

# Classification périodique des éléments et électronégativité

Julien Cubizolles

Lycée Louis le Grand

Lundi 4 décembre 2017

# Classification périodique des éléments et électronégativité

Julien Cubizolles

Lycée Louis le Grand

Lundi 4 décembre 2017

- ▶ Jusqu'au XIX<sup>e</sup>, éléments chimiques caractérisés par leur masse et leurs propriétés physiques et chimiques.

- ▶ Jusqu'au XIX<sup>e</sup>, éléments chimiques caractérisés par leur masse et leurs propriétés physiques et chimiques.
- ▶ Mendeleïev (1869) : périodicité des propriétés quand on les classe par masse croissante.

- ▶ Jusqu'au XIX<sup>e</sup>, éléments chimiques caractérisés par leur masse et leurs propriétés physiques et chimiques.
- ▶ Mendeleïev (1869) : périodicité des propriétés quand on les classe par masse croissante.
  - ▶ critiques (validées plus tard) de mesures de masses,

- ▶ Jusqu'au XIX<sup>e</sup>, éléments chimiques caractérisés par leur masse et leurs propriétés physiques et chimiques.
- ▶ Mendeleïev (1869) : périodicité des propriétés quand on les classe par masse croissante.
  - ▶ critiques (validées plus tard) de mesures de masses,
  - ▶ prédiction de nouveaux éléments et de leurs propriétés.

- ▶ Jusqu'au XIX<sup>e</sup>, éléments chimiques caractérisés par leur masse et leurs propriétés physiques et chimiques.
- ▶ Mendeleïev (1869) : périodicité des propriétés quand on les classe par masse croissante.
  - ▶ critiques (validées plus tard) de mesures de masses,
  - ▶ prédiction de nouveaux éléments et de leurs propriétés.
- ▶ désormais, classement en familles d'éléments de **propriétés similaires**

- ▶ Jusqu'au XIX<sup>e</sup>, éléments chimiques caractérisés par leur masse et leurs propriétés physiques et chimiques.
- ▶ Mendeleïev (1869) : périodicité des propriétés quand on les classe par masse croissante.
  - ▶ critiques (validées plus tard) de mesures de masses,
  - ▶ prédiction de nouveaux éléments et de leurs propriétés.
- ▶ désormais, classement en familles d'éléments de **propriétés similaires**
  - ▶ établie au départ sans connaissance de la nature de l'atome (XX<sup>e</sup>)

- ▶ Jusqu'au XIX<sup>e</sup>, éléments chimiques caractérisés par leur masse et leurs propriétés physiques et chimiques.
- ▶ Mendeleïev (1869) : périodicité des propriétés quand on les classe par masse croissante.
  - ▶ critiques (validées plus tard) de mesures de masses,
  - ▶ prédiction de nouveaux éléments et de leurs propriétés.
- ▶ désormais, classement en familles d'éléments de **propriétés similaires**
  - ▶ établie au départ sans connaissance de la nature de l'atome (XX<sup>e</sup>)
  - ▶ on l'étudiera cependant en utilisant le modèle atomique

## 1. Atomes et éléments

## 2. Classification périodique des éléments

## 1. Atomes et éléments

### 1.1 Structure atomique

### 1.2 Structure électronique de l'atome d'hydrogène

## 2. Classification périodique des éléments

# Noyau et électrons

## Définition (Atome)

Un **atome** est une entité électriquement neutre, constituée d'un noyau chargé positivement et de  $n_e$  électrons chargés négativement liés au noyau et formant le *cortège électronique*.

Le **noyau** est formé de  $n_p = n_e$  **protons** chargés positivement, et de  $n_n$  **neutrons**, électriquement neutres.

Un **ion** est une entité électriquement chargée, formée par ajout ou retrait d'électrons d'un atome (ou d'une molécule). C'est un **cation** (resp. **anion**) si sa charge est positive (resp. négative).

# Noyau et électrons

## Définition (Atome)

Un **atome** est une entité électriquement neutre, constituée d'un noyau chargé positivement et de  $n_e$  électrons chargés négativement liés au noyau et formant le *cortège électronique*.

Le **noyau** est formé de  $n_p = n_e$  **protons** chargés positivement, et de  $n_n$  **neutrons**, électriquement neutres.

Un **ion** est une entité électriquement chargée, formée par ajout ou retrait d'électrons d'un atome (ou d'une molécule). C'est un **cation** (resp. **anion**) si sa charge est positive (resp. négative).

- ▶ le rayon atomique varie en fonction de l'atome :

$$H \simeq 0,5 \text{ \AA} = 5 \cdot 10^{-11} \text{ m}$$

# Noyau et électrons

## Définition (Atome)

Un **atome** est une entité électriquement neutre, constituée d'un noyau chargé positivement et de  $n_e$  électrons chargés négativement liés au noyau et formant le *cortège électronique*.

Le **noyau** est formé de  $n_p = n_e$  **protons** chargés positivement, et de  $n_n$  **neutrons**, électriquement neutres.

Un **ion** est une entité électriquement chargée, formée par ajout ou retrait d'électrons d'un atome (ou d'une molécule). C'est un **cation** (resp. **anion**) si sa charge est positive (resp. négative).

- ▶ le rayon atomique varie en fonction de l'atome :

$$H \simeq 0,5 \text{ \AA} = 5 \cdot 10^{-11} \text{ m}$$

- ▶ rayon noyau  $\simeq 1 \text{ fm} = 1 \cdot 10^{-15} \text{ m}$ ,  $2 \cdot 10^{-6}$  fois plus petit

# Charge

## Définition (Nombre de charge $Z$ )

La charge  $q$  de toute objet physique est un multiple de la **charge élémentaire**  $e$  dont la mesure actuelle est  $e = 1,602\,176\,53(14) \cdot 10^{-19}$  C.

On a :

**électron**  $q_e = -e < 0$ ,

**proton**  $q_p = +e > 0$ ,

**neutron**  $q_n = 0$ .

La neutralité d'un atome implique  $n_e = n_p$ . On désigne par  $Z = n_p$  le **nombre de charge** ou **numéro atomique**.

# Charge

## Définition (Nombre de charge $Z$ )

La charge  $q$  de toute objet physique est un multiple de la **charge élémentaire**  $e$  dont la mesure actuelle est  $e = 1,602\,176\,53(14) \cdot 10^{-19}$  C.  
On a :

**électron**  $q_e = -e < 0$ ,

**proton**  $q_p = +e > 0$ ,

**neutron**  $q_n = 0$ .

La neutralité d'un atome implique  $n_e = n_p$ . On désigne par  $Z = n_p$  le **nombre de charge** ou **numéro atomique**.

- ▶ charge du noyau  $q = Ze$ , charge totale des électrons  $-q = -Ze$ .
- ▶  $n_n$  (neutrons) sans rapport immédiat avec  $n_p$ .

# Masse

La masse  $m$  de l'atome dépend de  $Z$  et du nombre de neutrons

# Masse

La masse  $m$  de l'atome dépend de  $Z$  et du nombre de neutrons

## Définition (Nombre de masse $A$ )

On nomme **nombre de masse**, noté  $A$  le nombre de nucléons  $A = n_p + n_n$  d'un noyau. Avec les masses :

**électron**  $m_e = 9,109\,382\,69(16) \cdot 10^{-31} \text{ kg},$

**proton**  $m_p = 1,672\,621\,71(29) \cdot 10^{-27} \text{ kg},$

**neutron**  $m_n = 1,674\,927\,28(29) \cdot 10^{-27} \text{ kg},$

on peut **approximer** la masse  $m_a$  d'un atome ou ion selon  $m_a \simeq Am_p.$

# Masse

## Définition (Nombre de masse $A$ )

On nomme **nombre de masse**, noté  $A$  le nombre de nucléons  $A = n_p + n_n$  d'un noyau. Avec les masses :

**électron**  $m_e = 9,109\,382\,69(16) \cdot 10^{-31} \text{ kg},$

**proton**  $m_p = 1,672\,621\,71(29) \cdot 10^{-27} \text{ kg},$

**neutron**  $m_n = 1,674\,927\,28(29) \cdot 10^{-27} \text{ kg},$

on peut **approximer** la masse  $m_a$  d'un atome ou ion selon  $m_a \simeq Am_p$ .

- ▶  $m_p \simeq m_n \simeq 1800 \times m_e \gg m_e$  : la masse des électrons est négligeable.
- ▶  $m_a < n_p m_p + n_n m_n + n_e m_e$  en raison de **énergie de liaison nucléaire**.

# Élément chimique

la réactivité chimique est gouvernée par la structure électronique : seul  $Z$  importe pour la chimie

# Élément chimique

la réactivité chimique est gouvernée par la structure électronique : seul  $Z$  importe pour la chimie

## Définition (Élément chimique)

Un **élément chimique**  $\chi$  est caractérisé par son nombre de charge  $Z$ .

Un **corps pur** est constitué d'une seule espèce chimique.

Un **corps pur simple** (resp. **composé**) est constitué d'un seul (resp. de plusieurs) élément.

# Élément chimique

## Définition (Élément chimique)

Un **élément chimique**  $\chi$  est caractérisé par son nombre de charge  $Z$ .

Un **corps pur** est constitué d'une seule espèce chimique.

Un **corps pur simple** (resp. **composé**) est constitué d'un seul (resp. de plusieurs) élément.

élément  $Cu(Z = 29)$  se retrouve dans plusieurs **espèces chimiques**

# Élément chimique

## Définition (Élément chimique)

Un **élément chimique**  $\chi$  est caractérisé par son nombre de charge  $Z$ .

Un **corps pur** est constitué d'une seule espèce chimique.

Un **corps pur simple** (resp. **composé**) est constitué d'un seul (resp. de plusieurs) élément.

élément  $Cu(Z = 29)$  se retrouve dans plusieurs **espèces chimiques**

- ▶ Le cristal  $Cu_s$  : un corps pur simple.

# Élément chimique

## Définition (Élément chimique)

Un **élément chimique**  $\chi$  est caractérisé par son nombre de charge  $Z$ .

Un **corps pur** est constitué d'une seule espèce chimique.

Un **corps pur simple** (resp. **composé**) est constitué d'un seul (resp. de plusieurs) élément.

élément  $Cu(Z = 29)$  se retrouve dans plusieurs **espèces chimiques**

- ▶ Le cristal  $Cu_s$  : un corps pur simple.
- ▶ Le cristal  $CuOH_{2s}$  d'hydroxyde de cuivre : un corps pur composé.

# Élément chimique

## Définition (Élément chimique)

Un **élément chimique**  $\chi$  est caractérisé par son nombre de charge  $Z$ .

Un **corps pur** est constitué d'une seule espèce chimique.

Un **corps pur simple** (resp. **composé**) est constitué d'un seul (resp. de plusieurs) élément.

élément  $Cu(Z = 29)$  se retrouve dans plusieurs **espèces chimiques**

- ▶ Le cristal  $Cu_s$  : un corps pur simple.
- ▶ Le cristal  $CuOH_{2s}$  d'hydroxyde de cuivre : un corps pur composé.
- ▶ L'ion  $Cu^{2+}$  en solution : une association de molécules de  $H_2O$  et d'ions  $Cu^{2+}$ .

# Isotope

la configuration du noyau joue sur réactivité **nucléaire**

## Définition (Définition)

Les **isotopes** d'un élément chimique sont des atomes de même numéro atomique  $Z$  mais de nombre de masse  $A$  différents. Ils sont présents naturellement dans des proportions différentes, caractérisées par leur **abondance naturelle**.

# Isotope

la configuration du noyau joue sur réactivité **nucléaire**

## Définition (Définition)

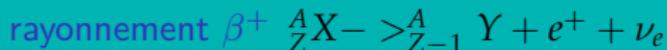
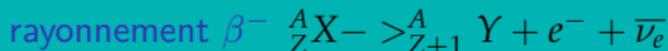
Les **isotopes** d'un élément chimique sont des atomes de même numéro atomique  $Z$  mais de nombre de masse  $A$  différents. Ils sont présents naturellement dans des proportions différentes, caractérisées par leur **abondance naturelle**.

- ▶ mêmes  $n_p$  et  $n_e$ , mais  $m_a$  différentes.
- ▶ propriétés physiques très différentes, propriété chimiques très proches
- ▶ un atome est noté  ${}^A_Z X$  :  ${}^{12}_6 C$  (abondance 98,9%) ;  ${}^{13}_6 C$  (abondance 1,1%) et  ${}^{14}_6 C$  ( $1 \cdot 10^{-12}$ , instable) sont trois **isotopes** de l'**élément** carbone
- ▶  ${}^{238}_{92} U$  : 99,27% de l'uranium naturel
- ▶  ${}^{235}_{92} U$  : 0,72% de l'uranium naturel est le seul fissible, utilisé dans les centrales selon  $n + {}^{235}_{92} U \rightarrow {}^{141}_{56} Ba + {}^{92}_{36} Kr + 3n$  par exemple

# Stabilité

certains noyaux sont **instables** et se transmutent spontanément selon des réactions **nucléaires**, principalement

## Définition (Principales réactions nucléaires)

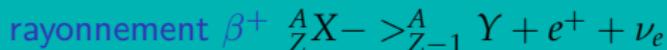
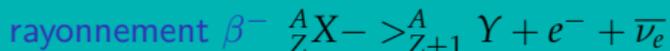


## Exemple (Réactions nucléaires)

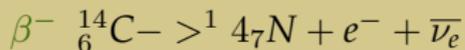
# Stabilité

certains noyaux sont **instables** et se transmutent spontanément selon des réactions **nucléaires**, principalement

## Définition (Principales réactions nucléaires)



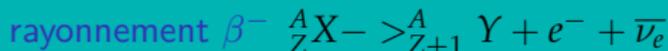
## Exemple (Réactions nucléaires)



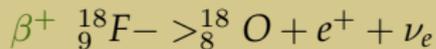
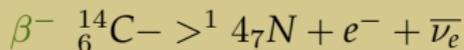
# Stabilité

certains noyaux sont **instables** et se transmutent spontanément selon des réactions **nucléaires**, principalement

## Définition (Principales réactions nucléaires)



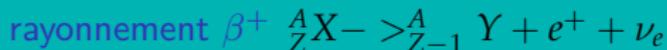
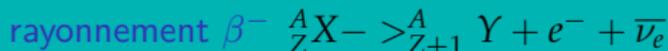
## Exemple (Réactions nucléaires)



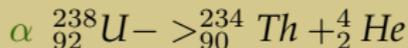
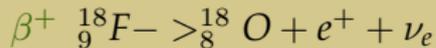
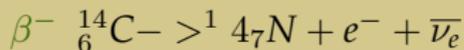
# Stabilité

certains noyaux sont **instables** et se transmutent spontanément selon des réactions **nucléaires**, principalement

## Définition (Principales réactions nucléaires)



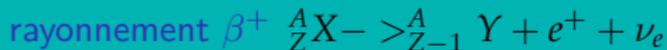
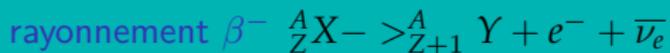
## Exemple (Réactions nucléaires)



# Stabilité

certains noyaux sont **instables** et se transmutent spontanément selon des réactions **nucléaires**, principalement

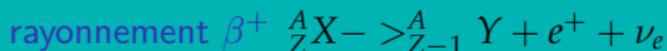
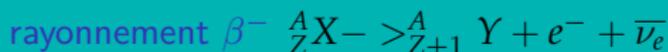
## Définition (Principales réactions nucléaires)



# Stabilité

certains noyaux sont **instables** et se transmutent spontanément selon des réactions **nucléaires**, principalement

## Définition (Principales réactions nucléaires)

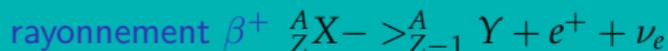
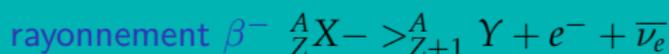


- ▶ l'élément chimique change : **transmutation**

# Stabilité

certains noyaux sont **instables** et se transmutent spontanément selon des réactions **nucléaires**, principalement

## Définition (Principales réactions nucléaires)

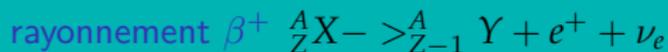
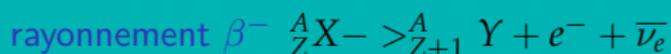


- ▶ l'élément chimique change : **transmutation**
- ▶  $\beta^-$  :  $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$

# Stabilité

certains noyaux sont **instables** et se transmutent spontanément selon des réactions **nucléaires**, principalement

## Définition (Principales réactions nucléaires)

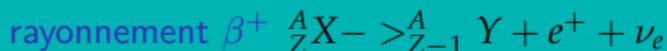
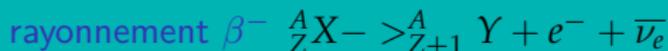


- ▶ l'élément chimique change : **transmutation**
- ▶  $\beta^-$  :  $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$
- ▶  $\beta^+$  :  $p \rightarrow n + e^+ + \nu_e$

# Stabilité

certains noyaux sont **instables** et se transmutent spontanément selon des réactions **nucléaires**, principalement

## Définition (Principales réactions nucléaires)

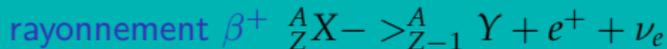
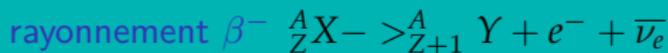


- ▶ l'élément chimique change : **transmutation**
- ▶  $\beta^-$  :  $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$
- ▶  $\beta^+$  :  $p \rightarrow n + e^+ + \nu_e$
- ▶ émission d'électrons  $e^-$ , de positron  $e^+$ , de neutrino électronique  $\nu_e$  ou d'antineutrino électronique  $\bar{\nu}_e$

# Stabilité

certains noyaux sont **instables** et se transmutent spontanément selon des réactions **nucléaires**, principalement

## Définition (Principales réactions nucléaires)

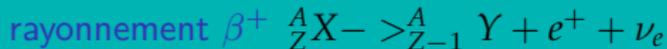
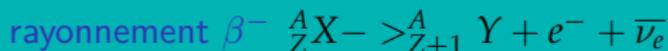


- ▶ l'élément chimique change : **transmutation**
- ▶  $\beta^-$  :  $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$
- ▶  $\beta^+$  :  $p \rightarrow n + e^+ + \nu_e$
- ▶ émission d'électrons  $e^-$ , de positron  $e^+$ , de neutrino électronique  $\nu_e$  ou d'antineutrino électronique  $\bar{\nu}_e$
- ▶ le nombre de masse ne change pas pour les radioactivités  $\beta$

# Stabilité

certains noyaux sont **instables** et se transmutent spontanément selon des réactions **nucléaires**, principalement

## Définition (Principales réactions nucléaires)



- ▶ l'élément chimique change : **transmutation**
- ▶  $\beta^-$  :  $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$
- ▶  $\beta^+$  :  $p \rightarrow n + e^+ + \nu_e$
- ▶ émission d'électrons  $e^-$ , de positron  $e^+$ , de neutrino électronique  $\nu_e$  ou d'antineutrino électronique  $\bar{\nu}_e$
- ▶ le nombre de masse ne change pas pour les radioactivités  $\beta$
- ▶ souvent le noyau produit sera dans un état excité et retombera dans son état fondamental en émettant un photon  $\gamma$   
( $\lambda \leq 1 \cdot 10^{-12}$  m ;  $E \geq 100$  keV)

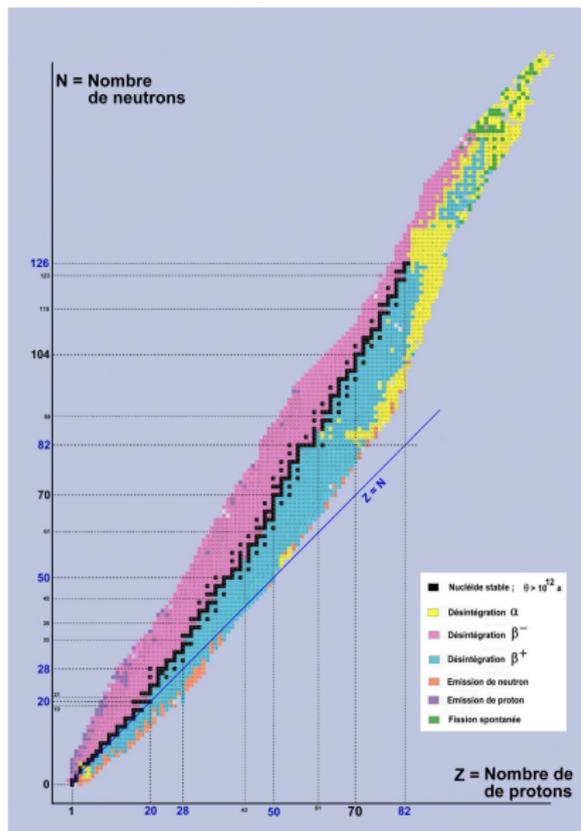
# Durée de vie

## Définition (Durée de vie)

Les désintégrations radioactives d'un noyau instable obéissent à des cinétiques d'ordre 1, caractérisées par leur temps de demi-réaction nommé **période radioactive**, notée  $T$ .

- ▶ un noyau est dit **stable** si  $T \geq 1 \cdot 10^{12}$  an
- ▶  ${}^6_{14}\text{C}$  :  $T = 5,7 \cdot 10^3$  an (datation)
- ▶  ${}^9_{18}\text{F}$  :  $T = 1,1 \cdot 10^2$  min (imagerie médicale PET)

# Vallée de stabilité



- ▶  $N \simeq Z$  pour les noyaux stables à faible Z
- ▶  $\beta^-$  quand il y a excédent de neutrons
- ▶  $\beta^+$  quand il y a excédent de protons
- ▶  $\alpha$  seulement pour des très lourds

# Masses atomique et molaire

la masse d'un isotope est légèrement inférieure à  $A m_p$

# Masses atomique et molaire

## Définition (Mole)

On définit l'**unité de masse atomique** de symbole  $u$  comme un douzième de la masse d'un atome de  ${}^{12}_6\text{C}$ .

La **masse atomique**  $m({}^A_Z\text{X})$  d'un isotope  ${}^A_Z\text{X}$  de l'élément  $X$  est un nombre sans dimension défini comme :

$$m({}^A_Z\text{X}) = 12 \times \frac{\text{masse d'un atome de } {}^A_Z\text{X}}{\text{masse d'un atome de } {}^{12}_6\text{C}}$$

Une **mole** est la quantité de matière d'un système contenant autant d'entités qu'il y a d'atomes dans 12 g de  ${}^{12}_6\text{C}$ .

Le **nombre d'Avogadro** est le nombre d'entités dans une mole. Sa mesure actuelle est :

$$\mathcal{N}_A = 6,022\,141\,5(10) \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}.$$

# Masses atomique et molaire

## Définition (Masse atomique)

La **masse molaire atomique d'un isotope**  ${}^A_ZX$ , notée  $M({}^A_ZX)$ , est la masse d'une mole de  ${}^A_ZX$ .

La **masse molaire atomique d'un élément**  $X$ , notée  $M(X)$ , est la moyenne pondérée des masses molaires atomiques des isotopes de  $X$ , en proportion de leur abondance naturelle.

# Masses atomique et molaire

## Définition (Masse atomique)

La **masse molaire atomique d'un isotope**  ${}^A_ZX$ , notée  $M({}^A_ZX)$ , est la masse d'une mole de  ${}^A_ZX$ .

La **masse molaire atomique d'un élément**  $X$ , notée  $M(X)$ , est la moyenne pondérée des masses molaires atomiques des isotopes de  $X$ , en proportion de leur abondance naturelle.

- ▶  $1 \text{ u} \simeq 1,660\,538\,86(28) \cdot 10^{-27} \text{ kg} \simeq m_p \simeq m_n$ ,
- ▶  $m({}^A_ZX)$  est une masse relative, **sans dimension**, proche du nombre de masse  $A$ .
- ▶  $M(U) = 238,028\,91 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$ , proche de celle de l'isotope majoritaire :  ${}^{238}_{92}\text{U}(99,3\%)$ , de même  $M(C) = 12,011 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$  légèrement supérieure à  $M({}^1_2\text{C})$  à cause des isotopes plus lourds
- ▶  $m(\text{He}) = 4,002602 \text{ u}$ ,  $m_p = 1,007\,276\,466\,61 \text{ u}$ ,  
 $m_n = 1,008\,664\,915\,96 \text{ u}$ ,  $m_e = 5,485\,799\,094\,6 \cdot 10^{-4} \text{ u}$  et  
 $(m(\text{He}) - 2m_p - 2m_n)c^2 = -27 \text{ MeV}$  : énergie de liaison d'un noyau de  $\text{He}$

## 1. Atomes et éléments

### 1.1 Structure atomique

### 1.2 Structure électronique de l'atome d'hydrogène

## 2. Classification périodique des éléments

# Observations expérimentales

les modèles **classiques** du mouvement de l'électron (ponctuel) autour d'un noyau (ponctuel) prédisent :

# Observations expérimentales

les modèles **classiques** du mouvement de l'électron (ponctuel) autour d'un noyau (ponctuel) prédisent :

- ▶ des trajectoires électroniques elliptiques de fréquence quelconques  $\nu$

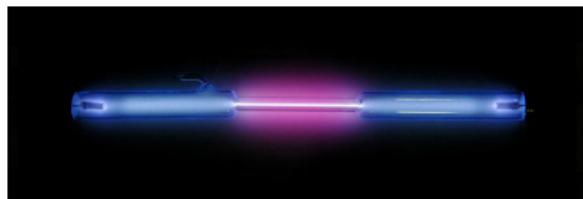
# Observations expérimentales

les modèles **classiques** du mouvement de l'électron (ponctuel) autour d'un noyau (ponctuel) prédisent :

- ▶ des trajectoires électroniques elliptiques de fréquence quelconques  $\nu$
- ▶ émission et absorption d'un rayonnement à  $\nu$  quelconques

# Observations expérimentales

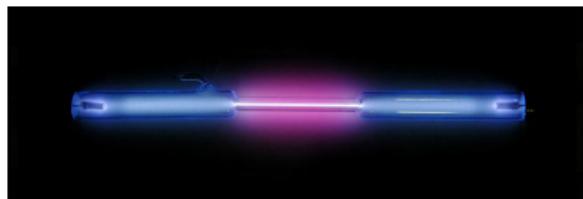
- ▶ décharges électriques ( $100 \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1}$ ) dans  $\text{H}_2(\text{g})$  sous faible pression
- ▶ ionisation du gaz et courant électrique
- ▶ les collisions avec les électrons excitent  $\text{H}_2$  qui se désexcitent en émettant un rayonnement



Lampe à décharge :  $\text{H}_2(\text{g})$  sous 1,8 kV

# Observations expérimentales

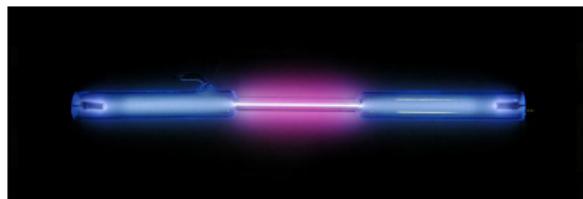
- ▶ décharges électriques ( $100 \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1}$ ) dans  $\text{H}_2(\text{g})$  sous faible pression
- ▶ ionisation du gaz et courant électrique
- ▶ les collisions avec les électrons excitent  $\text{H}_2$  qui se désexcitent en émettant un rayonnement
  - ▶ le spectre des longueurs d'ondes émises est **discret**



Lampe à décharge :  $\text{H}_2(\text{g})$  sous 1,8 kV

# Observations expérimentales

- ▶ décharges électriques ( $100 \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1}$ ) dans  $\text{H}_2(\text{g})$  sous faible pression
- ▶ ionisation du gaz et courant électrique
- ▶ les collisions avec les électrons excitent  $\text{H}_2$  qui se désexcitent en émettant un rayonnement
  - ▶ le spectre des longueurs d'ondes émises est **discret**
  - ▶ les longueurs d'onde  $\lambda_i$  émises sont indépendantes de la pression et de la température du gaz



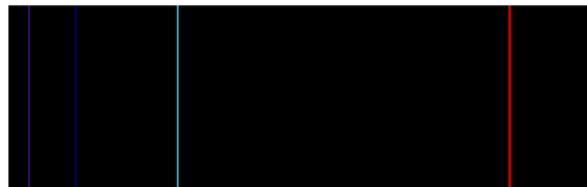
Lampe à décharge :  $\text{H}_2(\text{g})$  sous 1,8 kV

# Observations expérimentales

## Définition (Spectre d'émission)

Les longueurs d'ondes discrètes émises sont nommées **raies**.

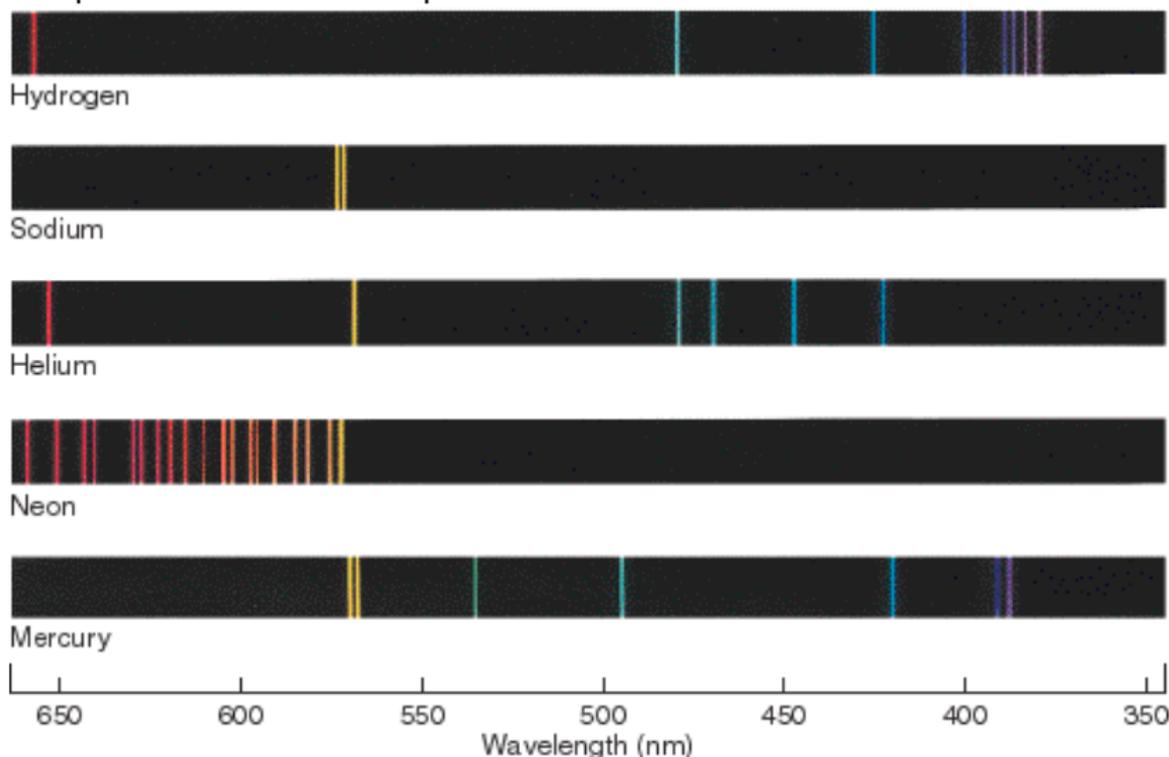
L'ensemble des raies constitue le **spectre d'émission** de l'atome.



Spectre de  $H$

# Spectres de différents éléments

Le spectre est caractéristique de l'élément étudié



# Transitions électroniques

dans la théorie quantique de l'atome (Bohr, Schrödinger) les niveaux d'énergie d'un électron sont **discrets**; l'émission et l'absorption correspondent à des changements d'état électronique

**excitation** l'électron « saute » d'un état  $E_b$  vers un état d'énergie  $E_h > E_b$  supérieure à l'issue d'une collision ou par absorption d'un photon de fréquence  $\nu$

# Transitions électroniques

dans la théorie quantique de l'atome (Bohr, Schrödinger) les niveaux d'énergie d'un électron sont **discrets**; l'émission et l'absorption correspondent à des changements d'état électronique

**excitation** l'électron « saute » d'un état  $E_b$  vers un état d'énergie  $E_h > E_b$  supérieure à l'issue d'une collision ou par absorption d'un photon de fréquence  $\nu$

**déexcitation** l'électron « descend » d'un état  $E_h$  vers un état d'énergie  $E_b < E_h$  en émettant un photon de fréquence  $\nu$

# Transitions électroniques

dans la théorie quantique de l'atome (Bohr, Schrödinger) les niveaux d'énergie d'un électron sont **discrets**; l'émission et l'absorption correspondent à des changements d'état électronique

**excitation** l'électron « saute » d'un état  $E_b$  vers un état d'énergie  $E_h > E_b$  supérieure à l'issue d'une collision ou par absorption d'un photon de fréquence  $\nu$

**déexcitation** l'électron « descend » d'un état  $E_h$  vers un état d'énergie  $E_b < E_h$  en émettant un photon de fréquence  $\nu$

## Interaction atome-rayonnement

La conservation de l'énergie totale du système (atome + photon) lors de l'émission ou de l'absorption d'un photon se traduit par :

$$h\nu = E_h - E_b$$

# Transitions électroniques

dans la théorie quantique de l'atome (Bohr, Schrödinger) les niveaux d'énergie d'un électron sont **discrets** ; l'émission et l'absorption correspondent à des changements d'état électronique

**excitation** l'électron « saute » d'un état  $E_b$  vers un état d'énergie  $E_h > E_b$  supérieure à l'issue d'une collision ou par absorption d'un photon de fréquence  $\nu$

**désexcitation** l'électron « descend » d'un état  $E_h$  vers un état d'énergie  $E_b < E_h$  en émettant un photon de fréquence  $\nu$

## Interaction atome-rayonnement

La conservation de l'énergie totale du système (atome + photon) lors de l'émission ou de l'absorption d'un photon se traduit par :

$$h\nu = E_h - E_b$$

- ▶ on a négligé l'effet Doppler ( $v_{\text{atome}} \ll c$ ) et l'énergie cinétique de l'atome ( $p_{\text{photo}}^2 / (2m_{\text{atome}}) \ll h\nu$ )
- ▶ pour le visible  $h\nu \simeq 1 \text{ eV}$

# États stationnaires de l'atome d'hydrogène

comme pour les modes propres dans une boîte quantique :

# États stationnaires de l'atome d'hydrogène

## Définition (États stationnaires)

Les états quantiques qui n'évoluent pas en fonction du temps sont répartis de manière discrète ; on les nomme **états quantiques stationnaires**. Leur énergie  $\mathcal{E} = \mathcal{E}_c + \mathcal{E}_{\text{pot}}$  (et d'autres grandeurs comme le moment cinétique...) est en particulier **stationnaire**.

# États stationnaires de l'atome d'hydrogène

## Définition (États stationnaires)

Les états quantiques qui n'évoluent pas en fonction du temps sont répartis de manière discrète ; on les nomme **états quantiques stationnaires**. Leur énergie  $\mathcal{E} = \mathcal{E}_c + \mathcal{E}_{\text{pot}}$  (et d'autres grandeurs comme le moment cinétique...) est en particulier **stationnaire**.

la densité de probabilité  $|\Psi|^2$  est stationnaire, mais  $\Psi$  évolue selon  
$$\Psi(t) = \Psi(0)e^{-i\mathcal{E}t/\hbar}$$

# États stationnaires de l'atome d'hydrogène

## Atome d'hydrogène

Dans le cadre de la mécanique quantique, l'énergie de l'électron d'un atome d'hydrogène dans un état quantique stationnaire est quantifiée *ie* elle ne peut prendre que les valeurs discrètes :

$$\mathcal{E}_n = -\frac{E_0}{n^2}, \quad \text{avec } :n \in \mathbb{N}^* \quad E_0 = 13,605\,692\,3(12) \text{ eV.}$$

On dit que l'électron se trouve dans l'**état d'énergie**  $\mathcal{E}_n$ .

# États stationnaires de l'atome d'hydrogène

## Atome d'hydrogène

Dans le cadre de la mécanique quantique, l'énergie de l'électron d'un atome d'hydrogène dans un état quantique stationnaire est quantifiée *ie* elle ne peut prendre que les valeurs discrètes :

$$\mathcal{E}_n = -\frac{E_0}{n^2}, \quad \text{avec } n \in \mathbb{N}^* \quad E_0 = 13,605\,692\,3(12) \text{ eV.}$$

On dit que l'électron se trouve dans **l'état d'énergie**  $\mathcal{E}_n$ .

# États stationnaires de l'atome d'hydrogène

## Atome d'hydrogène

Dans le cadre de la mécanique quantique, l'énergie de l'électron d'un atome d'hydrogène dans un état quantique stationnaire est quantifiée *ie* elle ne peut prendre que les valeurs discrètes :

$$\mathcal{E}_n = -\frac{E_0}{n^2}, \quad \text{avec } n \in \mathbb{N}^* \quad E_0 = 13,605\,692\,3(12) \text{ eV.}$$

On dit que l'électron se trouve dans l'**état d'énergie**  $\mathcal{E}_n$ .

- ▶ dans  $n = 1$ , le rayon est  $a_0 = 0,529\,177\,210\,8(18) \text{ \AA}$

# États stationnaires de l'atome d'hydrogène

## Atome d'hydrogène

Dans le cadre de la mécanique quantique, l'énergie de l'électron d'un atome d'hydrogène dans un état quantique stationnaire est quantifiée *ie* elle ne peut prendre que les valeurs discrètes :

$$\mathcal{E}_n = -\frac{E_0}{n^2}, \quad \text{avec } n \in \mathbb{N}^* \quad E_0 = 13,605\,692\,3(12) \text{ eV.}$$

On dit que l'électron se trouve dans **l'état d'énergie**  $\mathcal{E}_n$ .

- ▶ dans  $n = 1$ , le rayon est  $a_0 = 0,529\,177\,210\,8(18) \text{ \AA}$
- ▶ pour les autres états, la taille est de l'ordre de  $n^2 a_0$

# États stationnaires de l'atome d'hydrogène

## Atome d'hydrogène

Dans le cadre de la mécanique quantique, l'énergie de l'électron d'un atome d'hydrogène dans un état quantique stationnaire est quantifiée *ie* elle ne peut prendre que les valeurs discrètes :

$$\mathcal{E}_n = -\frac{E_0}{n^2}, \quad \text{avec } n \in \mathbb{N}^* \quad E_0 = 13,605\,692\,3(12) \text{ eV.}$$

On dit que l'électron se trouve dans l'**état d'énergie**  $\mathcal{E}_n$ .

- ▶ dans  $n = 1$ , le rayon est  $a_0 = 0,529\,177\,210\,8(18) \text{ \AA}$
- ▶ pour les autres états, la taille est de l'ordre de  $n^2 a_0$
- ▶  $E_0$  et  $a_0$  fixent toutes les échelles d'énergie/fréquence et taille à l'échelle atomique

# Diagramme énergétique

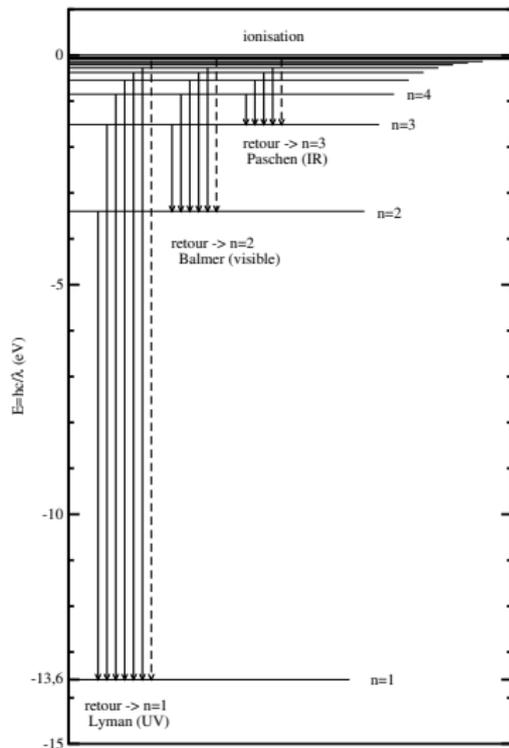
on retrouve les raies observées

# Diagramme énergétique

Lyman (UV) retour vers  
 $n = 1$

Balmer (visible) retour vers  
 $n = 2$

Paschen (IR) retour vers  
 $n = 3$



# Nombres quantiques

plusieurs états stationnaire peuvent avoir la même énergie

# Nombres quantiques

## Définition (Dégénérescence)

S'il existe  $p$  ( $p > 1$ ) états quantiques stationnaires de même énergie  $\mathcal{E}$ , le niveau d'énergie est dit **dégénéré**,  $p$  est sa dégénérescence.

# Nombres quantiques

## Définition (Dégénérescence)

S'il existe  $p$  ( $p > 1$ ) états quantiques stationnaires de même énergie  $\mathcal{E}$ , le niveau d'énergie est dit **dégénéré**,  $p$  est sa dégénérescence.

l'entier  $n$  n'est donc pas suffisant pour caractériser un état quantique stationnaire

# Nombres quantiques

## Nombres quantiques et orbitales atomiques

Un état quantique stationnaire, de l'atome d'hydrogène est complètement décrit par la données de 4 nombres entiers ou demi-entiers. 3 sont relatifs au mouvement orbital de l'électron :

- ▶  $n \in \mathbb{N}^*$  : nombre quantique principal,
- ▶  $l \in \mathbb{N} \in [0; n - 1]$  : nombre quantique secondaire/azimuthal
- ▶  $m_l \in \mathbb{Z} \in [-l; l]$  : nombre quantique magnétique

La donnée du triplet  $\{n, l, m_l\}$  caractérise complètement une orbitale atomique, notée  $O.A..$

Le quatrième est le **nombre de spin**  $m_s = \pm \frac{1}{2}$  relatif au moment cinétique intrinsèque de l'électron nommé spin .

L'énergie d'un état est donnée par  $-\frac{E_0}{n^2}$ , sa dégénérescence est  $2n^2$  (en comptant les deux états de spin  $m_s = \pm \frac{1}{2}$ ).

# Nombres quantiques



la dégénérescence sera différente pour les niveaux d'un atome  
**polyélectronique**

# Grandeurs quantifiées

à chaque nombre quantique est associée une grandeur quantifiée

## Grandeurs quantifiées

$n$  l'énergie :  $\mathcal{E}_n = -\frac{E_0}{n^2}$ ,

$l$  la norme du moment cinétique, noté  $\vec{L}$ . On a  
 $L = \sqrt{l(l+1)}\hbar$ ,

$m_l$  la projection  $L_z$  de  $\vec{L}$  sur un axe privilégié  $L_z = m_l\hbar$ ,

$m_s$  la projection  $S_z$  du moment cinétique intrinsèque  $\vec{S}$  (de norme  $S = \sqrt{\frac{1}{2}(\frac{1}{2} + 1)}\hbar$ ) sur un axe privilégié  $S_z = m_s\hbar$ .

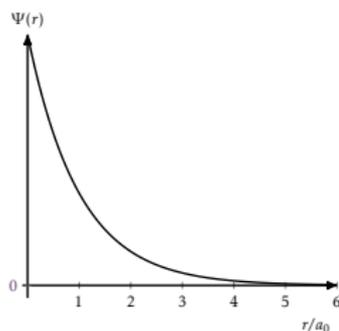
la description des structures **fine** et **hyperfine** fait intervenir de nouveaux nombres quantiques

# Structure spatiale

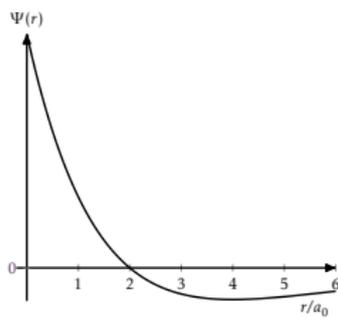
contrairement à une boîte quantique, les OA sont 3D : s'écrivent comme le produit :

- ▶ d'une fonction de la distance  $r$  au noyau
- ▶ d'une fonction de la direction autour du noyau

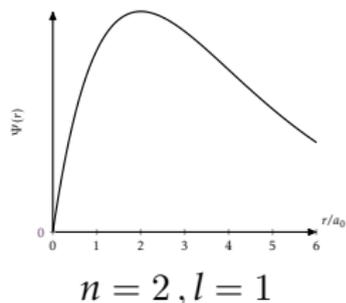
## Variations radiales



$$n = 1, l = 0$$



$$n = 2, l = 0$$



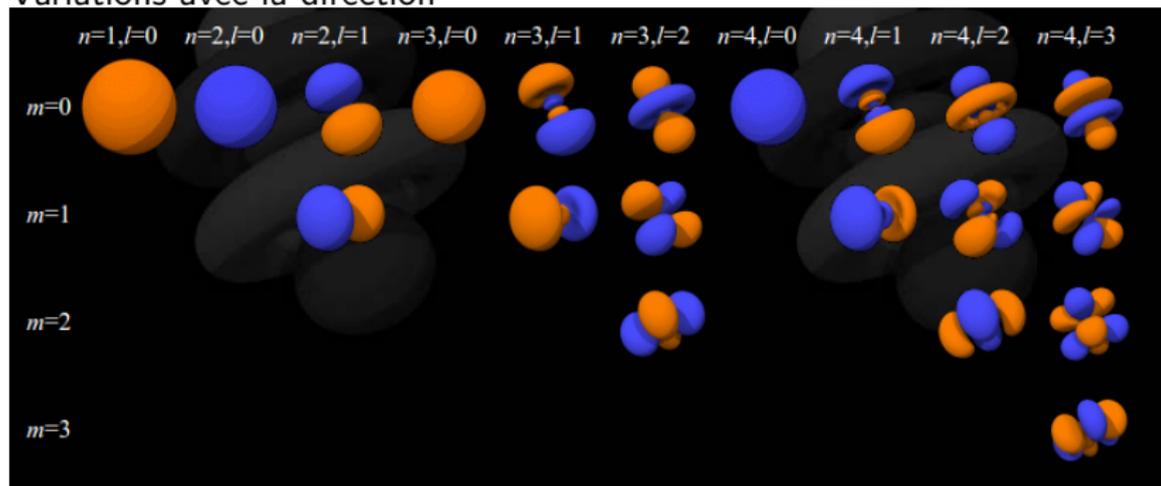
$$n = 2, l = 1$$

# Structure spatiale

contrairement à une boîte quantique, les OA sont 3D : s'écrivent comme le produit :

- ▶ d'une fonction de la distance  $r$  au noyau
- ▶ d'une fonction de la direction autour du noyau

Variations avec la direction



# Spin

- ▶ le spin est le moment cinétique intrinsèque que possède l'électron

# Spin

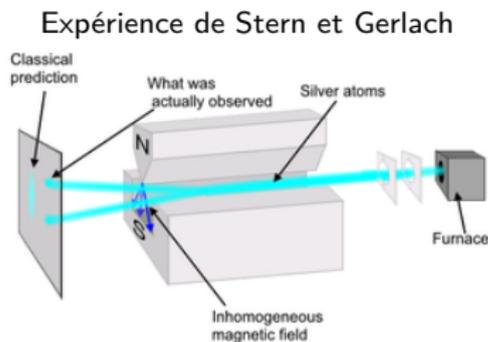
- ▶ le spin est le moment cinétique intrinsèque que possède l'électron
- ▶ différent du moment cinétique orbital autour du noyau

# Spin

- ▶ le spin est le moment cinétique intrinsèque que possède l'électron
- ▶ différent du moment cinétique orbital autour du noyau
- ▶ au spin  $S$  est associé un moment dipolaire magnétique  $\vec{M} = \gamma \vec{S}$  : un électron se comporte comme un aimant dans un champ magnétique

# Spin

- ▶ le spin est le moment cinétique intrinsèque que possède l'électron
- ▶ différent du moment cinétique orbital autour du noyau
- ▶ au spin  $S$  est associé un moment dipolaire magnétique  $\vec{M} = \gamma \vec{S}$  : un électron se comporte comme un aimant dans un champ magnétique
- ▶ des atomes de Ag (de spin  $S = 1/2$  comme un électron seul) sont déviés dans un champ magnétique inhomogène
- ▶ on observe **deux tâches distinctes** correspondant à  $m_S = \pm \frac{1}{2}$  et non pas une distribution continue
- ▶ le spin est donc quantifié



## 1. Atomes et éléments

## 2. Classification périodique des éléments

## 1. Atomes et éléments

## 2. Classification périodique des éléments

### 2.1 Configuration électronique d'un atome

### 2.2 Tableau périodique

### 2.3 Électronégativité

# Nomenclature des orbitales atomiques

on classe les orbitales atomiques en couches et sous-couches :

**couches** correspondent à une valeur de  $n$

$n$	1	2	3	4	5 ...
nom	K	L	M	N	O + alphabet

# Nomenclature des orbitales atomiques

on classe les orbitales atomiques en couches et sous-couches :

**couches** correspondent à une valeur de  $n$

$n$	1	2	3	4	5 ...
nom	K	L	M	N	O + alphabet

**sous-couches** correspondent à une valeur de  $l$

$l$	0	1	2	3	4	5 ...
nom	s	p	d	f	g	h + alphabet

# Nomenclature des orbitales atomiques

on classe les orbitales atomiques en couches et sous-couches :

**couches** correspondent à une valeur de  $n$

$n$	1	2	3	4	5 ...
nom	K	L	M	N	O + alphabet

**sous-couches** correspondent à une valeur de  $l$

$l$	0	1	2	3	4	5 ...
nom	s	p	d	f	g	h + alphabet

l'orbitale  $n = 3, l = 2$  sera notée  $3d$

# État fondamental d'un atome polyélectronique

- ▶ pour  $H$ , un électron à placer mais pour un élément  ${}^A_ZX$ , on doit déterminer la fonction d'onde de  $Z$  électrons

# État fondamental d'un atome polyélectronique

- ▶ pour  $H$ , un électron à placer mais pour un élément  ${}^A_ZX$ , on doit déterminer la fonction d'onde de  $Z$  électrons
- ▶ procédure simplifiée

# État fondamental d'un atome polyélectronique

- ▶ pour  $H$ , un électron à placer mais pour un élément  ${}^A_Z X$ , on doit déterminer la fonction d'onde de  $Z$  électrons
- ▶ procédure simplifiée
  - ▶ un électron ne ressent que le noyau ( $Z$ ) et les électrons situés entre lui et le noyau

# État fondamental d'un atome polyélectronique

- ▶ pour  $H$ , un électron à placer mais pour un élément  ${}^A_ZX$ , on doit déterminer la fonction d'onde de  $Z$  électrons
- ▶ procédure simplifiée
  - ▶ un électron ne ressent que le noyau ( $Z$ ) et les électrons situés entre lui et le noyau
  - ▶ interaction équivalente à celle d'une charge ponctuelle  $Z^*e$  avec  $0 < Z^* < Z$  (effet d'écran)

# État fondamental d'un atome polyélectronique

- ▶ pour  $H$ , un électron à placer mais pour un élément  ${}^A_ZX$ , on doit déterminer la fonction d'onde de  $Z$  électrons
- ▶ procédure simplifiée
  - ▶ un électron ne ressent que le noyau ( $Z$ ) et les électrons situés entre lui et le noyau
  - ▶ interaction équivalente à celle d'une charge ponctuelle  $Z^*e$  avec  $0 < Z^* < Z$  (effet d'écran)
  - ▶ on calcule des orbitales atomiques dans ce potentiel comme pour l'hydrogène : **mêmes nombres quantiques mais énergies différentes**

# État fondamental d'un atome polyélectronique

- ▶ pour  $H$ , un électron à placer mais pour un élément  ${}^A_ZX$ , on doit déterminer la fonction d'onde de  $Z$  électrons
- ▶ procédure simplifiée
  - ▶ un électron ne ressent que le noyau ( $Z$ ) et les électrons situés entre lui et le noyau
  - ▶ interaction équivalente à celle d'une charge ponctuelle  $Z^*e$  avec  $0 < Z^* < Z$  (effet d'écran)
  - ▶ on calcule des orbitales atomiques dans ce potentiel comme pour l'hydrogène : **mêmes nombres quantiques mais énergies différentes**
  - ▶ on place les électrons dans les OA

# État fondamental d'un atome polyélectronique

- ▶ pour  $H$ , un électron à placer mais pour un élément  $\frac{A}{Z}X$ , on doit déterminer la fonction d'onde de  $Z$  électrons
- ▶ procédure simplifiée
  - ▶ un électron ne ressent que le noyau ( $Z$ ) et les électrons situés entre lui et le noyau
  - ▶ interaction équivalente à celle d'une charge ponctuelle  $Z^*e$  avec  $0 < Z^* < Z$  (effet d'écran)
  - ▶ on calcule des orbitales atomiques dans ce potentiel comme pour l'hydrogène : **mêmes nombres quantiques mais énergies différentes**
  - ▶ on place les électrons dans les OA

## Définition (État fondamental)

L'**état fondamental** d'un atome de nombre de charge  $Z$  est la configuration électronique des  $Z$  électrons  $\{n_i, l_i, m_{li}, m_{si}\}_{i=1..Z}$  pour laquelle l'énergie totale  $\mathcal{E} = \sum_i \mathcal{E}(\{n_i, l_i, m_{li}, m_{si}\})$  est minimale.

# Règles de remplissage

- ▶ dans tout atome, les énergies des OA croissent de la même manière
- ▶ elles tiennent compte des interactions électriques avec le noyau mais aussi entre électrons et des interactions magnétiques, entre les spins...
- ▶ résumé dans trois règles

# Règles de remplissage

- ▶ dans tout atome, les énergies des OA croissent de la même manière
- ▶ elles tiennent compte des interactions électriques avec le noyau mais aussi entre électrons et des interactions magnétiques, entre les spins...
- ▶ résumé dans trois règles

## Règle de Klechkowski

L'énergie d'un électron dans une orbitale atomique  $\{n, l, m_l, m_s\}$  ne dépend que de  $n$  et  $l$ . Elle est :

- ▶ croissante avec  $n + l$ ,
- ▶ croissante avec  $n$  à  $n + l$  fixé.

La dégénérescence d'un état

$$\mathcal{E}(n, l) \text{ est } \underbrace{2}_{m_s = -\frac{1}{2} \dots \frac{1}{2}} \times \underbrace{(2l + 1)}_{m_l = -l \dots l}.$$

# Règles de remplissage

- ▶ dans tout atome, les énergies des OA croissent de la même manière
- ▶ elles tiennent compte des interactions électriques avec le noyau mais aussi entre électrons et des interactions magnétiques, entre les spins...
- ▶ résumé dans trois règles

## Règle de Klechkowski

L'énergie d'un électron dans une orbitale atomique  $\{n, l, m_l, m_s\}$  ne dépend que de  $n$  et  $l$ . Elle est :

- ▶ croissante avec  $n + l$ ,
- ▶ croissante avec  $n$  à  $n + l$  fixé.

La dégénérescence d'un état

$$\mathcal{E}(n, l) \text{ est } \underbrace{2}_{m_s = -\frac{1}{2} \dots \frac{1}{2}} \times \underbrace{(2l + 1)}_{m_l = -l \dots l}.$$

$n + l$	orbitale
1	1s
2	2s
3	2p < 3s
4	3p < 4s
5	3d < 4p < 5s
6	4d < 5p < 6s

# Règles de remplissage

- ▶ dans tout atome, les énergies des OA croissent de la même manière
- ▶ elles tiennent compte des interactions électriques avec le noyau mais aussi entre électrons et des interactions magnétiques, entre les spins...
- ▶ résumé dans trois règles

## Principe d'exclusion de Pauli

Deux électrons ne peuvent occuper un même état quantique, *ie* de mêmes nombres quantiques  $\{n, l, m_l, m_s\}$ .

# Règles de remplissage

## Remplissage des orbitales atomiques

# Règles de remplissage

## Remplissage des orbitales atomiques

- ▶ une OA  $(n, l, m_l)$  est occupée au plus par 2 électrons de spins opposés (antiparallèles) : on la nomme **boite quantique**

# Règles de remplissage

## Remplissage des orbitales atomiques

- ▶ une OA  $(n, l, m_l)$  est occupée au plus par 2 électrons de spins opposés (antiparallèles) : on la nomme **boite quantique**
- ▶ une sous couche  $(n, l)$  peut accueillir au maximum

# Règles de remplissage

## Remplissage des orbitales atomiques

- ▶ une OA  $(n, l, m_l)$  est occupée au plus par 2 électrons de spins opposés (antiparallèles) : on la nomme **boite quantique**
- ▶ une sous couche  $(n, l)$  peut accueillir au maximum
  - ▶  $s : 2e^-$

# Règles de remplissage

## Remplissage des orbitales atomiques

- ▶ une OA  $(n, l, m_l)$  est occupée au plus par 2 électrons de spins opposés (antiparallèles) : on la nomme **boite quantique**
- ▶ une sous couche  $(n, l)$  peut accueillir au maximum
  - ▶  $s : 2e^-$
  - ▶  $p : 6e^-$

# Règles de remplissage

## Remplissage des orbitales atomiques

- ▶ une OA  $(n, l, m_l)$  est occupée au plus par 2 électrons de spins opposés (antiparallèles) : on la nomme **boite quantique**
- ▶ une sous couche  $(n, l)$  peut accueillir au maximum
  - ▶  $s : 2e^-$
  - ▶  $p : 6e^-$
  - ▶  $d : 10e^-$

# Règles de remplissage

## Remplissage des orbitales atomiques

- ▶ une OA  $(n, l, m_l)$  est occupée au plus par 2 électrons de spins opposés (antiparallèles) : on la nomme **boite quantique**
- ▶ une sous couche  $(n, l)$  peut accueillir au maximum
  - ▶  $s : 2e^-$
  - ▶  $p : 6e^-$
  - ▶  $d : 10e^-$
- ▶ une sous couche  $(n, l)$  est dite :

# Règles de remplissage

## Remplissage des orbitales atomiques

- ▶ une OA  $(n, l, m_l)$  est occupée au plus par 2 électrons de spins opposés (antiparallèles) : on la nomme **boîte quantique**
- ▶ une sous couche  $(n, l)$  peut accueillir au maximum
  - ▶  $s : 2e^-$
  - ▶  $p : 6e^-$
  - ▶  $d : 10e^-$
- ▶ une sous couche  $(n, l)$  est dite :
  - pleine** si chaque boîte est occupée par  $2e^-$ , qu'on dit **appariés** ; elle contient donc  $2 \times (2l + 1)$  électrons

# Règles de remplissage

## Remplissage des orbitales atomiques

- ▶ une OA  $(n, l, m_l)$  est occupée au plus par 2 électrons de spins opposés (antiparallèles) : on la nomme **boîte quantique**
- ▶ une sous couche  $(n, l)$  peut accueillir au maximum
  - ▶  $s : 2e^-$
  - ▶  $p : 6e^-$
  - ▶  $d : 10e^-$
- ▶ une sous couche  $(n, l)$  est dite :
  - pleine** si chaque boîte est occupée par  $2e^-$ , qu'on dit **appariés** ; elle contient donc  $2 \times (2l + 1)$  électrons
  - partiellement remplie** si certaines de ses boîtes contiennent des électrons non appariés, dits **célibataires**

# Règles de remplissage

## Règle de Hund

Dans une sous-couche partiellement remplie :

- ▶ les électrons sont répartis de manière à maximiser le nombre d'électrons non appariés (ie de  $m_l$  différents),
- ▶ les électrons célibataires ont tous le même  $m_s$  : leurs spins sont donc tous dans le même sens.

# Exemples

élément	Z	configuration
H	1	
He	2	
Li	3	
C	6	
O	8	
Fe	26	

# Exemples

élément	Z	configuration
H	1	$1s^1$
He	2	
Li	3	
C	6	
O	8	
Fe	26	

# Exemples

élément	Z	configuration
H	1	$1s^1$
He	2	$1s^2$
Li	3	
C	6	
O	8	
Fe	26	

# Exemples

élément	Z	configuration
H	1	$1s^1$
He	2	$1s^2$
Li	3	$1s^2 2s^1$
C	6	
O	8	
Fe	26	

# Exemples

élément	Z	configuration
H	1	$1s^1$
He	2	$1s^2$
Li	3	$1s^2 2s^1$
C	6	$1s^2 2s^2 2p^2$
O	8	
Fe	26	

# Exemples

élément	Z	configuration
H	1	$1s^1$
He	2	$1s^2$
Li	3	$1s^2 2s^1$
C	6	$1s^2 2s^2 2p^2$
O	8	$1s^2 2s^2 2p^4$
Fe	26	

# Exemples

élément	Z	configuration
H	1	$1s^1$
He	2	$1s^2$
Li	3	$1s^2 2s^1$
C	6	$1s^2 2s^2 2p^2$
O	8	$1s^2 2s^2 2p^4$
Fe	26	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 \underbrace{4s^2}_{\text{avant } 3d} 3d^6$

# Exceptions

## Exception

Pour  $3d$ ,  $4d$ ...une sous-couche  $nd$  pleine ou à  $\frac{1}{2}$  pleine est plus stable que la sous-couche  $(n + 1)s$  inférieure.

## Exemple (Exemples)

élément	Z	configuration	
<i>Cr</i>	24	pas $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^2 3d^4$	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^1 3d^5$
<i>Cu</i>	29	pas $[Ar] 4s^2 3d^9$	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^1 3d^{10}$
<i>Pd</i>	46	pas $[Kr] 5s^2 4d^8$	$[Kr] 5s^0 4d^{10}$

des exceptions aux exceptions..., pour *Ni*, c'est plutôt  $[Ar] 4s^1 3d^9$

# Caractère magnétique

## Diamagnétisme et paramagnétisme

Les atomes possédant un ou plusieurs électrons non appariés sont dit **paramagnétique**. Ils sont dits **diamagnétiques** sinon.

- ▶ chaque électron possède un moment magnétique proportionnel à son spin : analogue à un petit aimant
- ▶ s'ils sont tous appariés, les moments magnétiques en sens opposés se compensent : **diamagnétique**
- ▶ il reste un moment magnétique non nul sinon, qui se comporte comme un aimant dans un champ magnétique : **paramagnétique**

## 1. Atomes et éléments

## 2. Classification périodique des éléments

### 2.1 Configuration électronique d'un atome

### 2.2 Tableau périodique

### 2.3 Électronégativité

# Électrons de cœur et de valence

au sein d'un atome on distingue les électrons selon leur orbitale atomique

## Définition (Électrons de valence et de cœur)

Les **électrons de valence** sont ceux situés dans les dernières sous-couches  $ns$   $np$  et les sous couches  $(n - 1)d$ ;  $(n - 2)f$  si elles ne sont pas pleines. Les électrons des sous couches d'énergie inférieure sont les **électrons de cœur**.

Les propriétés chimiques dépendent uniquement des électrons de valence qui peuvent « accueillir » d'autres électrons dans les O.A. de leur couche de valence pour former des liaisons chimiques

# Électrons de cœur et de valence

au sein d'un atome on distingue les électrons selon leur orbitale atomique

## Définition (Électrons de valence et de cœur)

Les **électrons de valence** sont ceux situés dans les dernières sous-couches  $ns$   $np$  et les sous couches  $(n - 1)d$ ;  $(n - 2)f$  si elles ne sont pas pleines. Les électrons des sous couches d'énergie inférieure sont les **électrons de cœur**.

Les propriétés chimiques dépendent uniquement des électrons de valence qui peuvent « accueillir » d'autres électrons dans les O.A. de leur couche de valence pour former des liaisons chimiques

# Électrons de cœur et de valence

au sein d'un atome on distingue les électrons selon leur orbitale atomique

## Définition (Électrons de valence et de cœur)

Les **électrons de valence** sont ceux situés dans les dernières sous-couches  $ns$   $np$  et les sous couches  $(n-1)d$ ;  $(n-2)f$  si elles ne sont pas pleines. Les électrons des sous couches d'énergie inférieure sont les **électrons de cœur**.

Les propriétés chimiques dépendent uniquement des électrons de valence qui peuvent « accueillir » d'autres électrons dans les O.A. de leur couche de valence pour former des liaisons chimiques

►  $Co : Z = 27 :$

# Électrons de cœur et de valence

au sein d'un atome on distingue les électrons selon leur orbitale atomique

## Définition (Électrons de valence et de cœur)

Les **électrons de valence** sont ceux situés dans les dernières sous-couches  $ns$   $np$  et les sous couches  $(n - 1)d$ ;  $(n - 2)f$  si elles ne sont pas pleines. Les électrons des sous couches d'énergie inférieure sont les **électrons de cœur**.

Les propriétés chimiques dépendent uniquement des électrons de valence qui peuvent « accueillir » d'autres électrons dans les O.A. de leur couche de valence pour former des liaisons chimiques

►  $Co : Z = 27 :$

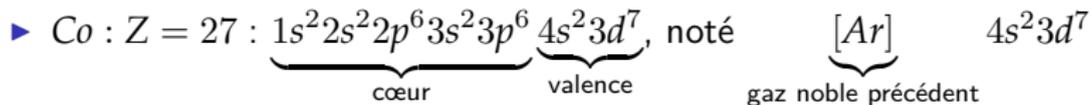
# Électrons de cœur et de valence

au sein d'un atome on distingue les électrons selon leur orbitale atomique

## Définition (Électrons de valence et de cœur)

Les **électrons de valence** sont ceux situés dans les dernières sous-couches  $ns$   $np$  et les sous couches  $(n-1)d$ ;  $(n-2)f$  si elles ne sont pas pleines. Les électrons des sous couches d'énergie inférieure sont les **électrons de cœur**.

Les propriétés chimiques dépendent uniquement des électrons de valence qui peuvent « accueillir » d'autres électrons dans les O.A. de leur couche de valence pour former des liaisons chimiques



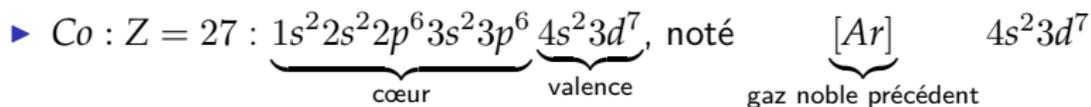
# Électrons de cœur et de valence

au sein d'un atome on distingue les électrons selon leur orbitale atomique

## Définition (Électrons de valence et de cœur)

Les **électrons de valence** sont ceux situés dans les dernières sous-couches  $ns\ np$  et les sous couches  $(n - 1)d$ ;  $(n - 2)f$  si elles ne sont pas pleines. Les électrons des sous couches d'énergie inférieure sont les **électrons de cœur**.

Les propriétés chimiques dépendent uniquement des électrons de valence qui peuvent « accueillir » d'autres électrons dans les O.A. de leur couche de valence pour former des liaisons chimiques



# Électrons de cœur et de valence

au sein d'un atome on distingue les électrons selon leur orbitale atomique

## Définition (Électrons de valence et de cœur)

Les **électrons de valence** sont ceux situés dans les dernières sous-couches  $ns\ np$  et les sous couches  $(n - 1)d$ ;  $(n - 2)f$  si elles ne sont pas pleines. Les électrons des sous couches d'énergie inférieure sont les **électrons de cœur**.

Les propriétés chimiques dépendent uniquement des électrons de valence qui peuvent « accueillir » d'autres électrons dans les O.A. de leur couche de valence pour former des liaisons chimiques

- ▶  $Co : Z = 27 : \underbrace{1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6}_{\text{cœur}} \underbrace{4s^2 3d^7}_{\text{valence}}, \text{ noté } \underbrace{[Ar]}_{\text{gaz noble précédent}} 4s^2 3d^7$
- ▶  $Br : Z = 35$  : les électrons de valence sont les  $4s^2 4p^5$  car la  $3d$  est pleine

# Structure des ions

## Définition (Ionisation)

### L'état fondamental

**d'un cation** est obtenu en arrachant les électrons de la couche de valence dans l'ordre :  $(np; ns; (n - 1)d; (n - 2)f)$  de l'atome neutre correspondant.

**d'un anion** est obtenu en rajoutant des électrons sur la couche de valence en respectant les règles habituelles.

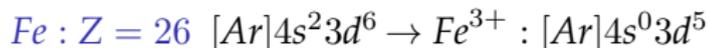
# Structure des ions

## Définition (Ionisation)

### L'état fondamental

**d'un cation** est obtenu en arrachant les électrons de la couche de valence dans l'ordre :  $(np; ns; (n - 1)d; (n - 2)f)$  de l'atome neutre correspondant.

**d'un anion** est obtenu en rajoutant des électrons sur la couche de valence en respectant les règles habituelles.



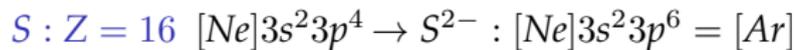
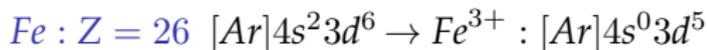
# Structure des ions

## Définition (Ionisation)

### L'état fondamental

**d'un cation** est obtenu en arrachant les électrons de la couche de valence dans l'ordre :  $(np; ns; (n - 1)d; (n - 2)f)$  de l'atome neutre correspondant.

**d'un anion** est obtenu en rajoutant des électrons sur la couche de valence en respectant les règles habituelles.



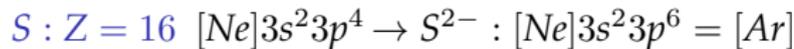
# Structure des ions

## Définition (Ionisation)

### L'état fondamental

**d'un cation** est obtenu en arrachant les électrons de la couche de valence dans l'ordre :  $(np; ns; (n - 1)d; (n - 2)f)$  de l'atome neutre correspondant.

**d'un anion** est obtenu en rajoutant des électrons sur la couche de valence en respectant les règles habituelles.



la règle de formation des cations revient à arracher d'abord les électrons les plus éloignés, même s'ils ne sont pas les plus énergétiques

# Structure du tableau

## Tableau périodique de Mendeleïev

Le tableau périodique de Mendeleïev associe **une case à chaque élément chimique** et les ordonne par nombre de charge  $Z$  croissant. Il est composé :

- ▶ de 7 lignes, nommées **périodes**,
- ▶ de 18 colonnes.

On y définit également les **blocs  $s, p, d, f$**  selon la dernière sous-couche partiellement remplie.

# Tableau

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
II	1s																		1s
II	2s												2p						
III	3s												3p						
IV	4s							3d											4p
V	5s							4d											5p
VI	6s	La						5d											6p
			Lanthanides 4f: 14 colonnes																
VII	7s	Ac						6d											7p
			Actinides 5f: 14 colonnes																

- ▶ une colonne = une sous-couche  $s^1$ ,  $s^2$ ,  $d^1 \rightarrow d^{10}$ ,  $p^1 \rightarrow p^6$

- ▶ une colonne = une sous-couche  $s^1, s^2, d^1 \rightarrow d^{10}, p^1 \rightarrow p^6$
- ▶ une période = une couche  $K, L, M$

- ▶ une colonne = une sous-couche  $s^1$ ,  $s^2$ ,  $d^1 \rightarrow d^{10}$ ,  $p^1 \rightarrow p^6$
- ▶ une période = une couche  $K, L, M$
- ▶ même configuration de valence dans chaque colonne

- ▶ une colonne = une sous-couche  $s^1$ ,  $s^2$ ,  $d^1 \rightarrow d^{10}$ ,  $p^1 \rightarrow p^6$
- ▶ une période = une couche  $K, L, M$
- ▶ même configuration de valence dans chaque colonne
- ▶ seule la configuration du cœur changent d'une période à l'autre

- ▶ une colonne = une sous-couche  $s^1$ ,  $s^2$ ,  $d^1 \rightarrow d^{10}$ ,  $p^1 \rightarrow p^6$
- ▶ une période = une couche  $K, L, M$
- ▶ même configuration de valence dans chaque colonne
- ▶ seule la configuration du cœur changent d'une période à l'autre
- ▶ les masses ne sont pas toujours croissante, voir par exemple  $Co$  et  $Ni$  ( $Z = 27$  et  $28$ ) ainsi que  $Te$  et  $I$  ( $S = 52$  et  $53$ )

- ▶ une colonne = une sous-couche  $s^1$ ,  $s^2$ ,  $d^1 \rightarrow d^{10}$ ,  $p^1 \rightarrow p^6$
- ▶ une période = une couche  $K, L, M$
- ▶ même configuration de valence dans chaque colonne
- ▶ seule la configuration du cœur changent d'une période à l'autre
- ▶ les masses ne sont pas toujours croissante, voir par exemple  $Co$  et  $Ni$  ( $Z = 27$  et  $28$ ) ainsi que  $Te$  et  $I$  ( $S = 52$  et  $53$ )
- ▶ lanthanides et actinides (groupe  $f$ ) moins utilisés en chimie  $\rightarrow$  déportés hors du tableau.

- ▶ une colonne = une sous-couche  $s^1$ ,  $s^2$ ,  $d^1 \rightarrow d^{10}$ ,  $p^1 \rightarrow p^6$
- ▶ une période = une couche  $K, L, M$
- ▶ même configuration de valence dans chaque colonne
- ▶ seule la configuration du cœur changent d'une période à l'autre
- ▶ les masses ne sont pas toujours croissante, voir par exemple  $Co$  et  $Ni$  ( $Z = 27$  et  $28$ ) ainsi que  $Te$  et  $I$  ( $S = 52$  et  $53$ )
- ▶ lanthanides et actinides (groupe  $f$ ) moins utilisés en chimie  $\rightarrow$  déportés hors du tableau.
- ▶  $He$  dans le groupe  $s$  mais également dans la dernière colonne car sa couche est remplie

# Métaux

le caractère métallique d'un corps pur dépend de sa configuration électronique : il faut que des électrons puissent se déplacer quasi librement

## Métaux

Les caractéristiques physiques d'un métal sont :

- ▶ ses bonnes conductions thermique et électrique,
- ▶ l'éclat métallique.

Les éléments des blocs :

- ▶ *s* sont des métaux (*H* à l'état solide) aux propriétés variables,
- ▶ *d* sont des métaux dits **de transition** durs, de température de fusion  $T_f$  élevée,
- ▶ *p* sont de nature variée. Les métaux se situent en dessous de la diagonale des **semi-métaux** *B, Si, Ge, As, Se, Sb, Te, Po*.
- ▶ *f* sont des métaux.

# Familles chimiques

la réactivité chimique dépend du remplissage de la couche de valence

# Familles chimiques

## Définition (Gaz nobles $c = 18$ )

- ▶ Ce sont des gaz monoatomiques neutres dans les conditions standard de température et pression ( $\theta = 25\text{ °C}$  et  $P = 1\text{ bar}$ ).
- ▶ Ils sont inertes chimiquement donc très stables.

# Familles chimiques

## Définition (Gaz nobles $c = 18$ )

- ▶ Ce sont des gaz monoatomiques neutres dans les conditions standard de température et pression ( $\theta = 25\text{ °C}$  et  $P = 1\text{ bar}$ ).
- ▶ Ils sont inertes chimiquement donc très stables.

les autres familles tendent à acquérir, par formation de liaisons chimiques ou ionisation, la structure électronique du gaz noble le plus proche

# Familles chimiques

## Définition (Alcalins $c = 1$ )

- ▶ ce sont des métaux réducteurs : réaction violente avec  $H_2O$  en particulier
- ▶ ils forment des cations monochargés

# Familles chimiques

## Définition (Alcalins $c = 1$ )

- ▶ ce sont des métaux réducteurs : réaction violente avec  $H_2O$  en particulier
- ▶ ils forment des cations monochargés



- ▶  $Na^+$  a le même nombre d'électrons que  $Ne$

- ▶ les alcalino-terreux  $c = 2$  forment des ions chargés  $2+$ , ce sont aussi des réducteurs

# Familles chimiques

## Définition (Halogènes $c = 17$ )

- ▶ ce sont des oxydants
- ▶ leur corps pur simple est constitué de molécules diatomiques, dont l'état physique dans les conditions standard dépend de la période
- ▶ ils forment des anions monochargés ( $Cl^-$ ,  $F^-$ ) pour s'entourer du même  $n_e$  que le gaz noble le plus proche

# Familles chimiques

## Définition (Halogènes $c = 17$ )

- ▶ ce sont des oxydants
  - ▶ leur corps pur simple est constitué de molécules diatomiques, dont l'état physique dans les conditions standard dépend de la période
  - ▶ ils forment des anions monochargés ( $Cl^-$ ,  $F^-$ ) pour s'entourer du même  $n_e$  que le gaz noble le plus proche
- 
- ▶ les états physiques sont  $F_2(g)$ ;  $Cl_2(g)$ ;  $I_2(s)$ ;  $Br_2(l)$
  - ▶ les ions sont  $F^-$  fluorure;  $Cl^-$  chlorure;  $Br^-$  bromure;  $I^-$  iodure

## 1. Atomes et éléments

## 2. Classification périodique des éléments

### 2.1 Configuration électronique d'un atome

### 2.2 Tableau périodique

### 2.3 Électronégativité

# Réactivité chimique

# Réactivité chimique

- ▶ la réactivité chimique traduit la tendance d'un élément à former des liaisons avec d'autres éléments

# Réactivité chimique

- ▶ la réactivité chimique traduit la tendance d'un élément à former des liaisons avec d'autres éléments
- ▶ une **liaison covalente** est la mise en commun de deux électrons pour former un **doublet liant**

# Réactivité chimique

- ▶ la réactivité chimique traduit la tendance d'un élément à former des liaisons avec d'autres éléments
- ▶ une **liaison covalente** est la mise en commun de deux électrons pour former un **doublet liant**
- ▶ on regarde s'il veut bien laisser son électron (pouvoir réducteur) ou en prendre (pouvoir oxydant)

# Évolution du pouvoir réducteur

on étudie  $X + p\text{H}_2\text{O}_{(l)} \rightarrow X^{p+} + p\text{OH}^- + \frac{p}{2}\text{H}_2_{(g)}$

# Évolution du pouvoir réducteur

alcalins ( $p=1$ )  $Cs > Rb > K > Na > Li$

# Évolution du pouvoir réducteur

alcalins ( $p=1$ )  $Cs > Rb > K > Na > Li$

non alcalins réducteurs ( $p > 1$ )  $Na > Ca > Mg > Al$

# Évolution du pouvoir réducteur

alcalins ( $p=1$ )  $Cs > Rb > K > Na > Li$

non alcalins réducteurs ( $p > 1$ )  $Na > Ca > Mg > Al$

autres  $Si \rightarrow Ar$  ne réagissent pas

# Évolution du pouvoir réducteur

alcalins ( $p=1$ )  $Cs > Rb > K > Na > Li$

non alcalins réducteurs ( $p > 1$ )  $Na > Ca > Mg > Al$

autres  $Si \rightarrow Ar$  ne réagissent pas

réaction avec  $O_{2(g)}$  tous réagissent pour donner des oxydes  $Na_2O$  ;  
 $MgO$  ;  $Al_2O_3$  ;  $SiO_2$  ;  $P_4O_{10}$  ;  $SO_3$  sauf  $Cl_{2(g)}$  et  $Ar_{(g)}$

# Évolution du pouvoir réducteur

alcalins ( $p=1$ )  $Cs > Rb > K > Na > Li$

non alcalins réducteurs ( $p > 1$ )  $Na > Ca > Mg > Al$

autres  $Si \rightarrow Ar$  ne réagissent pas

réaction avec  $O_2(g)$  tous réagissent pour donner des oxydes  $Na_2O$  ;  
 $MgO$  ;  $Al_2O_3$  ;  $SiO_2$  ;  $P_4O_{10}$  ;  $SO_3$  sauf  $Cl_2(g)$  et  $Ar(g)$

- ▶ les métaux sont des bons réducteurs, surtout en bas à gauche du tableau
- ▶ les non-métaux sont de moins bons réducteurs

# Évolution du pouvoir oxydant

# Évolution du pouvoir oxydant

- ▶ on a vu en TP que  $I_2$  est un bon oxydant, c'est le cas de tous les dihalogènes

# Évolution du pouvoir oxydant

- ▶ on a vu en TP que  $I_2$  est un bon oxydant, c'est le cas de tous les dihalogènes
- ▶ on pourrait observer (toxique) :

# Évolution du pouvoir oxydant

- ▶ on a vu en TP que  $I_2$  est un bon oxydant, c'est le cas de tous les dihalogènes
- ▶ on pourrait observer (toxique) :
  - ▶  $F_2(aq) + 2X^- \rightarrow 2F^- + X_2$  pour  $X = Cl, Br, I$  :  $F_2$  oxyde tous les ions halogénures

# Évolution du pouvoir oxydant

- ▶ on a vu en TP que  $I_2$  est un bon oxydant, c'est le cas de tous les dihalogènes
- ▶ on pourrait observer (toxique) :
  - ▶  $F_2(aq) + 2X^- \rightarrow 2F^- + X_2$  pour  $X = Cl, Br, I$  :  $F_2$  oxyde tous les ions halogénures
  - ▶  $I_2(aq)$  n'oxyde aucun des halogénures

# Évolution du pouvoir oxydant

- ▶ on a vu en TP que  $I_2$  est un bon oxydant, c'est le cas de tous les dihalogènes
- ▶ on pourrait observer (toxique) :
  - ▶  $F_2(aq) + 2X^- \rightarrow 2F^- + X_2$  pour  $X = Cl, Br, I$  :  $F_2$  oxyde tous les ions halogénures
  - ▶  $I_2(aq)$  n'oxyde aucun des halogénures
  - ▶  $Br_2(aq)$  n'oxyde que  $I^-$

# Évolution du pouvoir oxydant

les halogènes sont des oxydants, surtout en haut

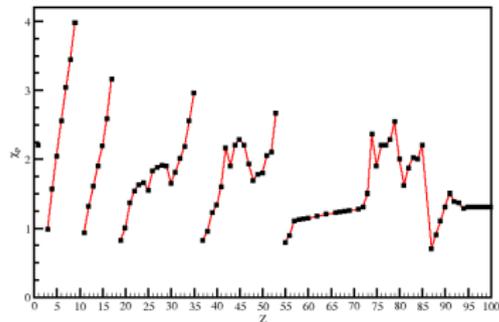
# Électronégativité

lors de la formation d'une liaison entre deux atomes différents  $A$  et  $B$ ,  
l'un attirera plus les électrons que l'autre

# Électronégativité

## Définition (Électronégativité)

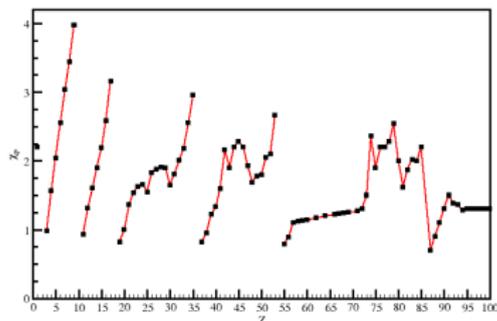
L'**électronégativité**  $\chi_A$  d'un atome  $A$  est un nombre sans dimension qui traduit l'aptitude de  $A$  à attirer à lui le doublet électronique qui le lie à un autre atome  $B$ .



# Électronégativité

## Définition (Électronégativité)

L'**électronégativité**  $\chi_A$  d'un atome  $A$  est un nombre sans dimension qui traduit l'aptitude de  $A$  à attirer à lui le doublet électronique qui le lie à un autre atome  $B$ .



- ▶ nombre positif sans dimension, de l'ordre de l'unité
- ▶  $\chi(^9F) = 3,98$
- ▶  $\chi(^{87}Fr) = 0,7$
- ▶ elle croît de bas en haut, de gauche à droite (sauf les gaz nobles)

## Lien avec les propriétés

caractère métallique les électrons de valence des non-métaux,  
électronégatifs, ne sont pas libres de circuler

## Lien avec les propriétés

**caractère métallique** les électrons de valence des non-métaux,  
électronégatifs, ne sont pas libres de circuler

**caractère oxydant réducteur** les meilleurs oxydants sont les plus  
électronégatifs puisqu'ils attirent les électrons d'une liaison

## Lien avec les propriétés

**caractère métallique** les électrons de valence des non-métaux,  
électronégatifs, ne sont pas libres de circuler

**caractère oxydant réducteur** les meilleurs oxydants sont les plus  
électronégatifs puisqu'ils attirent les électrons d'une liaison

## Lien avec les propriétés

**caractère métallique** les électrons de valence des non-métaux, électronégatifs, ne sont pas libres de circuler

**caractère oxydant réducteur** les meilleurs oxydants sont les plus électronégatifs puisqu'ils attirent les électrons d'une liaison

**nature de la liaison chimique** **liaison métallique** pour les bons réducteurs qui laissent des électrons de valence circuler

## Lien avec les propriétés

- caractère métallique** les électrons de valence des non-métaux, électronégatifs, ne sont pas libres de circuler
- caractère oxydant réducteur** les meilleurs oxydants sont les plus électronégatifs puisqu'ils attirent les électrons d'une liaison
- nature de la liaison chimique**
  - liaison métallique** pour les bons réducteurs qui laissent des électrons de valence circuler
  - liaison covalente** mise en commun d'électrons dans une paire localisée entre deux atomes d'électronégativités comparables et assez élevées

## Lien avec les propriétés

- caractère métallique** les électrons de valence des non-métaux, électronégatifs, ne sont pas libres de circuler
- caractère oxydant réducteur** les meilleurs oxydants sont les plus électronégatifs puisqu'ils attirent les électrons d'une liaison
- nature de la liaison chimique**
  - liaison métallique** pour les bons réducteurs qui laissent des électrons de valence circuler
  - liaison covalente** mise en commun d'électrons dans une paire localisée entre deux atomes d'électronégativités comparables et assez élevées
  - liaison ionique** entre deux atomes de  $\chi$  très différentes, le plus électronégatif arrache des électrons à l'autre : interaction électrostatique entre un cation ( $Na^+$ ) et un anion ( $Cl^-$ )

# Indispensable

- ▶ Les nombres quantiques, la nomenclature des orbitales,
- ▶ les 3 règles de remplissage,
- ▶ le lien avec la classification périodique
- ▶ construction du tableau
- ▶ familles chimiques
- ▶ allure générale des variations de  $\chi$ , lien avec les propriétés physico-chimiques