

# **Partie I: Molécules et liaisons chimiques entre 2 atomes**

**V. Michaud (MX)**

**Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne**

**EPFL**

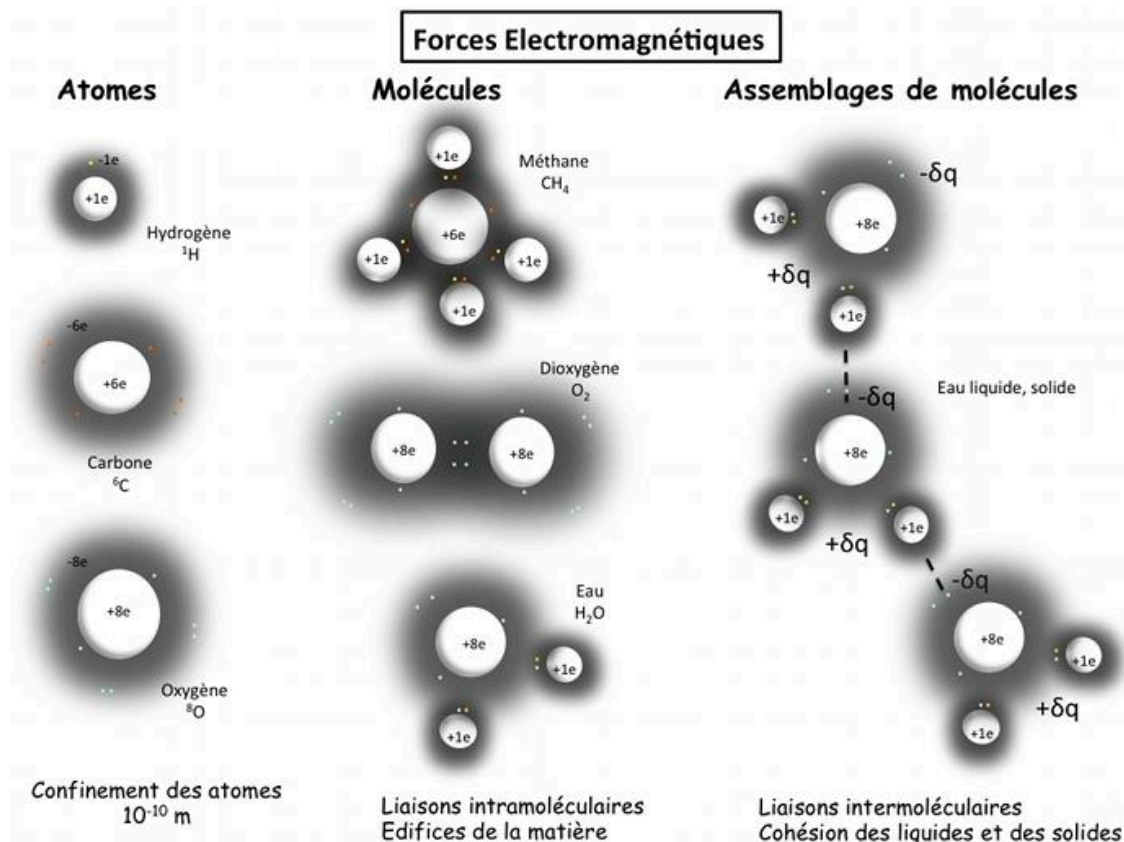
# Table des matières

---

- Interaction entre les atomes/Molécules
- Réactions chimiques (rappels)
- Energie potentielle entre deux atomes

# Interaction entre les atomes

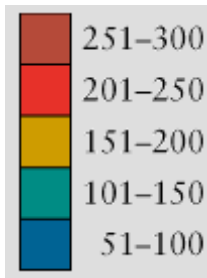
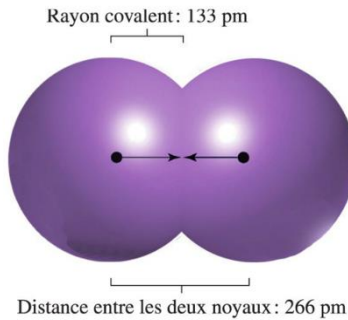
La façon dont les interactions se passent et la distance d'équilibre entre les atomes dépend de leur structure atomique, de leur position dans la table périodique et de leur propension à donner/recevoir des électrons...des forces électromagnétiques se créent entre les atomes!



# Rayon atomique

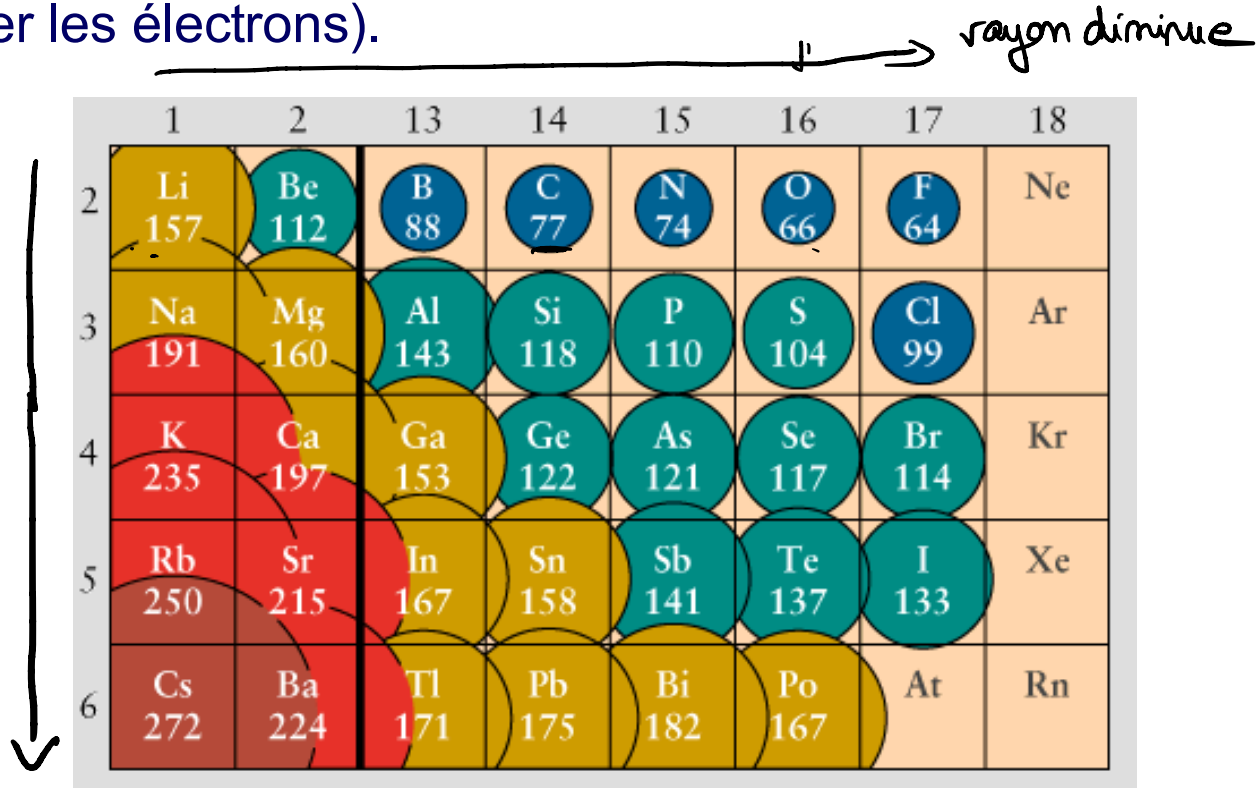
## Définitions:

- 1) demi-distance entre les centres d'atomes voisins (données expérimentales).
- 2) calcul, (mathématiquement l'atome n'est pas fini, on définit une zone où on a 90% de probabilité de trouver les électrons).



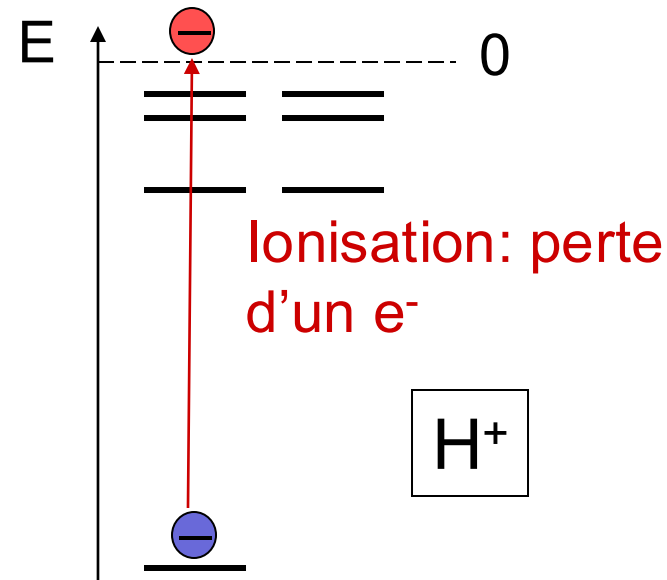
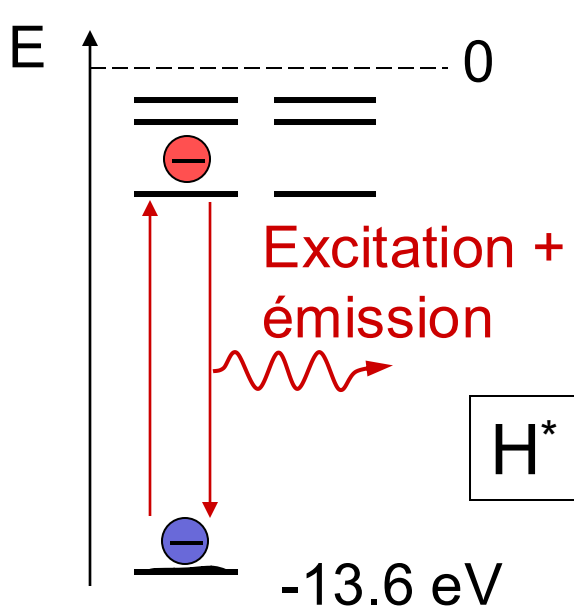
Rayon atomique en pm

↑  
rayon ↑



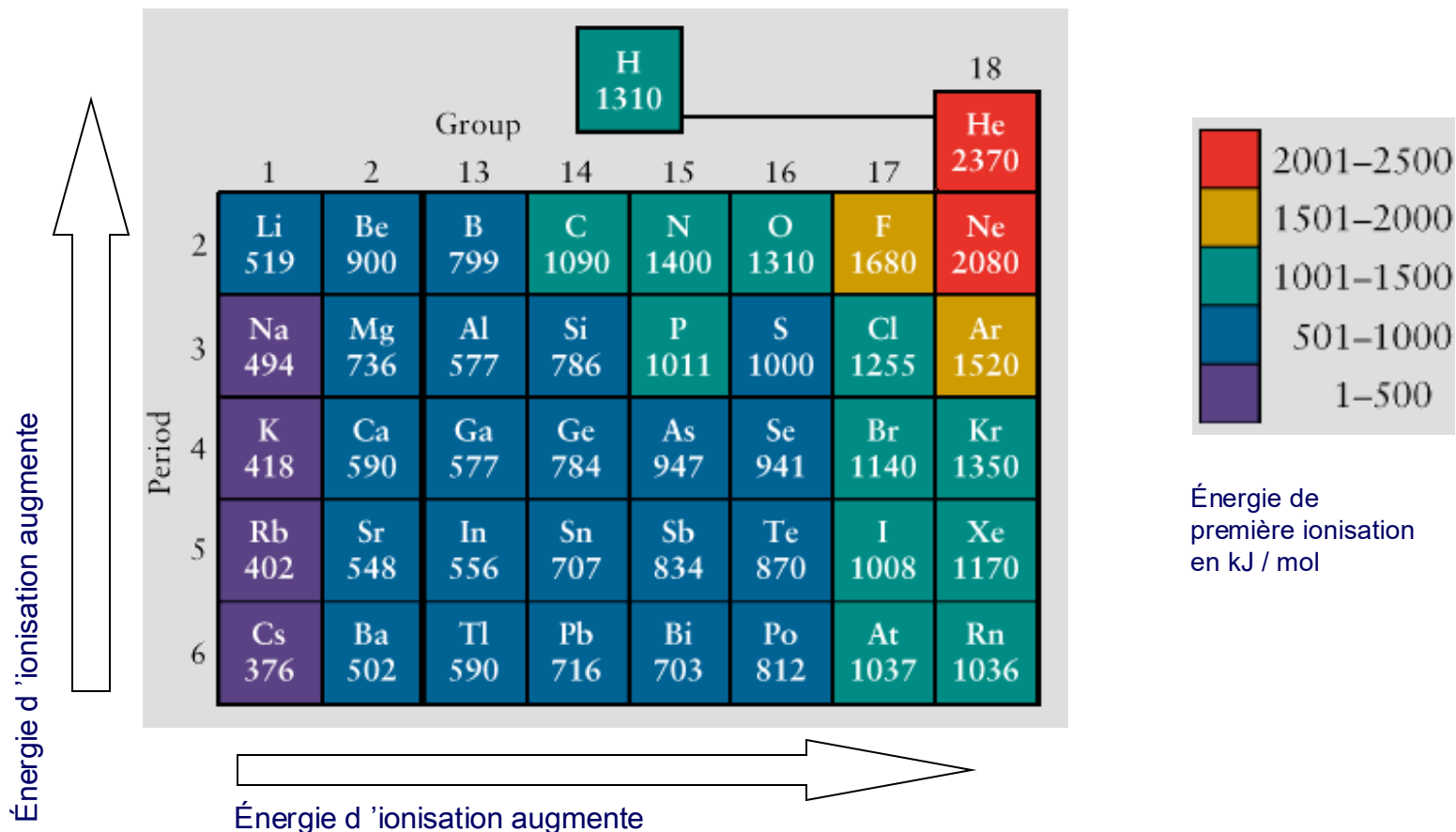
# Quelques définitions supplémentaires

- **Énergie d'ionisation** : énergie requise pour extraire un  $e^-$   
He : 23.7 eV      C : 10.9 eV



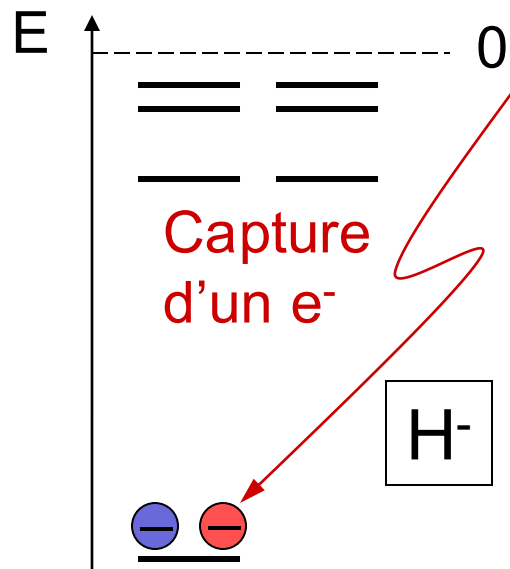
# Energie d'ionisation

Énergie nécessaire pour arracher un électron et former un ion positif à l'état gazeux.  
 Ex:  $\text{K} \longrightarrow \text{K}^+ + \text{e}^-$



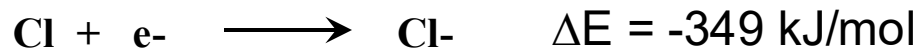
# Quelques définitions supplémentaires


- **Électroaffinité** : variation d'énergie lors de la capture d'un  $e^-$   
ou **affinité électronique**      F : -3.6 eV                      Mg : 2.3 eV




# Affinité électronique

Énergie associée à la fixation d'un électron par un atome en phase gazeuse. (stabilité relative de l'anion par rapport à l'atome neutre)



affinité électronique augmente 

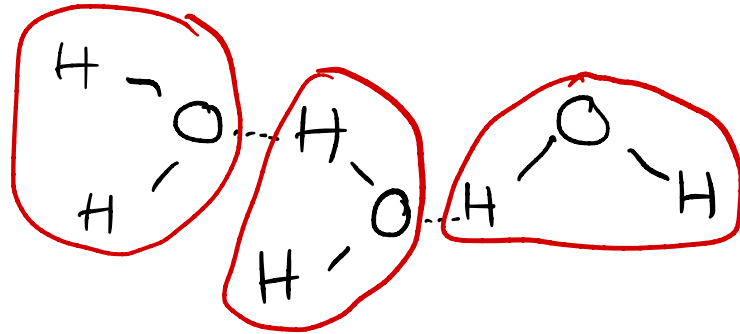
affinité électronique augmente 

<i>H</i>								<i>He</i>	
-74,5								+21,2	
<i>Li</i>	<i>Be</i>		<i>B</i>	<i>C</i>	<i>N</i>	<i>O</i>	<i>F</i>	<i>Ne</i>	
-59,8	-36,7		-17,3	-122,3	+20,1	-141,3	-337,5	+28,9	
<i>Na</i>	<i>Mg</i>		<i>Al</i>	<i>Si</i>	<i>P</i>	<i>S</i>	<i>Cl</i>	<i>Ar</i>	
-52,2	+21,2		-19,3	-131	-68,5	-196,8	-349,2	+35,7	
<i>K</i>	<i>Ca</i>		<i>Ga</i>	<i>Ge</i>	<i>As</i>	<i>Se</i>	<i>Br</i>	<i>Kr</i>	
-45,4	+186		-35,3	-139	-103	-203	-324,1	+40,5	
<i>Rb</i>	<i>Sr</i>		<i>In</i>	<i>Sn</i>	<i>Sb</i>	<i>Te</i>	<i>I</i>	<i>Xe</i>	
-37,6	+145		-19,3	-99,5	-90,5	-189	-295,2	+43,5	
<i>Sc</i>	<i>Ti</i>	<i>V</i>	<i>Cr</i>	<i>Mn</i>	<i>Fe</i>	<i>Co</i>	<i>Ni</i>	<i>Cu</i>	<i>Zn</i>
+70,5	+1,93	-60,8	-93,5	+93,5	-44,5	-102	-156	-173	-8,7
<i>Y</i>	<i>Zr</i>	<i>Nb</i>	<i>Mo</i>	<i>Tc</i>	<i>Ru</i>	<i>Rh</i>	<i>Pd</i>	<i>Ag</i>	<i>Cd</i>
+38,6	-43,5	-109	-114	-95,5	-145	-162	-98,5	-103	+26,1

# Définitions

---

**Molécule**: groupe de deux atomes ou plus, unis selon un arrangement spatial déterminé par des forces appelées liaisons covalentes. Exemple:  $H_2$ ,  $S_8$ .



Un **composé moléculaire** est formé de molécules constituées d'atomes de deux éléments distincts. Exemple:  $CO_2$ ,  $H_2O$ .

# Définitions

---

Un **composé ionique**: lorsqu'un atome isolé ou un groupe d'atomes cède ou acquiert des électrons, il y a formation d'ions. La formule d'un composé ionique a comme base une combinaison électriquement neutre de cations et d'anions qu'on appelle une entité formulaire. Exemple: NaCl, CuSO<sub>4</sub>

# Formation de molécules

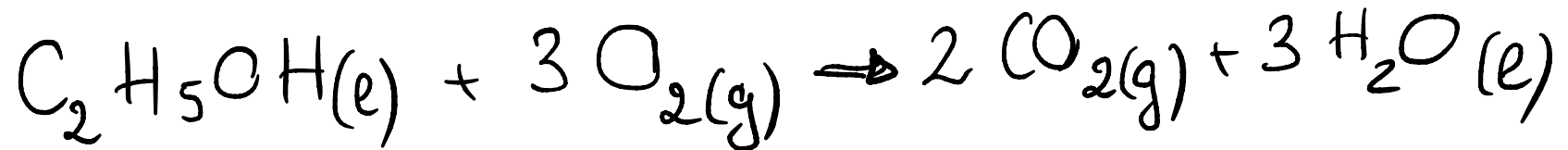
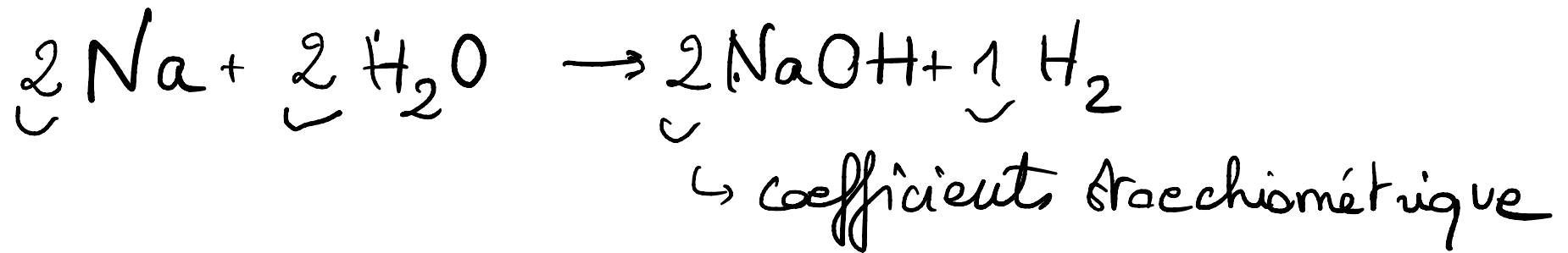
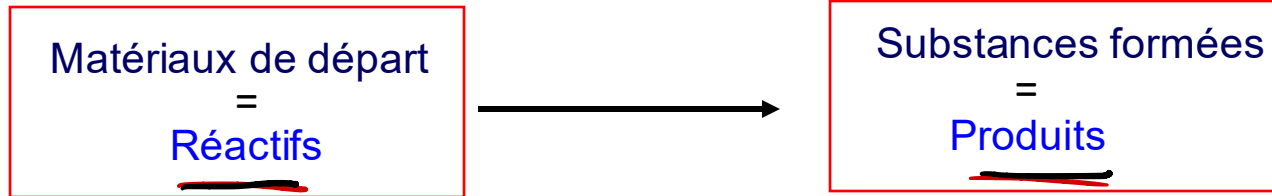
---

Certaines molécules sont stables et sont trouvées dans la nature (l'eau, le gaz carbonique, etc..) alors qu'on ne trouve pas les atomes isolés... De plus certaines molécules réagissent avec d'autres pour donner encore d'autres composés... Comment comprendre tout cela?

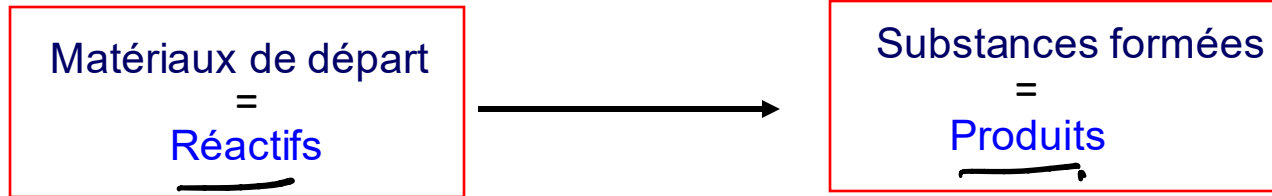
Certains principes ont été observés, historiquement:

- Conservation de la masse (Lavoisier, rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme!)
- Proportions définies (Proust, constate pour l'eau, on a toujours 1 atome de O pour deux de H)
- Proportions multiples (Dalton, les atomes se recombinent lors d'une réaction chimique)

# Equation chimique

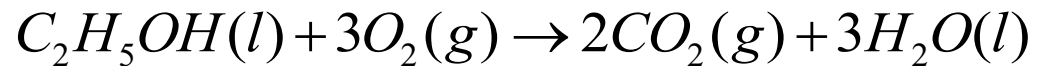


# Equation chimique



Indications supplémentaires → à droite de la formule

- (g) phase gazeuse
- (l) phase liquide
- (s) phase solide
- (aq) solution aqueuse



Il y a le même nombre d'atomes de chaque élément des deux côtés de la flèche, la réaction est équilibrée.

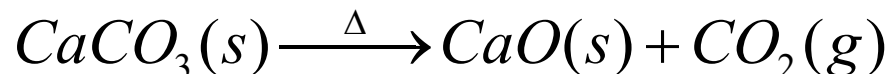
# Classification des réactions

## Par type de réaction:

(1) **Equilibre** (cas général, défini par thermodynamique)



(2) **Réaction complète** (équilibre déplacé)



$\Delta$  : chauffage

chaux  $\longrightarrow$

Industrie: aciérie, verrerie, cimenterie

L'oxyde de calcium, «chaux vive», est un produit obtenu par calcination du calcaire à 825 ° C.

## Par transformation chimique:

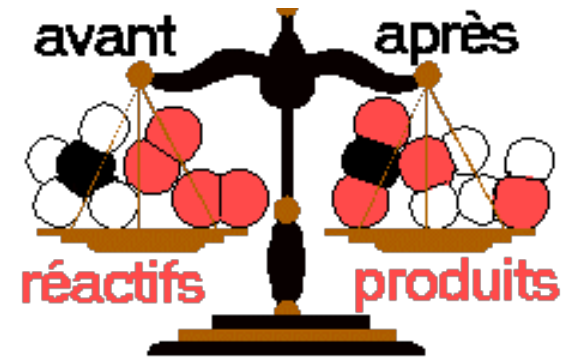
- Transfert de protons  $\rightarrow$  acide-base
- Transfert d'électrons  $\rightarrow$  oxydation-réduction
- Fixation de ligands  $\rightarrow$  complexation
- Substitution, dissociation, précipitation....

# Stœchiométrie

## Loi de conservation de masse

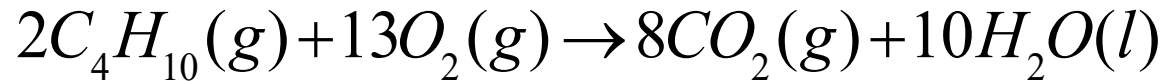
Au cours d'une réaction chimique, on peut considérer que la masse est conservée. (sauf en cas de réaction nucléaire)

Interprétation de Dalton : au cours d'une réaction chimique, les atomes ne sont ni créés ni détruits, ils changent de partenaires.



Les coefficients stœchiométriques sont introduits pour équilibrer les réactions : même nombre d'atomes de chaque élément de part et d'autre de la flèche.

Exemple : combustion du butane ( $C_4H_{10}$ )



En mole	2	13	8	10
En masse	2 x 58	13 x 32	8 x 44	10 x 18
(g)	= 116	= 416	= 352	= 180
	total = 532		total = 532	

1 mole de carbone pèse 12.0107g

carbone
6
C
12,0107

hydrogène
1
H
1,00794

oxygène
8
O
15,9994

# Définitions

**La mole:** Unité qui permet de rapporter simplement les nombres gigantesques d'atomes et de molécules dans des échantillons visibles.

**1 mole d'atomes** = quantité de substance contenant le même nombre d'atomes que 12 g de  $^{12}\text{C}$  pur.

Ce nombre : **nombre d'Avogadro** ( $N_A$ ) =  $6.02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$

$$1 \text{ u.m.a} = 1 \text{ Da} = \frac{1}{N_A} = \frac{1}{6,02 \cdot 10^{23}} \text{ g} = 1,66 \cdot 10^{-24} \text{ g}$$

L'unité de masse atomique (u.m.a.) est exactement le douzième de la masse d'un atome de l'isotope 12 du carbone

**Masse atomique ( $M$ )** : masse en grammes d'une mole d'atomes d'un élément, a pour unité des grammes par mole [ $\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$ ]

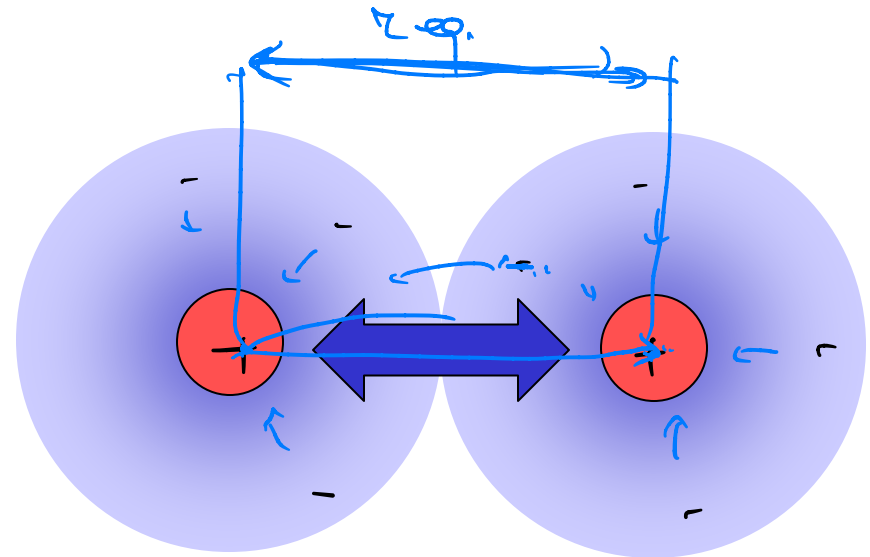
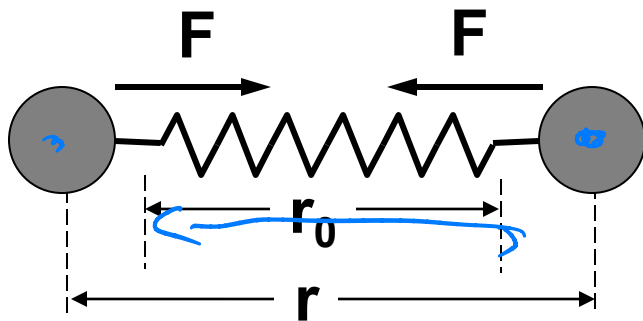
Numéro atomique  
Nombre de protons

carbone
6
C
12,0107

Nombre de masse  
Nombre de protons  
et neutrons

# Pourquoi les molécules se forment elles, du point de vue physique?

Les atomes interagissent entre eux, en fonction de la température, de la pression, pour former, ou non, des interactions durables. Un modèle simple d'interaction entre atomes consiste à prendre un **potentiel d'interaction**, comme pour un ressort.

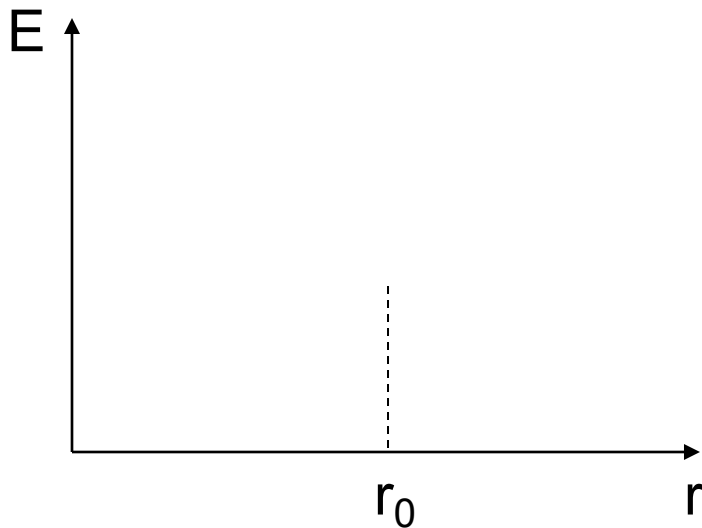
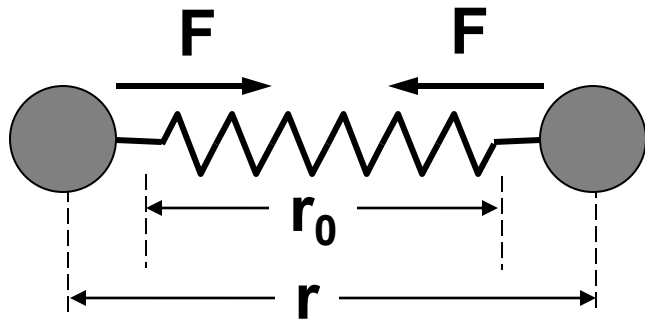


Attraction:  
noyaux /électrons

Répulsion:  
noyaux/noyaux  
électrons /électrons

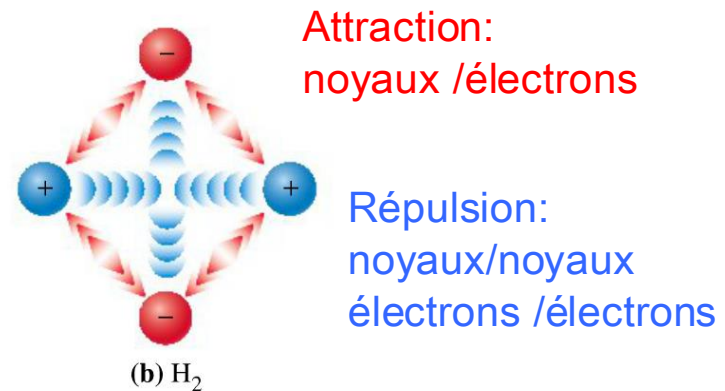
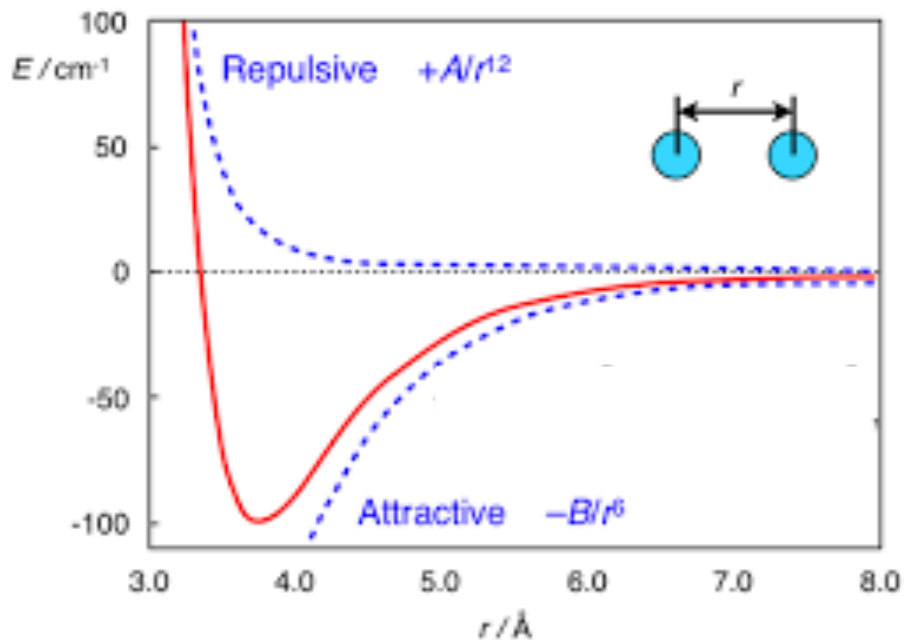
# Energie du système

---



# Cas des atomes

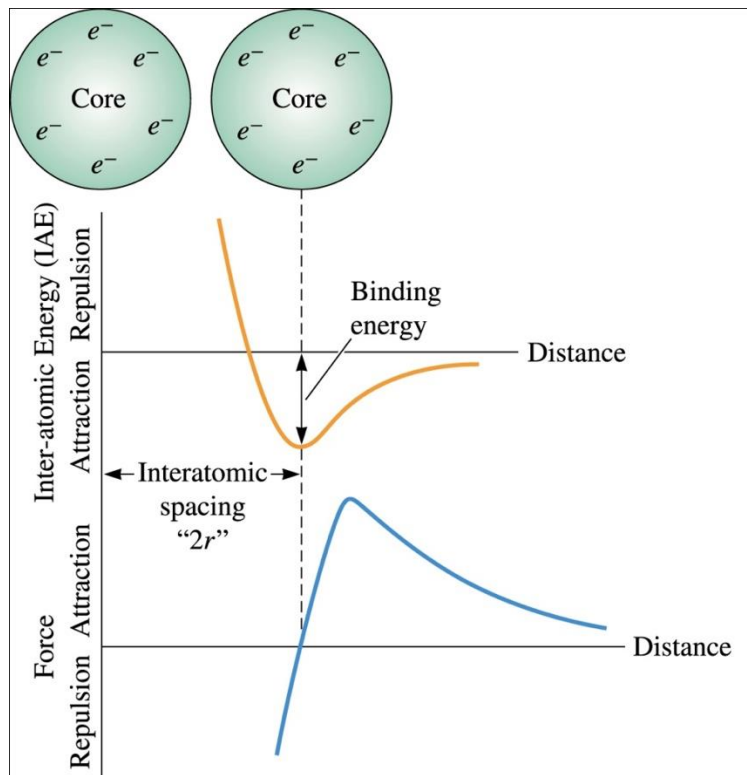
Entre 2 atomes: les forces d'attraction et de repulsion peuvent être simulées par le **potentiel de Lennard Jones**, E. L'énergie potentielle peut être dérivée de la superposition de deux forces, une attractive et une répulsive. Au point où les deux forces se compensent, l'énergie potentielle est minimale: équilibre.



$$E = \varepsilon_0 \left[ \left( \frac{r_0}{r} \right)^{12} - 2 \left( \frac{r_0}{r} \right)^6 \right]$$

# Energie de liaison

correspond à l'énergie interatomique minimale, et à une force nulle entre les atomes



liaison	énergie de liaison (Kcal/mol)
ionique	150 - 370
covalente	125 - 300
métallique	25 - 200
Van der Waals	< 10

# Résumé

---

- L'interaction entre atomes (molécules) peut être approximée par un potentiel (énergie), comme pour un ressort.
- L'équation chimique d'une réaction s'écrit à partir des symboles des éléments ou des formules des composés qui participent à la réaction. La mole est la grandeur adaptée au travail en chimie basé sur la constante d'Avogadro.
- Voir les annexes pour plus de détails sur le volume d'une mole et quelques définitions supplémentaires de chimie si vous ne les connaissez pas déjà.

# A retenir du cours d'aujourd'hui

---

- *Les concepts de rayon atomique, d'énergie d'ionisation, d'affinité électronique et comment ceux-ci varient globalement avec la position de l'atome dans la table périodique.*
- *Les concepts de base des équations chimiques, stœchiométrie, définition d'une mole, de la masse atomique.*
- *Pourquoi les molécules se forment-elles (on continuera cela la semaine prochaine aussi).*

# Annexe

---

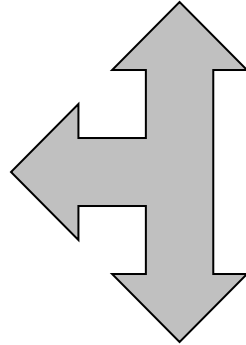
- Quelques rappels de chimie qui seront utiles pour le cours

# Utilité du concept de mole

Description  
macroscopique

Masse molaire-Mole

Quantité de matière



Nombre d'Avogadro  
 $6.02 \times 10^{23}$  (particules, atomes,  
molécules, ions...) par mole

Description  
microscopique

Masse atomique-Atome

La **mole** est la grandeur adaptée au travail en chimie.

## Exemples:

Une mole de carbone pèse 12,011 g et contient  $6.02 \times 10^{23}$  atomes de carbone.

Une mole de plomb pèse 207,2 g et contient  $6.02 \times 10^{23}$  atomes de plomb.

# Loi des gaz parfaits

---

## Loi des gaz parfaits

Gaz parfait: modèle thermodynamique décrivant le comportement de tous les gaz à basse pression.

↳ les interactions entre les particules de gaz peuvent être négligées

$$pV = nRT$$

R : constante des gaz parfaits

p : pression

V : volume occupé par le gaz

n : nombre de moles

T : température

# Volume d'une mole

---

## Volume molaire

Volume occupé par 1 mol du gaz à une température et à une pression données; dans des conditions de température et de pression normales, le volume molaire d'un gaz parfait est de 22.4 L.

**Conditions normales de pression et température** (TPN):  $P = 1 \text{ atm} = 101,325 \text{ kPa}$   
 $T = 273,15 \text{ K} (0^\circ \text{ C})$

Set de **conditions standard** pour réaliser des mesures expérimentales et pouvoir ensuite les comparer

$p = 1 \text{ atm} = 101,325 \text{ kPa}$   
anciennement

$p = 1 \text{ bar} = 100 \text{ kPa}$   
Définition IUPAC

La température ne fait pas directement partie des conditions standard, elle est néanmoins généralement choisie à  $25^\circ \text{ C} (298\text{K})$

# Masse moléculaire et masse d'une entité formulaireire

---

**Masse moléculaire** (masse molaire) : somme de la masse atomique  $M_i$  de chaque élément  $E_i$  qui compose la molécule, multipliée par le nombre  $n_i$  d'atomes de cet élément présent dans la molécule.

$$M = \sum_i M_i(E_i) \times n_i$$

**Formule chimique** : indication du nombre d'atomes  $n_i$  de chaque élément  $E_i$  qui compose une molécule. **Ex** :  $C_6H_6$  (benzène),  $C_2H_6$  (éthane),  $C_6H_{12}$  (cyclohexane)

**Masse d'une entité formulaireire** (entité artificielle): la somme des masses des atomes et des ions présents dans une entité formulaireire du composé **Ex**: NaCl,  $CaSO_4$

**Ex** : masse moléculaire de l'éthane  $C_2H_6$

$$M = (2 \times 12.011) + (6 \times 1.008) = 30.070 \text{ [g.mol}^{-1}\text{]}$$

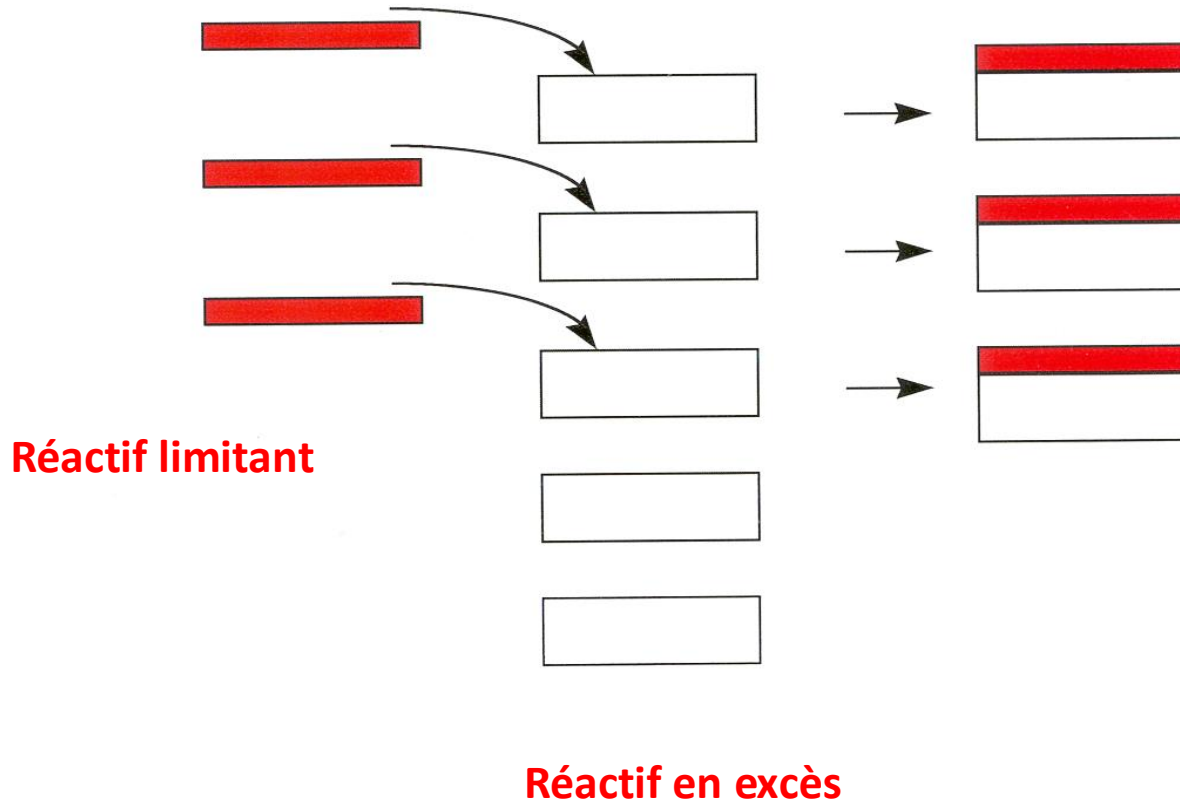
du chlorure de sodium NaCl

$$M = (1 \times 22.99) + (1 \times 35.45) = 58.44 \text{ g/mol}$$

# Réactif limitant

(conditions: non-stœchiométriques)

Le **réactif limitant** pour une réaction donnée est le réactif qui détermine la quantité maximum de produit qui peut être formée



# Rendement d'une réaction

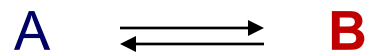
---



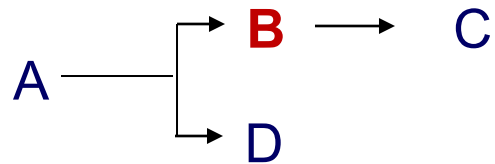
$$\eta_s (\%) = \frac{\text{masse de B pratique}}{\text{masse de B théorique}} \times 100 = \frac{\text{mole de B pratique}}{\text{mole de B théorique}} \times 100$$

$\eta < 100\%$  dans les cas:

i) Réactions incomplètes (réversibles)



ii) formation des autres produits secondaires (C et D)



## Annexe: Constante de gaz parfait R

---

$$PV = nRT$$

$$1 \text{ atm} = 1.013 \text{ bar} = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$$

<b>R</b>	<b>V</b>	<b>P</b>	<b>T</b>	<b>n</b>
0.0821 L.atm.K <sup>-1</sup> .mol <sup>-1</sup>	L	atm	K	mol
0.0831 L.bar.K <sup>-1</sup> .mol <sup>-1</sup>	L	bar	K	mol
8.314 L.kPa.K <sup>-1</sup> .mol <sup>-1</sup>	L	kPa	K	mol
8.314 J.K <sup>-1</sup> .mol <sup>-1</sup>	m <sup>3</sup>	Pa	K	mol

Pour  $n = 1 \text{ mol}$ ,  $T = 273.15 \text{ K}$ ,  $P = 1 \text{ atm}$

On calcule  $V = nRT/P = (1 \text{ mol} * 0.0821 \text{ L atm K}^{-1} \text{ mol}^{-1} * 273.15 \text{ K}) / 1 \text{ atm} = 22.4 \text{ L}$

ou  $V = nRT/P = (1 \text{ mol} * 8.314 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1} * 273.15 \text{ K}) / 1.013 \cdot 10^5 \text{ Pa} = 2.24 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3$

$1 \text{ J} = 1 \text{ Nm}$  et  $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$

# Annexe

---

Antoine Lavoisier (né Antoine Laurent de **Lavoisier** le 26 août 1743 à Paris et guillotiné le 8 mai 1794 à Paris) est un chimiste, philosophe et économiste français.

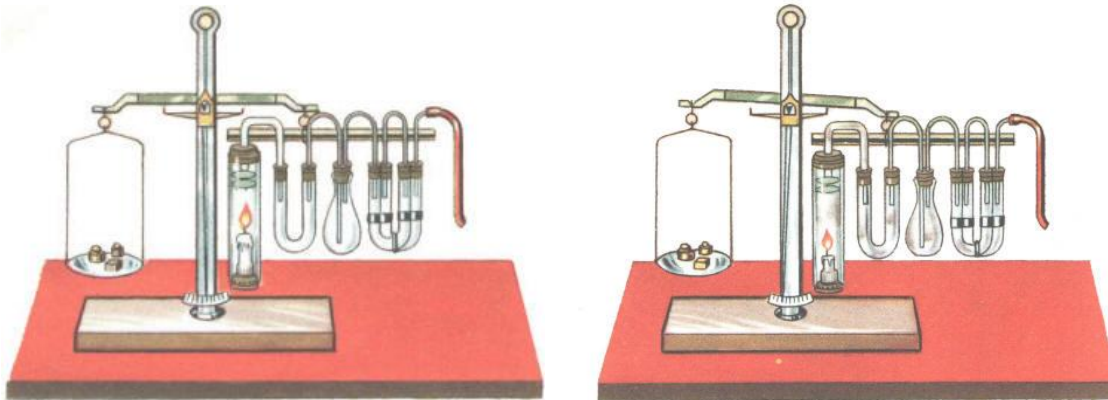
Il a énoncé la première version de **la loi de conservation de la matière**. Identifié et baptisé l'oxygène (1778), participé à la réforme de la nomenclature chimique,...

Il est souvent fait référence à Lavoisier en tant que père de la chimie moderne.

Les expériences de Lavoisier sont parmi les premières expériences chimiques véritablement quantitatives jamais exécutées.

Il a prouvé que, bien que la matière change d'état dans une réaction chimique, la quantité de matière reste identique du début jusqu'à la fin de la réaction. Il brûla du phosphore et du soufre dans l'air, et montra que les produits pesaient plus que les réactifs de départ. Néanmoins, la masse gagnée était perdue par l'air. Ces expériences ont été des preuves à la base de la loi de conservation de la matière.

Lavoisier a aussi étudié la composition de l'eau, et il appelle ses composants « oxygène » et « hydrogène ».



Lors de la combustion de la bougie, la balance penche vers le dispositif et ce, bien que la bougie soit en partie consumée ! Il y a donc une augmentation de la masse présente du côté du dispositif. Lavoisier en conclut que :

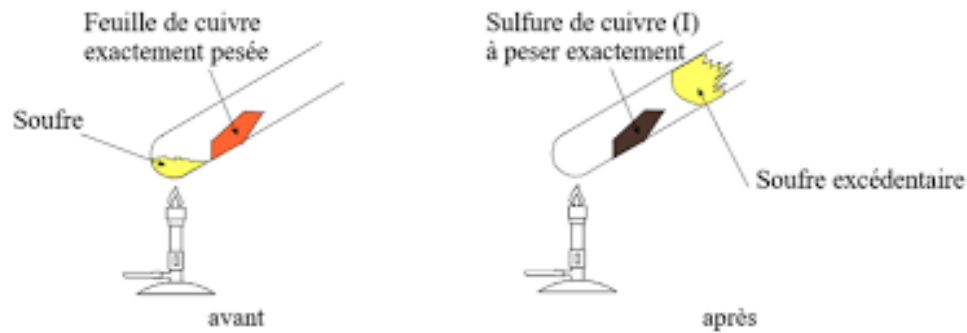
- la masse de la bougie n'est pas détruite (conservation de la matière)
- l'air (l'oxygène) se recombine avec les produits de la combustion de la bougie.

L'expérience fut réalisée dans un système fermé. Au bout d'un certain temps, la bougie s'éteint, car elle a consommé toute la partie d'air (oxygène) disponible. Dans ces conditions (système fermé), la balance reste à l'équilibre !

# Annexe

---

A l'époque une grande difficulté consistait pour les chimistes à faire la différence entre corps composés et mélange (températures de fusion et d'ébullition!). Une fois que cette différence était bien établie, ils pouvaient s'occuper des corps composés et de leur composition . En 1807, **Proust** mesurait à l'aide de la balance les masses des éléments présents dans un corps composé (par exemple les masses d'oxygène et d'hydrogène obtenues par analyse du corps composé eau ou les masses de soufre et de fer qui se combinent pour former le corps composé sulfure de fer).



# Annexe

---

**Dalton** était un instituteur dans une école de Manchester. On le tient aujourd'hui pour le créateur incontesté de la théorie atomique moderne. Dans son célèbre ouvrage de 1808 "Nouveau système de philosophie chimique", il pose les hypothèses essentielles de la théorie atomique:

1. Un corps simple est formé d'une sorte d'atomes
2. Tous les atomes d'un corps simple sont identiques
3. Les atomes restent inchangés dans les réactions chimiques
4. Dans la formation ou la destruction de corps composés, les atomes sont séparés ou recombinaés dans un rapport différent.

A l'aide de l'hypothèse atomique de Dalton, les lois de Lavoisier et de Proust s'expliquent tout naturellement:

Explication de la loi de conservation de la masse: D'après Dalton, une réaction chimique est un simple réarrangement d'atomes, par exemple:



Comme tous les atomes sont conservés intacts en gardant leur masse, la masse des réactifs ( dans notre cas masse de 6 atomes "rouges" + masse de six atomes "verts" + masse de trois atomes "mauves" ) est égale à la masse des produits ( dans notre cas masse de 6 atomes "rouges" + masse de six atomes "verts" + masse de trois atomes "mauves" )