

# L'ATOME : STRUCTURE DU NOYAU, REPRESENTATION ET CONFIGURATION ELECTRONIQUE, CLASSIFICATION PERIODIQUE DES ELEMENTS

## Introduction : Les constituants de la matière

- **Les cristaux et molécules (dimensions variables ; énergie dissociation = 1 eV)** : formés d'atomes.
- **Les atomes (=  $10^{-10}\text{m}$  ; énergie dissociation = 10 à  $10^4$  eV)** : formés d'un noyau et d'un cortège électronique.
- **Les noyaux (=  $10^{-15}\text{m}$  ; énergie dissociation =  $10^6$  eV)** : formés de nucléons : protons et neutrons.
- **Les hadrons (=  $10^{-15}\text{m}$  ; énergie dissociation =  $10^9$  eV)**, classés en :
  - Baryons (formés de 3 quarks) : proton, neutron...
  - Mésons (formés de 2 quarks).
- **Les particules élémentaires, ou fermions (=  $10^{-18}\text{m}$ )** :
  - Leptons : électron, neutrino électronique...
  - Quarks (6 types différents), composant des hadrons : il en existe 6 types.

$$1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

**Les Différentes Interactions** : qui participent à la cohésion de la matière

| Force               | Gravitationnelle  | Électromagnétique   | Nucléaire Faible     | Nucléaire Forte      |
|---------------------|-------------------|---------------------|----------------------|----------------------|
| Médiée par          | Graviton ?        | Photon              | Boson                | Gluon                |
| Agit sur            | Toutes particules | Particules chargées | $e^-$ , p, n         | Quarks               |
| Portée              | Infinie           | Infinie             | $< 10^{-15}\text{m}$ | $< 10^{-15}\text{m}$ |
| Importance Relative | $10^{-40}$        | $10^{-2}$           | $10^{-5}$            | 1                    |

L'interaction forte permet la cohésion des quarks entre eux pour former des hadrons. Sans elle, le noyau des atomes céderait sous l'effet de répulsion électrostatique des protons entre eux.

L'interaction nucléaire forte est  $10^{40}$  fois plus forte que l'interaction gravitationnelle.

## I. LA STRUCTURE DE L'ATOME

L'atome est formé d'une partie centrale, le **noyau**, entouré d'une partie périphérique constituée **d'électrons**. L'ensemble, supposé sphérique, a un **rayon de  $10^{-10}\text{m}$** .

Le noyau est constitué de **nucléons** :

- Les **protons**, porteurs d'une charge positive.
- Les **neutrons**, sans charge (électriquement neutres)

Le noyau est entouré d'un nuage d'électrons dont la charge est égale en valeur absolue, mais de signe opposé à celle des protons.

Le nombre de **protons** caractérise un **élément chimique**, pour un même nombre de protons, on a un même élément chimique. Si le nombre de protons diffère, ceux sont deux éléments chimiques différents.

Le nombre de **neutrons** explique l'existence des **isotopes**. Les isotopes ont le même nombre de protons. Le terme « isotope » n'est pas synonyme de radioactivité.

Les **niveaux quantifiés d'énergie** des électrons sont **caractéristiques** de l'atome considéré.

### A. Le noyau de l'atome

Les nucléons sont reliés entre eux par des **liaisons très fortes**, et occupent un volume extrêmement **petit**.

Le rayon du **noyau** est **100 000 fois** plus petit que celui de l'atome.

Toute la **masse** de l'atome est pratiquement concentrée dans le **noyau**. (Donc l'énergie est concentrée dans le noyau)

La masse du proton, pratiquement égale à celle du neutron, est égale à une unité de masse atomique (UMA = correspondant au 12<sup>ème</sup> de la masse d'un atome de carbone constitué de 12 nucléons).

Le noyau d'un atome est représenté par :  $\boxed{\begin{matrix} A \\ Z \\ X \end{matrix}}$

Où : **X** est le **symbole chimique de l'élément**, **A** est le **nombre total de nucléons** (protons + neutrons),  
**Z** est le **nombre de protons**.

**A** est appelé **nombre de masse**.

**Z** est le **nombre atomique ou numéro atomique**, il correspond au nombre de charges électriques positives contenues dans le noyau.

Exemple : Noyau de l'Aluminium naturel (Al)  $\overline{\begin{matrix} 27 \\ 13 \\ Al \end{matrix}}$

Le noyau contient 27 nucléons : 14 protons et 13 neutrons, soit 13 charges positives. La charge totale est +Ze, avec Z=13, et e étant la charge électrique élémentaire.

## Éléments – Isotopes

Un élément chimique est défini par le nombre Z de protons que contient son noyau ; chacun de ces éléments, ayant des propriétés chimiques bien définies, remplit l'une des cases de la classification périodique de Mendeleïev.

Un même élément chimique peut être constitué de noyaux qui diffèrent entre eux par le nombre de neutrons : **on dit qu'il s'agit d'isotopes**. Les isotopes ne sont pas forcément radioactifs.

**Ainsi l'hydrogène naturel est constitué de 3 isotopes : l'hydrogène (ou protium) qui est stable, le deutérium (stable aussi) et le tritium radioactif.**

${}^1_1\text{H}(1e^-/1p)$  ;  ${}^2_1\text{H}(1e^-/2p)$  = stables

${}^3_1\text{H}(1e^-/3p)$  = radioactif

## **B. Les électrons**

Le **noyau** est entouré d'un **nuage électronique** constitué de **particules élémentaires**, les électrons, dont la charge e est égale en **valeur absolue** et de signe **opposé** à celle du proton.

Le nombre **d'électrons** présents dans l'atome, égal au nombre Z de **protons** du noyau, assure la **neutralité électrique** de l'atome. **Quand un électron sera arraché du cortège électronique, l'atome aura une charge positive.**

La **masse de l'électron** est environ **1 800 fois plus faible** que celle du **proton**. La masse de l'atome est principalement contenue dans le noyau, la masse de e<sup>-</sup> étant négligeable.

Les **électrons** sont maintenus autour du noyau par des **forces de liaisons électrostatiques**.

Les électrons possèdent chacun un **niveau d'énergie précis (un niveau quantifié d'énergie)**, caractéristique de l'atome considéré.

## C. Énergie présente dans les atomes

En physique nucléaire, l'unité courante d'énergie est l'**électron volt (eV)** : c'est l'énergie cinétique d'un électron accéléré par un potentiel de 1 volt.

$E = m \cdot c^2$  : correspondance entre **masse** (m) et **énergie** (E) en Joule, où c est la vitesse de la lumière au carré.

La disparition d'une masse m correspond à la libération d'une **énergie E**.

### 1. Énergie présente dans les noyaux

L'énergie présente dans le noyau des atomes est **considérable**. Si toute la **masse d'un proton** était convertie en énergie, **931 MeV seraient libérés**. L'énergie liant entre eux les **nucléons** au sein des noyaux varie suivant les atomes de **1 MeV à 8,5 MeV**.

### 2. Énergie des électrons

Les énergies présentes dans le cortège électronique des atomes sont nettement plus **faibles**. L'équivalent en énergie de la masse d'un électron au repos est de **0,51 MeV**.

Les électrons négatifs sont liés au noyau positif de l'atome par des **forces de liaison électrostatique de faible énergie**. (Il existe aussi les électrons positifs, les positons e+).

Dans le cortège électronique, chaque électron se trouve à un **niveau d'énergie précis**, et seuls certains niveaux d'énergie sont possibles.

Ces énergies varient :

- De **quelques électron-volts** pour les liaisons les plus **faibles** (électrons les plus périphériques).
- A une **centaine de kilo-électron-volt** pour les plus **fortes** (électrons les plus internes des atomes les plus lourds).

La radioactivité s'explique du fait d'un **excès de charges positives** du noyau

Lors d'une **transition électronique** d'un niveau énergétique donnée à un autre moins élevé, l'énergie libérée varie de quelques eV à une centaine de keV selon les atomes.

Cette énergie ainsi libérée peut se retrouver sous forme d'énergie radiative : un rayonnement est alors émis sous forme d'un photon dont l'**énergie h.v** est égale à l'énergie perdue, libérée par l'atome.

$$E = h \cdot \nu$$

h : constante de Planck =  $6,626 \cdot 10^{-34}$  J.s<sup>-1</sup> ;  $\nu$  : la fréquence en Hertz

## II. STRUCTURE ELECTRONIQUE ET CLASSIFICATION PERIODIQUE

### A. Structure électronique

La Physique classique permet de décrire uniquement un atome contenant un seul électron.

Le modèle de l'atome d'H proposé par Niels Bohr en 1913 n'a pas pu être généralisé aux atomes poly-électroniques, montrant les limites de la physique classique.

Aux notions de trajectoire de position d'une particule, la physique quantique substitue une **description non déterministe** :

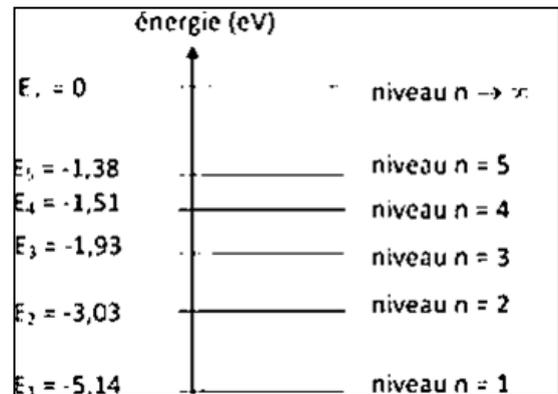
- Seule la **probabilité de présence** d'un électron dans une région de l'espace peut être calculée.
- Cette probabilité de présence est liée à la notion de **niveau d'énergie**.

### B. Niveaux d'énergie de l'atome d'H

L'énergie de l'atome d'H est quantifiée, et dépend d'un **nombre quantique n**, entier **strictement positif** ( $n = 1, 2, 3 \dots$ )

$$E_n = - \frac{E_{1,H}}{n^2} \text{ avec } E_{1,H} = 13,6 \text{ eV.}$$

L'état de plus basse énergie, associée à la valeur  $n = 1$ , est l'**état fondamental** de l'atome d'H. Les états d'énergie supérieurs, tels que  $n > 1$ , sont des états **excités**.



### C. Spectre d'émission de l'atome d'H

Quand l'**électron de l'atome d'H** est placé dans un état **excité**, le retour à l'état fondamental s'accompagne de l'émission d'un rayonnement (**photon**).

L'analyse de ce rayonnement constitue le spectre d'émission de l'atome d'H ; il est composé d'une **série de raies**. Il est **caractéristique de l'élément considéré**.

Une transition d'un niveau d'énergie  $E_p$  vers un niveau d'énergie  $E_n$  (avec  $p > n$ ) s'accompagne de l'émission d'un photon d'énergie :

$$h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda} = E_p - E_n$$

$E$  en joules,  $\lambda$  longueur d'onde du rayonnement émis en m,  $\nu$  en Hertz,  $h$  : constante de Planck.

$c$  : vitesse de la lumière dans le vide :  $3,00 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

## D. Relation de Rydberg

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{p^2} \right)$$

Avec  $R_H = \frac{E_{(1,H)}}{(h \cdot \nu)} = 1,0957 \cdot 10^{-7} \text{ m}^{-1}$  (constante de Rydberg)

La formule de Rydberg permet de réaliser le **spectre complet** de la lumière émise lors du **rayonnement** émis lors du **passage d'un électron d'un état n à un état n-1** pour un atome.

## E. Niveaux d'énergie d'un atome poly-électronique

L'état d'un électron d'un atome est décrit par **4 nombres quantiques**.

- 1. Nombre quantique principal n** (entier strictement positif  $n = 1, 2, 3, \dots, +\infty$ )  
La valeur de n caractérise une **couche électronique**.
- 2. Nombre quantique secondaire l** (entier positif  $l = 0, 1, 2, \dots ; n-1$ )  
A chaque valeur de l est associé une lettre : s pour  $l = 0$ , p pour  $l = 1$ , d pour  $l = 2$ , f pour  $l = 3, \dots$   
Un couple **(n, l)** caractérise une **sous-couche électronique**.
- 3. Nombre quantique magnétique (orbital) m<sub>l</sub>** : entier relatif tel que  $-l \leq m_l \leq +l$  :  
Un triplet (n, l, m) caractérise une **orbitale atomique ou orbite (même chose)**.
- 4. Nombre quantique magnétique de spin m<sub>s</sub>**, avec  $m_s = +\frac{1}{2}$  ou  $m_s = -\frac{1}{2}$   
Un quadruplet (n, l, m<sub>l</sub>, m<sub>s</sub>) caractérise **l'état quantique d'un électron**.

L'énergie d'un atome est **quantifiée** : l'énergie d'un niveau électronique dépend des deux nombres quantiques n et l.

L'énergie des niveaux électroniques **croît** avec la **somme (n + l)**. Pour deux valeurs égales de **(n + l)**, l'énergie croît avec n.

Pour une valeur l donnée, **m<sub>l</sub>** peut prendre **(2l + 1) valeurs** : une sous-couche est donc associée à **(2l + 1) orbitales atomiques de même énergie** : ces orbitales atomiques sont dites **dégénérées**.

## F. Configuration électronique fondamentale d'un atome (ou d'un ion)

|       | l = 0 | l = 1 | l = 2 | l = 3 | l = 4 |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| n = 1 | 1s    |       |       |       |       |
| n = 2 | 2s    | 2p    |       |       |       |
| n = 3 | 3s    | 3p    | 3d    |       |       |
| n = 4 | 4s    | 4p    | 4d    | 4f    |       |
| n = 5 | 5s    | 5p    | 5d    | 5f    | 5g    |
| n = 6 | 6s    | ..    |       |       |       |

**Principe de Pauli** : Dans un atome ou ion, 2 électrons ne peuvent posséder **simultanément** les mêmes nombres quantiques ( $n, l, m_l, m_s$ ).

#### Conséquences

Une orbitale atomique contient au maximum **2 électrons**, de nombres quantiques de spins **opposés**. Deux électrons occupant une **même orbitale atomique** sont dits **appariés**.

### G. Règles de remplissage

**Règle de Klechkowski** : la configuration électronique d'un atome dans l'état fondamental est obtenue en remplissant les niveaux d'énergie par **ordre croissant d'énergie**.

Donc, selon les valeurs croissantes de  $(n + l)$  et en cas d'égalité, selon les valeurs croissantes de  $n$ . (cf page 6)

**Règle de Hund** : lorsque des électrons sont dans des orbitales atomiques **dégénérées** appartenant à une **même sous-couche**, la configuration la plus **stable** est celle qui correspond au **nombre quantique magnétique total de spin** ( $M_s$ , somme des  $m_s$  de tous les électrons de l'atome) **maximal**.

Obtenue en plaçant dans la sous-couche le maximum d'électrons de même nombre quantique magnétique de spins  $m_s = + \frac{1}{2}$

## III. Conséquences sur les propriétés des atomes

### Propriétés chimiques

Les électrons de **valence** sont les électrons de la couche de nombre **quantique principal n le plus élevé**, et les électrons situés dans des **sous-couches en cours de remplissage**

Ce sont les électrons les plus **faiblement** liés au noyau.

Ce sont eux qui sont **arrachés** lors de **l'ionisation** de l'atome ; ils participent par ailleurs à l'établissement des **liaisons (covalentes)** et réactions chimiques d'un atome.

Les autres électrons constituent les électrons de cœur ; ils sont fortement liés au noyau.

### Propriétés magnétiques

Un atome ou un ion **diamagnétique** ( $M_s = 0$ ) si tous ses électrons sont **appariés**.

Il est **paramagnétique** ( $M_s \neq 0$ ) s'il possède au moins **un électron non apparié**.

## IV. Structure de la classification périodique

Les éléments sont classés dans **l'ordre croissant** de leur numéro atomique  $Z$ .

La structure de la classification périodique traduit le **remplissage progressif** des sous-couches électroniques d'un atome : chaque nouvelle **période** (ligne) correspond au remplissage d'une **nouvelle couche électronique** (caractérisée par la valeur de n).

La classification périodique présente une structure en **blocs** :

- Le **bloc s** : colonne 1 et 2, correspondant au remplissage des **sous-couches s**.
- Le **bloc d** : colonne 3 à 12, correspondant au remplissage des **sous-couches d**.
- Le **bloc p** : colonne 13 à 18, correspondant au remplissage des **sous-couches p**.

**À retenir : période/ligne = couche électronique**  
**Bloc/colonne = sous-couche**

Les éléments d'une même colonne possèdent une même structure électronique de **valence**, et constituent une **famille** (ou un **groupe**) d'éléments ; ils ont des **propriétés chimiques voisines** :

- Les éléments de la **première colonne** (excepté H) constituent la famille des **alcalins**.
- Les éléments de la **deuxième colonne** constituent la famille des **alcalino-terreux**.
- Les éléments de la **17<sup>ème</sup> colonne** constituent la famille des **halogènes**.
- Les éléments de la **18<sup>ème</sup> colonne** constituent la famille des **gaz nobles**.

Les éléments de **transition** sont des éléments pour lesquels un atome ou un ion possède une **sous-couche d** en cours de remplissage.

**Periodic Table of the Elements**

|                       |       |                   |       |       |       |       |       |       |       |       |       |                    |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |  |  |  |  |             |  |
|-----------------------|-------|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--|--|--|--|-------------|--|
| Alkaline earth metals |       |                   |       |       |       |       |       |       |       |       |       |                    |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |  |  |  |  | Noble gases |  |
| 1A                    |       |                   |       |       |       |       |       |       |       |       |       |                    |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |  |  |  |  | 18          |  |
| 1                     | 2     |                   |       |       |       |       |       |       |       |       |       |                    |       |       |       |       |       | 13    | 14    | 15    | 16    | 17    | 18    |  |  |  |  |             |  |
| H                     | He    |                   |       |       |       |       |       |       |       |       |       |                    |       |       |       |       |       | B     | C     | N     | O     | F     | Ne    |  |  |  |  |             |  |
| 1.008                 | 4.003 |                   |       |       |       |       |       |       |       |       |       |                    |       |       |       |       |       | 10.81 | 12.01 | 14.01 | 16.00 | 19.00 | 20.18 |  |  |  |  |             |  |
| 3                     | 4     |                   |       |       |       |       |       |       |       |       |       | 5                  | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    |       |       |       |       |       |       |  |  |  |  |             |  |
| Li                    | Be    |                   |       |       |       |       |       |       |       |       |       | B                  | C     | N     | O     | F     | Ne    |       |       |       |       |       |       |  |  |  |  |             |  |
| 6.9                   | 9.012 |                   |       |       |       |       |       |       |       |       |       | 10.81              | 12.01 | 14.01 | 16.00 | 19.00 | 20.18 |       |       |       |       |       |       |  |  |  |  |             |  |
| 11                    | 12    | 3                 | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    | 11    | 12    | 13                 | 14    | 15    | 16    | 17    | 18    |       |       |       |       |       |       |  |  |  |  |             |  |
| Na                    | Mg    | Transition metals |       |       |       |       |       |       |       |       |       | Al                 | Si    | P     | S     | Cl    | Ar    |       |       |       |       |       |       |  |  |  |  |             |  |
| 22.99                 | 24.31 |                   |       |       |       |       |       |       |       |       |       | 26.98              | 28.09 | 30.97 | 32.07 | 35.45 | 39.95 |       |       |       |       |       |       |  |  |  |  |             |  |
| 19                    | 20    | 21                | 22    | 23    | 24    | 25    | 26    | 27    | 28    | 29    | 30    | 31                 | 32    | 33    | 34    | 35    | 36    |       |       |       |       |       |       |  |  |  |  |             |  |
| K                     | Cu    | Sc                | Ti    | V     | Cr    | Mn    | Fe    | Co    | Ni    | Cu    | Zn    | Ga                 | Ge    | As    | Se    | Br    | Kr    |       |       |       |       |       |       |  |  |  |  |             |  |
| 39.10                 | 40.08 | 44.96             | 47.88 | 50.94 | 52.00 | 54.94 | 55.85 | 58.93 | 58.69 | 63.55 | 65.38 | 69.72              | 72.59 | 74.92 | 78.96 | 79.90 | 83.80 |       |       |       |       |       |       |  |  |  |  |             |  |
| 37                    | 38    | 39                | 40    | 41    | 42    | 43    | 44    | 45    | 46    | 47    | 48    | 49                 | 50    | 51    | 52    | 53    | 54    |       |       |       |       |       |       |  |  |  |  |             |  |
| Rb                    | Sr    | Y                 | Zr    | Nb    | Mo    | Tc    | Ru    | Rh    | Pd    | Ag    | Cd    | In                 | Sn    | Sb    | Te    | I     | Xe    |       |       |       |       |       |       |  |  |  |  |             |  |
| 85.47                 | 87.62 | 88.91             | 91.22 | 92.91 | 98.91 | (98)  | 101.1 | 102.9 | 106.4 | 107.9 | 112.4 | 114.8              | 118.7 | 121.8 | 127.6 | 126.9 | 131.3 |       |       |       |       |       |       |  |  |  |  |             |  |
| 55                    | 56    | 57                | 72    | 73    | 74    | 75    | 76    | 77    | 78    | 79    | 80    | 81                 | 82    | 83    | 84    | 85    | 86    |       |       |       |       |       |       |  |  |  |  |             |  |
| Cs                    | Ba    | La*               | Hf    | Ta    | W     | Re    | Os    | Ir    | Pt    | Au    | Hg    | Tl                 | Pb    | Bi    | Po    | At    | Rn    |       |       |       |       |       |       |  |  |  |  |             |  |
| 132.9                 | 137.3 | 138.9             | 178.5 | 180.9 | 183.9 | 186.2 | 190.2 | 192.2 | 195.1 | 197.0 | 200.6 | 204.4              | 207.2 | 209.0 | (209) | (210) | (222) |       |       |       |       |       |       |  |  |  |  |             |  |
| 87                    | 88    | 89                | 104   | 105   | 106   | 107   | 108   | 109   | 110   | 111   | 112   | metals ← nonmetals |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |  |  |  |  |             |  |
| Fr                    | Ra    | Ac†               | Rf    | Db    | Sg    | Bh    | Hs    | Mt    | Uun   | Uuu   | Uub   |                    |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |  |  |  |  |             |  |
| (223)                 | 226   | (227)             |       |       |       |       |       |       |       |       |       |                    |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |  |  |  |  |             |  |
| *Lanthanides          |       | 58                | 59    | 60    | 61    | 62    | 63    | 64    | 65    | 66    | 67    | 68                 | 69    | 70    | 71    |       |       |       |       |       |       |       |       |  |  |  |  |             |  |
|                       |       | Ce                | Pr    | Nd    | Pm    | Sm    | Eu    | Gd    | Tb    | Dy    | Ho    | Er                 | Tm    | Yb    | Lu    |       |       |       |       |       |       |       |       |  |  |  |  |             |  |
|                       |       | 140.1             | 140.9 | 144.2 | (145) | 150.4 | 152.0 | 157.3 | 158.9 | 162.5 | 164.9 | 167.3              | 168.9 | 173.0 | 175.0 |       |       |       |       |       |       |       |       |  |  |  |  |             |  |
| †Actinides            |       | 90                | 91    | 92    | 93    | 94    | 95    | 96    | 97    | 98    | 99    | 100                | 101   | 102   | 103   |       |       |       |       |       |       |       |       |  |  |  |  |             |  |
|                       |       | Th                | Pa    | U     | Np    | Pu    | Am    | Cm    | Bk    | Cf    | Es    | Fm                 | Md    | No    | Lr    |       |       |       |       |       |       |       |       |  |  |  |  |             |  |
|                       |       | 232.0             | (231) | 238.0 | (237) | (244) | (243) | (247) | (247) | (251) | (252) | (257)              | (258) | (259) | (260) |       |       |       |       |       |       |       |       |  |  |  |  |             |  |