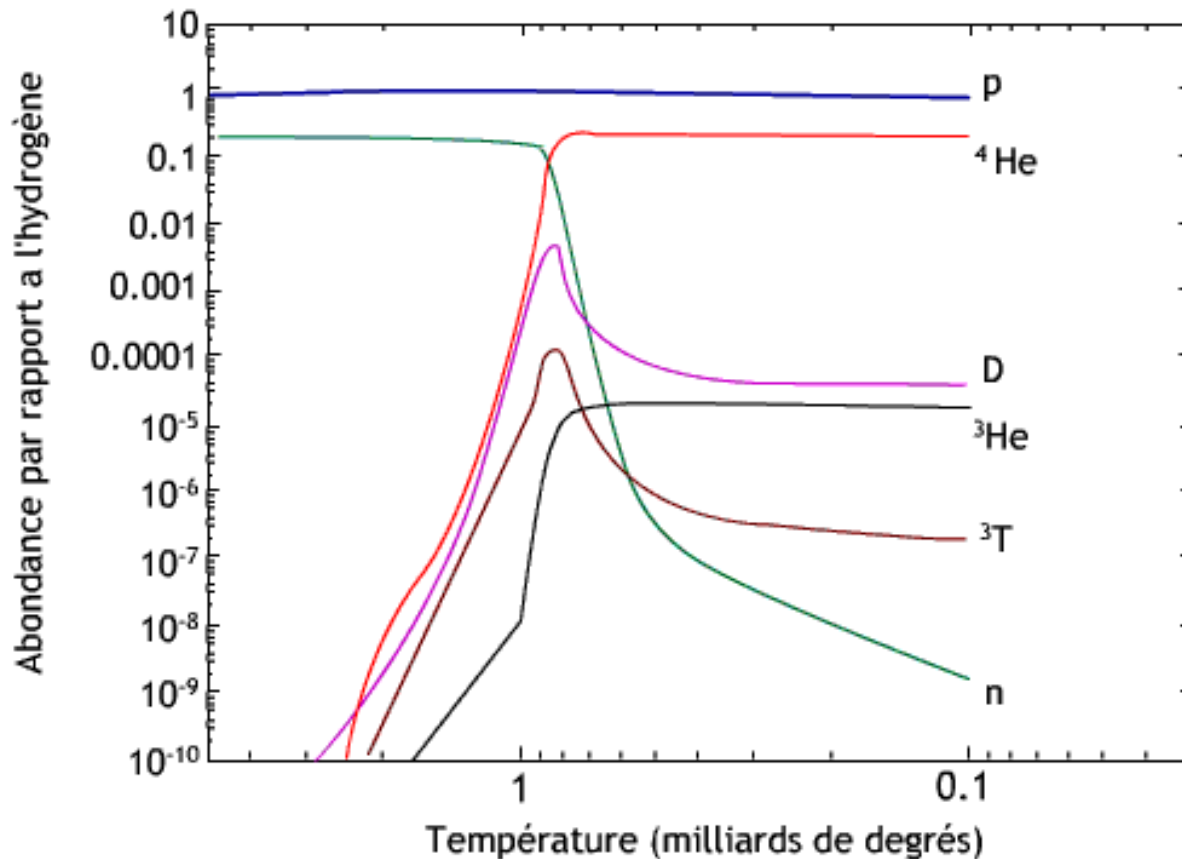
- Réaction de formation de l'Hélium et du tritium



III – La formation des atomes

10) Ère de la nucléosynthèse primordiale $t < 3$ min Proportion des atomes légers

L'abondance des éléments pendant les premières minutes de l'Univers, par rapport à celle des protons.



III – La formation des atomes

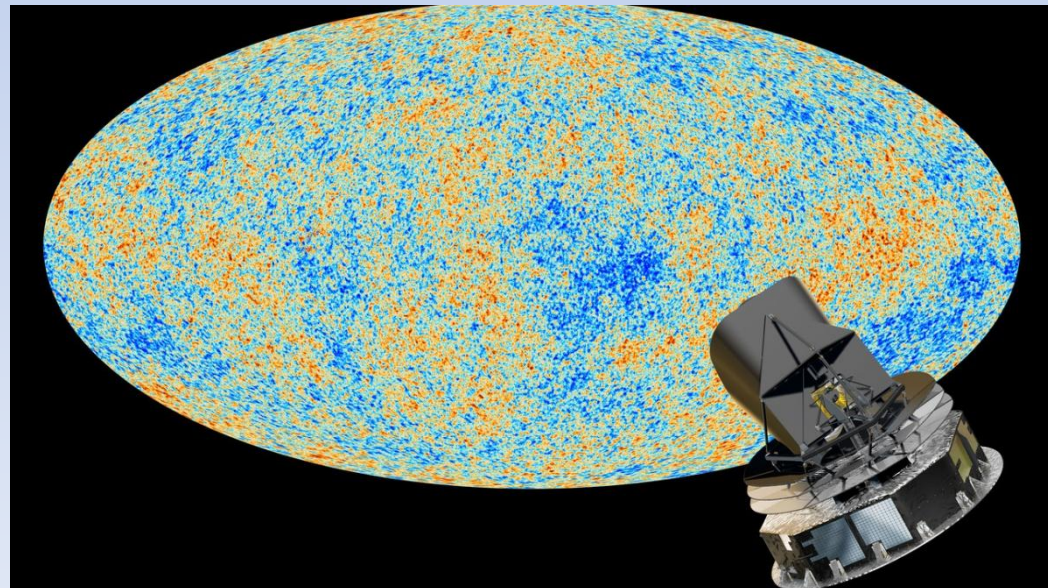
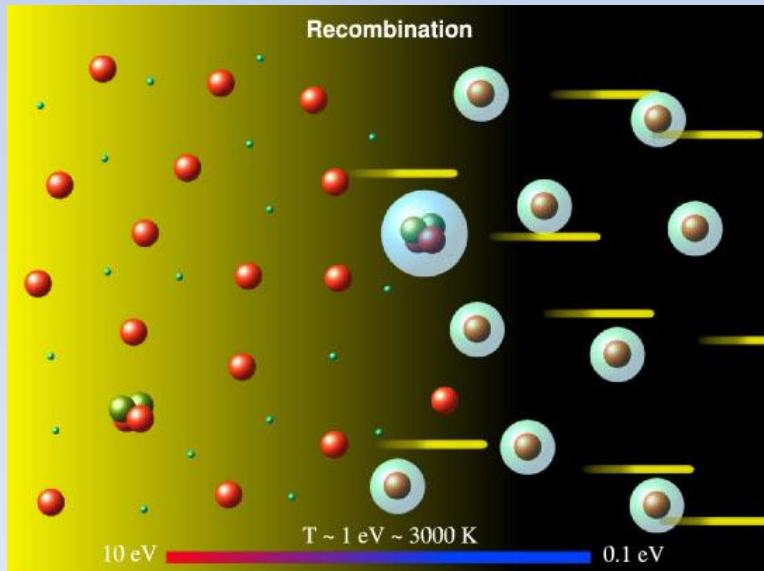
Une « brève » histoire de l'univers – Les différentes ères

11) Ère du plasma $t < 380\,000$ ans

- Noyaux + électrons + photons.
- Pas encore d'atomes (Univers **ionisé**).

12) Ère de la recombinaison $t \approx 380\,000$ ans ($T \approx 3000$ K)

- Formation des **premiers atomes** (noyau + électrons)
- L'Univers devient **transparent** → fond diffus cosmologique (FDC).



III – La formation des atomes

Une « brève » histoire de l'univers – Les différentes ères

12) Ère de la recombinaison $t \approx 380\,000$ ans ($T \approx 3000$ K)

- Formation des **premiers atomes** (noyau + électrons)



Résultat global de cette période :

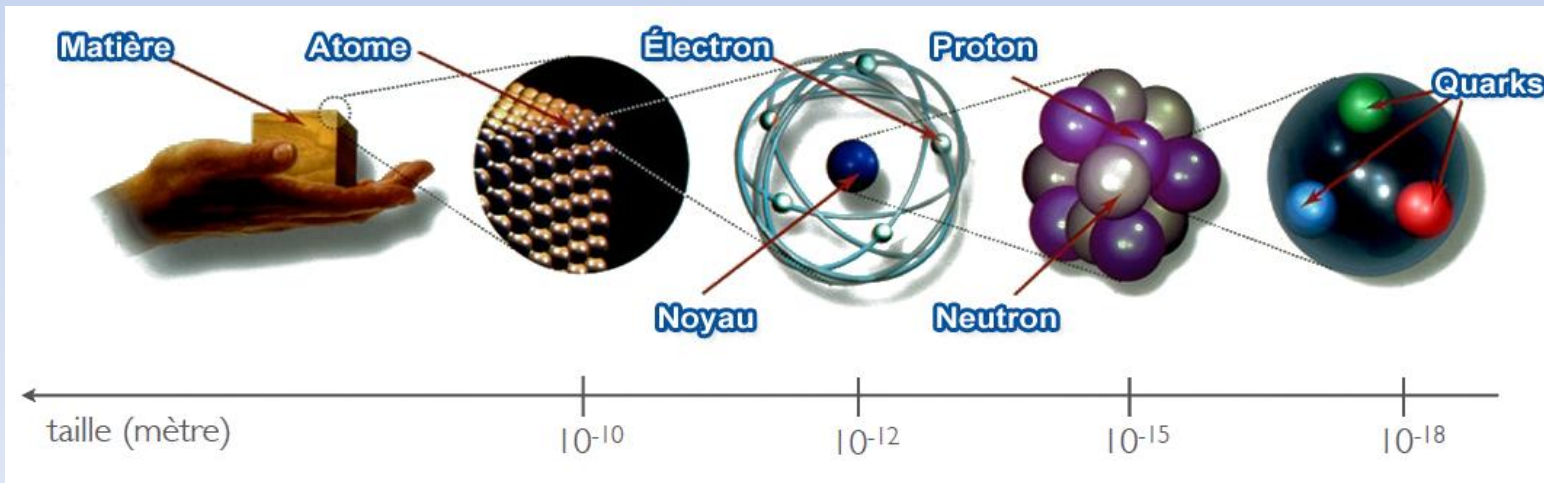
- ~75 % d'hydrogène (^1H)
- ~25 % d'hélium (^4He)
- traces de deutérium, hélium-3 et lithium

III – La formation des atomes

Une « brève » histoire de l'univers – Les différentes ères

13) Ères ultérieures

- Âges sombres : pas encore d'étoiles.
- Ère de la réionisation : premières étoiles et galaxies.
- Ère stellaire :
 - Nucléosynthèse stellaire → éléments lourds
 - Chimie complexe, planètes Et la vie



III – La formation des atomes

Une « brève » histoire de l'univers – Les différentes ères



III – La formation des atomes

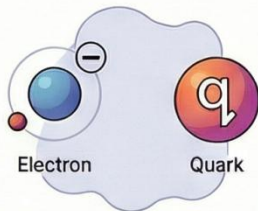
Univers (%)		Terre (%)		Corps Humain (%)	
H	93	O, oxydes et eau	50	O, eau, protéines, phosphate	65
He	6.9	Si, silicates	26	C	18
O	0.0005	Al	7	H, eau	10
C	0.00008	Fe	4	N	3
N	0.00015	Ca	3	Ca	2
Ne	0.0002	Na	2.5	P	1
Autres	0.1	K	2.5	K	0.35
		Mg	2	S	0.25
		H	0.88	Na	0.15
		C	0.087	Cl	0.015
		N	0.030	Autres	0.1
		Autres	2		

III – La formation des atomes

Les Briques Élémentaires de la Matière

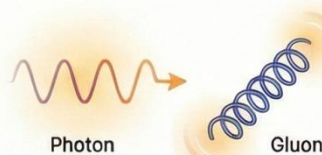
La matière qui nous entoure est un assemblage de particules élémentaires, décrites par la théorie du modèle standard. Cette infographie décompose la structure de la matière pour révéler ses constituants fondamentaux et les forces qui les lient.

Les Deux Grandes Familles de Particules



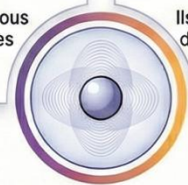
Les Fermions : Les Briques de la Matière

Ils constituent les particules que nous associons à la matière, comme les quarks et les électrons.



Les Bosons : Les Messagers des Forces

Ils permettent aux briques de matière d'interagir et de s'assembler, comme les photons et les gluons.



Le Boson de Higgs : La Particule Clé

Son existence, confirmée en 2012, explique l'origine de la masse des autres particules.

Anatomie de la Matière : de l'Atome aux Quarks

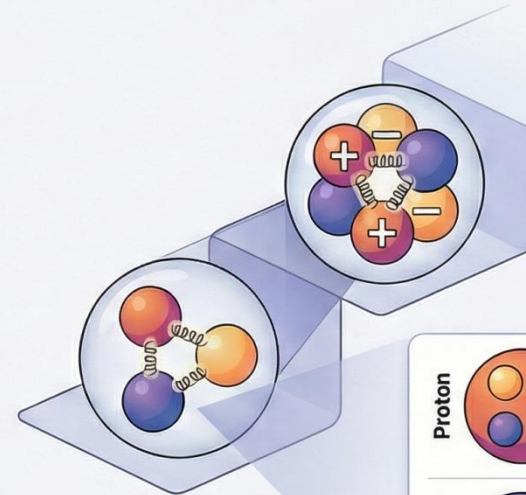


1. L'Atome

Composé d'un noyau et d'électrons maintenus ensemble par des photons (force électromagnétique).

2. Le Noyau Atomique

Un assemblage de protons et de neutrons, liés par des échanges continus de gluons (force forte).



3. Les Quarks

Les particules fondamentales qui composent les protons et les neutrons. Ils n'ont jamais été observés seuls.

Proton	Quarks		
	2	Quarks "up"	+1
Neutron	1	Quark "down"	
	1	Quark "up"	0
	2	Quarks "down"	

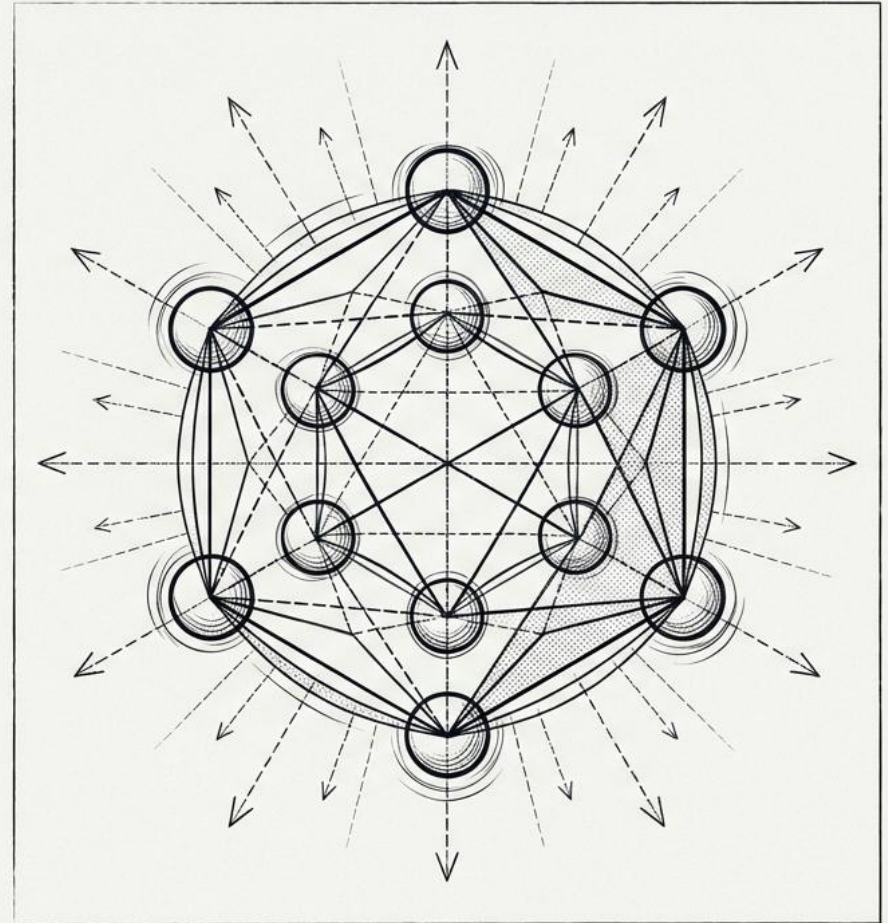
IV – La stabilité des atomes

La « Radioactivité »

La Quête de Stabilité

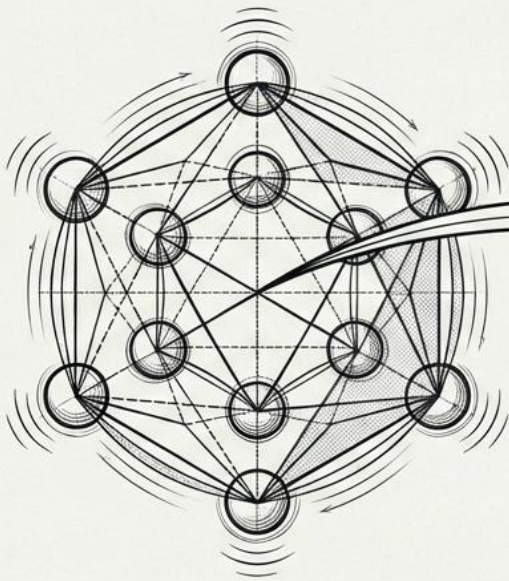
À l'échelle atomique, tout est une question d'équilibre. Un noyau atomique est dit 'instable' lorsqu'il souffre d'un surplus d'énergie.

Cette tension interne exige une libération.



IV – La stabilité des atomes

La « Radioactivité »



Le Processus de Libération

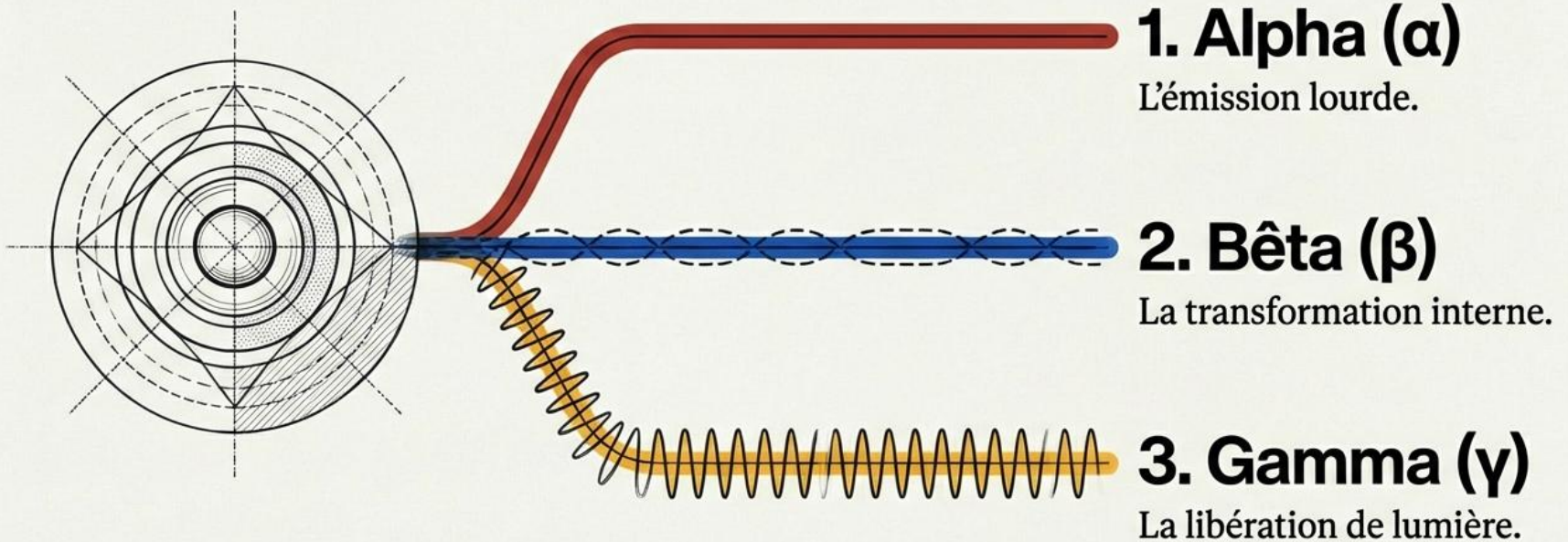
La radioactivité est le processus par lequel ce noyau instable perd son énergie en émettant des rayonnements.

Ce n'est pas une destruction, mais une transition vers un état d'énergie plus bas.

IV – La stabilité des atomes

La « Radioactivité »

Trois Voies vers l'Équilibre

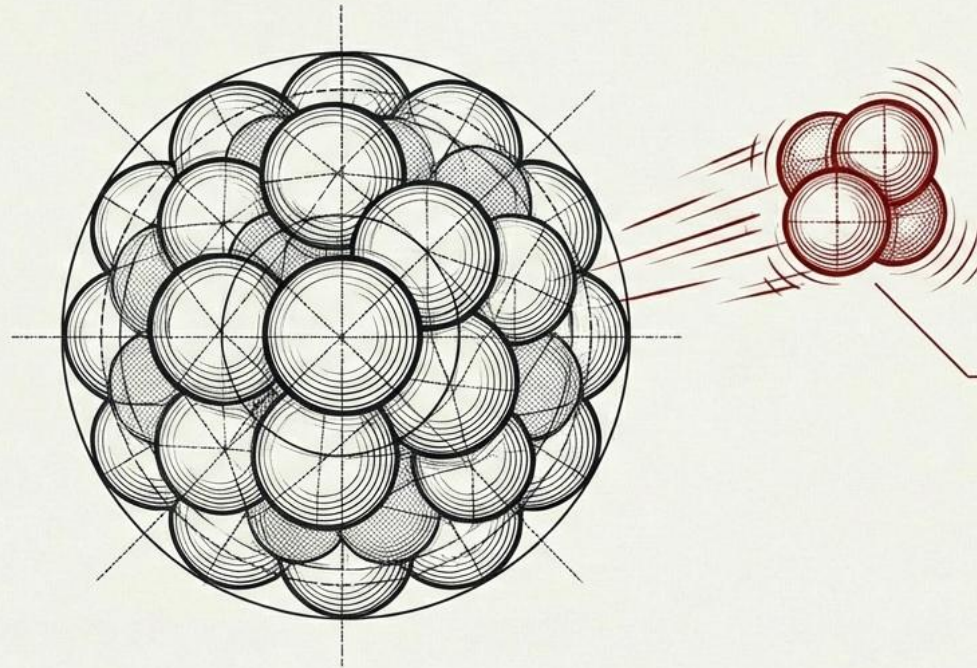


IV – La stabilité des atomes

La « Radioactivité α »

Radioactivité Alpha (α)

Le noyau émet une particule lourde.



Cette particule est physiquement un noyau d'hélium expulsé pour alléger la structure atomique.

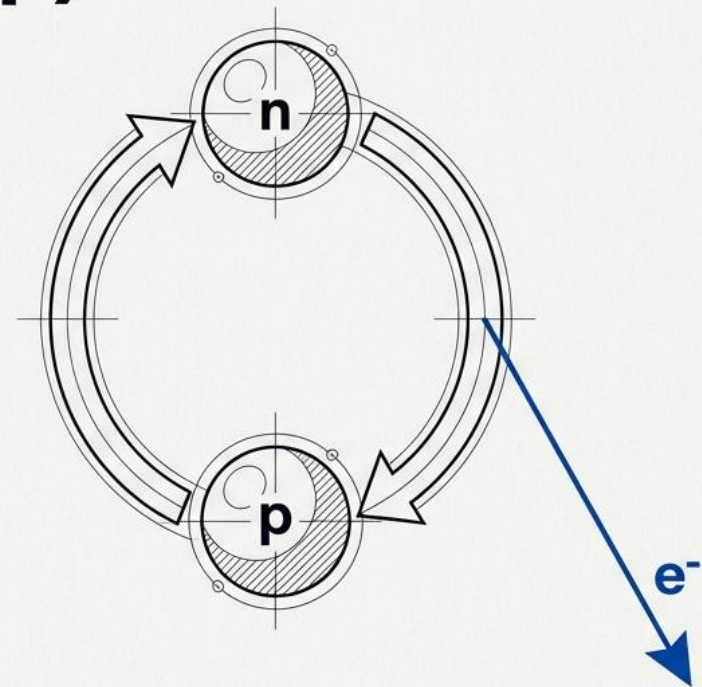
IV – La stabilité des atomes

La « Radioactivité β »

Radioactivité Bêta (β)

Une métamorphose
au cœur de la matière

Un neutron se transforme en proton
(ou vice versa). Le noyau émet alors
un électron ou un positron pour
compenser la charge.

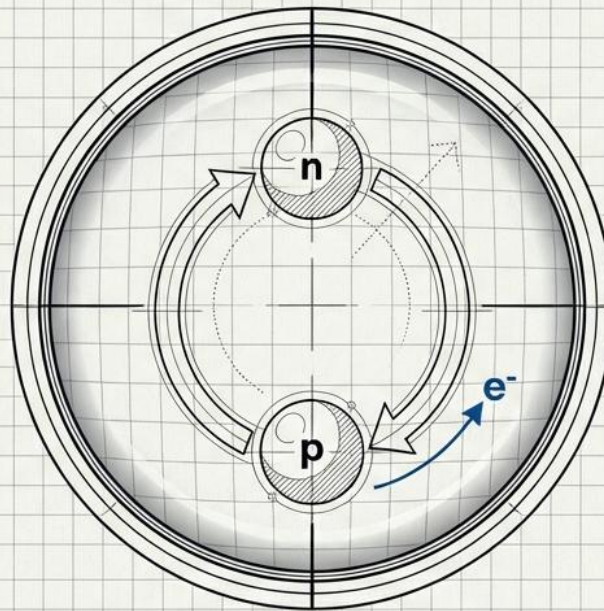


IV – La stabilité des atomes

La « Radioactivité β »

L'Interaction Faible

La radioactivité Bêta ne se contente pas d'éjecter de la matière ; elle change l'identité des particules.

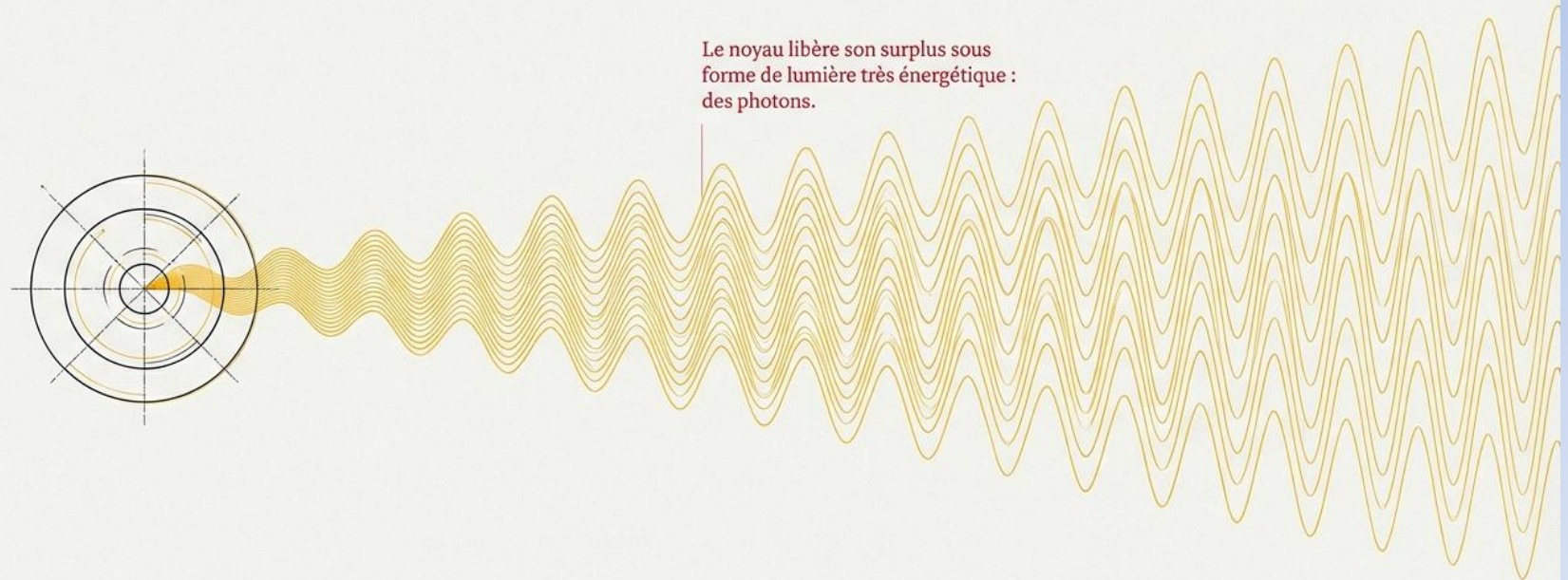


« Ce processus est régi par l'interaction faible. »

IV – La stabilité des atomes

La « Radioactivité γ »

Radioactivité Gamma (γ) Une pure libération d'énergie.

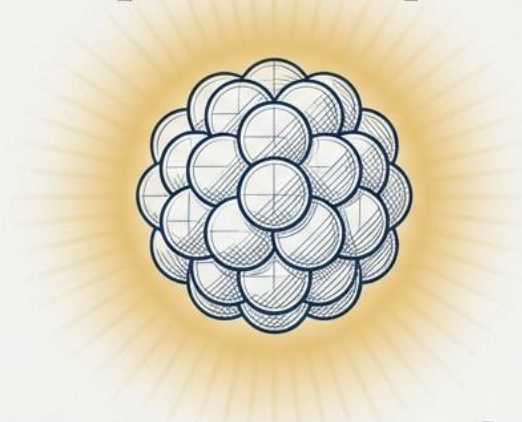


IV – La stabilité des atomes

La « Radioactivité γ »

Sans Changer de Nature

Contrairement aux émissions Alpha ou Bêta, le rayonnement Gamma n'altère pas la composition en protons ou neutrons.

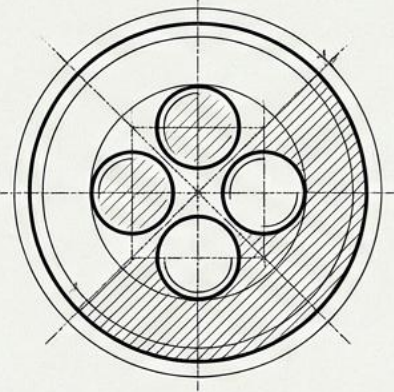
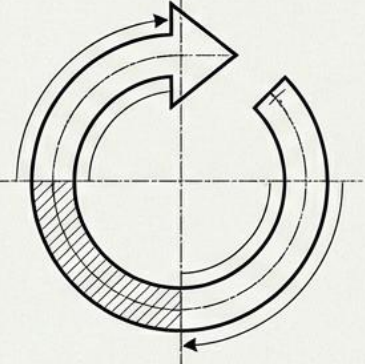
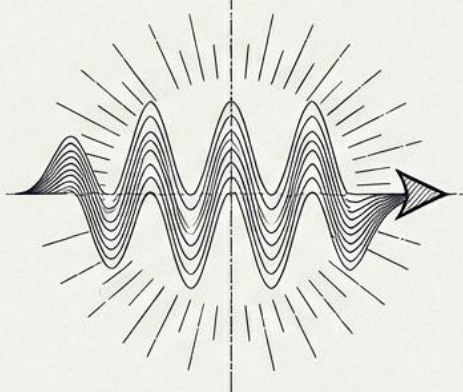


**C'est le simple 'soupir' énergétique
d'un noyau qui se relache.**

IV – La stabilité des atomes

La « Radioactivité »

Synthèse des Rayonnements

α	β	γ
		
Nature : Particule lourde (Hélium) Action : Éjection de masse	Nature : Électron ou Positron Action : Transformation (Interaction faible)	Nature : Photons (Lumière) Action : Libération d'énergie pure

IV – La stabilité des atomes

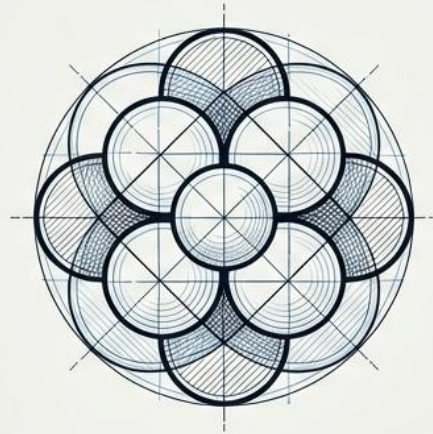
La « Radioactivité »

Type de désintégration	Particule émise	Transformation dans le noyau	Variation du numéro atomique (Z)	Variation du nombre de masse (A)	Exemple
Alpha (α)	${}^4_2\text{He}$	Perte de 2 protons et 2 neutrons	-2	-4	${}^{238}_{92}\text{U} \rightarrow {}^{234}_{90}\text{Th} + {}^4_2\text{He}$
Bêta - (β^-)	$e^- + \bar{\nu}_e$	Neutron $\rightarrow$ proton	+1	0	${}^{14}_6\text{C} \rightarrow {}^{14}_7\text{N} + e^-$
Bêta + (β^+)	$e^+ + \nu_e$	Proton $\rightarrow$ neutron	-1	0	${}^{22}_{11}\text{Na} \rightarrow {}^{22}_{10}\text{Ne} + e^+$

IV – La stabilité des atomes

La « Radioactivité »

L'État d'Équilibre

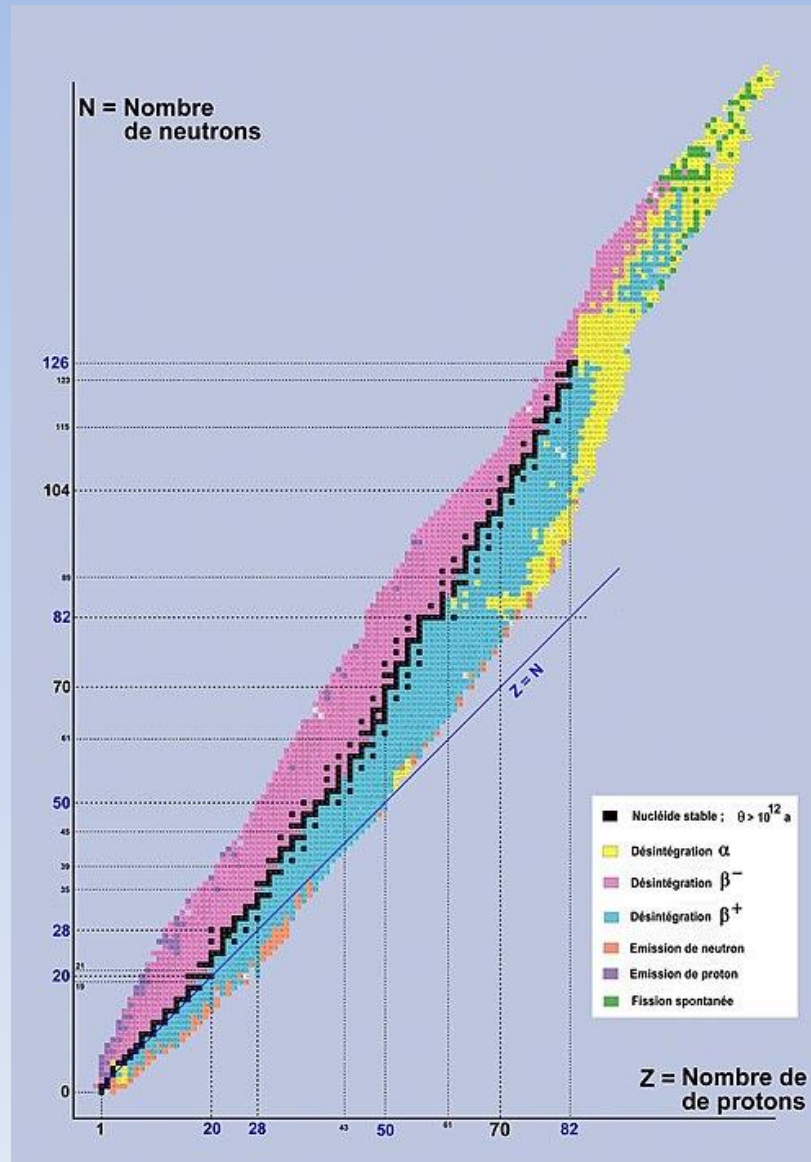


Qu'il s'agisse d'émettre de la matière, de transformer sa structure
ou de libérer des photons, l'objectif reste le même.

La radioactivité est le chemin nécessaire vers la stabilité atomique.

IV – La stabilité des atomes

La « Vallée de la stabilité »



V – Les modèles de l'atome

Historique

La Naissance du Concept d'Atome

L'idée que la matière est composée de particules indivisibles n'est pas une découverte moderne. Ce concept, appelé "atome", trouve ses racines dans la pensée philosophique de la Grèce antique. Il y a plusieurs millénaires.

Les Origines Antiques

Il y a 2 500 ans

Le concept d'atome émerge au sein de la philosophie grecque.



Les Pères de l'Idée

Démocrite, Épicure et Lucrèce sont les principaux penseurs à son origine.

V – Les modèles de l'atome

Historique

- La première formulation de l'atome fut émise par le philosophe **Leucippe de Millet** au Vème av. J.C
- D'après son disciple, DEMOCRITE, philosophe grec, (450-360 av J.C.) :
- la matière est constituée de particules en perpétuel mouvement
- Il invente le concept de l'atome :
 - particule indivisible
 - Invisible
 - Pleine



- Cette hypothèse atomique de la matière fut publiée au Ier siècle av. J.C. par Lucrèce.
- *Aristote* (384 – 322 av. J.-C.) croyait que la matière était continue, qu'elle ne comportait aucun vide.
 - C'est la *théorie de la continuité*.
 - Aristote croyait que la théorie présentée par Démocrite était fausse parce qu'elle impliquait que l'âme humaine était formée en partie de vide et reprend l'idée « *des 4 éléments* ».
 - Cette théorie domina la pensée scientifique jusqu'au XVIIIème siècle à cause de l'omniprésence de la religion à cette époque.
- Pendant des siècles, la taille et la nature de l'atome firent l'objet de spéculations ... jusqu'à la fin du XIXème siècle.

V – Les modèles de l'atome

Historique

◆ Robert Boyle (1627–1691)

Rôle clé : naissance de la chimie moderne

- S'oppose à la théorie des **quatre éléments** (terre, eau, air, feu)
- Défend une approche **expérimentale** de la science
- Introduit la notion de **corps simples** (éléments)
- Montre que la matière est faite de **particules** (idée pré-atomique)

👉 Boyle prépare le terrain pour la **théorie atomique**, même s'il ne décrit pas encore l'atome.

V – Les modèles de l'atome

Historique

◆ Antoine Lavoisier (1743–1794)

Père de la chimie moderne

- Introduit la **mesure précise** en chimie
- Établit la **loi de conservation de la masse** :
« Rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme »
- Définit clairement les **éléments chimiques**
- Explique la **combustion** par le dioxygène (fin de la théorie du phlogistique)
- Donne les bases de la **nomenclature chimique moderne**

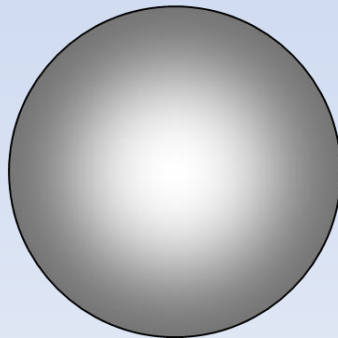
V – Les modèles de l'atome

Historique – Le modèle de Dalton

- Boyle : idée de matière faite de particules → base conceptuelle
- Lavoisier : conservation de la masse → fondement des équations chimiques
- Ensemble, ils rendent possible le modèle atomique de Dalton

1803 – 1808 Dalton : bases de la théorie atomique moderne en liant chaque élément chimique à un type d'atome unique

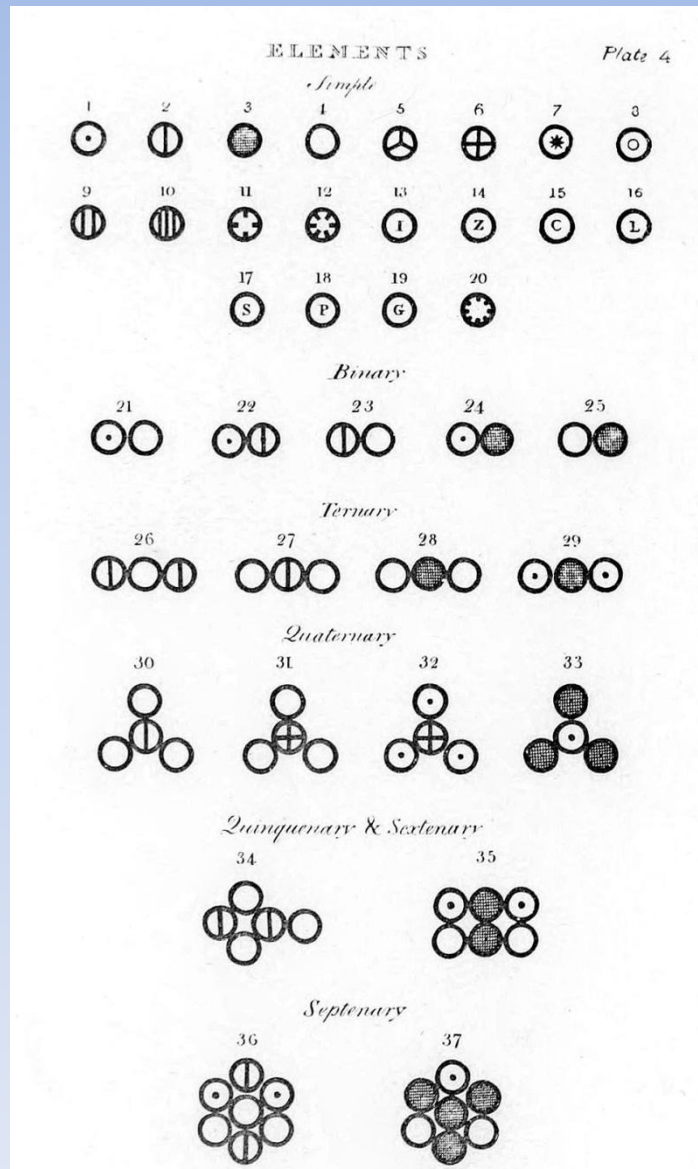
L'atome est une sphère simple et indivisible, semblable à une boule de billard



John Dalton 1808

V – Les modèles de l'atome

Historique – Le modèle de Dalton



Représentation de quelques atomes et molécules dans *A New System of Chemical Philosophy*¹ (John Dalton, 1808)

V – Les modèles de l'atome

Historique



Dmitri Mendeleïev (1834–1907)



Rôle majeur



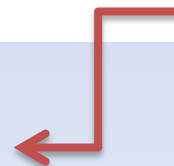
Créateur du tableau périodique des éléments (1869)



Ses idées principales

- Classe les éléments selon leur **masse atomique croissante**
- Observe une **périodicité** des propriétés chimiques
- Regroupe les éléments aux **propriétés similaires** dans les mêmes colonnes
- Laisse des **cases vides** pour des éléments encore inconnus

Elément 115 ?



V – Les modèles de l'atome

Historique



Prédictions célèbres

Mendeleïev prédit l'existence et les propriétés de plusieurs éléments :

- **Gallium** (eka-aluminium)
- **Germanium** (eka-silicium)
- **Scandium** (eka-bore)



Découvertes ultérieures confirment ses prédictions → énorme succès scientifique



Lien avec l'atome

- Montre que les propriétés des éléments dépendent de la **structure de l'atome**
- Prépare la compréhension moderne basée sur le **numéro atomique (Z)**

(corrigée plus tard par Moseley)

♦ Henry Moseley (1913)

- Montre que le classement correct se fait par **numéro atomique**, pas par masse
- Valide définitivement le tableau périodique

V – Les modèles de l'atome

Historique – La structure interne

La Découverte de l'Électron

1897

**J.J. Thomson
découvre l'électron.**

Il s'agit de la toute première particule
subatomique identifiée.

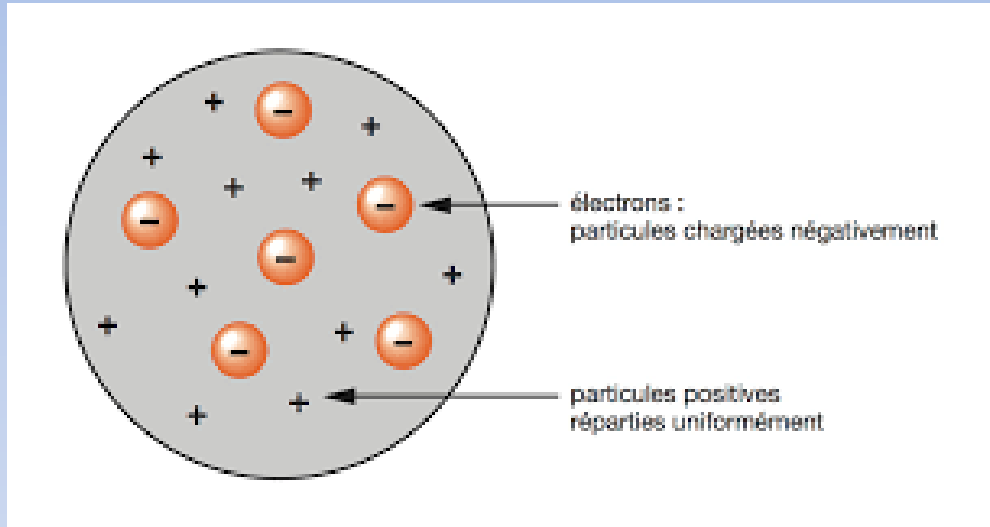
ÉLECTRON



V – Les modèles de l'atome

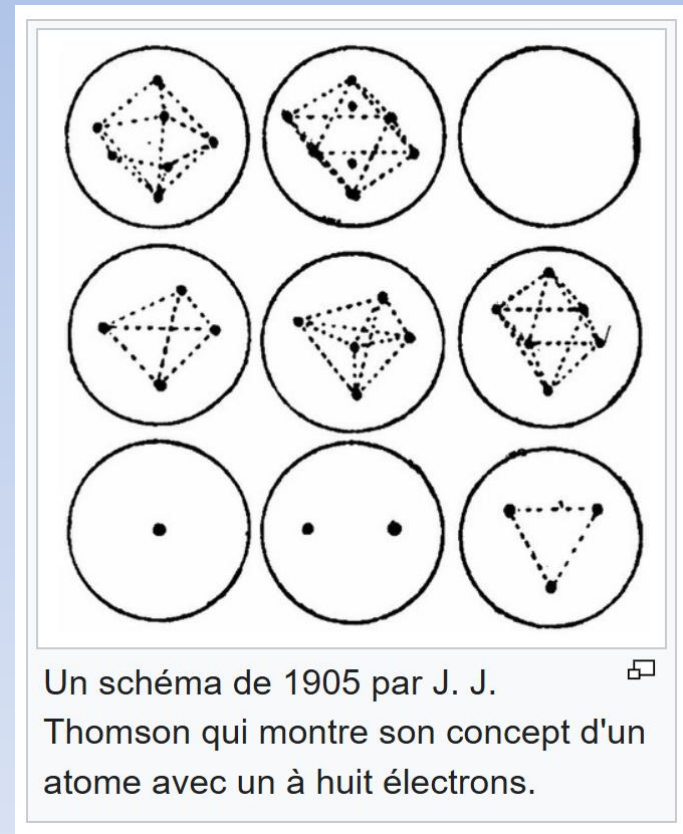
Historique – La structure interne

1904 - Modèle atomique de Thomson *modèle du plum pudding*



“On the Structure of the Atom: an Investigation of the Stability and Periods of Oscillation of a number of Corpuscles arranged at equal intervals around the Circumference of a Circle ; with Application of the Results to the Theory of Atomic Structure”

publié dans le Philosophical Magazine



V – Les modèles de l'atome

Historique – La structure interne

1904 - Modèle atomique de Thomson
modèle du plum pudding



« Le pudding de THOMSON »

Thomson 1897

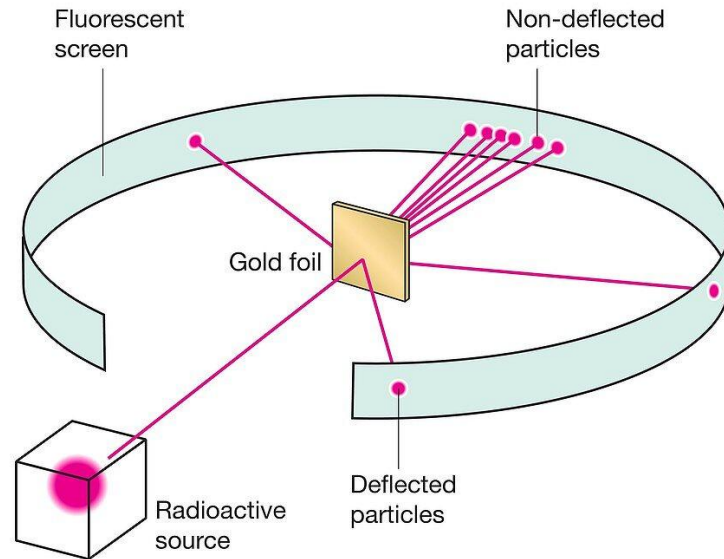


Un atome contient des particules négatives que j'appellerais électrons. Dans mon modèle, l'atome est constitué d'une boule pleine remplie d'une substance électriquement positive collée à des électrons.

V – Les modèles de l'atome

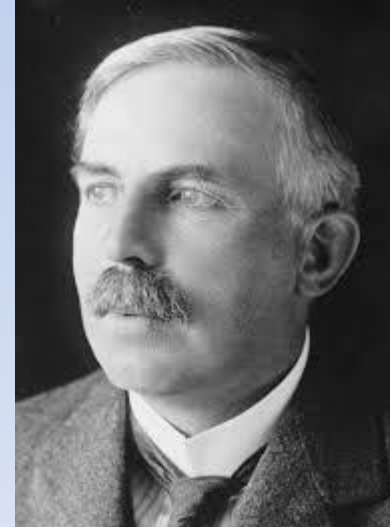
Historique – La structure interne

1911 - Modèle atomique de Rutherford – Découverte du proton



Ernest Rutherford (1911)

- Expérience de la feuille d'or
- Découverte du **noyau**
- L'atome est **presque vide**
- Noyau chargé positivement, électrons autour

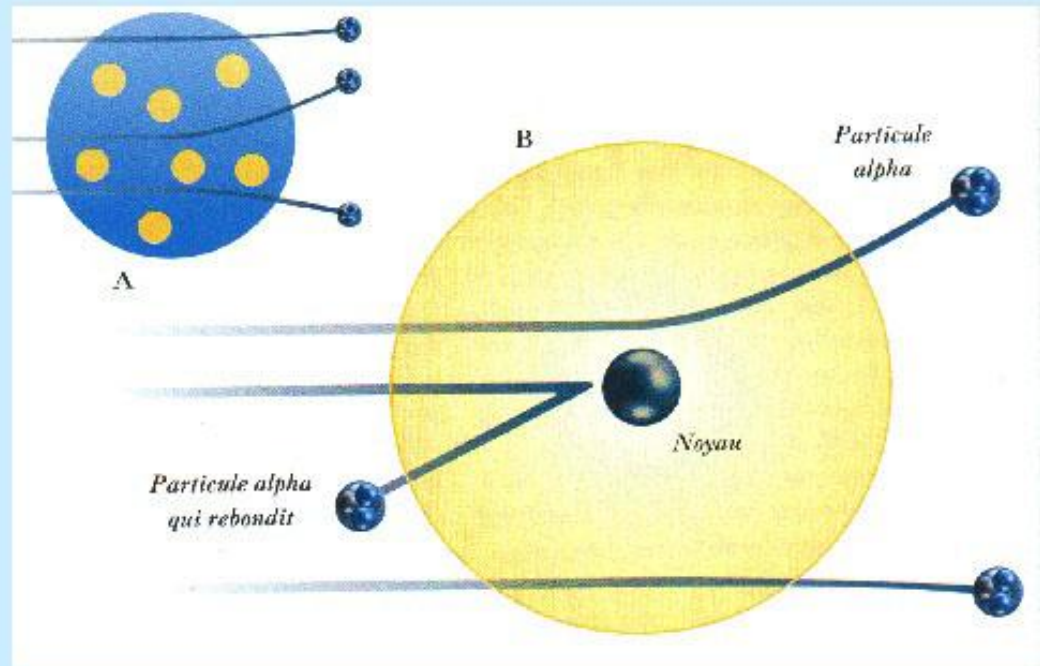


V – Les modèles de l'atome

Historique – La structure interne

1911 - Modèle atomique de Rutherford

L'expérience de Rutherford 1911



Il existe au centre de l'atome un noyau chargé positivement

V – Les modèles de l'atome

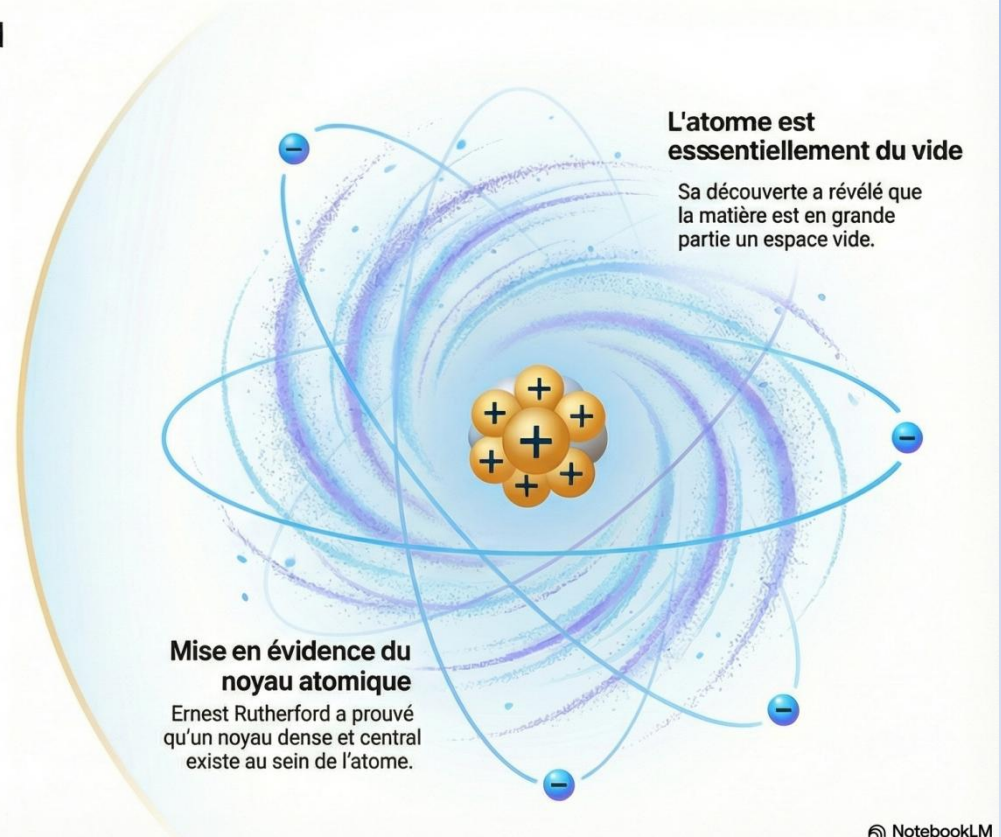
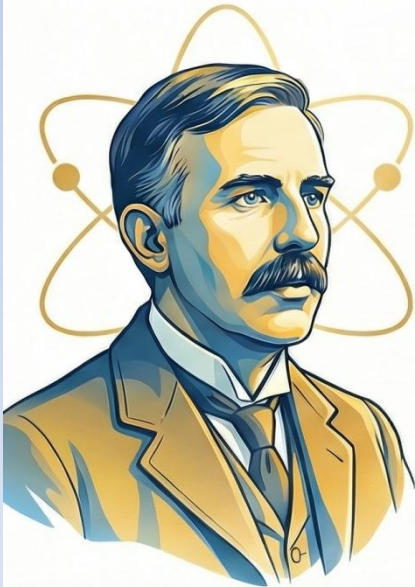
Historique – La structure interne

1911 - Modèle « Planétaire » de Rutherford

Rutherford et la Révolution de l'Atome

La découverte fondamentale d'Ernest Rutherford sur la structure de l'atome et sa composition.

Ernest Rutherford a prouvé qu'un noyau dense et central existe au sein de l'atome.



V – Les modèles de l'atome

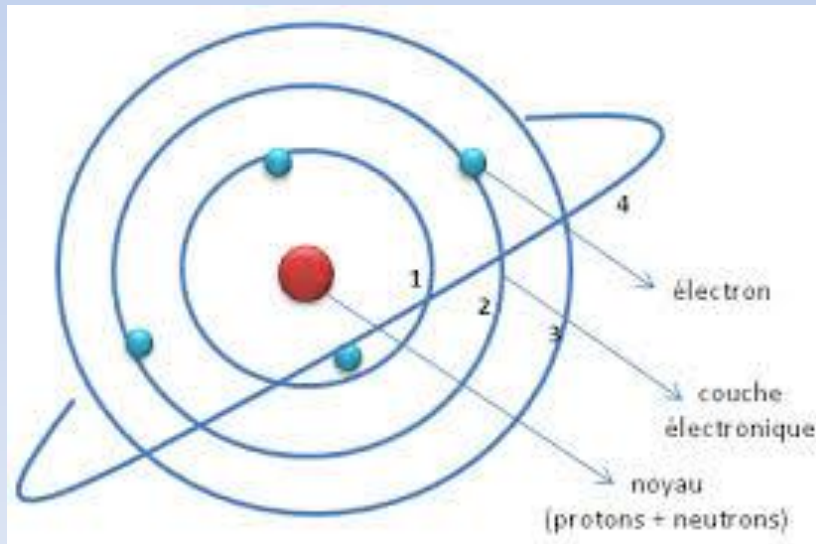
Historique – La structure interne

1913 - Modèle atomique de Bohr

☀ 1913

Niels Bohr

- Électrons sur des **orbites quantifiées**
- Explique les **spectres lumineux**
- Modèle planétaire amélioré



V – Les modèles de l'atome

Historique – La structure interne

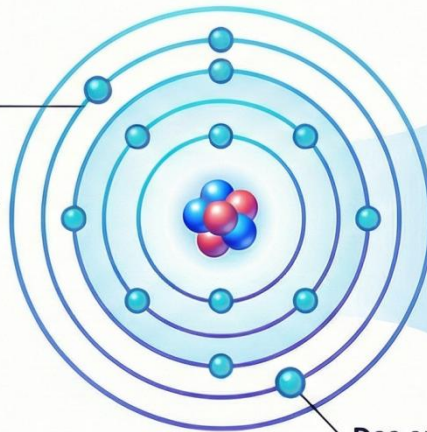
1913 - Modèle atomique de Bohr

L'Atome selon Bohr : Les Niveaux d'Énergie

Le Modèle Atomique de Bohr

Un "modèle planétaire" pour l'atome.

Les électrons tournent autour du noyau sur des orbites circulaires stables.

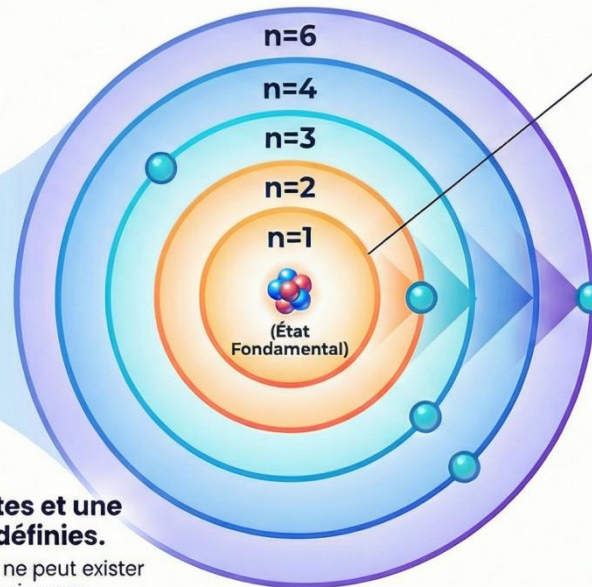


Des orbites et une énergie définies.

Un électron ne peut exister que sur des niveaux d'énergie spécifiques.

Le Rôle du Quantique Principal (n).

Il est un entier ($n=1, 2, 3, \dots$) qui définit chaque niveau d'énergie.



n=1 (État Fondamental)

C'est le niveau d'énergie le plus bas et le plus stable pour un électron.

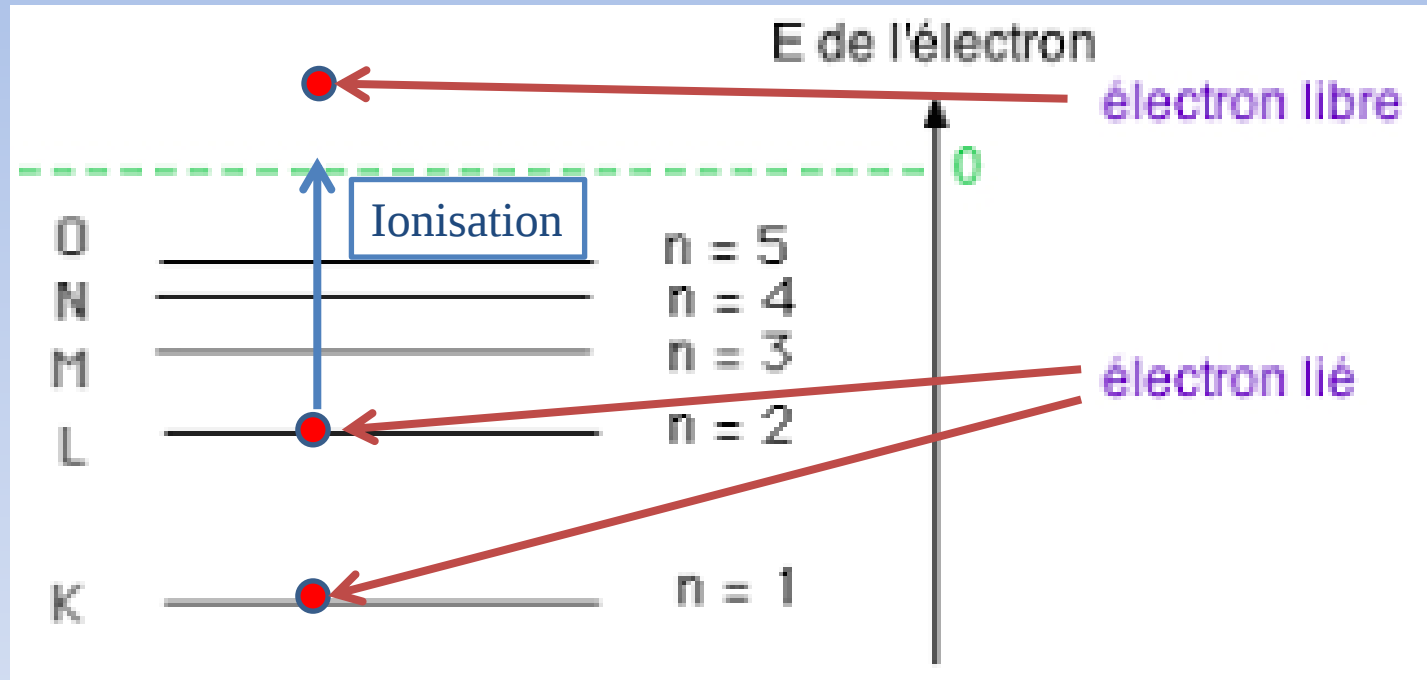
Plus "n" est élevé, plus l'énergie est grande.

L'électron est alors plus éloigné du noyau sur une orbite plus large.

V – Les modèles de l'atome

Historique – La structure interne

1913 - Modèle atomique de Bohr

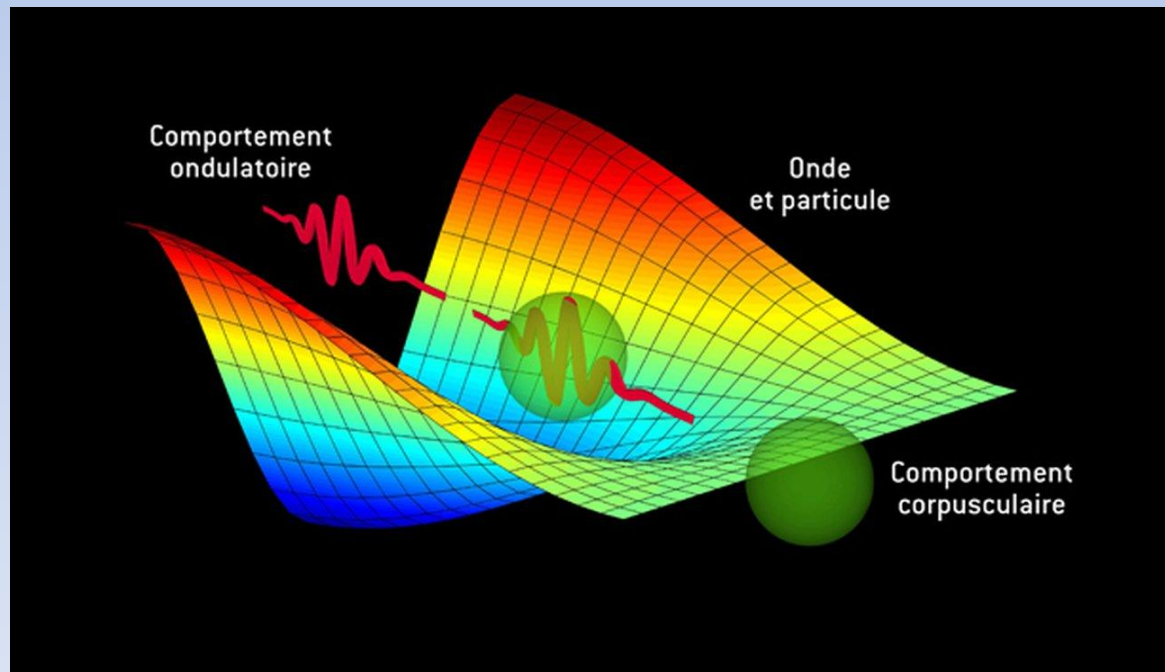


V – Les modèles de l'atome

Historique – Le modèle quantique de l'atome

◆ Louis de Broglie (1924)

- Dualité onde-particule de l'électron.
- L'électron se comporte comme une onde.



V – Les modèles de l'atome

Historique – Le modèle quantique de l'atome

- ◆ Louis de Broglie (1924)
 - Dualité onde-particule de l'électron.
 - L'électron se comporte comme une onde.

de Broglie



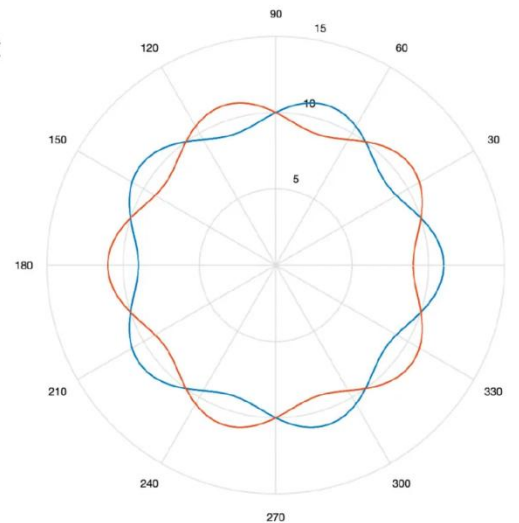
Prince Louis de Broglie

wavelength

Planck's constant

$$\lambda = h / p$$

momentum



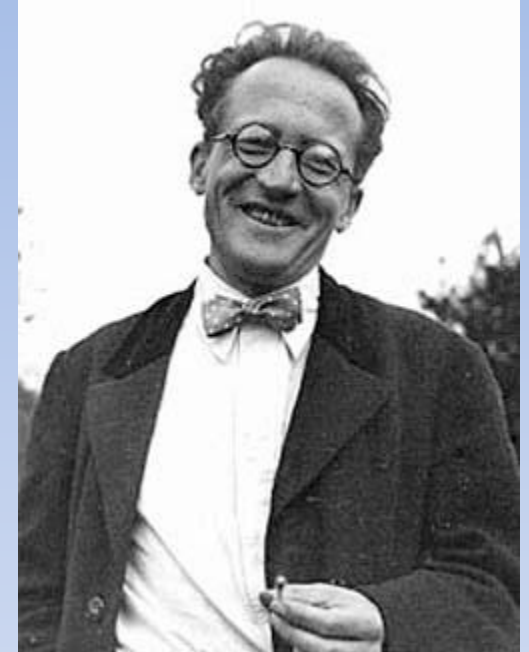
We are then inclined to admit that any moving body may be accompanied by a wave and that it is impossible to disjoin motion of body and propagation of wave.

V – Les modèles de l'atome

Historique – Le modèle quantique de l'atome

◆ Schrödinger (1926)

- Équation de Schrödinger.
- Les électrons ne suivent plus des trajectoires :
 - Ils sont décrits par une **fonction d'onde**.
- Apparition des **orbitales** (nuages de probabilité).



- *Fonction d'onde* $\psi(r, \theta, \phi, t)$

- *Etat quantique* $|\psi(t)\rangle$

- *Densité volumique de probabilité de présence* $dP / dV = |\psi(t)|^2$

V – Les modèles de l'atome

Historique – Le modèle quantique de l'atome

◆ Schrödinger (1926)

- Équation de Schrödinger.
- Les électrons ne suivent plus des trajectoires :
 - Ils sont décrits par une **fonction d'onde**.
- Apparition des **orbitales** (nuages de probabilité).



$$i\hbar \frac{\partial \Psi(t, \vec{r})}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \Delta \Psi(t, \vec{r}) + V(\vec{r}) \Psi(t, \vec{r})$$

$$i\hbar \frac{d}{dt} |\Psi(t)\rangle = \hat{H} |\Psi(t)\rangle$$

V – Les modèles de l'atome

Historique – Le modèle quantique de l'atome

♦ Heisenberg (1927)

- Principe d'incertitude :
 - Impossible de connaître simultanément la position et la vitesse d'un électron avec précision.



Uncertainty principle

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{h}{4\pi}$$

Werner Heisenberg, 1927

shutterstock.com • 2625224867

Principe d'incertitude

- On ne peut jamais mesurer simultanément une position x et son impulsion associée p avec une meilleure précision que

$$\Delta x \cdot \Delta p = \frac{h}{4\pi} = \frac{\hbar}{2}$$

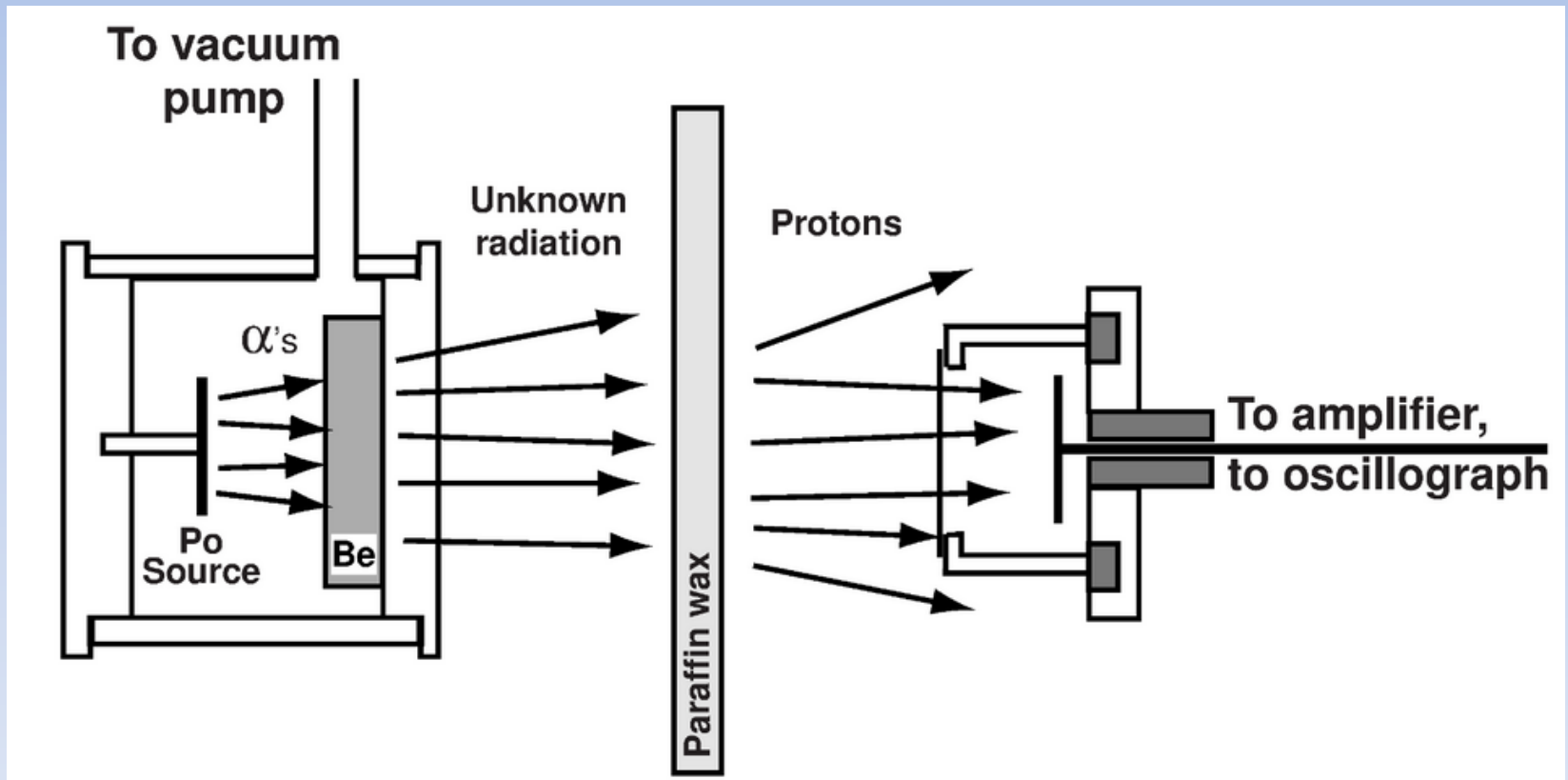
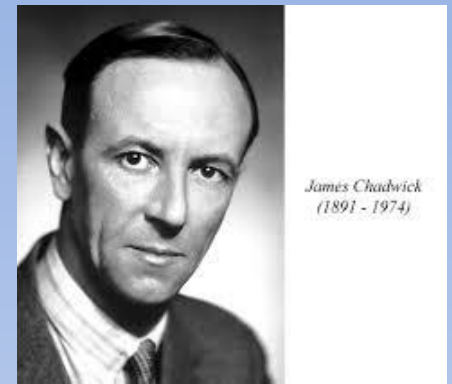
Relation d'incertitude: (Heisenberg)

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$$

V – Les modèles de l'atome

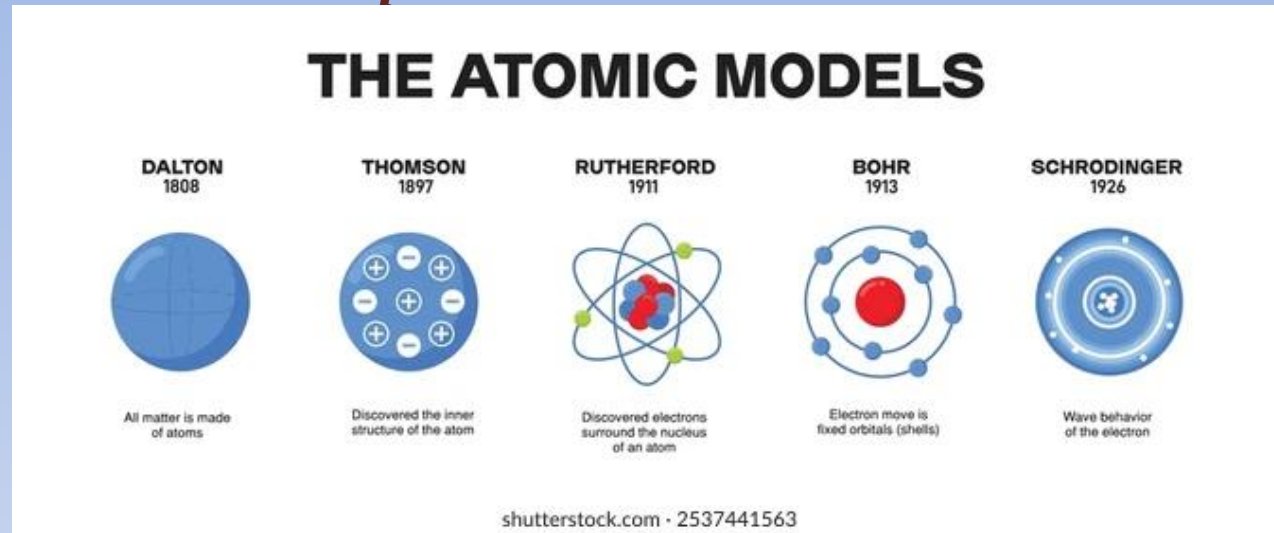
Historique – La structure interne

1932 – La découverte du neutron par Chadwick



V – Les modèles de l'atome

Historique – La structure interne



Résumé rapide

Modèle	Idée clé
Dalton	Atome indivisible
Thomson	Électrons intégrés
Rutherford	Noyau central
Bohr	Énergie quantifiée
Modèle quantique	Orbitales et probabilités

V – Les modèles de l'atome

Historique – Le modèle quantique de l'atome

👉 L'atome est constitué :

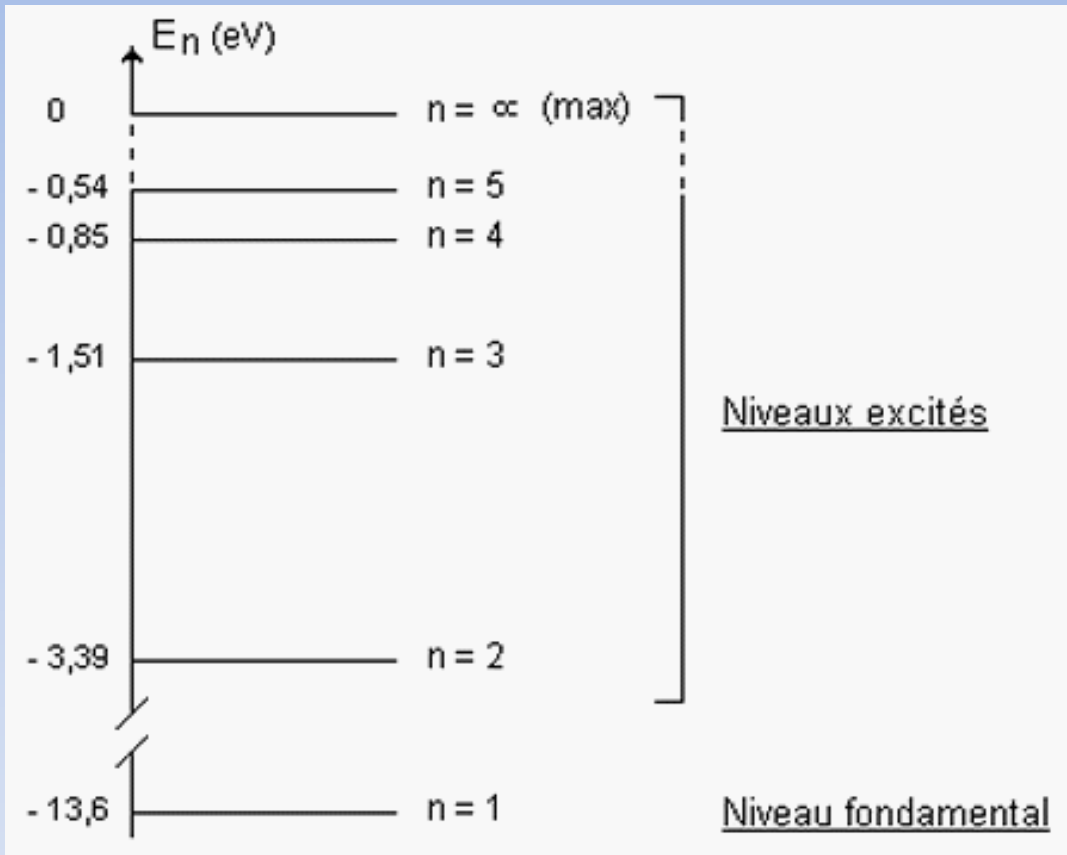
- D'un **noyau** (protons + neutrons)
- D'**électrons** décrits par des **orbitales quantiques**

Caractéristiques :

- Pas de trajectoires définies
- Description **probabiliste**
- Niveaux et sous-niveaux d'énergie (s, p, d, f)

VI – Structure électronique des atomes

1913 - Modèle atomique de Bohr – Cas de l'atome H



Quantification du moment cinétique L de l'électron :

$$L = mvr = \mathbf{n} \hbar / 2\pi$$

- $E_n = - 13,6 / \mathbf{n}^2$ (eV)

- $v_n = v_1 / \mathbf{n}$

- $r_n = a_0 \mathbf{n}^2$

Le rayon de Bohr est donné par

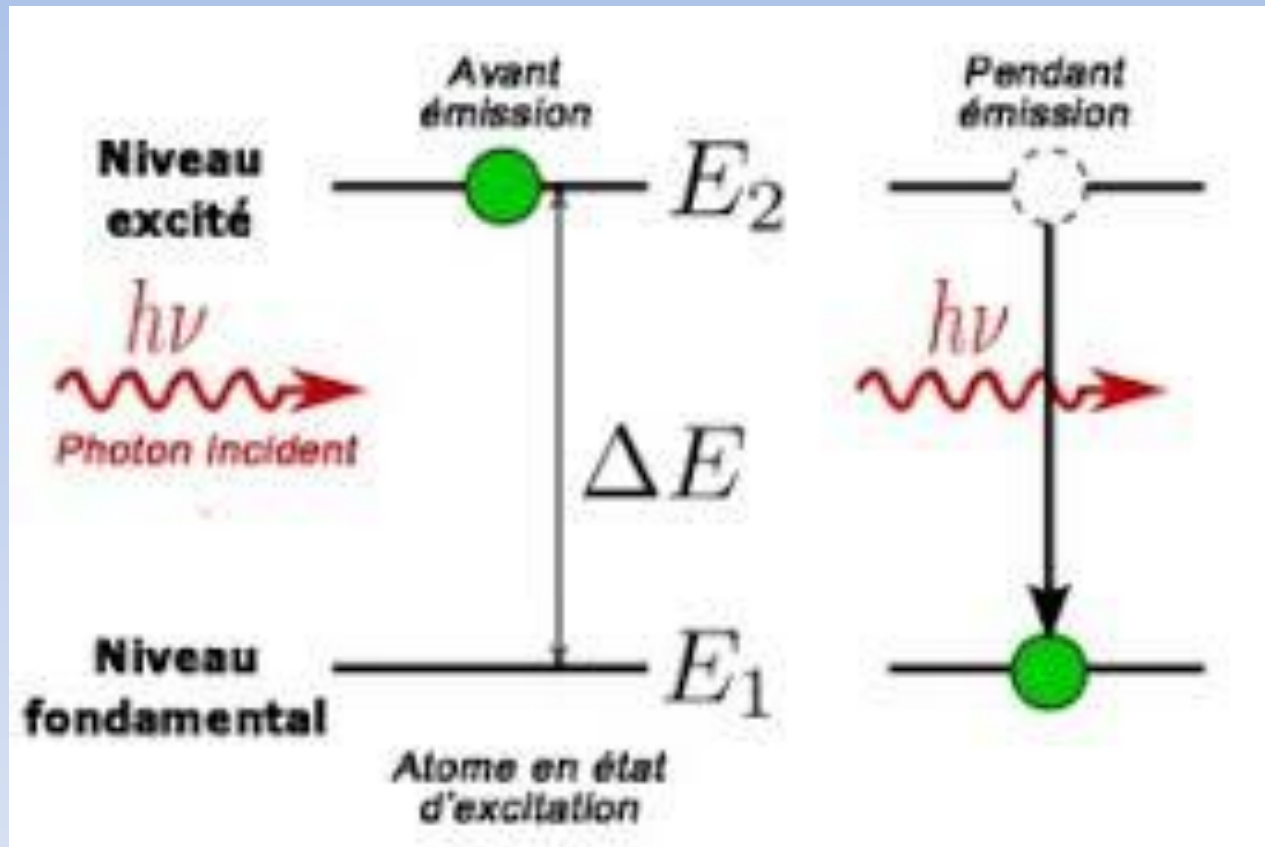
$$a_0 = \frac{\hbar}{\alpha m_e c} = \frac{4\pi\epsilon_0 \hbar^2}{m_e e^2},$$

Rayon de Bohr $a_0 = 0,529 \text{ \AA}$

VI – Structure électronique des atomes

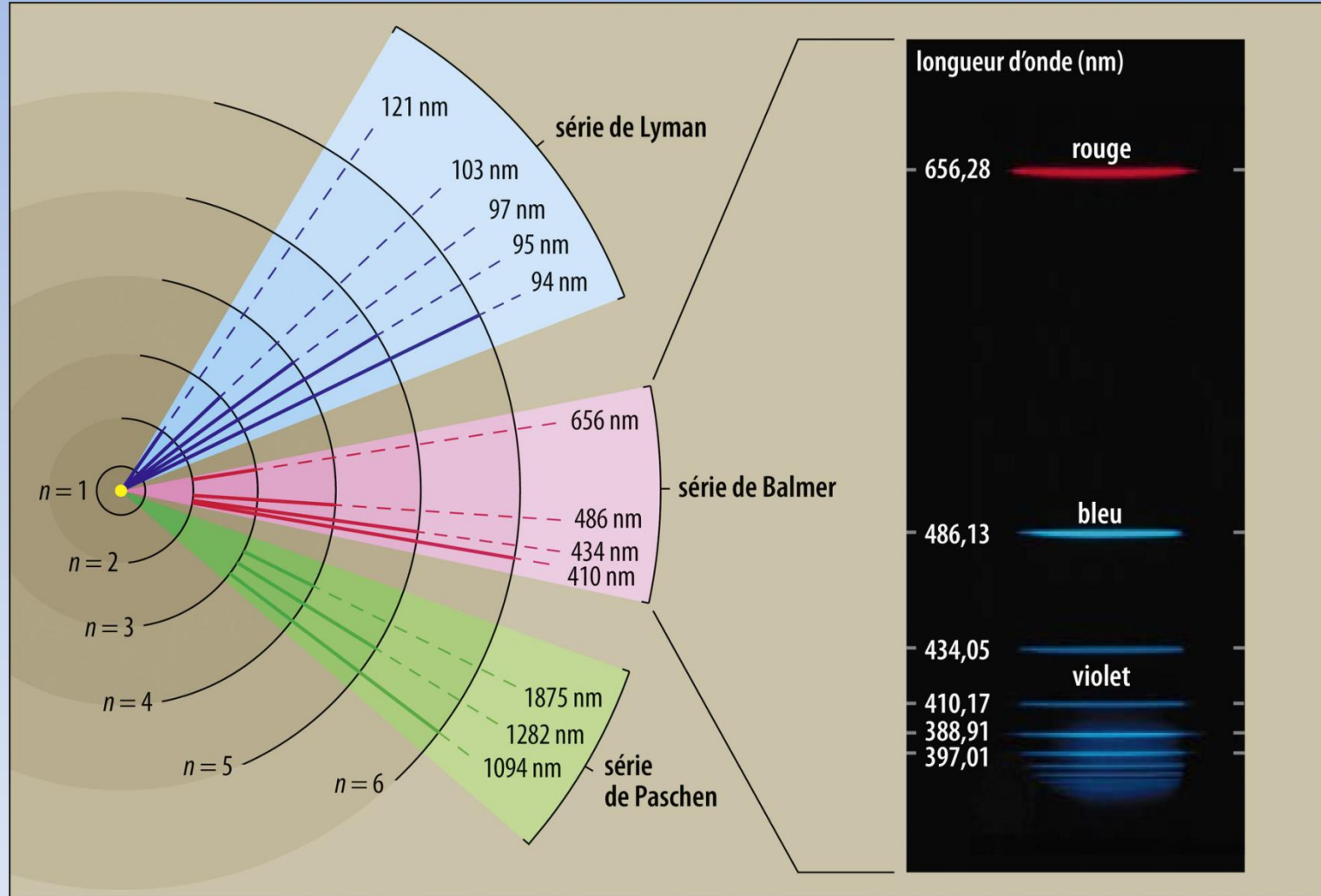
1913 - Modèle atomique de Bohr – Absorption et émission d'un photon

Les transitions électroniques



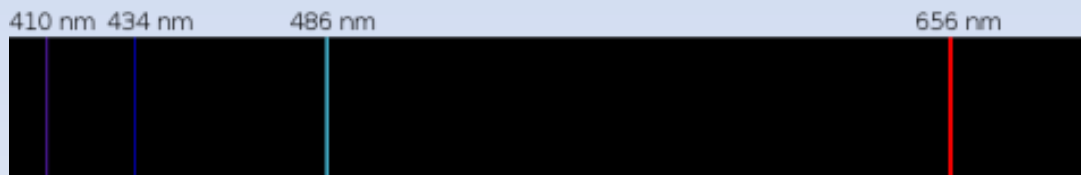
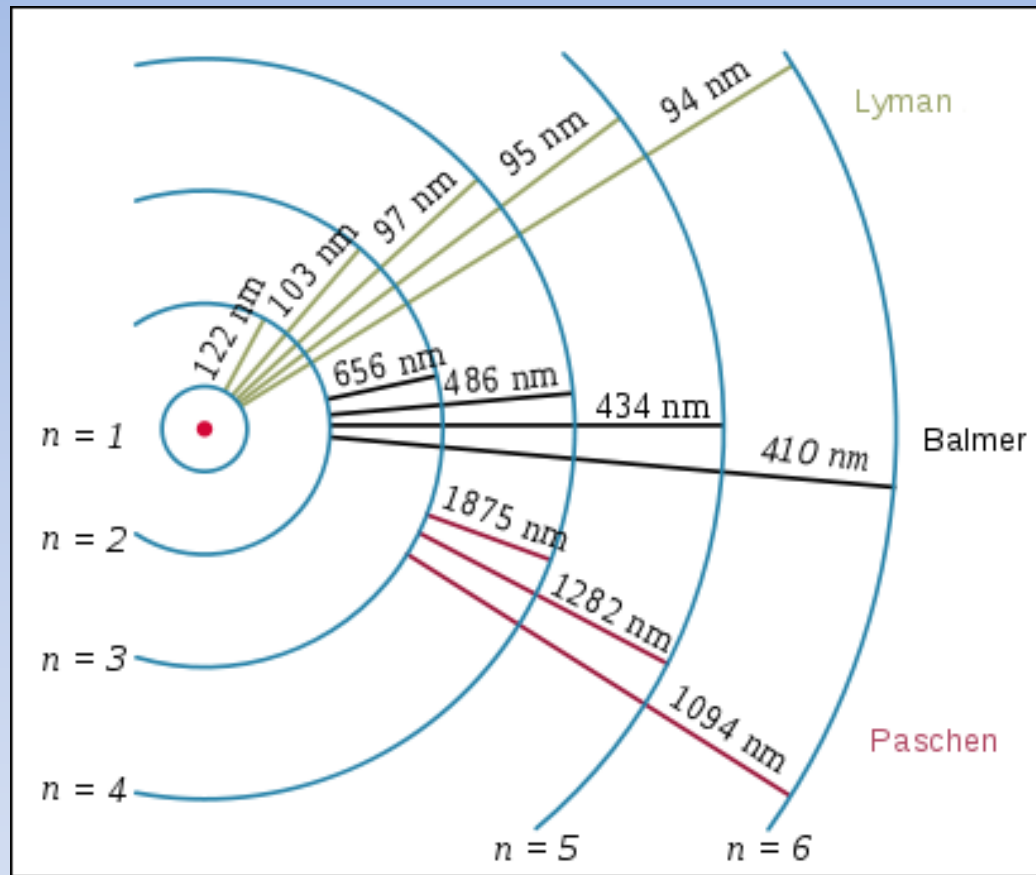
VI – Structure électronique des atomes

1913 - Modèle atomique de Bohr – les raies spectrales de l'atome H



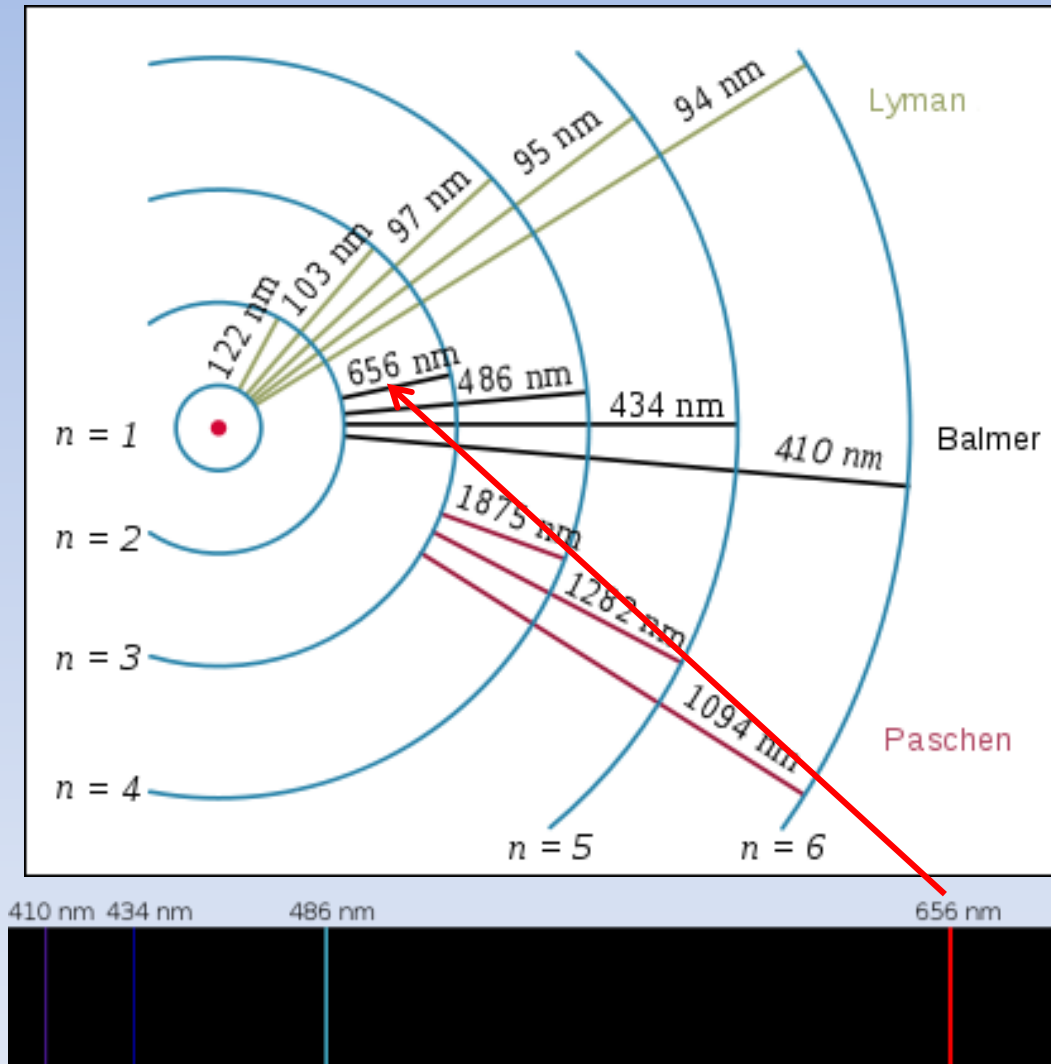
VI – Structure électronique des atomes

1913 - Modèle atomique de Bohr – les raies spectrales de l'atome H



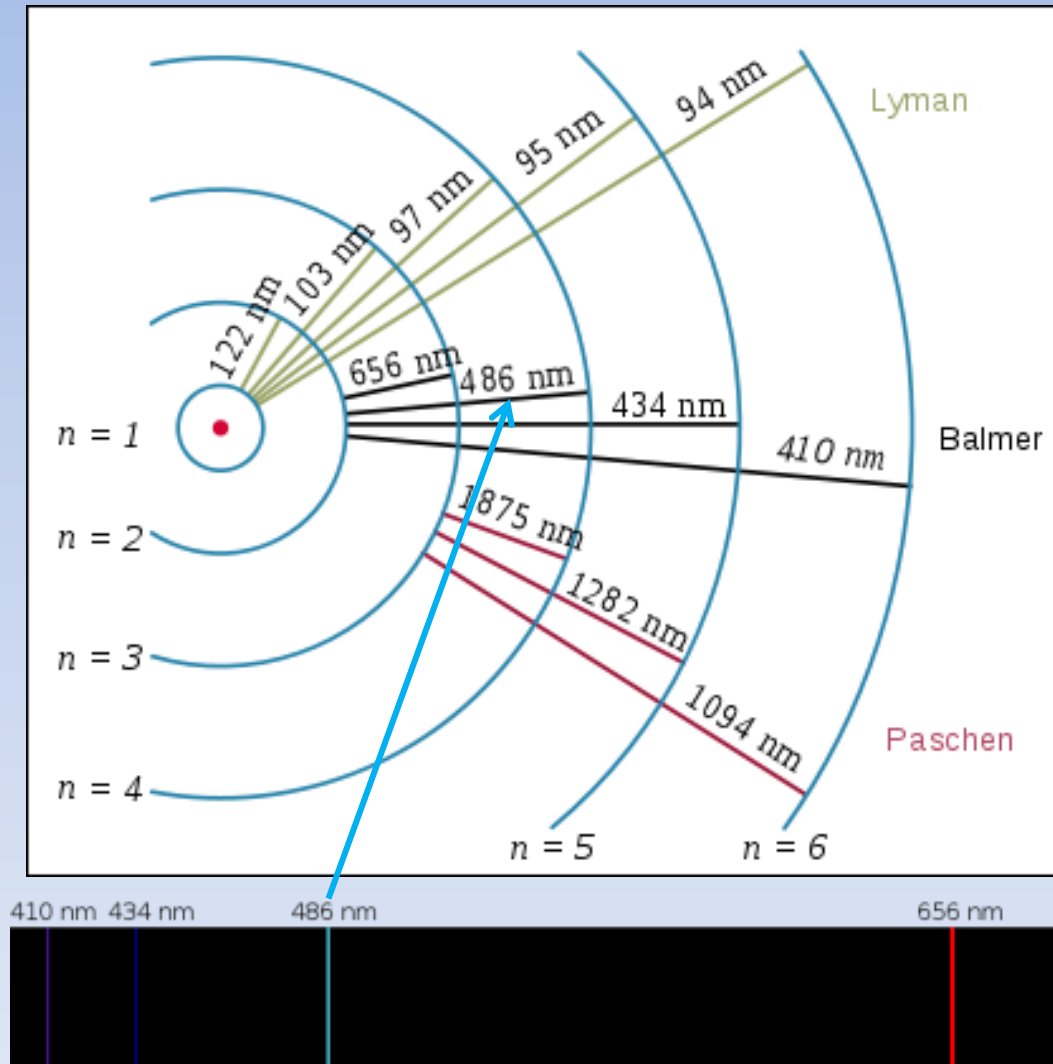
VI – Structure électronique des atomes

1913 - Modèle atomique de Bohr – les raies spectrales de l'atome H



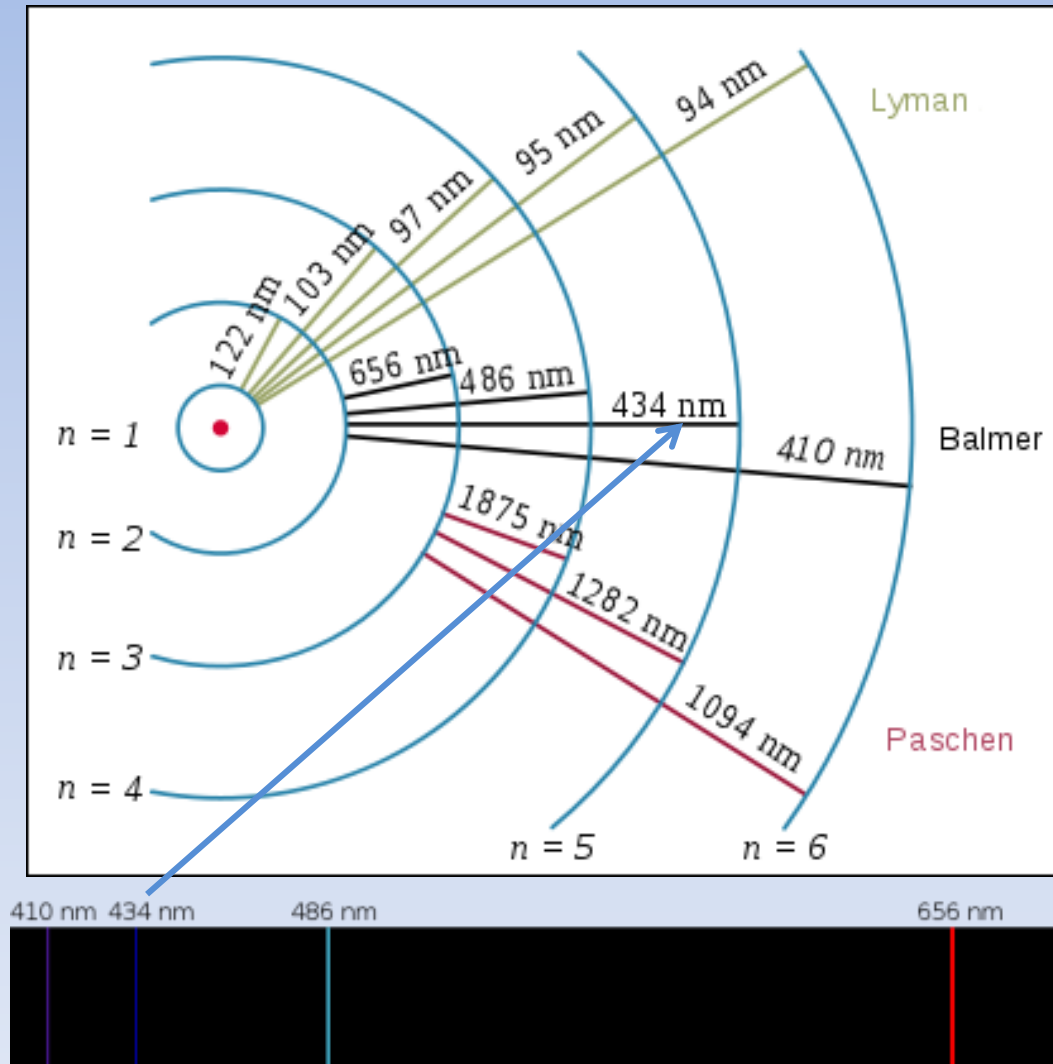
VI – Structure électronique des atomes

1913 - Modèle atomique de Bohr – les raies spectrales de l'atome H



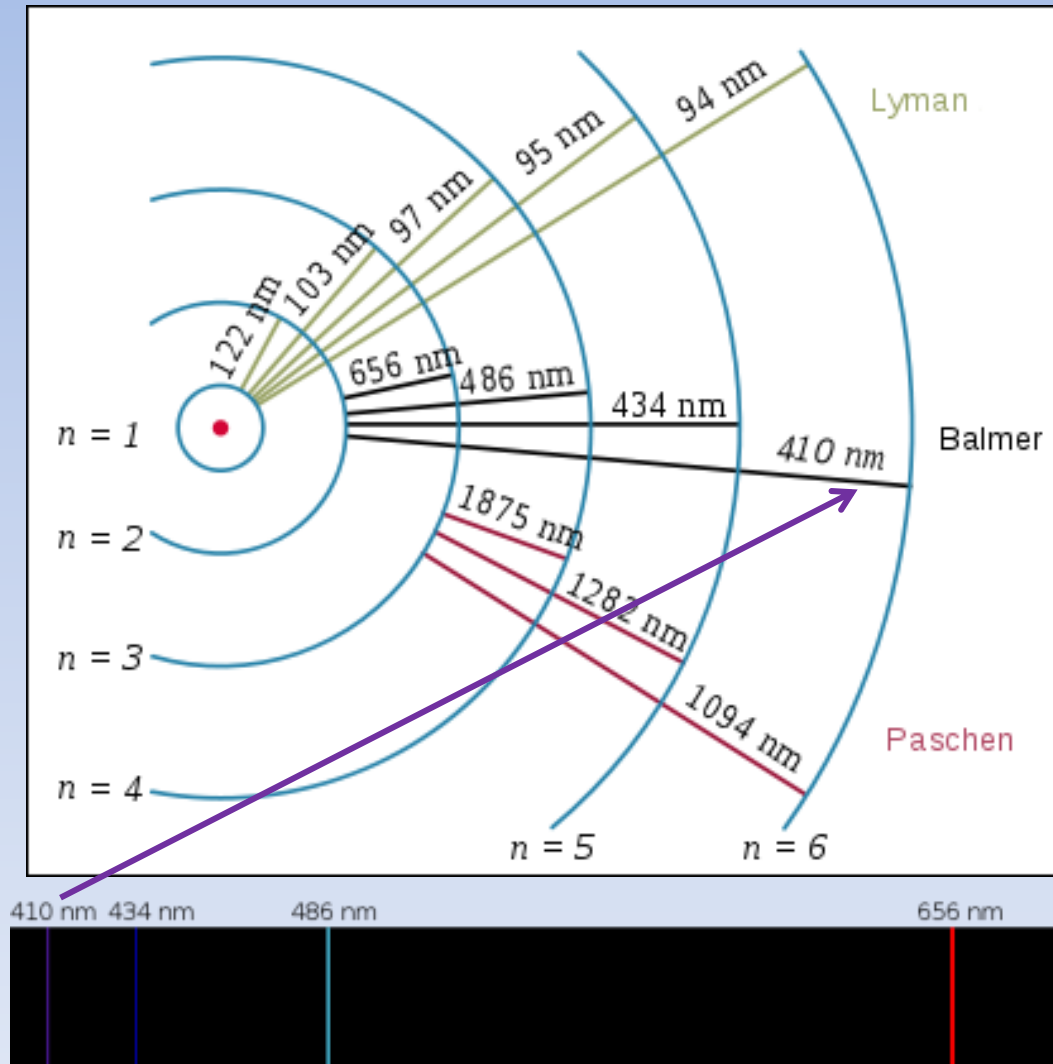
VI – Structure électronique des atomes

1913 - Modèle atomique de Bohr – les raies spectrales de l'atome H



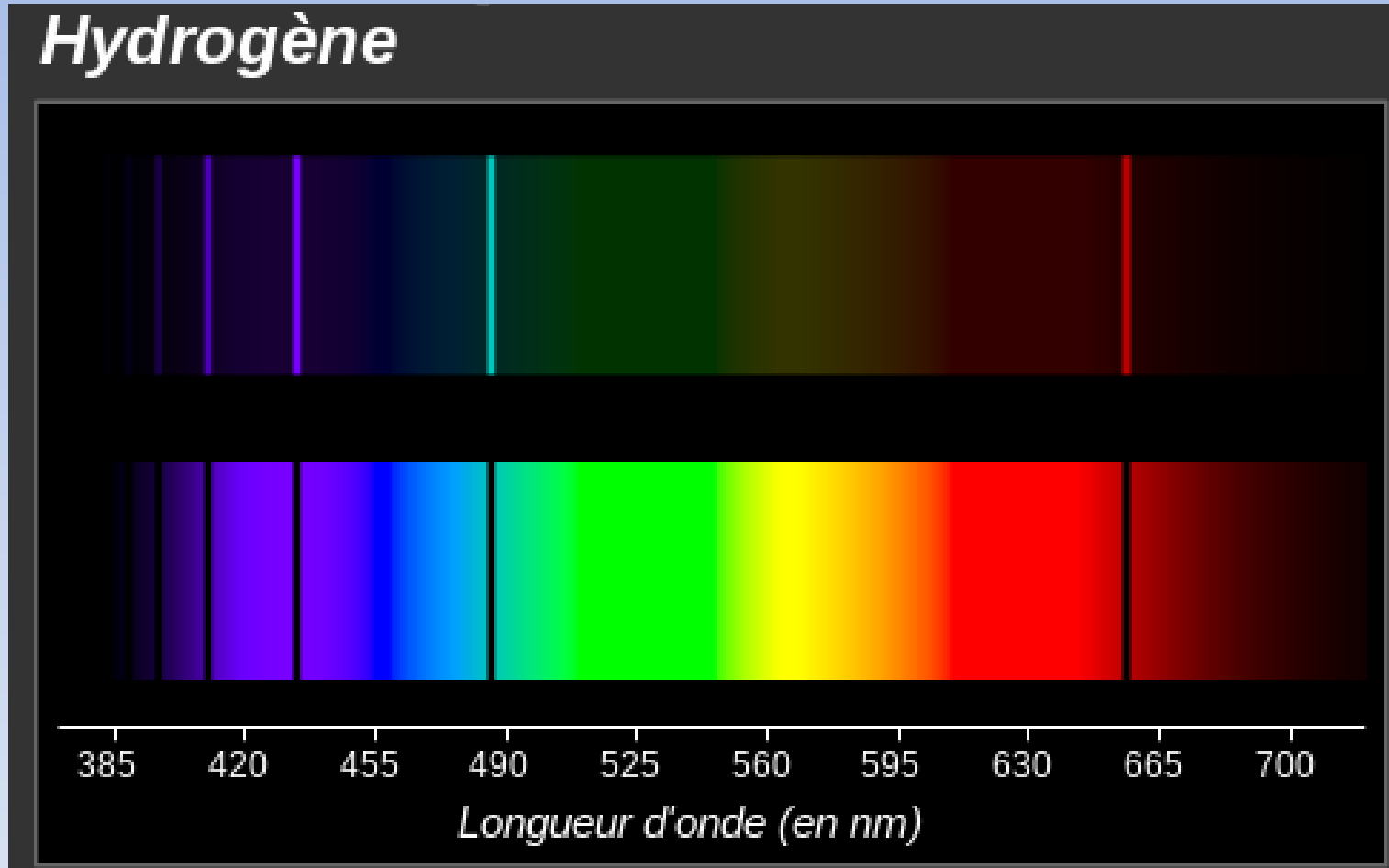
VI – Structure électronique des atomes

1913 - Modèle atomique de Bohr – les raies spectrales de l'atome H



VI – Structure électronique des atomes

1913 - Modèle atomique de Bohr – les raies spectrales de l'atome H



VI – Structure électronique des atomes

Les orbitales atomiques (OA)

👉 L'atome est constitué :

- D'un **noyau** (protons + neutrons)
- D'**électrons** décrits par des **orbitales quantiques**

Caractéristiques :

- Pas de trajectoires définies
- Description **probabiliste**
- Niveaux et sous-niveaux d'énergie (s, p, d, f)

VI – Structure électronique des atomes

Les orbitales atomiques

- Résolution de l'équation de Schrödinger $\rightarrow \psi_{n,l,m}(r,\theta,\varphi,t)$
- Orbitale atomique définie par 3 nombres quantiques ; n , l et m

Hydrogen Wavefunction

Probability density plots

$$\psi_{nlm}(r, \theta, \varphi) = \sqrt{\left(\frac{2}{na_0^*}\right)^3 \frac{(n-l-1)!}{2n(n+l)!}} e^{-\rho/2} \rho^l L_{n-l-1}^{2l+1}(\rho) Y_l^m(\theta, \varphi)$$

VI – Structure électronique des atomes

Les orbitales atomiques OA

- *Résolution de l'équation de Schrödinger $\rightarrow \psi_{n,l,m}(r,\theta,\phi,t)$*
- *Orbitale atomique définit par 3 nombres quantiques ; **n**, **l** et **m***

Nombres quantiques de l'électron dans le modèle de Hund-Mulliken

Nom	Symbole	Analogie classique	Intervalle de valeurs
Nombre quantique principal	n	Niveau d'énergie de l'électron dans l'atome	1, 2, 3, 4, etc.
Nombre quantique azimutal	ℓ	Moment angulaire orbital de l'électron	0, 1, 2, ... $n - 1$
Nombre quantique magnétique	m_ℓ	Projection du moment angulaire orbital sur un axe	$-\ell, \dots 0, \dots \ell$
Nombre quantique magnétique de spin	m_s	Projection du moment angulaire intrinsèque (spin) de l'électron	$-\frac{1}{2}$ ou $+\frac{1}{2}$

VI – Structure électronique des atomes

Les orbitales atomiques OA

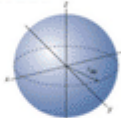
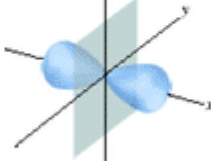
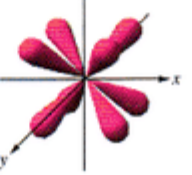
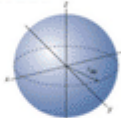
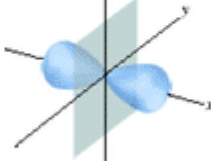
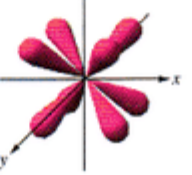
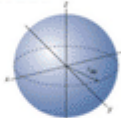
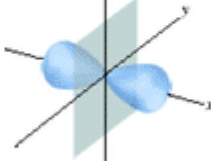
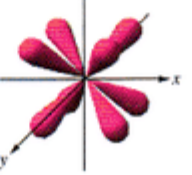
- Orbitale atomique définie par 3 nombres quantiques ; n , l et m

Valeurs possibles des nombres quantiques

Symbole	Dénomination	Valeurs possibles	Inégalités entre les nombres quantiques
n	principal	1, 2, 3, 4 ...	$n \geq 1$
l	secondaire (ou azimutal)	0, 1, 2, ... $(n-1)$	$0 \leq l \leq (n-1)$
m (ou m_l)	magnétique	$-l, (-l+1), \dots, 0, \dots, (l-1), l$	$-l \leq m \leq l$
s (ou m_s)	spin	$+1/2, -1/2$	

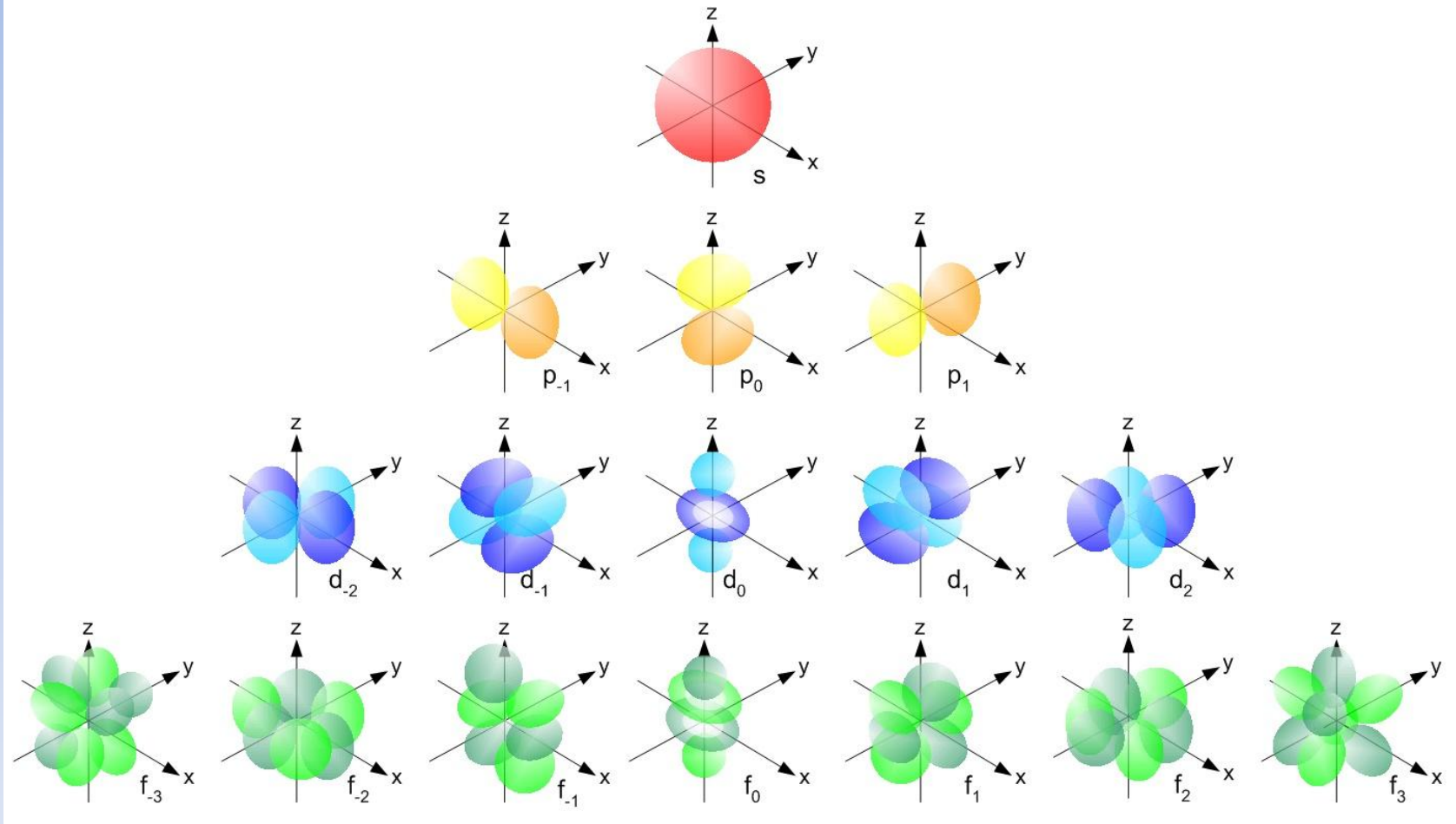
VI – Structure électronique des atomes

Les orbitales atomiques OA

	Nombre quantique principal n (section 5.4.1)	Nombre quantique secondaire l (section 5.4.2)	Nombre quantique magnétique m_l (section 5.4.3)																																											
Valeurs permises	$n = 1, 2, 3, \dots$	$l = 0, 1, 2, \dots, n-1$	$m = -l, \dots, 0, \dots, +l$																																											
Détermine...	Le niveau énergétique et la taille des orbitales	La forme des orbitales	L'orientation des orbitales																																											
Caractérise ...	Un niveau électronique	Un sous-niveau électronique	L'orbitale d'un sous-niveau																																											
	<table><tr><th>Valeur de n</th><th>Énergie</th><th>Proximité du noyau</th></tr><tr><td>1</td><td rowspan="4">+ basse</td><td rowspan="4">+ près</td></tr><tr><td>2</td></tr><tr><td>3</td></tr><tr><td>4</td></tr><tr><td>5</td><td rowspan="2">+ élevée</td><td rowspan="2">+ éloignée</td></tr><tr><td>...</td></tr></table>	Valeur de n	Énergie	Proximité du noyau	1	+ basse	+ près	2	3	4	5	+ élevée	+ éloignée	...	<table><tr><th>Valeur de l</th><th>Identification du sous-niveau</th><th></th></tr><tr><td>0</td><td>s</td><td></td></tr><tr><td>1</td><td>p</td><td></td></tr><tr><td>2</td><td>d</td><td></td></tr><tr><td>3</td><td>f</td><td></td></tr></table>	Valeur de l	Identification du sous-niveau		0	s		1	p		2	d		3	f		<table><tr><th>Type d'orbitale</th><th>Valeurs de m_l</th><th>Nombre d'orbitales</th></tr><tr><td>s</td><td>$l = 0$ $m_l = 0$</td><td>1 <u>orbitale s</u></td></tr><tr><td>p</td><td>$l = 1$ $m_l = -1, 0, +1$</td><td>3 orbitales p</td></tr><tr><td>d</td><td>$l = 2$ $m_l = -2, -1, 0, +1, +2$</td><td>5 orbitales d</td></tr><tr><td>f</td><td>$l = 3$ $m_l = -3, -2, -1, 0, +1, +2, +3$</td><td>7 orbitales f</td></tr></table>	Type d'orbitale	Valeurs de m_l	Nombre d'orbitales	s	$l = 0$ $m_l = 0$	1 <u>orbitale s</u>	p	$l = 1$ $m_l = -1, 0, +1$	3 orbitales p	d	$l = 2$ $m_l = -2, -1, 0, +1, +2$	5 orbitales d	f	$l = 3$ $m_l = -3, -2, -1, 0, +1, +2, +3$	7 orbitales f
	Valeur de n	Énergie	Proximité du noyau																																											
	1	+ basse	+ près																																											
	2																																													
3																																														
4																																														
5	+ élevée	+ éloignée																																												
...																																														
Valeur de l	Identification du sous-niveau																																													
0	s																																													
1	p																																													
2	d																																													
3	f																																													
Type d'orbitale	Valeurs de m_l	Nombre d'orbitales																																												
s	$l = 0$ $m_l = 0$	1 <u>orbitale s</u>																																												
p	$l = 1$ $m_l = -1, 0, +1$	3 orbitales p																																												
d	$l = 2$ $m_l = -2, -1, 0, +1, +2$	5 orbitales d																																												
f	$l = 3$ $m_l = -3, -2, -1, 0, +1, +2, +3$	7 orbitales f																																												

VI – Structure électronique des atomes

Les orbitales atomiques OA



VI – Structure électronique des atomes

Les orbitales atomiques OA

- Orbitale atomique définit par 3 nombres quantiques ; n , l et m
La structure fine de l'atome

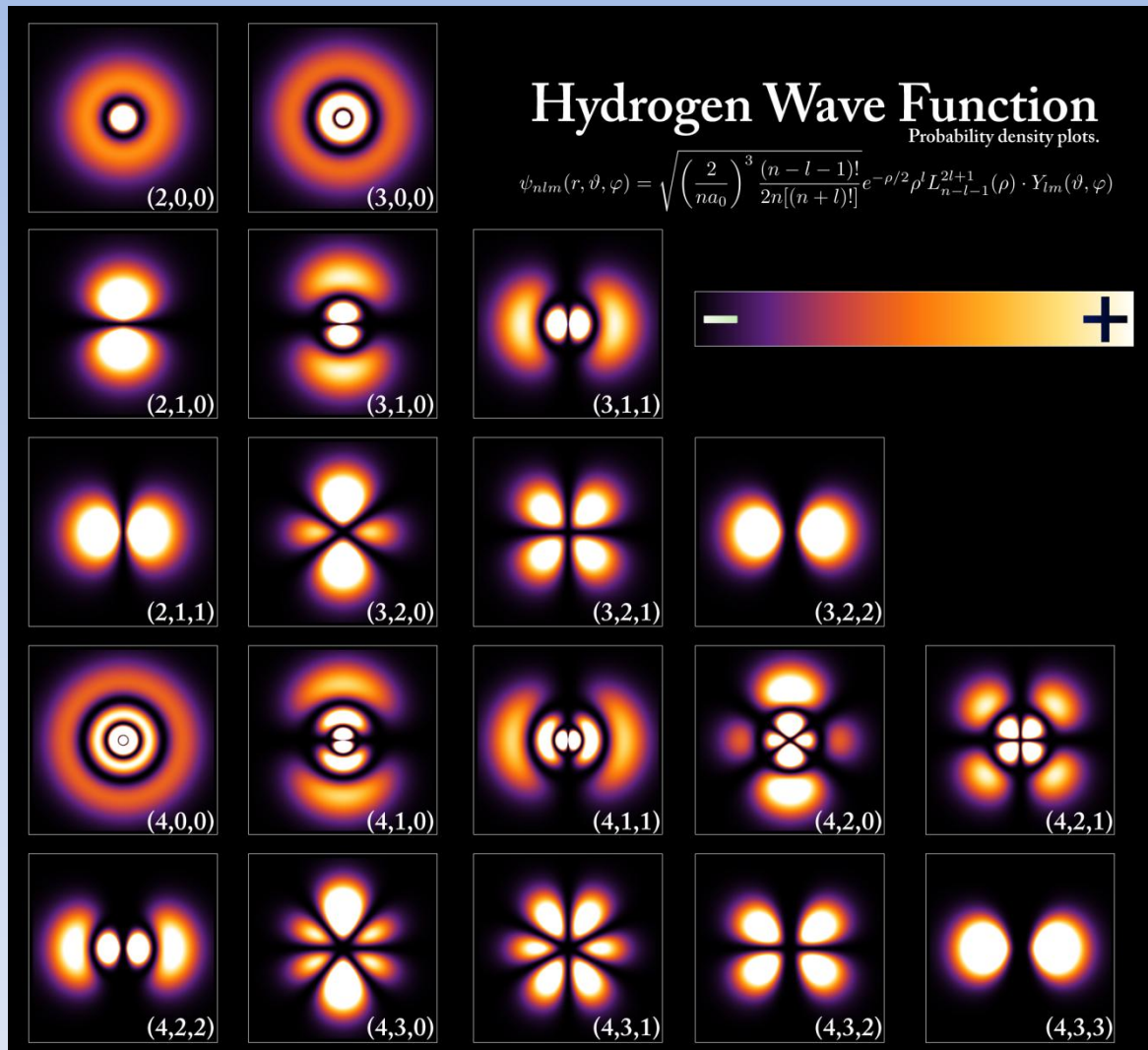
	Nombre quantique principal n (section 5.4.1)	Nombre quantique secondaire l (section 5.4.2)	Nombre quantique magnétique m_l (section 5.4.3)
Valeurs permises	$n = 1, 2, 3, \dots$	$l = 0, 1, 2, \dots, n-1$	$m = -l, \dots, 0, \dots, +l$
Détermine...	Le niveau énergétique et la taille des orbitales	La forme des orbitales	L'orientation des orbitales
Caractérise ...	Un niveau électronique	Un sous-niveau électronique	L'orbitale d'un sous-niveau

- $n = 1 \rightarrow l = 0$
 - $l = 0 \rightarrow$ OA « s »
 - Une seule valeur de $l \rightarrow$ un sous-niveau
 - $m = 0$: Une seule valeur de $m \rightarrow$ une OA « s » sur ce sous-niveau

OA (1,0,0) ou OA « 1s »

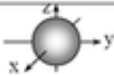
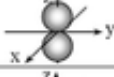
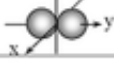
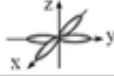
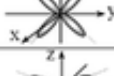
VI – Structure électronique des atomes

Les orbitales atomiques OA



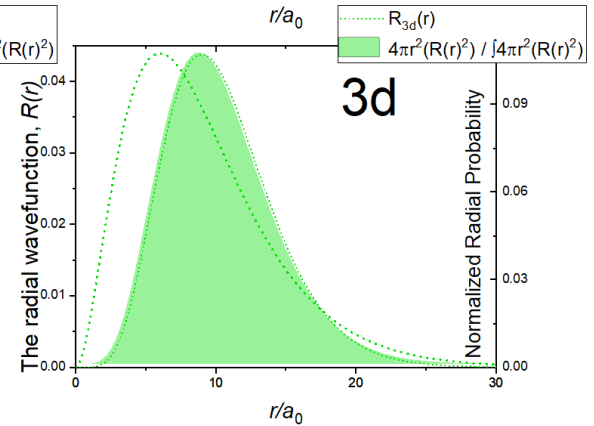
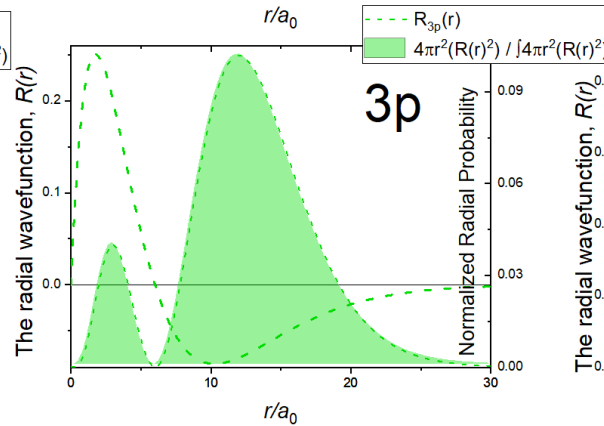
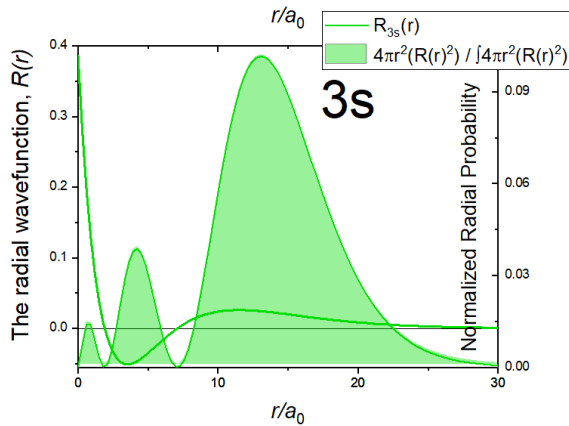
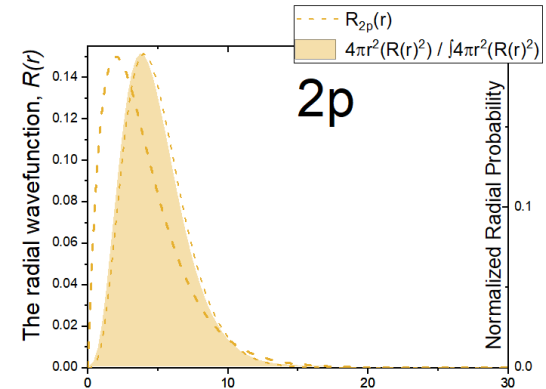
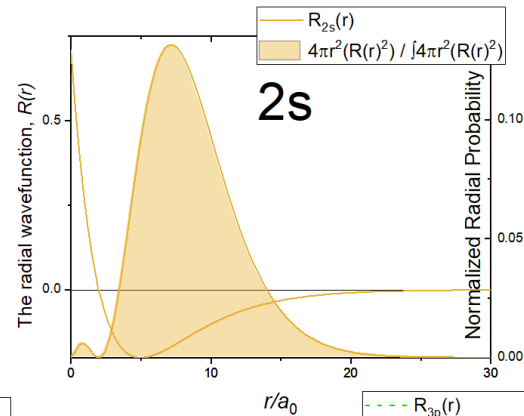
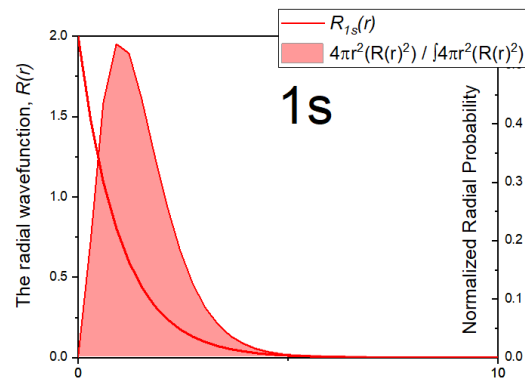
VI – Structure électronique des atomes

Les orbitales atomiques OA

Couche	n	l	m	nom	Fonction d'onde	Orbitale
K	1	0	0	1s	$\psi_{1s} = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{Z}{r_0} \right)^{\frac{1}{2}} e^{-\frac{Zr}{r_0}}$	
L	2	0	0	2s	$\psi_{2s} = \frac{1}{4\sqrt{2\pi}} \left(\frac{Z}{r_0} \right)^{\frac{1}{2}} \left(2 - \frac{Zr}{r_0} \right) e^{-\frac{Zr}{2r_0}}$	idem 1s
		1	+1	2p _x	$\psi_{2p_x} = \frac{1}{4\sqrt{2\pi}} \left(\frac{Z}{r_0} \right)^{\frac{1}{2}} e^{-\frac{Zr}{2r_0}} r \sin \theta \cos \varphi$	
		1	0	2p _z	$\psi_{2p_z} = \frac{1}{4\sqrt{2\pi}} \left(\frac{Z}{r_0} \right)^{\frac{1}{2}} e^{-\frac{Zr}{2r_0}} r \cos \theta$	
		1	-1	2p _y	$\psi_{2p_y} = \frac{1}{4\sqrt{2\pi}} \left(\frac{Z}{r_0} \right)^{\frac{1}{2}} e^{-\frac{Zr}{2r_0}} r \sin \theta \sin \varphi$	
M	3	0	0	3s	$\psi_{3s} = \frac{1}{81\sqrt{3\pi}} \left(\frac{Z}{r_0} \right)^{\frac{1}{2}} \left(27 - 18\frac{Zr}{r_0} + 2\frac{Z^2 r^2}{r_0^2} \right) e^{-\frac{Zr}{3r_0}}$	idem 1s
		1	+1	3p _x	$\psi_{3p_x} = \frac{1}{81\sqrt{\pi}} \left(\frac{Z}{r_0} \right)^{\frac{1}{2}} \left(6r - \frac{Zr^2}{r_0} \right) e^{-\frac{Zr}{3r_0}} r \sin \theta \cos \varphi$	idem 2p
		1	0	3p _z	$\psi_{3p_z} = \frac{\sqrt{2}}{81\sqrt{\pi}} \left(\frac{Z}{r_0} \right)^{\frac{1}{2}} \left(6r - \frac{Zr^2}{r_0} \right) e^{-\frac{Zr}{3r_0}} r \cos \theta$	idem 2p
		1	-1	3p _y	$\psi_{3p_y} = \frac{1}{81\sqrt{\pi}} \left(\frac{Z}{r_0} \right)^{\frac{1}{2}} \left(6r - \frac{Zr^2}{r_0} \right) e^{-\frac{Zr}{3r_0}} r \sin \theta \sin \varphi$	idem 2p
		2	+2	3d _{x²-y²}	$\psi(3d_{x^2-y^2}) = \frac{1}{162\sqrt{\pi}} \left(\frac{Z}{r_0} \right)^{\frac{1}{2}} e^{-\frac{Zr}{3r_0}} r^2 \sin^2 \theta \cos 2\varphi$	
		2	+1	3d _{xz}	$\psi(3d_{xz}) = \frac{1}{81\sqrt{\pi}} \left(\frac{Z}{r_0} \right)^{\frac{1}{2}} e^{-\frac{Zr}{3r_0}} r^2 \sin \theta \cos \theta \cos \varphi$	
		2	0	3d _{z²}	$\psi(3d_{z^2}) = \frac{1}{81\sqrt{6\pi}} \left(\frac{Z}{r_0} \right)^{\frac{1}{2}} e^{-\frac{Zr}{3r_0}} r^2 (3\cos^2 \theta - 1)$	
		2	-1	3d _{yz}	$\psi(3d_{yz}) = \frac{1}{81\sqrt{\pi}} \left(\frac{Z}{r_0} \right)^{\frac{1}{2}} e^{-\frac{Zr}{3r_0}} r^2 \sin \theta \cos \theta \sin \varphi$	
		2	-2	3d _{xy}	$\psi(3d_{xy}) = \frac{1}{162\sqrt{\pi}} \left(\frac{Z}{r_0} \right)^{\frac{1}{2}} e^{-\frac{Zr}{3r_0}} r^2 \sin^2 \theta \sin 2\varphi$	

VI – Structure électronique des atomes

Les orbitales atomiques OA

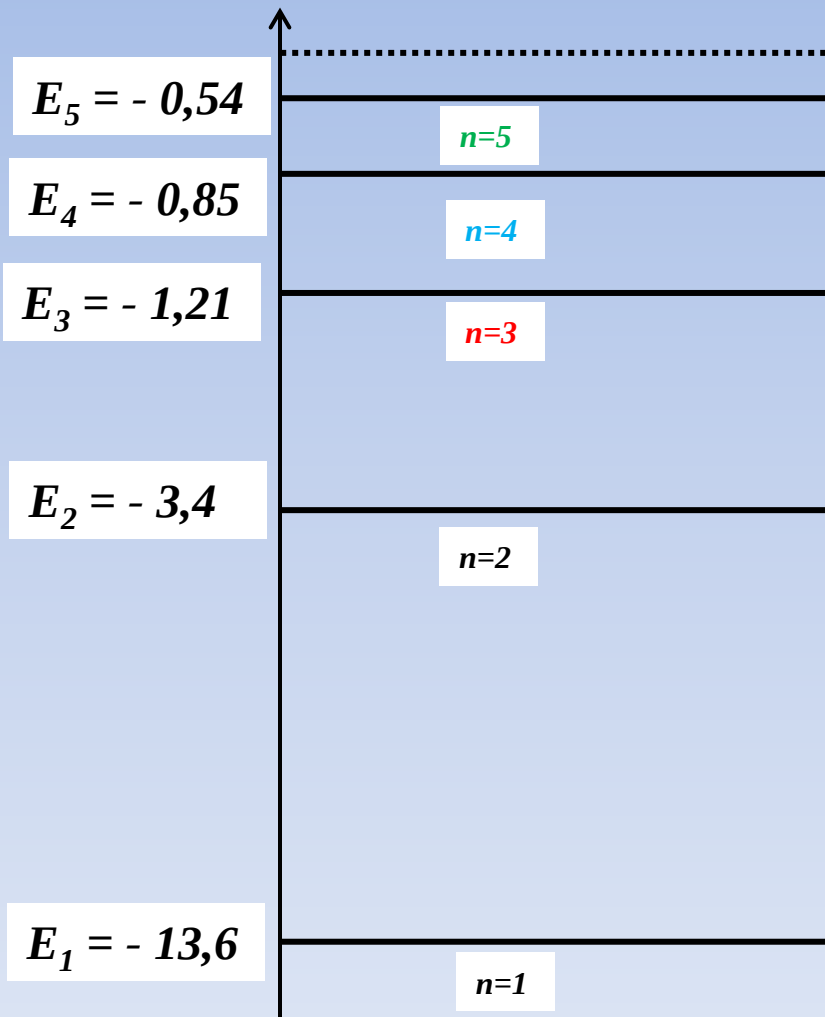


VI – Structure électronique des atomes

Niveaux d'énergie (H) et orbitales atomiques OA

$$E_n = - 13,6 / n^2 \text{ (eV)}$$

$$E_{\infty} = 0$$

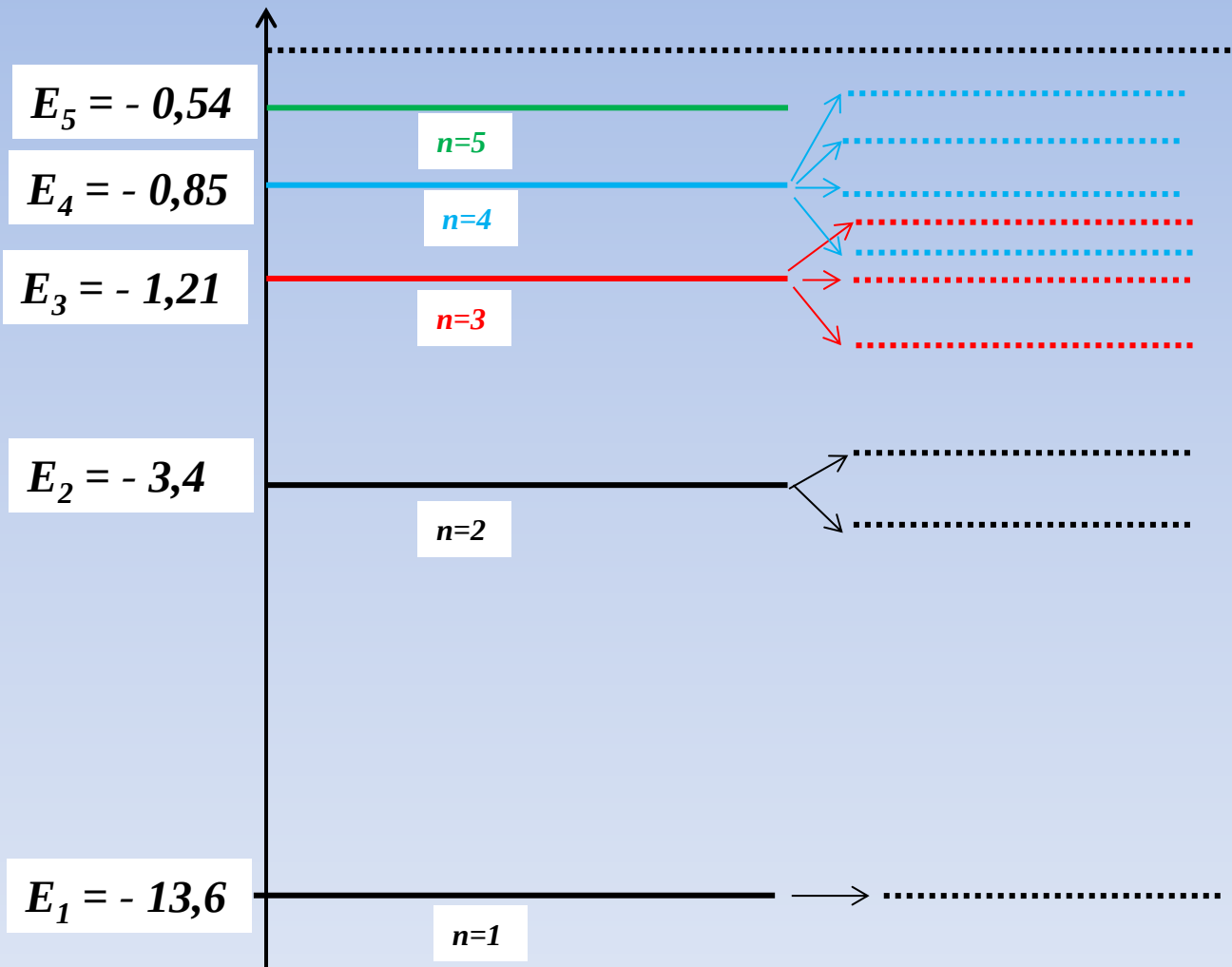


VI – Structure électronique des atomes

Niveaux d'énergie (H) et orbitales atomiques OA

$$E_n = -13,6 / n^2 \text{ (eV)}$$

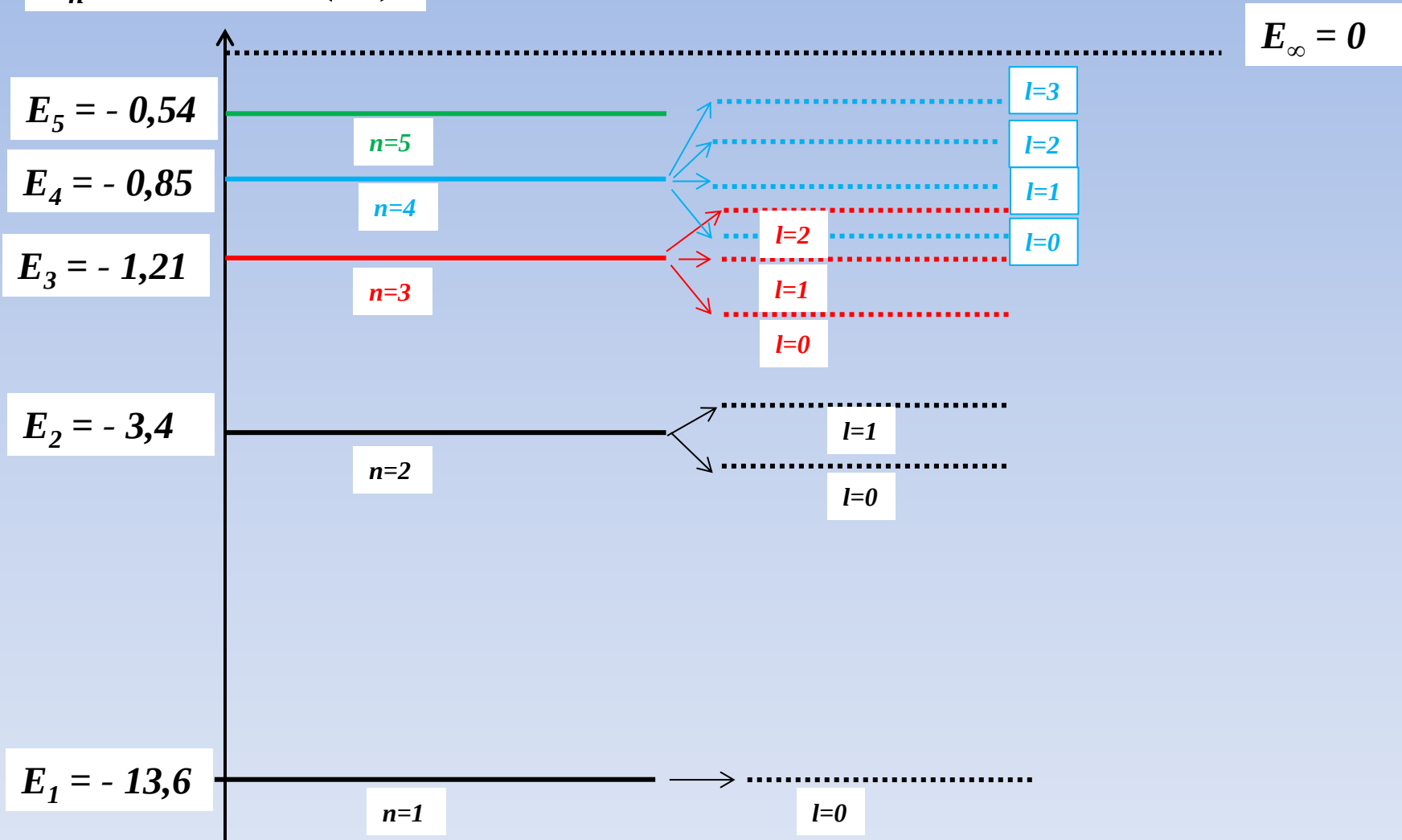
$$E_\infty = 0$$



VI – Structure électronique des atomes

Niveaux d'énergie (H) et orbitales atomiques OA

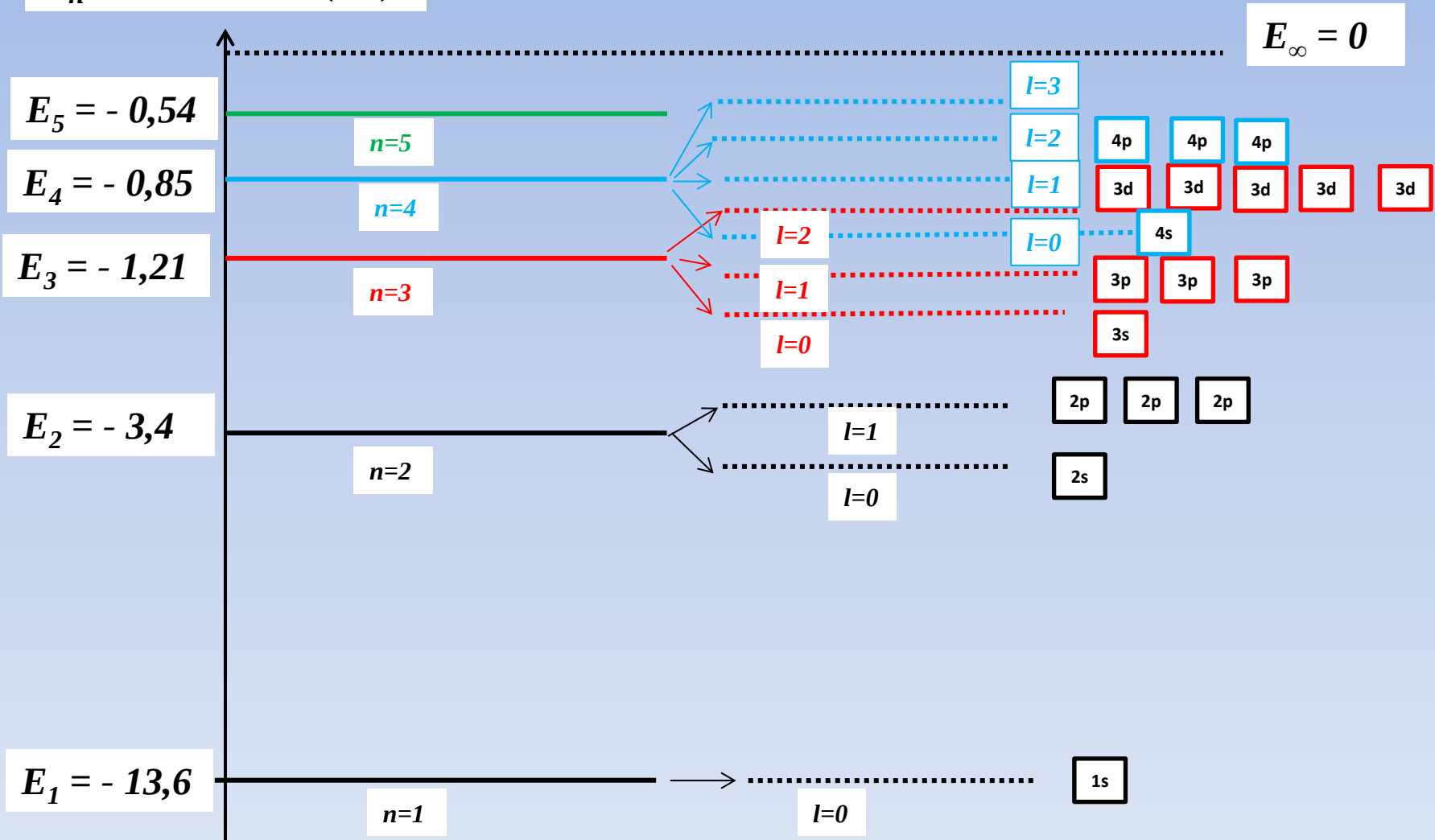
$$E_n = -13,6 / n^2 \text{ (eV)}$$



VI – Structure électronique des atomes

Niveaux d'énergie (H) et orbitales atomiques OA

$$E_n = -13,6 / n^2 \text{ (eV)}$$



VII – Structure du Tableau périodique

Règles de remplissages des orbitales atomiques OA

1 – Règle de Klechkowski

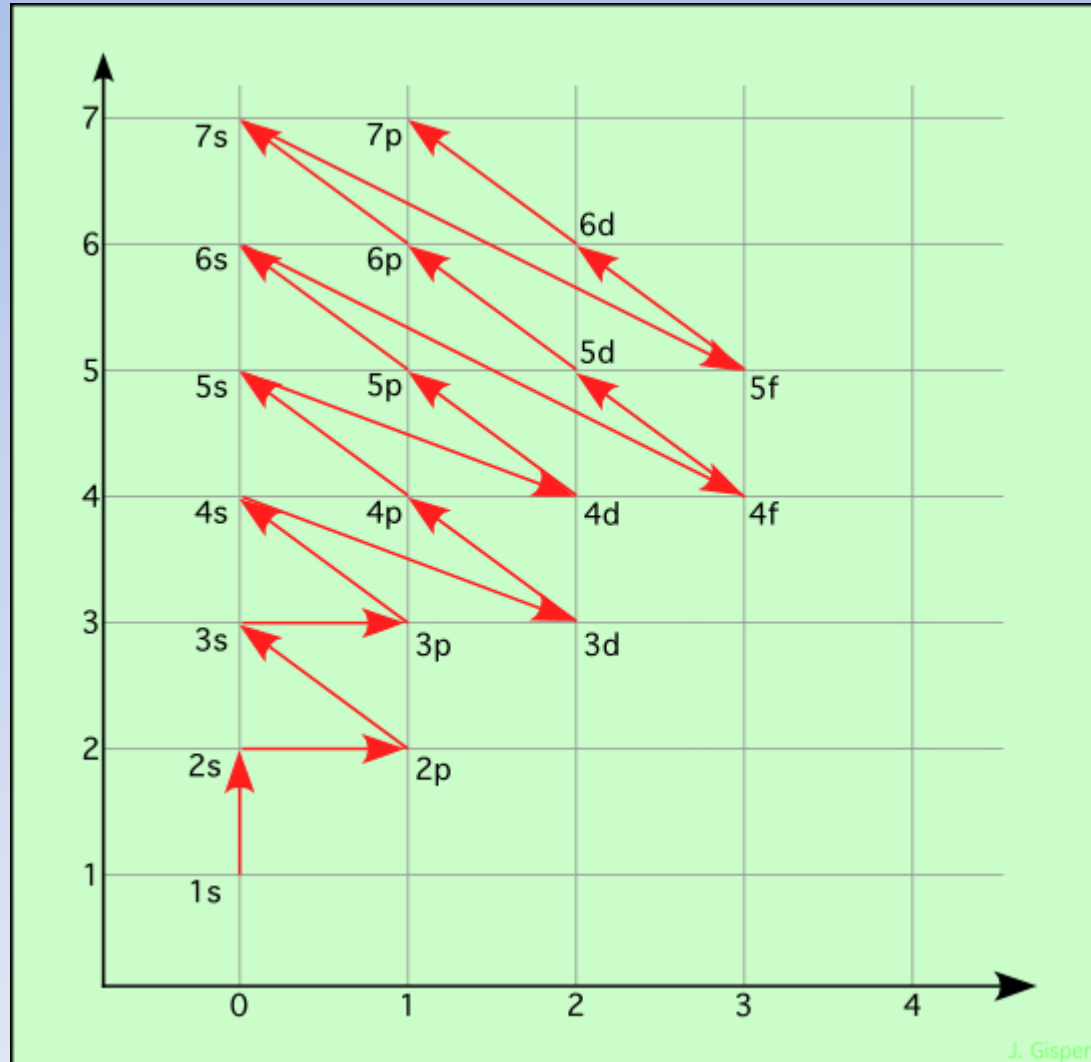
2 – Règle de Hund

3 – Principe d'exclusion de Pauli

VII – Structure du Tableau périodique

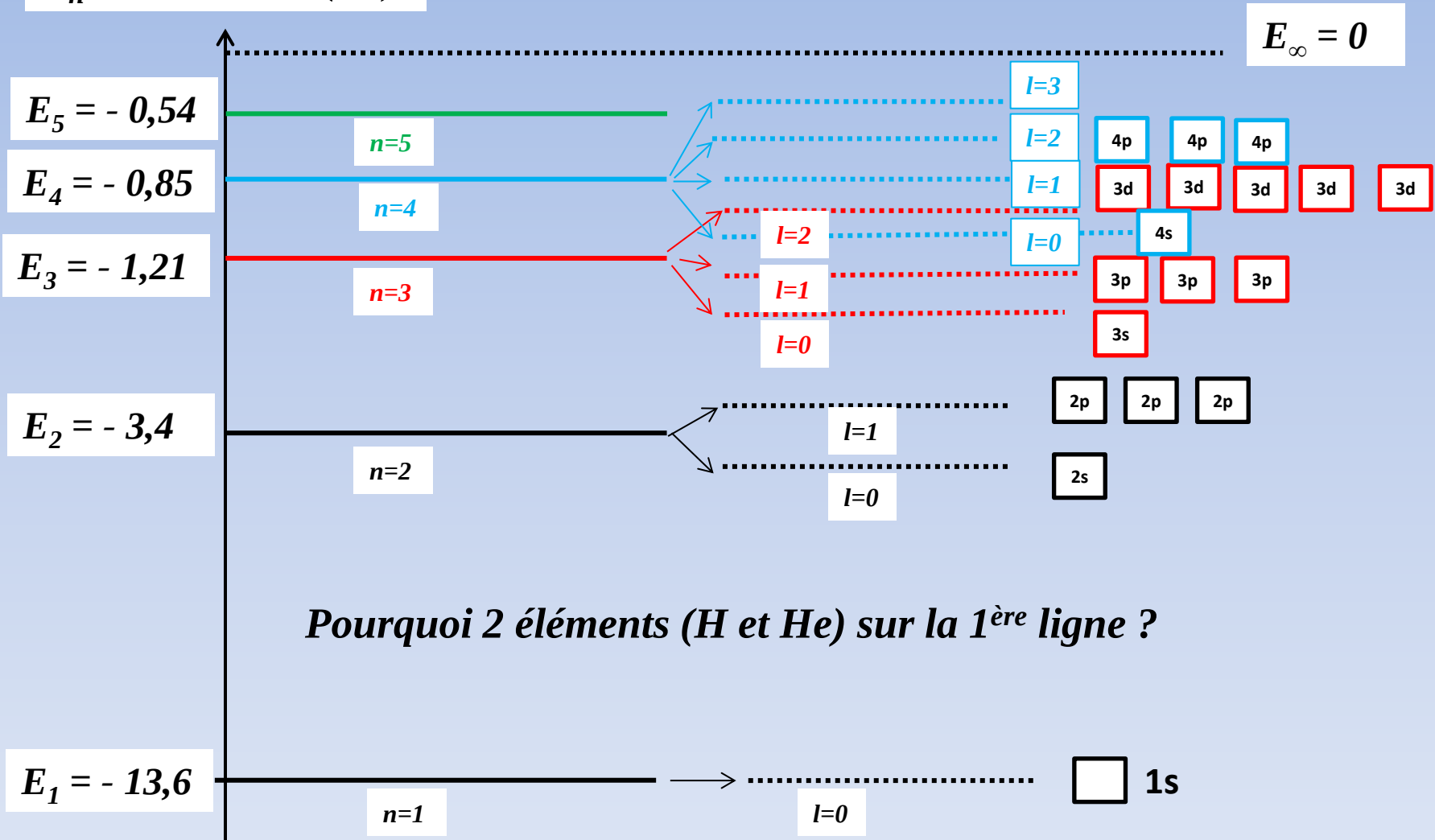
Règles de remplissages des orbitales atomiques OA

1 – Règle de Klechkowski (ou par valeurs de « $n+l$ » croissantes)



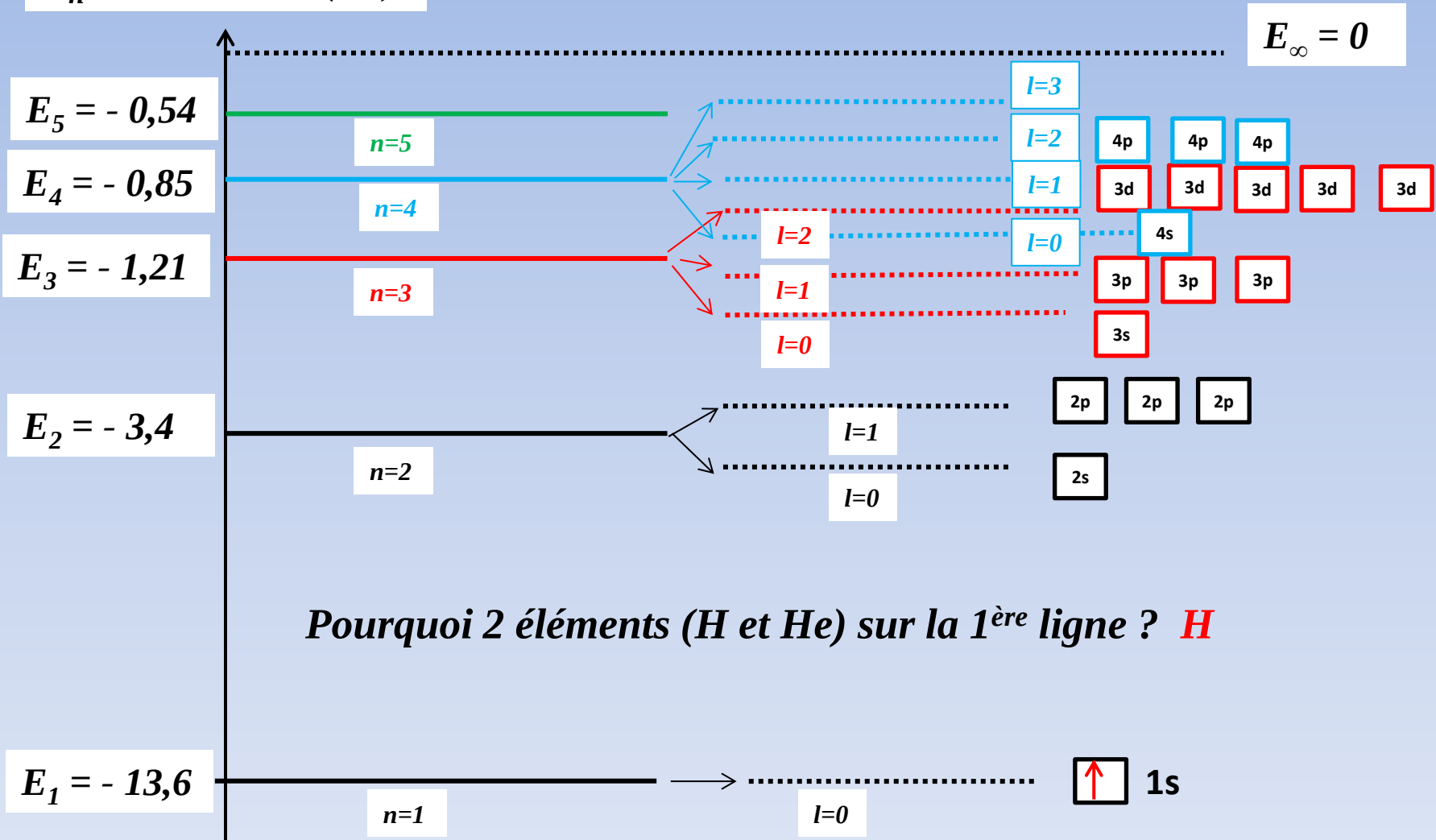
VII – Structure du Tableau périodique

$$E_n = -13,6 / n^2 \text{ (eV)}$$



VII – Structure du Tableau périodique

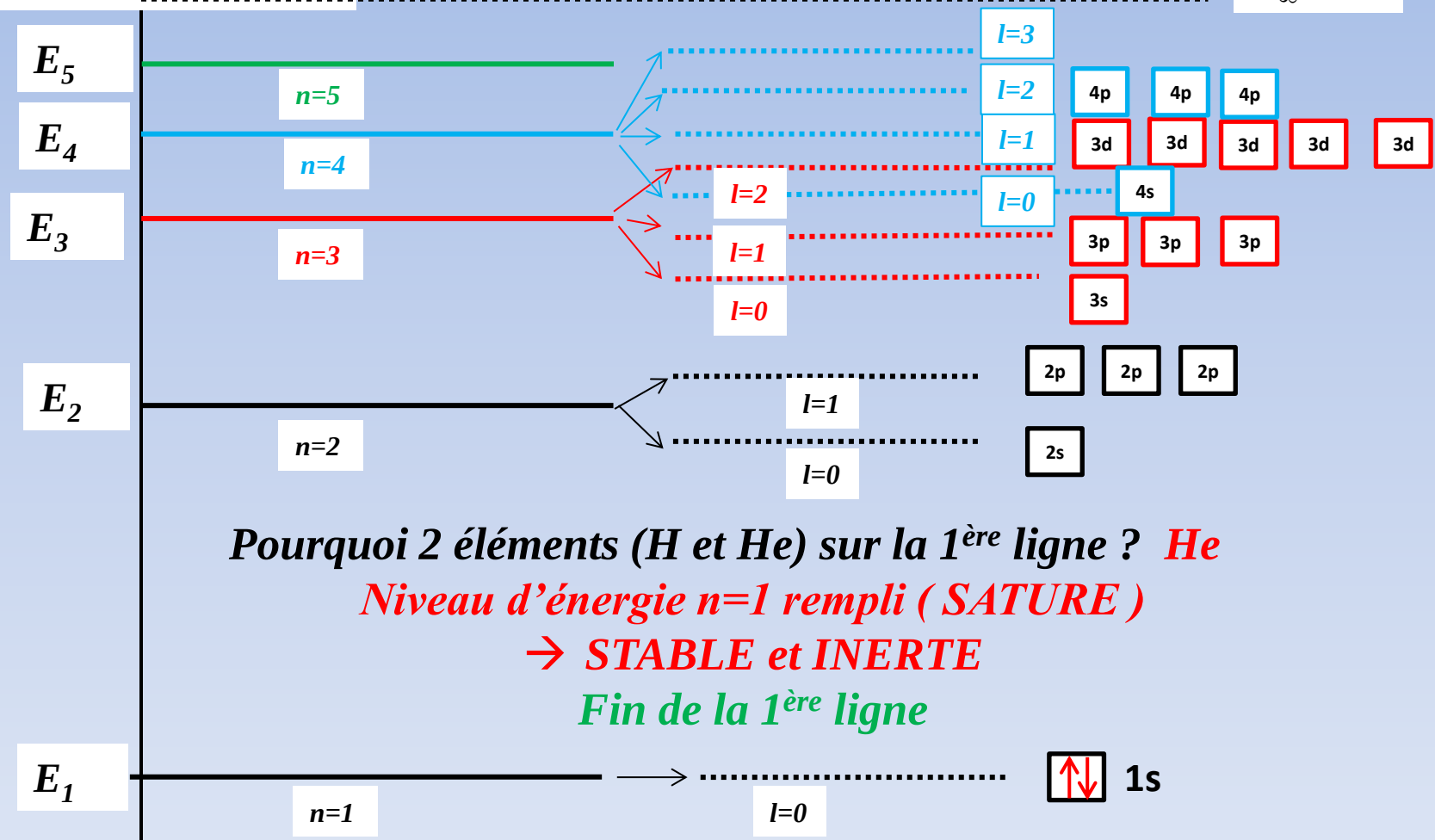
$$E_n = -13,6 / n^2 \text{ (eV)}$$



VII – Structure du Tableau périodique

$$E_n = -13,6 \frac{Z^{*2}}{n^2} \text{ (eV)}$$

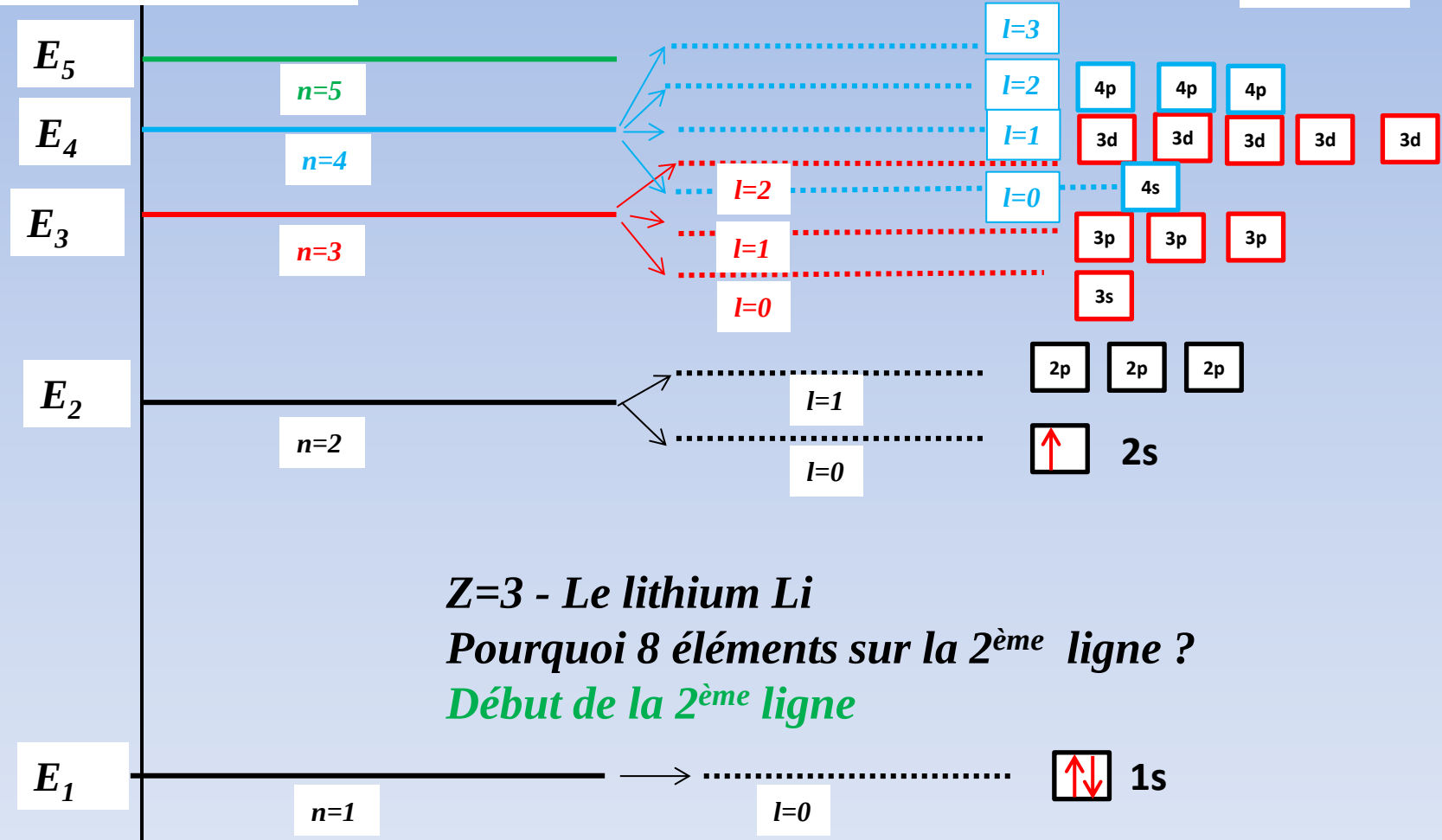
$$E_\infty = 0$$



VII – Structure du Tableau périodique

$$E_n = -13,6 \frac{Z^{*2}}{n^2} \text{ (eV)}$$

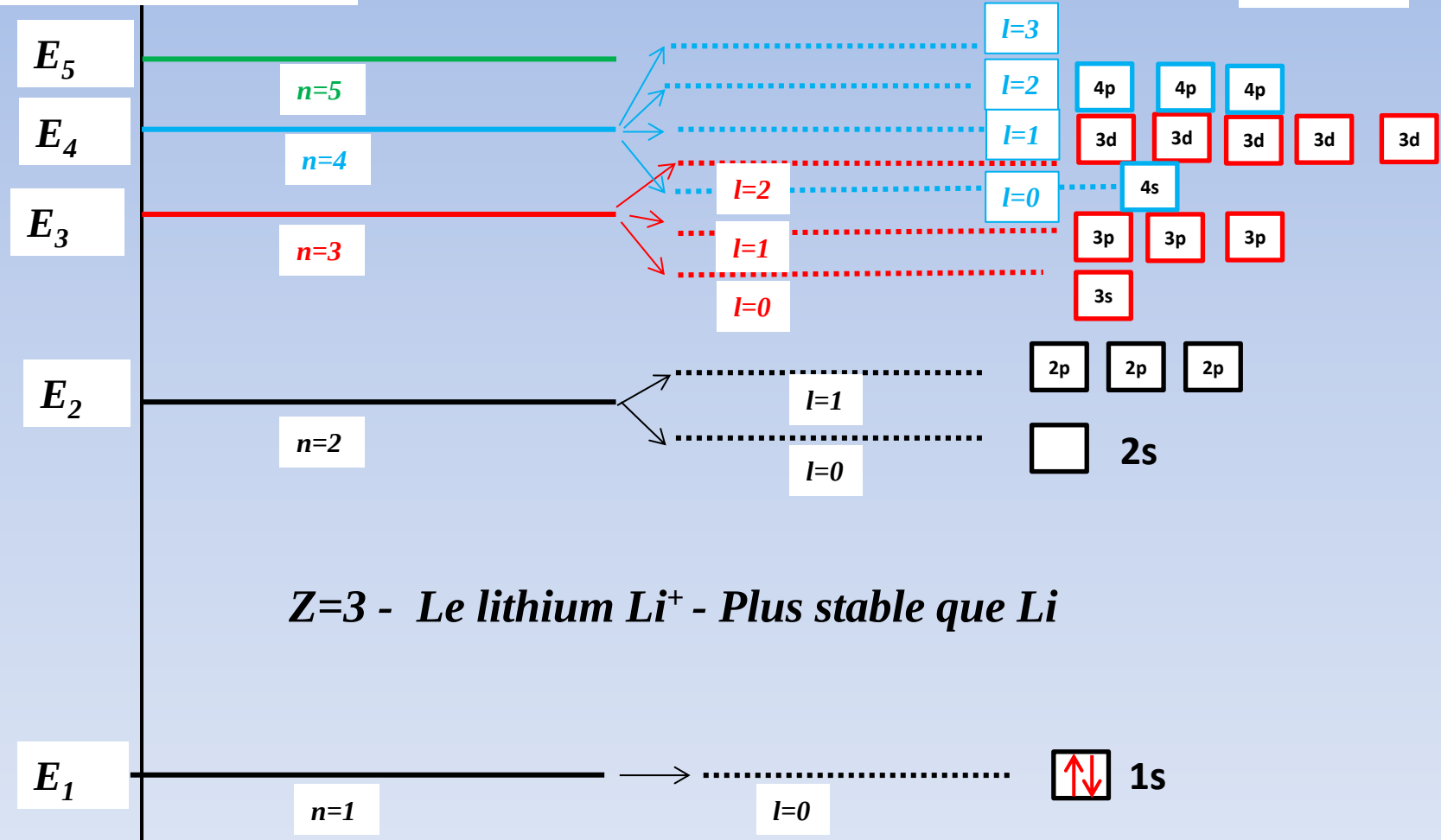
$$E_\infty = 0$$



VII – Structure du Tableau périodique

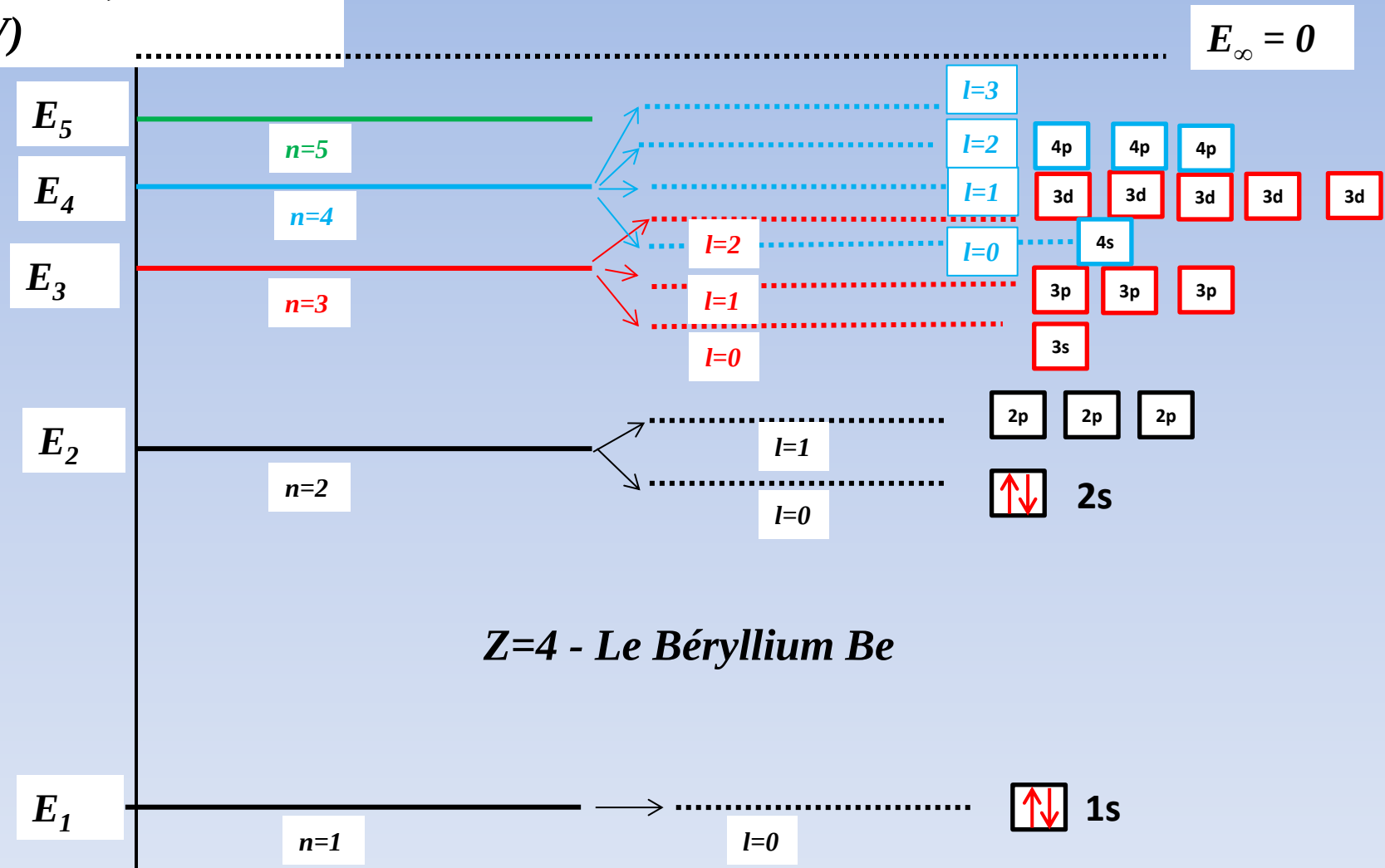
$$E_n = -13,6 \frac{Z^{*2}}{n^2} \text{ (eV)}$$

$$E_\infty = 0$$



VII – Structure du Tableau périodique

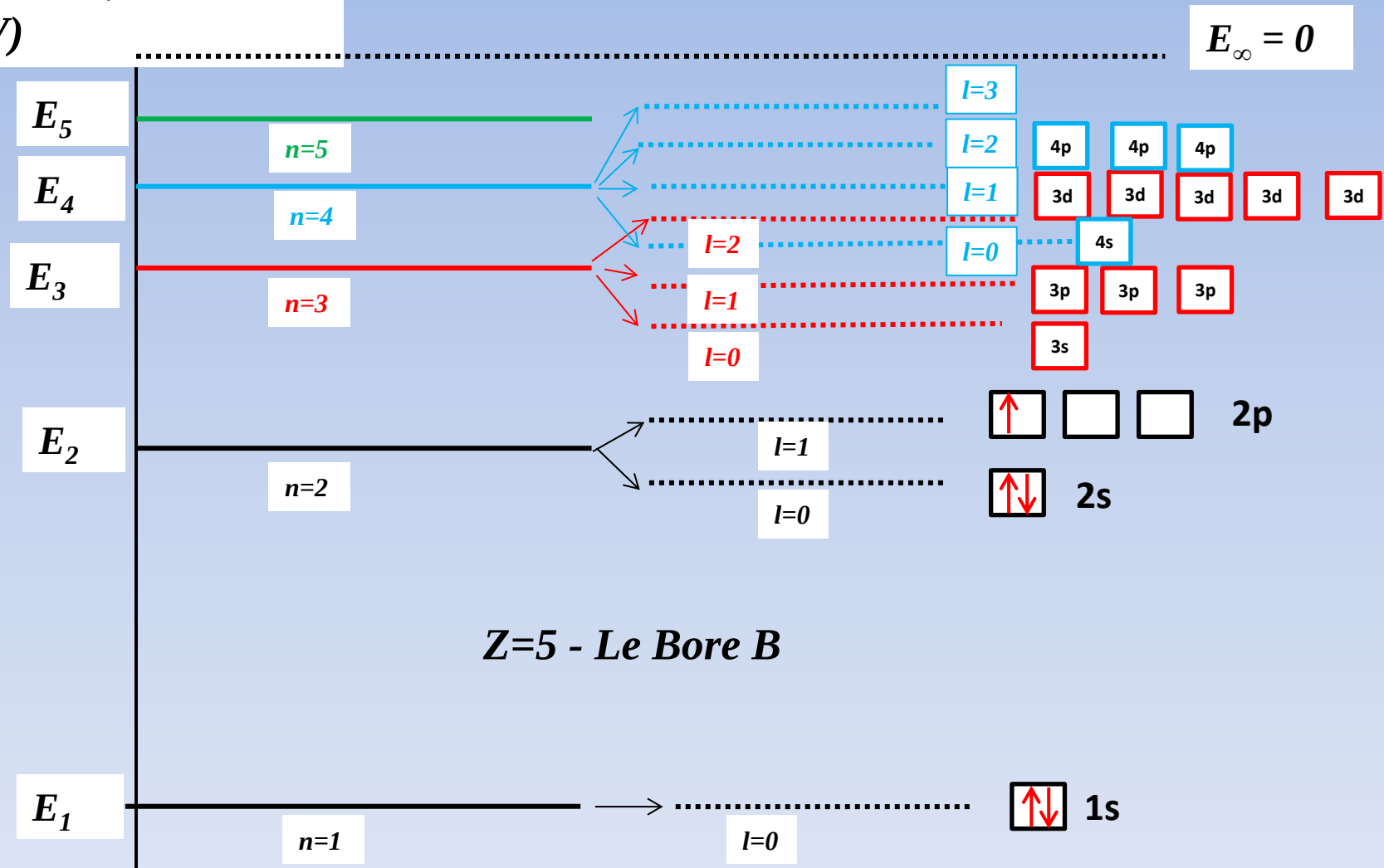
$$E_n = -13,6 \frac{Z^{*2}}{n^2} \text{ (eV)}$$



$Z=4$ - Le Béryllium Be

VII – Structure du Tableau périodique

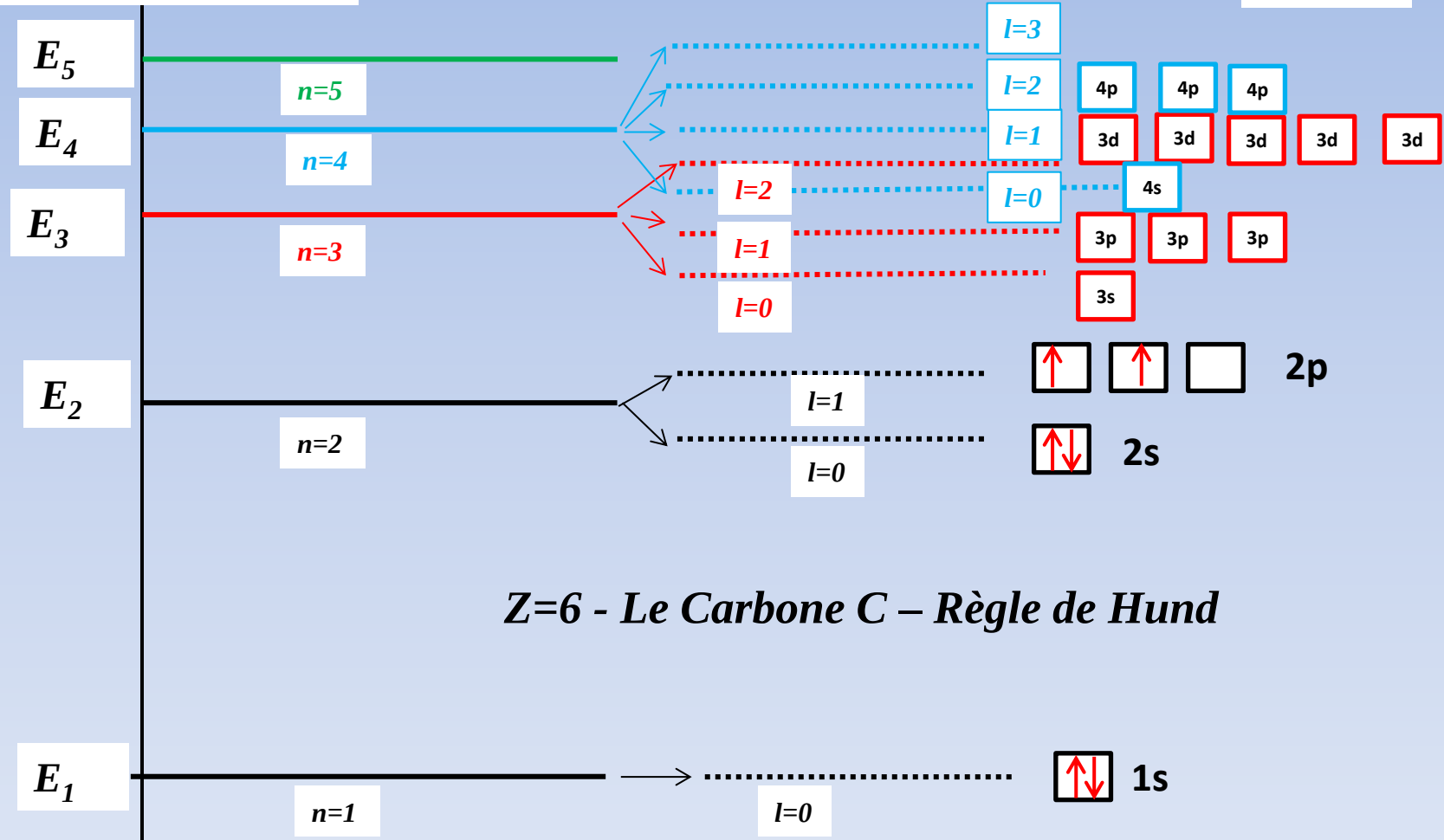
$$E_n = -13,6 \frac{Z^{*2}}{n^2} \text{ (eV)}$$



VII – Structure du Tableau périodique

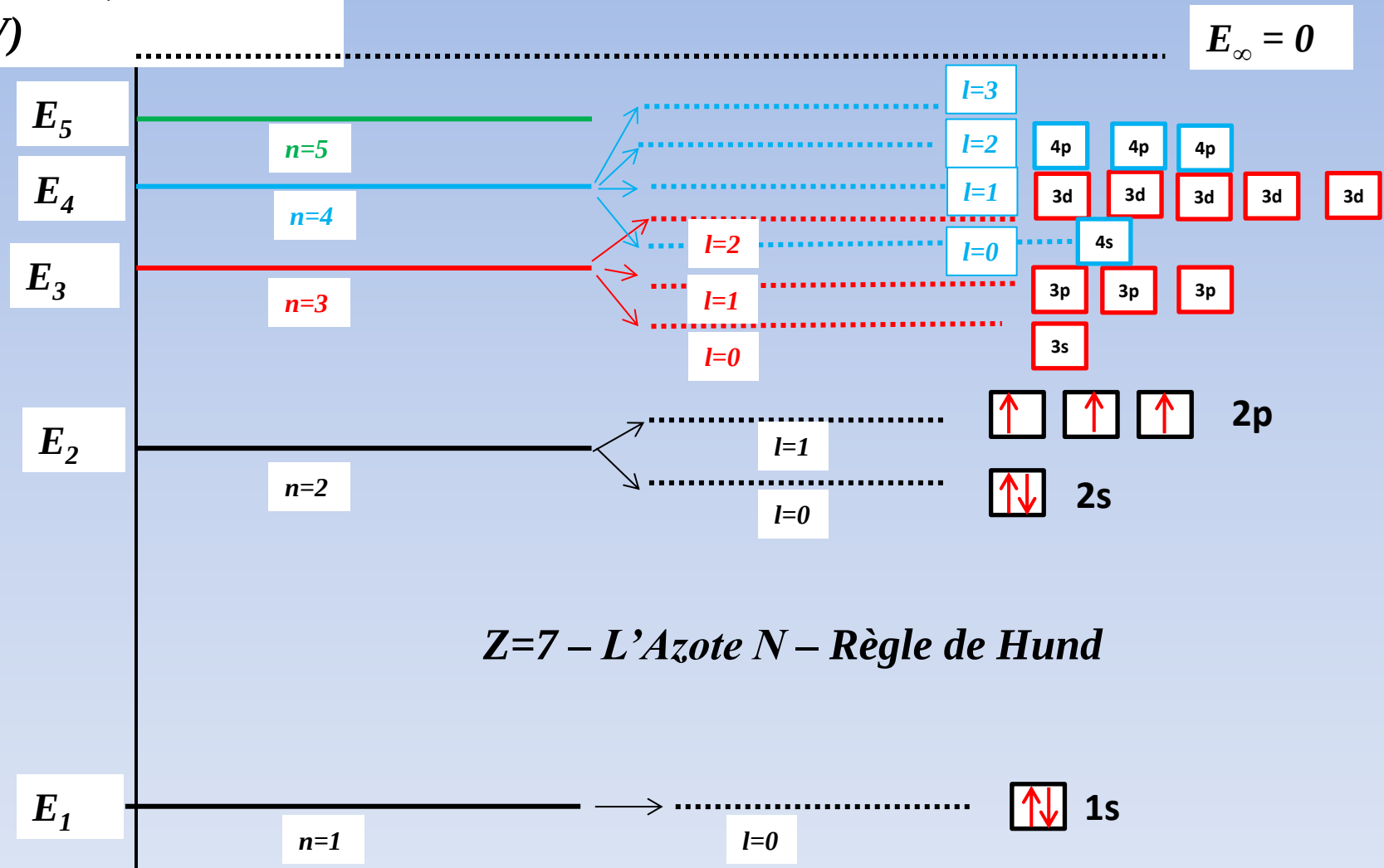
$$E_n = -13,6 \frac{Z^2}{n^2} \text{ (eV)}$$

$$E_\infty = 0$$



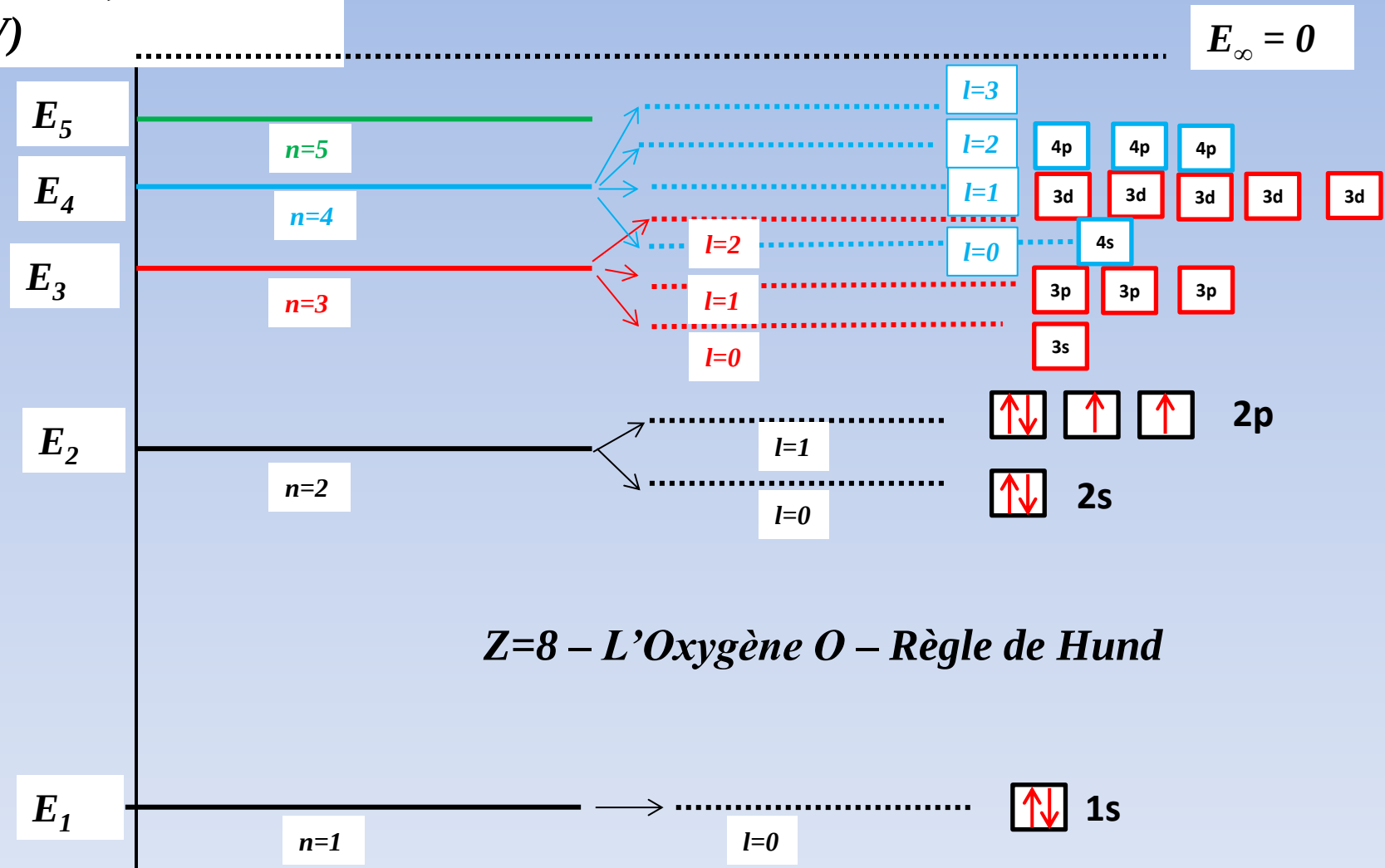
VII – Structure du Tableau périodique

$$E_n = -13,6 \frac{Z^{*2}}{n^2} \text{ (eV)}$$



VII – Structure du Tableau périodique

$$E_n = -13,6 \frac{Z^{*2}}{n^2} \text{ (eV)}$$

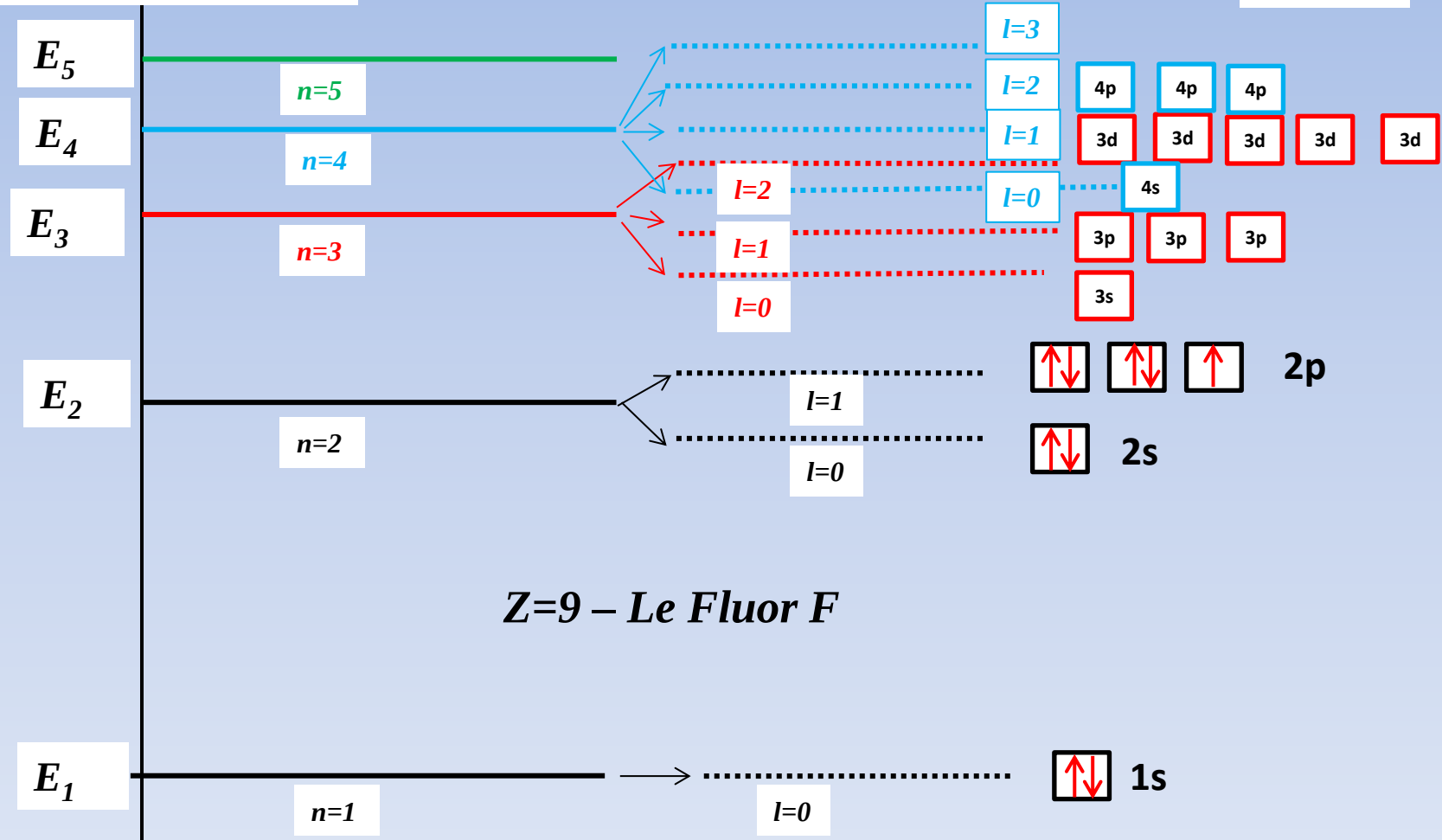


Z=8 – L'Oxygène O – Règle de Hund

VII – Structure du Tableau périodique

$$E_n = -13,6 \frac{Z^{*2}}{n^2} \text{ (eV)}$$

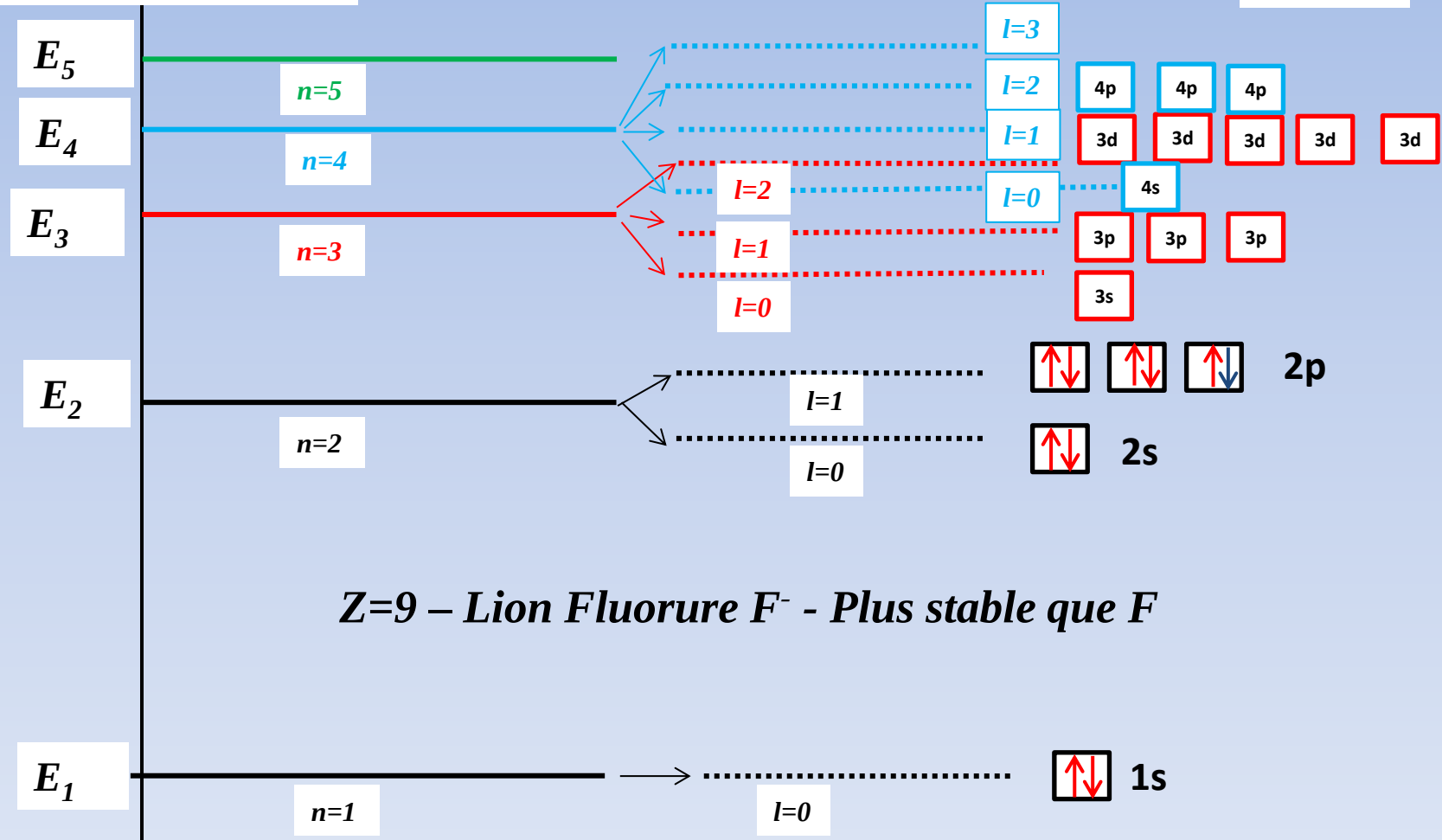
$$E_\infty = 0$$



VII – Structure du Tableau périodique

$$E_n = -13,6 \frac{Z^2}{n^2} \text{ (eV)}$$

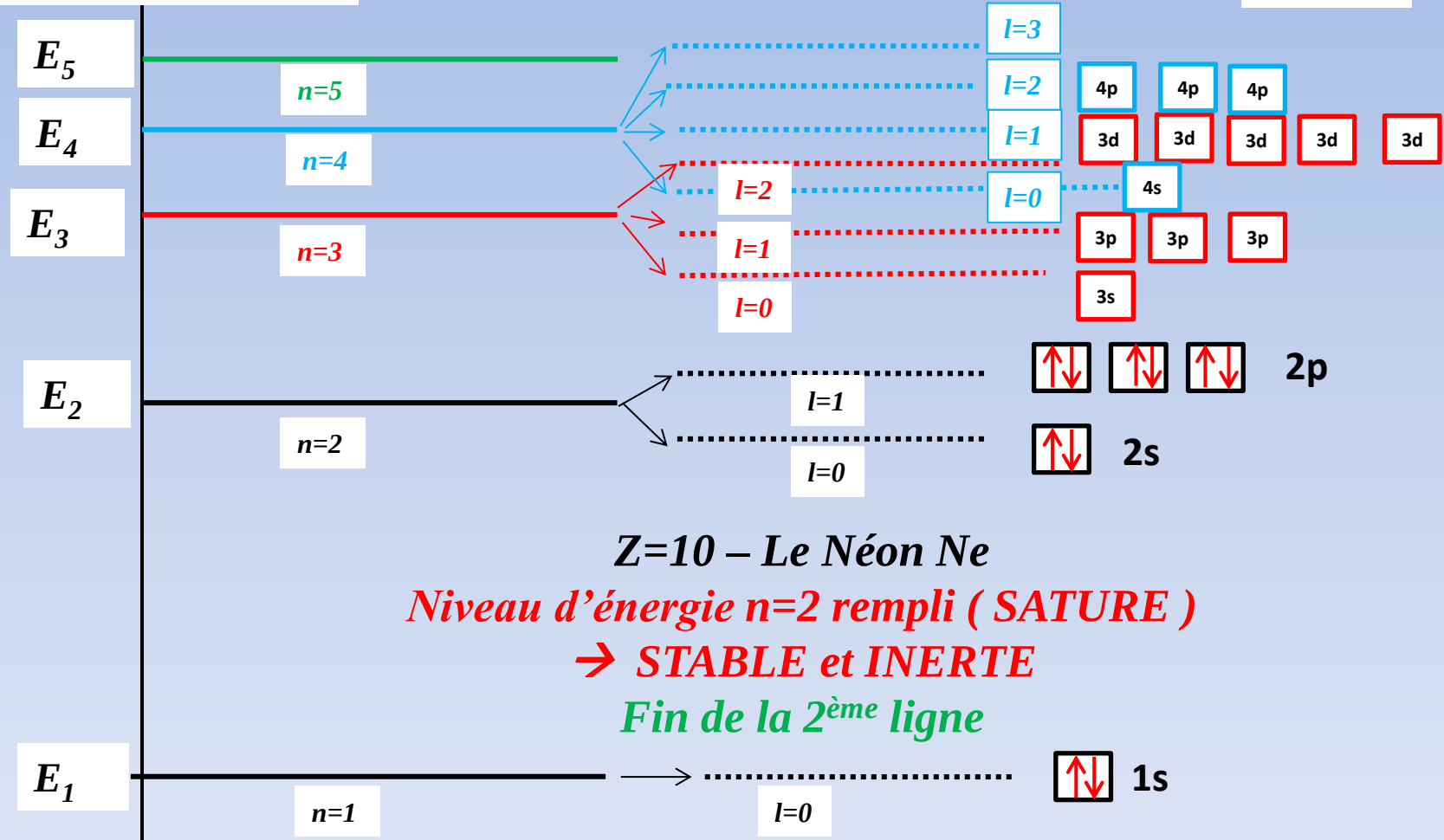
$$E_\infty = 0$$



VII – Structure du Tableau périodique

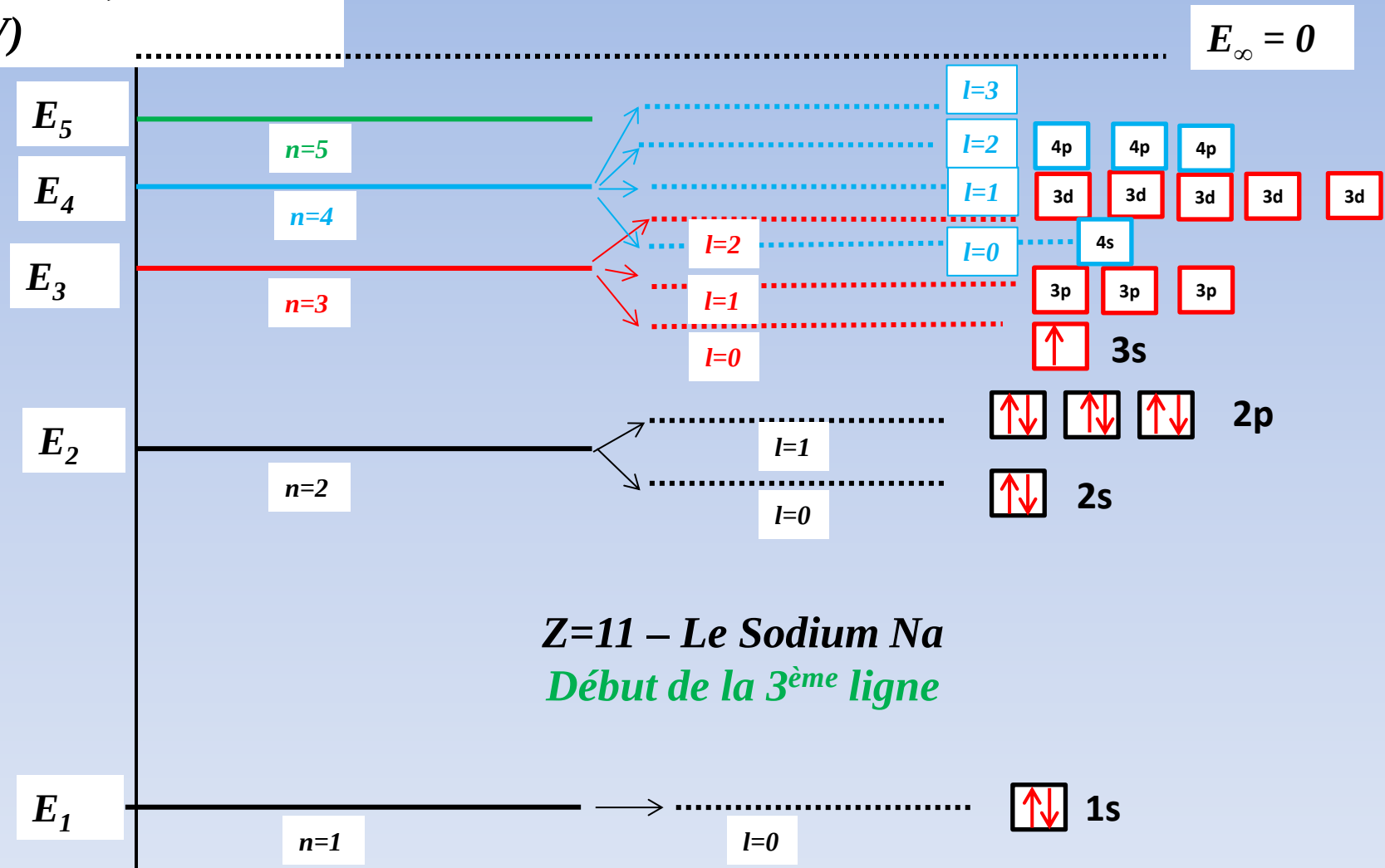
$$E_n = -13,6 \frac{Z^{*2}}{n^2} \text{ (eV)}$$

$$E_\infty = 0$$



VII – Structure du Tableau périodique

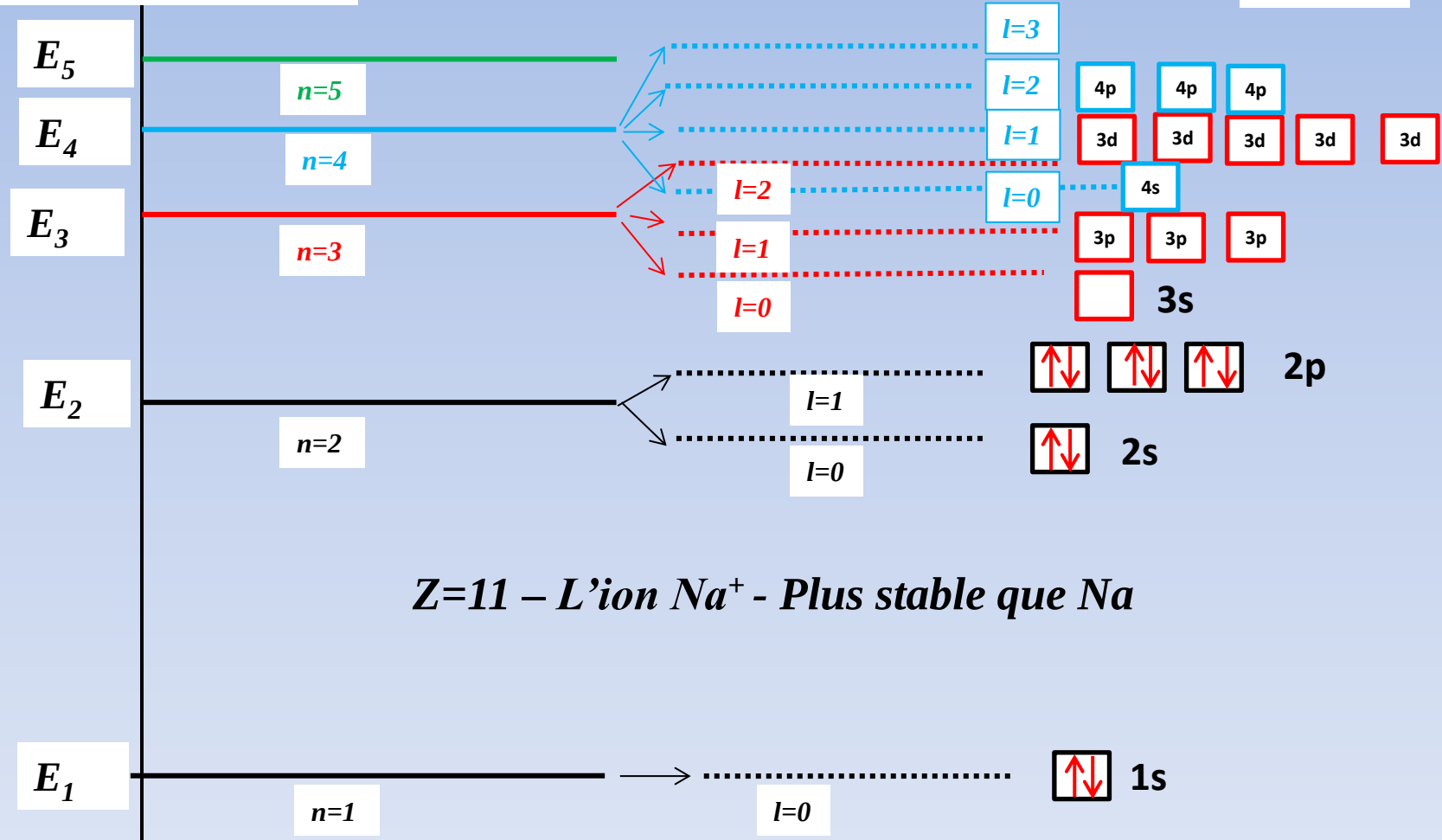
$$E_n = -13,6 \frac{Z^{*2}}{n^2} \text{ (eV)}$$



VII – Structure du Tableau périodique

$$E_n = -13,6 \frac{Z^{*2}}{n^2} \text{ (eV)}$$

$$E_\infty = 0$$

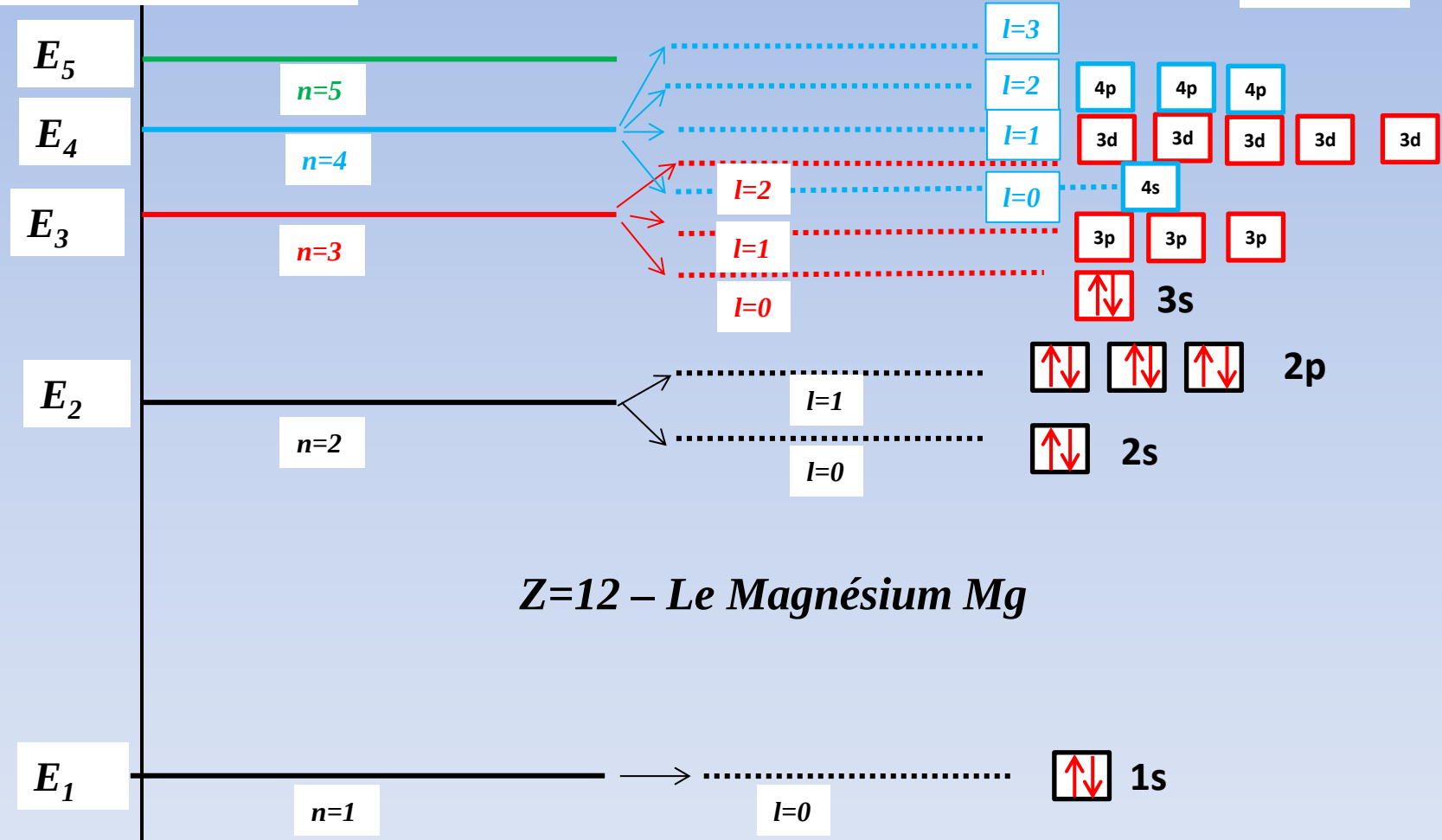


$Z=11$ – L'ion Na^+ - Plus stable que Na

VII – Structure du Tableau périodique

$$E_n = -13,6 \frac{Z^{*2}}{n^2} \text{ (eV)}$$

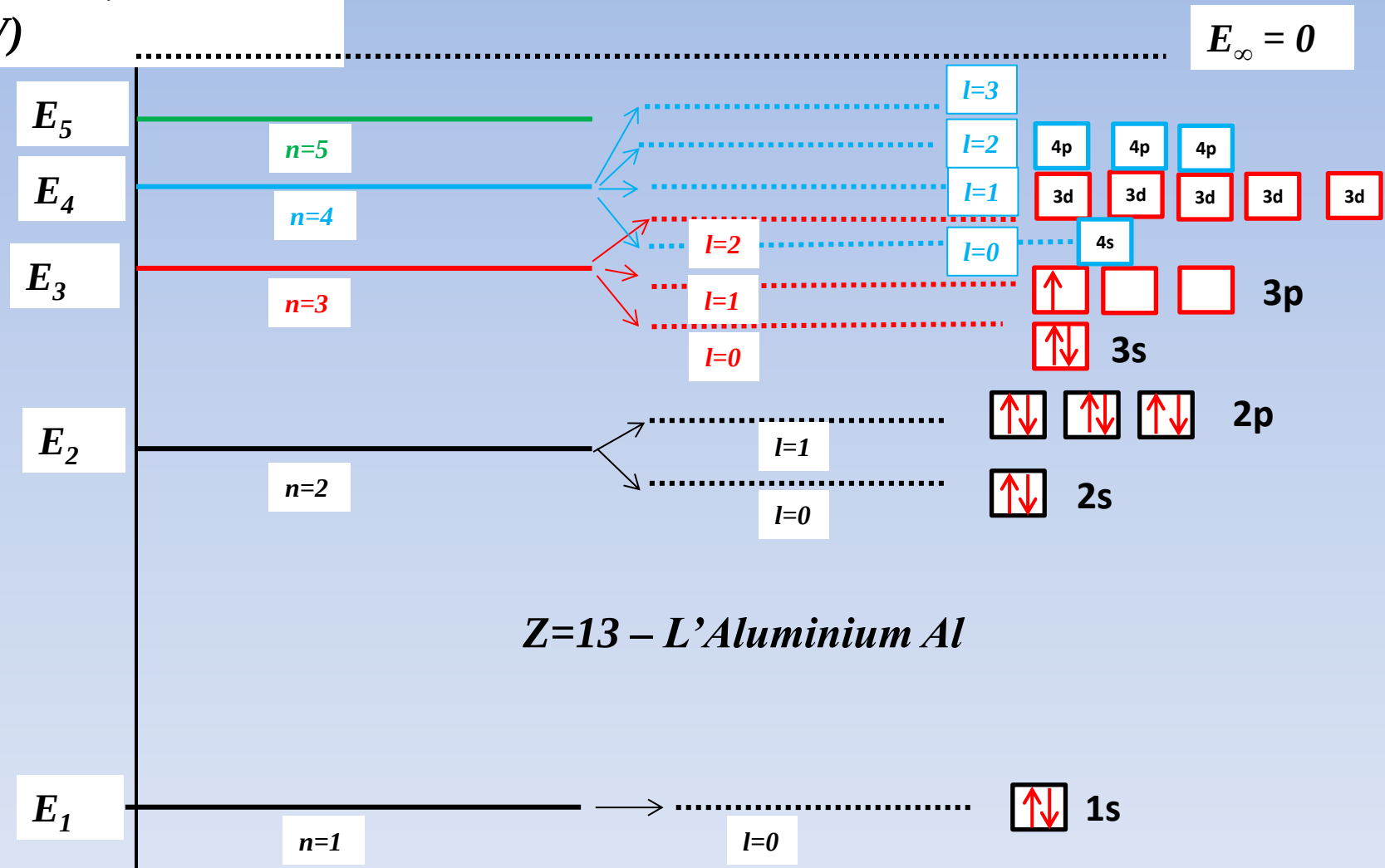
$$E_\infty = 0$$



Z=12 – Le Magnésium Mg

VII – Structure du Tableau périodique

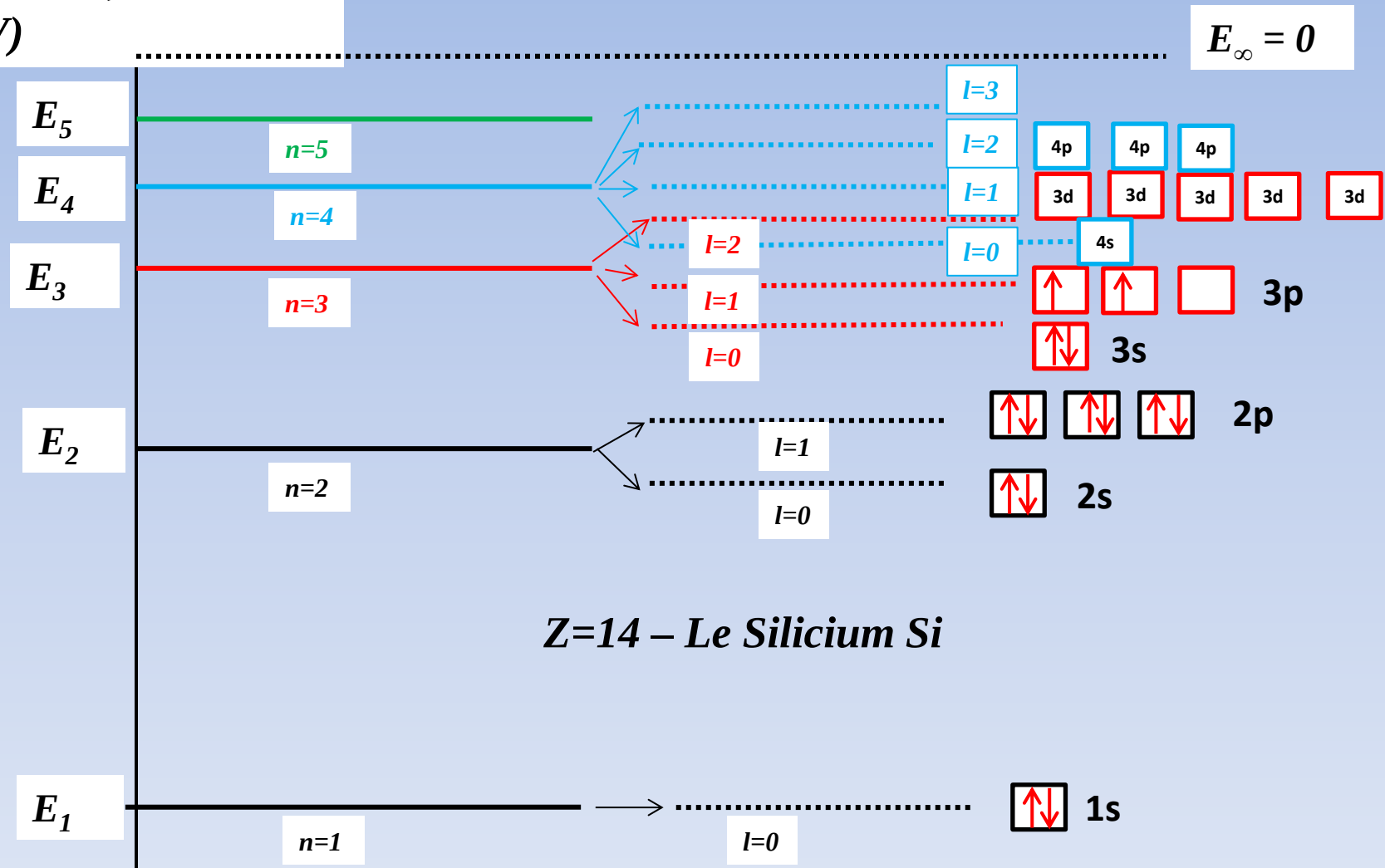
$$E_n = -13,6 \frac{Z^{*2}}{n^2} \text{ (eV)}$$



Z=13 – L'Aluminium Al

VII – Structure du Tableau périodique

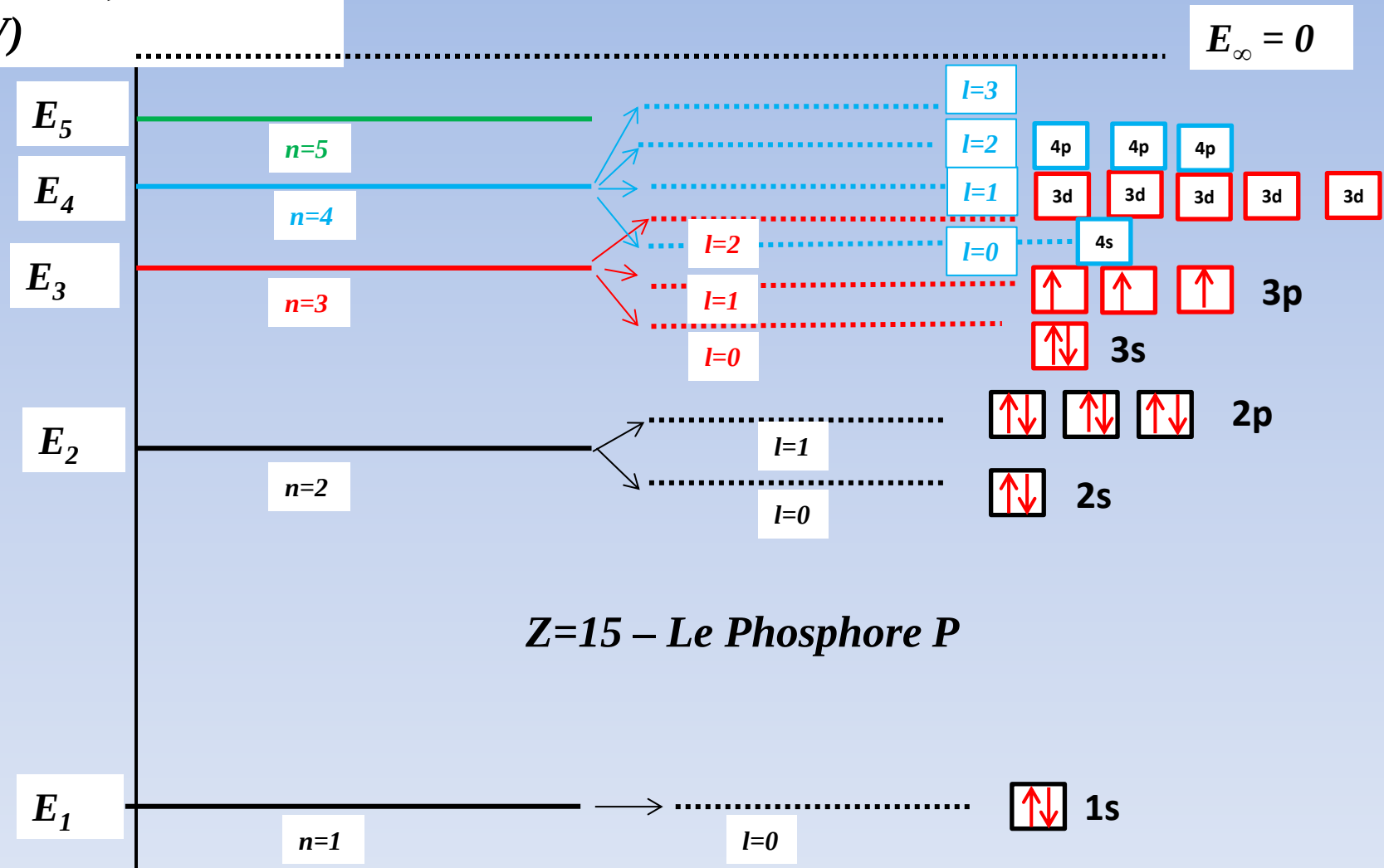
$$E_n = -13,6 \frac{Z^{*2}}{n^2} \text{ (eV)}$$



$Z=14$ – Le Silicium Si

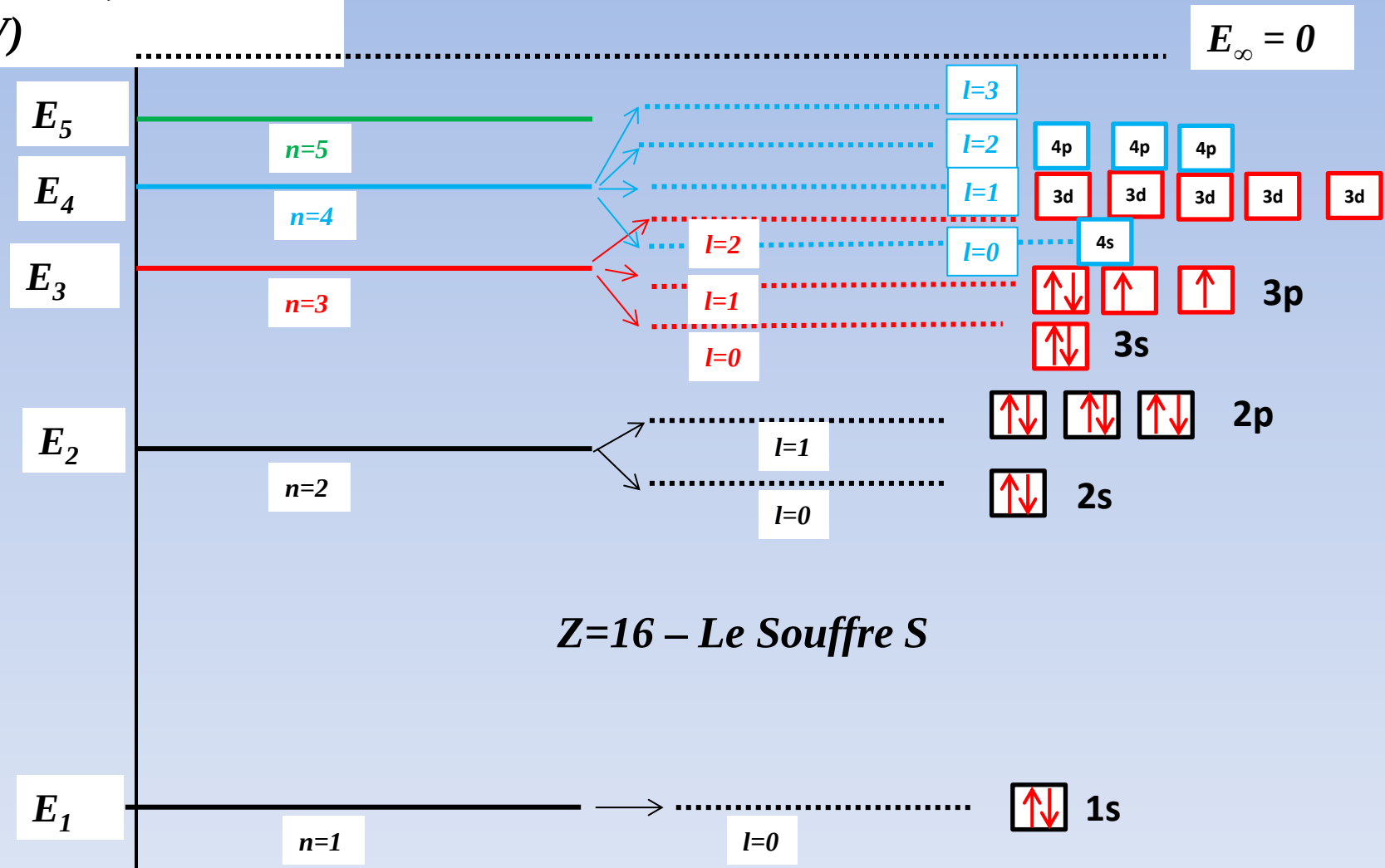
VII – Structure du Tableau périodique

$$E_n = -13,6 \frac{Z^{*2}}{n^2} \text{ (eV)}$$



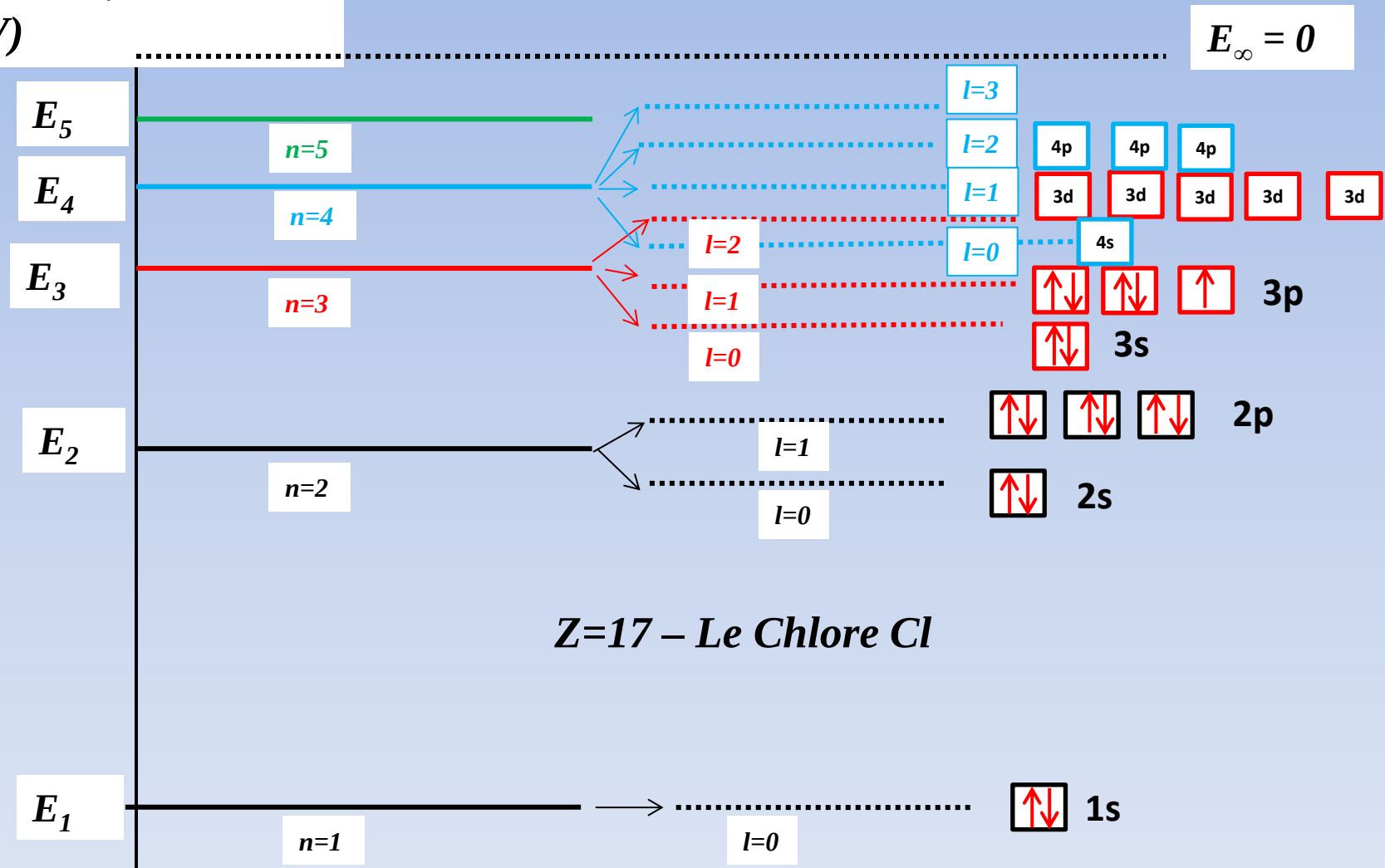
VII – Structure du Tableau périodique

$$E_n = -13,6 \frac{Z^{*2}}{n^2} \text{ (eV)}$$



VII – Structure du Tableau périodique

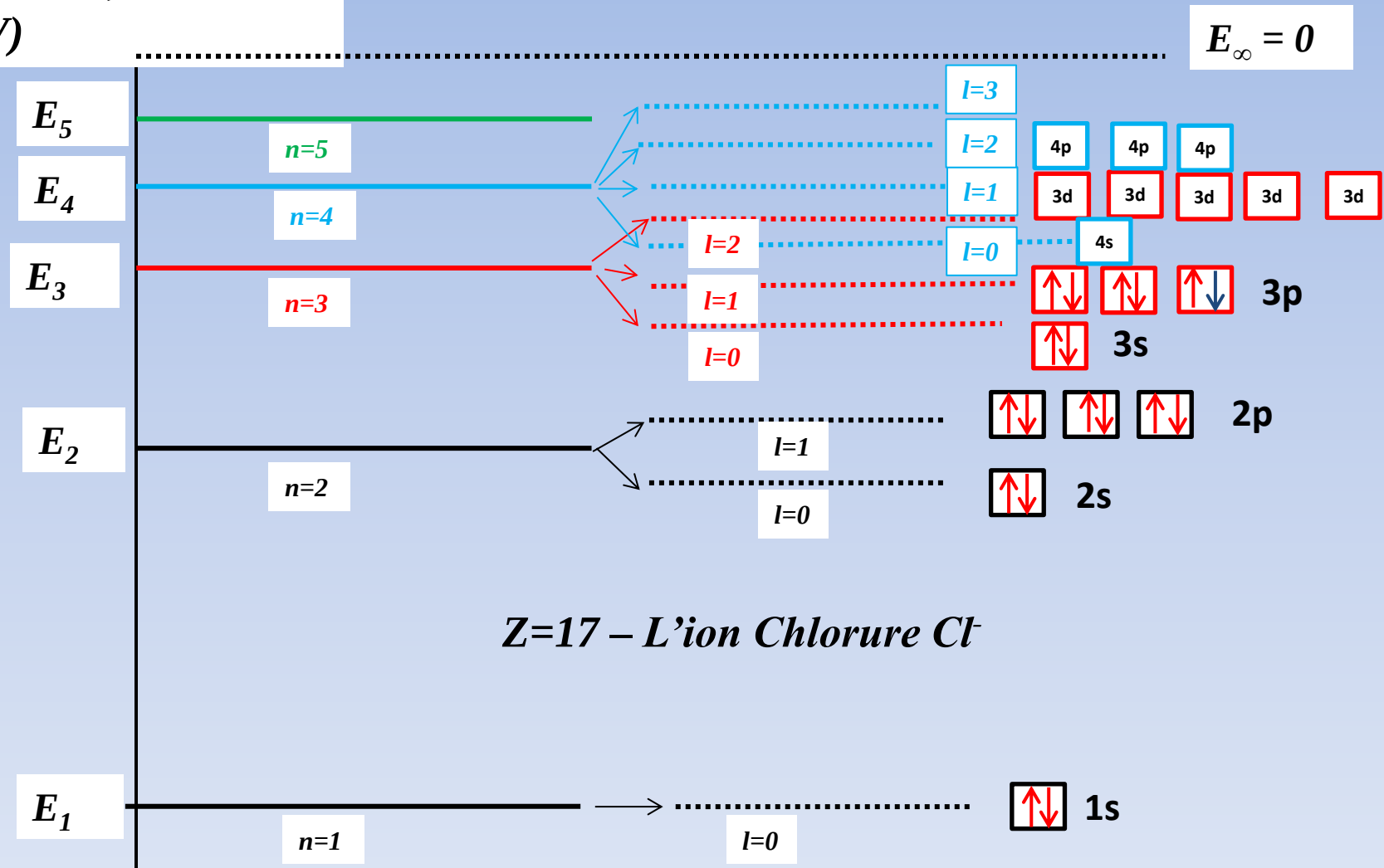
$$E_n = -13,6 \frac{Z^{*2}}{n^2} \text{ (eV)}$$



$Z=17$ – Le Chlore Cl

VII – Structure du Tableau périodique

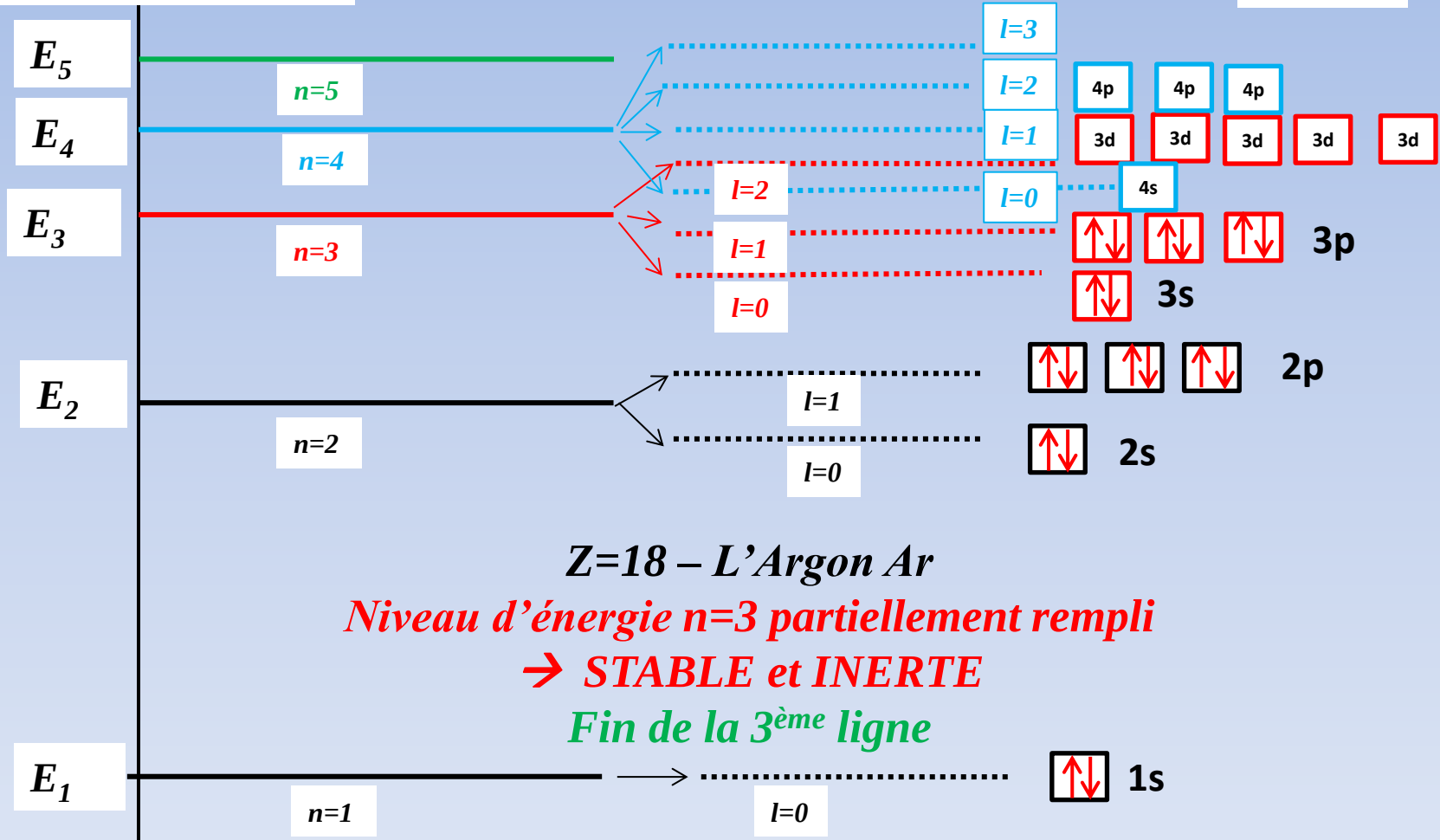
$$E_n = -13,6 \frac{Z^{*2}}{n^2} \text{ (eV)}$$



VII – Structure du Tableau périodique

$$E_n = -13,6 \frac{Z^{*2}}{n^2} \text{ (eV)}$$

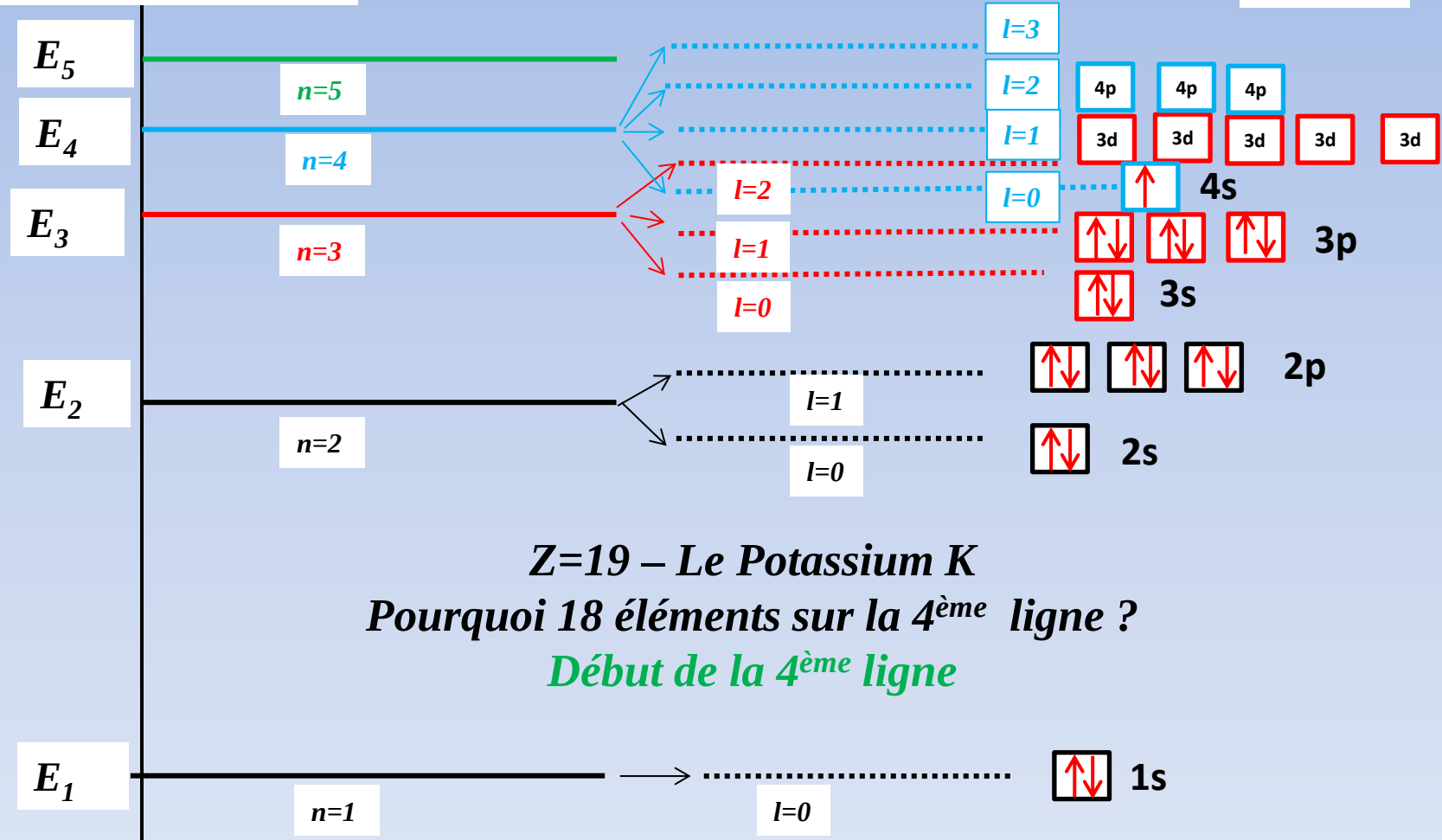
$$E_\infty = 0$$



VII – Structure du Tableau périodique

$$E_n = -13,6 \frac{Z^{*2}}{n^2} \text{ (eV)}$$

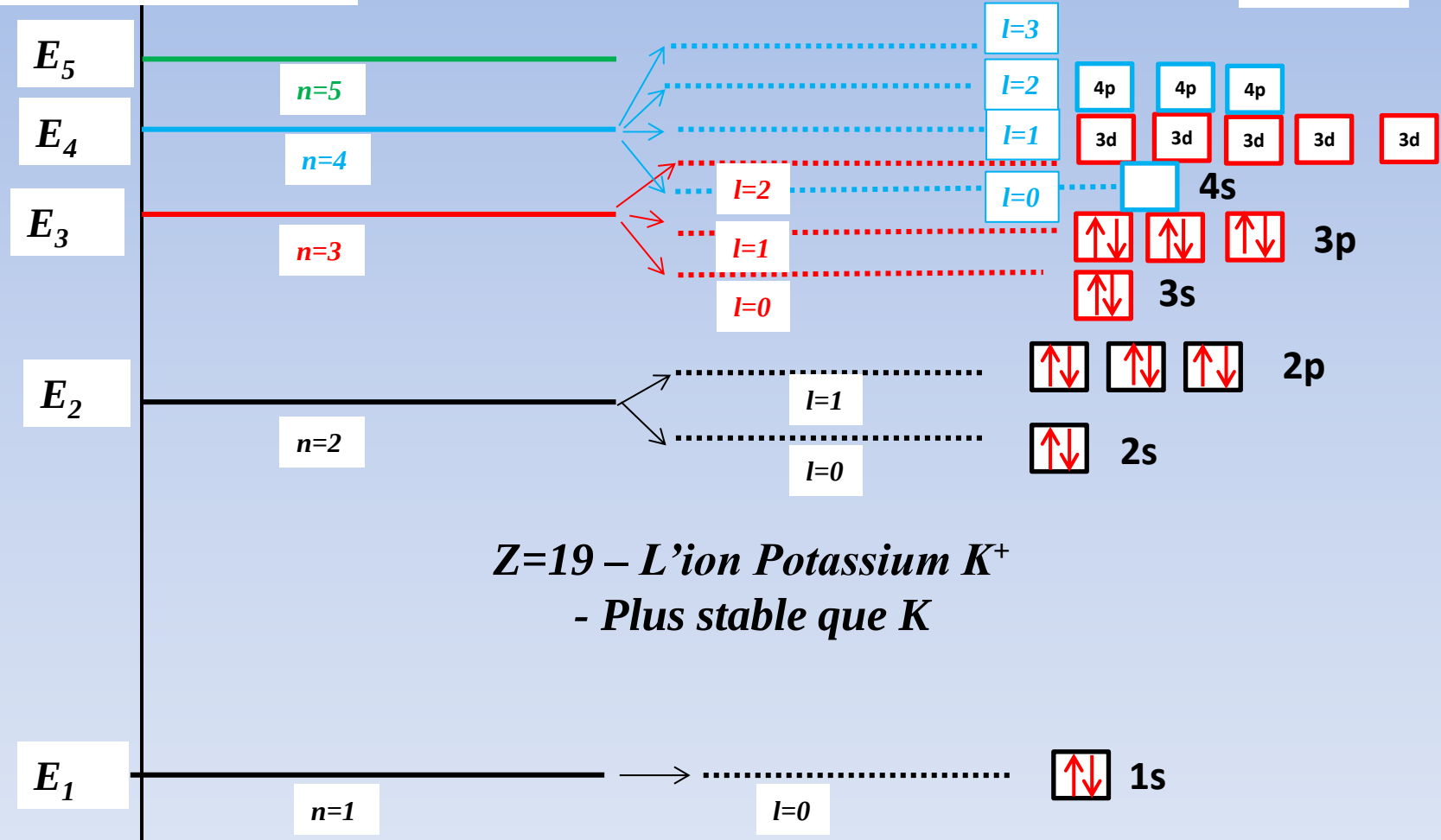
$$E_\infty = 0$$



VII – Structure du Tableau périodique

$$E_n = -13,6 \frac{Z^{*2}}{n^2} \text{ (eV)}$$

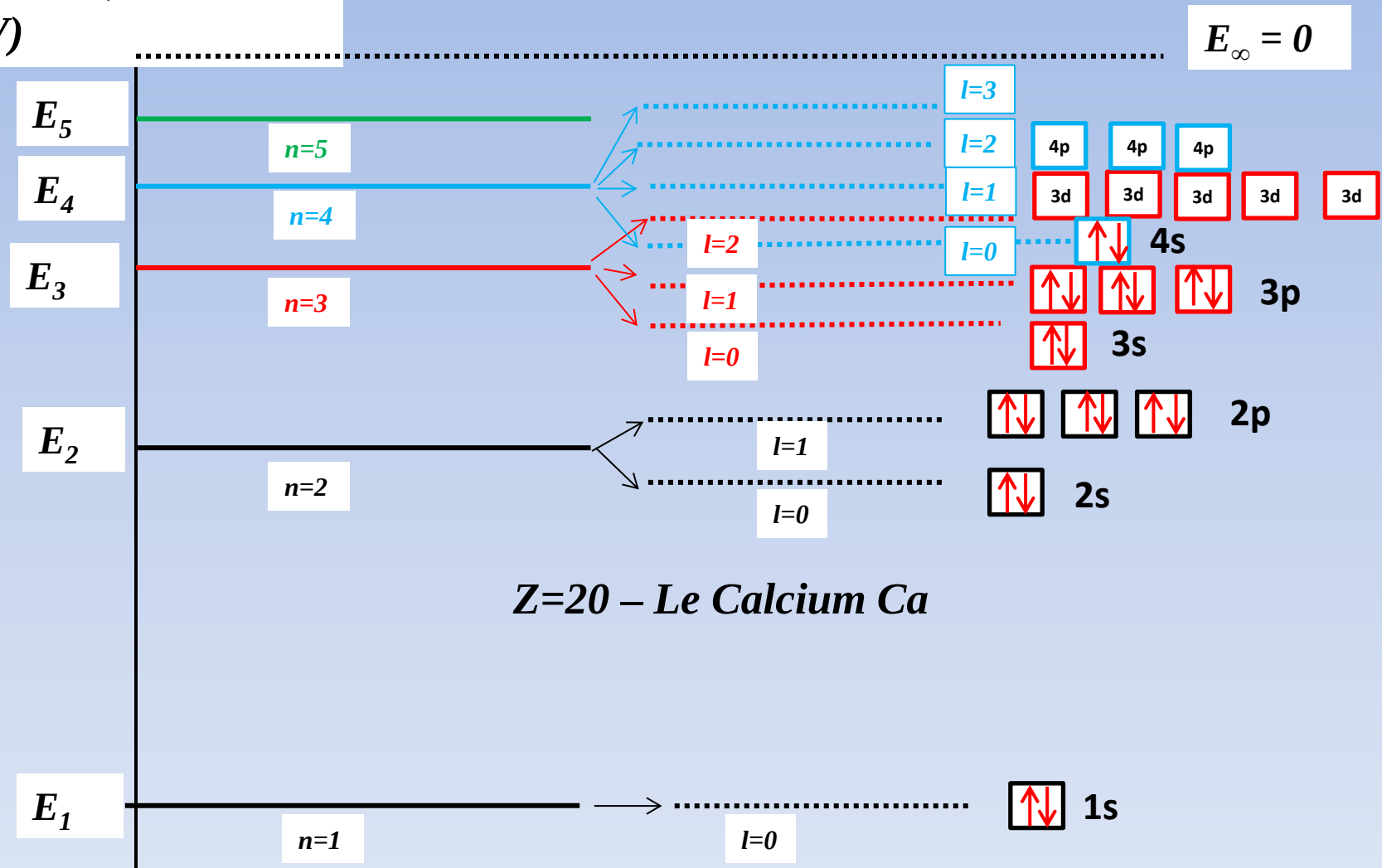
$$E_\infty = 0$$



Z=19 – L'ion Potassium K^+
- Plus stable que K

VII – Structure du Tableau périodique

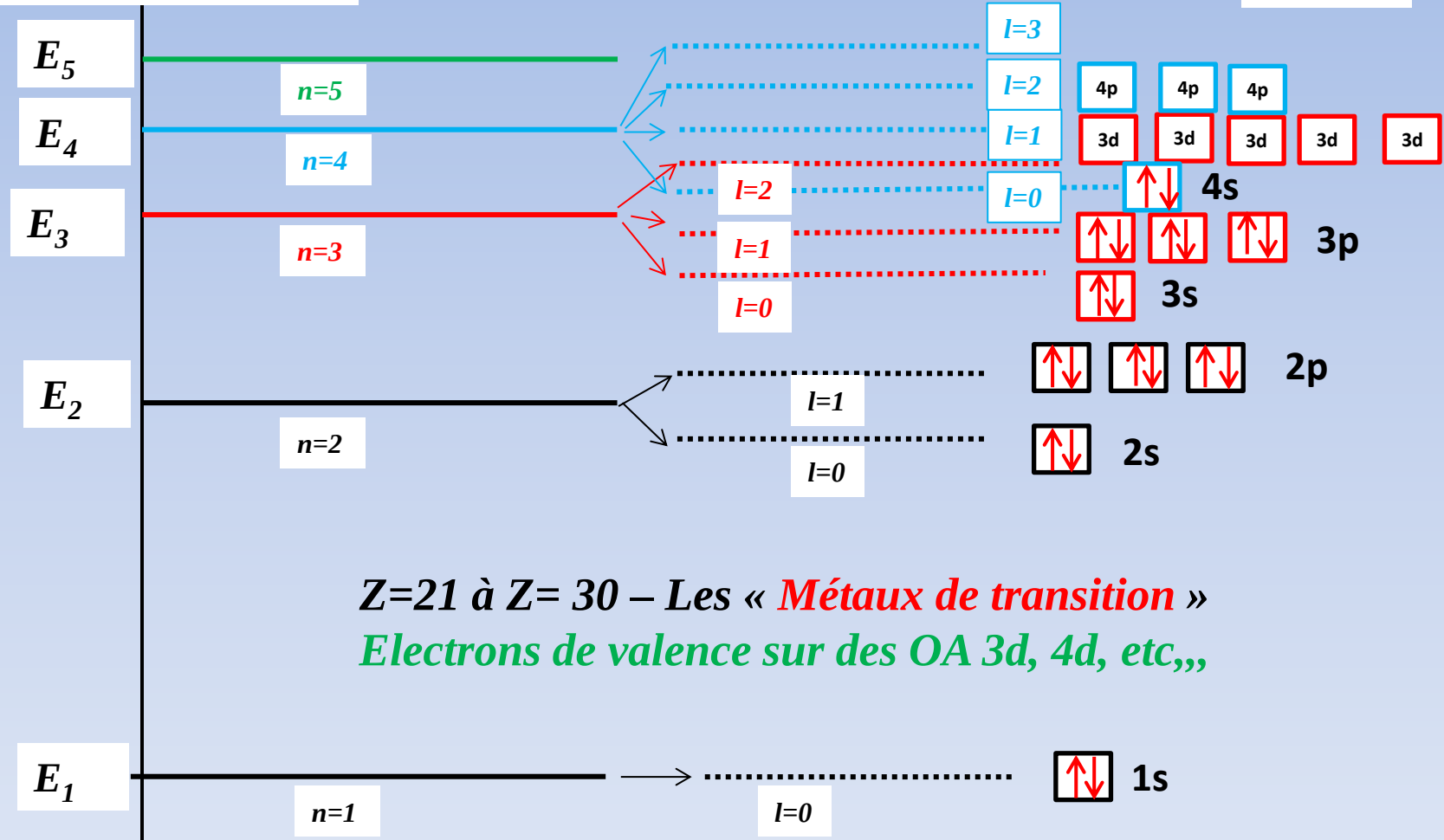
$$E_n = -13,6 \frac{Z^{*2}}{n^2} \text{ (eV)}$$



VII – Structure du Tableau périodique

$$E_n = -13,6 \frac{Z^{*2}}{n^2} \text{ (eV)}$$

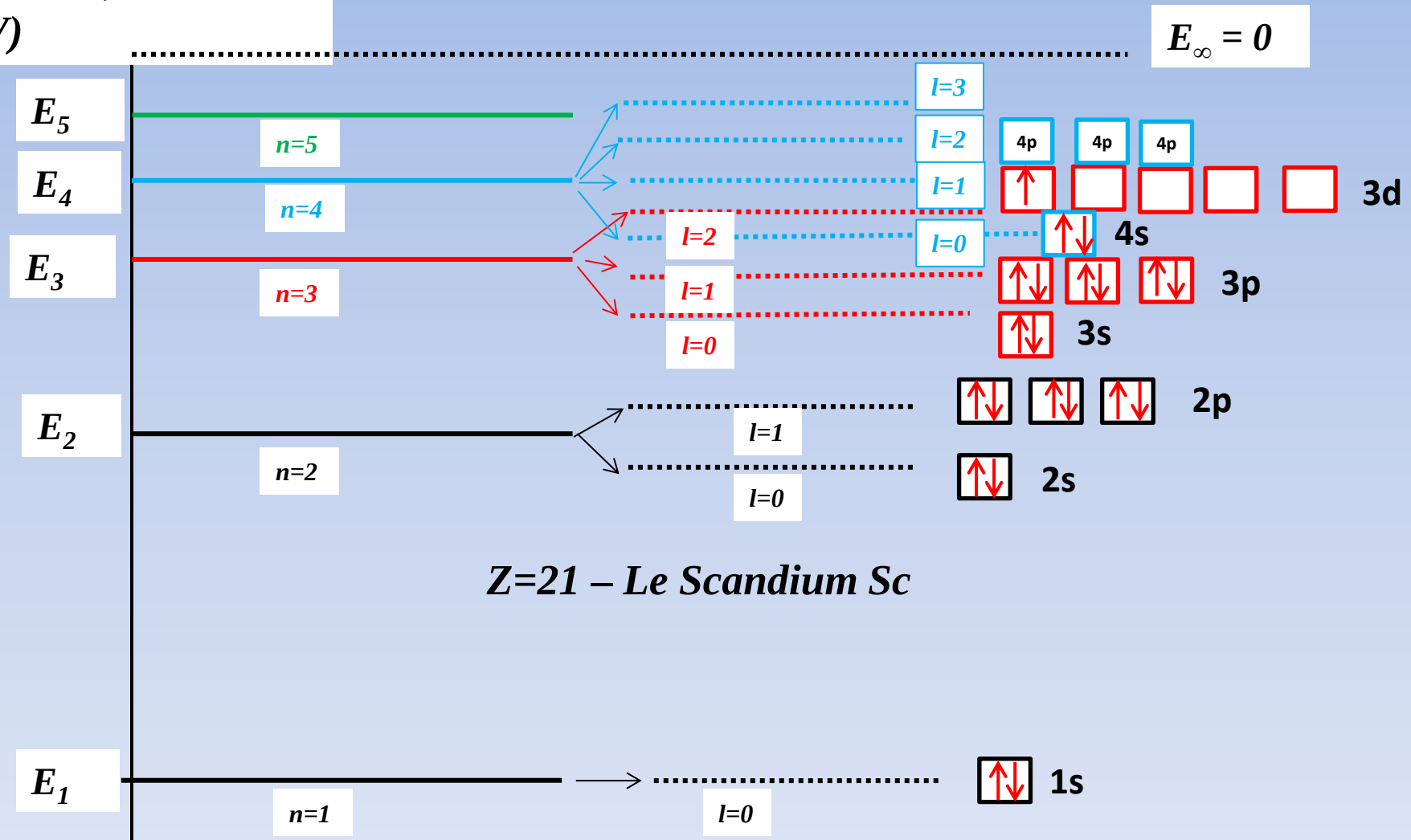
$$E_\infty = 0$$



$Z=21$ à $Z=30$ – Les « **Métaux de transition** »
 Electrons de valence sur des OA 3d, 4d, etc.,

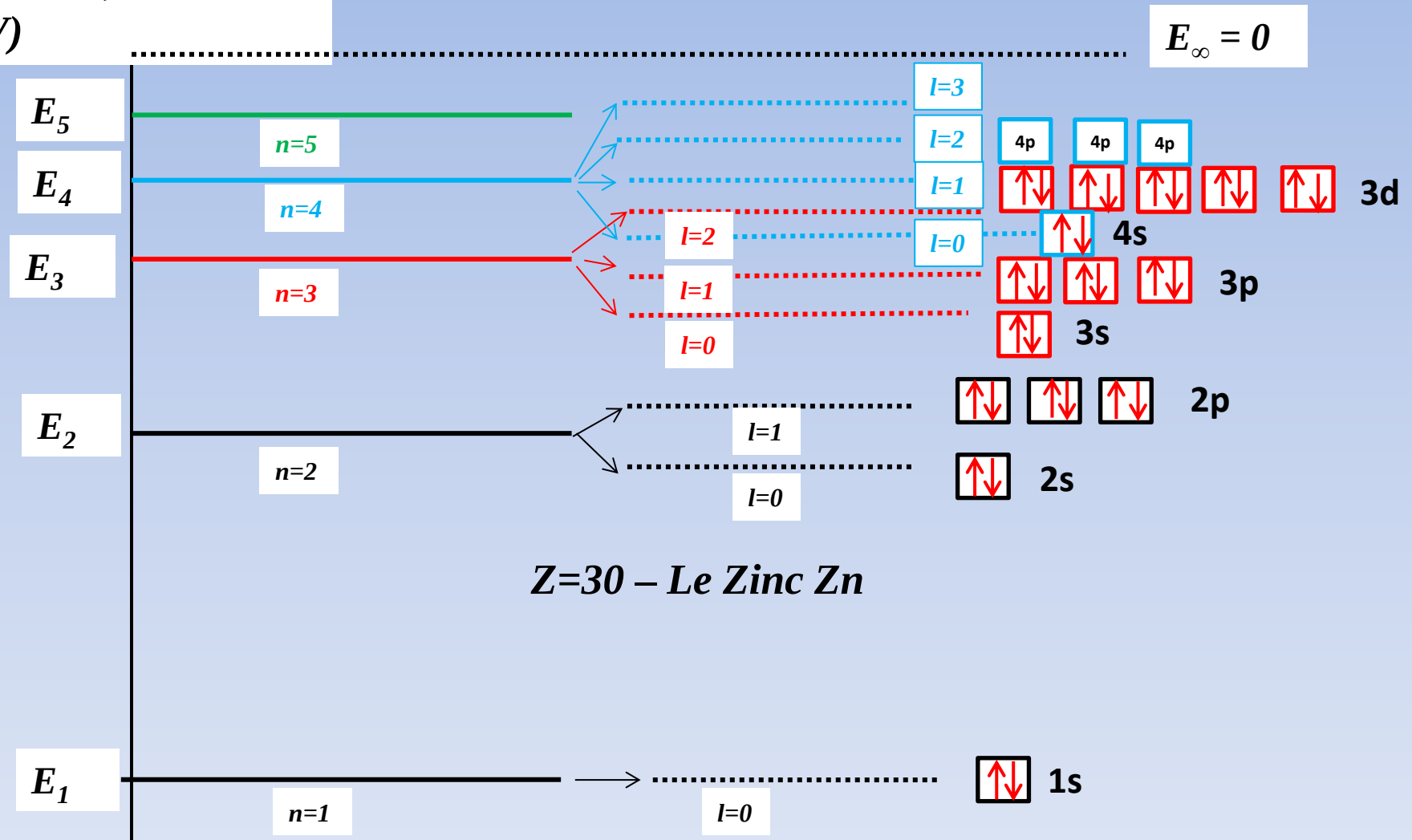
VII – Structure du Tableau périodique

$$E_n = -13,6 \frac{Z^{*2}}{n^2} \text{ (eV)}$$



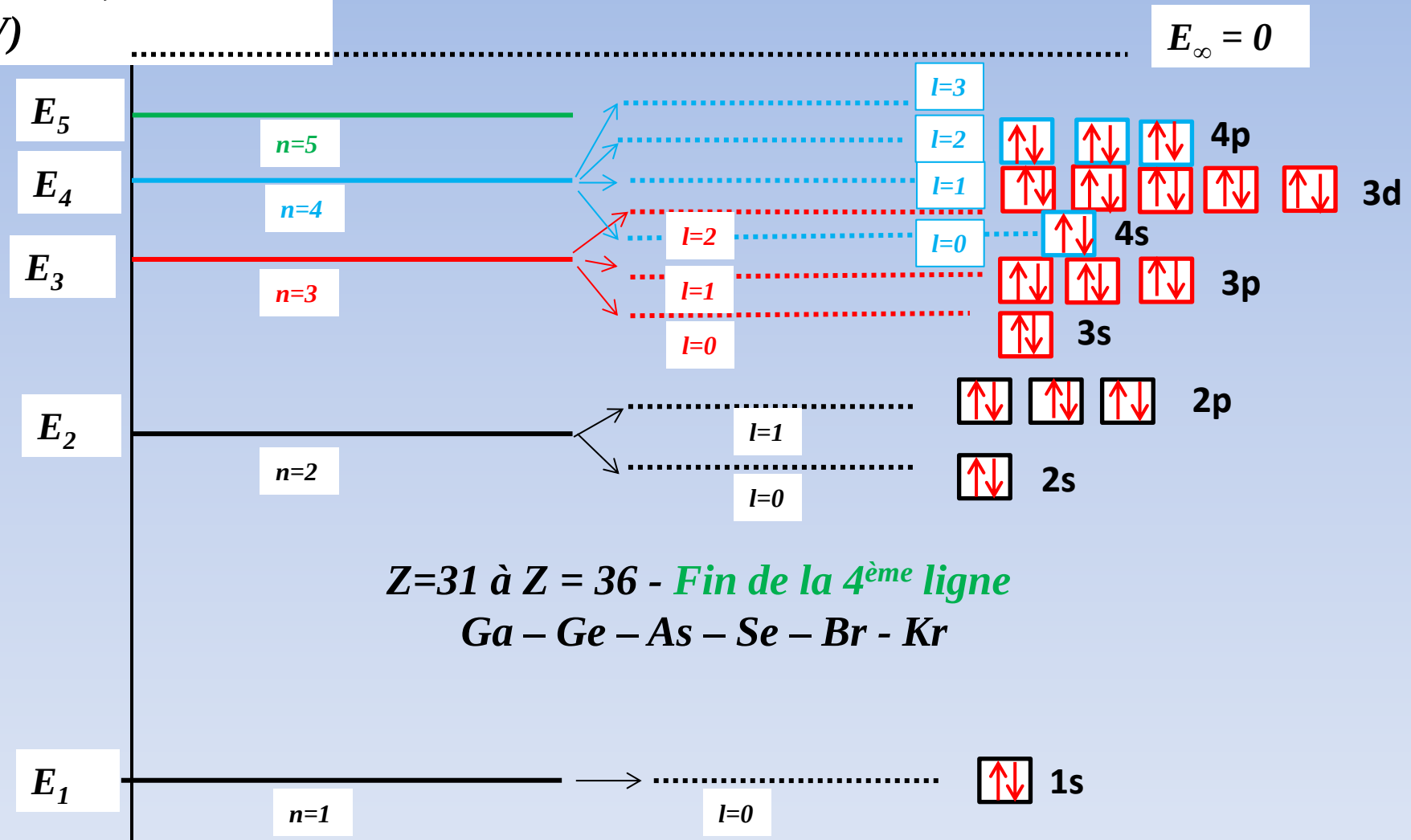
VII – Structure du Tableau périodique

$$E_n = -13,6 \frac{Z^{*2}}{n^2} \text{ (eV)}$$



VII – Structure du Tableau périodique

$$E_n = -13,6 \frac{Z^{*2}}{n^2} \text{ (eV)}$$



Groupe → I A
Période 1

VIII A
18

- ← 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]

© I CIAAW "Atomic Weights 2013" + rev. 2015

Lanthanides
57–71

Actinides
89–103

Métaux						Non métaux							
Alcalins	Alcalino-terreux	Lanthanides	Actinides	Métaux de transition	Métaux pauvres	Métalloïdes	Autres non-métaux	Halogènes	Gaz nobles	Non classés	primordial	désintégration d'autres éléments	synthétique

VII – Structure du Tableau périodique

Les familles chimiques

*Les **Alcalins** - 1^{ère} Colonne*

Points communs :

- 1 électron célibataire sur une orbitale « s »
(1 liaison covalente)*
- « Tendance » à perdre un électron (cation)*
 - **Li⁺** - **Na⁺** - **K⁺** - **Rb⁺***
- « Bases » au sens de Lewis*
- Réducteurs*

VII – Structure du Tableau périodique

Les familles chimiques

*Les **Gaz Nobles** - Dernière Colonne (Colonne VIII ou 18 ou ...)*
Gaz Rares ou Gaz inertes

Points communs :

- couche de valence saturée*
- Pas d'électrons célibataires → pas de liaison*
- Stables → pas d'ions !*

VII – Structure du Tableau périodique

Les familles chimiques

*Les **Halogènes** – Avant Dernière Colonne (Colonne VII ou 17 ou ...)*

Points communs :

- *1 électron célibataire sur une orbitale « p »
(1 liaison covalente)*

- *« Tendance » à capter un électron (anion)*

- ***F⁻ - Cl⁻ - Br⁻ - I⁻***

- *« Acides » au sens de Lewis*

- *Oxydants*

VII – Structure du Tableau périodique

Les familles chimiques

- *Les **Alcalins** - 1^{ère} Colonne*
- *Les **Alcalins Terreux** - 2^{ème} Colonne*
- *Les **Chalcogènes** – (Colonne VI ou 16)*
- *Les **Halogènes** – Avant Dernière Colonne (Colonne VII ou 17)*
- *Les **Gaz Nobles** - Dernière Colonne (Colonne VIII ou 18)
(**Gaz Rares** ou **Gaz inertes**)*

VII – Structure du Tableau périodique

Autres « groupes »

- Les « **Métaux de transition** » - $Z=21$ à $Z=30$
Electrons de valence sur des OA 3d, 4d, etc,,
- Les « **Lanthanides** » - $Z=57$ à $Z=71$
- Les « **Actinides** » - $Z=89$ à $Z=103$
Electrons de valence sur des OA 4f, 5f, etc,,
- « Terres rares » = Sc + Y + « **Lanthanides** »
- Les « **Métalloïdes** » ou « **Semi-Métaux** » :
B – Si – Ge – As – Sb – Te - At

VIII – Propriétés périodiques des éléments chimique

Quelques propriétés périodiques physiques :

- *Le « Rayon atomique »*
- *L' « Energie d'ionisation »*
- *L' « électronégativité »*
- *L' « Affinité électronique »*

VIII – Propriétés périodiques des éléments chimique

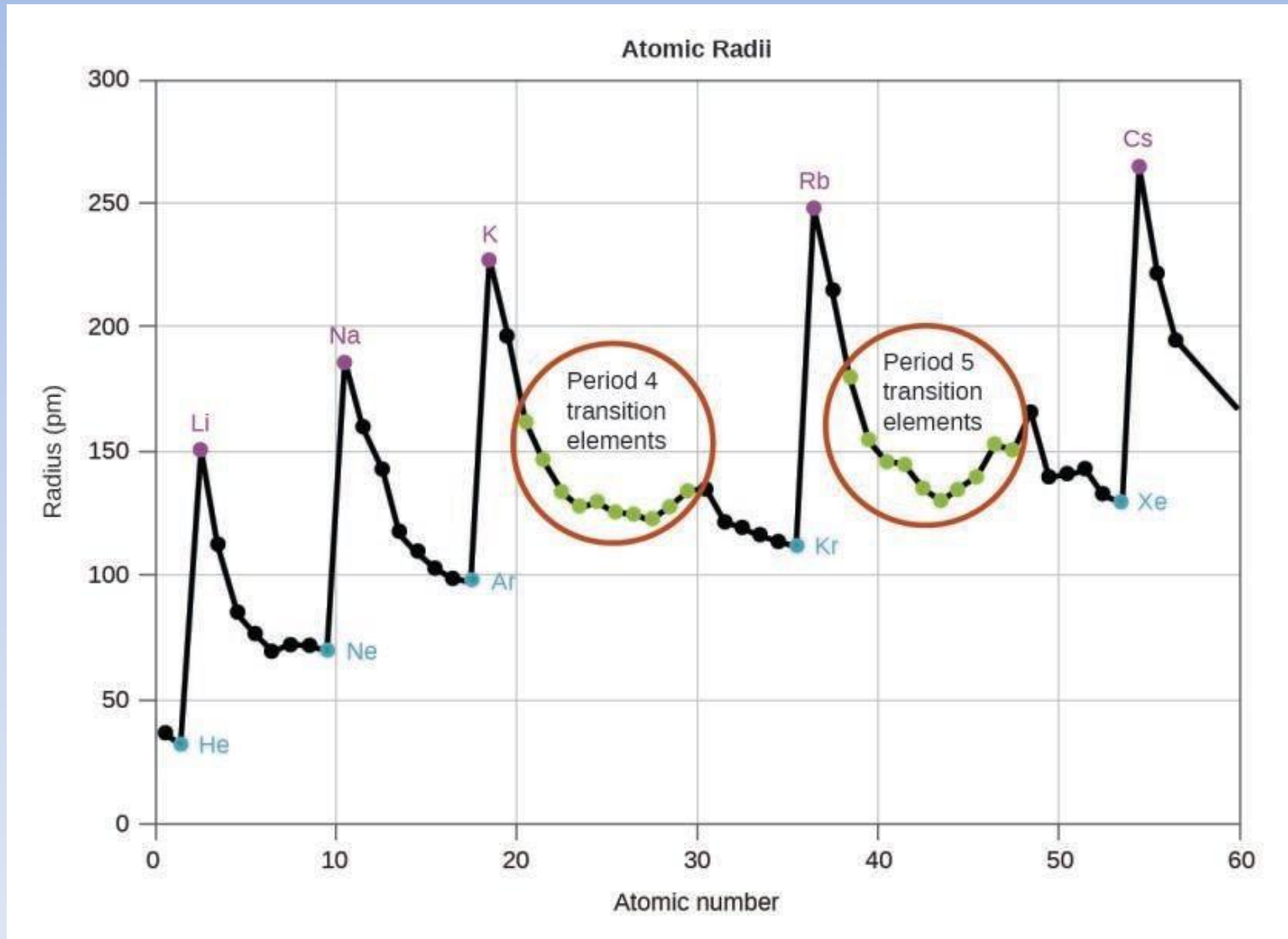
- Le « *Rayon atomique* »

Periodic Table of the Elements

Period	Group 1	Group 2											Group 13	Group 14	Group 15	Group 16	Group 17	Group 18	
1	H																		He
2	Li	Be											B	C	N	O	F		Ne
3	Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl		Ar
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	
6	Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn	
7	Fr	Ra	Ac	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Uut	Fl	Uup	Lv	Uus	Uuo	

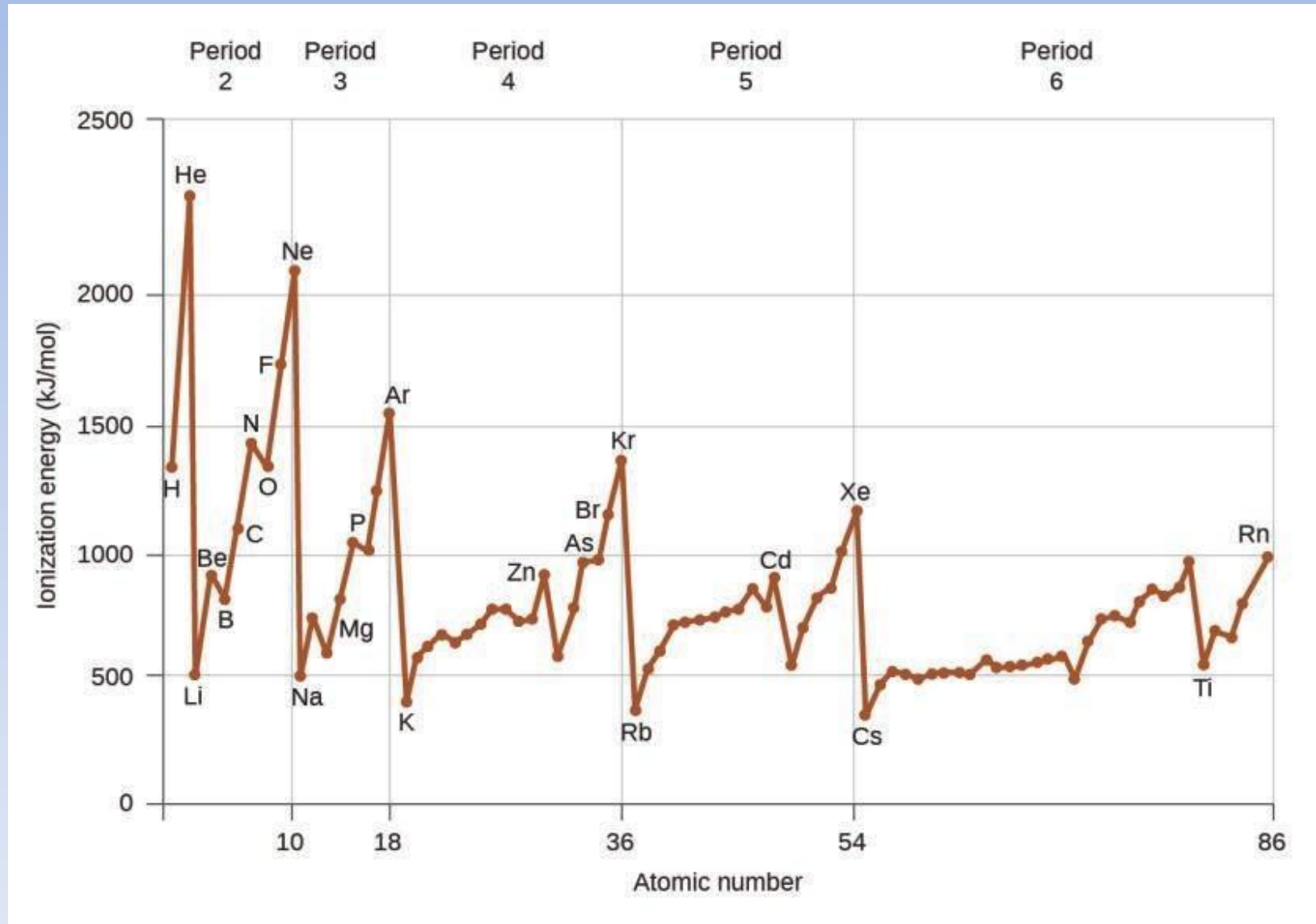
VIII – Propriétés périodiques des éléments chimique

- Le « **Rayon atomique** »



VIII – Propriétés périodiques des éléments chimique

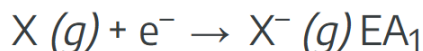
- *L'« Energie d'ionisation »*



VIII – Propriétés périodiques des éléments chimique

- L'« **Affinité électronique** »

L'affinité électronique (EA) est le changement d'énergie pour le processus d'*ajout* d'un électron à un atome gazeux pour former un anion (ion négatif).



Electron Affinity Values for Selected Elements (kJ/mol)

Period	Group 1	Group 2	Group 3	Group 4	Group 5	Group 6	Group 7	Group 8	Group 9	Group 10	Group 11	Group 12	Group 13	Group 14	Group 15	Group 16	Group 17	Group 18
1	H -72																	He +20*
2	Li -60	Be +240*											B -23	C -123	N 0	O -141	F -322	Ne -30
3	Na -53	Mg +230*											Al -44	Si -120	P -74	S -20	Cl -348	Ar +35*
4	K -48	Ca +150*	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga -40*	Ge -115	As -7	Se -195	Br -324	Kr +40*
5	Rb -46	Sr +160*	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In -40*	Sn -121	Sb -101	Te -190	I -295	Xe +40*
6	Cs -45	Ba +50*	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl -50	Pb -101	Bi -101	Po -170	At -270*	Rn +40*
7	Fr	Ra																

* Calculated value

VIII – Propriétés périodiques des éléments chimique

- *L'« électronégativité »*

L'électronégativité est définie comme la capacité d'un atome dans une molécule particulière à attirer les électrons vers lui. Plus la valeur est élevée, plus l'attrait pour les électrons est grand.

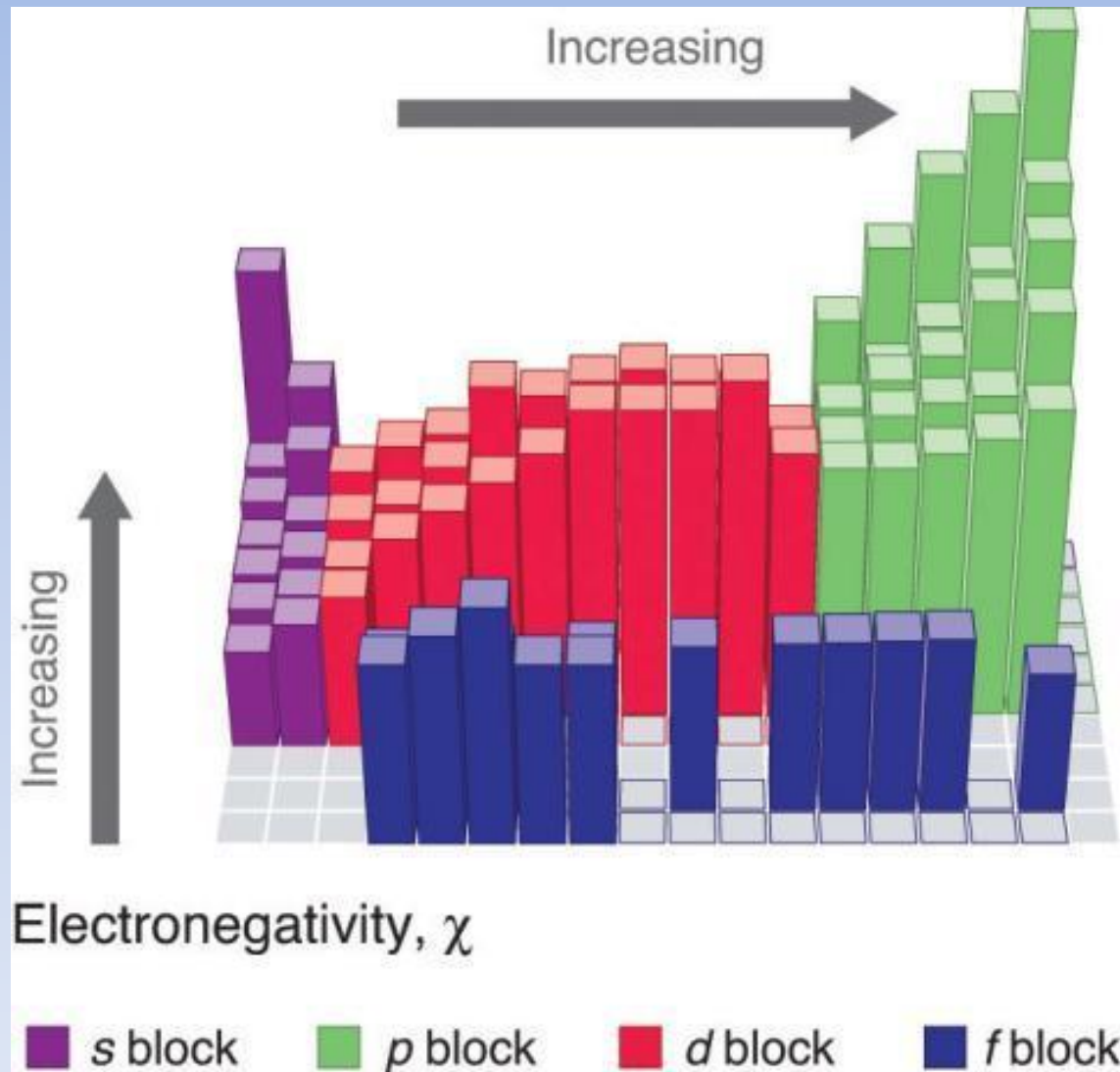
L'électronégativité est une fonction de :

l'*énergie d'ionisation* de l'atome (la force avec laquelle l'atome s'accroche à ses propres électrons), et

l'*affinité électronique* de l'atome (la force avec laquelle l'atome attire les autres électrons).

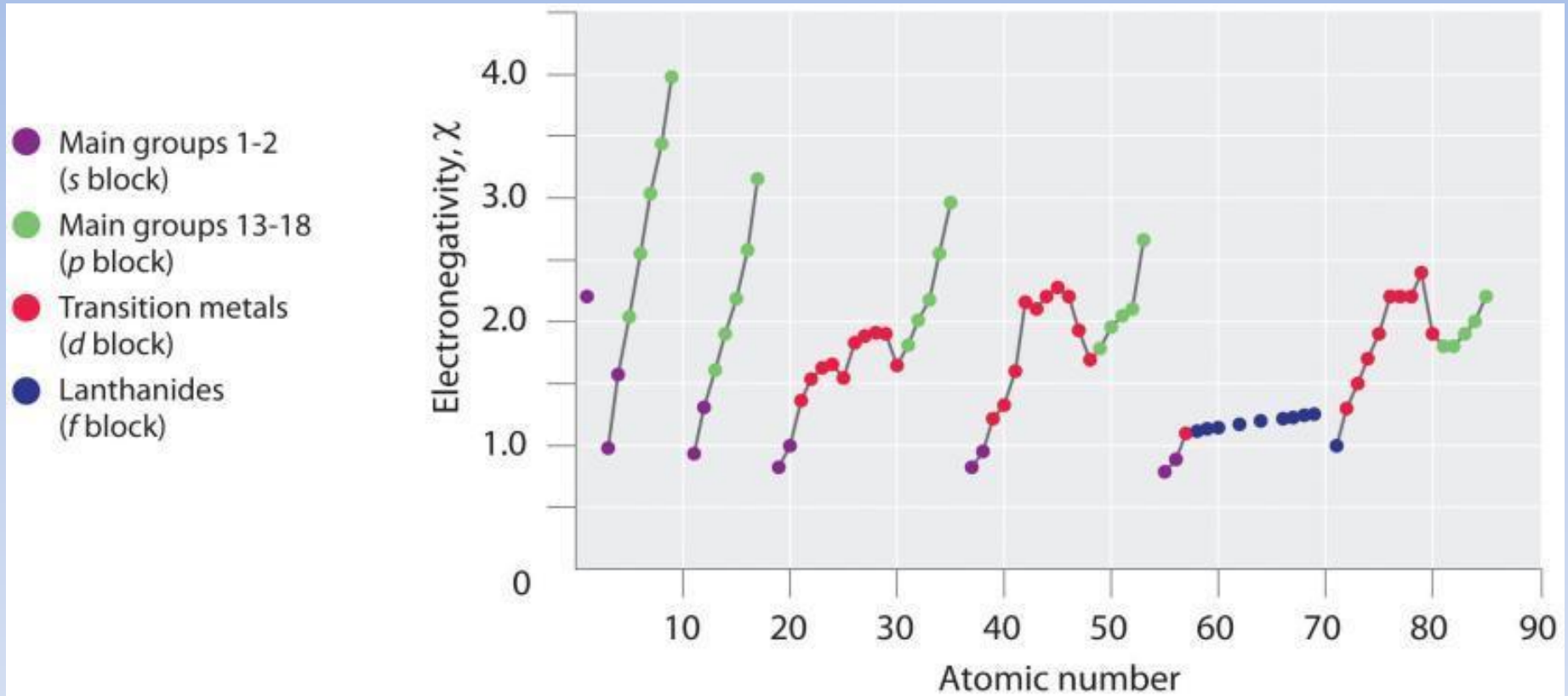
VIII – Propriétés périodiques des éléments chimique

- L' « *électronégativité* »



VIII – Propriétés périodiques des éléments chimique

- *L'* « **électronégativité** »



Actualités -16 mars 2026

La collaboration LHCb découvre une nouvelle particule de structure semblable à celle du proton

Composée de deux quarks charmés et d'un quark down, cette particule doublement charmée est quatre fois plus lourde qu'un proton

