

CHAMPS & PARTICULES

LA DÉCOUVERTE DE L'ATOME



Alain Bouquet

Laboratoire AstroParticule & Cosmologie

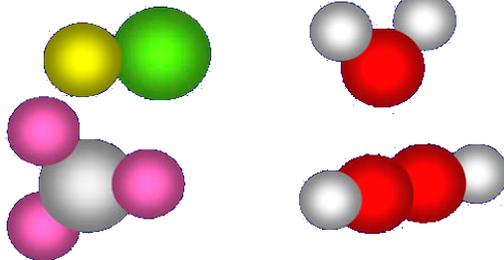
Université Denis Diderot Paris 7, CNRS, Observatoire de Paris & CEA



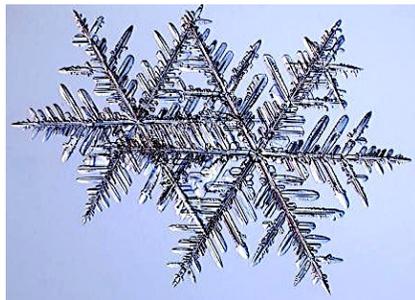
La conception moderne de la matière

- Toutes les substances sont formées
 - d'un nombre **fini** d'éléments différents
 - décomposables en **atomes** tous identiques
- Selon la manière dont les atomes sont assemblés

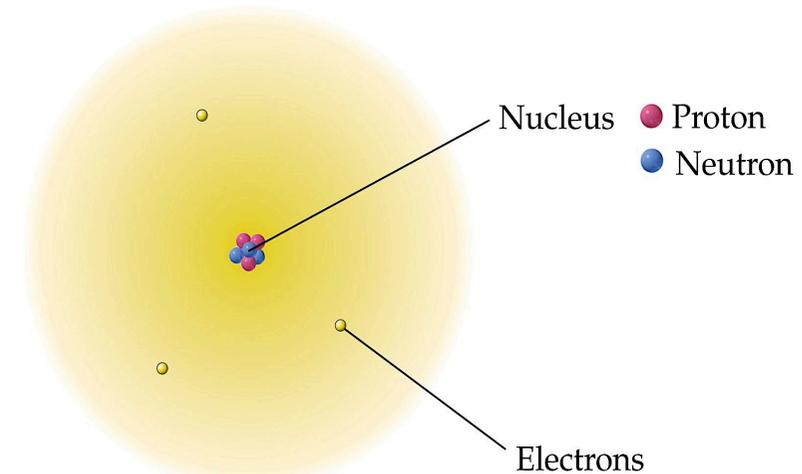
-  molécules



-  cristaux

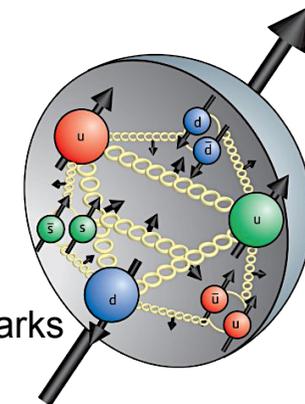


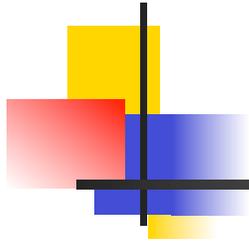
- Atome = nuage d'électrons entourant un noyau formé de protons et de neutrons



- Proton

- 3 quarks (u,u et d)
- de 3 « couleurs »
- liés par des gluons
- + paires quarks-antiquarks





MAIS COMMENT EN EST-ON ARRIVÉ LÀ ?



Continu et discontinu

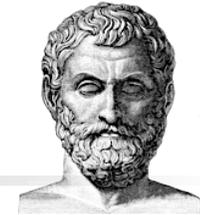
- Continu \Leftrightarrow unité
- *mais divisibilité (potentielle) à l'infini*
 ☞ *paradoxes*
- Continu \Leftrightarrow plein



- Discontinu \Leftrightarrow pluralité 1, 2, 3, 4...
- *nombre fini dans un univers limité*
 ☞ *atomes indivisibles*
- Discontinu \Leftrightarrow intervalles vides

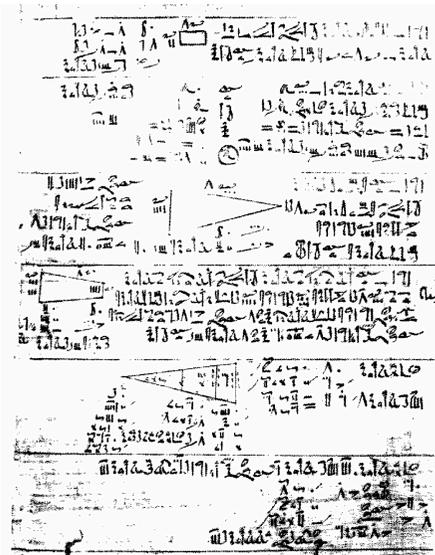


Au commencement était Thalès



- Accumulation de très nombreuses connaissances empiriques

- de la géométrie à la médecine, en passant par la botanique (agriculture), la zoologie (chasse et élevage), ou la physique et la chimie (céramique, métallurgie, architecture)



- mêlées à des pratiques magiques et des explications mythologiques

- Thalès de Milet (-625, -547?) inventa la science

- Le monde est régi par des lois

- universelles et immuables
- que nous pouvons découvrir
- par la logique et le raisonnement

- et il mit ces idées en pratique

- en géométrie (théorèmes « de Thalès »)
- en physique (propriétés de l'ambre et de la pierre de Magnésie)
- en astronomie (calendrier, éclipses)
- ...

- et il rechercha le *principe premier* à l'origine de toutes les lois de la nature

- il suggéra l'eau (glace, liquide, vapeur)

Les atomistes de l'Antiquité



■ Parménide

- L'être est (le non-être *n'est pas*)
- L'être est *un* (et donc continu)
- L'être est *immuable* (rien ne vient de rien)
- → **le changement est illusion**

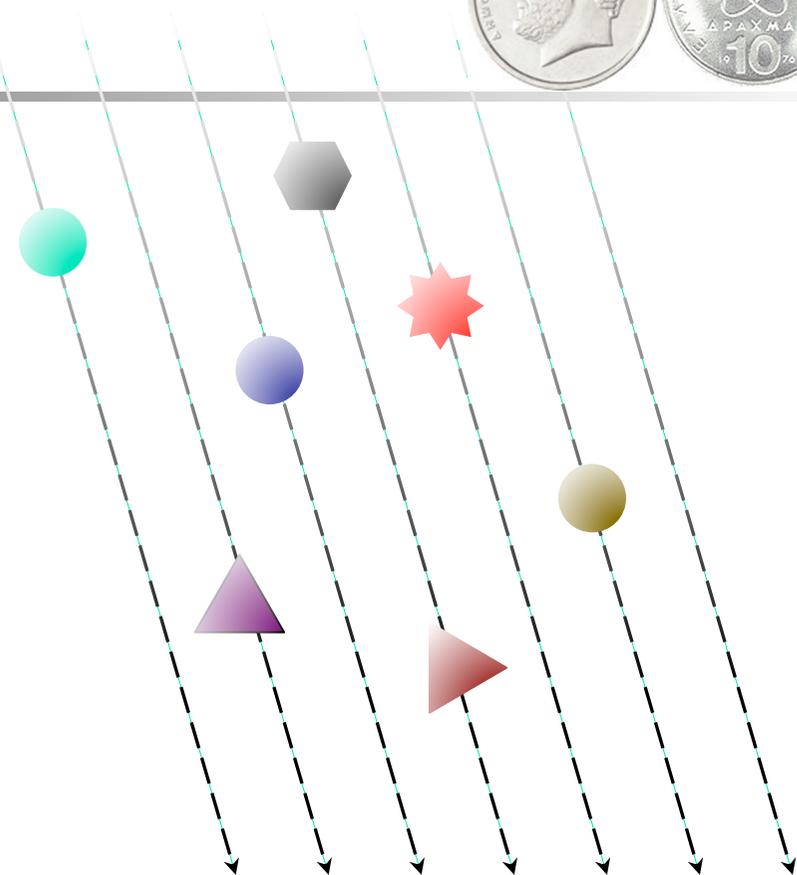
■ Leucippe → Démocrite → Lucrèce

- permanence : atomes indestructibles
- impermanence : assemblages éphémères de ces atomes

■ en pratique :

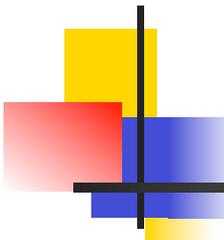
- atomes « tombant » dans le vide (néant ou espace ?)
- possédant en miniature les propriétés des corps qu'ils forment
- s'associant (plus ou moins) au hasard

↑↑
clinamen



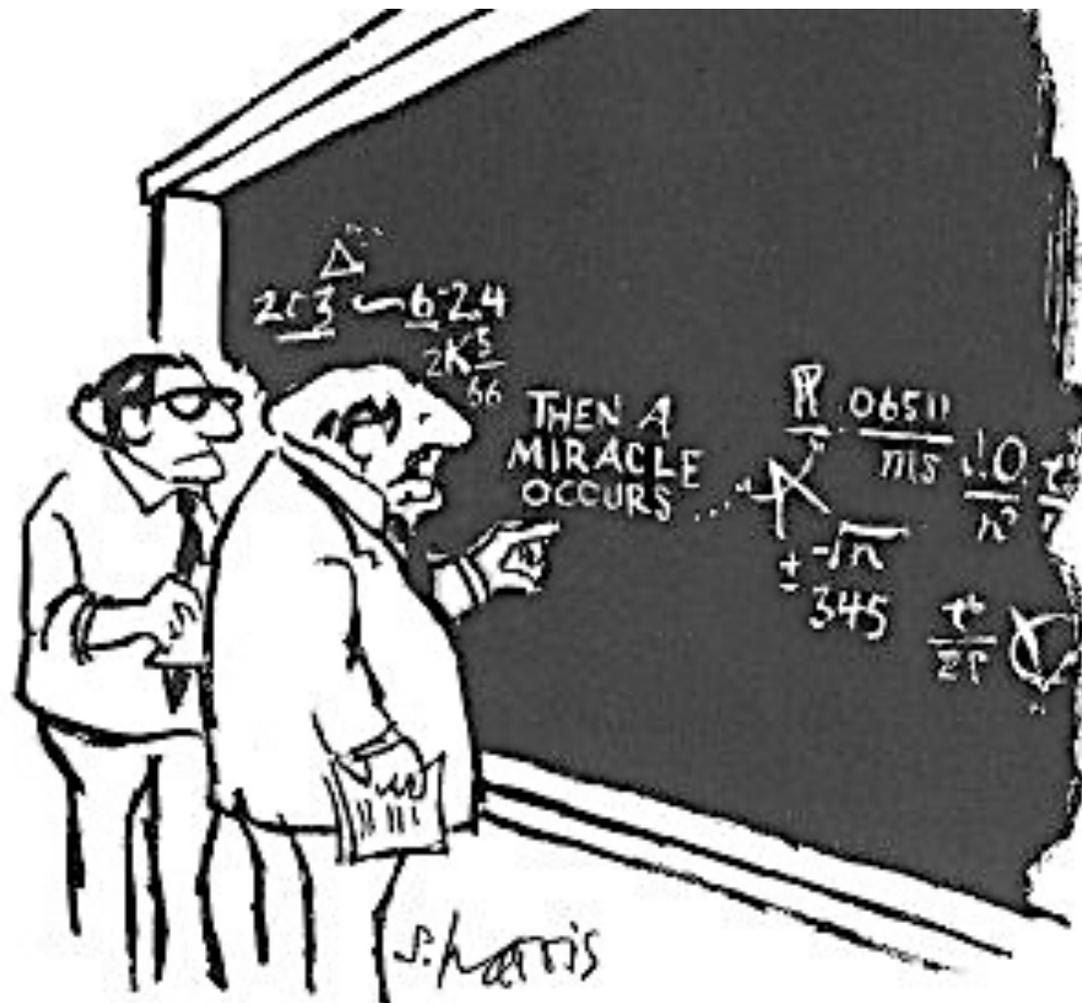
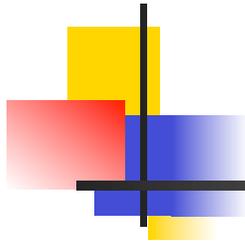
atomes « crochus »





Cela ne mène nulle part !





"I THINK YOU SHOULD BE MORE EXPLICIT HERE IN STEP TWO."

Commençons par le commencement: mélanges et corps purs

- Certains corps sont manifestement hétérogènes



- D'autres sont homogènes



- Comment savoir s'il s'agit de corps purs ou de mélanges ?

- impossibilité de les séparer ?
- \Rightarrow dépend des techniques employées
eau salée \rightleftharpoons eau + sel
café \rightleftharpoons eau + paillettes lyophilisées

- **proportions bien définies et constantes**

café : espresso \neq café « allongé »

air = oxygène + azote en *proportions variables*

eau = oxygène + hydrogène en *proportions constantes*

1 litre d'oxygène + 2 l d'hydrogène \rightleftharpoons 2 l de vapeur d'eau

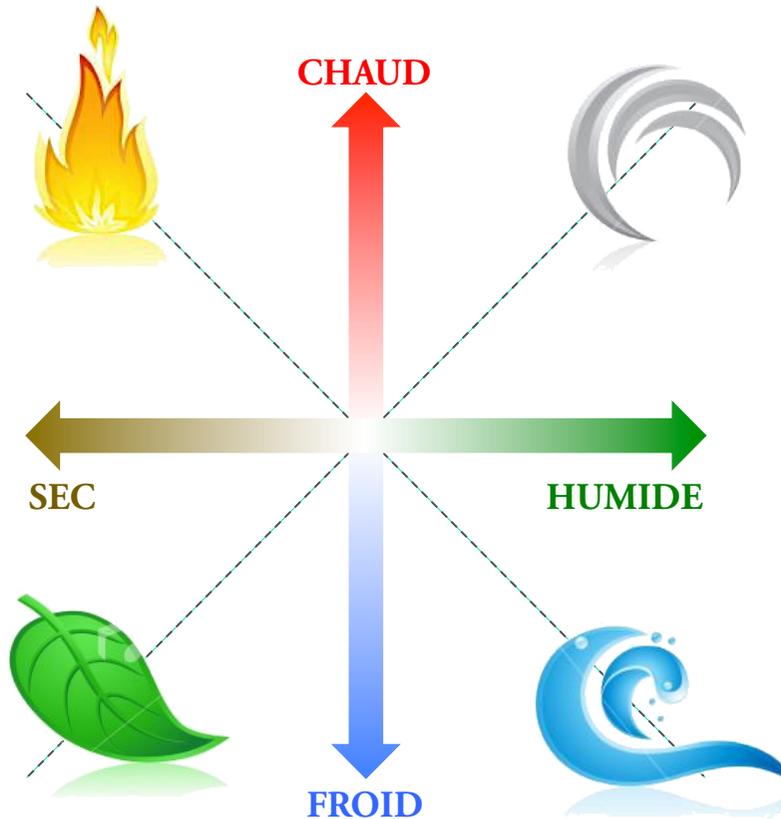
8 g d'oxygène + 1 g d'hydrogène \rightleftharpoons 9 g d'eau

- \Rightarrow **corps pur**

- **mais pas nécessairement élémentaire**

Quatre éléments fondamentaux (Empédocle -460)

- Deux paires de contraires
 - froid = passif \Leftrightarrow chaud = actif
 - sec = analyse \Leftrightarrow humide = synthèse

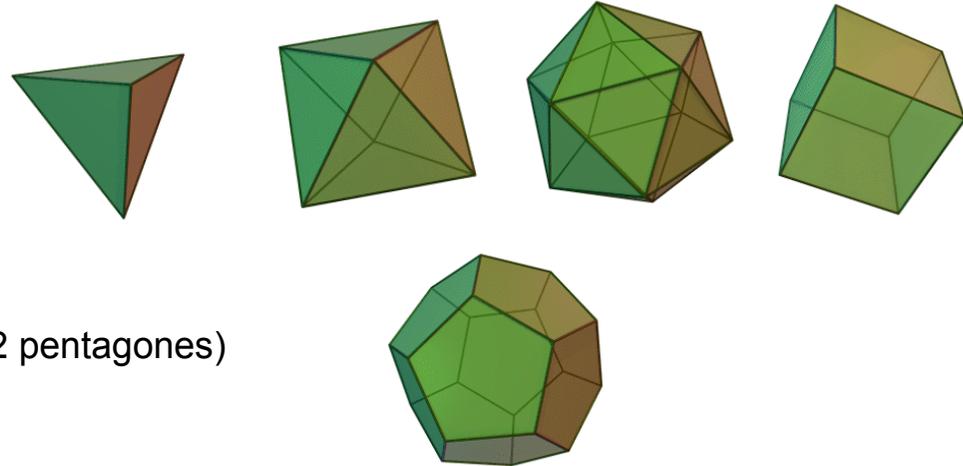


- \Rightarrow quatre éléments fondamentaux
 - « feu » : chaud et sec *vue*
 - « air » : chaud et humide *ouïe*
 - « eau » : froid et humide *goût, odorat*
 - « terre » : froid et sec *toucher*
- \Rightarrow quatre humeurs en médecine
 - bile jaune : chaud et sec
 - sang : chaud et humide
 - flegme (lymphe) : froid et humide
 - bile noire : froid et sec
- \Rightarrow quatre caractères...
- *Ces quatre éléments mis à part, tous les corps qui existent ici-bas résultent de la conjonction d'une forme et d'une matière constituée à son tour de l'union des quatre éléments. Ces derniers, eux, sont simples et ne sont faits que d'une forme et de la matière où elle s'imprime.* Maïmonide (expliquant Aristote)

Les quatre éléments et l'atomisme ancien

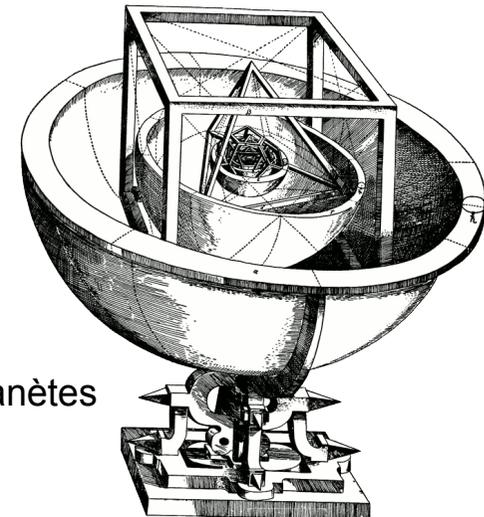
■ Solides « platoniciens »

- « feu » \Leftrightarrow tétraèdres (4 triangles)
- « air » \Leftrightarrow octaèdres (8 triangles)
- « eau » \Leftrightarrow icosaèdres (20 triangles)
- « terre » \Leftrightarrow hexaèdres (6 carrés)
- « quintessence » \Leftrightarrow dodécaèdres (12 pentagones)

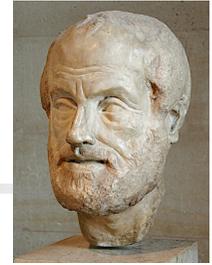


■ longue descendance

- Platon \rightarrow néo-platoniciens (Proclus...) \rightarrow Pères de l'Église...
- Aristote (en partie) \rightarrow scolastiques du Moyen-Age
- Kabbale
- Hermétisme de la Renaissance (Paracelse...)
- Kepler : les solides platoniciens expliquent les distances entre planètes



Aristote et les éléments fondamentaux



- Diagramme à 2 dimensions : du froid au chaud et du sec à l'humide
- Chaque substance correspond à *une* place dans le diagramme



- Subtilité
 - Cela ne veut *pas* dire que le bois, par exemple, est un mélange de feu, d'air (fumée), d'eau et de terre (cendres) !
 - Les éléments sont présents en *puissance*, non en *acte*, leur présence est révélée par les propriétés des corps et leurs transformations
 - Analogie : gris = blanc + noir, mais tissu gris ≠ damier noir et blanc
- 
- Intégré dans la théorie générale du changement présentée par Aristote :
 - Mouvement = conservation de la *substance* et de la *forme*
 - Génération et corruption = conservation de la substance mais pas de la forme
 - Mélange = modification de la substance et de la forme (ex: bronze)

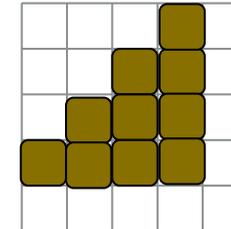
La falāsifa et les scolastiques

- Les philosophes musulmans développèrent l'œuvre des Grecs et des Romains : *philosophie* → *falāsifa*

- al Kindī (801-873)
- al Fārābī (872-950) le *Second Maître*
- ibn Sīnā (980-1037) *Avicenne*
- al Ghazālī (1058–1111)
 - *Les intentions des philosophes*
 - *L'incohérence des philosophes*
- ibn Rušd (1126-1198) *Averroès*, le *Grand Commentateur*
 - *Incohérence de l'incohérence*

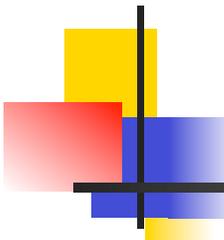


- Prolongent les réflexions d'Aristote et de ses continuateurs comme Alexandre d'Aphrodisie ou Philoponus
- continuité de l'espace



et Pythagore ?

- ⇒ continuité de la matière
 - ⇒ **rejet de l'atomisme**
- Duns Scot, Ockham, Buridan, Oresme, Bradwardine
- continu \Leftrightarrow géométrie
 - discontinu \Leftrightarrow arithmétique



Le kalām (كلام = dialectique), un atomisme radical

- Le monde ne peut être éternel car
 - un nombre infini de jours se serait déjà écoulés, et l'infini ne peut être parcouru
 - → il y a eu une création
 - → il y a eu un Créateur, distinct de sa création
- Le monde se divise entre
 - ce qui occupe l'espace : la **matière**
 - ce qui ne l'occupe pas : les **accidents** (couleur, odeur, force, adhésion, vie...)
- La matière est formée d'un nombre fini d'éléments (→ **atomes**)
 - sinon paradoxe de Zénon d'Elée : un grain de blé et une montagne auraient la même taille s'ils étaient formés du même nombre (infini) d'éléments
- L'espace est **discontinu**
 - agrégat d'emplacements occupés par les atomes (rapporté par Averroès)
- Le temps est aussi **discontinu**
 - agrégat d'instantanés séparés
 - événement : un *accident* est remplacé par un autre → **changement**
- Subtilités
 - atome
 - + accident du mouvement
 - + accident d'être à gauche
 - ⇒ déplacement de l'atome vers sa gauche [c'est le *but* qui *définit* un mouvement, sémantiquement du moins]
 - dans une roue en rotation, les atomes de la périphérie ont plus de chemin à parcourir que ceux du centre → **sauts** d'un atome d'espace à un autre distant

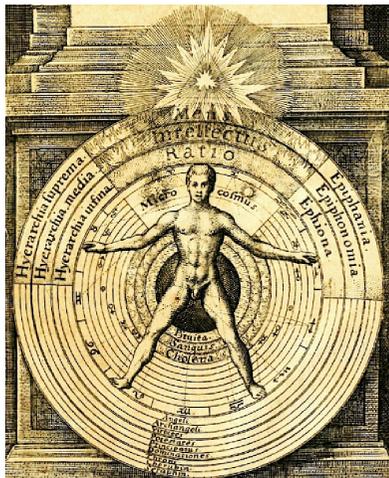
Influence, via Maïmonide, sur les kabbalistes puis Newton d'une part et Leibniz de l'autre

De l'alchimie à la chimie

- Les quatre éléments ?
 - Ou les trois substances (Paracelse) ?
 - soufre (ce qui brûle)
 - mercure (ce qui s'exhale)
 - sel (ce qui reste)
- gestation \Leftrightarrow combustion \Leftrightarrow digestion

■ Hermétisme

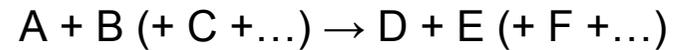
- « Ce qui est en haut est comme ce qui est en bas »



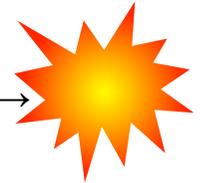
TABVLA SMARAGDINA HERMETIS TRISMEGISTUS

Ex ba Secretorū Hermetis, q̄ scripta erāt in tabula Smaragdi, inter manus eius in uenta, in obscuro antro, in q̄ hominum corpus eius reperit̄ est. Verū sine mendacio, certū, & uerissimū. Quod est inferius, est sicut q̄d est superius. Et q̄d est superius, est sicut q̄d est inferius, ad p̄cedēda miracula retinens. Et sicut oēs res fuerūt ab uno, meditatiōe unius. Sic oēs res natæ fuerūt ab hac una re, ad p̄cedēda. Pater eius est Sol, mater eius Luna. Portauit illud uentus in uētre suo. Nutrix eius terra est, Pater omnis celsus totius mūdi est hic. Vis eius integra est, si uerā fuerit in terrā. Separabis terrā ab igne, lubile à spisso, suauit̄ cū magno ingenio. Ascendit à terra in cœlū, iterumq̄ descendit in terrā, & recipit uim superiorū & inferiorū. Sic habebis gloriā totius mundi. Ideo fugiet à te omnis obscuritas. Hic est totius fortitudinis fortitudo fortis, quæ uincet omnem rem subtilem, omnemq̄ solidam penetrabit. Sic mundus creatus est. Hinc erunt adaptiones mirabiles, quarū modus hic est, itaq̄ uocatus sum Hermes Trismegistus, habens tres partes philosphiæ totius mundi. Complectū est, q̄d dixi de operatiōe Solis.

- accumulation de connaissances empiriques de la forme :



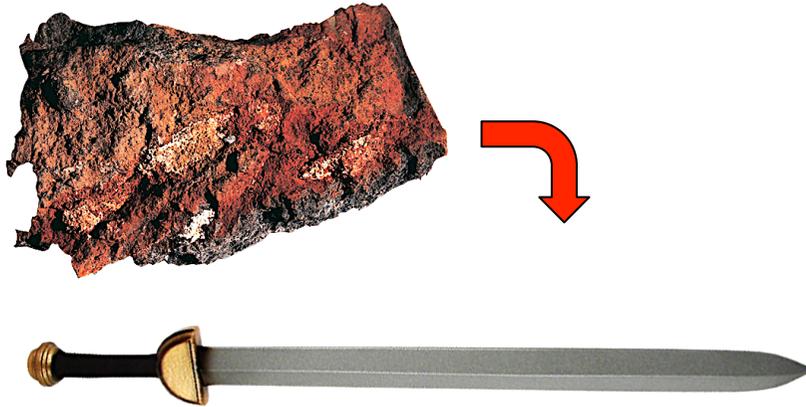
salpêtre + soufre + charbon de bois \rightarrow



- Mais pas de théorie prédictive
- Critiques de Robert Boyle (*The Sceptical Chymist* 1661)
 - \rightarrow notion d'élément chimique
 - 1. indécomposable
 - 2. non transformable en un autre
- Newton était aussi alchimiste

Un élément qui n'en est pas un : le phlogiston

- Pour expliquer la métallurgie



- Parallèle avec la combustion

- combustion : bois → cendres + feu
- calcination d'un métal → oxyde + ?

- Becher (1635-1682), puis Stahl (1659-1734) → le métal perd du **phlogiston** en devenant un oxyde

- ⇒ métal = minerais + phlogiston

- Phlogiston

- matériaux *riches en phlogiston* → brûlent facilement en laissant peu de cendres [ex: charbon de bois]
- matériaux *pauvres en phlogiston* → « brûlent » difficilement en laissant beaucoup de restes [ex: métaux]

- ☞ interprétation de la métallurgie :

oxyde + charbon → métal + cendres
par **transfert de phlogiston** du charbon à l'oxyde

- Cavendish et Priestley :
phlogiston = hydrogène ?

- air phlogistiqué = azote
- air déphlogistiqué = oxygène

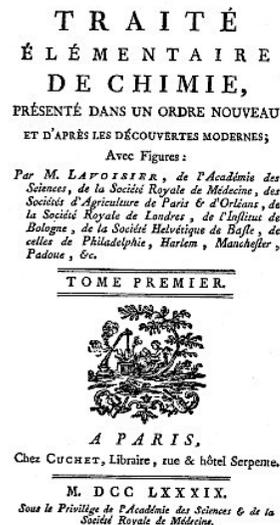
- Lavoisier anéantit l'idée du phlogiston

- l'oxyde est **plus lourd** que le métal

Lavoisier



- Principe de conservation : « Rien ne se perd, rien ne se crée, tout se conserve »
 - Présent (qualitativement) chez Aristote : dans un changement, la *forme* [μορφή] change mais la *substance* [ύλο] se conserve.
 - Quantifié par Lavoisier: les masses totales ne changent pas
- Lavoisier définit les *éléments* comme les substances que l'on ne peut séparer **expérimentalement** en composantes
 - ➔ rejet de l'atomisme
 - ➔ liste des éléments
 - ➔ liste des **affinités**
 - qui réagit avec quoi ?
 - et quel est le résultat ?



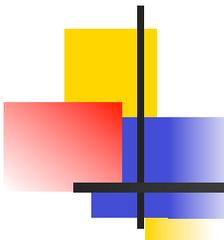
	Noms nouveaux.	Noms anciens correspondans.
	Lumière.....	Lumière. Chaleur. Principe de la chaleur.
	Calorique.....	Fluide igné. Feu. Matière du feu & de la chaleur.
Substances simples qui appartiennent aux trois règnes & qu'on peut regarder comme les élémens des corps.	Oxygène.....	Air déphlogistiqué. Air empiréal. Air vital. Base de l'air vital.
	Azote.....	Gaz phlogistiqué. Mofete. Base de la mofete.
	Hydrogène.....	Gaz inflammable. Base du gaz inflammable.
Substances simples non métalliques oxidables & acidifiables.	Soufre.....	Soufre.
	Phosphore.....	Phosphore.
	Carbone.....	Charbon pur.
	Radical muriatique.	Inconnu.
	Radical fluorique.	Inconnu.
	Radical boracique..	Inconnu.
	Antimoine.....	Antimoine.
	Argent.....	Argent.
	Arsenic.....	Arsenic.
	Bismuth.....	Bismuth.
	Cobalt.....	Cobalt.
	Cuivre.....	Cuivre.
	Etain.....	Etain.
Substances simples métalliques oxidables & acidifiables.	Fer.....	Fer.
	Manganèse.....	Manganèse.
	Mercure.....	Mercure.
	Molybdène.....	Molybdène.
	Nickel.....	Nickel.
	Or.....	Or.
	Platine.....	Platine.
	Plomb.....	Plomb.
	Tungstène.....	Tungstène.
	Zinc.....	Zinc.
Substances simples salifiables terreuses.	Chaux.....	Terre calcaire, chaux.
	Magnésie.....	Magnésie, base du sel d'Epfom.
	Baryte.....	Baryte, terre pesante.
	Alumine.....	Argile, terre de l'alun, base de l'alun.
	Silice.....	Terre siliceuse, terre vitrifiable.

Un élément qui n'en est pas un : le calorique

- Chauffer de la glace la fait fondre mais n'augmente pas sa température
 - chaleur latente de fusion (rupture des liaisons moléculaires)
- → idée que chaleur \neq température
- Black (1761) : eau = glace + calorique
(et vapeur = eau + calorique)
- Calorique = élément chimique comme un autre (→ ni créé ni détruit mais conservé dans toute transformation)
- Diffusion → la chaleur passe d'un corps chaud (= riche en calorique) à un corps froid (= pauvre en calorique)
- Rumford (1798) : on peut par **frottement** générer des quantités *illimitées* de calorique
- → non conservation → notion inutile

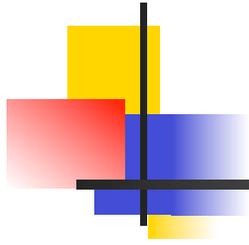


- Mais encore utilisée par Carnot en 1824



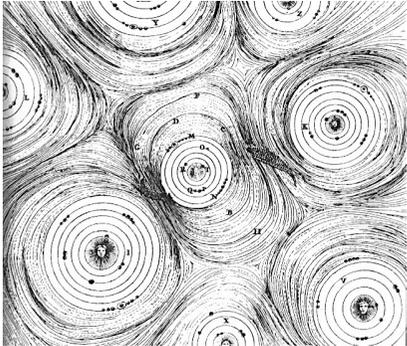
Mais quand allons nous parler des atomes ?





ATOMES MOLÉCULES ET CHIMISTES

Les atomistes des Lumières

- Transition \pm progressive
 - physique du continu (Descartes)
 - A black and white diagram showing several interlocking vortices, each with a central point and concentric circular lines representing the flow of matter. The vortices are arranged in a way that they appear to be moving and interacting with each other.
 - \rightarrow physique des corpuscules (Newton)
- Newton
 - atomes soumis à des forces
 - atome \rightarrow *masse* (corps dense \Leftrightarrow faible distance interatomique ?)
 - force \rightarrow propriété de l'atome ? Des paires d'atomes ?

- Grands efforts pour expliquer en termes d'atomes et de forces
 - la gravitation
 - la lumière
 - la cohésion des matériaux
 - leur élasticité
 - les frottements
 - la pression
 - la chaleur
 - ...
- \rightarrow des forces partout !
 - tensions de surface
 - frottements
 - forces électriques attractives, répulsives
 - forces magnétiques
 - \rightarrow propriétés nouvelles des atomes, comme la charge électrique
- Mais la chimie n'utilise pas les atomes !



Proust et Dalton

- Joseph Louis Proust (1754-1826)
- Loi des proportions définies (1794)

- dans tout corps composé, les proportions des constituants sont identiques *quelle que soit la façon de l'obtenir*

- vert-de-gris ou carbonate de cuivre de synthèse → mêmes proportions de cuivre, carbone et oxygène

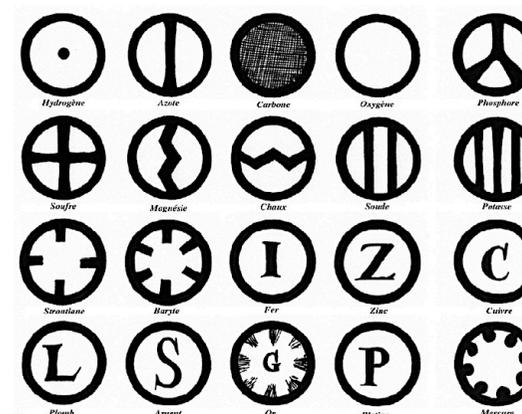
- → controverse avec Berthollet

- La chimie n'est pas de la cuisine !



- John Dalton (1766-1844)
- Explique en 1803 la loi de Proust en supposant la matière formée d'**atomes différents** (un type par élément) se combinant en proportions définies

- liste initiale (H, C, N, O, P, S) ensuite élargie, ainsi que leurs composés
- Estime la masse de l'atome d'azote à 5 fois celle de celui d'hydrogène [14], celle de l'atome d'oxygène à 7 [16]
- suggère (1808) des symboles, sans succès :



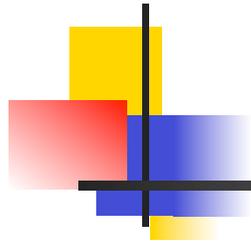
Avogadro, Berzélius, et les molécules



- **Loi des proportions multiples** (Dalton)
 - si deux corps peuvent former plusieurs composés, les rapports de masse sont des rapports de nombres entiers
 - oxydes d'azote : NO, N₂O, NO₂, N₂O₃ et N₂O₅
 - expliquée par la théorie atomique
- **Lois de Charles et de Gay-Lussac**
 - pression*volume/température = constante (*loi des gaz parfaits*)
 - les gaz réagissent entre eux dans des rapports **volumétriques** simples
- **Amedeo Avogadro**
 - cela s'explique si un volume donné de gaz contient toujours **le même nombre** de « molécules composites » quel que soit le gaz
 - ⇒ hydrogène gazeux = H₂, eau = H₂O ...

- **Jöns Jacob Berzelius (1779-1848)**
 - découvrit plusieurs nouveaux éléments (Ce, Se, Th, Li, V, Si, Zr, Ti)
 - travaux sur fluor, soufre, phosphore...
 - allotropie (graphite ≠ diamant, O₂ ≠ O₃)
 - chimie organique (protéines)
 - symboles actuels
 - catalyse
 - isomérisation (C₂H₆O : éthanol CH₃-CH₂-OH ou méthoxyméthane CH₃-O-CH₃)
 - dualisme électrochimique (1819)
 - *toute molécule est l'union de 2 parties (radicaux), une électropositive et une électronégative*
 - *☞ échelle allant de l'oxygène (-) à l'hydrogène (+)*
 - *mais quid des molécules d'hydrogène, de chlore ou d'oxygène ?*

Nombre d'Avogadro : 1g d'hydrogène = 6*10²³ atomes



ÉLECTRICITÉ ÉLECTROCHIMIE & CHIMIE

L'électricité

- L'ambre (ἤλεκτρον) frotté avec une fourrure attire de petits objets
 - verre, soufre, cire, résine

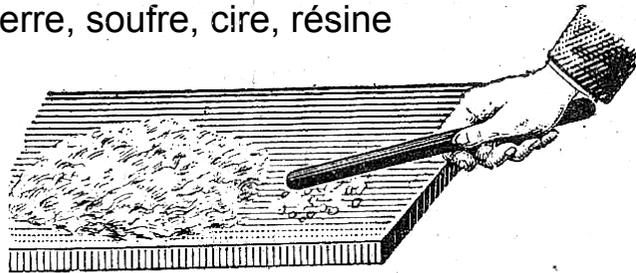


Fig. 217. — Attraction des corps légers par la résine frottée.

- dû au frottement ou à la chaleur ?
- un fluide (*effluvium*) émanant du corps mais indépendant de lui (Gilbert 1600)
- découverte de la conduction (Gray 1729)
- deux types d'électricité (du Fay 1733): vitreuse et résineuse

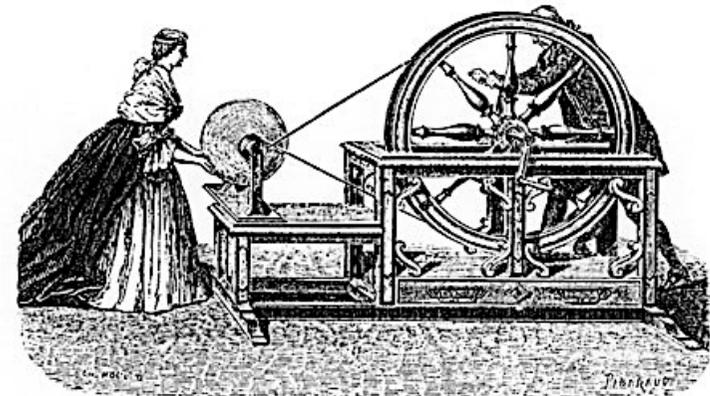
- Question ouverte (→ fin 19° siècle)

- deux fluides différents (Nollet 1743) ?
- ou un seul (Franklin 1758) ?
- et dans ce cas

1. électricité vitreuse = excédent (électricité **positive**)
2. électricité résineuse = déficit (électricité **négative**)

- En fait les deux idées sont justes

- il existe des charges positives (**protons**)
- et des charges négatives (**électrons**)



Machine électrostatique

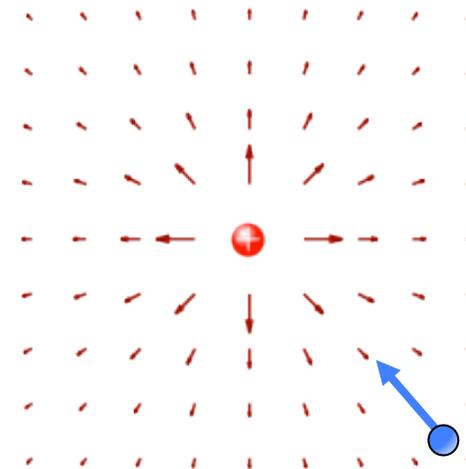
Forces et champs : Faraday

- Découverte progressive des forces entre corps électriquement chargés
 - Robinson (1769) : répulsion en $1/r^2$
 - Cavendish (1775) : attraction en $1/r^2$
 - Coulomb (1785) : force en $1/r^2$ et proportionnelle aux charges q_1 et q_2

$$\mathbf{F} = q_1 q_2 / r^2$$

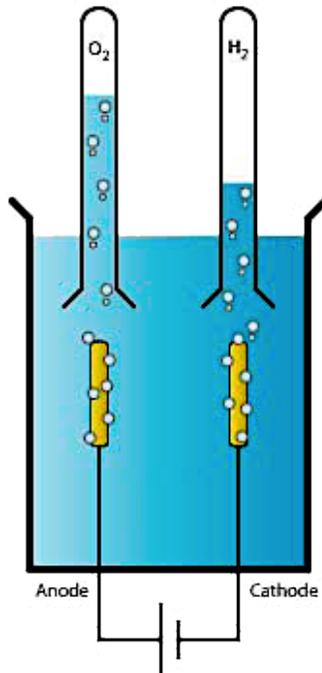
- *Similarité avec la loi de la gravitation de Newton*
- Faraday
 - une charge q_1 crée à distance r un champ électrique $\mathbf{E} = q_1 / r^2$
 - une charge q_2 placée dans un champ électrique \mathbf{E} subit une force $\mathbf{F} = q_2 \mathbf{E}$

- La notion de champ ↔ continu
 - → interprétation naturelle de la décroissance en $1/r^2$
 - → notion de « ligne de champ »
 - → une ligne de champ n'apparaît et ne disparaît qu'à l'emplacement d'une charge électrique
 - → notion de potentiel électrique V (↔ énergie potentielle $U = qV$)



L'électrolyse

- Découverte accidentelle (Nicholson & Carlisle 1800) ➡ décomposition de l'eau en hydrogène et oxygène



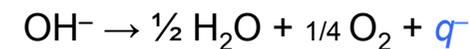
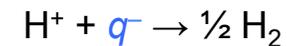
- ➡ décomposition d'autres substances (Davy)

- Avec des sels fondus ou dissous

- métal côté – sodium
- gaz côté + chlore
- ⇒ découverte du sodium, du potassium...

- Théorie : Faraday (encore)

- dissociation en ions de charges + et –
- attirés par les électrodes
- auxquelles ils prennent ou cèdent des charges
- redevenant ainsi des « atomes » neutres

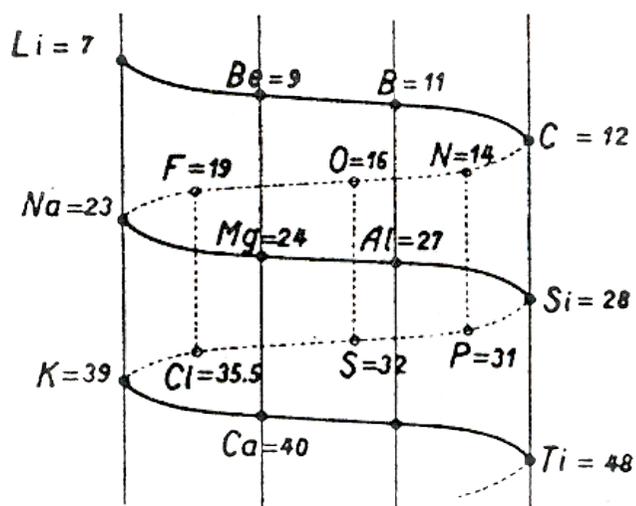


- Toujours dans les mêmes proportions

- ⇒ unité de charge électrique définie par le dépôt d'une quantité donnée (d'argent)

Classer les éléments chimiques

- Découverte de nouveaux éléments
- → régularités observées
 - fluor, chlore, brome, iode...
 - lithium, sodium, potassium...
 - carbone, silicium...
- → très nombreux essais de classement



« vis tellurique » de Chancourtois

- Dmitri Ivanovitch Mendeleïev (1834-1907)
 - éléments rangés par masses croissantes
 - dans un tableau : même rangée ⇒ mêmes propriétés chimiques
 - en laissant des trous pour des éléments à découvrir
 - ⇒ **prédictif !**

ОПЫТЪ СИСТЕМЫ ЭЛЕМЕНТОВЪ.

ОСНОВАННОЙ НА ИХЪ АТОМНОМЪ ВѢСѢ И ХИМИЧЕСКОМЪ СХОДСТВѢ.

			Ti=50	Zr=90	?=180.
			V=51	Nb=94	Ta=182.
			Cr=52	Mo=96	W=186.
			Mn=55	Rh=104,4	Pt=197,1.
			Fe=56	Rn=104,4	Ir=198.
			Ni=58,7	Co=58,9	Pd=106,4
			Cu=63,5	Ag=107,9	Hg=200,5.
H=1			Be=9,0	Mg=24,3	Zn=65,4
			B=10,8	Al=26,9	Si=28,1
			C=12,0	N=14,0	O=16,0
			F=18,9	Cl=35,5	Br=79,9
			Li=7	Na=23	K=39
			Ca=40	Sr=87,6	Ba=137,3
			?=45	Ce=92	?Er=56
			?Yt=60	Di=95	?In=75,5
			?In=75,5	Th=118,7	

Le tableau se remplit

TABLEAU PÉRIODIQUE DES ÉLÉMENTS

PÉRIODE	GROUPE																				
	1 IA	2 IIA		3-10										11 IB	12 IIB	13 IIIA	14 IVA	15 VA	16 VIA	17 VIIA	18 VIIIA
1	1 1.0079 H HYDROGÈNE															5 10.811 B BORE	6 12.011 C CARBONE	7 14.007 N AZOTE	8 15.999 O OXYGÈNE	9 18.998 F FLUOR	10 20.180 Ne NÉON
2	3 6.941 Li LITHIUM	4 9.0122 Be BÉRYLLIUM													13 26.982 Al ALUMINIUM	14 28.086 Si SILICIUM	15 30.974 P PHOSPHORE	16 32.065 S SOUFRE	17 35.453 Cl CHLORE	18 39.948 Ar ARGON	
3	11 22.990 Na SODIUM	12 24.305 Mg MAGNÉSIMUM	3 3 IIIB	4 4 IVB	5 5 VB	6 6 VIB	7 7 VIIIB	8 8 VIIIB	9 9 VIIIB	10 10 VIIIB	11 11 IB	12 12 IIB	31 69.723 Ga GALLIUM	32 72.64 Ge GERMANIUM	33 74.922 As ARSENIC	34 78.96 Se SÉLÉNIUM	35 79.904 Br BROME	36 83.80 Kr KRYPTON			
4	19 39.098 K POTASSIUM	20 40.078 Ca CALCIUM	21 44.956 Sc SCANDIUM	22 47.867 Ti TITANE	23 50.942 V VANADIUM	24 51.996 Cr CHROME	25 54.938 Mn MANGANÈSE	26 55.845 Fe FER	27 58.933 Co COBALT	28 58.693 Ni NICKEL	29 63.546 Cu CUIVRE	30 65.39 Zn ZINC	31 69.723 Ga GALLIUM	32 72.64 Ge GERMANIUM	33 74.922 As ARSENIC	34 78.96 Se SÉLÉNIUM	35 79.904 Br BROME	36 83.80 Kr KRYPTON			
5	37 85.468 Rb RUBIDIUM	38 87.62 Sr STRONTIUM	39 88.906 Y YTTRIUM	40 91.224 Zr ZIRCONIUM	41 92.906 Nb NIOBIUM	42 95.94 Mo MOLYBDÈNE	43 (98) Tc TECHNÉTIUM	44 101.07 Ru RUTHÉNIUM	45 102.91 Rh RHODIUM	46 106.42 Pd PALLADIUM	47 107.87 Ag ARGENT	48 112.41 Cd CADMIUM	49 114.82 In INDIUM	50 118.71 Sn ETAIN	51 121.76 Sb ANTIMOINE	52 127.60 Te TELLURE	53 126.90 I IODE	54 131.29 Xe XÉNON			
6	55 132.91 Cs CÉSIMUM	56 137.33 Ba BARYUM	57-71 La-Lu Lanthanides	72 178.49 Hf HAFNIUM	73 180.85 Ta TANTALE	74 183.84 W TUNGSTÈNE	75 186.21 Re RHÉNIUM	76 190.23 Os OSMIUM	77 192.22 Ir IRIDIUM	78 195.08 Pt PLATINE	79 196.97 Au OR	80 200.59 Hg MERCURE	81 204.38 Tl THALLIUM	82 207.2 Pb PLOMB	83 208.98 Bi BISMUTH	84 (209) Po POLONIUM	85 (210) At ASTATE	86 (222) Rn RADON			
7	87 (223) Fr FRANCIUM	88 (226) Ra RADIUM	89-103 Ac-Lr Actinides	104 (261) Rf RUTHERFORDIUM	105 (262) Db DUBNIUM	106 (266) Sg SEABORGIUM	107 (264) Bh BOHRIUM	108 (277) Hs HASSIUM	109 (268) Mt MEITNERIUM	110 (281) Uun UNUNNIUM	111 (272) Uuu UNUNUNIUM	112 (285) Uub UNUNBIUM	114 (289) Uuq UNUNQUADIUM								
				Lanthanides																	
				57 138.91 La LANTHANE	58 140.12 Ce CÉRIUM	59 140.91 Pr PRASÉODYME	60 144.24 Nd NÉODYME	61 (145) Pm PROMÉTHIUM	62 150.36 Sm SAMARIUM	63 151.96 Eu EUROPIUM	64 157.25 Gd GADOLINIUM	65 158.93 Tb TERBIUM	66 162.50 Dy DYSPROSIUM	67 164.93 Ho HOLMIUM	68 167.26 Er ERBIUM	69 168.93 Tm THULIUM	70 173.04 Yb YTTERBIUM	71 174.97 Lu LUTÉTIUM			
				Actinides																	
				89 (227) Ac ACTINIUM	90 232.04 Th THORIUM	91 231.04 Pa PROTACTINIUM	92 238.03 U URANIUM	93 (237) Np NEPTUNIUM	94 (244) Pu PLUTONIUM	95 (243) Am AMÉRICIUM	96 (247) Cm CURIUM	97 (247) Bk BERKÉLIUM	98 (251) Cf CALIFORNIUM	99 (252) Es EINSTEINIUM	100 (257) Fm FERMIUM	101 (258) Md MENDELÉVIUM	102 (259) No NOBÉLIUM	103 (262) Lr LAWRENCIUM			

NUMÉRO DU GROUPE RECOMMANDATIONS DE L'U.T.A.C. (1985)

NUMÉRO DU GROUPE CHEMICAL ABSTRACT SERVICE (1986)

NUMÉRO DU GROUPE IUPAC (1985)

NUMÉRO DU GROUPE IUPAC (1986)

NUMÉRO ATOMIQUE

SYMBÔLE

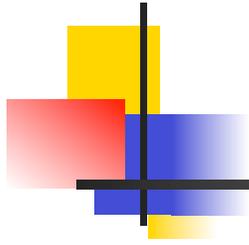
BORE

MASSE ATOMIQUE RELATIVE (1)

NOM DE L'ÉLÉMENT

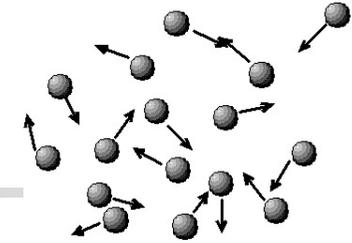
La masse atomique relative est donnée avec cinq chiffres significatifs. Pour les éléments qui n'ont pas de nucléides stables, la valeur entre parenthèses indique le nombre de masse de l'isotope de l'élément ayant la durée de vie la plus grande.

Toutefois, pour les trois éléments Th, Pa et U qui ont une composition isotopique terrestre connue, une masse atomique est indiquée.



ET PENDANT CE TEMPS, LES PHYSICIENS...

La théorie cinétique des gaz

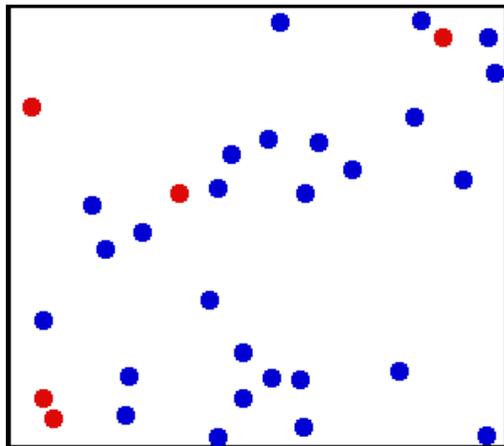


■ Thermodynamique

1. conservation de l'énergie
2. impossibilité de conversion totale de la chaleur en travail
3. impossibilité de parvenir à $T = 0$

■ Lois retrouvées si

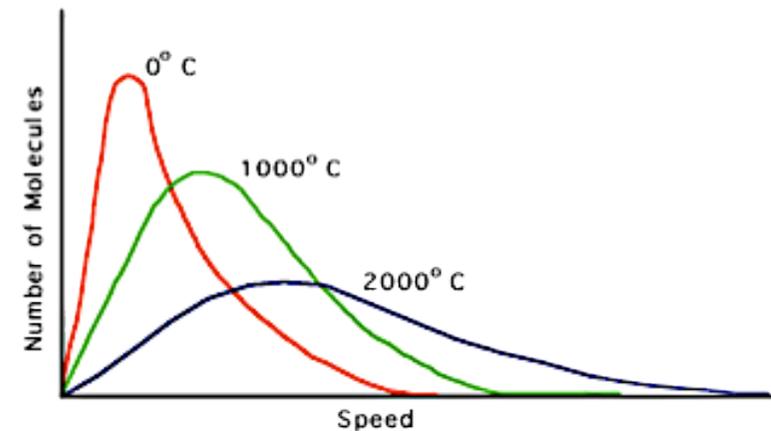
- chaleur \equiv mouvement désordonné d'un grand nombre de **particules**
- échangeant de l'énergie cinétique lors de collisions entre elles, ou avec les parois (👉 **pression**)



■ Maxwell (1859) & Boltzmann (1872)

- la distribution de vitesse des particules tend toujours vers une forme limite :

$$N(v) = N_{\text{tot}} 4\pi \left[\frac{m}{2\pi kT} \right]^{3/2} v^2 \exp\left\{ -\frac{mv^2}{2kT} \right\}$$



- \rightarrow énergie cinétique *moyenne* des particules

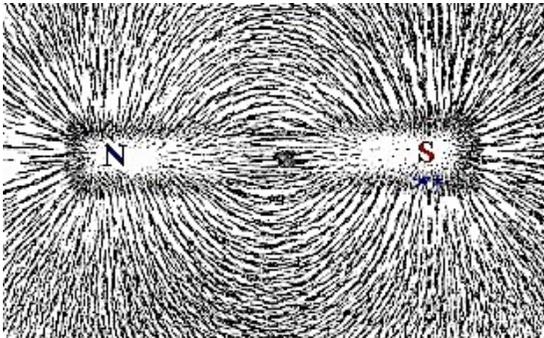
$$E_{\text{cin}} = \frac{1}{2} m \langle v^2 \rangle = \frac{1}{2} k T \quad (* \text{ nb d}^\circ \text{ liberté})$$

- E en joules, T en kelvins
- $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$

Le magnétisme

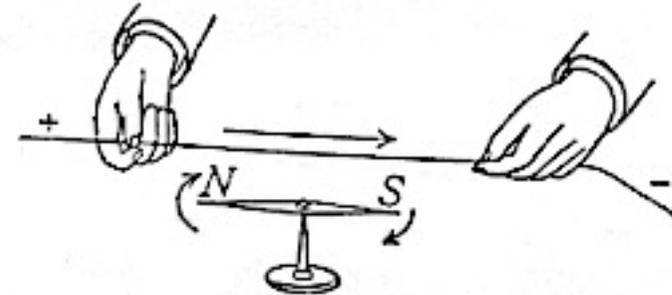


- Thalès : effets de la « pierre de Magnésie » sur le fer qui en est extrait
- Boussole d'usage courant en 1180 (Neckam)
- Pierre de Maricourt (1269) : pôles



- William Gilbert (*De magnete* 1600)
 - électricité : l'ambre attire n'importe quoi mais après avoir été frottée
 - la magnétite n'attire que le fer, mais en toutes circonstances
 - ⇒ deux phénomènes différents ?

- Mais Ørsted (1820) :

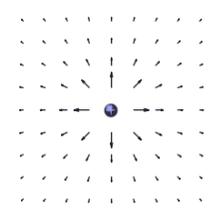
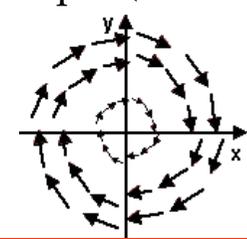


- l'aiguille pivote \perp fil
- l'orientation s'inverse avec le sens du courant (\rightarrow télégraphe !)
- Ampère (1820)
 - les courants s'attirent comme des aimants (attraction si $\uparrow\uparrow$ répulsion si $\uparrow\downarrow$)
 - champ magnétique : un courant I crée à distance d un champ $B \propto I/d$
 - lequel crée une force F sur les charges q (en mouvement \rightarrow vitesse v) du 2^o courant

$$F = q \mathbf{v} \times \mathbf{B}$$

Électromagnétisme

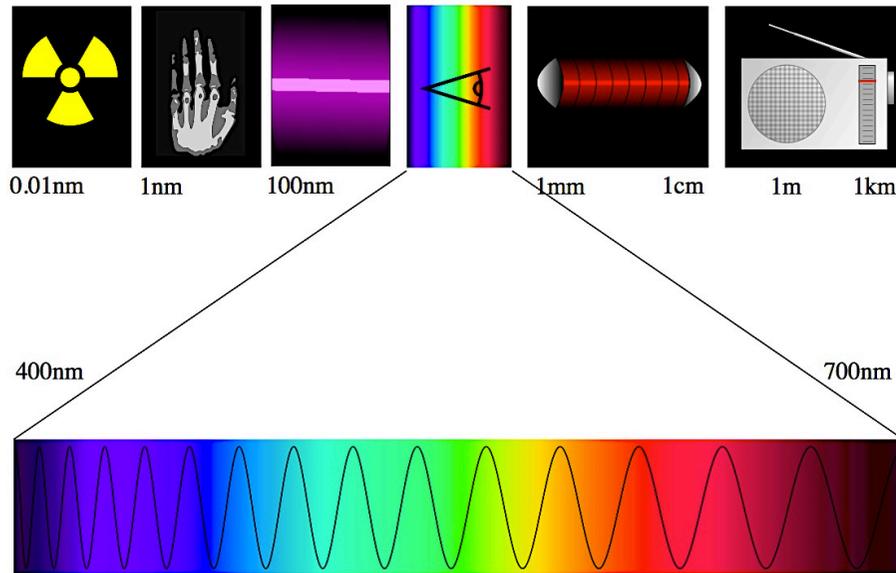
- Et Maxwell dit...

Gauss	$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$	Divergence du champ électrique \Leftrightarrow charge électrique <div style="text-align: center; margin-top: 10px;">  </div>
	$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$	Divergence nulle du champ magnétique \Leftrightarrow pas de charge magnétique (monopôle)
Faraday	$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$	Rotationnel du champ électrique \Leftrightarrow variation du champ magnétique (induction) <div style="text-align: center; margin-top: 10px;">  </div>
Ampère	$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$	Rotationnel du champ magnétique \Leftrightarrow courant électrique

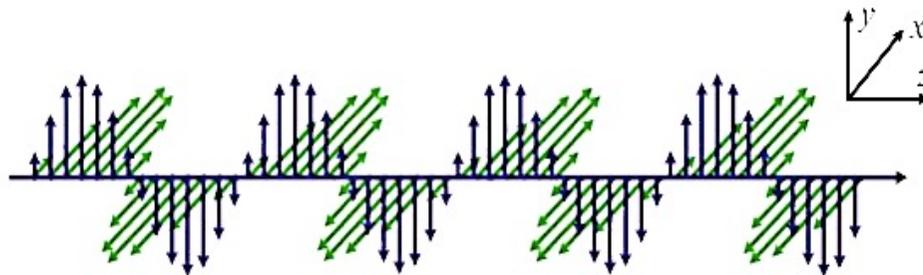
...et la lumière fut !



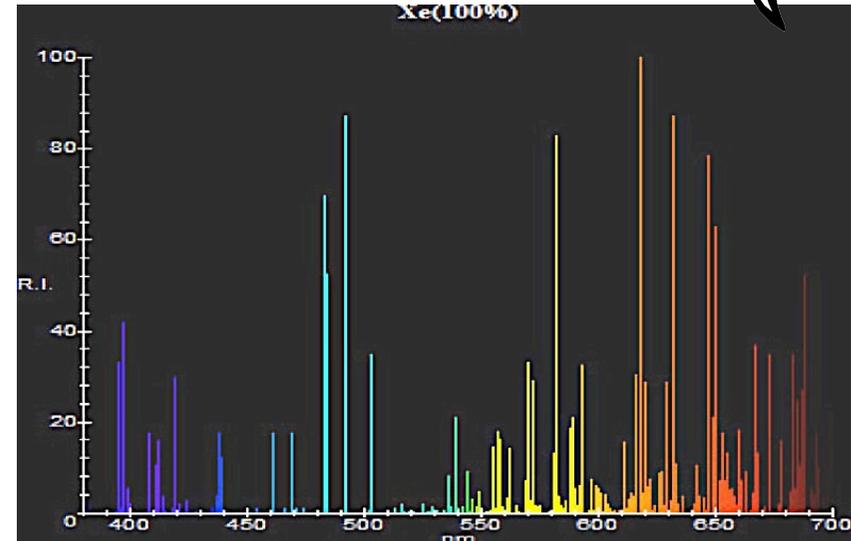
- Une onde, bien sûr,



mais **électromagnétique** !



- Xénon



- Mais la théorie de Maxwell ne permet d'expliquer

- ni les spectres continus
- ni les spectres de raies
- ni l'effet photoélectrique

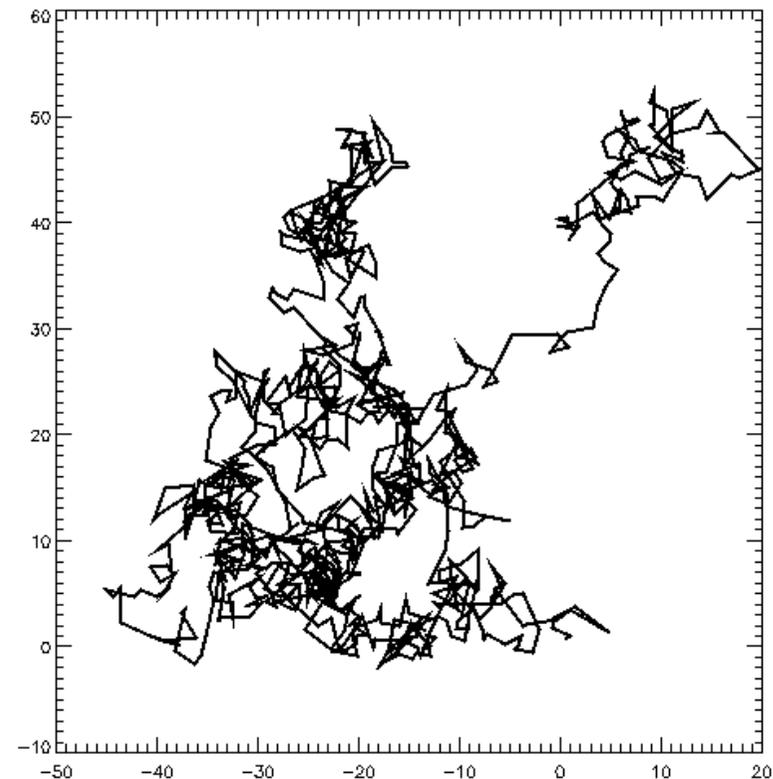


Les atomes existent-ils vraiment ?

- Indications nombreuses
 - **interprétation** simple de la loi des proportions définies, de la loi des proportions multiples, de la loi des gaz parfaits...
 - **interprétation** simple des réactions chimiques, des isoméries et des allotropies
 - **explication** de la thermodynamique par la théorie cinétique des gaz
- Mais aucune **preuve directe**
- Il était parfaitement possible de décrire toute la physique et la chimie par des quantités continues
- → **refus de l'atomisme** : énergétistes et équivalentistes (Duhem, Mach, Helmholtz, Planck, Berthelot, Dumas, Ostwald, Rankine...)

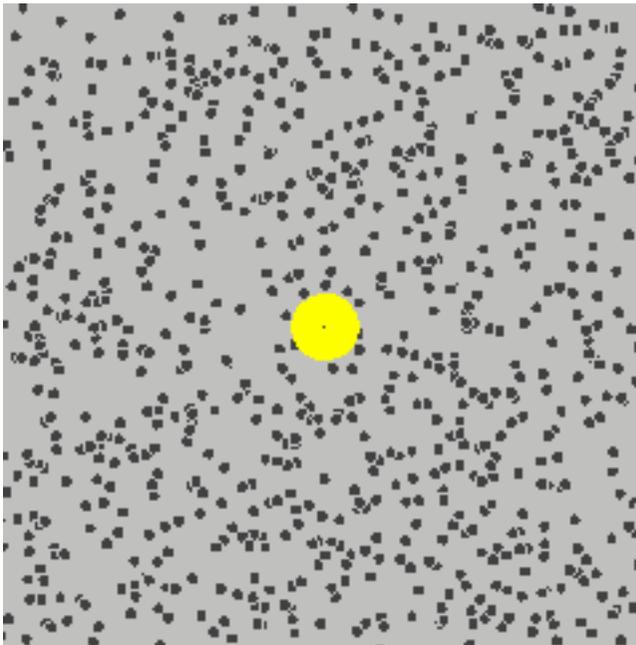
Sauf

- la spectroscopie (corps noir et raies)
- l'effet photoélectrique
- et le mouvement brownien

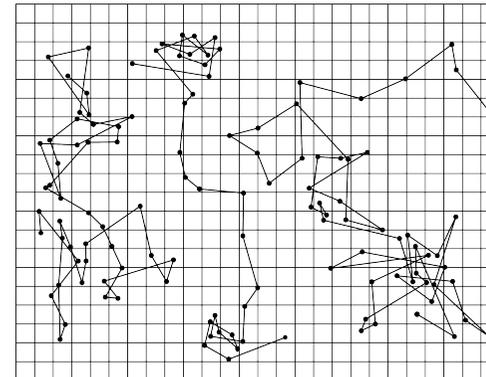


Mouvement brownien

- Lucrèce (~60 av. JC)
 - danse de la poussière dans un rai de lumière = preuve de l'existence des atomes (en fait non: microturbulences)
- Robert Brown (1827)
 - agitation incessante de grains de pollen dans l'eau



- Albert Einstein (1905)
 - explicable par des collisions avec les molécules (→ taille et nombre des molécules → nombre d'Avogadro)
- Jean Perrin (1909)
 - vérification expérimentale des prédictions

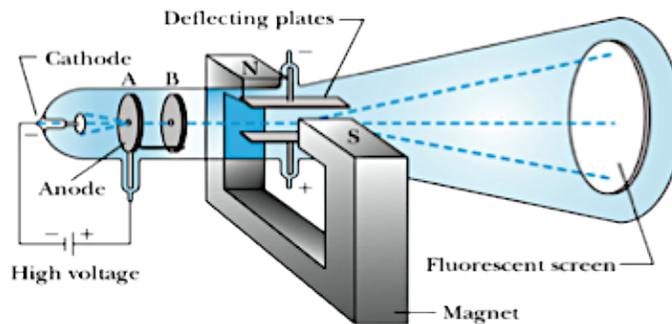


- ⇒ les atomes existent réellement
- ... *mais ils ne sont pas insécables.*

La découverte de l'électron et de la radioactivité

■ Joseph John Thomson – 1897

- déviation des rayons cathodiques par des champs électrique et magnétique



- permet de calculer le rapport masse/charge électrique de ce qui est dévié
- \Rightarrow 1/2000 de celui des ions hydrogène
- \Rightarrow électron = **corpuscule** très léger

■ \Rightarrow particule **sub**atomique



■ Becquerel (1896)

- émission de rayonnement par l'uranium

■ Rutherford (1898)

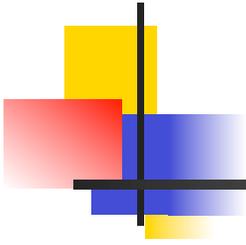
- deux types de rayonnement, α et β

■ Les Curie (1898)

- polonium et radium

■ Rutherford (1900 \rightarrow 1920)

- certains atomes se transforment en d'autres (\Rightarrow les atomes ne sont pas immuables)
- l'atome est formé d'un très petit **noyau** compact entouré d'électrons
- le noyau est formé de **protons** (=noyau de l'hydrogène) et d'**électrons** de **neutrons**



Merci de votre attention !

