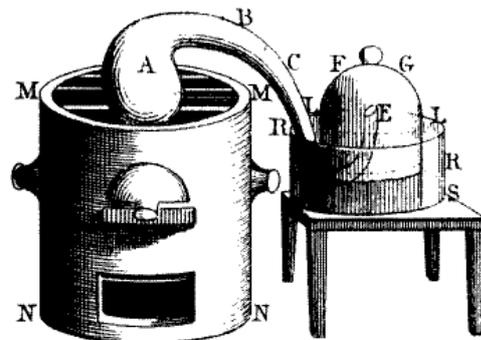




Eric JACQUES



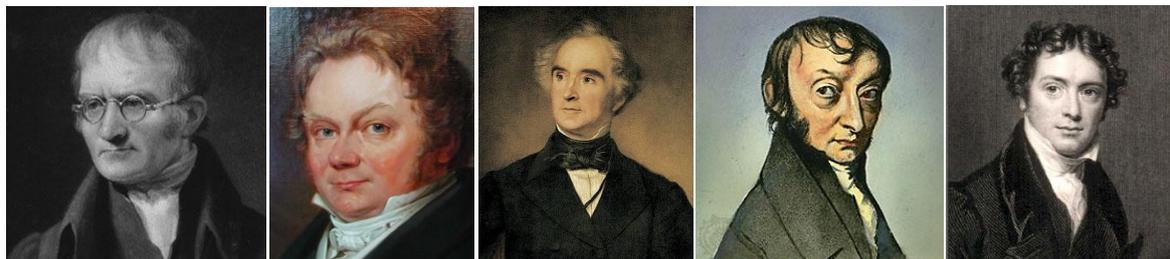
HISTOIRE DES SCIENCES

Pour accompagner les programmes de Sciences Physiques et Chimiques
Des classes de Lycée Général & Technologique



TOME I :

le programme de Seconde



Introduction

Ce document propose de suivre l'histoire des sciences dans la progression du programme de Seconde tel qu'il a été conçu et dans l'ordre où il a été écrit. On y retrouve les trois grands thèmes (Santé, Sport et Univers) et dans chaque thème, la description partie par partie des idées scientifiques qui demandent une contextualisation historique.

Au début de chaque partie traitée se trouve rappelées les idées à évoquer, les scientifiques emblématiques qui les ont traitées puis une chronologie qui entoure ces concepts et permet de les placer dans leur cadre historique. Lorsque cela m'a semblé nécessaire, un court commentaire ou un résumé des faits marquants de la période a été effectué. Le choix est resté celui de la simplicité et lorsqu'il semblait intéressant de préciser certaines notions, de rétablir «des vérités» ou d'éclaircir des points associés à des préjugés ou des mythes fabriqués par l'histoire des sciences voire par les scientifiques eux-mêmes (citons les miroirs ardents d'Archimède ou la pomme de Newton), j'ai réalisé un court commentaire pour le faire.

Quand cela fut possible, les éditions originales des textes furent consultées notamment sur les travaux de Newton, Descartes, Young, Fresnel, Coulomb, Arago, Wurtz, Avogadro, Ampère, Biot, Heaviside, Gibbs, Lalande, Lavoisier dont les ouvrages se retrouvent sur Scribd, BnF, ou sur des sites spécialisés comme Eduscol, ENS Lyon ou encore le site du CNRS. La version originale ou sa traduction d'époque furent les documents de référence pour que transparaissent l'idée originale et originelle du savant en question. Les dates proposées indiquent généralement les dates de parution et non les dates de conception des théories ou des découvertes car celles-ci sont très fluctuantes. Pour certains textes, il existe plusieurs éditions dues à l'auteur qui a amélioré sa théorie, fait disparaître certains concepts, modifié certaines idées.

Quelques illustrations à caractère historique ont également été dispensées dans ce document, copie des originaux que l'on peut trouver sur Gallica ou d'autres sites spécialisés afin d'illustrer les conceptions scientifiques telles qu'on les voyait au temps de leur concepteur.

Le présent document étant également destiné à la formation en Histoire des Sciences inscrite au Plan Académique pour l'année 2014 – 2015, nombre de commentaires, d'illustrations et d'anecdotes supplémentaires viendront le compléter durant ces journées de formation.

J'espère qu'à le parcourir, le lecteur occasionnel ou assidu y trouvera un outil efficace ou divertissant qui saura répondre à ses attentes.

Enfin, j'adresse tous mes remerciements à Madame COLOGNAC, IA-IPR de Sciences Physiques qui a pris le temps de le relire et de me faire part de ses conseils avisés.

Eric JACQUES

LA SANTE

Le Diagnostic Médical

- Signaux Périodiques
- Ondes Sonores, Ondes Electromagnétiques
- Propagation rectiligne de la lumière
- Young, Fresnel
- Doppler, Hertz
- Descartes, Newton

Signaux Périodiques : période, fréquence, tension

La période d'un phénomène est connue depuis que l'homme observe la nature. C'est au retour de la Lune et du Soleil à des positions spatiales identiques que sont apparues les périodicités spatiales, temporelles, les saisons, les calendriers. Le temps, cependant, « cette prison à roulette », se quantifie par l'évolution d'un phénomène. On peut le mesurer à l'aide du soleil, de la combustion d'une bougie que l'on a graduée, de l'écoulement du sable ou de l'eau puis de phénomènes oscillants comme le ressort d'une montre. Le temps est relié à une notion de périodicité et la période se définit donc par la durée nécessaire à un phénomène périodique pour se reproduire identique à lui-même. L'unité de temps est bien évidemment la seconde que l'on tenta de définir à l'aide du battement du pendule, définition fautive puisque cette période varie avec la position terrestre.

Le mot temps vient du latin *tempus*. La seconde est la seconde partie de la division de l'heure, telle que l'appelaient les romains *minutum secundum*, menue partie de la seconde division de l'heure. Minute vient de *minutus*, menu et du latin médiéval *minuta*. Le mot heure vient de *hora*... La première définition proposée pour la seconde est la $\frac{1}{86400}$ fraction du jour solaire. Elle sera en vigueur jusqu'en 1960.

1887, *Über sehr schnelle elektrische Schwingungen*, Sur les vibrations électriques très rapides, **d'Heinrich Hertz**.

Hertz étudie les phénomènes électromagnétiques sous l'impulsion de **Kirchhoff** et de **Helmholtz**. Il travaille sur les théories de **Maxwell**, **Weber** et **Helmholtz**. Il met au point un dispositif électrique produisant d'un côté des ondes électromagnétiques et de l'autre un récepteur que l'on nomme éclateur qui se compose d'un anneau de **Reiss** terminé par deux pointes de cuivre entre lesquelles apparaissent des étincelles lorsque les ondes sont détectées. Hertz vient de mettre en évidence l'existence des ondes radio qui porteront par la suite son nom, les ondes hertziennes.

L'expérience d'Hertz confirme totalement l'intuition de **Faraday** et les calculs de **Maxwell**. En séparant d'une distance allant jusqu'à 12 mètres l'émetteur et l'éclateur et en utilisant une plaque de zinc comme générateur d'ondes stationnaires, Hertz mesure les ventres et les nœuds électromagnétiques de l'onde, sa périodicité spatiale (de l'ordre de 4m) et sa vitesse pour laquelle il retrouve la valeur de la vitesse de la lumière.

L'unité de fréquence, le nombre de battements par seconde d'un phénomène périodique a été nommé en son honneur en 1930 par l'IEC (International Electrotechnical Commission) puis par la Conférence Générale des Poids et Mesures de 1960. La notion de fréquence est présente dans les travaux de Newton (1687), Young (1802) ou encore Fresnel (1820).

Ondes Sonores, Ondes électromagnétiques

Dès l'Antiquité, **Pythagore** s'intéresse à une théorie de la musique. Il forge les harmoniques, les quartes, les quintes. En pinçant à divers endroits une corde tendue, il obtient les 7 notes de la gamme chromatique.

1787, **Ernst Chladni** obtient des figures géométriques par frottement d'un archet sur une plaque de verre couverte de sable. Il met en évidence les ondes sonores stationnaires.

1822, première mesure de la vitesse du son effectuée par **Humboldt, Gay-Lussac et Arago** à Montlhéry. La mesure se fait entre deux points, l'un d'émission, l'autre de réception après détection d'un signal lumineux et émission d'un coup de canon.

1852, **Franz Melde** met en évidence les ondes stationnaires avec la corde qui porte son nom

1866, **August Kundt** réalise le même effet avec le tube qui porte son nom.

L'étude des ondes sonores va servir à comprendre et à conceptualiser les autres types d'ondes dont notamment les résultats particuliers que **Newton, Young et Fresnel** vont obtenir sur la lumière. Celle-ci sera ainsi qualifiée de phénomène ondulatoire (on évitera le mot vibratoire pour montrer que ces ondes ont des points communs mais aussi des différences). Ce n'est que plus tard que l'on comprendra, à la suite des travaux de **Faraday** et **Maxwell** que la nature de la lumière est électromagnétique. Quant aux ondes électromagnétiques proprement dites, c'est à **Ampère** puis à **Maxwell** que l'on doit la formulation théorique de leurs propriétés.

1800, **William Herschell** met en évidence l'existence de chaleur rayonnante en plaçant un thermomètre en dessous du rouge obtenu par décomposition de la lumière blanche par un prisme. Il constate une augmentation de température. On appellera plus tard cette chaleur rayonnante, l'infrarouge.

1801, **Johann Ritter** utilise une solution de chlorure d'argent qu'il expose au spectre de la lumière blanche. Il place son échantillon au-delà du violet et constate le noircissement des cristaux d'AgCl. Il en déduit l'existence de rayons chimiques que l'on appellera rayons ultraviolets.

1802, **Thomas Young** indique que les diverses couleurs représentent les diverses longueurs d'onde que peut prendre la lumière, en considérant celle-ci comme une onde (*On the theory of light and colors*).

Domaines de fréquences

1888, **Heinrich Hertz** met en évidence les ondes radio qui porteront le nom d'hertziennes

1895, **Wilhelm Roentgen** découvre par hasard de nouveaux rayons mystérieux qu'il nomme rayons X

1896, **Henri Becquerel** met en évidence par hasard la radioactivité naturelle à partir d'échantillons de sel d'uranium. Il nomme ces nouveaux rayons, les rayons uraniques.

1899, Ernest **Rutherford** nomme les rayonnements alpha et bêta à partir des travaux d'**Henri Becquerel**
1900, les rayons gamma sont identifiés par **Paul Villard**.
1903, **Rutherford** nomme les rayons de Villard, les rayons γ

En 1903-1904, **Blondlot**, professeur à l'université de Nancy croit découvrir un nouveau type de rayons qu'il baptise de la première lettre de sa ville, les rayons N. L'inexistence de ces rayons sera prouvée quelques années plus tard et ceux-ci disparaîtront après 1910. **Pierre Curie**, spécialiste en France des Rayons Cathodiques et prix Nobel de physique 1903, s'intéressa à ces fameux rayons auquel il ne croyait pas.

Propagation rectiligne de la lumière. Vitesse de la lumière dans le vide et dans l'air.

Descartes et **Newton** rappelèrent le fait que la lumière possède une propagation rectiligne dans *Dioptrique* (1637) et dans *Optique* (1704).

Les mesures « historiques » sur la vitesse de la lumière furent réalisées par **Römer** (1676), **Bradley** (1727), **Fizeau** (1849), **Foucault** (1850 et 1862), **Michelson** et **Morley** (1878). Dans les années 50, grâce au radar et aux lasers des mesures plus précises sont effectuées par **Essen** (1947, avec une cavité résonante), **Fröome** (1958 avec un interféromètre), ou encore **Evenson** (1972) avec un laser Hélium-Néon.

Galilée tenta de mesurer la vitesse de la lumière avec des lanternes dont ses assistants devaient enlever rapidement les caches.

Réflexion Totale et Réfraction : pratiquer une démarche expérimentale

Les phénomènes de réflexion sont connus depuis l'Antiquité et l'usage notamment des surfaces polies en bronze pour produire des miroirs. On connaît à ce sujet la légende des miroirs ardents de Syracuse, dressés par **Archimède** du haut des remparts de la cité fortifiée pour brûler les voiles des navires romains et provoquer des incendies à bord.

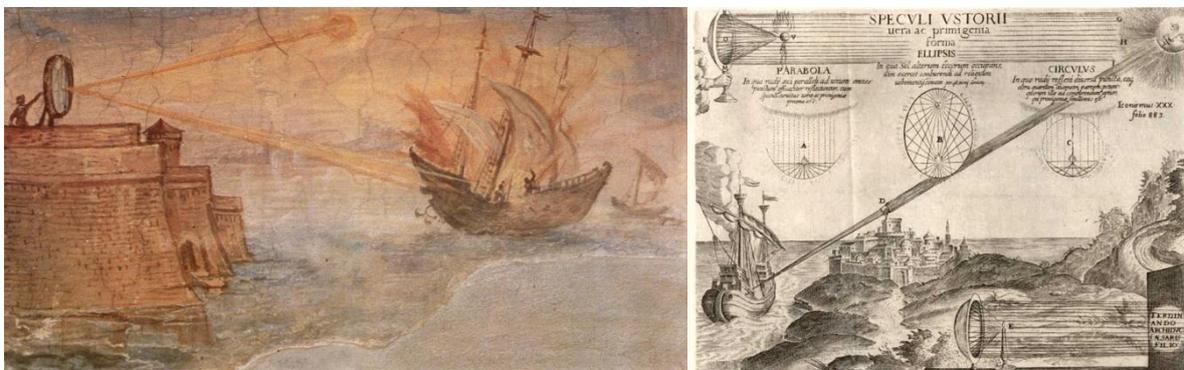


Tableau de Giulio Parigi et gravure anonyme des miroirs ardents d'Archimède

Produits rares et coûteux, les miroirs étaient composés d'une plaque de verre sur laquelle était déposée une plaque de plomb ou d'argent poli. Sous le règne d'Henri IV, le roi tenta d'organiser la fuite de quelques miroitiers pour en percer le secret. Des manufactures s'ouvrirent par la suite à Paris en 1634 et la production

industrielle démarrera vers 1665. En 1667, la fabrication est transférée dans la banlieue de Cherbourg où l'on achemine le bois, le douci, le poli et l'étamage et l'on commence la vente. En 1684, l'industrialisation des glaces est en plein essor et l'on trouve bientôt des glaces à bas prix.

La méthode d'étamage utilisée consistait à recouvrir la surface de verre avec un amalgame de mercure et d'étain. On commençait par déposer l'étain qui était poncé puis on ajoutait le mercure pour obtenir une surface lustrée.

La réfraction est déjà connue dans l'Antiquité. Tous les chasseurs en eau peu profonde qui utilisent la sagaie ou l'arc savent que l'endroit où ils voient le poisson n'est pas celui où il se trouve. Ce sera grâce aux travaux de Descartes et de Newton que les lois de la réfraction seront formulées pour la lumière blanche.

Dans notre monde de tous les jours la réfraction s'exprime au travers de nombreux phénomènes visuels comme la cassure d'une ligne plongée dans l'eau (fig. 1), les mirages (fig. 2 et 3), les arcs-en-ciel, les fontaines lumineuses (fig. 4), le principe du périscope. Les mirages « descendants » où l'on voit l'image du ciel se superposer sur le sol furent notamment observés par **Gaspard Monge** durant la campagne d'Egypte du **Général Bonaparte** ; il tenta d'en donner une explication. Les mirages ascendants, où un point situé au-delà de la ligne d'horizon est visible permirent à **Erik le Rouge** de découvrir le Groënland en 982. Les croisés avaient déjà observé ce genre de mirages, ayant l'impression de voir des châteaux se dresser au-dessus de la ligne d'horizon. Ce type de mirage, en l'honneur de la **fée Morgane** qui était dotée de ce pouvoir s'appelle un *fata morgana*.

Structure de la matière

- Un modèle de l'atome
- Espèces chimiques, corps pur et mélange
- Noyau, proton, neutron, électron
- Nombre de charge & Numéro atomique Z
- Charge électrique élémentaire.
- Dalton, Thomson, Rutherford
- Boyle, Newton, Lavoisier
- Rutherford, Chadwick, Thomson
- Mullikan, Moseley, Loschmidt, Perrin
- Du Fay, Nollet, Franklin, Coulomb

Un modèle de l'atome

On ne considèrera ici que les modèles modernes de l'atome, c'est-à-dire à partir des idées de Dalton dont le premier modèle date de 1804.

1804, Modèle de **John Dalton**. L'atome est comme une boule de billard qui représente un paquet d'espèces. Tout comme une boule, il est UN mais également composé d'un grand nombre d'espèces que l'on ne peut mesurer individuellement.

1904, Modèle de **Joseph Thomson**. L'atome est constitué d'une masse positive dans laquelle sont insérés les électrons, petits grains d'électricité négative.

1910, Modèle d'**Ernest Rutherford**. L'atome est constitué d'une charge centrale positive autour de laquelle gravitent les électrons, charges élémentaires négatives.

Pour les électrons, **Jean Perrin** proposera une trajectoire elliptique (vers 1900). **Hantaro Nagaoka** a l'idée (1900 – 1904) que les électrons sont tournants eux aussi, mais sur des trajectoires différentes comme les grains constituant les anneaux de Saturne. On a donc un modèle solaire et un modèle saturnien de l'atome à ajouter au modèle planétaire de Rutherford.

1913, **Niels Bohr** propose un modèle quantique de l'atome avec des trajectoires circulaires.

1915, **Arnold Sommerfeld**, associé à Bohr, propose un modèle quantique avec des trajectoires elliptiques que l'on va appeler orbitales.

1916, **Walther Kossel** donne un modèle sphérique de l'atome dont la dernière couche occupée par des électrons ne peut en contenir que huit. La même année, **Gilbert Newton Lewis**, fait la même chose avec un modèle cubique de l'atome.

1927, **Erwin Schrödinger** donne un modèle probabiliste de la description du mouvement des électrons formant un nuage autour du noyau de l'atome.

Espèces chimiques, corps pur et mélange

Les espèces chimiques dénombrées au temps de la chimie d'avant Lavoisier sont les acides, les alkalis, les métaux, les terres, les huiles, les esprits, les chaux, les sels, les précipités, les eaux, les mixtes, les airs. Au fur et à mesure que l'analyse chimique se met en place, des familles, des définitions, des séparations nettes et précises apparaissent. Si nous citons tous ces anciens termes c'est parce que certains coexistent encore aujourd'hui, trace de l'héritage alchimique de la chimie moderne.

Jusqu'au début du XX^e siècle, l'héritage d'Aristote et sa classification de la nature entre l'air, la terre, l'eau et le feu où se mélangent les notions de principe (archê) et d'élément (elementum) vont susciter tant d'interrogations et d'inadéquations avec la réalité que les chimistes vont finir par se débarrasser complètement de cette mythologie. Dans ce processus long et qui montre à quel point lorsqu'une idée est contre intuitive, même si elle est vraie, il est difficile de l'accepter (à l'inverse d'une idée fautive mais séduisante), les notions d'état,

d'espèces, d'éléments, de mélange, de corps purs, vont faire leur apparition et permettre de cerner la nature de la matière.

1675, **Lemery**, Cours de Chimie. « *Le nom de chimie vient du grec chûmos qui veut dire suc ou de cheein, qui veut dire fondre. Les arabes lui ont ajouté la particule al. La chymie est un art dont le but est de séparer les substances des mixtes* ». Rouelle conçoit l'acide comme la partie piquante d'un sel neutre, résultat de l'association de l'acide avec la partie à laquelle il a été retiré pour affirmer son caractère, sa base.

Le mot substance, convient pour corps pur tandis que celui de mixte, vient pour mélange.

1704, **Newton** souligne dans *Optique*, les réactions entre les métaux et les sels de ceux-ci en expliquant que les associations font précipiter le métal. Ainsi apparaît ici, même si ce n'est pas la première fois (on peut penser à Boyle qui a travaillé sur les sels d'argent), le concept de précipité.

1789, **Lavoisier** établit les fondations de la chimie moderne.

- Il montre que la terre n'est pas le résidu d'une distillation de l'eau et que les terres chimiques sont des mélanges.
- Il montre de la même manière qu'une chaux ou une chaux métallique sont des corps composés contenant de l'oxygène.
- Il montre que l'air et l'eau sont des mélanges.
- Le premier est un mélange de gaz, le gaz oxigine et le gaz azotique.
- Le second, une fois distillé, est un corps pur décomposable.
- Il différencie les corps purs simples contenant un seul élément des corps purs composés à plusieurs éléments.
- Il établit une classification des substances chimiques (il n'utilise pas le mot atome) en relation avec leur ancien nom et celui nouveau de la nomenclature chimique qu'il a contribué à élaborer.
- Il donne une première définition de l'oxydation par combinaison d'un métal avec l'oxygène et donc une interprétation de la calcination des métaux.
- En étudiant les décompositions des chaux métalliques, que l'on sait maintenant être des oxydes, il montre que la chaux est « réduite » en un métal et en oxygène. L'oxydation et son procédé inverse, la réduction, sont partiellement définis dans les travaux de Lavoisier.
- La dissolution des oxydes étudiée par Lavoisier aboutissait à ses solutions acides. Lavoisier en profite pour donner une définition d'un acide induite de ces expériences. Elles l'influencent dans le choix du nom à donner à cet élément (oxygène : qui génère de l'acide). Il rendait ainsi cet élément responsable du caractère acide d'une solution. La dissolution étant un processus inconnu, on ne supposait pas que celle-ci puisse provoquer des réactions sur les composés qui y étaient dissous. D'où l'erreur de Lavoisier et la correction de Davy et Ampère.
- Enfin, il donne la loi de conservation de la masse au cours d'une réaction chimique.

1803, **Dalton** donne une conférence à la *Literary & Philosophical Society* où il énonce sa théorie de l'atome.

1808, **Dalton** produit un essai, *A New System of Chemical Philosophy*, où l'on va trouver une représentation schématique des atomes sous la forme d'un rond avec un symbole à l'intérieur, l'idée que par l'intermédiaire des gaz et des solides, les quantités atomiques sont mesurables et qu'on peut en déterminer le poids relatif à l'élément le plus léger qui sera l'hydrogène. La théorie atomique de Dalton s'appuie sur une théorie expliquant la loi des pressions partielles qui porte son nom.

L'atome de Dalton représente une quantité, un agrégat d'espèces qui ne seront jamais mesurables à l'unité et qui n'existeront jamais sous cette forme « élémentaire ». Autrement dit, l'atome de 1803 n'est pas un atome élémentaire. De plus, au vu de ses mesures et de ses extrapolations, l'atome et l'élément de Dalton peuvent représenter la même chose. Le méthane de Dalton s'écrit CH, l'eau, OH.

1811, **Avogadro** découvre deux propriétés fondamentales des gaz. La première est liée à la future loi des gaz parfaits (*volumi eguali di gas nelle stesse condizioni di temperatura e di pressione contengono lo stesso numero di molecole*) où des volumes égaux de deux gaz différents, s'ils sont à la même température, contiennent la même quantité de matière. Cette quantité, Avogadro l'appelle molécule, du latin *molecula*. Dans une lettre à Berthollet, Avogadro explique qu'il peut y avoir deux types de molécules. Les molécules intégrantes sont elles-mêmes composées de molécules élémentaires. Ainsi l'infime quantité d'espèces dont parle Avogadro possède une quantification que chercheront plus tard à déterminer les chimistes et les physiciens, le fameux nombre N_A .

1814, **Ampère** retrouve la loi d'Avogadro en s'appuyant sur les lois des gaz ainsi que sur la cristallographie. Il donne des définitions simples et efficaces de la réaction et de la liaison chimique tout en entrevoyant la stéréochimie.

L'influence de Newton et de Coulomb, incite **Berzelius** à proposer une théorie dualistique de la nature en réduisant celle-ci à des duos d'espèces, l'une électropositive et l'autre électronégative. Berzelius dissociait ainsi les formules brutes des sels, en une partie acide et en une partie basique, chacune étant alors chargée. Le sulfate de cuivre CuSO_4 se « polarisait » en CuO , la base et SO_3 l'anhydride d'acide.

On ne conçoit pas que la nature puisse être cependant électriquement chargée sauf Ampère qui n'hésite pas à parler de courant moléculaire dans sa théorie de l'électrodynamique. Bien plus tard vers la fin du siècle apparaîtront les concepts d'atome électrique qui vont devenir des atomes négatifs et positifs. Stoney proposera ainsi l'électro-ion dont les deux termes accolés finiront par fusionner en électron pour l'atome négatif.

1834, **Faraday**, pour interpréter les résultats des électrolyses, propose l'existence de nouvelles espèces chimiques qui se déplacent dans les milieux liquides, les ions, qu'il sépare en anion et en cation. Faraday s'appuie sur la théorie des molécules chargées de **Grotthuss**. La théorie ionique est dès lors très controversée.

En 1860, au premier congrès international de la chimie organisé par **Kekulé, Cannizzaro** donne la définition d'une molécule comme une association d'atomes. Il interprète les résultats de Dalton, d'Avogadro ou de Gay-Lussac avec une idée simple pour rendre compte des poids relatifs des corps purs. « L'atome d'hydrogène est contenu deux fois dans la molécules d'hydrogène libre. » Grâce aux poids atomiques et au poids relatif de l'hydrogène, il obtient les formules chimiques élémentaires des gaz et des corps purs simples et composés comme H₂, O₂, CO₂ qu'il définit comme des entités élémentaires *séparables* les unes des autres.

Mendeleïev est dans l'assistance. A cette époque, on connaît 62 « éléments » mais l'on ignore encore comment les classer.

1880, **Kohlrausch** invente le conductimètre pour prouver l'inexistence des ions. Après 40 distillations consécutives d'une eau devenue ultra pure, il ne peut que convenir de l'existence d'espèces responsables de la conductivité de l'eau.

1884, **Arrhenius**, dans son mémoire de thèse, produit des résultats complémentaires sur les électrolytes et la conductivité de ces solutions.

- La résistance d'un électrolyte augmente avec la dilution
- En milieu très dilué, conductivité et concentration sont proportionnelles
- La conductivité d'une solution égale la somme des conductivités du sel et du solvant
- L'eau se décompose selon l'équation $\text{H}_2\text{O} = \text{H}^+ + \text{OH}^-$
- Il en déduit la définition d'un acide (libérateur d'H⁺) et d'une base (libérateur d'OH⁻).

C'est un tollé dans son jury de thèse. NaCl ne saurait donner par dissolution autre chose que Na et Cl. Le grade de docteur lui est octroyé de justesse. Cependant, de plus en plus, l'existence des ions ou des atomes d'électricité devient une réalité, comme le montrent les productions de rayons cathodiques qui s'avèrent être corpusculaires.

Noyau, proton, neutron, électron

1857, **Heinrich Geissler**, invente un tube à vide qui porte son nom. Il observe sur les parois en verre du tube un phénomène de fluorescence.

1886, **William Crookes** pense que les rayons cathodiques émettent des particules.

1891, **George Stoney** propose de nommer les atomes d'électricité produits par la cathode d'un tube de Crookes alimenté par une bobine de Ruhmkorff, des électro-ions, mot qui sera contracté en électrons.

1895, **Jean Perrin** donne la preuve expérimentale qu'il s'agit bien de particules électrisées.

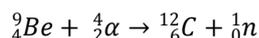
1897, **Joseph Thomson**, à l'aide de l'ancêtre du spectromètre de masse, réussit à dévier un faisceau d'électrons et parvient à donner la valeur du rapport e/m, entre la charge et la masse d'un électron. Il élabore le modèle atomique du plum-pudding.

Ernest Rutherford s'intéresse tout d'abord aux travaux d'Henri Becquerel et distingue dans les émissions des rayons uraniques, les rayonnements qu'il nomme alpha et bêta.

En 1909, il interprète les résultats de déviation de particules alpha par une feuille d'or en imaginant l'atome composé d'une charge centrale entourée d'électrons. Il produit un modèle planétaire de l'atome, *The Scattering of α & β particles by matter and the structure of the atom*, 1911 et l'année suivante (1912) il nomme la charge centrale, noyau. Le modèle de Rutherford compte les électrons avec le nombre N et la charge du noyau avec N fois la charge élémentaire e. Il pose également l'hypothèse que la charge du noyau égale sa masse.

En étudiant la transmutation d'un atome d'azote en oxygène, il met en évidence l'éviction d'une nouvelle particule du noyau initial, un noyau d'hydrogène. Rutherford parvient à déterminer que le noyau d'un atome d'hydrogène est composé d'une seule particule, qu'il appelle le proton (1919).

En 1932, **James Chadwick** produit un article *Possible Existence of a neutron* qui détaille ses expériences sur des noyaux de béryllium bombardés par des particules alpha. Le rayonnement émis fut interprété par **Joliot** comme une preuve d'un rayonnement gamma. Chadwick montre qu'il s'agit d'une transmutation :



Nombre de charges et numéro atomique. Charge électrique élémentaire.

1785, **Coulomb** indique dans son *Second mémoire sur l'électricité et le magnétisme*, que l'on appellera charge positive et charge négative les charges qui sont mises en évidence à l'aide de sa balance de torsion.

Avant cela, **Charles Cisternay Du Fay** définissait deux types d'électricité, l'électricité vitreuse et l'électricité résineuse (*De l'attraction et de la Répulsion de Deux Corps Electriques*, 1733).

1834, **Michaël Faraday** énonce les lois de l'électrolyse. Il détermine que la quantité d'électrons nécessaire à la production d'une masse m d'un métal à partir d'un sel métallique est proportionnelle à la masse m.

De ses expériences se définit le Faraday comme étant la quantité d'électricité nécessaire pour déposer sur une électrode une masse métallique égale à sa masse atomique.

			<u>Rapport charge / masse x masse atomique</u>
Cuivre	Pour 1000 C	0,329 g obtenus	$3039 \times 63 = 191\,457$
Argent	Pour 1000 C	1,12 g obtenus	$892,85 \times 108 = 96\,427$

Il faut 96 400 C pour obtenir un dépôt d'un équivalent-gramme d'un métal par électrolyse en tenant compte de la charge de l'ion.

- La formule reste juste même si la valeur de 1000 C n'est pas déterminée.
- La formule reste juste même si la valeur finale du Faraday n'est pas connue.
- La formule permet de comparer les équivalents obtenus et d'en déduire les charges ioniques entières des ions.

L'établissement de ces lois permet de relier :

- Le Faraday à la charge élémentaire et au nombre d'Avogadro

Les travaux de Dalton, Avogadro et Faraday, impliquent l'idée d'une masse molaire, puisque l'on ne peut compter précisément la matière par espèce mais il devient évident qu'en unités relatives on peut la compter par paquet d'espèces. Ainsi quand Dalton prend la masse atomique de l'hydrogène à 1, il pose que cette masse

représente un certain nombre d'atomes d'hydrogène. Si l'on compte que ce nombre est celui d'Avogadro on en arrive à la définition implicite de la masse molaire soit atomique soit moléculaire. Cependant, on préférera parler autour de 1880 d'équivalent ou d'atome-gramme.

1899, grâce à ses travaux sur la déviation des rayons cathodiques, **Thomson** donne pour l'électron le rapport e/m avec un ensemble de valeurs plus précises qu'en 1897. Il trouve la valeur de $7,8 \cdot 10^6$ u.e.s¹. Son papier de 1897 fait état de plusieurs méthodes et d'essais de mesure qui donnent des valeurs pour m/e entre $0,32 \cdot 10^{-7}$ et $1,5 \cdot 10^{-7}$.

1910, **Robert Millikan** publie les résultats de ses travaux de 1909 : *A new Modification of the cloud method of determining the elementary electrical charge and the most probable value of that charge* où il donne la valeur de $4,69 \cdot 10^{-10}$ u.e.s.

1913, **Henry Moseley** utilise les rayons X pour étudier le comportement des atomes vis-à-vis de leur réémission à la suite d'une irradiation. Il constate dans *The High-frequency spectra of the elements* que chaque atome émet des paquets d'énergie dont la fréquence fondamentale d'émission est reliée à un nombre entier, N , qui est le nombre de protons que possède cet atome. La place d'un atome dans la classification de Mendeleïev va se faire non pas par masse atomique mais par nombre croissant de proton dans le noyau de cet élément.

¹ Les unités u.e.s. sont des unités électrostatiques associées au vieux système CGS.

Structure de la matière

- Élément Chimique
- Isotopes
- Caractérisation de l'élément par son numéro atomique et son symbole
- Thales, Empédocle, Boyle, Lavoisier
- Thomson, Soddy, Aston
- Moseley, Dalton, Berzelius, Liebig

Élément Chimique

Dans son sens moderne, l'élément représente toutes les espèces chimiques appartenant à un groupe appelé nucléide dont les noyaux ont pour point commun le même nombre de protons Z . Historiquement, la notion d'élément remonte à **Thalès**, **Anaximène**, **Héraclite** et **Xénophane** qui voyaient dans la nature un seul principe élémentaire, l'eau, l'air, le feu ou la terre. **Empédocle** choisit de prendre les quatre et d'expliquer les associations et les dissociations à l'aide de deux forces, amour et haine. A la suite de quoi, **Platon** s'empare des quatre éléments et les associe aux solides parfaits du géomètre, le tétraèdre, le cube, l'octaèdre et l'icosaèdre. Enfin **Aristote**, disciple de Platon, décrit une physique et une chimie du monde où l'air, la terre, le feu et l'eau, sont rejoints par l'éther qui emplit l'espace au-delà de la Lune et mélange principes et qualité. Le mot élément apparaît lors de la traduction d'Aristote du grec au latin, archê devenant elementum.

1660, **Robert Boyle** décrit un élément comme ce qui est indécomposable dans *The Sceptical Chemist*.

1789, **Antoine Laurent de Lavoisier**, qui ne parle pas d'élément mais de substance, montre que l'eau, la terre et l'air ne sont pas des corps purs mais des mélanges. Seule la nature du feu lui résiste. Il le transforme en un fluide, le calorique, se rapprochant ainsi des idées de son époque où l'on pensait de même que l'électricité était un fluide (**Benjamin Franklin**).

1804, **John Dalton** réintroduit la notion d'atome.

1811, **Amédéo Avogadro** introduit celle de molécule.

Connaître la composition de la matière, c'est accéder à sa nature fondamentale. De quoi est-elle composée ? D'éléments, d'espèces, de substances, d'atomes, de molécules ? Tandis que l'analyse pondérale, les lois sur les proportions des gaz, les mesures de densités ou de volumes consommés permettent à **Proust**, **Berzelius**, **Dumas** de produire des tables de poids que l'on qualifie d'atomiques, les avancées techniques permettent également de produire en quantité non négligeable de nouveaux corps purs, Calcium, Strontium, Baryum, Chlore, Sodium. De quoi sont-ils composés dans leur état fondamental ? D'atomes ? De molécules ? D'ions ?

1860, **Stanislao Cannizzaro** produit un mémoire simple et claire sur la nature des gaz dont il sépare la composition et la constitution. Des gaz différents seront constitués soit d'atomes d'un seul type en un nombre défini soit de différents atomes de plusieurs types en un nombre lui aussi défini. Il vient de séparer clairement les notions d'atomes et de molécules.

Isotopes

Les travaux de **Moseley** de 1913, semblaient donner la réponse ultime. Chaque élément sera défini par son nombre atomique (Moseley le notait N mais il sera plus tard renommé X).

Avec la détermination du nombre d'Avogadro par **Jean Perrin** selon 16 méthodes différentes, *Les Atomes, 1913*, les physiciens et les chimistes accèdent à une nouvelle valeur de la charge électrique, de la masse de l'électron, de la quantité de matière. Ils peuvent en déduire la valeur d'un équivalent-gramme de chaque espèce et finalement, en comparant aux masses atomiques, les valeurs des masses molaires moléculaires et atomiques.

1913, **Frederick Soddy** qui travaille sur la radioactivité bêta et tente d'expliquer le phénomène de désintégration s'intéresse également aux séries radioactives de désintégration, celle du thorium, de l'uranium et de l'actinium qui donnent tous du plomb en fin de chaîne. Il tente de déterminer le nombre N de l'uranium et l'estime à 90. Il postule également le fait que, puisque tous ces atomes de plomb n'ont pas la même masse, ils constituent ce qu'il appelle des isotopes dans *Intra-Atomic Charges, 1913*, des espèces qui diffèrent par leur masse mais occupant la même position dans le tableau périodique.

C'est également dans un article sur le numéro atomique et sa relation avec le nombre d'électrons que **Van der Boek** note M le nombre d'électrons et A le nombre de masse (1913).

1919, **Francis Aston** qui travailla avec Thomson, met au point un spectromètre de masse qui lui permet de séparer des atomes d'un même élément lorsque ceux-ci sont soumis à un champ électrique d'accélération et champ magnétique de déviation. Grâce aux impacts il découvre qu'un même élément est séparable en divers atomes de masses différentes, ses isotopes.

Symbole Chimique

1804, **Dalton** utilise la première représentation symbolique chimique de l'atome. Elle représente une entité à part entière, un paquet défini d'espèces. Dalton utilise un rond associé à une lettre majuscule à l'intérieur.

1813, **Berzelius** préconise l'utilisation d'une lettre majuscule parfois suivie d'une minuscule pour représenter une substance chimique. Le nom de l'élément devant dériver du latin. Ainsi C pour carbon, S pour sulfur, Fe pour ferrum, Hg pour hydrargyrum, Au pour Aurum. L'azote sera noté A jusqu'à la fin du siècle où l'on changera son étymologie en nitro-genès, qui génère le nitre et où il deviendra N.

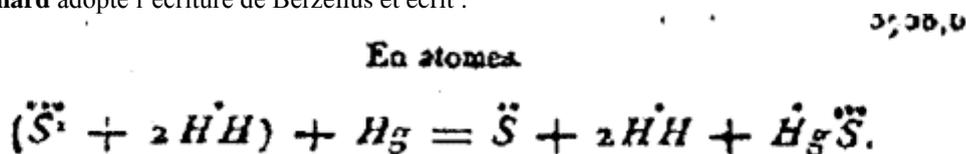
Si le calcium, le baryum, le strontium, l'aluminium suivent la règle, le potassium et le sodium représentent deux grandes exceptions à la règle préconisée par Berzelius.

ELEMENTS			
○	Hydrogen 1	⊕	Strontian 46
⊖	Azote 5	⊗	Barytes 68
●	Carbon 5	⊙	Iron 50
○	Oxygen 7	⊕	Zinc 56
⊖	Phosphorus 9	⊙	Copper 56
⊕	Sulphur 13	⊖	Lead 90
⊙	Magnesia 20	⊙	Silver 190
⊖	Limé 24	⊙	Gold 190
⊕	Soda 28	⊙	Platina 190
⊕	Potash 42	⊙	Mercury 167

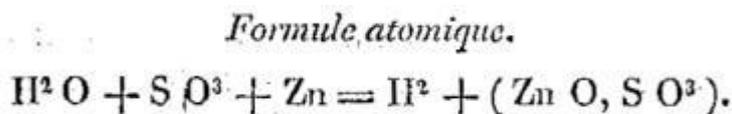
Noms des substances	Formules	« Poids de l'atome » (23)	
		O = 100	H = 1
Hydrogène	H	6,2398	0,50
	H	12,4798	1,00
Carbone	C	76,44	6,13
Eau	H	112,48	9,01
Ac. sulfurique (24)	S	301,16	40,16
Soude (25)	Na	390,90	31,32
Chlor. sodique (26)	NaCl	733,55	38,78
Alcool	CH ² O	290,31	23,26

Dalton note ainsi l'eau HO et l'ammoniac NH. Berzelius utilise le point pour noter l'oxygène. Dans sa table ci-dessus, l'acide sulfurique est représenté sous sa forme anhydre par un S surmonté de trois points qui signifie SO³. On remarquera l'usage de la barre horizontale qui remplace pour l'instant un coefficient 2.

1827, **Thenard** adopte l'écriture de Berzelius et écrit :



1836, dans le *Traité de Chimie* de **Thenard**, on peut lire :



L'équation bilan de réaction est donc apparue. Les signes + et = sont employés pour dénombrer les espèces.

C'est **Humphry Davy** qui obtient par électrolyse et notamment sur les conseils de Berzelius, le sodium et le potassium en 1807. Il nomme ce dernier par rapport à la potasse, le nom qui rappelle comment l'on fabriquait cette substance. Les cendres de pot (pot ash) de plantes poussant sur les sols calcaires forment une lessive appelée potasse. Pour la soude, il utilise de la même manière la confection du mot sodium, cette solution étant obtenue notamment par la fabrication d'une lessive à partir de la salsola soda, une plante des littoraux méditerranéens également connue sous le nom de suwwad qui une fois brûlée donnait des cendres appelée *soda ash*.

Martin Klaproth qui avait identifié mais pas isolé ces substances avait proposé comme nom kalium et natrin. Lorsque Berzelius produit sa classification, il choisit Kalium et Natron et prend pour symboles K et Na. Klaproth voulant distinguer l'alkali végétal (K₂CO₃) de l'alkali minéral (Na₂CO₃) proposa les mots kalium et natron.

Berzelius proposa également de noter les molécules selon des formules où chaque atome est compté autant de fois que nécessaire par un nombre noté en exposant. Cette notation était attendue pour CO², CuSO⁴, CaCO³ ou encore H²SO⁴.

La théorie dualistique de Berzelius, notamment inspirée des travaux de Coulomb et de Lavoisier permettait d'imaginer pouvoir décomposer ces formules en une espèce acide électropositive et une espèce basique électronégative.

Ainsi CuSO_4 donne CuO et SO_3 . CaCO_3 donne CO_2 et CaO et H_2SO_4 devient SO_3 et H_2O . Cette méthode fonctionnant pour les molécules à grand nombre d'atomes, elle était invalide pour CO_2 ou NaCl . Ce dernier représentait un cas fort intéressant que Faraday allait résoudre en introduisant les charges ioniques.

1840, **Justus Liebig** descend les nombres d'atome d'exposant en indice.

1850, **Jean-Baptiste Dumas** pense que la théorie atomique est une impasse. La notation atomique est abandonnée au profit d'une notation équivalentiste. H_2O devient HO . CO_2 s'écrit CO et H_2SO_4 devient HSO .

1853, **Charles Gerhardt** améliore sa théorie des types qui doit permettre de comprendre les réactions chimiques de chimie organique. Chaque atome intervenant dans les molécules fondamentales est ainsi représenté par son symbole.

Eau	Ammoniaque	Hydrogène	Acide Chlorhydrique
H	H	H	H
O	H N	H	Cl
H	H		

Williamson, Hoffmann et Liebig vont produire des théories du même genre, tous se basant sur la théorie des noyaux d'**Auguste Laurent**. Cette formulation va permettre en chimie organique de séparer les parties non réactives d'une molécule de sa fonction « organique » réactive. Williamson travaillera ainsi sur les éthers, Hoffmann sur les amines. Plus tard, **Ostwald**, s'intéressera aux acides organiques et **Arrhenius** aux sels ainsi qu'à l'autoprotolyse de l'eau.

Structure de la matière

- Répartition des électrons en couches
- Règle de l'octet, du duet, des 18 électrons
- Formule et modèle moléculaire
- Slater, Pauling
- Abegg, Lewis, Newlands
- Gerhardt, Liebig, Couper, Van't Hoff

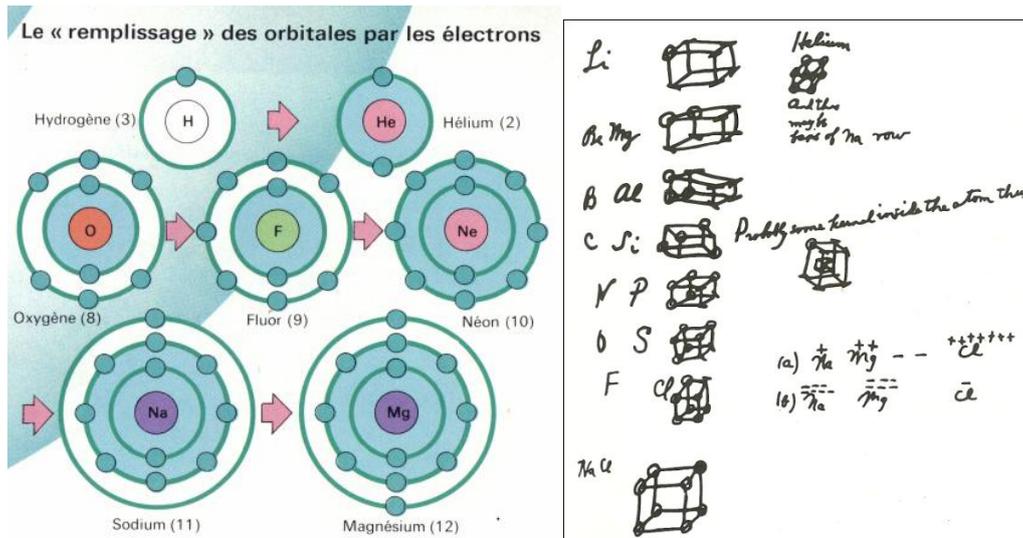
Répartition des électrons en couches

1913, **Charles Barkla** et **Henry Moseley**, par irradiation des atomes aux rayons X, ont la preuve que le nuage atomique est composé de couches dont on peut relier les fréquences ou énergies de transition aux couches concernées. Moseley proposera la notation K,L,M

1915, **Arnold Sommerfeld** modifie le modèle quantique de Bohr afin d'y introduire le nombre quantique secondaire l. Les électrons de cœur de l'atome sont associés à un noyau nommé avec la lettre K pour Kern. L'usage des nombres n et l implique la détermination d'un nombre particulier d'orbitales atomiques puisque si n = 2, 8 électrons deviennent concernés par les orbitales 2s, 2p₋₁, 2p₀ et 2p₊₁.

1916, **Walther Kossel** utilise un modèle sphérique de l'atome avec des couches pour répartir les électrons.

1916, **Gilbert Newton Lewis** utilise un modèle cubique avec bien évidemment huit sommets.



1923, **Manne Siegbahn**, étudie les transitions spectrales par rayon X sur l'atome. Il établit les notations K, L, M pour les transitions entre les différentes couches du nuage électronique correspondantes.

1925, **Wolfgang Pauli** introduit le principe d'exclusion. **Uhlenbeck** et **Goudsmit** proposent l'existence d'un quatrième nombre quantique, s, appelé spin en prévision d'une propriété de l'électron capable de tourner sur lui-même, une idée qui n'est pas du tout du goût de Pauli.

Friedrich Hund introduit les règles de répartition électronique sur les orbitales en vue du spin maximal.

1926, **Erwin Schrödinger** écrit l'équation qui permet de décrire l'électron d'un atome d'hydrogène.

1926, **Friedrich Hund** a l'idée d'une théorie des orbitales moléculaires

1927, **Max Born** donne la signification physique de l'essence Ψ de Schrödinger.

1927, **Walter Heitler** et **Fritz London** appliquent l'équation à l'ion hydrogénoïde H_2^+ . Ils utilisent deux fonctions d'onde, une pour chaque atome ainsi qu'un terme d'échange entre les orbitales.

1929, **John Clark Slater** établit les règles qui permettent de calculer l'énergie d'un électron dans un atome polyélectronique. Sa théorie utilise le nuage de Schrödinger, « scindé » en deux. L'électron considéré comme seul et périphérique associé à un noyau de charge initiale Z et à présent de charge Z^* tenant compte des autres électrons de l'atome.

Répartition des électrons pour les éléments de Z = 1 à 18

Bohr établit l'*Aufbau Prinzip*, le rangement croissant des électrons dans le nuage électronique l'un après l'autre

Erwin Madelung, donne la progression en $n + l$ croissant, qui est une règle empirique vers 1920.

Vsevolod Klechkowski propose une interprétation théorique de cette règle en 1962.

Commentaires : La règle de Klechkowski n'étant pas connue des lycéens, il n'est pas possible de justifier la règle de l'octet au-delà du 18^{ème} élément de la classification périodique. Dans ce sens, la formule pour compter le nombre d'électrons en $2n^2$ où n représente le nombre quantique principal, n'a pas lieu d'être.

Il serait donc judicieux de commencer par les règles avant d'éprouver leur validité soit d'expliquer le duet et l'octet avant de remplir K, L et M.

Ainsi pour He : $Z = 2$ et la structure est K^2

De même pour Ne : $Z = 10$ et la structure est K^2L^8

Et enfin pour Ar : $Z = 18$ avec la structure $K^2L^8M^8$.

Le modèle a ainsi atteint ses limites et ne fonctionne, au vu des règles énoncées, que pour les 18 premiers éléments.

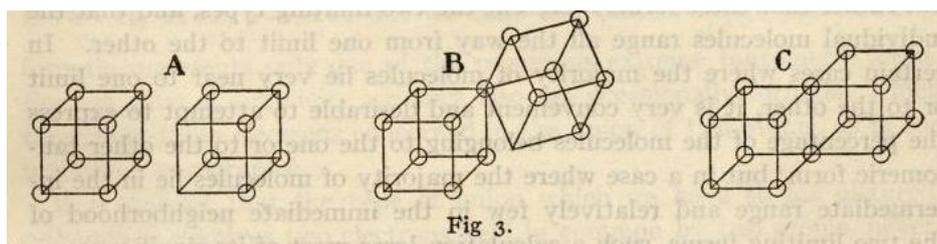
Règle du duet et de l'octet. Remarque, règle des 18 électrons

La règle fondamentale que mirent en évidence les chimistes fut la règle de l'octet. Lorsqu'on se rendit compte des exceptions concernant les éléments de nombre quantique principal $n = 1$ et de nombre $n = 4$ appartenant aux éléments de transition et aux complexes correspondant, deux autres règles, la règle du duet et la règle des 18 électrons virent le jour.

1863, **John Newlands** produit une classification des éléments selon la règle de l'octave, par poids atomique croissant à 8 unités.

1904, **Richard Abegg** remarque que l'écart maximal des nombres d'oxydation d'un élément n'excède pas 8.

1916, **Gilbert Newton Lewis** énonce la règle de l'octet à la suite de son modèle cubique de l'atome.



1940, **Nevil Sigdwick** décrit les structures complexes des métaux de transition et la tendance à une somme électronique entre ligands et espèces complexés à 18 électrons. Les travaux de Sigdwick inspireront Nyholm et Gillespie, les fondateurs de la théorie V.S.E.P.R.

Formules et modèles moléculaires. Formules développées et semi-développées. Isomérie

1832, **Berzelius** introduit le mot et le concept d'isomérie à propos du fulminate d'argent de Liebig et du cyanate d'argent de Wöhler : deux molécules de formules brutes identiques mais aux propriétés chimiques différentes.

1857, **Archibald Couper** note d'un trait plein la liaison entre deux atomes.

ОПЫТ СИСТЕМЫ ЭЛЕМЕНТОВ.
ОСНОВАННОЙ НА ВЕЛ АТОМНОЕ ВѢСЫ И ХИМИЧЕСКОЕ СХОДСТВО.

Ti=50 Zr=90 ?=180.
 V=51 Nb=94 Ta=182.
 Cr=52 Mo=96 W=186.
 Mn=55 Rh=104, Pt=197, Ir=198.
 Ni=Cu=59 Pt=106, O=199.
 Cu=63, Ag=108 Hg=200.
 Be=9, Mg=24 Zn=65, Cd=112.
 B=11 Al=27, ?=68 Ur=116 Au=197?
 C=12 Si=28 ?=70 Sn=118.
 N=14 P=31 As=75 Sb=122 Bi=210?
 O=16 S=32 Se=79, Te=128?
 F=19 Cl=35, Br=80 I=127.
 Li=7 Na=23 K=39 Rb=85, Cs=133 Tl=204.
 Ca=40 Sr=87, Ba=137 Pb=207.
 ?=45 Ce=92.
 ?Er=56 La=94.
 ?Yt=60 Di=95.
 ?In=75, Th=118?

Д. Менделѣев

Reihen	Gruppe I. R ⁰	Gruppe II. RO	Gruppe III. R ⁰ ³	Gruppe IV. RH ⁴ RO ⁴	Gruppe V. RH ⁵ R ⁰ ⁵	Gruppe VI. RH ⁶ RO ⁶	Gruppe VII. RH ⁷ R ⁰ ⁷	Gruppe VIII. RO ⁸
1	H=1							
2	Li=7	Be=9,4	B=11	C=12	N=14	O=16	F=19	
3	Na=23	Mg=24	Al=27,3	Si=28	P=31	S=32	Cl=35,5	
4	K=39	Ca=40	—=44	Ti=48	V=51	Cr=52	Mn=55	Fe=56, Co=59, Ni=59, Cu=63.
5	(Cu=63)	Zn=65	—=68	—=72	As=75	So=78	Br=80	
6	Rb=85	Sr=87	?Yt=88	Zr=90	Nb=94	Mo=96	—=100	Ru=104, Rh=104, Pd=106, Ag=108.
7	(Ag=106)	Cd=112	In=113	Su=118	Sb=122	To=125	J=127	
8	Cu=133	Ba=137	?Di=138	?Co=140	—	—	—	—
9	(—)	—	—	—	—	—	—	—
10	—	—	?Er=178	?La=180	Ta=182	W=184	—	Os=195, Ir=197, Pt=198, Au=199.
11	(Au=199)	Hg=200	Tl=204	Pb=207	Bi=208	—	—	—
12	—	—	—	Th=231	—	U=240	—	—

Parmi les éléments manquants se trouvent les « descendants » du silicium, de l'aluminium, du bore et du manganèse (entre autres). Ces quatre prédictions vont s'avérer d'une grande précision même si la position de ces éléments dans la classification de Mendeleïev à 8 colonnes, implique bien évidemment que les métaux de transitions soient insérés avec les colonnes classiques nommées en chiffres romain de I à VIII.

Pour ces éléments manquants, Mendeleïev prédit les comportements chimiques, les masses, les densités, les températures de fusion. Il s'attend à la découverte de quatre nouveaux éléments :

L'ekabore, l'ékasilicium, l'ékaaluminium, l'ékamanganèse

1875, **Lecoq de Bois Baudrant** découvre le Gallium, qui correspond aux prédictions de Mendeleïev pour l'ékaaluminium

1879, **Nilson** et **Cleve** obtiennent le scandium, lui aussi prédit par Mendeleïev sous le nom d'ekabore

1886, **Clemens Winkler** découvre le Germanium qui correspond aux prédictions de Mendeleïev pour l'ékasilicium. Winkler nomme le germanium en honneur à sa patrie pensant que Boisbaudrant avait fait de même avec le gallium. Il se trompe. Paul Emile Lecoq a nommé l'élément en son honneur personnel !

1937, **Emilio Segrè** et **Carlo Perrier** obtiennent le technetium, attendu par Mendeleïev sous le nom d'ekamanganèse.

I A	II A	III B	IV B	V B	VI B	VII B	VIII	IB	II B	III A	IV A	VA	VI A	VII A	O		
1 H															2 He		
3 Li	4 Be										5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne	
11 Na	12 Mg										13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar	
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	(43)	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba	57-71 Ln	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	(85)	86 Rn
(87)	88 Ra	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	(93)	(94)	(95)	(96)	(97)	(98)	(99)					
	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	(61)	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu		

En 1930, les lanthanides ont fait leur apparition. La classification à 7 colonnes de Mendeleïev s'est transformée. Les gaz nobles ont formé la véritable huitième colonne et l'on nomme les colonnes originales à l'aide des chiffres romains de I à VII associés à la lettre A. Les travaux en spectroscopie et en théorie quantique de l'atome

ont provoqué l'apparition de dix colonnes supplémentaires pour accueillir les atomes possédant des électrons sur une sous-couche d et f. L'utilisation de cette classification classique avec les deux colonnes supplémentaires en-dessous est due à Glenn Seaborg.

1941, **Glenn Seaborg** isole le Neptunium

1944, **Glenn Seaborg** isole l'américium et le curium

1949, **Glenn Seaborg** isole le berkelium

1950, **Glenn Seaborg** isole le californium

1952, **Glenn Seaborg** isole l'einsteinium et le fermium

1955, **Glenn Seaborg** isole le mendelevium

1959, **Glenn Seaborg** isole le nobelium

1974, **Glenn Seaborg** isole le seaborgium

Dès lors, Seaborg ajoute une nouvelle période à la classification, celle des actinides dont il complète le contenu.

La classification périodique que nous connaissons date ainsi des années 50. D'autres versions furent proposées, dont un modèle de **John D. Clark**, ami d'**Isaac Asimov** tentant d'inclure la périodicité de la vis de **Chancourtois** et le remplissage quantique de **Madelung**.

Familles Chimiques

Seules quatre des huit colonnes de la classification possède des noms historiques.

Les alcalins rassemblent les métaux de la première colonne dont les oxydes (Li_2O , Na_2O , K_2O) et les solutions (LiOH , NaOH , KOH) sont basiques.

Les alcalino-terreux étaient autrefois connus sous leur forme d'oxyde que l'on appelait des terres alcalines ; on comptait ainsi la baryte (BaO), la magnésie (MgO), la chaux vive (CaO). Mise en solution, ces chaux ou terres donnent également des solutions basiques d'hydroxydes peu solubles. ($\text{MgO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Mg(OH)}_2$)

Les halogènes, cette famille la plus connue rassemble ceux que l'on connaissait autrefois sous la forme de sels solubles de sodium ou de potassium, d'où le nom de leur famille (halos = sel).

Les gaz nobles : avec la découverte de l'hélium, de l'argon, du néon et du krypton, la huitième colonne qui porta le chiffre zéro fut attribuée aux gaz rares. Cette dénomination fut ensuite changée en gaz inertes. Mais elle était elle aussi erronée puisque l'on connaît également des propriétés chimiques à ces gaz. Aujourd'hui elle porte le nom de gaz nobles.

Les métaux nobles : cette dénomination tient à la triade Cu, Ag, Au, les métaux les moins vils dans la dénomination de Pline l'Ancien pour qui le plus mauvais des métaux était le plomb. L'alchimie mélangea les travaux de Pline et de Galien et se mit en quête de la pierre philosophale capable de guérir le plomb pour en faire de l'or. Les gaz nobles portent ce nom en référence aux métaux nobles.

Les cristallogènes, les pnictogènes et les chalcogènes :

Le groupe 14, qui est le groupe du carbone, possède plusieurs noms récents comme cristallogènes ou encore tétragènes.

Le groupe 15, qui est le groupe de l'azote porte le nom des pnictogènes, que l'on doit à **Anton van Arkel** autour des années 50.

Le groupe 16, qui est le groupe de l'oxygène, porte le nom des chalcogènes. Il fut proposé en 1932 par **Werner Fischer** et utilisé par **Wilhelm Blitz** en Allemagne où il gagna en popularité. **Berzelius** avait proposé le nom d'amphigènes mais celui-ci ne connut que peu de succès parmi les chimistes.

Solution & Quantité de matière

- La quantité de matière. Son unité
- La constante d'Avogadro
- Masse molaire atomique et moléculaire
- Avogadro, Ostwald
- Loschmidt, Van der Waals, Perrin,
-

La quantité de matière. Son unité

1810, **Gay-Lussac**, « *les volumes de gaz qui apparaissent ou disparaissent dans une réaction sont entre eux dans des rapports simples.* »

1811, pour **Avogadro**, « *des volumes égaux de gaz différents, dans les mêmes conditions de température et de pression, contiennent des nombres égaux de molécules.* »

1814, **Ampère** précise les conditions dans lesquelles sa loi, qui est identique à celle d'Avogadro, doit s'exprimer.

Les expériences réalisées sur un volume de 22 litres de gaz sous pression atmosphérique et autour de 0°C ont ainsi permis de mesurer les masses de chaque atome contenues dans un gaz ainsi considéré. Jean Perrin rapporte ainsi dans *Les atomes* :

1 g d'hydrogène issu du chlorure d'hydrogène ou du chloroforme
2 g d'hydrogène issus de l'eau, de l'acétylène ou du gaz hydrogène
3 g d'hydrogène issus du gaz ammoniac et 4g d'hydrogène issus du méthane, 5g de la pyridine, 6g du benzène.

De la même manière, dans les mêmes conditions, on obtient pour l'oxygène après décomposition :

16g issus de l'oxyde de carbone et de l'eau, 32 g issus du gaz oxygène et du gaz carbonique ou encore 48g de l'anhydride sulfurique ou de l'ozone.

Pour le carbone, de la même manière, les expériences donnent 12 g dans le gaz carbonique, le méthane, l'oxyde de carbone, 24 g dans l'acétylène et 36 g dans l'acétone.

Ces mesures permettent de définir la table des poids atomiques avec pour valeurs H = 1 ; C = 12 ; O = 16, Cl = 35,5. De plus, on appelle alors atome-gramme, la masse en gramme équivalente à un autre type d'atomes : 12 atome-gramme de carbone contiennent autant d'atomes de carbone que 16 atome-gramme d'oxygène.

Du fait de l'existence de gaz à l'état moléculaire, la notion d'atome-gramme fut étendue à celle de molécule-gramme qui indique la même chose, selon la loi d'Avogadro. Ainsi la valeur d'une molécule-gramme égale la

masse de cette molécule qui occupe le volume de 22 L défini tout à l'heure dans les conditions de température et de pression précédentes

Le nombre que représente chacun de ces gaz dans ces mêmes proportions est noté N , c'est le nombre d'Avogadro. **Dès lors les atomes-grammes et les molécules-grammes sont les ancêtres des masses molaires atomiques et moléculaires.**

Par conséquent, on obtient en formule moléculaire, $H_pO_qC_r$ la composition atomique d'une molécule. Toujours dans *Les Atomes*, Jean Perrin obtient ainsi les formules H_2 , O_2 , O_3 , CH_4 , NH_3 et H_2O pour l'eau. Rappelons que la notation fut proposée dès 1840 par Gerhardt mais qu'à la suite de la propagation des notions équivalentistes, l'eau se notait HO, une notation qui fut obligatoire jusqu'en 1895 de par l'influence du chimiste et ministre de l'instruction publique Berthelot.

1834, **Michaël Faraday** expose les lois de l'électrolyse. On en déduira que 96 550 C sont nécessaires pour obtenir le dépôt d'un atome-gramme d'espèce ayant donné un ion monovalent. Il s'établit alors la relation $F = e \cdot N$ où N représente le nombre d'Avogadro.

1835, **Benoit Clapeyron** décrit pour un gaz subissant une détente la loi $P.V. = R (267 + T)$. Cette équation permet non seulement de retrouver la loi de Boyle-Mariotte mais d'expliquer les transformations thermodynamiques sur le graphe qui porte son nom et qui est inspiré des travaux de **Nicolas Carnot**.

1842, **Victor Regnault** décrit la loi des gaz par $P.V. = C (K+T)$ où C sera remplacé par R en hommage à Clapeyron.

1846, **Regnault** interprète les écarts de la loi précédente dans certaines conditions expérimentales en donnant deux descriptions de l'état gazeux et invente la notion de gaz parfait. La loi s'écrit alors $PV=RT$.

1865, **Josef Loschmidt** obtient la valeur de 4.10^{22} pour le nombre d'Avogadro obtenu à partir de mesure de viscosité des gaz.

1873, **Johannes Van der Waals** obtient pour le nombre d'Avogadro la valeur de 62.10^{22} .

1877, **Ludwig Boltzmann** produit une théorie cinétique des gaz et de l'entropie en utilisant la notion de gaz moléculaire.

1899, **Max Planck** nomme k la constante de Boltzmann

1900, **Max Planck** introduit la constante h .

1913, **Jean Perrin** donne seize valeurs différentes du nombre d'Avogadro.

- La détermination du nombre d'Avogadro permet d'aboutir à celle de la charge élémentaire e par la loi de Faraday.
- La détermination de la charge élémentaire permet d'atteindre la valeur de la permittivité du vide ϵ_0 qui s'exprime dans la loi de Coulomb où était connue l'expression de la constante $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$
- La permittivité peut être déduite de la relation de Maxwell, $c^2\epsilon_0\mu_0 = 1$
- En reprenant les travaux sur les atomes-grammes et les molécules-grammes associées au nombre d'Avogadro on aboutit à la définition des masses molaires et du poids atomique.
- L'expression mole, utilisée par le chimiste **Oswald** comme abréviation de molécule-gramme deviendra l'expression de cette unité dont on donnera en 1972 une définition rigoureuse, tenant compte de la réalité des isotopes que l'on est en train de découvrir en 1913.
- L'expression de R permet d'aboutir à la valeur de k et vice versa.

La détermination du nombre d'Avogadro va donc avoir des répercussions dans différentes branches de la physique en montrant inversement comment celles-ci se sont reliées au cours du XIX^e siècle en s'appuyant sur la théorie atomique ou moléculaire des gaz. La mécanique, la thermodynamique, la physique statistique et l'électromagnétisme se retrouvent ainsi enchevêtrées par le fait qu'elles utilisent une idée fondamentale qu'est l'énergie.

Les Médicaments

- Principe Actif, Excipient, Formulation
- Espèces Naturelles et Synthétiques
- Groupes Caractéristiques
- Galien
- Perkin, Hofmann, Carothers
- Gmelin, Frobenius, Hoffmann

Principe Actif, Excipient, Formulation

Le mot pharmacie vient du grec pharmakon qui veut dire poison et remède.

La théorie des humeurs est inspirée des travaux de **Galien** où les quatre humeurs en équilibre assurent la santé de l'organisme. La bile, le flegme (ou pituite), le sang et l'atrabile forment l'équivalent des quatre éléments d'**Aristote**. Le langage courant, rehaussé des diagnostics des médecins de la Renaissance nous a d'ailleurs donné des expressions caractérisant un état physique ou mental :

- Etre de mauvaise humeur
- Etre d'humeur noire
- Se faire de la bile
- Etre flegmatique
- Etre atrabilaire ou mélancolique

Au XVI^e siècle, **Paracelse** remet en cause le diagnostic médical par la caractérisation des humeurs. Il préconise l'usage des métaux ou des sels métalliques pour soigner le mal par le mal. C'est le début de la pharmacopée et de la posologie. Ses théories sont controversées, notamment parce qu'il est souvent saoul et provocateur et surtout parce qu'il propose de guérir à l'aide de substances que l'on sait être dangereuses pour l'organisme.

Cependant cette guérison par les métaux trouvera une voie incertaine tandis que l'on préconisera des bouillons de céruse ou d'or afin de soigner selon la couleur du teint de la personne. La reine Catherine de Médicis était ainsi astreinte à la chrysothérapie, et devait boire de l'or en solution.

1877, synthèse du paracétamol par Harmon Northrop Morse

1897, synthèse de l'aspirine par Felix Hofmann

1933, Synthèse de la vitamine C par Norman Haworth

1939, Synthèse de la vitamine K par Edouard Doisy

1961, synthèse de l'ibuprofène par Andrew Dunlop et ses collègues.

Espèces Chimiques naturelles et synthétiques

Quelques espèces chimiques synthétiques ou artificielles :

1846, synthèse du T.N.T. par Sobrero

1856, synthèse de la mauvéine par William Perkin

1858, synthèse du camphre par Marcelin Berthelot

1860, synthèse de l'isoprène

1871, synthèse de la phénolphtaléine et de la fluorescéine par Adolf von Baeyer

1884, synthèse du rouge congo par Paul Bottinger

1891, synthèse de la viscosse par Hilaire de Chardonnet

1908, synthèse de la cellophane par Jacques Brandenberger

1909, Synthèse de l'ammoniac par Fritz Haber

1927, synthèse du polyméthacrylate de méthyle qui sera commercialisé sous le nom de Plexiglas ou Altuglas

1930, synthèse du polystyrène

1931, synthèse du néoprène par Wallace Carothers

1935, synthèse du nylon par Wallace Carothers

1938, synthèse du Teflon par Roy Plunkett

1947, synthèse de l'ABS

1950, synthèse du PET

1953, synthèse des polycarbonates par Hermann Schnell

1957, synthèse du polypropylène

1965, synthèse du Kevlar par Stephanie Kwolek

1969, synthèse du Gore Tex par Wilbert Gore

Groupes caractéristiques

Les groupes fonctionnels en chimie organiques ont été repérés à la suite des travaux de **Laurent** et **Gerhardt** sur leurs théories des noyaux et des types, théories qui furent par la suite reprises et discutées par **Liebig**, **Dumas**, **Hoffmann** et **Williamson**. C'est ainsi que Liebig utilise le mot radical pour représenter la partie non réactive de la molécule là où Laurent utilisait le mot noyau. Laurent représente d'un rond la partie fixe de la molécule et lui associe une sphérule terminale amovible. Dumas, après avoir critiqué l'idée de Laurent l'utilise pour expliquer le chlore contenu dans les bougies en paraffine utilisée au Palais des Tuileries. Les bougies ayant été décolorées à l'Eau de Javel, Dumas explique par une théorie de substitution le remplacement d'un atome d'hydrogène de la paraffine par un atome de chlore.

Liebig proposera des parties fixes qu'il nomme méthyle, éthyle et propyle. Ses noms seront plus tard repris pour les groupes alkyles substituant une chaîne ramifiée.

1832, théorie des radicaux de **Liebig**

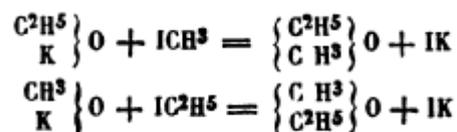
1834, théorie des substitutions de **Dumas**

1837, théorie des noyaux de **Laurent**

1842, théorie des résidus de **Gerhardt**

1854, Théorie des types de **Williamson**

Dans l'exemple ci-dessous, Williamson montre comment une partie de la molécule organique reste inchangée et comment va se produire ce qu'on appellera bien plus tard, une addition nucléophile. Williamson a d'abord fait réagir de l'éthanol sur de la potasse. Il obtient alors l'éthanoate de potassium qui est noté ici avec l'accolade qui représente deux liaisons simples dans C^2H^5-O-K , substance qu'il met ensuite à réagir avec de l'iodure de méthyle.



L'expression montre comment la partie C^2H^5 reste immuable et la partie terminale de la molécule est modifiée par la réaction.

- Alcool (v.1500) : de l'arabe al-khûl, esprit subtil. Utilisé par **Paracelse**
- Acide (v. 1600) : utilisé pour désigner une substance par cette propriété, **Lemery**.
- Ether (1742) : d'après l'adjectif éthéré. En 1730, **Frobenius** donne le nom d'éther à deux liqueurs éthérées obtenues par extraction.
- Anhydride (1836) : utilisé par **Laurent** à partir d'anhydre, sans eau. Cette dénomination est déjà utilisée pour les acides organiques sulfurique, sulfureux, carbonique par Lavoisier. La nomenclature qu'il met en place autour de 1787 fait la distinction entre le composé et les propriétés qu'il pourra avoir au contact de l'eau. Le mot désigne alors CO_2 , SO_2 , SO_3 . L'anhydride de Laurent correspond aux acides deshydratés.
- Aldéhyde (1845) : utilisé par **Liebig** pour la contraction d'alcool déhydrogéné, qui est un des moyens d'obtenir un aldéhyde comme par exemple le chauffage du méthanol sur une spirale de cuivre porté au rouge (lampe sans flamme, 1797, Martin van Marum)
- Ester (1848) : utilisé par **Gmelin** pour la contraction essigäther, vinaigre d'éther
- Amide (1850) : de l'ammoniac, am + ide

- Amine (1865) : de l'ammoniac, am + ine

Ammoniac désigne tout d'abord un adjectif concernant le sel NH_4Cl qu'utilisaient les embaumeurs pour la fabrication des momies. Produit devant le temple d'Amon, il fut dénommé sel ammoniac. Le gaz ammoniac fut longtemps appelé alkali volatil avant d'en connaître la composition et qu'il devienne le gaz ammoniac.

- Alcane, Alcène, Alcyne : d'après **Hoffmann**, désirant utiliser les voyelles a, e, i, et o pour désigner des classes de composés. Ainsi ils s'intercalent avec le o déjà utilisé pour les alcools.
- Cétone (v. 1900) : d'après l'acétone. **Gmelin** 1817

Les Médicaments

- Extraction, séparation, identification
- Aspect, températures
- Solubilité, densité, masse volumique
- Chromatographie
- Galilée, Réaumur, Nollet,
- Nernst, Archimède, Newton
- Tsvett

Extraction, séparation, identification

Les techniques de la chimie sont aussi anciennes que ses fondations, à savoir l'Antiquité. Le savoir chimique de la Grèce Antique et d'Alexandrie était un savoir expérimental de séparation et d'extraction des composés liquides. Avec le temps et le développement de l'alchimie arabe, le matériel et les techniques de séparation et d'extraction sont apparues.

Les plus anciennes sont la décoction, l'infusion et la macération que l'on pratiquait pour fabriquer des solutions à boire d'antalgique comme celle fabriquée à partir de l'écorce de saule. Le chauffage au bain d'eau chaude est également attribué à cette époque avec le procédé de Marie la Juive, que l'on connaît aujourd'hui sous le nom de bain Marie.

Avec les alchimistes se développent les fours (athanor), les vases (pélican, double pélican, matras), la verrerie (alambic, cornue). La distillation et la filtration sont donc facilement utilisées. L'identification par procédé chimique doit attendre que soit connu un grand nombre de réactions entre les différentes espèces et que leurs noms soient clairement définis.

1820, **John Herschel et William Talbot** utilisent la flamme pour identifier des sels jetés à l'intérieur

1835, **Charles Wheatstone** fait la même chose avec des métaux en poudre

1860, **Bunsen et Kirchhoff** inventent la spectroscopie

1864, invention de la centrifugeuse par **Antonin Prandtl**

1919, **Aston** invente le spectromètre de masse

1938, **Rabi, Purcell et Bloch** inventent la RMN

Aspect et température

L'aspect d'un corps a longtemps tenu à l'état dans lequel il se trouvait. Liquide et solide n'apparaissent ainsi pour caractériser un état que vers 1310. Le mot gaz, ne viendra que plus tard vers 1640 et jusque là ce sont principalement les éléments d'Aristote, air, terre, eau, qui vont désigner des composés que l'on appellera des airs, des terres ou des eaux. De l'extraction et de la séparation, on trouve également les huiles, les liqueurs, les esprits (qui représentent la partie volatile d'un liquide) à côté des métaux et des sels. Les sels ont la particularité d'être solubles, c'est-à-dire de disparaître dans un liquide. On sait également depuis Boyle et Newton que les sels métalliques, lorsqu'ils sont correctement opposés à un autre mixte, peuvent se précipiter au fond du récipient, d'où le mot précipité.

Solubilité, densité, masse volumique

La densité est définie par **Archimède** sous le nom de masse spécifique d'un corps. Celui dont la masse spécifique est la plus grande chasse celui dont la masse est la plus faible.

Newton définit la **masse** d'un corps comme l'ensemble de sa masse spécifique et de son volume. Il faut ainsi sous entendre que $m = \rho \cdot V$. On voit alors que les concepts de densité et de masse volumique se confondent (1687).

La notion de **masse volumique** apparaît au XVII^e siècle comme le rapport de la masse d'un corps à son volume. C'est la définition que donne **Laplace** (1810).

Système Chimique et Réaction Chimique

- Système Chimique
- Réaction Chimique. Stœchiométrie
- Ecriture Symbolique de l'équation.
- Lavoisier
- Ampère, Richter
- Berzelius, Thenard, Liebig

Système chimique

1789, **Lavoisier** définit le principe de la transformation chimique. Au cours des transformations de la matière, la masse de l'ensemble des espèces initialement présentes et/ou finalement apparues est strictement la même. Au cours d'une transformation chimique, la masse se conserve. De ce fait est défini par l'ensemble des espèces, le système chimique.

Lavoisier étudie dans ses divers mémoires à l'académie des Sciences les réactions suivantes :

- $\text{CaCO}_3 = \text{CaO} + \text{CO}_2$ Mémoire de 1765
- $\text{S} + \text{O}_2 = \text{SO}_2$ *Opuscules de Physique et de Chimie, 1773*
- $4\text{P} + 5\text{O}_2 = \text{P}_4\text{O}_{10}$ *Opuscules de Physique et de Chimie, 1773*
- $\text{Sn} + \text{O}_2 = \text{SnO}$ *Opuscules de Physique et de Chimie, 1773*
- $\text{Pb} + \text{O}_2 = \text{PbO}$ *Opuscules de Physique et de Chimie, 1773*
- $\text{HgO} = \text{Hg} + \text{O}_2$ *Sur la Calcination, 1775*
- $\text{H}_2\text{O} + \text{Fe} = \text{H}_2 + \text{FeO}$ Réaction étudiée en 1783. *Réflexions sur le Phlogistique ?*

Réaction Chimique

1792, **Jeremias Richter** découvre la loi des proportions définies dans les gaz. Il publie ses résultats dans *Der Stöchiometrie oder Messkunst chemischer Elemente, 1792* où il montre que les combinaisons des gaz se font en volume multiples les uns des autres. Il s'est également intéressé aux acides et aux bases et a approché le concept d'équivalence.

1814, **Ampère** étudie la réaction entre le gaz ammoniac et le chlorure d'hydrogène qui donne du chlorure d'ammonium. Il écrit : « si la combinaison de deux corps donne une figure régulière alors l'interaction entre les deux espèces a bien eu lieu. Dans le cas contraire, la forme est irrégulière et représente tout au plus un amas ou un mélange des deux substances ». La réaction chimique devient création et rupture de liaisons (qui en est la définition actuelle). La liaison chimique est quant à elle responsable de l'organisation dans l'espace des espèces.

Écriture symbolique de l'équation

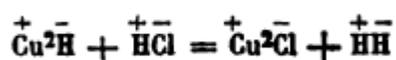
1827, **Louis Jacques Thenard** adopte les symboles + et = pour écrire une équation de réaction avec les symboles de Berzelius.

1836, **Thenard remplace** le point par un atome d'oxygène. Il compte les espèces en exposant. Il écrit ainsi pour l'attaque du zinc par l'acide sulfurique : $H^2O + SO^3 + Zn = H^2 + (ZnO, SO^3)$.

On remarque que le concept de réaction entre un gaz et l'eau n'est pas formulé par l'équation. De la même manière, les ions, bien que postulés par Faraday en 1834 n'existant pas en écriture, le bilan qui représente comme produit un composé d'oxyde de zinc et trioxyde de soufre est faux...

1840, **Liebig** préconise d'écrire les nombres d'atomes en indice. Dix ans plus tard, la théorie atomiste, controversée par Dumas, devient inutilisée. Les formules de Dalton, HO et NH pour l'eau et l'ammoniac refont surface à la place de H^2O et de NH^3 .

1870, on trouve dans les *cahiers de la revue scientifique* une écriture en charge et en atome où est utilisée l'ensemble des positions en exposant. L'exemple reprend une réaction de **Wurtz** avec une tentative d'inclure



une polarité à chaque atome.

La notation en exposant est encore utilisée dans la *Théorie Atomique* (1886) de **Wurtz**. Jusqu'en 1895, la théorie équivalentiste prévaut en France.

1884, **Van't Hoff** utilise la double flèche pour rendre compte des réactions renversables dans *Etude de Dynamique Chimique*.

1913, Dans *Les Atomes*, **Jean Perrin** utilise tant la notation ionique que moléculaire actuelle : « nous vérifions encore sans qu'il soit besoin d'insister qu'il faut faire passer 2 faradays pour décomposer 1 molécule-gramme de chlorure de baryum $BaCl_2$ et qu'ainsi l'ion Ba^{++} porte deux charges élémentaires »

Il utilise également les flèches simples, directes et indirectes ainsi que la flèche double pour les réactions cinétiques

Dès lors, on peut considérer que le formalisme actuel de l'équation bilan est établi depuis le début du XX^e siècle.

PRATIQUE DU SPORT

L'Étude du Mouvement

- Relativité du mouvement
- Référentiel, Trajectoire
- Mesure d'une durée
- Ptolémée, Copernic, Galilée, Brahe
- Galilée

Relativité du mouvement

La relativité du mouvement est mise en évidence par la mesure des phénomènes astronomiques, position du Soleil et des étoiles.

Aristote élabore un modèle du monde *simple et efficace* limité par la trajectoire de la Lune autour de la Terre. Le monde supralunaire s'étend au-delà. Il est immuable. Les planètes y évoluent sur des orbites sphériques avec au fond, la sphère des fixes qui contient les étoiles. En dessous de la Lune, le monde sublunaire est celui du monde en mouvement et en évolution. Les déplacements y sont rectilignes. La chute des corps, verticale, dépend de la nature de l'objet que l'on fait tomber : le gland de chêne chute plus rapidement que la feuille.

Le développement de l'astronomie, tout d'abord par observation à l'œil nu (Tycho Brahe utilise des sextans, des arbalétrilles et des bâtons de Jacob) puis à l'aide d'instruments d'optiques (Galilée utilise une lunette d'approche à deux lentilles) va confronter le modèle théorique d'une Terre fixe à des contradictions expérimentales qui ne seront tout d'abord pas prises au sérieux (la philosophie naturelle et l'astronomie sont assujetties à la philosophie et à la théologie qui sont les sciences primordiales) avant d'être battues en brèches par les meilleurs astronomes et physiciens du XVII^e siècle.

La quête de l'explication des trajectoires des objets célestes se résume alors à l'opposition de l'étude d'un mouvement dans deux référentiels, c'est-à-dire finalement d'un mouvement relatif à un autre.

Ptolémée, produit un modèle géocentrique du monde avec la Terre au centre de celui-ci. Les compositions de trajectoires circulaires, les épicycles, servent à interpréter les trajectoires des planètes.

1543, **Copernic** propose un modèle héliocentrique du monde.

1572, Tycho **Brahe** observe la supernova et publie ses résultats. Il ne conçoit pas un système solaire central mais propose un modèle à deux centres, le modèle tychonien.

1596, **Kepler** soutient la thèse de Copernic dans *Mysterium Cosmographicum*. Grâce aux mesures de Brahe, il va montrer quel est le véritable mouvement des planètes.

1609, **Kepler** énonce ses deux premières lois du mouvement dans *Harmonius Mundi*.

1610, **Galilée** publie *Siderus Nuncius*. Il y décrit la structure de la Lune, les satellites de Jupiter.

1616, l'Eglise Catholique interdit la publication d'ouvrages favorables à l'héliocentrisme

1619, **Kepler** publie *Astronomia Nova* et y intègre la troisième loi qui porte son nom.

1632, **Galilée** publie le *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde* qui va lui valoir son procès. Il y indique les preuves en faveur de l'héliocentrisme, la composition des vitesses, la preuve de la rotation de la Terre.

Référentiel & trajectoire

Galilée est l'inventeur du concept de référentiel. Toutes les espèces appartenant au même référentiel partagent ses propriétés de mouvement, à savoir vitesse et trajectoire. C'est avec la notion de référentiel que Galilée justifie la rotation de la Terre et la loi de composition des vitesses.

- Tycho Brahe pensait montrer que la Terre était immobile par l'expérience suivante : en tirant un coup de canon à l'est et à l'ouest, si la Terre tourne, alors la portée des deux coups de canon devrait être différente.
- De la même manière, un objet lâché du haut du mat d'un navire en mouvement ne devrait pas tomber au pied du mat du navire, ce qui est pourtant le cas.
- Les deux affirmations qui contredisent la théorie de Galilée ne tiennent pas compte de la vitesse d'entraînement d'un corps lorsqu'il quitte le canon dans le premier cas et le mat dans le second cas. A ce moment, les corps en question quittent le référentiel auquel ils étaient attachés et donc en partent avec la vitesse de ce référentiel. Aussi les expériences ne peuvent infirmer le fait que la Terre tourne.
- Galilée utilise une chandelle en rotation autour d'une sphère elle aussi en rotation pour montrer la relativité des mouvements et le fait que la Terre puisse tourner sur elle-même et autour du Soleil, la différence de perception n'étant pas décelable.

Deux trajectoires sont admises du temps de Galilée : la droite (rectiligne) et le cercle (circulaire), encore dues à l'influence d'Aristote. Les artilleurs interrogent les savants sur les comportements des projectiles. Avec le développement de la balistique pour rendre les tirs de canon efficaces, les physiciens et les mathématiciens vont devoir découvrir les lois du mouvement.

Comme nous le verrons juste après, Galilée va s'intéresser au mouvement particulier de la chute des corps, mettre en évidence l'idée d'inertie, de frottement de l'air et préparer le terrain pour les travaux de Descartes et de Newton.

L'Étude du Mouvement

- Action modélisée par une force
- Effet d'une force sur le mouvement
- Principe d'inertie
- Stevin, Descartes, Newton
- Galilée, Newton
- Descartes, Newton

Action modélisée par une force

Le concept de force est en partie défini par **Newton**. On doit à **Descartes** la quantité de mouvement et à **Leibniz** l'énergie cinétique même si ces mots aujourd'hui définis ne le sont pas clairement aux époques respectives où Newton, Descartes, Leibniz y réfléchissent. On attribue à **d'Alembert** d'avoir écrit les formes différentielles $dp = Fdt$ et $\frac{1}{2}d(mv^2) = F \cdot dl$ séparant ainsi clairement les trois concepts.

Les lois du mouvement selon **Newton** sont publiées dans *De Motu Corporum in Gyrum* en 1684. Initialement cinq, Newton n'en garde que trois en substance :

- « *Tout corps persévère dans l'état de repos ou de mouvement uniforme en ligne droite dans lequel il se trouve, à moins que quelque force n'agisse sur lui et ne le contraigne à changer d'état* ».
- « *L'altération du mouvement est proportionnelle à la force qui lui est imprimée ; cette altération se fait en ligne droite dans la direction de la force* ».
- « *Pour chaque action, il existe une réaction égale et opposée : l'action est toujours égale à la réaction ; c'est-à-dire que les actions des deux corps l'un sur l'autre sont toujours égales et dans des directions opposées* ».

1586, composition des forces de **Simon Stevin**. C'est l'utilisation d'un parallélogramme des forces qui fait dire à Stevin que la somme de deux actions selon deux directions différents a pour résultante l'action selon la troisième direction qui relie les deux autres.

1637, **Descartes** publie *la Géométrie*. Il définit le repère cartésien et les coordonnées d'un point. La géométrie devient analytique.

1684, **Newton** introduit la notion de force (vis en latin) pour expliquer le mouvement

1692, **Leibniz** développe le calcul intégral et différentiel. Introduit les coordonnées d'un point.

1698, **Varignon** introduit le concept de vitesse de chaque instant sous la forme $v = \frac{dx}{dt}$

1700, **Varignon** exprime la force accélératrice de Newton sous les expressions $y = \frac{dv}{dt}$ ou $y = \frac{d^2x}{dt^2}$

1743, **D'Alembert** énonce la composition analytique des vitesses, exprime les nombres complexes sous la forme $a+bi$ et introduit le théorème de conservation des forces vives, donne l'équation aux dérivés partielles pour la propagation d'une onde sur une corde vibrante, *Traité de Dynamique*

1788, la *Mécanique Analytique* de **Lagrange** décrit tout système ponctuel dans ses variations élémentaires. L'étude de Lagrange aboutit à une équation simple de la statique : si P, Q et R sont les grandeurs qui tentent de déplacer un point dans leur direction respective des quantités dp, dq et dr alors l'équation a pour forme $Pdp + Qdq + Rdr = 0$.

1799, *Traité de Mécanique Céleste*, **Laplace** utilise l'expression rayon-vecteur.

1843, **Rowan Hamilton** introduit la notion de vecteur, comme sous-ensemble des quaternions, des entités mathématiques à quatre coordonnées. Hamilton introduit également l'opérateur nabla. La physique des vecteurs reste encore analytique, c'est-à-dire que l'on traite les coordonnées (deux ou trois) que l'on exprime par des opérations croisées. Hamilton décrit un quaternion comme étant composé de quatre nombres, le premier étant le scalaire, les trois autres le vecteur.

1845, **Saint-Venant** écrit dans les Comptes rendus de l'académie des sciences, « *j'appelle somme géométrique [...] d'un nombre quelconque de lignes a, b, c données en grandeur, direction et sens, une ligne égale au dernier côté d'un polygone dont les autres côtés sont a, b, c et j'écris $\bar{l} = \bar{a} + \bar{b} + \bar{c}$* »

1873, *Treatise of Electromagnetism* de **James Clerk Maxwell** introduit (entre autres) la notion de champ qui pourra s'appliquer au champ électrique, au champ magnétique et au champ gravitationnel. Notons que c'est **Faraday** qui met en évidence les lignes de forces qui deviendront des lignes de champ.

1884, *Elements of Vector Analysis*, **Josiah Willard Gibbs** définit les nombres qui sont des scalaires à séparer des vecteurs. Pour noter le vecteur entre A et B il propose la notation \overline{AB} qui deviendra plus tard celle de la valeur algébrique. Gibbs note le produit scalaire entre deux vecteurs par un point et le produit vectoriel par un x. Gibbs définit également le gradient ∇ pour le calcul différentiel et intégral des vecteurs. Il envisage les produits scalaires et vectoriels à l'aide du gradient, ce que l'on notera plus tard le rotationnel et la divergence d'un vecteur.

1888, *The electro-magnetic effect of a moving charge*, d'**Oliver Heaviside** où l'on trouve l'équation $\text{curl } \mathbf{H} = 4\pi(\mathbf{C} + \mathbf{D} + \rho\mathbf{u})$ qui est une équation vectorielle issue des équations scalaires de Maxwell. Il utilise l'écriture en gras pour matérialiser un vecteur.

1893, *Electromagnetic Theory*, **Oliver Heaviside** réussit le tour de force de résumer 12 des 20 équations de **Maxwell** décrites sous la forme d'équations différentielles scalaires sous la forme de 4 équations vectorielles où interviennent le rotationnel, la divergence, les vecteurs $\vec{B}, \vec{E}, \vec{j}$ et la densité de charge ρ , ce qui ne fut pas du goût de Maxwell qui ne trouva pas cette expression de son travail plus convaincante.

Effet d'une force sur le mouvement

Le vecteur force tel que nous le connaissons et la relation fondamentale de la dynamique sous leur formulation moderne ne sont pas des concepts mathématisés du temps de leurs auteurs. On peut cependant situer qu'à la fin du XIX^e siècle, force, énergie, vitesse, accélération, quantité de mouvement, travail, sont des concepts qui ont presque atteint leur forme moderne.

La relation de la statique, la somme des forces égale le vecteur nul, se trouve déjà comprise dans les réflexions de **Simon Stevin** et l'utilisation du parallélogramme. C'est l'outil fondamental qui permet de comprendre les cas des forces opposées mais surtout celui de l'addition des forces quelconques.

Quant au changement de trajectoire, bien qu'il fut évident de l'observer, notamment grâce à la balistique, l'expliquer mathématiquement fut plus compliqué. Cependant, grâce à l'invention des calculs intégral et différentiel, Huygens, Leibniz, Newton purent faire des descriptions de trajectoire d'un mobile soumis à des forces.

Principe d'inertie

1633, *Dialogue des Deux Grands Systèmes du Monde*, **Galilée**, par extrapolation de l'étude du mouvement sur un plan incliné, énonce un principe d'inertie qui doit s'appliquer au mouvement circulaire uniforme. Il montre

également que la masse joue une influence sur le déplacement d'un corps et interprète correctement la chute des corps grâce à ses expériences sur un plan incliné.

- Galilée mesure les distances sur le plan et détecte la position du mobile par des clochettes
- Galilée mesure les temps à l'aide d'une clepsydre
- Il obtient un ensemble de résultats qui lui font dire qu'il y a une relation entre distance parcourue et durée

Sur la chute des corps il montre les résultats suivants qui incluent l'existence de l'inerte, la force de frottement de l'air :

- La chute d'un corps est indépendante de sa masse
- La chute d'un corps est indépendante de sa forme
- La trajectoire est rectiligne
- Il y a une relation entre la distance parcourue et le carré de la durée nécessaire au parcours

Galilée justifie les deux premiers résultats en contradiction avec l'expérience d'Aristote qui en observant le gland et la feuille de chêne affirmait :

- Plus un corps est lourd et plus il tombe vite
- Plus un corps est petit et plus il tombe vite

Galilée infirme ces résultats à l'aide des affirmations suivantes :

- La résistance de l'air (qui incarne son inertie) augmente avec la taille de l'objet qui s'y déplace. Voilà pourquoi la feuille est plus ralentie que le gland de chêne.
- L'inertie d'un corps augmente avec sa masse.
- L'attraction de la Terre augmente avec la masse d'un corps

De ce fait il obtient les résultats suivants :

- Deux corps de même forme et taille mais de masses différentes tombent de la même manière au sol
- Deux corps totalement différents tombent de la même manière au sol si l'air ne les freine pas.

Dans le premier et le deuxième cas, Galilée indique que les deux forces, l'attraction et l'inertie évoluent en fonction de la masse. Elles augmentent toutes les deux de la même manière. Ainsi plus l'objet est massif, plus il est attiré mais plus il est retenu par son inertie.

1644, *Principes Philosophiques*, **Descartes** est le premier à énoncer le principe d'inertie où le mouvement rectiligne uniforme est le mouvement d'équilibre.

1687, **Newton** énonce de nouveau le principe d'inertie en y incluant le mouvement au repos*.

1744, **Pierre-Louis Moreau de Maupertuis** énonce le principe de moindre action : *L'Action est proportionnelle au produit de la masse par la vitesse et par l'espace. Maintenant, voici ce principe, si sage, si digne de l'Être suprême : lorsqu'il arrive quelque changement dans la Nature, la quantité d'Action employée pour ce changement est toujours la plus petite qu'il soit possible.* Il avait déjà été utilisé par **Pierre de Fermat** pour infirmer la seconde loi de Descartes mais avait prouvé sa validité par le calcul différentiel. Même s'il est dans ce cas appliqué à la lumière, l'idée de moindre quantité d'action appliquée à la mécanique permettra la formulation de la loi de la mécanique.

1788, L'étude de l'inertie comme la transformation de la dynamique à la statique, à l'aide du principe de **d'Alembert** et des équations de **Lagrange** conduit à l'équation différentielle du mouvement :

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} = \frac{\partial U}{\partial q_i}$$

2T représente l'énergie cinétique du système, q les paramètres de position, q' leur dérivée par rapport au temps et U les forces appliquées. Voici exprimée la forme différentielle de la fameuse équation $\sum \vec{F} = m\vec{a}$. Comme nous le montrerons plus tard, c'est bien par l'étude du principe de moindre action associée à la variation d'énergie que se construit la seconde loi de Newton que ce soit analytiquement ou vectoriellement. Dans l'équation, seule T est dérivée, soit l'énergie cinétique à un facteur 2 près.

La Pression

- Pression d'un gaz, pression d'un liquide
- Force pressante exercée sur une surface
- Pression dans un liquide au repos
- Boyle, Archimède
- Pascal
- Pascal, Torricelli

Pression d'un gaz, pression d'un liquide

Le concept de pression ou de force pressante est utilisé dès l'Antiquité par Archimède dans son *Traité des Corps Flottants* où les parties les plus denses chassent celles qui le sont moins. L'étude de la consistance de l'air vient alors à être rapprochée de l'étude du vide dont l'existence est mise en cause dès l'Antiquité.

-250, *Traité des Corps Flottants* d'**Archimède** « *Tout corps plongé dans un fluide subit une poussée verticale, dirigée de bas en haut, égale au poids du fluide déplacé* ».

1644, *De Motu Aquarium* d'**Evangelista Torricelli** contient notamment le théorème qui porte son nom. Les fontainiers de Florence lui soumettent alors le problème de l'aspiration de l'eau au-delà de 10m33 qu'ils n'arrivent à résoudre et qu'ils auraient voulu soumettre à **Galilée**. Torricelli se fait construire un tube en verre d'1m33 et y place du mercure à la place de l'eau. Il découvre ainsi l'influence de la pression atmosphérique sur la hauteur des fluides. En retournant un tube de 80 cm rempli de mercure sur une cuve de mercure en contact avec l'air, il constate que le mercure descend dans la colonne pour laisser un *vide* « *grosso* » au sommet de celle-ci et n'occuper que 76 cm de hauteur en partant de la base. Torricelli ne parla pas de cette découverte, indiquant juste la relation entre la pression atmosphérique et la colonne d'un liquide pouvant s'élever au dessus de celui-ci

Les expériences de Torricelli conduisent à l'invention du baromètre dont va se servir **Pascal** pour ses expériences.

1647, *Expérience Nouvelle Touchant le Vide* de **Blaise Pascal**. Il réalise ses premières expériences en 1646. Il les poursuivra avec son père l'année suivante et enfin en 1648 depuis le haut de la tour Saint Jacques à Paris. Il énonce le Théorème de Pascal : *toute variation de la pression en un point d'un fluide incompressible se transmet intégralement en tout point de ce fluide*.

1648, *Récit de la grande expérience de l'équilibre des liqueurs*. **Pascal** montre que la pression à une certaine hauteur est due au poids de l'air dans la colonne au-dessus de l'endroit étudié. Pascal réitère cette année-là dans le Puy de Dôme l'expérience de **Torricelli** sur le baromètre à mercure. Il observe alors le niveau du liquide diminue en fonction de l'altitude.

1654, *Traité de l'Equilibre des Liqueurs* de **Blaise Pascal**. Il y fait la synthèse de l'hydrostatique.

Force pressante exercée sur une surface

S'il est donc permis d'écrire que la pression se transmet dans un fluide sur toute la hauteur de celui-ci et que cette pression est fonction de la nature du fluide, c'est-à-dire de sa masse volumique, Pascal qui distingue force et pression, définit cette dernière comme le rapport de force exercée par la masse d'un objet à la surface qu'encombre cet objet. De même si l'on tente d'écrire la loi de l'hydrostatique à la suite des travaux de Pascal, l'idée de champ de gravité ou de pesanteur n'existe pas encore. On obtient les formules :

$$p = \frac{m}{S} \qquad p = p_{atm} + \rho \cdot h$$

Pression dans un liquide au repos

Pour obtenir la loi de la statique des fluides, il faut imposer une vitesse nulle aux particules en mouvement dans un fluide dans l'équation d'Euler ou dans celle de Navier-Stokes. On obtient alors l'équation de la statique à partir de l'équation de la dynamique des fluides.

Indiquons simplement :

1738, *Hydrodynamica* de **Daniel Bernoulli** contient le théorème qui porte son nom, à savoir que la charge C en un point d'un fluide s'écrit

$$\frac{1}{2} \rho v^2 + P + \rho g z = C$$

Cette écriture est celle de la conservation de l'énergie mécanique pour un fluide. En effet, si C est une constante et si le fluide est au repos, c'est-à-dire avec $v = 0$, on retrouve l'équation de la statique des fluides.

La Pression

- Dissolution d'un gaz dans un liquide
- Loi de Boyle-Mariotte
- Henry
- Boyle, Mariotte, Amontons

Dissolution d'un gaz dans un liquide

1803, **William Henry** énonce : *À température constante et à saturation, la quantité de gaz dissous dans un liquide est proportionnelle à la pression partielle qu'exerce ce gaz sur le liquide*

Loi de Boyle-Mariotte

1654, **Otto von Guericke**, bourgmestre de Magdebourg, réalise la fameuse expérience des hémisphères de Magdebourg : deux hémisphères en bronze creuses furent assemblées et, à l'aide d'une pompe (les premières

qu'il a confectionnées datent de 1650), l'air fut retiré de la sphère ainsi créée. Deux attelages de seize chevaux ne purent séparer les deux hémisphères. Lorsque l'on laissa pénétrer l'air dans la sphère, les hémisphères se séparèrent immédiatement.

1660, *New experiments physico-mechanical touching the spring of air and its effects*. Expérience de la cloche à vide de **Robert Boyle**. Il montre que la propagation du son dépend du milieu matériel considéré. Il va également montrer la relation entre pression et volume du gaz occupé.

1679, Edmé **Mariotte** publie, *De la nature de l'air*. Boyle et Mariotte font la même constatation : pour un fluide déformable comme l'air il existe une relation constante entre le volume et la pression du gaz de telle sorte que $PV = \text{cste}$.

1702, **Guillaume Amontons** indique que la loi n'est valide que si la température est constante.

La loi de Boyle Mariotte, que l'on peut effectivement écrire $PV = kT$ préfigure d'autres lois, notamment celles d'Avogadro-Ampère ainsi que celles de Joule-Gay-Lussac qui, associées à celle de Carnot et de Clapeyron, vont permettre d'écrire la loi des gaz parfaits.

L'UNIVERS

Une première présentation de l'Univers

- L'atome
- La Terre
- Le système solaire
- La Galaxie
- Leucippe, Epicure,
- Sumer, Grèce,
- Aristarque, Pythagore, Ptolémée, Brahé
- Einstein, Gamow, Hubble, Lemaitre

L'atome

Le modèle du grain de matière immortel et insécable est né en Grèce sous la houlette de Leucippe et de son disciple Démocrite. Chez les Romains, Epicure s'attache à ce modèle mais il ne s'épanouit pas comme une théorie sérieuse de la description du monde.

La Terre

Elle est plate et immobile pour Aristote. Les Sumériens placent la sphère céleste au-dessus et les enfers, le monde des morts, en dessous. Avec Pythagore, la nécessité d'un nombre cohérent de continents, en accord avec sa numérologie implique qu'outre l'Europe, la Lybie et l'Asie, le monde ne peut se réduire à quatre continents en tenant compte de l'Arctique que l'on plaçait comme zone désertique au nord. En conséquence, Pythagore rajoute une Antichtone au sud pour en faire le pendant. Les idées de Pythagore ne seront pas sans séduire Platon qui ajoutera un nouveau continent avec l'Atlantide.

Le système solaire

L'observation du ciel à l'œil nu permet de lister les corps célestes que l'on connaît dès l'Antiquité : Terre, Lune, Soleil, Mars, Vénus, Mercure, Jupiter et Saturne avec au-delà, les étoiles. L'idée de comprendre les phénomènes astronomiques et de trouver le véritable modèle capable de décrire les mouvements des planètes se développe

dès l'Antiquité :

Aristote et le *Traité du Ciel* comme nous l'avons déjà cité définit le monde sublunaire et supralunaire, la fixité de la Terre, les mouvements des planètes et celui des étoiles sur une sphère fixe.

Schema huius præmissæ diuisionis Sphærarum.



Ptolémée dans l'*Almageste*, décrit le mouvement des planètes et repère 38 constellations. Le système de Ptolémée plaçait la Terre immobile au centre de l'univers. La Lune était ensuite la planète la plus proche de la Terre, suivie de Mercure, de Venus et du Soleil. Mars, Jupiter et Saturne étaient plus éloignées. Pour justifier les mouvements à rebours observés, Ptolémée indique que l'observation de ces épicycles est due au fait que chaque corps céleste tourne autour de la Terre mais également autour d'un point fixe de sa trajectoire.

Aristarque de Samos, a cependant l'idée d'un système solaire avec le soleil fixe au centre.

Thalès de Milet interprète les phases de la Lune comme étant celles d'une demi-sphère de feu tournoyant sur elle-même et présentant soit sa face ignée soit sa face éteinte.

Enfin, **Philolaos**, disciple de **Pythagore**, pour obtenir la décade parfaite des corps célestes, propose un système solaire héliocentrique à deux soleils. Il obtient ainsi le Feu central, la Contre-Terre, la Terre, la Lune, le Soleil puis les autres planètes.

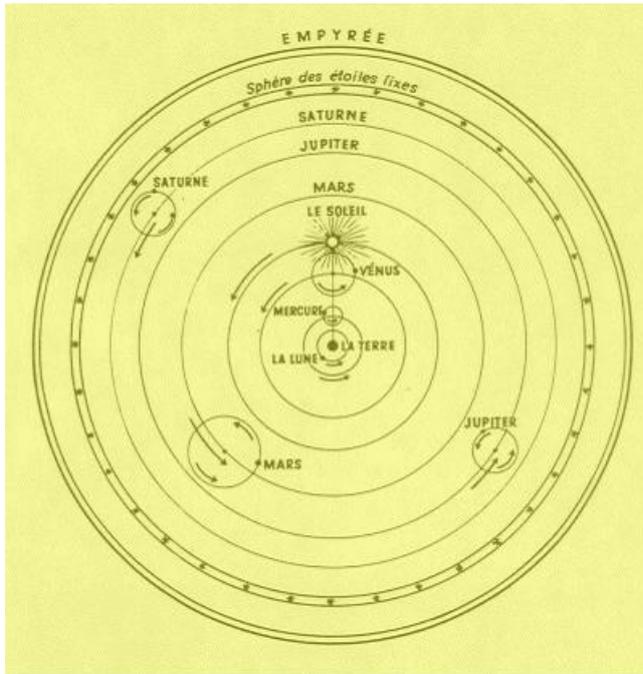
1514, *Commentariolus* de Copernic, premier écrit où il parle de la place centrale du Soleil.

1540, *Narratio Prima* de **Rheticus**, disciple de Copernic qui publie les réflexions des *Comentalorius*.

1543, *De Revolutionibus Orbium Caelestium* est l'ouvrage posthume de Copernic qui fait connaître sa position astronomique en Europe.

1596, *Mysterium Cosmographicum* de **Johannes Kepler** où l'auteur défend le système de **Copernic**.

Kepler, astronome, mathématicien, astrologue myope et protestant luthérien sera considéré comme hérétique par l'église catholique et renié par sa propre obédience pour son manque de radicalisme. Son statut d'hérétique va curieusement le protéger de l'Eglise qui ne l'inquiétera jamais pour ses positions héliocentriques qu'il affiche ouvertement et qu'il mêle à ses considérations philosophiques et théologiques.



1600, **Giordano Bruno** soutient en Italie la théorie de l'héliocentrisme de Copernic. Bruno pose l'idée de la prééminence de l'intellect par rapport à la limitation des sens, qui nous présentent un univers illusoirement clos. À l'inverse de Copernic, dont il retient cependant l'idée de réduction de l'illusion géocentrique et géostatique, Bruno ose penser l'impensable de l'infinité, d'une pluralité de mondes en mouvement dans un espace sans limites. Accusé d'hérésie, il refuse de se rétracter et sera alors brûlé vif. Ses travaux publiés dans *L'infini, l'univers et les mondes* ou *Des fureurs héroïques*, et *Banquet des Cendres* influencèrent Leibniz ou encore Hegel.

1609, *Hamonius Mundi* de **Kepler**. Grâce aux mesures précises amassées par Tycho Brahe dont il fut l'assistant à Prague entre 1600 et 1601, Kepler s'attaque aux erreurs dans l'orbite de Mars attendue circulaire. Après avoir refait maintes fois ses calculs, Kepler change d'approche. Il place non seulement le Soleil comme point fixe mais aussi comme foyer d'une trajectoire elliptique que décrirait Mars. Kepler vient de démontrer la première de ses lois.

- **Première loi de Kepler** : les planètes décrivent des ellipses dont le Soleil occupe l'un des foyers
- **Seconde loi de Kepler** : en des temps égaux les planètes balaient des aires égales

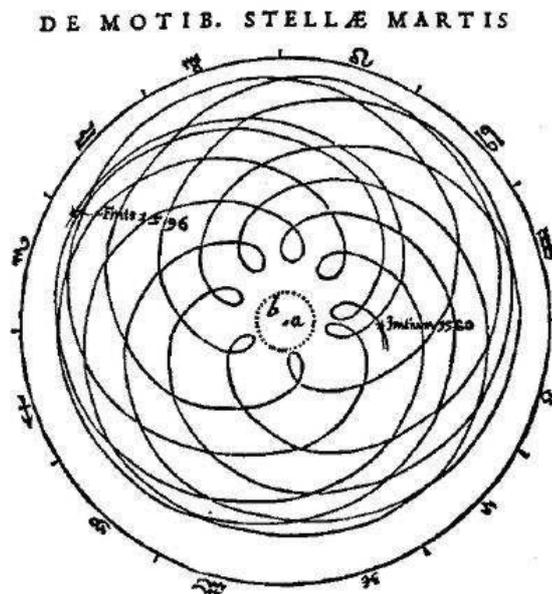
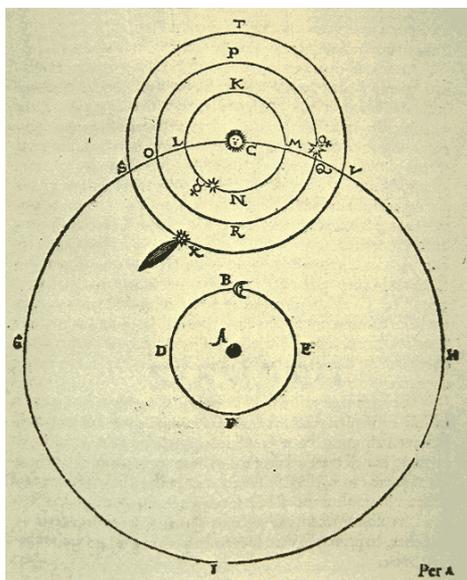
La seconde loi de Kepler indique que la surface que décrit la planète sur son ellipse a toujours la même valeur quelles que soient les positions qu'elle prend sur sa trajectoire. Or sur une ellipse pour que les aires soit égales en fonction de la position il faut que la vitesse change à proximité et loin du Soleil. Le concept d'accélération et de force est donc ainsi contenu dans la deuxième loi de Kepler.

Dans le cas des planètes proches du Soleil, les ellipses sont très peu prononcées, de ce fait les trajectoires ressemblent à des cercles. Il fallait la précision des mesures de Tycho Brahe et le savoir mathématique de Kepler pour déceler que les incertitudes dans les trajectoires n'étaient rien d'autre que des erreurs de postulat.

1610, *Sidereus Nuncius* de **Galilée**. Il décrit la structure de la couronne solaire, de la Lune et découvre les quatre premiers satellites de Jupiter (Io, Callisto, Ganymède et Europe) qu'il nomme planètes médicéennes. Le mot satellite est dû à Kepler. Le monde aristotélicien qui prétendait à la fixité des astres et à leur perfection à partir de la Lune est faux. Le pape Barberini lui commande un ouvrage pour approfondir ses recherches sur la nature de l'Univers.

1619, *Astronomia Nova* de **Kepler** produit la troisième loi du mathématicien allemand. Pour Kepler, les orbites des planètes sont des ellipses. Il montre à présent une relation entre leur période de révolution et le demi-grand axe de leur ellipse, a . Kepler obtient la relation $T^2 = k.a^3$.

1623, *Dialogue sur les Deux Systèmes Du Monde* vaut sa condamnation à **Galilée**. Grâce à sa notion de référentiel Galilée montre que l'hypothèse de Copernic n'est pas impossible. Il affirme également que la Terre peut être en rotation et que les lois du mouvement d'Aristote sont erronées.



L'Inquisition oppose au modèle de Copernic soutenu par l'hérétique Kepler, celui de Tycho Brahe qui est un système solaire à deux centres, le Soleil autour duquel tournent toutes les planètes sauf la Terre et la Lune. La Terre, est le centre principal autour de laquelle tournent la Lune et le Soleil. Face à la complexité du modèle de Kepler notamment lorsqu'il s'intéresse à la course de Mars, le modèle képlérien semble aberrant face au système tychonien qu'approuve l'Eglise. Galilée doit se récuser et finir ses jours en résidence surveillée.

Il faudra attendre les travaux d'**Huygens**, **Halley**, **Hooke**, **Newton** pour que soit formalisée la mécanique céleste avant les contributions de **Lagrange** et surtout de **Laplace** au détour des années 1780 - 1810.

La galaxie et l'univers en expansion

Découvrir ce qui se cache dans l'Univers ne fut pas une mince affaire quand on constate déjà quelle fut la difficulté d'étudier notre propre système solaire.

Si 7 corps célestes sont connus dès l'Antiquité, les premiers satellites sont découverts par Galilée (1610) et Huygens (1655) avant que les télescopes ne permettent une observation plus précise et la découverte de nouvelles planètes (Uranus, 1781, Neptune, 1846, Pluton, 1930).

1919, **Einstein** conçoit un univers stable et immuable. Il ajoute la constante cosmologique Λ à ses travaux sur les équations gravitationnelles.

1923, **Edwin Hubble** de par ses observations rend compte qu'il existe des étoiles qui ne sont pas associées à notre galaxie mais appartiennent donc à d'autres.

1922, **Friedmann**, reprend l'équation d'Einstein et en retire la constante Λ . Il publie un article sur la nature de l'Univers qu'il pense être en expansion croissante.

1927, **George Lemaître** publie l'article *Un univers homogène de masse constante et de rayon croissant*.

1929, **Edwin Hubble**, utilisant le décalage vers le rouge et les mesures de Vesto Slipher, mesure la vitesse d'éloignement des étoiles et produit la constante qui porte son nom.

1939, **Gamow**, inspiré par Friedmann et les travaux de **Schwartzschild** sur le rayon limite d'une étoile (qui donnera plus tard la théorie des trous noirs), produit un modèle condensé de l'Univers en extrapolant à l'envers son expansion et aboutit à la notion de singularité qu'il associe à une explosion primordiale qui prendra plus tard le nom de Big Bang (**Fred Hoyle**, 1956)

Les Etoiles

- Les spectres d'émission et d'absorption
- Caractérisation d'une radiation par sa λ
- Bunsen & Kirchhoff, Fraunhofer
- Fresnel

Les Spectres d'émission et d'absorption

1665, *Physico-Mathesis de lumine, coloribus et iride* de **Francesco Maria Grimaldi** introduit le mot diffraction.

1665, **Robert Hooke** introduit la même année une théorie ondulatoire de la lumière dans *Micrographia*.

1678, **Christian Huygens** élabore le principe qui porte son nom sur la diffraction d'une source lumineuse

1690, *Traité de la Lumière* de **Huygens**, nature ondulatoire de la lumière

1704, *Optique* d'**Isaac Newton** avance une théorie corpusculaire de la lumière. On y trouve décrite l'expérience

de décomposition de la lumière blanche par un prisme. Celle-ci a cependant été réalisée plusieurs années auparavant, en 1672.

1802, **William Hyde Wollaston** observe le spectre solaire et y distingue des « anomalies » : il n'est pas totalement continu comme le suggérait l'expérience de Newton.

1802, **Thomas Young** indique que les couleurs dans la lumière sont explicables si la lumière est un phénomène ondulatoire de type onde sphérique comme le décrit le principe de Huygens.

1815, **Joseph Fraunhofer** observe le spectre solaire à l'aide d'un système fente-prisme. Il découvre des raies noires et les nomme de A à H.

1818, Principe d'Huygens-Fresnel, contribution d'**Augustin Fresnel**. Le jeune et maladif ingénieur polytechnicien qui s'élança en 1815 pour s'engager contre l'armée de Napoléon au début des cents jours s'est intéressé à la diffraction et aux phénomènes d'interférences de la lumière. Ami de **François Arago** et d'**André-Marie Ampère**, il fait partie des physiciens français convaincus de la nature ondulatoire de la lumière.

1821, **Fraunhofer** travaille cette fois avec un réseau à la place du prisme, une innovation dans le domaine de l'étude spectrale. Il utilise également un couplage avec une lunette.

1822, **David Brewster** étudie le spectre de flamme d'alcool salé où apparaissent fortement deux raies jaunes. En étudiant le spectre solaire il émet l'hypothèse que les raies noires sont dues à des absorptions.

1852, **Gabriel Stokes** réussit à obtenir nombre de raies du spectre ultraviolet du Soleil en utilisant un prisme en quartz qui permet mieux que les verres flint et crown de laisser passer les rayonnements de longueur d'onde inférieure à 320 nm.

1855, **Robert Bunsen** met au point un brûleur à gaz qui servira aux études spectroscopiques.

1859, **Gustav Kirchhoff** met au point le spectroscope à prisme à l'aide de **Robert Bunsen**. Il définit la loi du rayonnement

1860, **Bunsen** et **Kirchhoff** découvrent le césium

1861, **Bunsen** et **Kirchhoff** découvrent le rubidium. **Kirchhoff** applique son dispositif à différents types de sources lumineuses, sources qu'il appelle chaude (comme un soleil) ou froide (comme un gaz). Pour une source chaude il obtient un spectre coloré de bandes sur fond noir. Pour une source froide, il obtient des raies minces sur fond noir. Kirchhoff a alors l'idée de mélanger les deux. Il observe alors qu'il devient possible de déterminer la composition de la source froide placée devant la source chaude. Il en déduit les lois de la spectroscopie applicables aux milieux stellaires.

Les trois lois de Kirchhoff

- Un objet chaud incandescent produit un spectre continu.
- Un gaz produit un spectre de raies de différentes longueurs d'onde (donc non continu), dépendant du niveau d'énergie des atomes du gaz.
- Un objet chaud entouré d'un gaz froid ou un gaz froid seul produit un spectre presque continu, et présentant des lacunes ponctuelles à certaines longueurs d'onde bien séparées, lacunes qui correspondent aux niveaux d'énergie des atomes composant le gaz.

1862, **Kirchhoff** pose le problème théorique du corps noir qui sera résolu par **Stefan, Rayleigh, Boltzmann, Wien** et **Planck**.

1870, **Bunsen & Kirchhoff** nomment la théorie de la diffraction sous le nom de principe Huygens-Fresnel.

1875, Création de l'observatoire d'astronomie physique à Meudon sous l'impulsion de **Jules Janssen**. Observation du Soleil et des étoiles à l'aide d'un télescope associé à un spectroscope.

Caractérisation d'une émission par sa longueur d'onde

A propos du « rayonnement électromagnétique. La lumière que nous voyons n'est qu'une petite fraction d'un vaste spectre, les différentes parties de ce spectre se distinguant par différentes valeurs d'une certaine quantité qui varie. Cette quantité variable est appelée la longueur d'onde. Lorsque celle-ci varie, la lumière modifie apparemment sa couleur du rouge au violet». **Richard Feynman**, Cours de Mécanique 2.

Thomas Young et **Augustin Fresnel** entre 1802 et 1818 élaborent le renouveau de la théorie ondulatoire de la lumière. Young pose dans *On The Theory of Light and Color* quelques hypothèses reprises par **Fresnel** dont la théorie scalaire de la lumière viendra conforter les travaux de Huygens. On peut en retenir les hypothèses suivantes :

- Un éther luminifère emplit l'univers (Hyp. 1)
- La perception des différentes couleurs dépend des différentes fréquences de vibration qu'excite la lumière sur la rétine (Hyp.3)
- Quand une ondulation est transmise au travers d'une surface séparant deux milieux, cela se fait tel que les sinus des angles d'incidence et de réfraction sont en rapport constant aux vitesses de propagation dans chaque milieu (Proposition V)
- L'angle d'incidence égale l'angle de réflexion en cas de non réfraction (proposition VI)

Young nomme intentionnellement le phénomène qu'il étudie « ondulation » par opposition à « vibration ». Aussi parle-t-il d'**intervalle retard**, de fréquence, de **longueur d'ondulation**. Ces deux termes représentent ce qu'on appellera plus tard la différence de marche et la longueur d'onde.

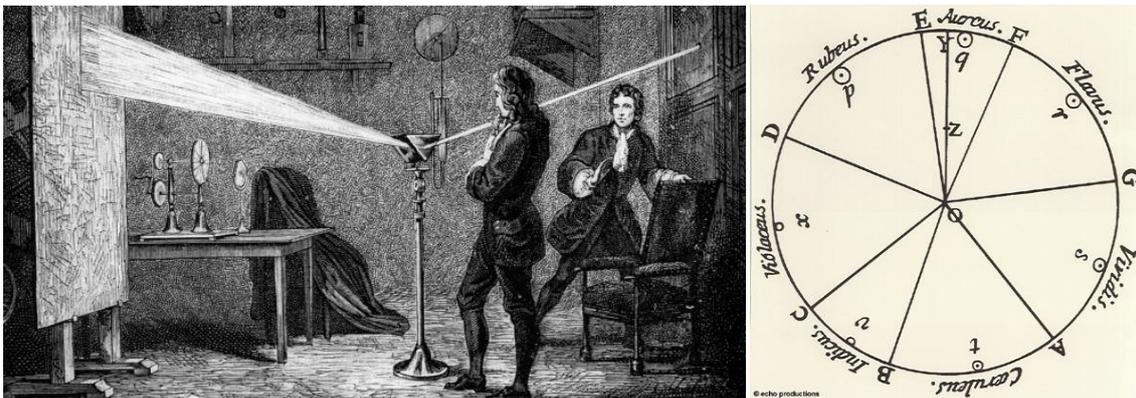
Dans ses mémoires de 1818 présentées à l'Académie des Sciences et figurant également dans les Annales de Physique et de Chimie, Fresnel donne les formules en cosinus pour la propagation des ondes. **Il utilise la notation λ** pour représenter la **longueur d'ondulation**.

Les Etoiles

- Dispersion de la lumière blanche par le prisme
- Réfraction
- Lois de Snell-Descartes
- Newton
- Kepler, Newton, Descartes
- Snelius, Voss, Descartes, Fermat, Young

Dispersion de la lumière blanche par un prisme

1704, Optique. **Newton** décrit l'expérience de décomposition puis de recombinaison de la lumière blanche par un prisme. Il nomme spectre cette décomposition du latin *spectrum*, apparition. Il choisit de séparer le spectre de la lumière blanche en sept et de nommer les sept couleurs observées : *rubeus*, *aureus*, *flavius*, *viridis*, *caeruleus*, *indicus*, *violaceus*, que l'on connaît comme les sept couleurs de l'arc-en-ciel allant du rouge au violet en passant par l'indigo.



Newton utilise un rayon lumineux obtenu à partir du Soleil puis le fait passer à travers un prisme de verre, projetant par la suite le résultat sur un écran. Il appelle le résultat obtenu, le spectre de la lumière.

Réfraction et loi de Snell-Descartes

1593, *De Refractione* de **Della Porta** tout comme *Catoptrique* d'**Euclide** ou *Optique* de **Ptolémée**, posent les problèmes des observations de réflexion et de réfraction sans trouver comment les expliquer.

1602, **Thomas Harriot** s'intéresse à l'optique et aurait découvert la loi des sinus entre 1598 et 1604. Il entre en communication avec Kepler.

1604, *Ad Vitellionem paralipomea*, **Kepler** tente une première approche pour mathématiser les lois de la réfraction, cherchant la courbe qui, au passage d'un changement de milieu, transforme des droites parallèles en droite convergentes en un point. Kepler utilise comme mesures les tables de **Witelo** qui sont incomplètes et imprécises. Il définit cependant :

- à tout point objet correspond un point image.
- L'image est dite *intentionnelle* si le rayon reçu par l'observateur a été « brisé » par réfraction ou

réflexion.

La loi de la réfraction de Witelo date du XIII^e siècle et s'écrivait pour les petits angles sous la forme moderne

$$\frac{i}{r} = \text{constante}$$

Kepler qui constate que ses propres mesures ne fonctionnent pas au-delà de 30° indique une proportionnalité entre les deux angles de la réfraction, ce que l'on pourrait écrire sous la forme moderne

$$i = k.r$$

1621, **Snell** élabore une loi de la réfraction. Il indique que le rapport des sinus des angles des rayons dans chaque milieu, égale le rapport des vitesses de la lumière dans chaque milieu.

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{v_i}{v_r}$$

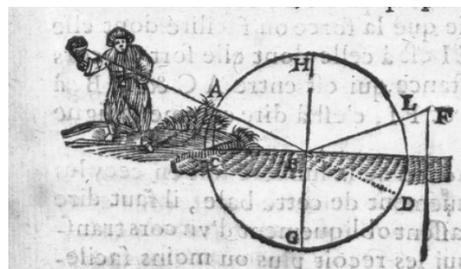
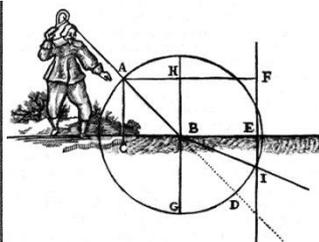
Cette loi semble avoir été perdue ainsi que le mémoire où elle fut inscrite. Cependant, il semblerait que l'on en ait fait montre ou lecture à Descartes lorsque celui-ci était en Hollande.

1625, **Descartes** élabore les lois de la réfraction et de la réflexion.

1637, *Dioptrique*, contient dans le second discours les lois de Descartes. Pour comprendre le comportement de la lumière dans les problèmes de réfraction, Descartes la modélise par une balle partant de la raquette de son personnage et frappant le sol.

- Il en déduit sa première loi, à savoir qu'incidence et réflexion, dans le cas d'un non changement de milieu, se font sous le même angle. Ainsi toute surface réfléchissante crée une image qui nous semble à égale distance de l'original, ce qui est normal par symétrie.
- En remplaçant le sol par une toile déchirée au passage de la balle dont la trajectoire est déviée par amoindrissement de sa vitesse, il en déduit la seconde loi par un raisonnement mathématique basé sur la conservation d'une partie de la vitesse.
- Descartes nomme dans ce problème l'angle d'entrée, angle d'incidence.
- Les deux autres angles sont l'angle de sortie et l'angle de réflexion
- Si elle n'est pas écrite explicitement, la seconde loi de Descartes pourrait s'exprimer :

$$\sin i = k. \sin r$$



En des temps égaux, la lumière, qui se déplace toujours en ligne droite, parcourt alors dans le milieu 2 une distance toujours égale à celle parcourue dans le milieu 1 à un facteur constant près. Ainsi tant que l'on passe de l'air à l'eau, par exemple, $d_1 = k. d_2$.

En utilisant l'illustration de 1637, ça donne $AH = k \cdot HF$. Il suffit ensuite d'utiliser les relations dans les triangles ABH avec l'angle en B et le triangle BIE avec l'angle en B. On obtient $\sin i = \frac{AH}{AB}$ et $\sin r = \frac{HF}{BI}$. Connaissant la relation entre AH et HF et sachant que l'on a pris un cercle de rayon AB ou BI, on obtient l'expression mathématique sous la forme d'une loi des sinus de Descartes.

La loi des sinus de Descartes s'appuie sur un modèle théorique faux puisque Descartes affirme que si la balle arrive dans un milieu plus dense, elle va gagner en vitesse.

1657, **Pierre de Fermat** énonce le principe des moindres temps qui se base sur une idée simple : « *la nature agit toujours par les voies les plus courtes et les plus simples* ».

1662, *De Lucis Natura et Proprietate*, d'**Isaac Voss** donne la parenté de la loi des sinus à Snell. Il indique aussi la définition de la réfraction : « *le chemin parcouru pendant le même temps dans les deux milieux est dans un rapport constant, égal à celui des cosécantes des deux angles.* »

1662, *Synthèse pour les réfractions*, de **Pierre de Fermat**. Utilisant son principe de 1657, il démontre par sa méthode mathématique la loi des sinus pour la propagation de la lumière entre deux milieux transparents. Pierre de Fermat introduit la notion d'indice, ou de rapport entre deux vitesses dans deux milieux différents.

$$n = \frac{v_{eau}}{v_{air}}$$

Fermat formule alors son principe $L = \int_A^B n dl$ dont la variation doit être nulle, c'est-à-dire que L doit être « stationnaire ».

Deux écoles s'opposent alors dans le comportement de la lumière dans deux milieux différents. Certains comme Fermat pensent que la lumière ralentit dans un milieu plus dense à l'inverse de Descartes. Leibniz soulève la question de savoir si le chemin le plus court est le plus facile. L'indice reste alors défini comme un rapport de vitesse.

Le Système Solaire

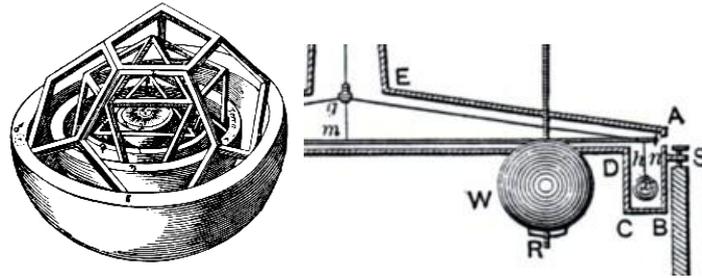
- La Gravitation Universelle
- L'interaction gravitationnelle entre deux corps
- La pesanteur terrestre
- Halley, Hooke
- Kepler, Huygens, Newton
-

La Gravitation Universelle et l'interaction gravitationnelle entre deux corps

1610, *Siderus Nuncius*, **Galilée** décrit la surface du Soleil, celle de la Lune, les satellites de Jupiter

1619, *Astronomia Nova* contient la troisième loi de **Kepler**

1659, **Huygens** donne l'expression de la force centrifuge dans le *De Motu Gyrum*



1674, **Hooke** publie un ouvrage où il énonce trois lois du mouvement dont l'une exprime les attractions des corps à l'inverse du carré de la distance les séparant.

1684, **Hooke**, **Wren** et **Halley** cherchent un savant capable de démontrer la nature elliptique des trajectoires de Kepler. Halley pense au professeur Newton. Celui-ci lui annonce qu'il a déjà fait les calculs et trouvé solution à cette question. Halley l'encourage vivement à publier ses résultats.

1684, *De Motu Corporum in Gyrum*, de **Newton** contient les trois lois du mouvement

1687, *Principia Philosophiae Mathematicae Naturalis*, contient l'expression littérale de l'attraction gravitationnelle mise au point par Newton. Il utilise les définitions suivantes :

- « La quantité de matière se mesure par la densité et le volume pris ensemble [...]. Je désigne la quantité de matière par les mots de *corps* ou *masse*. » (Définition I)
- La quantité de mouvement est le produit de la masse par la vitesse (Définition II)
- La force qui réside dans la matière est le pouvoir qu'elle a de résister (*vis insita*). C'est par cette force que tout corps persévère de lui-même dans son état actuel de repos ou de mouvement uniforme en ligne droite. (Définition III)
- La force imprimée est l'action par laquelle l'état du corps est changé, que cet état soit le repos ou le mouvement uniforme en ligne droite. (Définition IV)
- La force centripète est celle qui fait tendre les corps vers quelque point, comme vers un centre, soit qu'ils soient tirés ou poussés vers ce point, ou qu'ils y tendent d'une façon quelconque. (Définition V où Newton introduit le concept de force centripète à l'opposé de la force centrifuge définie par Huygens).

- La quantité accélératrice de la force centripète est proportionnelle à la vitesse qu'elle produit en un temps donné (Définition VII)
- Il faut distinguer le temps, l'espace, le lieu et le mouvement en *absolus* et *relatifs*, *vrais* et *apparents*, *mathématiques* et *vulgaires* (Scholie)

Dans le corollaire VI et la Scholie qui le suit, Newton étudie les poids p et P de deux corps. Il énonce également que « *le poids étant donné, la force nécessaire pour le mouvoir est donnée aussi, ou ce qui est la même chose, que la résistance étant donnée, la force nécessaire pour la surmonter est donnée aussi.* »

Newton aboutit à la loi de la Gravitation universelle en s'appuyant sur les travaux de **Kepler** et d'**Huygens**. Il formule l'idée que cette attraction n'a besoin d'aucun milieu pour exister et que donc elle peut se faire dans le vide qui peut remplir l'espace. Sa rédaction de la force gravitationnelle qu'il appelle force de gravitation est littérale et il en est de même dans la traduction d'**Emilie du Châtelet**.

1798, **Henry Cavendish** va réussir à l'aide d'une balance de torsion à peser la Terre : cette machine conçue par **Michell** puis améliorée par Cavendish reprend l'idée de celle qu'utilisa **Coulomb** pour mesurer la force entre les charges électriques. Elle doit servir cette fois à vérifier l'existence d'une force en $1/r^2$ qui agirait comme une force d'attraction entre deux masses. Pour ce faire, Cavendish utilise un appareil à torsion d'1m80 de haut avec deux jeux de sphères pleines en plomb, l'une de 73 g et l'autre de 158 kg. La plus petite fait 51mm de diamètre et 3 m pour la plus grande. Grâce à cet appareillage il prouva que **Newton** avait raison et sera en mesure d'évaluer la densité de la Terre ($5,48 \pm 0,038$). En utilisant par la suite ses travaux, il sera possible d'évaluer la valeur de la constante gravitationnelle G à 6,74 au lieu de la valeur actuelle de $6,67 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$.

La pesanteur terrestre

Newton avait déjà parlé de poids d'un corps et fait la distinction avec sa masse puisque l'un représente une force p et l'autre l'association $m = \rho V$.

La notion de champ est introduite par **Faraday** et **Maxwell** pour leurs études électromagnétiques. Si l'on étudie les phénomènes de pesanteur et d'attraction, se définit alors l'idée d'un champ g . On peut supposer que le choix d'écriture « g » et « G », entre le champ de pesanteur et la constante gravitationnelle soit intentionnel afin de rappeler leurs similitudes (on peut créer un champ gravitationnel G , associé à G et utilisable par le théorème de Gauss).

Cependant, la distinction menée par **Newton** entre la *vis insita* et la *vis impressa* donne l'existence de deux types de masses, l'une issue de l'inertie et l'autre du mouvement. On écrit ainsi pour le poids d'un corps qui est en chute et pour la force F associée à l'accélération a :

$$P = m_g \cdot g \qquad F = m_i \cdot a$$

m_g la masse grave d'un corps m_i est la masse inertielle

C'est en utilisant la relativité des mouvements qu'**Einstein** montra que les deux masses peuvent être confondues. Si les relations précédentes permirent de montrer que ces masses sont identiques, elles indiquent également que le champ de pesanteur est une accélération.

La question de l'uniformité de g fut à la base des problèmes de pendule rencontrés avant Newton par **Galilée** et **Huygens**. Par la suite, se posa également le problème du réglage des montres marines dont le battement de la seconde variait en fonction des latitudes. Ce problème était double. Il fut tout d'abord mis en évidence par de célèbres académiciens comme **Coulomb**, **Monge** et **Borda** (même s'ils ne furent pas les premiers à faire ces observations) puis devint problématique lorsqu'il fut question de définir la nouvelle mesure révolutionnaire du mètre (1792) en fonction de ce battement (**Talleyrand**, **Condorcet**). **Laplace**, **Poisson**, **Bessel** s'attachèrent à obtenir un modèle satisfaisant de l'expression de g en fonction de la latitude et de la longitude mais celui-ci devait forcément tenir compte également de l'inhomogénéité de la croûte terrestre et de la constitution de la Terre en général.

Conclusion

Le présent document couvre les notions abordées en seconde dont certaines ont déjà été vues au collège. L'aspect historique et théorique sera développé et approfondi dans le tome II consacré au programme de première S. Les titres des ouvrages ont été donnés en langue originelle quand cela fut possible afin de favoriser l'enseignement en langue vivante étrangère. Outre les mémoires numériques originaux, les traductions françaises faites pour les annales de physique et de chimie, une centaine d'ouvrages d'histoire des sciences a été compulsée dont les plus synthétiques et incontournables sont cités ci-dessous.

Bibliographie Sommaire

Ouvrages de Jean Baudet :

Penser le Monde, une histoire de la physique avant 1900

Penser la Matière, une histoire de la chimie

Ouvrages de René Taton :

La Science Antique et Médiévale

La Science Moderne

La Science Contemporaine Tome I et II

Autres Ouvrages :

Histoire de la Physique et des Physiciens, Jean-Claude Boudenot