

NOTES D'HISTOIRE DES SCIENCES

Christophe Chatelain

Université Henri Poincaré, Nancy

DEUG Sciences de la Matière, groupe 4, 2004

1. ANTIQUITÉ

(Bibliographie : 24, 29, 4, 14)

1.1. Les civilisations d'une science embryonnaire

1.1.1. L'Égypte ancienne

1.1.1.1. Contexte général de l'Égypte ancienne

L'organisation sociale et politique de l'Égypte s'articule autour d'un empire de droit divin, né de l'unification de la Basse et Haute-Égypte vers 3100 av. J.C. Malgré un art brillant, la basse époque égyptienne (I^{er} millénaire av. J.C.) est marquée par un affaiblissement du pouvoir central et des dominations étrangères (Assyrie, Perse). Trente et une dynasties se succèdent jusqu'en 332 av. J.C, date de la conquête par Alexandre de Macédoine.

1.1.1.2. La science de l'Égypte ancienne

L'Égypte des pharaons est restée isolée culturellement. La science n'y prend qu'un aspect pratique. L'écriture apparaît dès 3100 av. J.C. et l'arithmétique est utilisée par les scribes pour les besoins de l'administration. Les égyptiens utilisaient un système de numération décimale mais pas de position (i.e. avec un signe différent pour 10, 100, 1000, ... comme les romains) ce qui rendait les calculs difficiles. Ils utilisaient couramment les quatre opérations de l'arithmétique en décomposant toutefois la multiplication et la division en doublements et réduction de moitié.

$13 \times 7 =$	1	7	←	$168/8 =$	1	8	←
	2	14			2	16	
	4	28	←		4	32	←
	8	56	←		8	64	
	—	—			16	128	←
	13	91			—	—	
					21	168	

La monnaie n'est apparue en Égypte que tardivement et le commerce a longtemps reposé sur le troc d'où la nécessité du recours aux fractions. Les égyptiens ne manipulaient que les fractions de la forme $1/n$ et leur appliquaient multiplications et divisions sur le même principe que les entiers. Ils utilisaient parfois certaines formes plus générales ($2/3$ voire $5/6$) mais la fraction $7/8$ par exemple leur était inconnue ($7 \times 1/8 = 1/2 + 1/4 + 1/8$). Les égyptiens maîtrisaient la décomposition des fractions et utilisaient des tables pour faire l'économie de calculs fastidieux. Ils ne connaissaient semble-t-il pas le calcul algébrique mais ils étaient néanmoins capables de résoudre des équations du premier voire du second degré tel que $x + x/4 = 15$ en essayant $x = 4$ ce qui donne 5 puis en utilisant une règle de trois ce qui conduit à $x = 4 \times 15/5 = 12$.

La géométrie, comme l'arithmétique, se développe pour les besoins du commerce. Les égyptiens calculaient les surfaces et les volumes en utilisant des algorithmes obtenus par tâtonnement et non par démonstration. Ils estimaient la surface d'un cercle de diamètre d par $(d - d/9)^2 = 3.1605(d/2)^2$ alors que les peuples plus anciens utilisaient la valeur $\pi = 3$. La civilisation égyptienne est surtout connue pour sa maîtrise architecturale. Ils connaissaient notamment la balance, le fil à plomb, l'horloge à eau (avec un cylindre tronconique dont la forme compense la baisse de pression au cours de l'écoulement de l'eau), l'horloge à ombre, ...



Figure 1 : [Fig 1] Papyrus égyptien daté de 1650 av. J.C.

L'astronomie reste à un niveau peu élevé car l'arithmétique égyptienne est mal adaptée aux calculs nécessaires à cette discipline. L'astronomie qui apparaît tardivement est en fait hellénistique. Dans l'Égypte ancienne, l'astronomie est pratiquée pour la définition du calendrier. On doit aux égyptiens le calendrier de 365 jours (vers 2770 av. J.C.) composé de 12

1.1. Les civilisations d'une science embryonnaire

mois de 30 jours auxquels étaient ajoutés 5 jours complémentaires ⁽¹⁾ . La dérive d'un quart de jour par an rendait ce calendrier inutile pour la définition du début de la saison des inondations par exemple. Le début du règne de pharaon servait d'origine au calendrier. Les égyptiens découpaient le ciel en 36 décans dans chacun desquels une étoile servait de référence 10 jours par an pour la définition de la dernière heure de la nuit. Douze décans étant observables en une nuit, ils divisent nuits et journées chacun en douze heures de durée inégales. Les égyptiens ne pratiquaient pas l'astrologie et ne connaissaient donc pas le zodiaque. Un calendrier lunaire était utilisé pour la détermination des fêtes religieuses. Ils utilisaient également les astres pour définir le nord : les grandes pyramides dévient du nord vrai de moins de 1°.

Une médecine scientifique égyptienne naît peu à peu d'une activité initialement d'exorcisme. Les médecins étaient des fonctionnaires et certains étaient spécialisés. Malgré la momification, ils connaissaient assez mal l'intérieur du corps humain (ils ne connaissaient pas le foie par exemple). On a retrouvé beaucoup de traités compilant des remèdes dont certains sont encore en usage. Les caries, apparues dans les classes aisées étaient obstruées par un ciment. Les égyptiens pratiquaient également la chirurgie.

1.1.2. Mésopotamie

1.1.2.1. Contexte général de la Mésopotamie

Des habitations permanentes apparaissent dans l'actuelle Irak entre 10000 et 5000 av. J.C. et des civilisations bien définies vers 4000 av. J.C. La plus avancée d'entre elles était la civilisation sumérienne qui introduit notamment l'écriture cunéiforme vers 3500 av. J.C. (les hiéroglyphes ne se prêtaient pas à l'écriture sur les tablettes d'argile). L'écriture alphabétique (22 lettres) a été introduite par les phéniciens vers 1700 av. J.C. Les sumériens ont été supplantés vers 2350 av. J.C. par les akkadiens, un peuple sémite ⁽²⁾ à l'origine nomade. Les sumériens font leur retour deux siècles plus tard et leur civilisation atteint son apogée vers 2000 av. J.C. avant de décliner rapidement au profit des sémites. D'abord située à Our, la capitale fut déplacée à Babylone en 1894 av. J.C. L'épanouissement de la

⁽¹⁾ Le calendrier égyptien fut utilisé par les astronomes de Ptolémée à Copernic.

⁽²⁾ (de Sem, fils de Noé) ensemble de peuples du proche-orient parlant ou ayant parlé une langue sémitique (akkadiens, amorrites, araméens, phéniciens, arabes, hébreux, éthiopiens, ...).

civilisation sémite est suivie vers 1650 av. J.C. d'une vague d'invasions : hittites, hourrites, cassites, La période qui s'étend de 1800 av. J.C. à 1530 av. J.C., date du sac de Babylone par les hittites est appelée période paléo-babylonienne. La région connut ensuite beaucoup de luttes de pouvoir, en particulier une rivalité entre Babylone et l'Assyrie jusqu'à l'effondrement de cette dernière en 615 av. J.C. Commence alors la période dite néo-babylonienne avec pour Babylone une période faste pendant un siècle. L'invasion perse en 539 av. J.C. y met fin. La région reste sous domination perse jusqu'en 75 av. J.C.

1.1.2.2. La science en Mésopotamie

En Mésopotamie, la magie est une discipline savante et sacerdotale. Le champ de la divination était pratiquement illimité. Les sumériens pratiquaient l'astronomie à des fins religieuses. La dynastie chaldéenne qui gouverna le royaume pendant les VII^{ème} et VI^{ème} siècle av. J.C. a introduit les signes du zodiaque et leur capacité à prédire le mouvement des astres a conduit à l'**astrologie** (les horoscopes existaient en 410 av. J.C.). Ils pratiquent l'haruspiscine, l'art de lire l'avenir dans les viscères d'animaux. Ces disciplines ne sont pas figées mais évoluent selon un processus de confrontation à l'expérience qu'on peut qualifier de scientifique. La société paléo-babylonienne comprenait des médecins et des devins aux rôles complémentaires selon que la maladie était d'origine surnaturelle ou pas et dont les pratiques étaient codifiées par des tablettes rassemblant de longues listes de propositions "Si... alors...". La symptomatologie pratiquée par les médecins est une science exacte. Ils pratiquaient également la chirurgie (cataracte et césarienne par exemple).

La numération babylonienne est positionnelle et de base sexagésimale. Toutefois, à l'intérieur de chaque ordre, les babyloniens utilisaient un système décimal ce qui complique la lecture ⁽³⁾. Un espace était laissé pour le zéro. Ils manipulaient également les fractions multiples de 1/60. L'arithmétique était très avancée. Multiplications et divisions étaient opérées à partir de tables. Les racines carrées et cubiques étaient également tabulées (on a retrouvé une tablette donnant $\sqrt{2}$ à 10^{-6} près !). Ils manipulaient les séries arithmétiques et géométriques. L'algèbre était également très développée. Les babyloniens savaient résoudre les équations du premier et second degré à une ou plusieurs inconnues (substitution). Leurs acquis ont été par la suite oubliés avant leur redécouverte par les arabes. La géométrie était abordée d'un point de vue purement algébrique, contrairement par la suite aux grecs. Ils savaient notamment calculer les surfaces et

⁽³⁾ 1.20.1.1 = $60^3 + 20 \times 60^2 + 60 + 1$ se note comme 1.21.1 ou 1.22. Seul le contexte permet la distinction.

1.1. Les civilisations d'une science embryonnaire

les volumes (avec la valeur approchée $\pi \simeq 3$).

Une astronomie de position est née de la nécessité de définir un calendrier, ce qui requiert l'établissement des tables des mouvements de la lune et du soleil. Contrairement aux égyptiens, ils intercalaient des mois supplémentaires dans leur calendrier pour éviter sa dérive. Ils introduisirent des cycles hypothétiques comportant des nombres entiers d'années solaires et de mois lunaires, le plus connu étant le saros de 6585 jours ⁽⁴⁾. On leur doit la subdivision des heures en minutes et secondes. On a retrouvé des relevés des dates d'apparition et de disparition de Vénus datant de la période paléo-babylonienne. Les premiers relevés systématiques d'observation datent de la période cassite. Lors de la période néo-babylonienne, les astronomes établissent des tables du cheminement de la lune et des planètes et de leur conjonction avec les étoiles fixes. Les babyloniens étaient capables de prévoir les éclipses lunaires (mais pas solaires). La tendance à une description mathématique apparaît sous la domination perse. Dans les trois derniers siècles, l'étude du mouvement céleste est fondée sur des observations suivies et des théories mathématiques élaborées.

Pour les besoins du commerce, les sumériens définirent un système fermé de poids et mesures basé sur des multiples de 60 qui présente l'avantage de posséder beaucoup de diviseurs (2, 3, 4, 5, 6, 10, 12, 15, 20 et 30). Ni les sumériens, ni les akkadiens n'ont connu l'usage de la monnaie qui sera introduite par les perses.

1.1.3. Les civilisations d'Amérique

1.1.3.1. Les civilisations d'Amérique centrale

Si des traces d'agriculture ont été datées de 6500 av. J.C., les progrès furent lents et n'interviennent réellement qu'entre 1500 et 900 av. J.C. avec la civilisation olmèque. Les olmèques savaient par exemple mouler le caoutchouc et utilisaient de nombreux minéraux (jade, ...) souvent importés de comptoirs commerciaux. La civilisation zapothèque succéda aux olmèques vers 800 av. J.C. Les zapothèques utilisaient une écriture à base de hiéroglyphes et un calendrier élaboré d'une période de 52 ans (un jour occupe la même position après un cycle de 52×365 jours).

Présents dans la péninsule du Yucatan au moins dès 1000 av. J.-C., les Mayas ont développé une brillante civilisation qui s'est épanouie de 250 à

⁽⁴⁾ On retrouve une trace de l'influence babylonienne chez les grecs avec Méton (V^{ème} siècle av. J.C.) qui introduit un cycle de 19 années solaires et 235 mois lunaires.

900 après J.-C. (période classique). S'inspirant des découvertes et des idées héritées de civilisations plus anciennes comme celle des Olmèques (1500-500 av. J.-C.), ce peuple a pratiqué les mathématiques (numération à base 20) et l'astronomie principalement pour la mise au point de calendriers perfectionnés et a inventé l'écriture la plus développée du continent américain. Agriculteurs, tisserands et céramistes habiles, les Mayas furent de remarquables bâtisseurs. Bien que ne connaissant ni les métaux, ni les animaux de trait, ni la roue, ils construisirent dans la jungle tropicale d'imposantes cités organisées autour de gigantesques pyramides bordées de terrasses et surmontées d'un temple et de palais surélevés. Les traces de cette activité sont encore visibles dans toute l'aire maya, qui s'étendait principalement sur le sud-est du Mexique, le Guatemala et le Belize, ainsi qu'à l'ouest du Salvador et sur une partie du Honduras. Le premier "boom architectural" a eu lieu vers 500 ans av. J.-C., époque à laquelle furent construits Nakbé et El Mirador dont les pyramides sont tellement hautes qu'elles servent de repères aux pilotes d'avion survolant la forêt. Cet épisode a ensuite été suivi d'une longue période de stagnation. Puis, entre 250 et 300 après J.-C., ce fut la fulgurance du grand essor classique, principalement dans les basses terres centrales. C'est au début de cette période que les Mayas ont mis au point leur écriture glyphique, et nous ont laissé les premiers textes complexes et détaillés. La première stèle gravée, portant l'image d'un roi, a été trouvée à Tikal et date de 292 apr. J.-C. Tous les grands édifices ont été entièrement construits en pierre taillée. Les bâtiments officiels sont ornés de nombreuses sculptures en bas relief peintes de couleurs vives. Les Mayas décoraient aussi les murs intérieurs des plus beaux édifices avec des peintures murales. Cette première phase de la civilisation classique maya a vu l'émergence de dynasties royales qui ont contrôlé l'écriture sur les monuments publics et leur architecture, mais qui ont aussi exercé une lourde influence sur les céramiques polychromes et l'artisanat de luxe. Cette période fut suivie, à partir de 600 apr. J.-C., du classique récent, véritable apogée de cette civilisation. Mais elle s'effondre entre 830 et 909 apr. J.-C., du fait vraisemblablement de la décomposition du système politique et d'un fort exode (entre 80% et 90%). Les archéologues ont aujourd'hui la preuve que certains souverains se sont épuisés en guerres pour le pouvoir, qui les ont considérablement affaiblis. S'y sont probablement ajoutés des facteurs écologiques, comme cette terrible sécheresse qui a frappé la région vers le IXe siècle. Ensuite, le monde maya a connu un dernier et bref flamboiement dans le nord du Yucatan, région plus sèche, où ont été construites les puissantes villes d'Uxmal (du VIIIe au Xe siècle) et de Chichen Itza (IXe au XIIIe siècle).

Les civilisations toltèques puis les aztèques à partir du XIV^{ème} siècle

1.2. La Grèce antique

dominèrent la région sans toutefois rien apporter aux connaissances scientifiques des mayas (les toltèques par exemple ne savaient pas utiliser les animaux de trait). Lorsqu'ils entrent dans la ville aztèque de Tenochtitlán, les espagnols seront éblouis par cette nouvelle Venise dont l'urbanisme est bien supérieur à celui de l'Europe médiéval : l'eau potable est amenée dans chaque quartier par un aqueduc, les chaussées permettent à huit cavaliers de circuler de front.

1.1.3.2. Les civilisations d'Amérique du sud

Succédant à des peuples installés dans les Andes depuis 3500 ans av. J.C., les incas peu à peu imposèrent leur empire aux peuples andins. Si les régions colonisées conservent leur hiérarchie sociale, un tiers des terres est attribuée au culte et un second tiers à l'Inca. Les vassaux de l'Inca restent libres mais doivent régulièrement travailler pour lui. La société est articulée autour d'une puissante administration dirigée par des hauts fonctionnaires. Les incas développèrent une technologie avancée (irrigation, techniques de construction, ...) à partir de 800 ap. J.C. Bien que ne connaissant pas la roue, 3600 km de routes sillonnaient le pays au XV^{ème} siècle. Les incas inventèrent notamment le *quipu* formé d'un certain nombre de cordelettes suspendues à une corde principale et servant à compter et plus difficilement à calculer.

1.2. La Grèce antique

(Bibliographie :10)

1.2.1. La période de l'hellénisme classique

1.2.1.1. Les origines de la civilisation grecque

La civilisation grecque est l'héritière des civilisations minoenne (du nom du roi Minos) établie en Crète et mycénienne installée dans les Cyclades, nombreuses petites îles situées au sud-est de la Grèce continentale. En 2500 av. J.C., la métallurgie artisanale prospérait dans ces régions. La civilisation mycénienne disparut après l'assaut d'envahisseurs venus d'Anatolie (Turquie occidentale) à lequel les crétois résistèrent. La civilisation minoenne s'effondra peu après son apogée (première puissance maritime) en 1500 av. J.C. à la suite d'une violente éruption volcanique sur l'île proche de Théra, suivie une génération plus tard d'un incendie détruisant la plupart des villes crétoises. Les grecs anciens étaient les descendants des doriens venus du nord entre le X^{ème} et XI^{ème} siècle av. J.C.

L'originalité de la science grecque est de se libérer de la religion et de la magie et de s'élever au dessus des techniques. Elle cherche à comprendre

plutôt qu'à utiliser. Le *miracle grec*, à savoir l'apparition de la pratique de la critique et de la discussion rationnelles est probablement liée à l'implication des citoyens dans la vie politique des cités-états.

1.2.1.2. La première science ionienne

Homère, poète épique du IX^{ème} siècle av. J.C. considéré comme l'auteur de l'*Illiad*e et de l'*Odyssée* (cette dernière œuvre est probablement postérieure d'un siècle à la première) est le précurseur de la philosophie à venir. Il est alors déjà question de la décomposition de tous corps matériels en trois éléments (eau, terre et feu). C'est en Ionie dès le VII^{ème} siècle av. J.C. que vivent les premiers penseurs qu'Aristote appellera plusieurs siècles plus tard les "*physilogoï*", comme Thalès ou Pythagore. Ils s'efforcent d'apporter des explications aux phénomènes naturels sans faire intervenir d'intervention divine mais uniquement à partir de causes naturelles. Plus question d'expliquer les éclipses de soleil comme des caprices de Zeus ou les tremblements de terre comme l'expression de la colère des cyclopes et des titans.

Lors de son séjour en Lydie, **Thalès** (vers 625-580 av. J.C.) apprend suffisamment d'astronomie des mésopotamiens pour prédire l'éclipse solaire du 28 mai 585 av. J.C qui lui vaudra une grande renommée. Avec ses disciples, il pratique également la géométrie théorique et non plus appliquée. Thalès aurait mesuré la hauteur des pyramides en comparant leur ombre à celle d'un bâton planté en terre. Il introduit l'idée d'un **élément premier**, à la base de toutes choses, et qui est, selon lui, l'eau car l'humidité est fertilisante (les semences ont besoin d'eau pour vivre alors que ce qui est mort est desséché). Anaximandre (vers 610-547 av. J.C.) fait de l'élément premier un élément à part, non physique, impalpable, infini, illimité et éternel qu'il dénomme *apeiron*. Selon lui, l'eau ne pouvait être l'élément premier car dans ce cas, comment le feu serait-il venu à l'être s'il est annihilé par l'eau ? Toute substance est finie et déterminée. Naître, c'est devenir fini en se détachant de l'infini et mourir, c'est retourner au principe de toutes choses. Dans la cosmogonie d'Anaxagore, on retrouve l'idée de l'infini : au commencement, toutes choses étaient ensemble, infinies en nombre comme en petitesse. Tout est mêlé dans tout (pour que l'herbe par exemple devienne viande lorsqu'elle sera mangée). Il a formé le premier l'idée d'un *Intellect*, architecte d'un monde dont il est distinct. Anaximène (vers 585-525 av. J.C.) revient à la conception de Thalès mais avec l'air comme élément premier et avec l'originalité d'introduire les transformations entre éléments (transformation de l'air en eau par condensation et de l'eau en air par raréfaction). Héraclite (vers 550-480 av. J.C) pense quant à lui que le feu est l'élément premier et que le monde est un feu se nourrissant des choses qu'il dévore. Le monde n'a jamais été créé mais se transforme

1.2. La Grèce antique

sans cesse (on ne descend jamais strictement la même rivière).

Pour Thalès, l'univers est une bulle d'air hémisphérique au sein d'une masse liquide infinie. La surface concave de cette bulle est le ciel et la Terre est un disque plat flottant sur la surface plane de la bulle (ce qui expliquerait les tremblements de terre sans faire intervenir Poseïdon). A la même époque, Hécatee de Milet (560-480 av. J.C.), auteur de l'un des premiers ouvrages de géographie propose également l'image d'une Terre de la forme d'un disque entouré d'océans. Selon Anaximandre, la Terre est suspendue au centre de l'univers car à égale distance de toute chose. Les astres sont de petites ouvertures dans le brouillard qui entoure trois anneaux creux (Soleil, lune et astres) remplis d'un feu intérieur, de diamètres respectifs 27, 18 et 9 diamètres terrestres et dont la Terre est au centre. L'anneau associé au Soleil est le plus éloigné de tous. Anaximandre introduit également l'idée de pluralité des mondes. Anaximène reprend la théorie d'Anaximandre en revenant à l'idée rétrograde d'une Terre plate et en remplaçant les anneaux par des sphères. Ils distinguent également astres et planètes. Xénophane ne croît pas à la périodicité des phénomènes astronomiques et suggère un déplacement linéaire des astres avec une Terre sans dimension (et donc un nouveau soleil chaque jour).

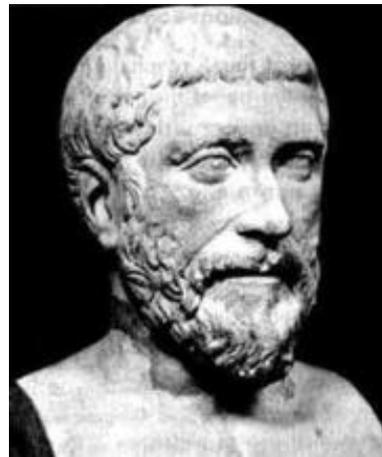


Figure 2 : [Fig 1 Fig 2] Portraits de Thalès (à gauche) et Pythagore (à droite).

1.2.1.3. Pythagore et son école

Malgré l'absence de toute œuvre écrite, **Pythagore** (VI^{ème} siècle av. J.C.) a une importante influence sur la science grecque. Chef religieux d'une secte philosophique et scientifique à vocation politique, il milite contre le relâchement des mœurs dû à l'opulence des aristocrates et prône la maîtrise de soi, le courage et la discipline collective. Il adopte une théorie dualiste dans laquelle existent dix oppositions fondamentales (limité/illimité,

pair/impair, droit/courbe, ...). Il professe que “le nombre est à l’origine de toute chose”. Il tente avec ses disciples de comprendre le monde à l’aide des mathématiques. Il démontre le théorème qui porte son nom, construit une théorie des cordes vibrantes (relation entre la longueur d’une corde et la note produite). Sa découverte la plus importante est celle concernant l’existence de triangles rectangles dont l’hypothénuse peut être irrationnelle (1^{ère} démonstration par l’absurde ⁽⁵⁾).

Pythagore pratiquait également l’astronomie et proposa un modèle d’univers sphérique dans lequel les planètes, le soleil et la voûte céleste supportant les étoiles décrivent des orbites circulaires autour de la Terre, qui prend dans la théorie la forme d’un globe. La Terre contient en son centre un feu central (*Hestia*). Il distingue également le monde sublunaire du monde supralunaire immuable. Pythagore quitta la Grèce pour la côte est de l’Italie où son école perdura. L’un des ses disciples, Philolaos, avança l’hypothèse de l’existence d’un feu central distinct de la Terre et dont la vue nous serait en permanence masquée par une anti-Terre en orbite à la même vitesse que la Terre. L’univers contient alors 10 corps (anti-Terre, Terre, Lune, Soleil puis les planètes et enfin la voûte céleste), 10 étant un nombre parfait. Les éclipses de lune causées par l’anti-Terre expliquait pourquoi elles sont deux fois plus nombreuses que celles de soleil. Il déduit également de l’existence des cinq solides réguliers (tétraèdre, cube, octaèdre, dodécaèdre et icosaèdre) l’existence d’un cinquième élément, l’**éther**.

Le seul problème d’optique vraiment débattu chez les grecs est celui de la vision. Les pythagoriciens postulent l’existence du *quid* qui, sortant des yeux, va à la rencontre des objets et provoquent la vision.

1.2.1.4. Le problème du changement

Au V^{ème} siècle, la science grecque est marquée par l’école italique des éleates, notamment Zénon (né vers 490 av. J.C.) et Parménide (515-450 av. J.C). Ce dernier introduit le réalisme scientifique en insistant sur la différence entre intelligible et sensible. Penser doit être la même chose que ce que vise la pensée pour assurer l’unité de l’être. Parménide nie que quoique ce soit puisse venir à être à partir de ce qui est totalement inexistant. Il en vient à nier l’existence de toutes choses. L’être est nécessairement

⁽⁵⁾ Soient AC la diagonale d’un carré, AB son côté et a/b leur rapport sous forme d’une fraction irréductible. D’après le théorème de Pythagore, $a^2 = 2b^2$ donc a^2 et par conséquent a sont pairs. Il existe un entier c tel que $a = 2c$ donc d’après le théorème de Pythagore, $b^2 = a^2/2 = 2c^2$. On en conclut que b^2 et donc b sont pairs ce qui incompatible avec l’hypothèse que a/b est une fraction irréductible.

1.2. La Grèce antique

et éternellement puisqu'il ne peut pas avoir été ou devoir être. Ses continuateurs développent des arguments en sa faveur, tel le paradoxe de la course d'Achille et la tortue, proposé par Zénon et qui est une preuve de l'impossibilité du mouvement et une manifestation du dilemme entre nos sens et la raison.

1.2.1.5. Les atomistes

Empédocle (490-430 av. J.C.) part de la doctrine de Parménide mais réhabilite les sens et restaure la notion de changement. Il introduit une cosmogonie fondée sur quatre éléments immuables (terre, air, eau et feu), origine de toutes choses. Le changement provient de la combinaison et la séparation de ces éléments sous l'effet de deux forces (amour et haine, i.e. attraction et répulsion dans un univers emporté dans un cycle éternel). Il propose également une théorie des proportions (l'os est composé de feu, eau et terre dans les proportions 4 : 2 : 2). C'est un premier pas vers une théorie atomique mais qui ne reçoit pas l'adhésion de tous. Néanmoins, la théorie des quatre éléments prévaut jusqu'à la Renaissance et sera intimement liée à l'Alchimie.

Anaxagore (500-430 av. J.C.) est un opposant à la théorie d'Empédocle. Il affirme la continuité de la matière et la conservation de ses propriétés à chaque division. Il explique le changement en expliquant qu'en toute chose, il y a une portion de toute chose (ce qui résout par exemple le problème de la source de cheveux dans l'alimentation). Pour Anaxagore, l'univers s'est formé au sein d'un chaos illimité dans lequel un tourbillon s'est développé autour de la Terre.



Figure 3 : [Fig 1] Portrait de Democrite.

Le concept d'**atomes** indivisibles, éternels et flottant dans le vide est avancé par Leucippe et son élève Démocrite (460-370 av. J.C.). Leur théorie

est élaborée et inclut par exemple les cinq sens ainsi que l'âme ce qui suppose l'absence de vie après la mort. Le changement est dû à la combinaison ou à la séparation des atomes. Leucippe soutenait qu'il fallait considérer comme réels l'être ("ou ce qui est", i.e. les atomes) mais aussi le non-être ("ou ce qui n'est pas", i.e. le vide). Selon Leucippe et Démocrite, le chaos primitif était formé d'atomes qui se sont regroupés de manière cohérente grâce à de petits crochets qu'ils portent. Démocrite s'est intéressé à beaucoup de choses : physique, cosmologie, astronomie, zoologie, botanique et médecine. Selon lui, la connaissance n'est légitime que si elle vient de l'esprit et pas des sens. Forme, taille et arrangement des atomes sont des qualités secondaires fournies par les sens et purement conventionnelles. La sensation d'acidité était dû à des atomes anguleux. Pour les atomistes Leucippe, Démocrite et Lucrèce, ce sont les objets qui, en émettant de la lumière sous forme granulaire en direction de nos yeux, manifestent leur présence. Ils avaient en effet noté l'existence de certaines émanations (fumée du bois, chaleur du feu ...) qu'ils interprétaient comme des particules s'échappant des corps et s'introduisant dans les conduits de notre organisme pour y stimuler les sensations. Ils supposent l'existence d'émanations plus subtiles. Certaines (*eidola*) s'échappent des corps en conservant leur forme et reproduisent cette forme en nous sous des grandeurs proportionnellement réduites et causent la vue. Les particules se retournent lors d'un choc sur un miroir d'où l'égalité des angles d'incidence et de réflexion. La réfraction est pour eux une erreur imputable aux jugements de l'esprit. Il considèrent la vitesse de la lumière finie bien que très grande. Cette théorie a été systématiquement ridiculisée : il était alors admis que ce sont les yeux qui émettaient un feu subtil vers les objets.

1.2.2. La science aristotélicienne

1.2.2.1. Socrate et Platon

Au IV^{ème} siècle, Périclès stratège (élu) d'Athènes porte la ville à son apogée. **Socrate** (470-399 av. J.C.) eut un impact considérable sur la philosophie grecque. Il met méthodiquement en question l'ensemble des valeurs religieuses, morales et politiques de la cité d'Athènes au nom d'une certaine conception de la raison, inspirée des mathématiques. Ses idées furent répandues par son disciple **Platon** (428-348 av. J.C.). Socrate s'opposa aux sophistes qu'il accusait de manquer de sérieux et de négliger l'enseignement des valeurs morales mais aussi aux météorologues et aux astronomes. Toutefois, comme les sophistes qu'il combat (comme Protagoras d'Abdère), il est défavorable à la science pure. L'étude doit être limitée aux choses utiles comme la recherche de soi ("*connais-toi toi même*"). Son relativisme tourne parfois au nihilisme : "*je ne sais qu'une chose, c'est que*

1.2. La Grèce antique

je ne sais rien". Il fut condamné à mort pour avoir corrompu la jeunesse athénienne.

Platon fonda une académie où il enseignait ses idées et celles de Socrate et qui ne sera fermée qu'en 529 ap. J.C. par les byzantins. Pour Platon, on ne pouvait se faire une idée de l'univers que par la seule pensée. Aucune explication exacte du monde du devenir n'est possible et la philosophie doit avoir pour objet primordial le monde des Formes. Il remet la science au premier plan de toute activité intellectuelle et place les mathématiques en avant de toute science ("*Nul n'entre ici s'il n'est géomètre*" écrit-il au fronton de l'Académie). Il reconnaît leur grandeur mais est conscient de la limite qu'impose la nécessité du choix de postulats de départ. Il méprise les sciences expérimentales. Comme Empédocle, il considère que toute substance naturelle est composée des quatre éléments feu, air, eau et terre. Il poursuit l'analyse en associant à chaque corps un solide régulier (tétraèdre pour le feu, cube pour la terre, octaèdre pour l'air et icosaèdre pour l'eau) et en permettant leur combinaison de manière géométrique ("*Un octaèdre d'air se décompose en deux tétraèdres de feu.*").

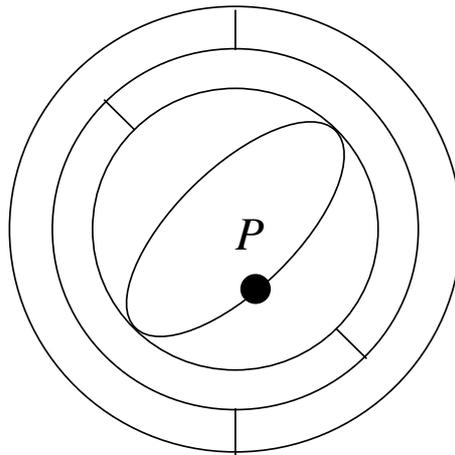


Figure 4 : [Fig 1] Système de sphères d'Eudoxe de Cnide expliquant le mouvement complexe d'une planète P : la première sphère, la plus extérieure, tourne autour d'un axe qui passe par le centre du monde. La seconde participe au mouvement de la première mais, en elle, ce mouvement se compose avec une rotation uniforme dont l'axe, le sens et la vitesse lui sont propres. La composition se poursuit ainsi jusqu'à la quatrième sphère porteuse de l'astre.

Platon reprit le modèle d'univers d'Anaximandre mais en remplace les anneaux supports des orbites des astres par des sphères de cristal

homocentriques. Au IV^{ème} siècle, Eudoxe de Cnide (405-350 av. J.C.) parvient à élaborer un tel système à partir des données astronomiques au prix de l'introduction d'une hiérarchie de sphères d'axes de rotation différents (à la manière d'un gyroscope) rendant compte des mouvements complexes des astres (notamment le mouvement rétrograde des planètes). Son disciple, Callipe de Cyzique, ajoute 7 sphères supplémentaires dont une au Soleil pour rendre compte de l'inégalité de la durée des saisons.

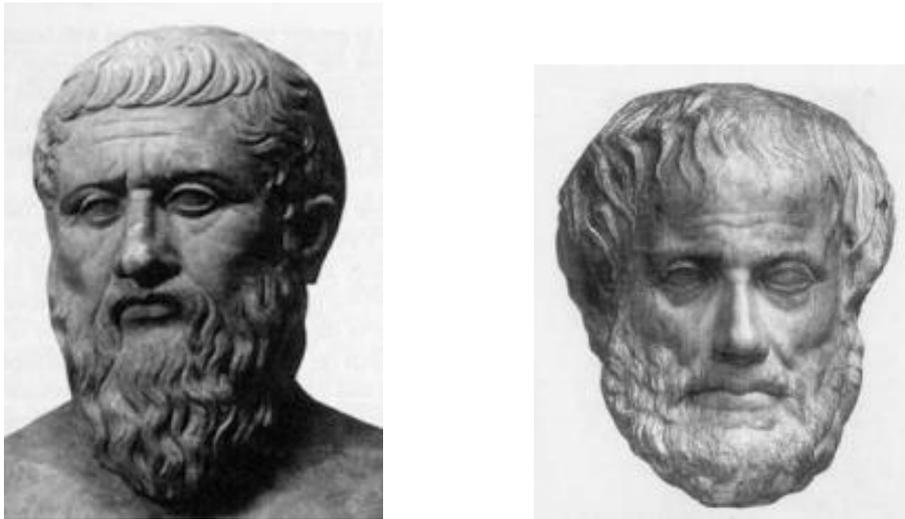


Figure 5 : [Fig 1 Fig 2] Portrait de Platon (à gauche) et d'Aristote (à droite)

1.2.2.2. Aristote

La plus importante des contributions grecques à la science est celle d'**Aristote** (384-322 av. J.C.). Élève de Platon pendant 20 ans, il fut par la suite précepteur du prince de Macédoine, futur Alexandre le grand. Il formalise le raisonnement déductif (par syllogisme : "*Tous les hommes sont mortels. Socrate est un homme donc Socrate est mortel*"). Le savoir procède par démonstration à partir d'axiomes, définitions et hypothèses et l'étude des principes premiers, indémontrables, relève de la métaphysique. La réponse d'Aristote au problème du changement posé par Parménide repose sur la distinction entre potentialité (non-être dans l'être) et actualité (la graine est potentiellement une plante mais pas actuellement). Aristote nie qu'un dessein conscient soit à l'œuvre dans la nature mais il existe selon lui des fins dans les processus naturels (développement et reproduction).

1.2.2.2.1. La physique d'Aristote

Aristote pensait que l'application d'une force constante était nécessaire pour maintenir un corps en mouvement à cause de la résistance du milieu (**mouvement forcé**). Un projectile ne s'arrête pas instantanément car l'air

1.2. La Grèce antique

effectue un mouvement circulaire autour de lui et le pousse par l'arrière. Il expliqua la chute des corps en supposant que toute chose avait sa place naturelle : le centre de la Terre pour les matériaux à base de l'élément terre, la surface du sol pour les liquides constitués d'eau, l'atmosphère pour l'air et une sphère au-dessus de nos têtes pour le feu (**mouvement naturel**). Il dit dans un ouvrage que la vitesse est directement proportionnelle au poids du corps et parle dans un second d'une vitesse inversement proportionnelle à la densité du milieu à travers lequel s'effectue le mouvement. Le vide ne pouvait donc pas exister (une vitesse infinie pourrait être atteinte). Le mouvement des astres se doit pour lui d'être circulaire (perfection) ce qui le pousse à avancer l'idée que les corps célestes sont constitués d'un cinquième élément, l'éther, dont le mouvement naturel est circulaire. La Terre n'étant manifestement pas faite d'éther, elle n'a aucun mouvement et se trouve au centre d'un univers qu'Aristote imaginait analogue à celui d'Eudoxe de Cnide. Alors que pour Platon l'astronomie doit se limiter à construire un modèle théorique reproduisant les observations ("*sauver les phénomènes*"), Aristote cherche dans la physique l'origine du mouvement des astres.

1.2.2.2.2. La lumière et l'intertransformabilité des éléments

Concernant le problème de la vision, Aristote rejette la conception atomiste mais s'il admet l'existence d'un mouvement de l'œil vers l'objet, il nie l'existence du *quid*. En effet, son existence ne permet pas selon lui d'expliquer l'obscurité de la nuit. L'absence de vision nocturne lui fit dire, comme les atomistes, que la lumière provient des objets. Il introduit l'idée de l'importance du milieu intermédiaire pour la vision et développa une théorie dynamique dans laquelle la lumière est une modification du milieu transparent ambiant qui se propage à vitesse infinie. Aristote enseignait que la lumière était blanche et que les couleurs naissaient progressivement de son affaiblissement.

Il donna une base logique à la notion d'intertransformation des éléments déjà existante en leur associant des qualités (froid et sec pour la terre, froid et humide pour l'eau, chaud et humide pour l'air et chaud et sec pour le feu). Il entreprend l'étude systématique des propriétés physiques des substances naturelles (ce qui représente une grande originalité comparée aux travaux jusqu'alors essentiellement théoriques).

1.2.2.2.3. La biologie d'Aristote

La vie naît selon lui de la chaleur (élément feu dont l'homme par exemple -mais pas seulement- était constitué) et de l'humidité (eau, la femme). Cette conception autorisant la génération spontanée est acceptée jusqu'aux travaux de Pasteur. Contrairement à Platon, Aristote prônait l'expérimentation (il pratiquait la dissection de manière systématique).

Bien qu'Aristote ait tiré parti d'observations antérieures dont certaines remontent aux premiers physiologues milésiens, il a fondé l'enseignement des sciences naturelles. Sans doute, la nécessité s'imposait-elle de réagir au platonisme. Aristote fonde la zoologie. Il s'intéresse aux moeurs des animaux, étudie l'influence des climats sur leur mode de vie, décrit leur habitat, leurs maladies. Il décrit 495 espèces dont 60 mammifères et 160 oiseaux. Son classement des espèces est basé sur la complexité de leur âme. Les animaux à sang rouge sont divisés en quadrupèdes vivipares (mammifères, cétacés, ...) subdivisés selon la complexité de leur squelette, quadrupèdes ovipares (reptiles), les oiseaux et les poissons. Les animaux sans sang rouge sont divisés en céphalopodes (corps mou), crustacés (écailles), coquillages et insectes. Il présente la nature comme une force ingénieuse, organisatrice, soucieuse de perfection et note que les organes ne sont attribués qu'aux animaux qui savent en faire usage. Il étudie la reproduction et admet la génération spontanée pour des formes de vie inférieures mais pas ex-nihilo, car sa doctrine implique la préexistence au surgissement de toute vie d'une âme partout répandue, *psyché*, latente et omniprésente qui, dans des conditions favorables peut animer un fragment de matière. L'hérédité des caractères acquis est généralement admise. Contrairement à Hippocrate qui se veut **préformateur**, i.e. pour qui dans le sperme se trouve des particules de toutes les parties du corps (un homme mutilé engendre des enfants mutilés), Aristote est **épigéniste** : il pense que le sperme renferme en puissance toutes les formes.

1.2.2.2.4. Les successeurs d'Aristote

Théophraste (371-287 av. J.C.), élève et successeur d'Aristote à la tête de son école (*le Lycée*), s'intéressa plus particulièrement à la botanique : il observa de manière scientifique et classa quelques 550 espèces végétales. Il apporte plusieurs critiques à l'œuvre de son maître. Par exemple, il nie que le feu puisse-t-être un élément premier car il requiert un combustible. Straton qui dirigea également le Lycée, conteste l'existence d'un mouvement naturel vers le haut des éléments légers, le mouvement naturel vers le bas des éléments lourds suffisant à l'explication de tous les phénomènes physiques. Il réalise une série d'expériences en physique pour prouver par exemple l'existence de poche de vide dans l'air expliquant sa compressibilité.

1.2.3. La science hellénistique

L'indépendance de la Grèce prit fin en 338 av. J.C. après sa conquête par Philippe de Macédoine. L'empire macédonien atteint son extension maximale avec son fils Alexandre le grand. Alors que l'histoire des V et IV^{ème} siècles av. J.C. est essentiellement celle de la lutte pour l'hégémonie

1.2. La Grèce antique

entre les États-cités de la Grèce, le théâtre politique s'étend à partir du III^{ème} siècle aux royaumes issus de l'empire d'Alexandre. Le plus important est celui d'Égypte sous domination macédonienne depuis 332 av. J.C. et dirigé par la dynastie des Ptolémée. La science grecque profita de la facilité nouvelle d'échange avec le monde non-grec. De plus, alors que les philosophes vivaient jusqu'alors essentiellement de leur fortune personnelle et plus rarement et tardivement de leur enseignement ou de la pratique de la médecine, certains rois hellénistiques, en particulier les Ptolémée, apportent un soutien financier à l'exercice de la science. La **Bibliothèque**, comportant jusqu'à 700.000 manuscrits fut probablement fondée par Ptolémée I^{er} et le **Musée**, tourné vers la recherche et non l'enseignement comme l'Académie ou le Lycée, par Ptolémée II vers 280 av. J.C. La ville d'Alexandrie devient le centre principal des recherches mathématiques, astronomiques et biologiques au III^{ème} siècle av. J.C. Athènes reste la cité dominante pour la philosophie, terme qui regroupait l'éthique, la logique et la physique.

1.2.3.1. Les sciences appliquées

Par intérêt, les rois hellénistiques soutiennent la science appliquée. La mécanique est appliquée à la construction d'engins de guerre. Levier, poulie, coin et treuil étaient en usage bien avant le IV^{ème} siècle. La vis fut une innovation du III^{ème} siècle av. J.C. et fut tout d'abord utilisée à l'élévation de l'eau. La puissance motrice de la vapeur ne fut exploitée que pour des jouets. De même, l'usage de la roue à eau ne se généralise qu'au III^{ème} ap. J.C. L'importance de l'esclavage explique probablement la lenteur des développements technologiques dans l'antiquité.

1.2.3.2. Sciences de la vie et médecine

Les sciences de la vie déclinent après Aristote et Théophraste. La recherche biologique se spécialise et se concentre sur l'homme. En zoologie, l'amour de la recherche cède au goût du merveilleux alimenté par les récits des voyageurs et les fables. Posidonius (135-51 av. J.C.) fonde l'ethnologie, i.e. l'étude des peuples, sur ses caractères non seulement physiques mais aussi psychologiques. Il décrit les celtes et les germains comme grands, blonds et hyperémotifs (*thymos*) alors que selon lui, les méditerranéens, plus petits et foncés sont rationnels (*logos*) ce qui permet la civilisation. Les médecins alexandrins pratiquent la dissection de corps humains et même la vivisection de prisonniers condamnés. Les plus importants furent Hérophile de Chalcédoine et Erasistrate de Céos. Un courant empiriste se développe.

1.2.3.3. Épicuriens et stoïciens

Épicuriens et stoïciens divisaient la philosophie en éthique, logique et physique. Le but de la philosophie est selon eux d'atteindre le bonheur. Ce

dernier est indépendant des facteurs externes : le sage est heureux même sous la torture. Pour être heureux, l'homme devait donc être libéré de l'anxiété et de la crainte. Epicure (341 av. J.C.-?) pense qu'il n'est pas nécessaire d'étudier la physique au delà du point suffisant pour disposer d'explications des phénomènes auxquels on pourrait être tenté d'attribuer une origine surnaturelle. Il adhère à la théorie atomiste de Leucippe et Démocrite. Epicure propose la théorie des déclinaisons, qui sera tournée en dérision, selon laquelle tous les atomes tombaient à la même vitesse lorsqu'une déviation infime de l'un d'entre eux entraîna une succession de chocs à l'origine du monde. Les stoïciens, à la suite de Zénon de Kittion, niaient l'existence du vide et croyaient la substance divisible. L'univers est selon eux un être vivant, pénétré de souffle vital, d'âme et de raison.

1.2.3.4. Les mathématiques hellénistiques

Euclide fonda au III^{ème} siècle av. J.C. une grande école de mathématiques à Alexandrie. Il posa la géométrie sur des bases solides synthétisées dans son œuvre "*les éléments*", base de tout enseignement en Occident jusqu'à une époque très récente. Euclide fonde également l'optique géométrique : il établit le concept de rayons lumineux et publie deux traités d'optique dans lesquels il énonce sous forme géométrique de nombreuses lois (dont celle de la réflexion). **Apollonios de Perga** (262-180 av. J.C.) travailla principalement sur les coniques (il est à l'origine des termes ellipse, parabole et hyperbole). Les systèmes d'équations dits indéterminés ont été étudiés par Diophante (vers 350). La notion de fonction était étrangère aux grecs. Ils n'ont donc pas pratiqué l'analyse. Toutefois, ils montrèrent que le nombre π , qui restait numériquement indéterminé, est le même dans les formules de la circonférence et de la surface du cercle (Archimède). L'infini leur pose problème et bien qu'ils calculent des surfaces par récurrence, ils n'inventèrent pas la démonstration par récurrence.

1.2.3.5. Archimède

Génial inventeur vivant à Syracuse (Sicile), **Archimède** (287-212 av. J.C.) s'intéressa à la mécanique (théorie des leviers et des poulies, vis sans fin) et à l'hydrostatique (poussée d'Archimède) mais son activité principale fût les mathématiques. Il introduit une nouvelle notation permettant de manipuler les grands nombres qu'il mit à l'œuvre dans la détermination du nombre de grains de sable que peut contenir l'univers ($\sim 10^{63}$ selon lui). Il calculait les aires en encadrant la surface par deux polygones respectivement inscrit et circonscrit (**méthode d'exhaustion** qu'Euclide avait utilisé en se limitant à des polygones inscrits). Il donna une estimation de π ($3 + \frac{10}{71} < \pi < 3 + \frac{1}{7}$). Archimède montra l'équivalence (au sens de l'égalité de leur surface) du cercle et du triangle ayant pour base la

1.2. La Grèce antique

circonférence et pour hauteur le rayon. Il montra également que le rapport des volumes d'un cylindre ($2R \times \pi R^2$) et de la sphère la plus grosse ($\frac{4}{3}\pi R^3$) qu'il peut contenir est $3/2$. Il proposa la mesure du volume d'un corps en le plongeant dans l'eau et en mesurant la variation de hauteur de la surface ⁽⁶⁾. Il est également le premier à décrire le phénomène de réfraction.



Figure 6 : [Fig 1 Fig 2] Portrait d'Euclide (à gauche) et d'Archimède (à droite).

1.2.3.6. L'astronomie hellénistique

Aristarque de Samos (310-230 av. J.C.) proposa la première théorie héliocentrique (vers 290 av. J.C.) dans laquelle les étoiles et le soleil sont fixes et les planètes tournent autour du Soleil. Cette théorie présentait l'avantage de permettre de se passer du système complexe de sphères concentriques d'Eudoxe de Cnide pour expliquer les trajectoires des planètes. Toutefois, elle fut presque unanimement rejetée car elle allait à l'encontre de la théorie du mouvement naturel d'Aristote, elle supposait un mouvement de la Terre qui pensait-on ne permettait pas d'observer les nuages au repos et elle impliquaient un mouvement des étoiles par rapport à la Terre au cours de sa révolution autour du Soleil (parallaxe stellaire) qui n'avait pas encore été observé.

Erathostène (276-195 av. J.C.), géographe et mathématicien, fut directeur de la Bibliothèque. Il apporte une solution nouvelle au problème de la duplication du cube et mesure la circonférence terrestre en remarquant

⁽⁶⁾ On raconte que le roi lui avait demandé un moyen de vérifier qu'une couronne qu'il avait commandée était bien en or pur. Il découvrit la manière de procéder alors qu'il était dans les bains et rentra chez lui, nu, en courant et en s'écriant "*Eureka*".

que les rayons solaires atteignaient le fond d'un puits à Syène (actuelle Assouan) à midi le jour du solstice d'été. En mesurant la longueur de l'ombre portée par un bâton à la même date, il avança l'estimation de 36.960 km (252.000 stades contre 400.000 selon Aristote et 300.000 pour Archimède), très proche de la valeur moderne (40.009 km).

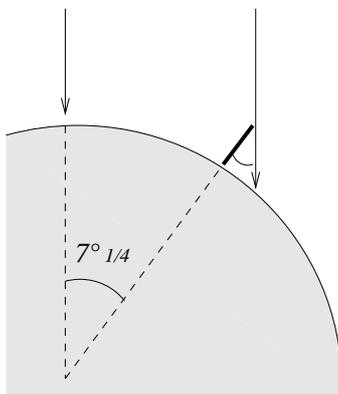


Figure 7 : [Fig 1] Technique d'estimation de la circonférence terrestre utilisée par Erathostène.

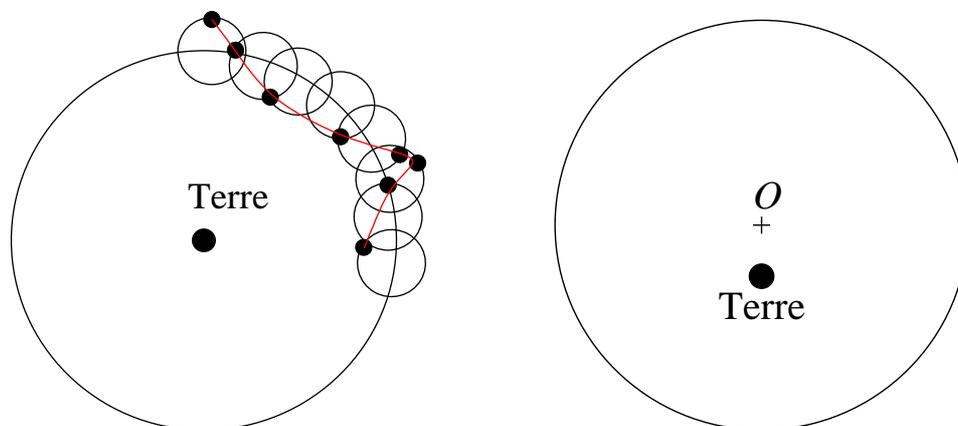


Figure 8 : [Fig 1 Fig 2] Un mouvement en sens inverse sur l'épicycle et le cercle déferent explique les rétrogradations des planètes (à gauche). Second système dans lequel la planète se meut sur un cercle dont le centre ne coïncide pas avec la Terre.

Apollonios expliqua le mouvement des planète en introduisant deux systèmes plus simples que les sphères concentriques d'Eudoxe de Cnide et basés d'une part sur des **épicycles** dont le centre C se meut le long de la circonférence du cercle déferent et de l'autre sur des cercles décentrés. Il montra probablement l'équivalence des deux modèles.

1.2. La Grèce antique

A cette époque se développe l'astronomie d'observation. **Hipparque** qui vécut au II^{ème} siècle fut l'un des plus grands astronomes grecs. Il améliora la précision de ses mesures en construisant lui-même des instruments évolués. Il découvrit la **précession des équinoxes** ⁽⁷⁾ et dressa un catalogue de la position de 850 étoiles. Ses travaux furent sauvegardés trois siècles plus tard par l'astronome alexandrin **Claude Ptolémée** (100-170 ap. J.C.) qui écrivit en 140 un traité marquant l'apogée de l'astronomie grecque : *Grande Syntaxe Mathématique* plus connu sous le nom d'*Almageste* que lui donnèrent les arabes. Il rejette l'hypothèse héliocentrique et prend pour point de départ les théories des épicycles et des excentrés d'Apollonios dont il donne une preuve de l'équivalence. Il enrichit les observations d'Hipparque en utilisant un astrolabe de sa fabrication et utilise ses données pour mettre sur pied une théorie satisfaisante du mouvement de la lune et des planètes, chose qu'Hipparque n'était pas parvenu à faire. Pour cela, il ajoute au modèle d'Apollonios une excentricité du cercle déférent et une vitesse angulaire du centre de l'épicycle uniforme par rapport à un troisième point différent du centre du cercle déférent ou de la Terre. Pour Mercure, il ajoute un second épicycle. Du point de vue de la théorie héliocentrique, pour les trois planètes extérieures, l'épicycle correspond au mouvement de la Terre autour du soleil et le cercle déférent au mouvement de la Terre autour du Soleil. Pour Mercure et Venus, c'est l'inverse.

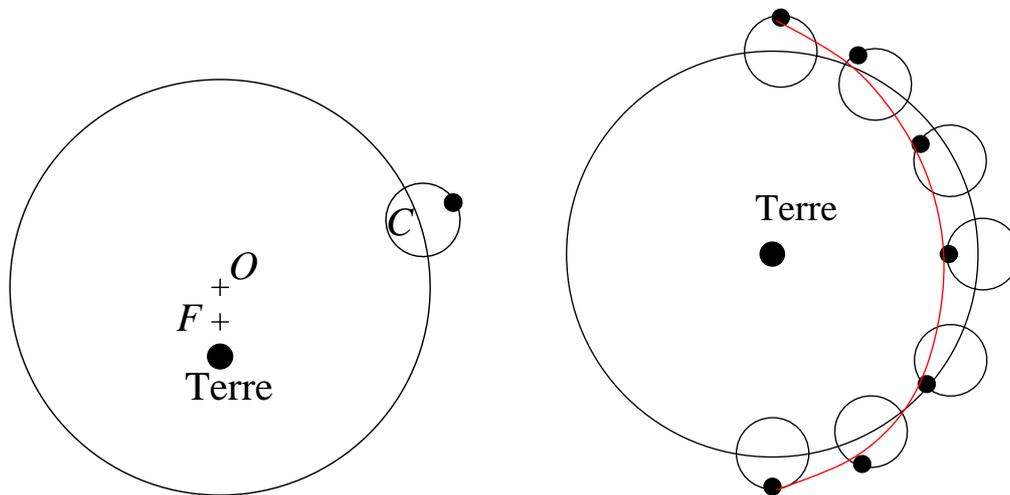


Figure 9 : [Fig 1 Fig 2] Système de Ptolémée où le cercle déférent possède un centre O excentré par rapport à la Terre et le centre

⁽⁷⁾ Déplacement par rapport aux étoiles des points équinoxiaux, i.e. intersection de l'écliptique (plan de la trajectoire terrestre) et de l'équateur. Il est dû à la non-sphéricité de la Terre qui provoque des oscillations ($T = 26000$ ans) de l'axe de la Terre.

C de l'épicycle a une vitesse angulaire uniforme par rapport à F (à gauche) et configuration du cercle déferent et de l'épicycle conduisant à des orbites elliptiques (à droite).

Ptolémée a également établi des tables trigonométriques. Il a écrit un traité d'astrologie et s'est intéressé à la géographie, l'acoustique, la théorie musicale et l'optique. Il vérifia expérimentalement la loi de la réflexion $i = i'$ et mesura la réfraction dans l'eau.



Figure 10 : [Fig 1] Portrait de Ptolémée

1.3. La Rome antique

1.3.1. De la cité romaine à la chute de l'empire

Rome est une petite cité du Latium fondée en 753 av. J.C. qui s'organise en république en 509 av. J.C. Elle étend peu à peu sa domination et défait lors des guerres puniques (146 av. J.C.) la colonie phénicienne de Carthage (fondée en 814 av. J.C.) qui contrôle alors la méditerranée occidentale. Les troubles qui suivirent les guerres civiles au I^{er} siècle av. J.C. conduisirent à l'édification d'un empire en 27 av. J.C. dont Auguste est le premier empereur. La Gaule est conquise en 52 av. J.C., le royaume d'Égypte en 30 av. J.C. L'empire atteint son apogée vers la fin du I^{er} siècle ap. J.C. L'empire romain apporte alors la paix ("*pax romana*") et la cohésion à une zone s'étendant de l'Égypte à la Grande-Bretagne.

Au III^{ème} siècle, l'empire doit faire face à deux conflits simultanés sur des fronts différents : au nord où les germains se sont organisés avec l'arrivée des Goths et à l'est où l'Iran est tombé aux mains de la dynastie

1.3. La Rome antique

perse des sassanides. L'armée est défaite, l'empereur Valérien tué et empaillé. L'économie s'effondre et l'armée prend le pouvoir. Les empereurs se succèdent et finissent pour la plupart assassinés. La population souffre de la pauvreté et en 249 de la peste. L'empire connaît 50 ans d'anarchie militaire et de crise sociale et économique. En 277, les invasions des francs et des alamans sont stoppées. La chrétienté s'étend et en 337, l'empereur Constantin se fait baptiser. Le christianisme devient religion d'état sous Théodose en 380. Au IV^{ème} siècle, les empereurs contiennent les germaniques en installant des peuplades barbares le long du Rhin et du Danube (en 378, les Goths sont recrutés pour garder le Danube et reçoivent le statut de peuple fédéré). Sous la pression des Huns, les invasions germaniques se font plus nombreuses. En 395, l'empire est divisé en deux : l'empire d'Orient avec Constantinople pour capitale et l'empire d'Occident administré par Rome. Rome est mise à sac par les Wisigoths d'Alaric en 410 et en 476, Odoacre, général romain d'origine germanique s'empare de Rome. Les Suèves s'installent en Galice, les Wisigoths en Espagne, les Francs dans le nord de la Gaule, les Burgondes au centre, les Vandales en Afrique du nord, les Angles, les Jutes et les Frisons en Angleterre, les Ostrogoths puis les Lombards en Italie. L'empire romain d'Orient perdure jusqu'en 1453.

1.3.2. Science et techniques dans l'empire romain

1.3.2.1. Travail des esclaves et mécanisation

L'antiquité connaissait les machines mais n'en fit qu'un emploi limité, n'utilisant l'engrenage et l'arbre à cames que pour les jouets et les automates. Les premiers moulins à eau sont construits vers la fin du II^{ème} siècle av. J.C. Leur puissance passe de 0,5 CV à 3 CV au I^{er} siècle ap. J.C. grâce à un engrenage. Le moulin retrouvé à l'est du mont Cassin accomplissait la tâche de 40 esclaves. Les romains construisent des aqueducs alimentant de véritables usines dont la plus grande est celle de Barbegal près d'Arles qui pouvait moulinier du blé pour 80.000 personnes. Toutefois, le monde antique reste indifférent à la mécanisation, l'esclavage fournissant une main d'œuvre bon marché. L'empereur la décourage par crainte d'un soulèvement des esclaves dont la tâche s'allégerait. L'esclavage continue après la chute de Rome mais décline graduellement.

1.3.2.2. La science romaine

Les penseurs romains, tel Pline l'ancien (23-79 ap. J.C.), étaient peu enclins à la spéculation scientifique et les mécènes à soutenir l'expérimentation. Toutefois, la civilisation et la science grecque jouissaient d'un grand prestige dans l'empire romain. Les œuvres d'Homère, Aristote et Platon y étaient enseignées. Seul **Galien** (131-201 ap. J.C.), médecin renommé et

très compétent de la famille impériale eut un impact sur la médecine occidentale médiévale mais aussi arabe. La physiologie de Galien est hautement spéculative mais ses descriptions témoignent d'observations minutieuses. Il propose notamment une structure de l'œil à partir de dissections sans toutefois parvenir à comprendre le mécanisme de la vision. Le III^{ème} siècle fut le témoin d'une renaissance du platonisme (néo-platonisme). A la même époque, le chrétien Jean Philopon d'Alexandrie se lança dans une opiniâtre offensive contre l'aristotélisme. Il critique la théorie du mouvement d'Aristote. Pourquoi un projectile s'il est poussé par l'air ne fait-il pas volte-face ? Selon Philopon, le milieu n'a pour seul effet que de résister au mouvement. Il rejette la distinction entre mouvement naturel et forcé et affirme que les astres sont constitués de l'élément feu et non d'éther.



Figure 11 : [Fig 1 Fig 2 Fig 3] Instruments de chirurgie romains.

1.3.2.3. Le déclin de la science en Occident

La science décline peu à peu, les siècles qui suivent le II^{ème} siècle furent beaucoup moins productifs que les précédents. Ptolémée et Galien sont néanmoins des figures majeures de cette époque. Les grandes philosophies hellénistiques, épéurisme et stoïcisme, déclinent vers la fin du II^{ème} siècle. Le dernier stoïcien est Marc Auréle (121-180). A partir de 200 environ, les principaux efforts tendent de plus en plus dans la préservation du savoir plutôt que dans des tentatives de l'accroître. La pénurie de main d'œuvre, le déclin de l'agriculture, l'insuffisance des moyens de communication conduisent à un climat social défavorable à la science. En Occident, la science régresse avant la chute de l'empire (affaiblissement des pouvoirs, déclin des villes, fermeture des écoles).

1.3.2.4. Le rôle du christianisme dans le déclin

A l'origine une obscure secte juive, la chrétienté est devenue la religion officielle de Rome après la conversion de l'empereur Constantin en 313. Avec sa montée en puissance vers 250, une carrière ecclésiastique devint

1.4. L'Orient antique

plus lucrative que celle de professeur ou de médecin. Saint Augustin (354-430), érudit tardivement converti en 387, s'efforce de montrer l'absence d'incompatibilité entre foi et science. Néanmoins, il traite des dangers d'une trop grande curiosité scientifique qui pourrait écarter de Dieu. Certains parlent d'hérésie. Jusqu'au XII^{ème} siècle, tous les savants étaient des clercs dont l'esprit penchait par conséquent davantage vers les matières concernant le salut et la glorification de Dieu que vers l'investigation détaillée de l'univers physique. L'épanouissement de la science grecque était en partie dû à un polythéisme peu encombrant. En 529, l'empereur byzantin Justinien ferme les écoles d'Athènes pour cause de paganisme. La Bibliothèque d'Alexandrie est brûlée par les chrétiens au V^{ème} siècle.

1.4. L'Orient antique

1.4.1. La Chine antique

1.4.1.1. Contexte général de la Chine antique

La première civilisation en Chine est celle des Yangshao en 2500 av. J.C. Vers 1600 av. J.C., une culture de l'âge du bronze se développe. L'écriture était déjà connue au XVI^{ème} siècle av. J.C, les faits astronomiques notés et l'état organisé avec des devins cherchant à prévoir les guerres, les famines et les inondations. On a retrouvé des vases de bronze de cette époque. En 1122 av. J.C. s'installe au pouvoir la 3^{ème} dynastie royale. Durant les quelques siècles qui suivirent, des progrès technologiques furent accomplis, notamment la métallurgie du fer et la culture à la charrue. Deux groupes d'écoles politiques coexistent : d'un part les interventionnistes telle l'école de MoTi ou les légistes et d'autre part les écoles s'inspirant de la culture des plantes. Ces dernières sont partagées entre deux courants : le confucianisme, enseignée par **Confucius** (552-479 av.J.C.) et qui prône l'harmonie et la justice dans les rapports sociaux par une connaissance de l'homme en société et le respect de l'individu et le taoïsme, fondée par Lao-Tseu (VI^{ème} siècle), mélange de religion, philosophie et science magique (VIII-V^{ème} siècle av. J.C.) pour qui l'étude de l'homme devait se faire hors de l'influence de la société. Le taoïsme stimulait le désir de s'informer sur les causes des phénomènes et ouvrit la voie au développement de la science chinoise. Contrairement à ce qui se passa en Occident, la religion ne s'opposa pas au développement scientifique. La conquête par le roi Ts'in (qui laissera son nom au pays) de tous les états chinois et la fondation de l'empire en 221 av. J.C. amena le triomphe des légistes. A partir de 206 av. J.C. avec les Hans, la dynastie s'appuie sur les confucéens (après une période taoïste). A partir du V^{ème} siècle av. J.C., la civilisation

chinoise est probablement la plus avancée. Toutefois, peut-être à cause de la lourde bureaucratie ou de l'état d'esprit hérité de Confucius, la révolution scientifique de la Renaissance n'eut pas d'équivalent en Chine.

1.4.1.2. La science de la Chine antique

Les chinois utilisaient un système de numération décimale (547 s'écrivaient cinq cent quatre dix sept) dès le XIII^{ème} siècle av. J.C. Ils manipulaient les nombres décimaux dès le IV^{ème} siècle av. J.C., les puissances de 10 et les nombres négatifs. Addition, soustraction, multiplication et division étaient facilitées par l'usage de baguettes de calcul puis d'abaques (VI^{ème} voire II^{ème} siècle ap. J.C.). Contrairement aux grecs, les mathématiques chinoises étaient surtout développées en algèbre (équations de degré 2, système linéaire d'équations, ...). Ils connaissaient par exemple le triangle de Pascal. Ils s'intéressèrent à la géométrie analytique et calculaient des surfaces et des volumes en utilisant dans un premier temps la valeur $\pi = 3$. Au V^{ème} siècle ap. J.C., Zu Chong-zhi et son fils calculèrent $3.1415926 < \pi < 3.1415927$ en découpant le disque unité en polygones réguliers.

Pour les chinois, la Terre et ses habitants faisaient partie d'un gigantesque organisme vivant dont aucune divinité ne contrôlait la destinée. Les textes retrouvés témoignent de l'existence d'au moins trois théories cosmologiques basées sur une Terre carrée ou sphérique avec un firmament solide puis un firmament composé d'étoiles dans le vide. Les chinois mesuraient la position des étoiles à partir de l'équateur céleste (plan de l'équateur terrestre) comme le font les astronomes actuels. Les grecs utilisaient quant à eux l'ectiptique (plan de la course apparente du soleil dans le ciel). L'astronomie chinoise avait essentiellement pour but la définition précise du calendrier demandée par l'administration. Ils cataloguèrent néanmoins dès 720 av. J.C. les éclipses, le passage de comètes mais aussi les novæ et super-novæ (1006, 1054, 1575 et 1604). Dès le IV^{ème} siècle av. J.C., des cartographies précises du ciel furent établies en utilisant des méthodes avancées de projection. Contrairement à ce qui se passait en Occident, la cartographie terrestre était également très avancée.

La civilisation chinoise a permis de nombreuses avancées technologiques. Contrairement aux grecs qui imaginaient une substance sortant des yeux pour prendre une image des objets, les chinois avaient une conception moderne de la lumière. Ils construisirent des lentilles dès le X^{ème} siècle sans toutefois en faire ni lunette ni télescope. Leur apport principal concerne la boussole, déjà courante au I^{er} siècle ap. J.C. Les chinois pratiquaient l'alchimie à la quête de l'immortalité (ils obtinrent la conservation des corps sans putréfaction). L'alchimie chinoise entraîna néanmoins des progrès dans

les domaines industriel (extraction du cuivre par précipitation), militaire (poudre à canon dès le X^{ème} siècle) et médical (préparation de minéraux). Les chinois pratiquaient également la géologie et la sismologie.

1.4.2. La civilisation hindoue

1.4.2.1. Contexte général de la civilisation hindoue

La civilisation hindoue avec sa division en castes (guerriers, prêtres, commerçants et manœuvres à l'origine) et son polythéisme ont pour origine une série d'invasions indo-européennes au XVIII^{ème} siècle av. J.C. Les idées de l'hindouisme furent poussées à l'extrême par l'enseignement de Bouddha (564-483 av. J.C.). Les premières villes établies dans la vallée de l'Indus datent de la période 2300 à 1750 av. J.C. et étaient pourvues d'une ingénierie (urbanisme, égouts, piscine, ...) et d'une économie au moins aussi développée qu'en Mésopotamie. Une activité scientifique est attestée dès le milieu du II^{ème} millénaire av. J.C. Elle utilise le sanskrit, la langue de la culture parlée par tous les hindous. La civilisation hindoue a joué pour l'Asie le même rôle de phare que la Grèce pour l'Occident. La science hindoue a été en contact avec les sciences babylonienne et hellénistique à partir de l'époque perse puis avec l'empire romain. Des échanges existaient également avec les chinois dès le I^{er} siècle puis avec les arabes. La culture islamique a entravé l'essor de la civilisation hindoue sans toutefois supprimer son influence.

1.4.2.2. La science de la civilisation hindoue

L'astronomie d'abord très primitive et attachée à la définition du calendrier s'est enrichie des textes mésopotamiens puis grecs. L'année comportait 360 jours de 12 mois auxquels était ajouté lorsque nécessaire un mois intercalaire de 30 jours puis 25 ou 26. Les jours étaient divisés en 30 moments. Les mathématiques hindoues étaient semblables aux mathématiques chinoises, essentiellement numériques et algébriques. Des progrès furent accomplis entre le IV^{ème} et le XI^{ème} siècle avec notamment l'introduction d'un signe différent (et non plus de bâtonnets comme les chinois) pour chaque chiffre et en particulier pour le 0. Le système est repris par la suite par les arabes avant de parvenir en Occident. Au VI^{ème} siècle, Aryabhata écrit un traité utilisant la numération décimale de position, la racine carrée et présentant la résolution d'équations du second degré. Au VII^{ème} siècle, Brahmagupta utilise des lettres pour désigner les inconnues et manipule les nombres négatifs. Des tables trigonométriques ont également été retrouvées. L'alchimie se développa sans but précis contrairement aux chinois qui recherchaient l'immortalité et plus tard aux occidentaux qui

espéraient synthétiser de l'or. Une théorie atomiste fit son apparition. Aux quatre éléments grecs fut ajouté un élément céleste et un ensemble d'atomes indivisibles furent associés à chacun de ces éléments. Le mouvement était pour les hindous dû à une force vive ("vega") transmise aux objets par une force initiale. La médecine hindoue et plus particulièrement la chirurgie était avancée (ablation de cataractes, cautérisation, ...) et a par la suite influencé la médecine grecque. Un effort de classification systématique des maladies a été accompli avec une recherche de leur origine en relation avec les cinq éléments de l'alchimie.

2. LE MOYEN-ÂGE

2.1. La civilisation islamique

(Bibliographie : 24, 29)

2.1.1. Contexte général de la civilisation islamique

La civilisation arabe doit sa cohésion à la religion islamique fondée en 622 ap. J.C. par Mahomet. La conquête arabe est brutale : les grands empires dominant le Moyen-Orient disparaissent en quelques décennies. La guerre sainte permit une expansion de l'Espagne à la vallée de l'Indus qui s'acheva vers 750 après que la dynastie abbassyde eut succédé aux omeyyades. Contrairement aux romains, les arabes étudient la culture des peuples soumis. La civilisation arabe connut du VIII^{ème} au XI^{ème} siècle un âge d'or où la traduction et l'étude des textes principalement grecs furent encouragées. Les oeuvres grecques, arrivées en Orient avec les chrétiens hérétiques et les juifs persécutés par Byzance, avaient été léguées aux bibliothèques et écoles musulmanes. Des échanges eurent lieu également avec la Chine et l'Inde. La langue grecque subsiste mais, par ordre du souverain, elle est remplacée par l'arabe dans l'administration en 705. Le calife al-Mansur crée Bagdad en 762 et y attire les savants de l'époque. Les scientifiques font alors partie de la cour et les princes recherchent le prestige en les finançant. Le calife Al-Ma'moun crée la Maison de la sagesse, centre permanent d'enseignement et de recherche. Par rapport aux grecs, le changement de perspective est total : les chercheurs arabes veulent trouver l'élixir de longue vie, la pierre philosophale, ... La science se heurta à partir du XV^{ème} siècle au traditionalisme islamique.

2.1.2. La science de la civilisation islamique

2.1.2.1. L'astronomie arabe

L'astronomie arabe se développe d'abord à partir de sources indiennes et perses et au delà mésopotamiennes. L'almageste de Ptolémée est traduit

au début du X^{ème} siècle. Al-Battani le commente et y apporte des corrections. Sans remettre fondamentalement en cause la conception grecque et plus particulièrement celle de Ptolémée, les arabes développèrent une astronomie méthodique de précision avec la construction d'observatoires et la publication de nombreuses tables astronomiques utilisées par les astronomes de la Renaissance. Les astronomes arabes mettent en œuvre le système décimal indien et développent la trigonométrie. Contrairement aux grecs, les arabes pratiquaient l'astrologie. Vers la fin du X^{ème} siècle, certains astronomes abandonnèrent les orbites elliptiques de Ptolémée pour revenir au système aristotélicien. L'astronomie arabe déclina à partir du XIII^{ème} siècle et après un dernier soubresaut d'intérêt disparut vers 1440.

2.1.2.2. L'optique arabe

Les arabes furent peu productifs dans le domaine de la physique mis à part quelques travaux en optique. La contribution originale des arabes surpasse de loin celle des grecs, principalement grâce à Al-Kindi (?-873) et **Ibn al-Haytham** (965-1039). Ce dernier rejette la conception grecque et établit que la lumière a une existence propre, indépendante de l'individu et du corps lumineux. Comment le soleil pourrait-il nous aveugler via le *quid* ? La vision se fait selon lui par des rayons venant de l'objet. La lumière et les couleurs se propagent de chaque point de l'objet jusqu'à l'œil le long de rayons rectilignes. A partir de la structure de l'œil établie par Galien, il suppose que la lumière pénètre ensuite dans les différentes tuniques concentriques de l'œil et s'y réfracte pour aboutir au cristallin. Ils y provoquent la formation d'une image dont chaque point correspond à ceux de l'objet. Il fait l'analogie de la réflexion avec le choc élastique d'une boule dure sur une surface plane, ce qui le conduit à la loi de la réflexion. Il écrit cette dernière sous forme vectorielle. i.e. comme le renversement de la composante normale des rayons lumineux sans changement de la composante tangentielle. Le modèle mécanique permet d'expliquer la réfraction comme un passage à un milieu plus résistant dans lequel la lumière a par conséquent une vitesse moindre. Il écrivit les lois, plus tard utilisées par Kepler et Descartes.

2.1.2.3. Les mathématiques arabes

Les arabes assimilèrent les mathématiques grecques et apportèrent à partir du IX^{ème} siècle deux contributions majeures facilitées par l'utilisation des chiffres hindous : la trigonométrie par l'astronome Al-Battāni et l'algèbre sous une forme moderne avec en particulier Al-Khwārizmi. Ce dernier est l'auteur de "Al-Jabr wa al-muqabala" (réduction et comparaison) dont dérive le mot algèbre. Il présente dans cet ouvrage les procédés

2.2. Le moyen-âge en Occident

de résolution de six équations :

$$\begin{array}{lll} ax = b\sqrt{x}, & ax = c, & b\sqrt{x} = c, \\ ax + b\sqrt{x} = c, & ax + c = b\sqrt{x}, & b\sqrt{x} + c = ax \end{array}$$

avec a, b, c des rationnels positifs. D'autres équations ou systèmes d'équations sont par la suite résolus : $x^3 + c = ax^2$ par Al Mahani au IX^{ème} siècle, $x^3 + 1 = 3x$ par Abou-I-joud au X^{ème} siècle, $x^3 = 3x + 1$ par Al-Biruni au XI^{ème} siècle, ...

2.1.2.4. Médecine et sciences de la vie

La médecine arabe était très développée mais la zoologie se limite à des récits merveilleux.

2.2. Le moyen-âge en Occident

2.2.1. Le haut moyen-âge

(Bibliographie : 1)

2.2.1.1. De l'empire romain à une société féodale

Sous la pression des huns d'Attila, les barbares s'installent dès le début du V^{ème} siècle partout où le pouvoir civil et militaire de l'empire a été impuissant à les chasser. 100.000 à 150.000 germains s'installent en Gaule en éliminant les grands propriétaires ou leur imposant le partage de leurs terres. En 476, l'empereur d'occident est remplacé par un roi barbare. Toutefois, la première partie de l'époque mérovingienne en Gaule est restée imprégnée de traditions héritées de l'Antiquité. La monarchie mérovingienne remplace l'idée romaine d'un État dont les agents ne sont que les représentants. La levée de l'impôt devient intermittent et les rois finissent par vivre de revenus fonciers, de butins de guerre et des amendes encaissées par la justice. Une aristocratie franque prend peu à peu le pas sur l'ancienne aristocratie gallo-romaine. A la faveur des partages du royaume entre les fils du roi défunt, elle acquiert un pouvoir croissant. Alors que l'administration religieuse devient le dernier refuge des membres des vieilles familles sénatoriales, l'aristocratie est devenue au VIII^{ème} siècle exclusivement militaire. Les vieilles familles aristocratiques romaines disparaissent. La fusion ethnique romano-germaine est réalisée. Dès la seconde moitié du VIII^{ème} siècle, les propriétaires (*dominus*) de domaine (*uilla*) cessent peu à peu d'entretenir des esclaves (*mancipia*) et accordent aux affranchis des terres sur leur domaine. Les domaines aux mains des grands propriétaires forment l'embryon d'une société préféodale.

L'éclatement du royaume mérovingien à la fin du VII^{ème} siècle entraîne la mise en place d'une société vassalique. Avec les germains, l'armée permanente et professionnelle de l'empire avaient disparu et chacun doit alors assurer sa propre sécurité contre les envahisseurs et les brigands. Les hommes aliènent leurs libertés pour garantir leur sécurité.

Les maires du palais deviennent les véritables gouvernants et les pipinides, descendants de Charles Martel, remplacent les derniers mérovingiens sur le trône de France (dynastie carolingienne) grâce à la gloire et à la fortune que leurs conquêtes militaires leur ont apportées. Ils ont su s'attirer la sympathie du pape à qui ils prêtent secours et font des vaincus leur vassaux et non ceux des derniers rois mérovingiens. Charlemagne étend son royaume à l'Italie et la Saxe et est couronné empereur romain par le pape Léon III en 800 en vertu d'une soi-disant délégation de ce pouvoir par Constantin au pape.

Les famines apparaissent au VI^{ème} siècle, probablement à cause du repli démographique. La ville du haut moyen-âge est relativement petite et se compose d'un bourg fortifié et d'un faubourg. Paris compte 20.000 habitants (contre 200.000 à la fin du moyen-âge). Les villes étaient probablement dirigées par l'évêque. Elles se dégradent aux VIII^{ème} et IX^{ème} siècles et n'abritent plus guère que des clercs.

2.2.1.2. L'Église catholique au haut moyen-âge

Après sa reconnaissance par l'Empire romain, l'Église avait quadrillé le territoire d'une administration distincte et parallèle à l'administration impériale. Alors que cette dernière s'écroule sous la pression des germains, l'Église tente d'assurer son maintien face à l'arianisme ⁽⁸⁾ des germains, aux assauts de l'Islam et au paganisme des envahisseurs du IX^{ème} siècle (normands, vikings, hongrois). Le paganisme germanique avait mis en péril la christianisation encore incomplète des gallo-romains. Alors que Clovis, le premier roi franc, se christianise, les wisigoths en Espagne et les vandales en Afrique du nord se heurtent à une forte résistance populaire en tentant d'imposer leur arianisme. Le catholicisme ne devient religion officielle de l'Espagne wisigothique qu'en 587. A la suite de la conversion des rois germains, les autorités ecclésiastiques et royales s'associent pour lutter contre le paganisme même si subsiste par exemple la mode du culte des reliques qui est une résurgence des traditions païennes. Dès le VI^{ème} siècle, l'Église n'est plus préoccupée par son combat de la culture aristocratique païenne du Bas Empire et commence à opposer un barrage à la culture

⁽⁸⁾ L'arianisme est la doctrine chrétienne d'Arius niant la divinité du Christ.

2.2. Le moyen-âge en Occident

folklorique des masses rurales où se trouve désormais le centre de gravité de la société. L'Église impose la distinction du bien et du mal, intimement liés dans la religiosité romaine. Dans l'Italie à feu et à sang, l'Église se heurte à l'arianisme des lombards. Pour assurer sa protection, elle doit faire appel au VIII^{ème} siècle aux carolingiens (de Charles Martel à Charlemagne) qui sont à la recherche d'une légitimité. Elle fait alors à cette époque un changement politique radical en se détournant de l'Empire romain d'Orient et en sacrant les carolingiens.

Dépositaire de la tradition écrite, l'Église s'assure le meilleur recrutement dans une époque troublée. Le monachisme est importée d'Orient par Martin au IV^{ème} siècle. L'expansion des monastères commence au VI^{ème} siècle en Irlande (*Scotia*) avec qui l'Église romaine a rétabli des liens en 614. Bien que de langue celte et n'ayant jamais été profondément romanisée, l'Irlande offre un refuge à la culture latine au sein de ses monastères. Le développement des monastères se poursuit avec l'évangélisation de l'Angleterre en 673. Une première expansion sur le continent venue d'Irlande a lieu au VI^{ème} siècle (fondation du monastère de Luxeuil). L'ordre bénédictin de Cluny est fondé en 909. Ses innombrables dépendances en Europe en font le coeur du renouveau monastique et chrétien aux X et XI^{ème} siècles.

2.2.1.3. La culture du haut moyen-âge

Au IV^{ème} siècle, les infrastructures culturelles et éducatives sont païennes. Seule la superstructure est chrétienne depuis que les controverses du III^{ème} siècle sont closes. Toutefois, la disparition des écoles publiques vers la fin du V^{ème} siècle en Gaule conduit à la contraction du nombre de lettrés et donc du vivier de l'Église. Seules les grandes familles peuvent offrir une éducation à leurs enfants. L'Église crée alors au VI^{ème} siècle des écoles non plus seulement dans les monastères mais aussi dans les ordres séculiers. L'éducation y est exclusivement chrétienne et dépouillée de tradition classique. Toutefois, entre la fin du VIII^{ème} siècle et le début du IX^{ème} siècle, l'Occident connaît une renaissance culturelle dite carolingienne caractérisée par une nette amélioration de la culture des fils de nobles élevés à l'école du palais ou des futurs clercs mais elle met fin à l'enseignement rudimentaire dispensé dans les campagnes par les monastères mérovingiens. Au VIII^{ème} siècle, les seuls laïcs encore lettrés sont les jeunes aristocrates appelés à la cour royale où ils reçoivent une éducation propre à l'administration civile. A cette époque, les tribunaux doivent faire appel à des clercs pour rédiger les textes. L'Église conserve le latin mais en 814, elle recommande aux prêtres d'utiliser le latin des illétrés dans les sermons.

Les invasions barbares ont provoqué un courant de pensée angoissé, en

attente de l'apocalypse. La condition paysanne est déconsidérée (paysan se dit en latin *rusticus* et en vieux français *vilain*). Le moyen-âge est jusqu'au XII^{ème} siècle platonicien et se méfie du progrès (tout changement nous éloigne encore plus du monde réel des idées). Le platonisme s'accorde très bien avec la doctrine chrétienne pour qui le progrès est inséparable de Dieu. Une activité scientifique limitée perdure dans l'empire romain d'Orient et s'étend sur tout le territoire de l'empire d'Alexandre jusqu'en Inde. Après Boèce, il n'y a plus de culture philosophique. La littérature est réduite à Virgile, Cicéron et Salluste. La connaissance du grec s'efface au VI^{ème} siècle. La culture est littéraire et a pour composantes la grammaire, la poésie, la rhétorique ⁽⁹⁾. Limitée au culte de la forme et de l'érudition, elle se révèle incapable de produire des oeuvres originales. Dans la seconde moitié du VII^{ème} siècle, les laïques perdent l'habitude d'écrire et la culture s'installe dans les monastères ⁽¹⁰⁾. Le passage du latin vulgaire au roman s'achève avant le IX^{ème} siècle et une littérature romane apparaît à cette époque (poèmes en occitan de Guillaume IX).

2.2.2. Le bas moyen-âge

2.2.2.1. L'évolution de la société des XI-XII^{ème} siècles

Du XI^{ème} au XIII^{ème} siècle, l'Europe occidentale connaît une forte explosion démographique due aux progrès techniques de l'agriculture et de l'industrie, à un régime alimentaire sain, à l'extinction des grandes épidémies de peste qui avaient ravagé l'Europe au VII^{ème} siècle et à la limitation dans le temps et l'espace des guerres. La population européenne s'élève à 27 millions d'habitants en l'an 700, 42 en l'an mil, 48 en 1100, 61 en 1200 et 73 en 1300. Au XIV^{ème} siècle, la France compte 20 millions d'habitants (dont 200.000 à Paris), l'Angleterre de 5 à 6 millions. Des populations en mouvement émigrent, défrichent et colonisent des territoires nouveaux où ils construisent de nouvelles villes. On libère les derniers esclaves du VIII^{ème} au XI^{ème} siècle et ils deviennent serfs. Cette époque est caractérisée par une attitude d'esprit rationaliste et une foi solide dans en la notion de progrès.

2.2.2.2. L'affirmation de l'autorité papale

⁽⁹⁾ La rhétorique est la technique du discours, l'ensemble des règles, des procédés constituant l'art de bien parler, de l'éloquence.

⁽¹⁰⁾ Le faible niveau du savoir en Occident au VII^{ème} siècle est illustré par le fait qu'Isidore de Séville, qui avait la réputation d'être l'un des plus savants de son époque, croyait que les étoiles étaient éclairées par le Soleil.

2.2. *Le moyen-âge en Occident*

Le pouvoir du pape, limité par Charlemagne aux questions immatérielles, s'affirme à partir de 1050 avec le lorrain Léon IX (1049-1054) qui revient sur le principe de nomination des évêques par les rois et l'empereur, puis avec Nicolas II qui réserve la nomination du pape aux cardinaux et non plus à l'empereur. Avec la réforme grégorienne (Grégoire VII, 1073-1085), c'est le pape qui représente Dieu sur Terre et non plus l'empereur. La radicalisation de la papauté conduit en 1054 à la rupture de l'empire romain d'Orient et la fondation de l'orthodoxie et en 1095 à la première croisade puis plus tard en 1231 à l'Inquisition. Le but de l'Église romaine est alors d'imposer une théocratie pontificale mais ses efforts seront ruinés par les souverains en place, en particulier Philippe IV le Bel et conduira au Grand Schisme (1378-1415) au XIV^{ème} siècle qui voit l'installation d'un second pape à Avignon.

2.2.2.3. **La révolution industrielle du moyen-âge**

(Bibliographie : 11)

En détruisant l'animisme, le christianisme désacralise la nature et annonce une vision rationnelle de la nature permettant son exploitation industrielle.

2.2.2.3.1. **L'énergie éolienne et hydraulique**

Grâce à des innovations techniques, le rendement s'améliore et de nouvelles sources d'énergie sont découvertes. A partir du X^{ème} siècle, l'arbre à cames permet la mécanisation d'un grand nombre d'opérations. Maintes tâches exécutées à la main sont confiées à des machines. Un moulin à blé actionné par l'eau des rivières, le vent ou la marée se trouve désormais à la portée du citadin ou du paysan. Le mouvement à vent à pivot vertical est une invention occidentale. En Provence, les moulins sont également utilisés pour écraser les olives. Dans les abbayes cisterciennes, l'énergie hydraulique sert à écraser le grain, tamiser la farine, fouler le drap, tanner les peaux (à partir de 1138) voire activer les souffleries chauffant les cuves à bière (à partir de 987), boisson de substitution si les vendanges étaient mauvaises. Le foulage des draps pour resserrer les fibres est révolutionné par la mécanisation. Les seigneurs ecclésiastiques et laïques construisent un grand nombre de moulins à foulon et en imposent l'usage à leur vassaux, comme pour les moulins à blé, ce qui suscite des révoltes. La force motrice de l'eau révolutionne également l'industrie du fer en actionnant les marteaux et les soufflets (1323). On construit des moulins de fer près des sources de minerai (à partir de 1197 en Suède). Les premiers moulins à papier apparaissent en Italie en 1276. Des chiffons de lin et de coton sont réduits en pulpe par une batterie de longs maillets en bois actionnés par un arbre à cames. L'explosion de l'industrie provoque la pollution des rivières et de

l'atmosphère.

2.2.2.3.2. La révolution agricole du moyen-âge

Entre 750 et 1250, l'Europe médiévale devient plus chaude (un à deux degrés) et plus sèche ce qui stoppe la croissance des forêts et facilitent le défrichage au profit de la culture des céréales. On utilise désormais la force motrice des chevaux plutôt que celle des boeufs grâce au harnais rigide inventé dans les steppes d'Asie pour les chameaux et introduite en Europe au VIII^{ème} siècle. Le cheval permet de labourer une fois et demi plus rapidement que des boeufs. On ferre les chevaux depuis le IX^{ème} siècle en Sibérie et à partir du XI^{ème} siècle en Occident. On invente l'attelage des chevaux les uns derrière les autres. L'invention la plus importante du moyen-âge est la charrue lourde à versoir qui se répand au XI^{ème} siècle et est encore utilisée. Elle remplace l'araire symétrique des romains adaptés aux terrains secs méditerranéens mais pas aux lourdes terres humides du nord de l'Europe. La nouvelle charrue nécessite de 6 à 8 boeufs ou de 2 à 4 chevaux. En conséquence, les groupements humains évoluent vers un système de communautés agricoles. A partir du VIII^{ème} siècle, l'assolement triennal (légumes printaniers, céréales, jachère) remplace progressivement l'alternance biennale des romains. Les récoltes sont dorénavant suffisantes pour nourrir une population en pleine croissance et le régime alimentaire devient plus varié. Pour tous le niveau de vie augmente.

2.2.2.3.3. Matières premières et conditions ouvrières

La recherche de matières premières est intensifiée. L'extraction de la pierre est une industrie importante. De nos jours, les carrières à ciel ouvert ont disparu mais les galeries souterraines, notamment sous Paris (300 km de galeries), témoignent de leur intense activité. La pierre de Caen est exportée jusqu'en Angleterre. Les ouvriers du bâtiment sont libres d'aller d'un chantier à l'autre et de refuser le salaire offert. Contrairement aux ouvriers du textile, ils disposent d'une quantité importante de congés et sont relativement bien payés. Les ouvriers qualifiés sont recherchés. Les architectes inscrivent leur nom sur leurs ouvrages.

Les allemands découvrent près de Goslar en 968 des filons de plomb argentifères. A partir du XI^{ème} siècle, l'exploitation est en pleine activité. De l'argent est découvert de nouveau en Saxe en 1136 provoquant la ruée vers l'argent à Freiberg et la migration de colons vers l'Europe centrale. Alors que la richesse de la France tient à son agriculture et à son industrie, celle de l'Europe centrale est due à ses gisements miniers. Les mineurs sont traités comme des travailleurs privilégiés. Ils peuvent prospecter pratiquement partout, détourner les cours d'eau. Ce qu'ils découvrent leur appartient à vie. Ils sont exempts des taxes habituelles et du service militaire.

2.2. *Le moyen-âge en Occident*

Dans l'économie de l'Occident médiéval, la laine est la matière première la plus importante. Les grandes entreprises capitalistes de Flandres et de Florence absorbent 10 millions de toisons par an. Le plus gros producteur est l'Angleterre qui exporte par exemple 8 millions de toisons en 1273. A partir de 1275, les impôts et taxes à l'exportation de la laine décidés par le parlement anglais conduisent à plusieurs crises socio-économiques dans les Flandres. En 1296, le roi d'Angleterre utilise l'embargo pour obliger le comte de Flandres à se rallier à lui contre le roi de France. L'embargo engendre chômage et misère et le comte de Flandres doit se joindre à l'Angleterre. Peu à peu, l'Angleterre attire sur son territoire les ouvriers textiles flamands ce qui lui permet de prendre la tête de l'industrie textile mondiale aux dépens des flamands. Au XIII^{ème} siècle, les florentins mirent en oeuvre toutes les ressources de leur nouvelle puissance financière pour obtenir le contrôle de la laine anglaise en achetant aux monastères cisterciens leur laine deux ans à l'avance par exemple. A la fin du XIII^{ème} siècle, la qualité du textile florentin s'est beaucoup améliorée. En revanche, l'industrie flamandeériclite. Au XIV^{ème} siècle, 30.000 ouvriers sont maintenus dans la servitude à Florence. Ils ne disposent d'aucun droit. La main d'oeuvre représente 60 % du prix de revient des draps et donc est la cible des banquiers souhaitant augmenter leur marge. Chacune des 26 étapes du travail de la laine est effectuée par un ouvrier spécialisé. Comme en Flandres, le paiement des salaires en nature enchaîne les ouvriers qui doivent en heures de travail les marchandises ou les prêts déjà accordés ("*verlag system*").

Le défrichage intensif suscité par l'utilisation importante du bois de construction cause la destruction de milliers d'hectares de forêt et entraîne l'augmentation du prix du bois au XIII^{ème} siècle. L'Angleterre doit importer du bois de Scandinavie dès 1230. Le charbon remplace peu à peu le bois de chauffage.

2.2.2.3.4. Le rôle de l'ordre cistercien

L'ordre cistercien est fondé en 1098 par Robert de Molesme qui, entouré de quelques compagnons s'est retiré dans la forêt de Cîteaux en Bourgogne pour tenter de revenir à la règle de Saint Benoît. L'ordre prend son essor après l'arrivée de Saint Bernard en 1112. Pour fuir l'agitation des villes et assurer leur indépendance, les cisterciens créent une organisation économique reposant sur une excellente administration et de solides compétences techniques. Ils jouent un grand rôle dans le développement de l'énergie hydraulique, la métallurgie du fer, l'exportation de la laine en Angleterre, du vin en France et en Allemagne (215.000 litres pour l'abbaye d'Eberbach par exemple). Les cisterciens produisent pour leurs besoins

puis, la production augmentant, ils vendent le surplus. Les moines embauchèrent des frères dits convers pour les aider dans leurs tâches mais les incidents causés par l'alcoolisme de certains précipitent le déclin de l'ordre de Citeaux au XIII^{ème} siècle.

2.2.2.3.5. Le développement du capitalisme

Les importants débouchés dans le monde musulman des matières premières produites en Occident modifient les structures économiques et sociales puis politiques avec l'émancipation des communes nées sur les restes des cités romaines encore habitées par une poignée de clercs et de quelques laïcs. L'économie de troc fait place à des échanges fondés sur l'argent. Les villes s'enrichissent et le servage devient intolérable aux citadins, ce qui cause des révoltes et des rachats de condition encouragés par l'Église. Les anciens serfs utilisent leur nouvelle liberté de circuler pour devenir marchands. Au XII^{ème} siècle, l'Occident n'a encore guère que des matières premières à exporter mais des produits rares (épices, soie, ...) arrivent désormais des grandes villes de Byzance, Damas ou Bagdad.

Les conditions générales de l'économie favorisent la libre entreprise. Des compagnies capitalistes sont créées et leurs actions sont négociables. La première société par actions est probablement la société du Bazade fondée au XII^{ème} siècle par les citoyens de Toulouse pour l'exploitation des douze moulins de la Garonne. Les administrateurs sont désignés par l'assemblée annuelle des actionnaires. Des dividendes annuels variant avec le rendement des moulins sont versés chaque année en grains et produisent un intérêt de 19 à 25 %. Les actions ("uchau") s'achètent et se vendent librement. Dès le début du XIII^{ème} siècle, il n'y a plus de meuniers parmi les actionnaires. Les promoteurs ne reculent devant aucune méthode pour étouffer la concurrence.

Ce sont les propriétaires de grands domaines, les bourgeois et les financiers qui profitent le plus de l'expansion industrielle. La croissance du capitalisme fait naître des méthodes améliorées de comptabilité. Les banques permettent un maniement plus aisé des capitaux. Les grandes fortunes influencent le pouvoir des gouvernants. Les sanctions économiques sont employées avec succès à des fins politiques.

2.2.2.4. Le progrès technique

2.2.2.4.1. L'invention de l'horloge mécanique

La première horloge mécanique est celle de Su Song construite en Chine au XI^{ème} siècle. Malheureusement, personne ne sut la reproduire ni même l'entretenir et elle disparut après plusieurs changements de dynastie. En

2.2. Le moyen-âge en Occident

occident, les pendules à poids et à échappement mécanique sont familières au milieu du XIV^{ème} siècle. La plus perfectionnée est celle de Giovanni di Dondi construite à Padoue en 1344. Elle donne les horaires de lever et coucher du soleil, les dates des six fêtes fixes ainsi que celles des cinq fêtes mobiles ⁽¹¹⁾ et montre la course des planètes. Les horloges conduisent à une nouvelle conception du temps. Les pendules à eau indiquaient des heures d'une durée inégale parce que le jour était divisé en douze heures du lever au coucher du soleil et douze heures pour la nuit, ce qui n'était pas un problème en Égypte mais le devenait à Londres où la durée d'une heure variait de 38 à 82 minutes. L'horloge mécanique permet la division du jour en 24 heures d'égales durées, changement que l'Église accepta sous la pression de la bourgeoisie appuyée par la royauté.

2.2.2.5. L'épanouissement intellectuel

(Bibliographie : 16, 24, 29)

2.2.2.5.1. L'arrivée de la science gréco-arabe

Parmi les marchandises importées du monde musulman, quelques manuscrits pénètrent en Occident de manière marginale dès le X^{ème} siècle. Gerbert, pape sous le nom de Sylvestre II (999-1003) est le premier à réintroduire la science en Europe avec en particulier les chiffres arabes, la table à calcul ainsi que probablement l'astrolabe. Malgré l'atmosphère hostile à la pensée et à la recherche indépendante entretenue par la chrétienté, un afflux soudain de connaissances grecques déferle sur l'Europe au XII^{ème} siècle sous la forme de traductions en latin de textes arabes principalement en provenance de Tolède en Espagne. Seule la science est transmise : l'Occident a déjà une religion, des bases juridiques (droit romain) et une littérature en train d'émerger.

2.2.2.5.2. L'apparition des écoles urbaines

C'est principalement dans la région délimitée par le Rhin et la Loire, où le grand commerce et la banque se sont localisés aux foires de Champagne que renaît la culture gréco-romaine, appuyée par le prestige de la dynastie capétienne. Paris, Chartres, Laon, Reims, Orléans abritent des écoles où enseignent outre des professeurs réguliers et des chanoines, des professeurs agrégés qui ont reçu des autorités épiscopales la *licentia docenti*, le droit d'enseigner la théologie mais aussi la dialectique aristotélicienne. A la fin du XI^{ème} siècle, les écoles monastiques s'effacent devant les écoles urbaines

⁽¹¹⁾ il faudra attendre l'horloge astronomique de la cathédrale de Strasbourg construite en 1842 pour qu'une horloge donne de nouveau les fêtes mobiles.

à la faveur de la croissance urbaine et le recentrage des monastères sur les prières. L'enseignement se compose du *trivium* : grammaire, dialectique (art de bien conduire le dialogue) et rhétorique (art de persuader par le discours) puis du *quadrivium* (arithmétique, géométrie, musique et astronomie). Pour certains, Paris est l'antre du diable où se mêlent la perversité des esprits par la dépravation philosophique et les turpitudes d'une vie tournée vers les femmes, le jeu et le vin. Pour d'autres, Paris est comparable à Jérusalem. Chartres est le grand centre scientifique de l'époque. On y préfère l'enseignement du *quadrivium* plutôt que du *trivium*.

2.2.2.5.3. Les professeurs : une nouvelle classe d'érudits

Auparavant, la société était divisée en trois classes : ceux qui prient et sont les érudits (les clercs), ceux qui protègent et accessoirement possèdent et administrent (les nobles) et ceux qui travaillent (les serfs). L'assouplissement de la rigidité sociale permet aux audacieux de prendre le chemin et de grossir les populations urbaines. Alors que certains choisissent de rejoindre les croisades, d'autres se font étudiants bohèmes, tels les **goliards**, des anarchistes, critiquant la compromission de l'Église avec le luxe, le privilège des naissances. Leur esprit critique destructeur leur fermera les portes de l'université.

Né à Pallet (Bretagne), arrogant autant que brillant, Abélard devient le premier professeur et le plus grand philosophe puis théologien de Paris. Alors âgé de 39 ans, Abélard s'éprend d'une de ses élèves de 17 ans, Héloïse dont il aura un enfant. Le mariage promis à son oncle n'est plus acceptable dans les milieux intellectuels à une époque où la femme se libère. Pour protéger la réputation d'Abélard, Héloïse va se retirer temporairement au couvent d'Argenteuil mais son oncle croyant le mariage annulé fait éclater le scandale. Abélard va cacher sa honte à l'abbaye de Saint-Denis. Il ne cessera de correspondre avec Héloïse jusqu'à sa mort. Il écrit son premier traité de théologie en 1121 mais son succès déplaît. Son livre est brûlé et il est condamné à finir ses jours dans un couvent. Poussé par l'ennui, il s'en enfuit et fonde une école où viennent étudier des étudiants vivants de mendicité dans un village scolaire formé de tentes et de cabanes. Élu abbé en Bretagne, le manque de stimulation intellectuelle le pousse de nouveau à prendre la fuite pour retourner enseigner sur la montagne Sainte Geneviève. Excommunié, il se réfugie à Cluny où il meurt. Abélard a donné à la pensée occidentale son premier *Discours de la méthode* où il prouve la nécessité du raisonnement.

2.2.2.5.4. Réalisme et nominalisme

(Bibliographie : Encyclopédie Wikipédia)

2.2. Le moyen-âge en Occident

Le **nominalisme** est une doctrine de pensée qui se fait jour au sein de la scolastique médiévale. Son fondateur est Roscelin (1050-1120). Le problème qui lui donne naissance est celui de la nature des universaux dans les syllogismes d'Aristote. Les nominalistes rejettent la conception idéaliste platonicienne selon laquelle ils ont une existence immanente a priori, et lui oppose que ces universaux ne sont que des noms. Le tenant principal du réalisme contre le nominalisme est Guillaume de Champeaux. Pierre Abélard tente une synthèse qui donne une importance primordiale au sujet par rapport à l'objet. Dans sa forme maximaliste, pratiquement équivalente au solipsisme (théorie philosophique qui place l'individu seul devant la seule connaissance de sa propre existence), le nominalisme affirme qu'il n'existe rien que ce qu'un individu désigne (pense). L'ensemble des pensées d'un individu forme un tout cohérent, qu'il lui est impossible de réellement tester. Dans une forme plus modérée, il reconnaît une existence indépendante à au moins certains objets, mais considère que cette existence est dépourvue d'effet pratique tant que le sujet n'arrive pas à en intégrer consciemment la pensée.

2.2.2.5.5. Platonisme augustinien et optimisme naturaliste au XII^{ème} siècle

Le XII^{ème} siècle est marqué par le **néoplatonisme** ⁽¹²⁾. Lanfranc et son disciple Saint-Anselme, tous deux successivement archevêques de Canterbury au XI^{ème} siècle sont les premiers à tenter de marier foi et raison. Saint Anselme (1033-1109) s'inscrit dans le courant qui veut mettre la démarche rationnelle au service de la foi. Influencé par Platon et Saint Augustin, il affirme que les hommes n'ont pas été créés par Dieu pour remplacer les anges déchus après la révolte de Lucifer mais parce que la nature humaine le méritait. Il explique l'existence de Dieu par un argument ontologique : l'existence est une condition première de la perfection. **Pierre Abélard** (1079-1142) va plus loin en s'efforçant de présenter les Écritures de manière rationnelle. Dans son traité "*le Sic et le Non*" (le Oui et le Non) écrit en 1122, Abélard cite 158 contradictions trouvées dans les Écritures et des textes sacrés. Son but n'est pas d'induire un scepticisme envers l'Église, chose impensable à l'époque mais de susciter le questionnement menant à la vérité. A cet égard, ce traité constitue le premier discours de la méthode de l'Europe médiévale. Abélard avait compris la différence entre la connaissance empirique d'un fait et la connaissance rationnelle de sa cause. Il se heurte à l'anti-intellectualisme de Saint-Bernard. Le conceptualisme de **Pierre Abélard** est intermédiaire entre le nominalisme et le réalisme. Au XII^{ème} siècle se développe à Chartres un optimisme naturaliste fondée sur

(12) Le traité "*le Timée*" de Platon n'avait pas disparu en Occident.

l'idée d'une Nature, puissance fécondante, perpétuellement créatrice et aux ressources inépuisables. Elle forme un ensemble organisé et rationnel gouverné par des lois rendant possible une science rationnelle de l'univers. Dieu respecte les lois qu'il a créés. Développant Saint Anselme, les intellectuels de Chartres affirment que le monde a été créé par Dieu pour l'homme. La thèse se développe de l'analogie entre le monde et l'homme, le macrocosme et le microcosme. A propos des philosophes grecs, Bernard de Chartres écrit " *Nous sommes des nains montés sur des épaules de géants. Nous voyons ainsi davantage et plus loin qu'eux*".

2.2.2.6. Les universités du XIII^{ème} siècle

2.2.2.6.1. Les universités acquièrent leur autonomie

Les professeurs s'organisent en corporations de métier : les universités. Même si elle comporte de plus en plus de laïcs, l'université reste une corporation ecclésiastique sous la juridiction de Rome. En luttant contre les pouvoirs ecclésiastiques et laïques, les universités acquièrent leur autonomie. Dès le début du XIII^{ème} siècle, les papes travaillent à concentrer les foyers de culture pour éviter la naissance de nouvelles hérésies ⁽¹³⁾. Ils seront un allié important des universités face aux pouvoirs locaux. A Paris, Célestin III accorde à l'université ses premiers privilèges en 1194. L'université de Paris cesse de dépendre de la juridiction du prévôt après que des incidents aient conduit à la mort de cinq étudiants en 1200. En 1214, le légat pontifical leur donne ses statuts officiels. L'enseignement était une fonction ecclésiastique. L'évêque avait depuis longtemps délégué ses pouvoirs en la matière à un chancelier. A Paris, le chancelier perd en 1213 le privilège d'accorder la licence au profit des maîtres de l'université. En 1219, le chancelier tente vainement de s'opposer à l'entrée des ordres mendiants à l'université. A Oxford, 120 miles séparent l'évêque de l'université de sorte que le chancelier devient rapidement un officier de l'université. En 1229, à la suite d'événements sanglants opposant les étudiants aux bourgeois puis à la police royale, une majeure partie de l'université se retire à Orléans jusqu'en 1231, date à laquelle Blanche de Castille et Saint Louis, sous la pression du pape Grégoire IX, reconnaissent et étendent les pouvoirs accordés à l'université par Philippe Auguste en 1200. Entre 1229 et 1231, l'université a été soustraite à la juridiction de l'évêque et en 1231, elle est placée sous l'autorité directe du pape. C'est également à la suite de rixes entre bourgeois et étudiants que les universités d'Oxford et de Bologne acquièrent leur indépendance.

(13) telles celle des cathares écrasés par le pape et le roi de France.

2.2. Le moyen-âge en Occident

2.2.2.6.2. Les troubles liés aux ordres mendiants

L'enrichissement considérable de l'Église catholique (à l'image du monastère bénédictin de Cluny par exemple) conduit à un mouvement de protestation qui va jusqu'à l'hérésie (vaudois, albigeois). Pour conjurer le péril, des ordres mendiants (franciscains en 1210, dominicains en 1215) sont fondés au début du XIII^{ème} siècle et placés sous la seule autorité papale. Leurs membres vivent comme des séculiers (afin de rechristianiser les villes) et sont voués à la pauvreté et à la prédication itinérante. Le pape leur confie l'Inquisition en 1232 et impose leur présence à l'université. C'est également pour lutter contre les hérésies que l'université de Toulouse est créée en 1229.

L'extension de la place prise par les ordres mendiants à l'université créa une crise grave au XIII^{ème} siècle et au début du XIV^{ème} siècle (à Paris, en 1252-1259 puis en 1265-1271 et 1282-1290). Les séculiers reprochent aux ordres mendiants de violer les statuts universitaires en obtenant la licence d'enseignement de théologie des mains du chancelier sans obtenir de maîtrise *es arts*, privilège accordé par le pape. De plus, ils continuent d'enseigner lorsque l'université est en grève, comme en 1229-1231 et 1253. Ils dérangent également car vivants d'aumônes, ils ne réclament pas d'argent aux étudiants et ils détournent beaucoup d'entre eux vers la voie monastique.

2.2.2.6.3. L'enseignement universitaire au XIII^{ème} siècle

Paris compte quatre corporations correspondant aux quatre facultés (arts, droit canon, médecine, théologie) regroupées au sein de l'université. Grâce à ses effectifs, la faculté des arts domine les trois autres et son recteur deviendra celui de l'université entière. Comme au XII^{ème} siècle, les maîtres sont généralement payés par leurs étudiants. La papauté décrète dès 1179 une série de mesures pour assurer la gratuité de l'enseignement. A Paris, les étudiants suivaient tout d'abord un enseignement des arts entre 14 et 20 ans sanctionné par le *baccalauréat* après deux ans et la licence et le *doctorat* en fin d'études. L'enseignement est composé de commentaires de texte d'Aristote. La *licence* était accordée après présentation devant les docteurs d'un commentaire de deux textes préparé dans la journée. Le doctorat et la licence d'enseigner n'étaient délivrés qu'après présentation et argumentation (*la dispute*) d'une thèse sur un point particulier de droit devant les étudiants dans la cathédrale. Entre 20 et 25 ans, s'enseignaient la médecine ou le droit. La théologie est enseignée au moins jusqu'à 35 ans.

2.2.2.7. Le savoir au XIII^{ème} siècle

2.2.2.7.1. Aristotéliens modérés ou averroïstes et augustinien

C'est par le biais de deux foyers arabes, la Sicile et l'Espagne qu'apparaissent en Occident les premières traductions d'Aristote vers 1160 ainsi que les commentaires arabes d'Avicenne et Averroès. Averroès (1126-1198), le plus célèbre de ses traducteurs et commentateurs, prône le retour à la pensée intégrale d'Aristote. Les averroïstes acceptent la contradiction entre les Écritures et l'œuvre d'Aristote là où elle existe. Ils inventent pour cela la doctrine de la double vérité. Ils enseignent l'éternité du monde (qui nie la création) et refusent à Dieu d'être la cause efficiente des choses mais seulement la cause finale. La négation de la création par les averroïstes entraîne l'interdiction de l'enseignement de la "*Physique*" et de la "*Métaphysique*" d'Aristote en 1210, 1215 et 1228. Les interdictions restent lettre morte et ces œuvres servent même de publicité à l'université de Toulouse lors de sa fondation en 1229.

A la période de condamnation des livres naturels d'Aristote succède un aristotélisme modéré christianisé. Dominicain et universitaire dont la botanique et la zoologie étaient les principaux centres d'intérêt, Albert le grand (1193-1280) œuvra beaucoup à partir de 1240 en faveur des sciences. Son élève, le théologien Thomas d'Aquin (1225-1274) tente de concilier l'orthodoxie chrétienne et la science aristotélicienne. Saint Thomas d'Aquin affirme que la connaissance intellectuelle est acquise à travers l'expérience sensible. Néanmoins, les hommes ne peuvent, selon lui, progresser sur le chemin de la connaissance de Dieu que jusqu'à un certain point car la connaissance de Dieu dépasse la raison. L'apparition d'un aristotélisme plus radical dans les années 1260 conduit à une menace d'excommunication de la part de l'évêque de Paris à l'encontre des aristotéliciens (à cause des questions d'éternité du monde et de l'individualité de l'âme humaine). L'évêque de Paris dresse en 1270 une liste de 219 propositions considérées hérétiques. Les œuvres de Thomas d'Aquin sont interdites en 1277.

A ces tendances de l'aristotélisme, modéré et radical, s'opposent les augustinien, principalement les franciscains qui restent attachés au néoplatonisme (Robert Grosseteste et Roger Bacon). Depuis **Robert Grosseteste** (1168-1253), l'observation des faits et la recherche mathématique sont très prisées à l'université d'Oxford. Pour Grosseteste, il semblait impossible de comprendre le monde sans les mathématiques. Disciple et admirateur de Grosseteste, le franciscain **Roger Bacon** (1220-1292) étudie à Paris et à Oxford. Dans son "*Opus majus*", il affirme qu'il y a deux manières d'acquérir la connaissance : par le raisonnement et par l'expérience. Toutefois, raisonner ne retire pas le doute et seule l'expérience conduit à la vérité. Jérôme d'Ascoli, supérieur des franciscains et futur pape Nicolas IV, interdit en 1278 l'"*Opus majus*" de Bacon. Un an auparavant, Étienne Tempier publie à Paris les 219 erreurs. Bien que franciscain, Bacon est emprisonné

2.2. Le moyen-âge en Occident

quelques années à cause de son enseignement et ceci, alors que pour lui n'existait aucune contradiction entre philosophie, métaphysique et religion. La voie du mysticisme est ouverte.



Figure 12 : [Fig 1] Portrait de F. Bacon.

2.2.2.7.2. Les progrès de la transmission du savoir

La plume d'oiseau remplace le roseau et la minuscule gothique l'ancienne lettre. Cela permet une prise de notes plus rapide à l'université. Abréviations, table des matières et ordre alphabétique facilitent alors la lecture des ouvrages. Les étudiants pauvres servent de copistes.

2.2.2.7.3. La physique au bas moyen-âge

Les lentilles de verre ⁽¹⁴⁾ sont inventées par hasard par des artisans verriers au XI^{ème} siècle. Les lunettes sont fabriquées de manière systématique à Venise et à Florence à la fin du XII^{ème} siècle et circulent bientôt jusqu'en Chine. Les lunettes pour corriger la myopie existaient déjà en Italie vers 1280. Les lentilles suscitent l'intérêt pour l'étude de l'optique. Ecclésiastique franciscain anglais et lecteur à l'université d'Oxford, **Robert Grosseteste** encouragea la pensée scientifique et écrivit des traités importants en astronomie et en optique. Grosseteste soutient que la rotondité de la Terre est prouvée par les explications naturelles et l'expérience astronomique. Il connaît le phénomène de précession des équinoxes. Selon lui, la lumière est la forme corporelle première. Grosseteste comprend que la lumière se propage en ligne droite instantanément et sans perte de substance. Il pense que Dieu avait tiré la matière informe du néant et que par auto-diffusion,

⁽¹⁴⁾ Le nom de lentille provient de la ressemblance des premières lentilles avec le légume.

la lumière a produit les dimensions de l'espace puis tous les êtres. Par conséquent, l'optique donne selon lui la clé du monde physique. Il comprend la nature des lentilles et la manière de les utiliser. Son élève le plus remarquable fut **Roger Bacon** (1220-1292) qui enseigna à Paris et Oxford et poursuivit les travaux de Grosseteste, principalement en optique. Comme lui, il fit référence aux études d'Euclide, Ptolémée et Al-Haytham. Montrant que l'année solaire est plus courte d'un 130^{ème} que ne le prédit le calendrier julien (365 jours et 6 heures), Bacon adressa au pape Clément IV une demande de réforme du calendrier. Il ne fut pas écouté et il faudra attendre 1582 pour que le pape décide de réajuster le calendrier en passant du 5 au 15 octobre.

Pierre de Maricourt (Petrus Peregrinus) est le premier à véritablement pratiquer scientifiquement la recherche expérimentale. Il s'intéresse notamment au magnétisme (1269). Il décrit la magnétite et ses caractéristiques ainsi que la déclinaison magnétique (différence entre pôles nord géographique et magnétique). Maricourt explique comment reconnaître les deux pôles de la boussole et il énonce la loi des attractions et des répulsions magnétiques. C'est grâce aux perfectionnements apportés par Pierre de Maricourt à la boussole arrivée de Chine à l'époque que peuvent débiter les voyages de découverte avec les frères génois Vivaldi qui partent pour les Indes au XIII^{ème} siècle (ils disparurent dans l'Atlantique).

Witelo (1230-1300) mesure les angles de réfraction dans l'eau, l'air et le verre et note qu'ils varient comme la densité du milieu. Thierry de Freiberg (?-1311) remplit d'eau des fioles sphériques et montre que leur couleur dépend de l'angle sous laquelle on les regarde. Elles deviennent rouge sous un angle œil-soleil de 42° que Bacon déjà connaissait comme l'angle sous lequel apparaissait la couleur rouge de l'arc-en-ciel. Thierry de Freiberg explique alors la formation des arcs-en-ciel par la réfraction dans gouttes d'eau en suspension dans l'air.

2.2.3. Le déclin du moyen-âge

2.2.3.1. Les causes du déclin et les mutations de la société

2.2.3.1.1. Les guerres de la fin du moyen-âge

Au XIII^{ème} siècle, les troupes mongoles de Gengis Khan déferlent sur l'Asie et l'Europe de l'est. Malgré les croisades qui se succèdent entre le XI^{ème} et le XIII^{ème} siècle, les mamelouks prennent les états francs de Palestine. L'élan des croisés et de leurs mécènes bourgeois s'essouffle à partir du milieu du XIII^{ème} siècle. Saint Jean d'Acre, dernière place forte chrétienne en Syrie est prise en 1291. Les turcs s'emparent des vestiges de

2.2. *Le moyen-âge en Occident*

l'empire byzantin qui disparaît complètement en 1453. Ils pénètrent dans les Balkans et menacent la Hongrie et la Pologne. La France et l'Angleterre s'épuisent dans la guerre de cent ans (1337-1453). D'autres guerres suivront : la guerre des deux Roses, les guerres ibériques et italiennes. La bombe révolutionne l'art de la guerre.

2.2.3.1.2. Les famines et la peste noire

Les conditions climatiques favorables cessent au début du XIV^{ème} siècle. La température s'abaisse et les pluies augmentent. De 1315 à 1317, l'Europe connaît des conditions climatiques effroyables. Les pluies torrentielles détruisent les récoltes et les grandes famines qui avaient pratiquement disparues refont leur apparition en 1315-1317. Des cas de cannibalisme sont reportés. En 1347, la peste est intentionnellement transmise à des marchands génois dans le port de Tara en Crimée par des tartares qui tentaient de les assiéger. Après celle du VII et VIII^{ème} siècle, une seconde épidémie de peste noire dévaste l'Europe ⁽¹⁵⁾. Partie de Gênes, elle atteint l'Italie, l'Espagne, la France et le sud de l'Angleterre en 1348, l'Allemagne, les Flandres, l'Europe centrale et le nord de l'Angleterre en 1349, les pays baltes et scandinaves et l'Écosse en 1350. 33 à 40 % de la population européenne meurt.

2.2.3.1.3. Le déclin de l'économie de la fin du moyen-âge

On assiste à un arrêt puis à un reflux de l'essor démographique. Le moyen-âge entre dans une période de vieillissement et de déclin. Le niveau de vie augmente et les dominants sont moins entreprenants. Les pionniers se raréfient. La production d'énergie et la mécanisation atteignent un stade avancé de développement puis l'industrialisation est freinée. Dans certaines industries, des pratiques restrictives sont introduites. L'économie était alors basée sur des compagnies (à Florence, Venise, Pise) qui avaient établi des succursales dans toute la Méditerranée. La hausse du prix du blé s'inverse et les prix baissent jusqu'au XV^{ème} siècle. Seuls la viande bovine et le fer échappent à la baisse générale des prix. Les monnaies sont dévaluées par émission de pièces de moindre poids ou contenant moins d'argent, en particulier en France sous le règne de Philippe le bel (1285-1314). La dévaluation cause la hausse massive des prix. Des banques connaissent la faillite. Une monnaie d'or est réintroduite en Europe ce qui cause la migration de l'argent vers l'Orient. En tuant un tiers de la population, la peste noire rend les ouvriers spécialisés du bâtiment extrêmement rares et leurs salaires augmentent. Toutefois, si leur pouvoir d'achat, confortable

⁽¹⁵⁾ Le gros rat noir, vecteur de la peste, a été ramené des croisades à la fin du XII^{ème} siècle.

avant l'épidémie de peste noire, augmente sensiblement de 1350 à 1510, l'inflation la fait chuter entre le XVI et le XVII^{ème} siècle à la moitié de sa valeur.

2.2.3.1.4. L'évolution de la société à la fin du moyen-âge

La contestation du servage par les citadins conduit à la déstabilisation de la société et à la réémergence des tendances autoritaires. L'agitation ouvrière s'organise dans les grands centres de travail. L'imposition de nouvelles taxes conduit à une série de soulèvements révolutionnaires de 1378 à 1381. L'idéal socialiste voire communiste est mis en avant. L'égalité des hommes est proclamé. John Ball puis Wat Tyler en Angleterre menèrent un groupe d'insurgés. La rente féodale prend massivement une forme monétaire, ce qui bouleverse les conditions sociales. Les couches supérieures de la bourgeoisie urbaine qui tire ses ressources d'une activité précapitaliste et de revenus fonciers courtise les princes. En Flandres, en Italie du nord et dans les grandes villes, l'artisanat manifeste des formes de prolétarisation et rejoint les conditions des masses paysannes.

2.2.3.1.5. L'affaiblissement de la religion

La chrétienté est divisée par l'installation de papes français à Avignon (1309-1403). Les valeurs morales traditionnelles s'écroulent. A la foi succède la dévotion (flagellation publique, ...). L'esprit civique fléchit. Les esthètes se substituent aux pionniers. Le rationalisme est partout battu en brèche par le mysticisme. Des cultes nouveaux, ésotériques, multiplient leurs adeptes. Le développement du mysticisme éveille un intérêt passionné pour la sorcellerie. La répression qui suit est brutale. L'astrologue Cecco d'Ascoli est brûlé par l'Inquisition en 1327. Des centaines de femmes accusées de sorcellerie subiront le même sort.

2.2.3.2. Le savoir aux XIV^{ème} et XV^{ème} siècles

2.2.3.2.1. La nationalisation des universités

Aux cours des XIV^{ème} et XV^{ème} siècle, de nombreuses universités sont créées en Espagne où après la *reconquista*, l'université est un outil de la monarchie en train de s'imposer (Lisbonne et Coïmbre en 1290, Lérida en 1300, Perpignan en 1350, Huesca en 1354, Barcelone en 1450, Palma de Majorque en 1483, ...), en Europe centrale sous l'impulsion des papes (Prague en 1347, Vienne en 1363 puis 1383, Erfurt en 1379, Heidelberg en 1385, Cologne en 1388, ...) et en Italie par des princes à la recherche de grandeur. Le recrutement devient national voire régional et fait disparaître l'aspect supranational des premières universités (Paris, Oxford et Bologne). Les universitaires, inspirés désormais par un sentiment national,

2.2. *Le moyen-âge en Occident*

soutiennent contre les aspirations pontificales à la domination temporelle, le principe de séparation des pouvoirs spirituel et temporel revendiqué par l'empereur. Alors que la politique scolastique cherchait à étendre à tous les hommes la cité d'Aristote transformée en cité chrétienne, l'ockhamisme et l'averroïsme politique accepte la fin de l'unité. Après que les tchèques imposent à tous les universitaires de l'université de Prague de prêter serment à la couronne de Bohême en 1409, les professeurs allemands partent pour Leipzig où ils fondent la première université nationale. L'université de Paris est désertée par les anglais durant la guerre de cent ans et par les allemands lors du grand schisme. Sous domination bourguignonne au début du XV^{ème} siècle, l'université condamnera Jeanne d'Arc pour plaire aux anglais. Avant la fin du XV^{ème} siècle, l'université de Paris est reprise en main par le roi. Elle perd ses privilèges fiscaux en 1437, judiciaires en 1445 et le droit de grève en 1499.

2.2.3.2.2. **La disparition de l'intellectuel du moyen-âge**

Après la condamnation de 1277, certains philosophes parisiens averroïstes tel Siger de Brabant fuient vers Padoue. L'intellectuel du moyen-âge disparaît par avidité au profit de l'humaniste. Les maîtres les plus célèbres sont devenus de riches propriétaires mais l'avilissement des rentes féodales et foncières lors de leur conversion en argent et les crises et dévaluations successives de la fin du moyen-âge poussent les universitaires vers les nouveaux centres de richesse. Ils méprisent le travail manuel et mènent un train de vie noble. En 1533, François I^{er} accorde la chevalerie aux docteurs de l'université. Les universités se vident des étudiants de condition modeste. Le milieu universitaire se transforme en oligarchie en se conférant l'hérédité du droit au titre de docteur (1409 à Bologne).

2.2.3.2.3. **Le divorce de la raison et de la foi**

A partir de 1320 environ, la tradition anselmienne reprise par les augustinien de la foi en quête d'intelligence est abandonnée. Le divorce entre foi et raison est proclamé par deux élèves de Roger Bacon à Oxford, les franciscains Jean Duns Scott (1266-1308) et Guillaume d'Occam (1280-1347) qui participent au courant **nominaliste**. Jean Duns Scott rejette le premier la raison des affaires de la foi : Dieu est si libre qu'il échappe à la raison humaine. Guillaume d'Occam distingue connaissances pratique et théorique ⁽¹⁶⁾ . Seule l'expérience permet la connaissance. Le reste

⁽¹⁶⁾ Il est l'auteur de ce qu'on appelle aujourd'hui le rasoir d'Occam qui affirme que les entités ne devraient pas être multipliées sans nécessité. En d'autres termes, lorsqu'une explication simple suffit à expliquer une situation donnée, il est inutile de chercher une explication compliquée.

n'est que spéculation. Occam nie que l'universel soit autre chose qu'une abstraction (par opposition à l'idéalisme ou réalisme) et soutient que seules les choses particulières ont une existence réelle et que les universaux ne sont que des conventions commodes adoptées par le genre humain. La théologie d'Occam débouche sur le scepticisme. Dieu n'étant défini que par sa toute-puissance, la raison ne peut pas soutenir ou confirmer la croyance. L'intelligence humaine ne peut rien établir selon lui au sujet du Dieu véritable. Le nominalisme incite à l'examen du monde sensible (Jean Burridan étudie les lois du mouvement et Nicolas Oresme critique le géocentrisme) et la lecture des Écritures, seules certitudes incontestables, le reste n'étant que pure construction subjective de l'esprit. Les esprits sont entraînés par le courant anti-intellectualiste et en particulier le mysticisme de maître Eckhart. Comme l'écrivit le cardinal Nicolas de Cues en 1449, l'aristotélisme est assimilé à une secte. On lui dénie le qualificatif de science. La scolastique cède la place à un retour à la sainte ignorance.

2.2.3.3. Les sciences de la fin moyen-âge

2.2.3.3.1. Mathématiques au bas moyen-âge

Pour les besoins du commerce, l'arithmétique est enseignée aux enfants des riches commerçants par des maîtres privés (chiffres arabes, les quatre opérations de l'arithmétique, la règle de trois et les fractions). Les manuels destinés aux marchands, sont de plus en plus diffusés. Ils sont écrits en langue vulgaire sur le modèle de celui de Léonard de Pise (1170-1240) dit Fibonacci en 1202 qui fit connaître en Occident les chiffres indo-arabes

2.2.3.4. La physique du XIV^{ème} siècle

Les insuffisances de la conception d'Aristote concernant l'origine du mouvement amenèrent les savants du moyen-âge à s'y intéresser. Jean Burridan, recteur de l'université de Paris, avait pressenti les fondements de la dynamique moderne. Il a donné une définition du mouvement proche de l'*impeto* de Galilée et de la quantité de mouvement de Descartes. Alfred de Saxe aura une influence sur la statique jusqu'au XVII^{ème} siècle. Nicolas d'Oresme (1320-1382), évêque de Lisieux, présentait la transmission d'une variation de la vitesse sous l'action d'une force. Il aurait aperçu clairement la loi de la chute des corps, le mouvement diurne de la Terre et l'usage des coordonnées. Ces théories se heurtent à l'absence d'un symbolisme mathématique approprié et aux retards de la technique.

3. LA RENAISSANCE

3.1. La renaissance artistique et des idées

L'Europe se réveille sous l'effet des progrès technologiques et des idées nouvelles : imprimerie, boussole, découverte de l'Amérique, la Réforme (1517) en réponse à la corruption de l'Église. Le XVI^{ème} siècle marque le passage d'une chrétienté médiévale aux États-nations. La colonisation de l'Amérique latine fait de l'Espagne le royaume le plus riche d'Europe. L'idéologie du don laisse place à celle du profit. Les centres urbains éclatent de la magnificence des nouveaux riches. La Renaissance voit le développement des arts et de l'humanisme mais c'est aussi une période de barbarie : les juifs sont expulsés d'Espagne en 1492 suivis en 1498 par les musulmans, les indiens d'Amérique sont massacrés par les conquistadors.

3.1.1. Humanisme et nouvelles idées à la Renaissance

3.1.1.1. L'humanisme de la Renaissance

La Renaissance débute en Italie au XIV^{ème} siècle ⁽¹⁷⁾. L'Italie est alors la région d'Europe la plus riche et la plus peuplée. La France a très mauvaise presse en raison des guerres qu'elle mène en Italie. François I^{er} saura s'entourer d'humanistes dont Léonard de Vinci et inverser cette situation. La Renaissance est teintée d'humanisme et de l'opinion que la culture de l'époque est l'héritière de l'Antiquité classique. L'humanisme s'impose en faisant de la scolastique une discipline dépassée et du latin, langue de la science internationale du moyen-âge, une langue morte et le trésor désuet d'une élite. Les humanistes vantent l'oisiveté occupée aux belles-lettres. On redécouvre le beau langage. L'humaniste est un aristocrate qui vit principalement à la campagne et l'humanisme ne s'enseigne pas à l'université mais par exemple au collège des lecteurs royaux (actuel collège

⁽¹⁷⁾ L'émigration vers l'Italie de nombreux intellectuels après la chute de Constantinople en 1453 n'y est peut-être pas étrangère.

de France). Élaborée durant l'Antiquité, reprise durant le moyen-âge, la théorie des correspondances entre microcosme et macrocosme jouit d'une extraordinaire popularité à partir du *quattrocento*. Pour Nicolas de Cues, l'univers se trouve en résumé dans l'homme.

3.1.1.2. Le cas de la question de l'humanité des amérindiens

Durant l'été 1550 au couvent de Valladolid, Juan Gines de Sepúlveda, philosophe et traducteur d'Aristote, affronte Bartolomé de Las Casas, protecteur des amérindiens devant le légat du pape et un représentant de Charles Quint. La question est de savoir si les indiens descendent d'Adam et ont une âme. La victoire de Las Casas sur Sepúlveda est aussi celle du thomisme de Thomas d'Aquin sur l'aristotélisme. Las Casas n'est pas pour autant un défenseur des droits de l'homme : il encourage la traite des noirs et défend l'idée que les espagnols sont les "*seigneurs naturels*" des indiens. Selon lui, bien qu'à la limite de l'humanité, les indiens ne sont toutefois ni des turcs ou des maures.

3.1.1.3. Une nouvelle théorie économique

Le commerce se réorganise dans la seconde moitié du XV^{ème} siècle sur un modèle plus souple de compagnies entourées de filiales juridiquement indépendantes. La comptabilité apparaît et les contrats d'assurance se multiplient. Alors que le capitalisme s'impose, l'inflation des prix reste élevée (400 à 500 %). Copernic corrèle cette hausse à la dépréciation de la monnaie et conseille au prince de Brandenbourg de ne pas manipuler la monnaie, i.e. la masse relative d'or et d'argent, de limiter l'accroissement des espèces disponibles et de confier l'émission de la monnaie à une banque centrale. Cette révolution se heurte à la théorie médiévale du juste prix de Thomas d'Aquin. On peut y voir une laïcisation de l'économie. Luther continue de voir dans le capitalisme financier une forme déguisée d'usure.

3.1.1.4. De nouvelles théories politiques

Humaniste et juriste anglais, **Thomas More** (1478-1535) a laissé un ouvrage intitulé "*Utopie*" décrivant une société sans classe sociale, bien que comportant des esclaves, où règne le régime de la possession commune et qu'il situe sur une île aux confins de l'Atlantide. Chaque citoyen y passe une période probatoire dans les champs (à la manière de la Chine maoïste) avant d'exercer ensuite un talent particulier au service de la société. Les utopiens travaillent six heures par jour et ne connaissent pas l'argent. Le pays d'Utopie apparaît donc comme un vaste monastère idéal et laïc.

Secrétaire de l'éphémère république de Florence, emprisonné au retour des Médicis, Niccolò Machiavelli (1469-1527) écrit en prison le "*Prince*" où il discute, non pas de la légitimité du pouvoir mais de manière pragmatique

3.1. La renaissance artistique et des idées

de sa conservation par la loi ou la force.

3.1.2. La remise en cause de l'Église catholique à la Renaissance

3.1.2.1. La Réforme protestante

Entré à un âge encore tendre chez les augustins, Luther a vécu dans toute la rigueur l'état religieux et le célibat ecclésiastique avant de les contester violemment et de prendre femme. Sa volonté réformatrice s'enracine dans l'aspiration au salut qui n'est pas selon lui lié ni aux mérites individuels, ni à l'intercession de l'Église auprès de Dieu mais à l'action incompréhensible de Dieu. Chez les augustins, Luther s'était en effet mis à haïr ce Dieu qui exige des hommes une perfection bien au delà de leurs possibilités. Il s'apaise en trouvant dans l'épître aux Romains la citation "*Le juste vivra par la foi*" (Rom 1,17). Face aux découvertes de monstres (âne-pape et veau-moine) interprétés comme la manifestation de la colère de Dieu envers les protestants, Luther doit écrire un livret pour expliquer que la colère de Dieu s'abat sur les hommes et non sur lui. A la même époque, le picard Calvin critique la superstition et l'idolâtrie notamment dans son "*traité des reliques* (1543).

Les réformistes réclament l'abandon du latin que le peuple ne comprend pas et reprochent à l'Église le décalage entre la pauvreté de nombreux membres du clergé et la quantité de biens qu'elle possède. Ce mouvement conduit en 1517 au plus important schisme de son histoire qui vit l'apparition du protestantisme. L'Église répond par le Concile de Trente (1545-1563) en réaffirmant la vérité exclusive de la scolastique, en réactivant la Sainte Inquisition et en se dotant d'une congrégation organisée militairement : les jésuites.

3.1.2.2. Platonisme et hermétisme

La redécouverte de Platon trouve un appui à la cour des Médicis en Toscane. Le florentin Marsile Ficin œuvre à la synthèse du christianisme et du platonisme. Contrairement à Florence, Padoue célèbre un Aristote païen, celui du philosophe Averroès, qui s'oppose au Platon christianisé de Marsile Ficin. On doit également à Marsile Ficin une traduction du "*Corpus hermeticum*" alliant mysticisme, neo-platonisme et annonces antiques du christianisme et attribué au prêtre égyptien Hermès Trismégiste, personnage fabuleux que les grecs auraient assimilé au dieu Thot et qui leur aurait transmis la sagesse des anciens égyptiens. L'**hermétisme** qui tire sa respectabilité d'une origine prétendument antique se développe à partir de 1480 et est très répandue au XVI^{ème} siècle. En 1614, Isaac Casaubon

(1559-1614) montre que les textes hermétistes sont l'œuvre de chrétiens du II^{ème} siècle. Le mythe d'Hermès Trismégiste s'éteint mais le mysticisme se perpétue jusqu'à nos jours avec la fondation de l'Ordre de la Rose-Croix par Christian Rosenkreutz en 1614.

3.2. La renaissance scientifique

(Bibliographie : 24, 28)

La curiosité se manifeste par des explorations maritimes à partir du XV^{ème} siècle qui stimulent l'imagination et engendrent un renouveau de la cartographie scientifique qui avait disparue au moyen-âge (on était revenu à la conception d'une Terre en forme de disque au haut moyen-âge). L'introduction en occident du papier en 1150 et de l'imprimerie en 1377 en Allemagne, tous deux originaires de Chine (le papier y est apparu au II^{ème} siècle et l'imprimerie au IX^{ème} siècle), permettent une très large diffusion des idées, notamment celle des réformistes depuis Jean Huss en 1420. Toutefois, dans un premier temps, l'imprimerie ne comble qu'une petite élite alphabétisée et prive les autres qui étaient nourris des miettes de la scolastique que leur apportaient les prédicateurs et les artistes formés à l'université au moyen-âge.

3.2.1. La renaissance de l'abstraction mathématique

Les mathématiques s'épanouissent pendant la Renaissance avec la publication des traductions de textes grecs et arabes et en particulier ceux d'Euclide. De nombreuses tables trigonométriques furent publiées à cette époque et l'algèbre (résolution d'équations algébriques) progressa considérablement à partir du XV^{ème} siècle, principalement en Toscane, sous l'impulsion des maîtres privés. Nicolas Chuquet développe un symbolisme facilitant les calculs

$$12 \bar{p} 3^1 \text{ egaulx a } 4^2, \quad (12 + 3x = 4x^2)$$

alors que ses contemporains, tel Luca Pacioli écrivent "*un nombre ajouté à son carré valent 12*" pour $x + x^2 = 12$. Au début du XVI^{ème} siècle, la marchandise cède la place à l'humanisme et les mathématiciens publient alors en latin des textes moins appliqués. L'algèbre abandonne la tradition trigonométrique reçue d'Al-Kwarizmi et transmise, en particulier, par Léonard de Pise. Divers auteurs proposèrent la solution de l'équation du 3^{ème} degré sans terme x^2 ou x . Le mathématicien italien **Jérôme Cardan** (1501-1576) en donna la solution générale ⁽¹⁸⁾ et inventa la théorie

⁽¹⁸⁾ Cette solution avait été découverte par Tartaglia (1499-1557) qui refusa de la publier. Devant l'insistance de Cardan, il lui révéla cette solution. Ce dernier la publia sous son nom.

3.2. La renaissance scientifique

des équations algébriques. Il fut également le premier à utiliser les nombres imaginaires. Il publia le premier grand traité d'algèbre occidentale *Ars magna*. L'utilisation de symboles en algèbre est apparue à la Renaissance (+ était une abréviation du latin "et" et le signe = est introduit en 1537 par François Viète (1540-1603)). L'usage de lettres pour les variables est introduit à la même époque. La renaissance artistique suscite un nouvel intérêt pour la géométrie : l'artiste Albrecht Dürer (1471-1538) s'intéresse à la perspective ce qui l'amène à publier le premier traité de mathématiques en Allemagne. La cartographie se développa grâce à la méthode de projection cylindrique inventée par le flamand Gerhard Mercator (1512-1594) et à la triangulation proposée en 1533 par le précepteur de Mercator, Reiner Gemma Frisius.



Figure 13 : [Fig 1 Fig 2] Portraits de Paccioli (à gauche) et Cardan (à droite).

3.2.2. Médecine et sciences de la nature à la Renaissance

Les idées de Galien qui firent autorité au moyen-âge furent balayées par le grand anatomiste flamand **André Vésale** (1514-1564) qui acquit ses connaissances des nombreuses dissections qu'il pratiqua dans les universités de Padoue et de Bologne. La médecine italienne se développa rapidement (Eustache, Fallope, ...). Le hollandais Volcher Coiter (1534-1576), fervent partisan de Vésale, pratiqua l'anatomie comparée et développa sur la base de sa formation de médecin la biologie. Toutefois, le développement de la médecine n'était pas toujours du goût de l'Église : le médecin espagnol Miguel Serveto (1511-1553) périt sur le bûcher pour antitrinitarisme (il découvrit la petite circulation qu'il interpréta comme le véhicule de l'esprit vital). En 1564, Jean Wier, le médecin du duc de Clèves s'élève contre les buchers de sorcières, ces dernières n'étant pour la plupart que de faibles

femmes sujettes à des troubles mentaux plutôt qu'à une liaison avec le diable.

Par les explorations et découvertes géographiques, l'inventaire du monde vivant s'est démesurément grossi durant la fin du moyen-âge. La question de l'inventaire des espèces pose alors problème. Albert le grand utilise l'ordre alphabétique ! Des systèmes a-priori sont introduits, qui sont basés sur une échelle des êtres d'inspiration biblique et qu'on retrouve également chez Aristote. Les critères humoral (sang) et génétiques (mode de reproduction) sont utilisés dans la classification. Avec l'imprimerie apparaît au XVI^{ème} siècle principalement en Allemagne, la zoologie illustrée et la botanique.

A cette époque, on ramène le principe de vie des plantes à la croissance, la nutrition et la reproduction. On met en évidence la reproduction sexuée de certaines plantes. L'intérêt porté dès la fin du Moyen-âge à l'étude des textes des naturalistes de l'antiquité provient essentiellement des parties consacrées aux propriétés médicinales des plantes.

3.2.3. De l'alchimie à la chimie

Une protochimie se développa de manière parallèle via l'alchimie, teintée d'hermétisme et à la recherche de la transmutation des métaux en or et d'un élixir d'immortalité et d'autre part de manière plus scientifique pour répondre aux besoins de l'industrie minière et métallurgique (Georg Bauer, 1494-1555 ; Bernard Palissy, 1499-1589). L'imprimerie permit la diffusion de textes techniques remplaçant les traités mystiques de l'alchimie. De nombreux médecins (dont Paracelse, 1493-1541) contribuèrent au développement de la chimie par leur étude des procédés d'élaboration de plantes et de minéraux nécessaires à leur thérapies. Les qualités d'Aristote (chaud, humide, froid et sec) associées aux éléments se voient adjoindre au XIV-XV^{ème} siècle, les "principes" : soufre, mercure, sel qui précisent les propriétés antagonistes de la matière. Tandis que le soufre et le mercure viennent de l'alchimie arabe, c'est Paracelse qui ajoute le sel comme troisième principe. Le soufre est le principe de ce qui est actif, chaud, dur (le masculin), le mercure de ce qui est passif, froid, malléable, volatile (le féminin) et le sel de ce qui permet dans un corps d'unir le soufre et le mercure, et d'assurer la cohésion du résultat.

3.2.4. L'effondrement du paradigme ptolémaï-aristotélicien

3.2.4.1. Une physique encore embryonnaire

L'évolution de la physique fut lente. **Léonard de Vinci** ^[15] (1452-1519) est le type des physiciens de l'époque. Il était avant tout un artiste

3.2. La renaissance scientifique

formé par un des artistes les plus renommés de Florence mais développa rapidement l'imagination d'un grand inventeur. Également scientifique bien qu'handicapé par son manque de formation (latin, mathématiques, ...), il s'intéressa principalement à l'optique et refait aux alentours de 1500 les expériences d'Al-Haytham. Simon Stevin (1548-1620) reprit les travaux d'Archimède sur la mécanique des leviers, étudia l'équilibre des forces au moyen d'un collier de sphères disposé autour d'un plan incliné et s'intéressa à l'hydrostatique. Le constructeur anglais Robert Norman reprend en 1581 l'étude du magnétisme, qui avait été abandonné depuis Pierre de Maricourt. Toutefois, rien ne fut publié jusqu'à ce que William Gilbert (1540-1603), médecin de la reine Elizabeth I^{er}, publie en 1600 un traité dans lequel il montre comment un aimant en forme de sphère peut imiter le champ magnétique terrestre. Il soutint la théorie copernicienne et avança l'idée d'une rotation de la Terre.



Figure 14 : [Fig 1] Portrait de L. de Vinci.

L'optique connaît un renouveau important dans la seconde moitié du XVI^{ème} siècle, en particulier avec l'impression des travaux de **Ibn al-Haytham** en 1572. **Kepler** pose en 1604 les fondements de l'optique géométrique en reprenant et en précisant les propositions de Ibn al-Haytham, Grosseteste et Thierry de Freiberg. Le flux de lumière émane de la source sous forme d'une infinité de rayons droits allant à l'infini. Il n'échoue dans la construction de l'optique géométrique que dans la détermination de la loi de la réfraction (il établit la proportionnalité des angles d'incidence et de réfraction pour des angles de moins de 30°). Contrairement aux atomistes, **Ibn al-Haytham** et Bacon, il pense que la vitesse de la lumière est infinie. En 1610, à partir des tables de réfraction de Witelo, **Kepler** développe la théorie des lentilles, expliquant le

fonctionnement de la lunette à oculaire divergent (celle de Galilée), prévoit celle à oculaire convergent et donne le principe du téléobjectif (réalisé deux siècles plus tard). Il construit un modèle d'œil formé d'une sphère aqueuse et d'un diaphragme. **Willebrord Snel** (1580-1626) découvre en 1621 la loi de la réfraction mais sa disparition prématurée ne lui laisse pas le temps de la publier. Ce furent **Christiaan Huyghens** et **René Descartes** en 1637 qui publièrent ce résultat.

3.2.4.2. La révolution copernicienne de l'astronomie

Les progrès les plus significatifs en science à la Renaissance sont ceux concernant la conception de l'univers. Johann Müller (1436-1476), brillant étudiant de l'université de Vienne, connu sous le nom de Regiomontanus développa la trigonométrie. Il poursuivit la rédaction d'un abrégé de l'“*Almageste*” de Ptolémée entreprise par son maître et dont les tables étaient beaucoup plus précises que dans l'œuvre originale. Les critiques des travaux de Ptolémée qu'il avança mirent en lumière les failles du système ptolémaï-aristotélicien.

Nicolas Copernic (1473-1543) naît dans la ville hanséatique de Torun, située en Pologne. Après des études à l'université de Cracovie, il devient en 1496 l'assistant de Domenico Maria à l'université de Bologne. Maria avait montré en 1489 que les latitudes des villes méditerranéennes étaient $1^{\circ}10'$ plus élevées que ne le pensait Ptolémée. Reprenant les calculs de Ptolémée, il en conclut à un mouvement de l'axe de la Terre de période 395.000 ans, ce qui contredisait la vision aristotélicienne d'une Terre immobile. Toujours sans diplôme, Copernic accepte en 1501 une chaire de chanoine obtenue par son oncle évêque parce qu'elle lui permettait de disposer de deux années d'études supplémentaires qu'il passe alors à Bologne. En 1503, il rentre en Pologne et se consacre aux affaires du diocèse et à l'œuvre de sa vie “*De revolutionibus orbium coelestis*” qui sera publié quarante ans plus tard en 1543. Copernic y critique Aristote et Ptolémée. Concernant la physique du premier, il affirme que si la Terre se meut, elle entraîne dans son mouvement circulaire non seulement l'élément aqueux mais aussi une portion considérable de l'air. Il pense que tout corps éloigné de son lieu naturel admet un mouvement rectiligne uniforme pour le rejoindre et que lorsque c'est le cas, il adopte un mouvement circulaire uniforme. Il se démarque d'Aristote pour qui seul l'éther a un mouvement naturel circulaire. Copernic reprend l'hypothèse de Maria du mouvement de l'axe terrestre. A ce mouvement de la Terre, il y adjoint la révolution autour du Soleil et la rotation. Le modèle héliocentrique de Copernic repose toujours sur des épicycles pour assurer l'ellipticité des orbites et des excentriques pour expliquer certaines anomalies mais présente l'avantage de ne pas nécessiter d'équant. De plus, les tables

3.2. La renaissance scientifique

coperniciennes n'ont pas besoin d'être mises à jour fréquemment comme cela était nécessaire dans les modèles géocentriques à cause de la variation de l'année solaire. Georg Joachim Rheticus, mathématicien protestant de l'université de Wittenberg, avait rejoint en 1539 Copernic qui jouissait alors d'une très grande réputation. Il publie en 1540 son "*Narratio Prima*", dans lequel il présente une introduction des résultats de Copernic sous une forme plus mathématique (Copernic avait adopté l'héliocentrisme pour des raisons philosophiques, pensant qu'il est plus facile de faire mouvoir le plus petit) et montrant par exemple que le mouvement des étoiles présentait une anomalie par rapport au mouvement moyen et que la période de cette anomalie était d'une année solaire.



Figure 15 : [Fig 1] Portrait de N. Copernic

L'œuvre de Copernic est publiée en 1543 avec une préface anonyme précisant que la théorie n'introduit qu'une simplification des calculs astronomiques et non une nouvelle description de l'univers. Les protestants désapprouvèrent vivement cet ouvrage sauf en Angleterre. E. Reinhold publie en 1551 des tables astronomiques basées sur la théorie copernicienne, dites "*tables pruténiques*" qui jouirent rapidement d'un très grand succès et détrônèrent les "*tables alfonsines*". Dans un almanach très populaire, Léonard Digges présenta en 1576 la théorie copernicienne sur un diagramme du système solaire avec des étoiles s'étendant à l'infini. La sphère des étoiles qui créait un obstacle à la théorie de Copernic disparaît. L'Église qui ne formula tout d'abord aucune objection à l'encontre de la nouvelle théorie, changea de discours après que le très provocant hermétiste **Giordano Bruno** (1548-1600) ait soutenu la théorie copernicienne à travers l'Europe et adopté le point de vue de Digges d'un univers infini d'étoiles et celui du cardinal allemand Nicolas de Cusa (1401-1464) de l'omniprésence de la vie dans l'univers ^[12]. Condamné une première fois, Bruno s'enfuit

mais revenu par provocation, fut dénoncé et périt pour hérésie sur le bûcher de l'Inquisition.

3.2.4.3. Tycho Brahé et Johannes Kepler



Figure 16 : [Fig 1 Fig 2] Portraits de T. Brahé.

Alors étudiant à l'université de Copenhague depuis 1569, le danois **Tycho Brahé** (1546-1601) se destine à l'astronomie après une éclipse qui l'a marquée par le fait qu'on ait pu la prédire. A partir de 1563, il se forme dans les grandes universités allemandes (Leipzig, Wittenberg, Rostock, Bâle et Augsbourg). En 1563, il observe le rapprochement de Jupiter et Saturne et est choqué par l'inexactitude des tables alfonsines (désaccord d'un mois) et pruténiques (quelques jours). Il construit un quadrant de bois de 18 mètres à Augsbourg en 1569 mais la santé déclinante de son père le pousse à rentrer au Danemark en 1572. Cette année-là, il observe une super-nova, visible jusqu'en 1574. Il acquiert la célébrité en montrant qu'il s'agissait bien d'une nouvelle étoile. La théorie aristotélicienne de l'immuabilité des astres en sort affaiblie. La notoriété lui vaut en 1576 de se voir offrir l'île de Ven par le roi Frédéric II du Danemark, sur laquelle il fait construire un immense observatoire qu'il baptise *Unraniborg*. Tycho Brahé ramène la précision de $1/2$ degré (inchangée depuis Hipparque) à deux minutes d'angle. Il observe en 1577 une comète dont il montre qu'il ne s'agit pas d'un phénomène sublunaire. Il s'oppose à la conception aristotélicienne mais rejette la théorie héliocentrique car il n'observe aucune variation de ce qu'il croit être le diamètre apparent des étoiles (en fait la diffusion de la lumière dans sa rétine) au cours de la révolution terrestre. Sur une idée de Paul Wittich, il commence dès 1583 à mettre au point sa propre théorie cosmologique, géocentrique mais où les astres gravitent autour du soleil.

3.2. La renaissance scientifique

Après avoir observé plusieurs comètes dont il établit qu'elles se situent au-delà de la lune, il rejette l'idée d'orbites solides et lui préfère celle d'un espace rempli d'un fluide dans lequel les astres se déplacent librement. En brouille avec les successeurs de Frédéric II, il quitte Uraniborg en 1597. Après deux ans d'errance, il s'installe à la cour de l'empereur Rodolphe II à Prague qui lui avait offert la charge de mathématicien impérial.

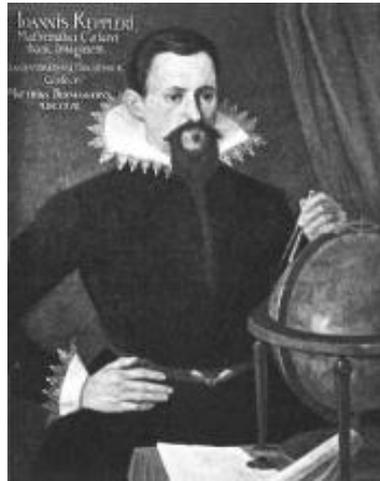


Figure 17 : [Fig 1] Portrait de J. Kepler.

Après une enfance difficile avec un père devenu mercenaire après le déclin de la fortune familiale et une mère qui sera accusée de connivence avec le diable à la fin de sa vie, **Johannes Kepler** ^[18] (1571-1630) profita du très bon système éducatif des ducs protestants de Wittenberg. Il entre en 1589 à l'université de Thübingen où il se destine à la théologie dans le but de devenir pasteur. L'enseignement d'astronomie en fait un copernicien convaincu. En 1591, l'université le recommande pour remplacer le mathématicien des États de Styrie à Graz. Il y enseigne l'astronomie puis l'astrologie plus attractive aux yeux de son jeune public noble. Il s'acharne à tenter de découvrir une explication aux distances entre les planètes et le Soleil. En 1600, chassé par un édit contre les protestants, Kepler rejoint Tycho Brahé dans le but d'obtenir ses données astronomiques. Tycho Brahé et son assistant Longomontanus échouent dans la modélisation mathématique du mouvement de Mars car ils utilisent le soleil moyen comme référence. Kepler reprend leur travaux en utilisant cette fois le soleil vrai et en réintroduisant un équant dans la théorie copernicienne ⁽¹⁹⁾. En observant les positions de Mars sur une période de révolution (687 jours), il découvre

⁽¹⁹⁾ D'après la loi des aires, la vitesse angulaire n'est constante que pour une orbite circulaire.

l'ellipticité de son orbite en retranchant au mouvement de Mars celui de la Terre. Il imagine une attraction du soleil perpendiculaire à la trajectoire et inversement proportionnelle à la distance. Après la lecture de “*De Magnete*” (1600) du médecin anglais W. Gilbert, il est convaincu que cette attraction est d'origine magnétique. A la même époque, le flamand Simon Stevin liait lui aussi mouvement planétaire et magnétisme. Après huit ans de travail, Kepler tire de la forme de son attraction les deux premières lois (ellipticité de l'orbite et loi des aires) dans son traité “*Astronomia nova*” publié en 1609. Sa première démonstration de la loi des aires repose sur une orbite circulaire et une vitesse proportionnelle à la force. Il l'étend en 1618 au cas d'une dépendance quelconque de la vitesse avec la force. En relation avec Galilée, il étudie les comètes de 1618, reconnaissant leur nature céleste puis s'intéresse aux tâches solaires. En 1619, après neuf ans de cogitations mystico-pythagoriciennes, Kepler publie “*Harmonices mundi libri*” où on peut trouver notamment la troisième loi ($a^3/T^2 = \text{Cste}$). En 1627, il publie les “*tables Rudolphinae*”, les premières basées sur les trois lois de Kepler et qui seront utilisées pendant un siècle.

3.2.4.4. La physique nouvelle de Galilée

Galileo Galilei ^[2] (1564-1642) abandonne des études de médecine (au cours desquelles il découvrit en 1583 l'isochronisme du pendule en mesurant avec son pouls la période des lustres de la cathédrale de Pise lors d'un office religieux) pour se consacrer aux mathématiques, à la mécanique et à l'hydrostatique. Titulaire d'une chaire de mathématiques à l'université de Pise, il publie un traité dans lequel il démolit la conception aristotélicienne du mouvement. Il rejette la démonstration d'Aristote de l'impossibilité du vide et étudie dès 1604 le mouvement en lâchant des poids du haut de la tour de Pise et en faisant rouler des billes sur un plan incliné ⁽²⁰⁾. Galilée met en évidence le principe d'inertie ⁽²¹⁾ par l'analyse de la combinaison des mouvements et l'hypothèse de l'indépendance des forces. En utilisant une horloge à eau de sa fabrication, il montre que la vitesse d'une bille à l'issue de sa chute le long du plan incliné ne dépend que de la hauteur de chute ⁽²²⁾. Il établit que les espaces franchis par le mouvement naturel

⁽²⁰⁾ L'intérêt du plan incliné est de réduire la vitesse de chute.

⁽²¹⁾ sans toutefois le formuler car il ne peut pas imaginer un corps privé de sa gravité : ses expériences sur un plan horizontal n'y conduisent que par un artefact.

⁽²²⁾ Le théorème de l'énergie cinétique conduit en effet à

$$W = \int_A^B mg\vec{u}_z \cdot d = mg\Delta z = \Delta T = \frac{1}{2}mv_B^2 \Leftrightarrow v_B = \sqrt{2g\Delta z}$$

3.2. La renaissance scientifique

des graves dans le vide sont dans la proportion double du temps (i.e. le carré) : $\ell \sim t^2$. En revanche, il se trompe en concluant que la vitesse est proportionnelle à la distance parcourue ($v \sim \ell$ alors que $v \sim t$). Il démontre que la composée du mouvement rectiligne uniforme avec celui causé par la gravité est une parabole.



Figure 18 : [Fig 1] Portrait de G. Galilei.

Installé ensuite à Padoue, il s'intéressa au télescope, inventé par un fabricant de bécicles hollandais Hans Lippershey en 1608. Il présente sa lunette au Sénat qui lui accorde une chaire à vie. Les observations astronomiques de Galilée popularisèrent l'usage du télescope et certaines fournirent un puissant soutien à la théorie copernicienne. L'observation fine de la Lune lui permet de mettre en évidence sa rugosité et son opacité, d'observer le mouvement des ombres portées par les montagnes, d'estimer les plus hauts sommets à plus de 6000 mètres et d'interpréter l'illumination de la Lune comme due au Soleil et à la Terre quant à la partie obscure (seconde Lune). Il découvre quatre satellites de Jupiter en 1609 en suivant leurs apparitions et disparitions périodiques. Il observe en 1610 les tâches solaires et explique avec précision dans les "*Dialogues*" que ces tâches apparaissent généralement au centre du disque solaire et disparaissent parfois loin de sa circonférence ce qui exclut la possibilité d'objets passant devant le soleil. Grâce à sa lunette, il réalise que la voie lactée correspond à une masse innombrable d'étoiles et non à une exhalaison de l'atmosphère terrestre comme on le pensait alors. L'absence de parallaxe des étoiles confirme leur éloignement, ce que montre également l'absence de grossissement par la lunette. En mars 1610, Galilée publie le

“*Messenger céleste*” qui déclenche une réaction inouïe et un engouement de la bourgeoisie pour la nouvelle cosmologie. Cela vaut à la cosmologie de Copernic d’être condamnée par le Saint-Office en 1616

En 1612, Galilée publie son “*Traité sur les corps flottants*” où il reprend la théorie d’Archimède ce qui lui vaut une querelle farouche avec les aristotéliens pour qui la forme détermine la poussée. Parti pour Florence, Galilée s’y heurte au conservatisme en particulier de l’Église, une Terre en mouvement allant à l’encontre des Écritures. Alors qu’il affiche sa foi dans le système copernicien en 1613, les jésuites tentent de sauver le géocentrisme en mettant en avant à partir de 1619 le système de Tycho Brahé. Galilée prépare sa réponse pendant quatre ans, au terme desquels, il publie en 1623 “*L’essayeur*”, violente critique d’un ouvrage sur les comètes dans laquelle il expose ses vues sur la réalité scientifique ⁽²³⁾. Il évite toutefois d’y traiter du mouvement de la Terre après l’interdiction de la cosmologie de Copernic. Le Vatican réserve à sa discussion un accueil favorable et le pape Urbain VIII autorise Galilée à écrire un traité présentant les systèmes aristotélien et copernicien, à la condition que les deux systèmes soient placés sur un même plan et que l’ouvrage conclue à la toute puissance divine. Galilée ruse en écrivant un ouvrage populaire, écrit en toscan, se présentant sous la forme d’un dialogue faisant intervenir un aristotélien, Simplicio, tourné en ridicule par Salviati, le réformateur mordant et Sagredo, l’homme cultivé et de bon sens jouant le rôle de modérateur (deux amis physiciens de Galilée, alors disparus). De plus, c’est Simplicio qui prononce la conclusion sur la toute puissance divine. Publié en 1632, “*Dialogues sur les deux principaux systèmes du monde*” déclenche une tempête de protestations. En 1633, Galilée est contraint par l’Inquisition de se rétracter ⁽²⁴⁾ et est assigné à résidence jusqu’à sa mort.

Avec Galilée, c’est le paradigme ptolémaï-aristotélien qui achève son déclin. Après lui, la découverte de nouveaux corps célestes confirmera sa vision : nébuleuse d’Orion en 1611 par Peiresc, Titan le plus gros satellite de Saturne en 1655 par Huyghens, les anneaux de Saturne en 1656 par Huyghens, Japet en 1671 par Cassini, Rhéa en 1672 par Cassini,...

L’établissement d’un nouveau paradigme sera finalisé par Newton.

⁽²³⁾ Il affirme notamment que le livre de l’univers est écrit en langage mathématique

⁽²⁴⁾ Et pourtant elle tourne (“*Eppur, si muove !*”) aurait-il affirmé à l’issue de son procès.

4. LE SIÈCLE DES LUMIÈRES

4.1. La modernisation de la société des lumières

4.1.1. Contexte politique et économique des lumières

4.1.1.1. L'apparition du capitalisme redéfinit les valeurs

Au XVII^{ème} siècle, la société européenne est encore marquée par le féodalisme : elle est divisée en ordres. Les nobles et les évêques possèdent la terre, en recueillent les revenus et perçoivent des impôts. La majorité du peuple vit à la campagne. L'agriculture n'a guère évolué depuis le XII^{ème} siècle : les rendements sont faibles. Les famines causées par le climat ou les guerres reviennent régulièrement. Les industries, artisanales, prospèrent. Des banques ouvrent. Le capitalisme apparaît. Les nobles commencent à connaître des difficultés financières à cause de l'inflation. La société hiérarchisée en ordres laisse peu à peu place à une société de classes sociales.

Après 1600, les villes italiennes déclinent et l'Espagne stagne. Le développement du trafic maritime profite maintenant aux pays atlantiques (France, Angleterre, Provinces Unies et Suède). La puissance des Provinces Unies s'affirme. Elles deviennent le pôle économique, intellectuel (Descartes, Spinoza, ...) et artistique (Vermeer, Rembrandt, ...) de l'Europe. En Angleterre, Charles II favorise les milieux d'affaires et permet à la classe capitaliste d'accéder au pouvoir politique. En France, Louis XIV, marqué par l'affront de la Fronde, cantonne les nobles à la cour et lègue la direction économique du pays à un bourgeois, Colbert. La monarchie absolue exige l'obéissance au roi des sujets et la bourgeoisie a besoin de l'obéissance à la hiérarchie sociale. La base idéologique est commune : l'idéal esthétique répond aux soucis d'ordre et d'unité. Le classicisme triomphe : Corneille et Racine mettent en avant la grandeur morale, on copie les sculptures antiques, l'architecture devient sobre et froide, les fresques romanes, colorées, sont blanchies. Le soutien à la science répond à cet idéal.

4.1.1.2. L'évolution de la société

Au XVIII^{ème} siècle, le commerce Outre-Mer prend un essor considérable. L'arrivée du coton d'Inde stimule la production intérieure. Les états se centralisent, l'administration devient une affaire de spécialistes. Grâce à son sol fertile, sa population nombreuse et son unité, la France est alors le pays le plus puissant. Son rayonnement culturel est tel que le français remplace peu à peu le latin en Europe continentale. Seule l'Angleterre résiste à cette influence. A l'aube de la révolution [22], la France est essentiellement rurale : 20 millions de personnes vivent à la campagne sur une population totale de 26 ou 27 millions. La hausse des prix a entraîné la dépréciation des droits féodaux. La révolution française annoncera le début d'un mouvement de disparition complète du servage en Europe qui s'achèvera par la Russie en 1861. Comme dans toutes les sociétés rurales, la paysannerie est victime de l'endettement qui transfère la propriété de la terre de ses détenteurs héréditaires vers les banques. Les villes abritent des bourgeoisies intellectuelles (diplomates) et commerçantes. Contrairement à celles du reste de l'Europe, la bourgeoisie française est peu entreprenante. Elle préfère l'investissement foncier qui assure des bénéfices supérieurs aux autres formes d'investissement et aspire à l'honorabilité en achetant des charges et en espérant l'anoblissement. Dès le milieu du XVIII^{ème} siècle, l'Angleterre s'engage dans une voie originale : elle permet l'enfermement des parcelles de terre ce qui provoque une mutation de l'agriculture (concentration des terres, remplacement de la culture céréalière par l'élevage et la culture fourragère, suppression de la vaine pâture du troupeau communautaire).

4.1.2. Contexte scientifique et philosophique des lumières

4.1.2.1. Le détachement de la philosophie de la religion

Le mouvement des lumières se développe au début du XVII^{ème} siècle lorsqu'il apparut qu'il existait des hommes de grande vertu ("*bon sauvages*⁽²⁵⁾ ") mais sans religion dans de lointaines contrées (en orient et principalement en Chine). Le mouvement déiste se développe à partir des années 1620 en Angleterre et eut pour plus grand avocat en France Voltaire. Même si pour **Emmanuel Kant**, l'homme ne peut rien apprendre du monde supra-sensible par la théorie, il doit postuler l'existence de Dieu et de l'immortalité pour ne pas sombrer dans le désespoir. Kant rejette le platonisme et affirme que les mathématiques sont le langage permettant la description du monde (il rejoint en cela Galilée). Selon Descartes, Dieu prend

⁽²⁵⁾ terme dû à Voltaire après qu'il eût lu les récits des premiers missionnaires jésuites en Chine

4.2. La révolution scientifique des lumières

désormais le rôle d'architecte, spectateur d'un monde mécanique régit par les lois de la mécanique plutôt que celui d'un père céleste. Les philosophes du continent n'admettent pas la théorie de Newton qui, à tout instant, requiert l'existence d'un principe actif, la force de gravitation, derrière laquelle se cache la main de Dieu. Les miracles sont devenus inconcevables et les prophéties bibliques inacceptables. Le rôle de la morale est redéfini, non plus comme l'égoïsme d'accéder à la vie éternelle promise par la religion mais comme quelque chose d'inné à l'homme. Le déterminisme de Kant ne s'applique pas au Moi ce qui garantit à l'homme sa liberté. D'autres mouvements, plus ou moins radicaux, firent leur apparition tels le scepticisme et l'athéisme (principalement en France avec Diderot et d'Alembert mais aussi et surtout avec Spinoza). D'Amsterdam, Baruch Spinoza alimente le débat de fond, poussant l'esprit critique et le doute métaphysique de Descartes à la morale et à la métaphysique.

Alors que la théorie newtonienne est peu à peu acceptée sur le continent, elle se vide des considérations théologiques que leur avait associé Newton. Laplace, à qui l'empereur demande quel rôle joue Dieu dans la nouvelle cosmologie, répond "*Sire, je n'ai pas eut besoin de cette hypothèse.*"

4.1.2.2. La théorie de la connaissance

David Hume s'interroge sur des questions du style "*Pourquoi sommes-nous persuadés que le soleil se lèvera demain ?*". Il définit la causalité comme l'habitude qui naît chez l'homme à force d'observations d'une connexion entre deux faits, l'apparition de l'un conduisant à celle de l'autre. Toutefois, seules ces connexions nous apparaissent lors de l'expérimentation mais pas les causes premières.

4.1.2.3. Le soutien public à la science

Alors que l'Église recule, la science acquiert aux XVII^{ème} et XVIII^{ème} siècles ses lettres de noblesse. L'intérêt des gouvernements pour les sciences s'accroît au cours des XVII^{ème} et XVIII^{ème} siècles. La création des observatoires royaux de Paris et Greenwich mais surtout celle des académies sur le modèle de celles qui apparurent en Italie à la fin du XVI^{ème} siècle encourage le développement de la science. Parmi les plus célèbres d'entre elles figurent l'Academi del Cimento créé en 1657 à Florence, The Royal Society en 1660 à Londres et l'Académie des Sciences fondée en 1666 par Colbert à Paris. Leur rôle était d'encourager matériellement les sciences et la publication des résultats. Les premières revues scientifiques font leur apparition : "*Philosophical transactions of the Royal Society*" en 1664 et le "*Journal des sçavans*" en 1665.

4.2. La révolution scientifique des lumières

(Bibliographie : 24, 28)

4.2.1. La victoire du déterminisme newtonien en mécanique

La physique connut un grand élan pendant les XVII^{ème} et XVIII^{ème} siècles et progressa considérablement dans certains domaines, plus particulièrement en optique, dans les recherches sur la nature du vide et dans les études sur la chaleur, l'électricité et le magnétisme. C'est surtout du domaine de l'astronomie que provient la véritable avancée tant scientifique que philosophique initiée par le déterminisme de Newton.

4.2.1.1. Descartes et la philosophie naturelle française

L'intérêt pour la science portée par le philosophe et mathématicien français **René Descartes** (1596-1650) est née de sa rencontre en 1618 avec Isaac Beeckman qui cherchait à mettre en évidence expérimentalement l'existence d'une vitesse finie lors de la chute des corps dans le vide. Descartes s'attache alors à concevoir un système complet du monde basé sur un petit nombre de concepts. Sa vision de l'univers est fondée sur Dieu (*Discours de la méthode*, 1637). Il publie en 1644 ses "*Principia Philosophae*" où il parvient à la conclusion que sa seule certitude ne pouvait être que sa propre existence ("*cogito ergo sum*"). Il soutient la théorie copernicienne et contribue à la rendre acceptable aux yeux des conservateurs. Chef de file de l'école française, il pense impossible l'existence d'action à distance et explique le mouvement des planètes comme la conséquence des tourbillons d'une matière invisible qui remplirait l'espace. Il n'y a selon lui ni vide, ni atomes. En 1664, il apporte la première formulation claire et distincte de la loi d'inertie :

"la première loi de la nature : que chaque chose demeure en l'état qu'elle est, pendant que rien ne change ; la seconde loi : tout corps qui se meut tend à continuer son mouvement en ligne droite."

Ses autres principes décrivant les modalités de communication du mouvement (lois des chocs) se révéleront en revanche inexacts.

Selon Descartes, lors de la création, la matière formait un mélange confus auquel Dieu a insufflé le mouvement. Les chocs ont conduit peu à peu à des trajectoires stables : les rotations uniformes. De plus, ils ont usé la matière, lui donnant la forme sphérique caractéristique d'un des trois éléments : l'air subtil. L'agglutination de petites particules sur les corps les plus massifs ayant résisté aux chocs a formé l'élément Terre. Enfin, les

4.2. La révolution scientifique des lumières

éclats produits lors des chocs a donné l'élément Feu. Les solides, liquides ne sont que des particules de l'élément Terre plus ou moins distantes. La nature ayant horreur du vide, l'air subtil emplit tout l'espace. La forme de l'élément Feu lui permet de s'insérer entre l'assemblage de sphères sphériques d'air subtil. Ce dernier est le siège de tourbillons qui entraînent les planètes dans leur mouvement. Les sphères d'air subtil sont maintenues dans leur trajectoire par la couche de sphères situées au dessus et qui exerce une pression. Cette pression se communique du centre du tourbillon jusqu'à la périphérie selon des rayons avant de se communiquer aux yeux sous forme d'une sensation de lumière. Les points lumineux dans le ciel signalent donc le centre d'un tourbillon mais n'implique pas nécessairement la présence d'une étoile. Pour Descartes, la flamme est formée des particules d'éléments feu dont le mouvement est très rapide et très violent, provoquant la séparation des corps (élément Terre) en cendres et en fumées (particules en suspension dans l'air subtil). Ce mouvement est perçu tantôt comme chaleur, tantôt comme lumière. En effet, le mouvement très violent des éléments feu se communique aux sphères d'air subtil. Dans ses derniers travaux, Descartes parle d'une pression "tremblante" communiquée aux sphères d'air subtil, i.e. admet le caractère ondulatoire de la lumière.



Figure 19 : [Fig 1] Portrait de R. Descartes.

4.2.1.2. La mécanique newtonienne

4.2.1.2.1. Les pre-newtoniens

Gassendi par son opposition à la vision cartésienne du monde se montre un précurseur de l'école de Cambridge. Il suppose que la gravité n'est pas intrinsèque aux corps mais qu'elle est le fruit de l'attraction terrestre. En 1640, il fait exécuter au large du port de Marseille et selon la procédure proposée par Galilée des expériences de mécanique dans la cale d'un bateau afin

de mettre en évidence le principe de relativité. En 1666, Giovanni Borelli (né en 1608) qui lui succède à la chaire de mathématiques de l'université de Pise explique l'existence d'orbites planétaires fermées par l'équilibre de trois forces (attraction naturelle vers le soleil, répulsion engendrée par les rayons solaires et force centrifuge). **Robert Hooke** (1635-1703) note à la même époque qu'un pendule a une trajectoire presque elliptique s'il est écarté de sa position d'équilibre et lancé suffisamment fort dans une direction perpendiculaire. Il en tire une loi en $1/r$. **Christiaan Huyghens** (1629-1695) commence dès 1652 à douter des lois de **Descartes**. En 1657, il établit les lois des chocs qu'il publie en réponse à un concours de la Royal Society en 1666. En 1673, Huyghens publie ses travaux sur l'accélération centrifuge des corps en mouvement circulaire ($\gamma = v^2/R$).



Figure 20 : [Fig 1] Portrait de Ch. Huyghens.

4.2.1.2.2. L'œuvre de Newton

Encore étudiant, **Isaac Newton** ^[13] (1642-1727) est contraint d'interrompre ses études en 1665, avec en poche une licence (sans mention) du Trinity College de l'université de Cambridge qui doit fermer ses portes à cause de la "Grande peste". Au domaine maternel de Woolsthorpe, il poursuit ses recherches personnelles. Il découvre la formule du binôme qui lui permet de calculer l'aire sous certaines courbes en exprimant la fonction sous forme de séries. Il développe sa méthode des tangentes qui le conduit au calcul des infinitésimaux (qu'il appelle fluxions) puis à leur inverse, i.e. à l'intégration. Il s'intéresse à la décomposition de la lumière par un prisme qu'il a acquis en août. En 1666, en voyant tomber une pomme, il comprend que la lune tombe également sur la Terre mais à une vitesse telle que sa trajectoire

4.2. La révolution scientifique des lumières

est circulaire autour de la Terre. Il ne publie aucun de ces résultats. La réouverture de l'université en 1667, lui permet d'obtenir une maîtrise en 1668. Il occupe dès 1669 une chaire de mathématiques à Cambridge. Son télescope à réflexion et donc présentant l'avantage de ne pas être sujet aux aberrations chromatiques lui apporte la célébrité et lui vaut sa nomination à la *Royal Society* en 1672. Il publie sa théorie des couleurs en 1672 mais une discussion animée avec Hooke quant à la nature de la lumière le pousse à s'isoler. A partir de 1670, Newton commence à dédaigner la lecture de ses contemporains pour revenir aux auteurs classiques, se plonger secrètement dans l'alchimie, la théologie et l'exégèse biblique. Dans sa jeunesse, Newton avait lu **René Descartes** et était conscient que sa théorie des tourbillons ne pouvait pas expliquer le mouvement de certaines comètes qui tournent dans le sens inverse des planètes et de la plupart des comètes. Il admet alors l'existence d'une action à grande distance et montre que les lois de **Kepler** pour une orbite circulaire sont compatibles avec une force en $1/r^2$ où r est la distance au centre la masse. Le calcul n'étant pas possible pour les orbites elliptiques, il développe son calcul des fluxions. En 1690, il utilise pour un déplacement infinitésimal la notation $\dot{x}o$ où \dot{x} est le taux de variation de x par unité de temps et o un temps aussi petit que souhaité. Après plusieurs années, il peut alors démontré qu'une sphère agit comme un point situé à son centre et concentrant toute la masse. Il démontre alors que le mouvement d'un corps soumis à une force centrale est plan et que si la trajectoire est elliptique, le corps est soumis à une force centrale agissant en direction d'un des foyers de l'ellipse avec une intensité inversement proportionnelle au carré de la distance. Il démontre les lois de **Kepler** dans le cas des trajectoires elliptiques. Comme Hooke, **Edmond Halley** (1656-1742) est à la recherche de la loi sur la gravitation ⁽²⁶⁾. Il arrive indépendamment en 1684 à la loi en $1/r^2$ pour les orbites circulaires. Il demande alors conseil à Newton qui lui révèle qu'il a déjà résolu le problème. Halley le pousse à sortir de son isolement et prend en charge la publication des résultats. Newton rédige alors entre 1684 et 1686 "*Principia mathematica Philosophiæ naturalis*" où il présente ses trois lois :

(i) *Tout corps persévère dans l'état de repos ou de mouvement linéaire uniforme, à moins que quelque force n'agisse sur lui et ne le contraigne à changer d'état.*

(ii) *Les changements qui arrivent dans le mouvement sont proportionnels à la force motrice et se font dans la direction dans laquelle cette force a été imprimée ($d(m\vec{v}) = \vec{F}dt$).*

(iii) *L'action est toujours égale et opposée à la réaction, c'est à*

⁽²⁶⁾ Christopher Wren, président de la Royal Society aurait offert 40 shillings à qui apporterait une solution à ce problème.

dire que les actions de deux corps l'un sur l'autre sont toujours égales et qu'elles s'exercent dans des directions opposées.

Il donne ensuite un certain nombre d'applications (chocs, pendule, projectile, résistance de l'air, équilibre des liquides, propagation du son et étude des corps célestes). Il calcule la densité de la Terre et la masse des planètes et montre que si elle a la forme d'une ellipsoïde alors son aplatissement sous l'effet de la gravité est 1/230. Il donne le premier calcul expliquant la précession des équinoxes et montre que le mouvement des comètes s'explique par l'attraction du soleil. Par admiration pour les anciens, il rejette le calcul algébrique et écrit les "*Principia*" dans un langage géométrique.

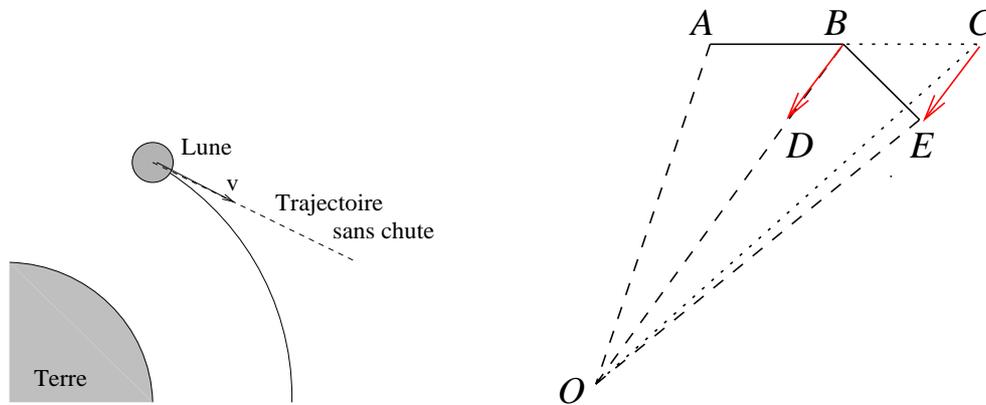


Figure 21 : [Fig 1 Fig 2] Newton comprend que la trajectoire de la Lune est due à sa chute sur la Terre (à gauche) et démonstration de Newton de la loi des aires : Soient AB la distance parcourue entre les instants t et $t + dt$, BC celle qui serait parcourue entre $t + dt$ et $t + 2dt$ en l'absence de force. On a $\overline{AB} = \overline{BC}$ et égalité des aires

$$OBC = |\overline{OB} \wedge \overline{BC}| = |\overline{OB} \wedge \overline{AB}| = |(\overline{OA} + \overline{AB}) \wedge \overline{AB}| = |\overline{OA} \wedge \overline{AB}| = OAB$$

La force centrale introduit une vitesse radiale et un déplacement \overline{BD} pendant le temps dt de sorte le mouvement est selon \overline{BE} . On a toujours égalité des aires

$$\begin{aligned} OBE &= |\overline{OB} \wedge \overline{BE}| = |\overline{OB} \wedge (\overline{BC} + \overline{CE})| \\ &= |\overline{OB} \wedge (\overline{BC} + \overline{BD})| = |\overline{OB} \wedge \overline{BC}| = OBC = OAB \end{aligned}$$

Dans le cas d'une orbite circulaire, la loi des aires conduit à une vitesse angulaire uniforme $v = \frac{2\pi R}{T}$ d'où l'accélération centripète

$$\gamma = K \frac{v^2}{R} = 4\pi^2 K \frac{R}{T^2}$$

4.2. La révolution scientifique des lumières

et donc en utilisant la troisième loi de Kepler $R^3/T^2 = K'$, il obtient une loi en $1/R^2$:

$$\gamma = 4\pi^2 K K' \times \frac{1}{R^2}$$



Figure 22 : [Fig 1 Fig 2 Fig 3] Portraits de E. Halley (à gauche) et I. Newton.

L'ouvrage publié en 1687 est unanimement salué bien que jugé trop mathématique. Il pose les bases du **déterminisme**. Newton critique l'approche cartésienne de la science, lui reprochant de reposer sur un nombre trop grand d'hypothèses ⁽²⁷⁾. Il montre également que des tourbillons ne pourraient pas conduire à la troisième loi de **Kepler**. En 1679, il imaginait la gravitation causée par un gradient d'éther mais il réalisera plus tard que le frottement avec cet éther conduirait à des trajectoires en forme de spirales. Face aux problèmes de l'immobilisme des étoiles, Newton finit par se retrancher derrière l'intervention divine. Les réticences des cartésiens ou de Leibniz à l'égard de la théorie newtonienne reposent sur la gêne occasionnée par le remplacement de la matière subtile qui poussait les planètes par une attraction agissant à distance et dans le vide. Malgré sa grande estime pour Newton, Huyghens rejette également la possibilité d'une attraction mutuelle des corps et tentera vainement de concilier théorie des tourbillons et mécanique newtonienne. Une polémique très virulente oppose Newton et Leibniz, par disciples interposés, quant à la paternité de la découverte des infinitésimaux. En 1689, Newton est élu au parlement. Il devient haut-fonctionnaire de la monnaie en 1696 et est élu président de la Royal Society en 1703.

⁽²⁷⁾ “*Hypotheses non fingo*” (je n'imagine pas d'hypothèses) a-t-il écrit.

4.2.1.2.3. Le principe de moindre action

En 1686, Leibniz attaque la loi cartésienne de la conservation de la quantité de mouvement mv (que les cartésiens n'orientaient pas) et montre que mv^2 , la **force vive** est une quantité conservée. En 1736, Euler publie le premier traité où la mécanique du point est traitée de manière rationnelle. En 1743, d'Alembert publie son "*Traité de dynamique*" où il rapporte toutes les situations à une situation d'équilibre ($\sum_i \vec{F}_i = 0$) par l'introduction de forces inertielles. Pierre-Louis Moreau de Maupertuis est le premier français à se déclarer ouvertement newtonien. En 1732, il prend le parti de **Newton** sur la forme aplatie de la Terre. En 1744, il présente devant l'académie des sciences un mémoire comportant un principe variationnel similaire à celui de Fermat et où la quantité $mv\ell$ (masse, vitesse, distance parcourue) est extrémale. En 1747, il étend son principe aux chocs en montrant que l'action totale est la somme des forces vives dues aux vitesses perdues et cela que le choc soit élastique ou inélastique. Il est conscient de la répugnance de l'époque à utiliser les conditions finales pour déterminer la trajectoire. En 1744, Euler met en évidence dans divers problèmes de mécanique le fait que les équations du mouvement correspondent à un extremum de $\int mv d\ell$. En 1760, il définit le centre d'inertie et les moments d'inertie.

4.2.1.3. Les confirmations astronomiques de la théorie de Newton

(Bibliographie : 32)

4.2.1.3.1. Progrès technologiques et soutien à l'astronomie

La généralisation du télescope donne un souffle nouveau à l'astronomie (Brahé avait fait toutes ses mesures à l'œil). **Huyghens** met à profit en 1665 l'isochronisme du pendule découvert par Galilée pour mesurer le temps. La déviation n'est plus que d'une seconde en 24 heures. Plusieurs perfectionnements sont apportés qui permettent en 1770 de construire des montres de marine ne déviant que de quelques secondes durant le voyage. En 1666, Auzout invente le **micromètre** : une vis déplace un fil dans le plan focal d'une lunette d'une distance obtenue à partir de l'angle dont la vis a été tournée. Ces deux améliorations techniques permettent d'obtenir des mesures 100.000 fois plus précises. Les observatoires royaux de Paris et Greenwich sont fondés en 1671 et 1676.

4.2.1.3.2. Les vérifications de la théorie newtonienne

Trois vérifications importantes apportent un immense crédit à la théorie newtonienne. Tout d'abord, l'académie des sciences sous la direction de Maupertuis finance en 1735-36 la vérification de la prédiction de

4.2. La révolution scientifique des lumières

l'aplatissement de la Terre à ses pôles. L'expérience menée au Pérou et en Laponie est concluante. D'autre part, Halley avait prédit en 1695 le retour en 1757-1758 de la comète de 1531, 1607 et 1682. Clairaut reprend les calculs en 1757 et prédit le passage pour la mi-avril 1759, à un mois près. Enfin, la découverte d'Uranus aura un retentissement inimaginable. **William Herschel** (1738-1822), musicien le jour et astronome amateur exceptionnel la nuit, construit son propre télescope, d'une excellente qualité, et commence un catalogue des étoiles. En 1774, il découvre la nébuleuse d'Orion puis en 1781 ce qu'il croit d'abord être une comète. Les calculs sont entrepris par plusieurs astronomes, dont Laplace et Hexel qui arrivent tous à la conclusion qu'il s'agit d'une nouvelle planète. La célébrité d'Herschel lui vaut une pension de la royauté britannique qui lui permet de poursuivre ses observations avec un nouveau télescope de sa fabrication (et le meilleur de son époque) des étoiles entre 1778 et 1808.

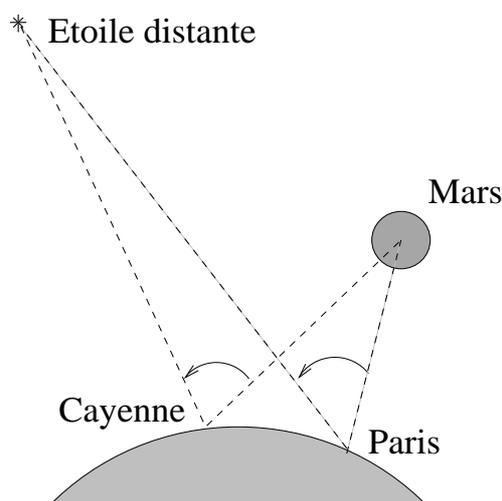


Figure 23 : [Fig 1] Mesure de la distance Terre-Mars par les astronomes royaux en 1671. L'angle formé par le trièdre avec Mars et une étoile est mesuré en deux points de la Terre : Paris et Cayenne, dont la différence de latitude est de 45° . L'étoile étant distante, les rayons y menant sont approximativement parallèles et la distance Terre-Mars est obtenue à partir de la différence des angles obtenus à Paris et Cayenne au même instant. La mesure a donné le résultat de 23 secondes d'arc.

4.2.1.3.3. Astronomie de mesure et d'observation

La mesure du degré terrestre est reprise en 1667 par Jean Picard (1620-1682), chef de file de l'astronomie française avant l'arrivée de Cassini, par triangulation dans la région d'Amiens. Les astronomes de l'observatoire de

Paris entreprennent sous la direction de Cassini la mesure des distances planétaires (on ne connaît encore que la distance Terre-Lune, estimée par Aristarque au III^{ème} siècle). En 1671, Richer découvre lors de mesures à Cayenne que le pendule y a une période plus grande. Jean Picard met en évidence en 1667 sans s'en rendre compte le phénomène d'aberration en notant les variations sur dix ans de la position de l'étoile polaire. En 1727, Bradley entreprend la surveillance de 200 étoiles. Il observe une modification des positions apparentes de toutes les étoiles avec une périodicité d'un an. Il interprète l'effet comme le résultat apparent de la composition de la vitesse de la lumière avec celle de la Terre. La constante gravitationnelle \mathcal{G} est mesurée pour la première fois autrement que par l'analyse de la trajectoire de corps célestes par Cavendish en 1798. Herschell s'intéresse aux systèmes binaires d'étoiles dans le but de déterminer leur distance. Il échoue. Il s'intéresse également aux nébuleuses dont il fait passer le nombre de 103 à 2500 et qu'il classe en 33 types. La question de leur nature ne sera résolue qu'en 1845 lorsque William Parsons résout en étoile la galaxie spirale des chiens de chasse.

4.2.1.3.4. Le problème de l'accélération séculaire de la Lune

En 1693, Halley confronte les dates des éclipses lunaires notées depuis l'Antiquité et constate l'accélération de la Lune. En 1743, Clairaut lit devant l'académie des sciences son étude du mouvement de la Lune (problème à trois corps : Soleil, Terre, Lune) où pour la première fois, il ne cherche pas à obtenir une solution exacte mais traite l'attraction du Soleil comme une perturbation par rapport à la force principale due à la Terre. Toutefois, il ne parvient pas à expliquer l'accélération séculaire de la lune et l'académie décide de lancer un concours en 1762 pour résoudre ce problème. Aucune réponse ne fut apportée et le concours supprimé en 1774. En 1787, Pierre-Simon de Laplace présente une solution du problème de l'accélération séculaire : une variation à très longue période de l'excentricité de l'orbite terrestre introduit une variation de l'action du soleil sur la Lune. Un calcul correct, comme le montre John Couch Adams, donne une valeur moitié de l'expérience. En 1860, on réalisera que ce désaccord est dû à l'imperfection de la rotation terrestre.

4.2.2. L'optique et la question de la nature de la lumière

(Bibliographie : 19)

4.2.2.1. La théorie de Descartes et le principe de Fermat

En 1637, **Descartes** publie un traité d'optique intitulé "*Dioptrique*". Il se garde bien d'y présenter ses déductions quant à la nature de la lumière pour se cantonner à l'optique géométrique. Comme **Ibn al-Haytham** ,

4.2. La révolution scientifique des lumières

il compare la réflexion au rebond d'une balle sur une surface. Il admet que la réfraction est due au passage à un milieu plus résistif bien que cela entre en contradiction avec sa vision de la nature de la lumière. En effet, comme **Kepler**, **Descartes** conclut à une vitesse infinie de la lumière car il note qu'aucun décalage de temps n'a jamais été observé lors d'une éclipse lunaire. De plus, il se trompe en admettant que la propagation de la lumière est plus rapide dans le verre que dans l'air et qu'elle augmente avec la densité. Il associe les couleurs à la vitesse de rotation sur elles-mêmes des corpuscules de lumière (rouge pour une vitesse faible). Un choc peut modifier cette vitesse. Descartes reprend l'explication de l'arc-en-ciel de Thierry de Freiberg et fait un exposé complet des réfractions et des réflexions à l'intérieur des gouttes de pluie. Il remarque que les couleurs différentes correspondent à des angles de réfraction différents.



Figure 24 : [Fig 1] Portrait de P. Fermat.

A la même époque, Fermat critique la théorie cartésienne de la lumière, en particulier la proposition d'une vitesse inversement proportionnelle à la densité. Il cherche l'explication des réfractions dans un principe variationnel : "*Dieu nous envoie sa grâce, la lumière, par le chemin le plus court*". Il retrouve la loi de la réfraction. L'utilisation des causes finales est vivement critiquée par les cartésiens.

4.2.2.2. Les théories ondulatoires de Grimaldi et Huyghens

En 1663, Grimaldi s'attaque au problème de la nature de la lumière en s'attachant à suivre la méthode scientifique prescrite par Galilée. En perçant un trou dans un volet, il fait tomber un mince pinceau de lumière sur un cheveu. Il observe des franges colorées en bordure de la zone de pénombre entourant l'ombre. Il vérifie que les franges ne dépendent pas du corps utilisé. Il invente pour ce phénomène le terme de **diffraction**. Ayant

noté que les ondes mécaniques à la surface de l'eau ne laisse jamais place à une zone d'ombre comme c'est le cas avec la lumière, il rejette l'hypothèse d'une nature ondulatoire de la lumière. Il admet que la lumière est un fluide obéissant aux lois de la mécanique mais ne parvient pas à expliquer correctement la réfraction (l'indice de réfraction mesurant la porosité du milieu). Il attribue les couleurs aux ondulations de densité du fluide, ce qui semble expliquer le changement de couleur à la réflexion.

Le hollandais **Christiaan Huyghens** avait reçu une excellente éducation, avec notamment Descartes comme précepteur de physique. Excellent mathématicien, il est également expérimentateur : il fabrique avec son frère Constantin son propre télescope qui leur permit la découverte en 1665-1666 des anneaux de Saturne. Notant que deux rayons lumineux peuvent se croiser sans être déviés ou affaiblis, Huyghens admet une nature ondulatoire de la lumière. Il introduit un éther, substance invisible servant de support matériel aux ondes lumineuses. Dans un traité d'optique d'une soixantaine de pages, il explique la propagation des ondes en utilisant un modèle mécanique de sphères dures. Une chaîne de sphères dures permet la propagation d'ondes longitudinales et un assemblage tridimensionnel celle d'ondes sphériques. Cette description lui permet de montrer que deux ondes peuvent se croiser sans se gêner et le conduit au principe dit de Huyghens :

Tout se passe comme si chaque point du front d'onde était la source secondaire d'une onde sphérique. Le nouveau front d'onde est formé de l'enveloppe de toutes les ondes secondaires.

Ce principe permet d'expliquer la propagation rectiligne de la lumière : chaque point d'un diaphragme crée une onde sphérique et leur somme ne se renforce que pour un arc de cercle dont les extrémités sont sur la même droite que la source et le bord correspondant du diaphragme. Le principe de Huyghens permet également d'expliquer la réflexion et la réfraction et d'en retrouver les lois. L'existence de solides transparents conduit Huyghens à postuler une structure discontinue des solides, le vide étant comblé par l'éther. Cela provoque une gêne dans la propagation donc une vitesse moindre. Il démontre la loi de la réfraction. Huyghens explique également les effets de mirage par une composition inhomogène de l'air. Lorsque de la vapeur d'eau stagne près du sol, les ondes lumineuses s'y déplacent plus lentement et le front d'onde n'est plus sphérique.

En 1669, Erasme Bartholin avait décrit dans un traité des cristaux de calcite rapportés d'une expédition en Islande qui dédoublent les images des objets. En tournant un cristal parallélépipédique, l'une des images d'un objet placé sous le cristal est fixe alors que la seconde tourne avec le cristal. Bartholin parle de réfraction ordinaire dans le premier cas car les lois de la réfraction sont vérifiées et de réfraction extraordinaire dans le second. Il

4.2. La révolution scientifique des lumières

explique le phénomène par l'existence de pores laissant passer la lumière et qui seraient de deux types dans la calcite dont l'un seulement est identique à ceux du verre. Huyghens montre que l'onde extraordinaire semble avoir un indice de réfraction qui dépend de la direction alors que celui de l'onde ordinaire est constant. Il explique la biréfringence en postulant que l'onde ordinaire est sphérique alors que l'onde extraordinaire est ellipsoïdale. Il note la similitude entre l'ellipsoïde et les directions dans lesquelles il est plus facile de briser le cristal. Il postule alors que l'onde ordinaire fait vibrer l'éther alors que l'onde extraordinaire se transmet à la fois à l'éther et aux parties massives du cristal. La biréfringence doit donc exister dans tous les cristaux et effectivement, il la découvre comme attendu dans le quartz et le mica. Un fait reste cependant inexpliqué : Huyghens observe en éclairant d'un rayon un premier cristal que les deux rayons obtenus à sa sortie ne se dédoublent plus si on interpose un second cristal de même orientation.

4.2.2.3. La théorie corpusculaire de Newton

En 1666, **Newton** entreprend de résoudre le problème des couleurs. Les couleurs font-elles partie de la lumière incidente (comme le pense Thierry de Freiberg) ou sont-elles produites par la surface réfractante (Descartes) ? Les théories sont nombreuses : lumière plus ou moins ternie pour Aristote et Kepler, onde de densité d'un fluide pour Grimaldi, composition des deux couleurs fondamentales rouge et bleu pour Hooke. Newton va réaliser une série d'expériences décisives. Il perce un trou dans un volet et fait tomber le pinceau de lumière sur un prisme, obtenant les franges colorées connues depuis 1558. En plaçant un second prisme perpendiculairement au premier, il constate que la largeur de l'image n'augmente pas donc l'orientation des surfaces ne joue aucun rôle. Descartes avait tort. Avec un masque, il isole la partie bleue de la tâche avant de la faire passer à travers le second prisme. Le faisceau émergent est dévié mais ne change pas de couleur. En utilisant deux prismes placés de manière appropriée à la sortie du premier, Newton parvient à reconstituer sur un écran la lumière blanche. La lumière blanche est donc composée de toutes les couleurs de l'arc-en-ciel. Pensant que les aberrations chromatiques étaient inévitables avec un télescope à lentille, il conçoit le premier télescope à réflexion utilisable. En 1672, Newton présente ses travaux à la Royal Society en les accompagnant d'une théorie corpusculaire de la lumière. Hooke s'oppose à Newton violemment sur la question de la couleur.

La propagation rectiligne de la lumière dans un milieu est due selon **Newton** à l'existence de corpuscules lumineux auxquels s'applique le principe d'inertie. Il rejette l'hypothèse de Descartes d'un rebond de ces corpuscules lors de la réflexion car il observe que l'intensité réfléchie augmente avec la densité du milieu incident, i.e. lorsque la densité de points

de collision diminue dans le second milieu. Newton introduit l'idée d'une modification de la trajectoire par une force perpendiculaire à la surface dioptrique. La trajectoire est donc parabolique sur une distance très courte au voisinage de la surface. Il retrouve avec cette hypothèse les lois de la réflexion et de la réfraction. En passant de l'air au verre, le rayon se rapproche de la normale ce qui signifie d'après Newton que la vitesse de la lumière est plus grande dans le verre que dans l'air. Il note que la force augmente avec la densité du second milieu, ce qui le conforte dans l'idée que la force en question est la gravitation. La dépendance de l'angle de réfraction avec la couleur signifie selon Newton que la couleur n'est autre que la masse des corpuscules (rouge plus massive). Une difficulté importante apparaît : on observe presque toujours à la fois réflexion et réfraction, ce que sa théorie ne permet pas. Il diffère la publication de "*Optiks*" jusqu'en 1704.

Newton interprète la diffraction découverte par Grimaldi avec sa théorie. Il étudie les motifs colorés apparaissant sur des lames transparentes. Il observe les anneaux dits de Newton au moyen d'une lentille hémisphérique à grand rayon de courbure posée sur un plan de verre. Il explique la couleur des anneaux par une réflexion de toutes les autres couleurs. Il s'aperçoit que la couleur dépend de la distance entre les deux surfaces. Pour expliquer ce phénomène, Newton doit introduire une action supplémentaire qui se propage de la première à la seconde surface. Il suppose qu'à la manière d'une pierre lancée dans l'eau, les corpuscules de lumière créés lors de la réflexion ou de la réfraction des ondes mécaniques dans un milieu qu'il appelle l'**éther** et qui remplit les interstices des solides. Ces ondes se propagent jusqu'à la deuxième surface, plus rapidement que la lumière, et les modulations de densité induisent des modulations périodiques de la gravitation. Il réalise que les franges de diffraction sont disposées suivant une hyperbole et non une droite. Les rayons continuent d'être déviés après l'interaction avec l'objet. Newton suppose alors que l'éther est responsable de cette déviation continue sans parvenir à expliquer comment. Il associe la gravitation à la condensation de l'éther.

Newton s'acharne à construire une théorie corpusculaire mettant en jeu une force de réfraction. Il échoue dans cette tâche et fait parfois preuve d'un esprit peu scientifique dans son traité d'optique. Il formule un certain nombre de critiques à l'encontre de la théorie de Huyghens. La propagation se faisant par transmission de vibrations des sphères d'air subtil de proche en proche, on doit avoir des frottements et donc une production de chaleur. Pour réduire cet échauffement, il faut des sphères dures en contact mais pourquoi alors, si les astres se meuvent dans l'éther, n'observe-t-on aucune résistance à leur mouvement ?

4.2. La révolution scientifique des lumières

4.2.2.4. Progrès technologiques et déclin de l'optique

L'usage de la lunette et du microscope se généralise dans la deuxième moitié du XVII^{ème} siècle. Ole Römer (1644-1710) estime en 1675 la vitesse de la lumière à 193.000 km/s en mesurant la différence de temps entre les prédictions et les observations des éclipses des satellites de Jupiter. En 1672, Newton invente le télescope. Le grossissement est obtenu par réflexion car Newton pense qu'il est impossible d'éviter l'aberration chromatique en utilisant des réfractifs. En 1723, Hall démontre qu'il est possible de réaliser des objectifs achromatiques par superposition de lentilles polies dans des verres différents et convenablement choisis. Cette découverte reste dans l'indifférence générale. En 1747, Euler démontre expérimentalement que la dispersion n'est pas proportionnelle à l'indice de réfraction ce qui rend caduque la théorie corpusculaire de Newton. Les newtoniens restent imperturbables. En 1757, John Dolland construit un objectif achromatique. On admet une erreur expérimentale de Newton.

Au XVIII^{ème} siècle, l'optique n'est plus à la mode et tombe dans l'oubli pendant 150 ans. On en vient à enseigner que les rayons sont réellement rouges ou violets !

4.2.3. L'apparition de la thermodynamique, l'électricité, l'hydrostatique

4.2.3.1. La thermodynamique

L'inventeur du premier thermomètre est inconnu (peut-être Galilée). En 1708, Ole Römer conçoit un thermomètre à alcool grâce auquel il définit une échelle de température de 60 degrés à partir des points de fusion et d'ébullition de l'eau. Daniel Farenheit réalise un travail similaire peu après. L'échelle centésimale est due à Anders Celsius (1701-1744) en 1742. La nature de la chaleur était expliquée par la théorie calorique qui supposait l'existence d'un fluide impondérable composé de particules se repoussant mutuellement. On pensait que ces particules entouraient chaque corps et que leur répulsion permettait de compenser la force gravitationnelle supposée être à l'origine de la cohésion des solides. **Pierre Simon de Laplace** (1749-1827) propose une démonstration des lois connues de la thermodynamique dans le cadre de cette théorie. Le médecin, chimiste et physicien écossais Joseph Black (1728-1799) découvre que tous les corps ont une capacité calorifique différente. Il mesure la chaleur latente associée à l'évaporation de nombreuses substances. L'application la plus importante fut la construction d'une machine à vapeur par James Watt (1736-1819).

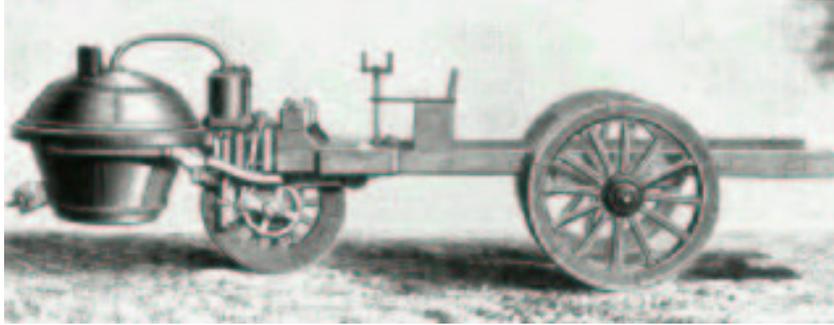


Figure 25 : [Fig 1] Véhicule à vapeur construit par Cugnot en 1769 pour déplacer des pièces d'artillerie. Il atteignait une vitesse de 3.2 km/h mais devait s'arrêter toutes les quinze à vingt minutes.

4.2.3.2. Les débuts de l'électricité

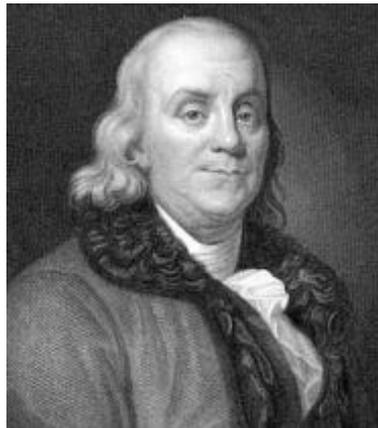


Figure 26 : [Fig 1] Portrait de Franklin.

Otto von Guericke (1602-1686), diplomate et ingénieur allemand, construit la première machine électrostatique à la fin des années 1640. L'étude de l'électricité démarre réellement avec l'observation faite dans les années 1720 par Stephen Gray (1670-1736) de la possibilité de conduire l'électricité d'un corps électrisé vers un corps qui ne l'est pas par un matériau approprié. Le français Charles François Dufay (1698-1739) découvre que les corps électrisés peuvent soit se repousser, soit s'attirer. La bouteille de Leyde mise au point en 1745 par Pieter Van Musschenbroek permet de stocker l'électricité. En 1750, **Benjamin Franklin** (1706-1790) montre que les éclairs sont d'origine électrique. Dans les années 1760-70, les travaux de Joseph Priestley (1733-1804), Benjamin Franklin et Henry Cavendish

4.2. La révolution scientifique des lumières

(1731-1810) mettent en évidence la loi en $1/r^2$ de la force électrostatique. Sa balance électrique à torsion permet à **Charles de Coulomb** (1736-1806) d'en donner l'expression précise. En 1780, Luigi Galvani (1737-1798) observe que deux métaux différents en contact par le nerf de la patte d'une grenouille provoque la contraction du muscle. Alessandro Volta (1745-1827) déduit de cette expérience le principe de la pile en 1799 et fabrique la première pile électrique formée d'une succession de rondelles de cuivre et de zinc séparées par du carton humide.

4.2.3.3. De l'hydrostatique à l'hydrodynamique

Galilée montra en 1638 que le vide pouvait être aisément obtenu contrairement à ce que pensait Aristote. Ses recherches furent poursuivies par son élève Evangelista Toricelli (1608-1647) qui inventa le premier baromètre. En 1648, **Blaise Pascal** ^[9] (1623-1662) met en évidence une différence de la hauteur du mercure dans le baromètre de Torricelli selon qu'on se trouve à Clermont-Ferrand ou au sommet du Puy de Dome. Guericke réalise l'expérience des deux hémisphères à Magdebourg en 1654 (deux chevaux tentent de séparer deux hémisphères à l'intérieur desquels le vide a été fait et dont la cohésion est maintenue par la pression atmosphérique). Toutes ces expériences permettent de comprendre que la pression atmosphérique est en fait la pesanteur de l'air. Otte Guericke donne au tube de Torricelli une forme siphoniale en 1663 et invente le manomètre. Sous la direction de Robert Boyle (1627-1691), Robert Hooke conçut une pompe plus perfectionnée que celle de Guericke avec laquelle il découvrit la loi $PV = cste$ (loi de Boyle-Mariotte), d'abord énoncée par Towneley puis redécouverte quelques temps après (1679) par le français Edme Mariotte (1620-1684) et qui fut la première équation d'état d'un gaz. Amontons prouve en 1702 que la loi n'est valide qu'à température constante.



Figure 27 : [Fig 1 Fig 2] Portraits de Pascal (à gauche) et Boyle (à droite).

Pascal développe l'hydrodynamique dans la voie ouverte par Stevin. En 1738, Daniel Bernouilli publie "*Hydrodynamica*" fondée sur la conservation des forces vives. Il suppose la vitesse constante dans les plans perpendiculaires au mouvement. En 1744, d'Alembert publie "*Traité de l'équilibre et du mouvement des fluides*" où il se ramène de nouveau à une situation d'équilibre. En 1752, il parvient aux équations générales de l'hydrodynamique dans le cas de mouvements plans ou de révolution. Euler établit ces équations dans une forme définitive (mouvement d'un fluide parfait compressible et équation de continuité traduisant la conservation de la masse).

4.2.4. Le développement de l'analyse en mathématiques

4.2.4.1. L'introduction de l'analyse et le calcul infinitésimal

Les années 1650 sont marquées par le développement de l'analyse en Europe. La notion de fonction apparaît après que Galilée ait tracé des courbes espace-temps lors de son étude de la chute des corps. Contrairement aux grecs, les mathématiciens de l'après Galilée considèrent comme indissociables l'étude des propriétés des courbes et la manipulation des équations correspondantes. Le développement du calcul algébrique comme outil applicable à la géométrie est dû à **René Descartes** (avec le système cartésien) et à Pierre de Fermat. Les logarithmes sont une découverte de John Napier, ou Neper (1550-1617) en 1614. **Blaise Pascal** (1623-1662) et Pierre de Fermat (1596-1650) contribuent à poser les fondements de la mathématique des probabilités.

Newton a développé dans les *Principia* le calcul infinitésimal qui regroupe le calcul différentiel et intégral. **Gottfried Leibniz** (1646-1716) était arrivé à une méthode équivalente en 1684 (le taux de variation de x avec le temps était noté \dot{x} par **Newton** et $\frac{dx}{dt}$ par Leibniz) et a montré la relation entre dérivation et intégration. Il utilise la méthode de simplification $x + dx = x$. La notion d'infiniment petit reste néanmoins flou et tout le monde a conscience de les utiliser sans réelle justification.

4.2.4.2. Le siècle de l'analyse

La famille Bernouilli introduisit entre 1650 et 1780 une forme moderne de l'analyse. Les mathématiques apparaissent de plus en plus comme une science abstraite, indépendante de l'expérience. Leibniz souligne la possibilité d'une *mathematica universalis* en tant que science mathématique, symbolique et formelle, qui dépasse tout ce qui est à la portée des constructions et intuitions humaines. Pour Kant, en revanche, non seulement la géométrie, mais même l'arithmétique sont liées aux formes de l'intuition humaine. Espace et temps sont des a-priori.

4.2. La révolution scientifique des lumières



Figure 28 : [Fig 1 Fig 2] Portraits de Leibniz (à gauche) et Euler (à droite).

Le XVIII^{ème} siècle a été le “siècle de l’analyse”. Les deux figures marquantes de cette époque sont Joseph-Louis Lagrange (1736-1813) et surtout **Leonhard Euler** (1707-1783). On rencontre Euler à tous les carrefours des mathématiques : théorie des nombres, algèbre, développement en séries infinies, notion de fonction, calcul différentiel et intégral qu’il affranchi de ses origines géométriques, équations différentielles, calcul des variations, mécanique et hydrodynamique. En 1748, il publie “*Analysin infinitorium*” où on peut trouver les formules liant les fonctions trigonométriques et l’exponentielle, les expressions du sinus et du cosinus en séries infinies et la classification des coniques. Le calcul infinitésimal, malgré ses succès, reste contesté quant à sa justification. L’académie de Berlin, dominé par Lagrange, ouvre un concours pour établir une méthode rigoureuse expliquant pourquoi le calcul différentiel fonctionne. Sans succès.

4.2.5. La chimie aux lumières

La nécessité d’abandonner les cinq éléments aristotéliens au profit d’une nouvelle classification se fait sentir au XVII^{ème} siècle notamment au travers de “*The sceptical chymist*” (1661) de Robert Boyle et des travaux de Robert Hooke. Jan Baptist Van Helmont (1579-1644) observe que les résidus de fumées de combustion conservent certaines caractéristiques des corps brûlés et ne sont donc pas exclusivement composés d’air et de vapeur d’eau comme on le pensait alors. Il imagine le mot gaz pour les décrire. L’économiste allemand Johann Becher propose en 1669 une classification composée de trois sortes de terres (*terra lapida, mercurialis et pinguis*). La terre mercurialis, inflammable, se dégage selon lui par combustion. Georg Stahl (1660-1734) reprend ces idées et remplace terra mercurialis

par le phlogistique ou principe fondamental du feu, responsable selon lui de la combustion. Pour Stahl, les propriétés chimiques d'un élément sont inhérentes et non relationnelles. Il s'oppose en cela à **Newton** qui pensait que l'attraction entre composés chimiques était d'origine gravitationnelle et donc qu'on ne pouvait qualifier un corps que relativement à un autre (affinités relatives). En étudiant lors de sa thèse la perte de masse de la poudre blanche *magnesia alba* lors de sa calcination ou lors du dégagement de bulles dans l'acide et la réapparition de cette masse ⁽²⁸⁾ dans un alcali, Joseph Black arrive à la conclusion en 1756 que l'air est une substance composée. Il appelle la substance se combinant avec *magnesia alba* air fixe. En 1766, Henry Cavendish introduit l'air inflammable qui est dégagé par les métaux en milieu acide et qui correspond au phlogistique. A ces trois formes d'air (air, air fixe et air inflammable), Joseph Priestley en ajoute sept autres (air nitreux, air phlogistiqué, ...) au terme de ses expériences en 1772. En 1774, il obtient de l'hydrogène qu'il baptise air déphlogistiqué mais que Cavendish baptise eau déphlogistiquée après qu'il ait identifié le reste de son explosion à de l'eau.



Figure 29 : [Fig 1] Portrait de Lavoisier.

Observant l'augmentation de la masse de certains corps après combustion, **Antoine-Laurent Lavoisier** (1743-1794) propose en 1777 une nouvelle théorie de la combustion, définie comme une combinaison avec l'air, source de chaleur (calorique) et non une libération de phlogistique. En 1783, il achève sa refondation de la chimie en montrant que l'eau est

⁽²⁸⁾ Pour expliquer cette perte de masse lors de la calcination alors qu'on devrait observer une absorption de phlogistique, Stahl suggéra que ce dernier devait être soumis à une pesanteur différente.

4.2. La révolution scientifique des lumières

composé de deux parties : le principe acide ou oxigine présent dans tous les acides et le principe hydrogène. Il peut expliquer grâce à cette hypothèse un grand nombre de réactions chimiques. Cette nouvelle chimie fit oublier la théorie phlogistique et fut très rapidement acceptée et enseignée. Un système proche du nôtre où l'huile de vitriol était devenu l'acide sulfurique et l'aqua fortis l'acide nitreux est proposé dès 1787 par Guyton de Morveau, Berthollet et Fourcroy. En 1795, Berthollet observe que l'affinité, au lieu de caractériser un corps dans sa relation avec un autre, est une fonction de l'état physico-chimique du milieu, et, en particulier, de la concentration des réactifs en présence. Pour lui, le produit d'une réaction est un mélange à l'équilibre. Cette théorie sera vivement critiquée par Proust qui lui oppose sa théorie des proportions dans laquelle chaque composé correspond à une unique composition chimique et non à un mélange.

4.2.6. Les sciences du vivant aux lumières

4.2.6.1. Les “Histoire Naturelles”

Dès 1555, Belon note les similitudes des squelettes des animaux (un oiseau avec les ailes le long du corps a un squelette très similaire à celui d'un homme). Plusieurs *Histoires Naturelles* sont publiées au cours du XVII^{ème} siècle mais répètent toutes les mêmes erreurs. On constate peu de progrès entre les traités de Gesner en 1551-1558 et ceux de Jonston entre 1657 et 1665. Un souffle nouveau survient avec John Ray (1627-1705) et Willoughby, qui publient un système, toujours inspiré d'Aristote mais qui apportent quelques nouveautés comme le rattachement des cétacés aux mammifères et non aux poissons. Ils distinguent les reptiles dont le cœur n'a qu'un ventricule. Pour **René Descartes**, les animaux sont des machines répondant aux stimulations du milieu (1617). L'homme se distingue par son âme. Cette pensée s'impose durablement en France.

Au début du XVIII^{ème} siècle, **Carl von Linné** (1707-1778) propose une classification qui regroupaient végétaux, animaux et minéraux et était basée sur un système binominal (*canis lupus* pour le loup par exemple). L'oeuvre de Linné est assouplie par ses successeurs parmi lesquels on compte Bernard et Antoine-Laurent de Jussieu. Le plus illustre contemporain de Linné est **George Louis Leclerc, comte de Buffon** (1707-1788). Il s'oppose à une classification en genres et espèces, ne voyant dans la nature que des individus. L'ouvrage de Buffon (*Histoires naturelles générales et particulières*) publié en 1749 est avec 250 éditions un best-seller jusqu'au livre de Darwin. Le principal opposant à Buffon et à la philosophie cartésienne est Charles-George Leroy (1723-1789) qui observe les animaux avec les yeux d'un éthologiste et non d'un “zoologiste de bibliothèque” ou

d'un philosophe. Il publie, dans l'indifférence, en 1764 ses *lettres sur les animaux* dans lesquelles il écrit sous la plume d'un mystérieux physicien de Nürenberg. Voltaire s'opposera également à l'idée cartésienne d'animal-machine.

4.2.6.2. L'apparition du microscope et d'une nouvelle biologie

Le microscope apporte une dimension nouvelle à la biologie. Le premier grand ouvrage consacré à la microscopie est "*Micrographia*" de **Robert Hooke** en 1665. Jan Swammerdam (1637-1680) étudie les insectes, découvre les globules rouges et met en évidence l'absence d'une circulation de fluide dans les nerfs. Le sang est étudié par Marcello Malpighi (1628-1694) et surtout par Antony Van Leeuwenhoek (1632-1723) dont les travaux couvrent un champ important de la biologie. La botanique profite également de l'arrivée du microscope.

4.2.6.3. Les théories transformistes du XVIII^{ème} siècle

Buffon est le premier à parler d'espèces perdues en référence aux espèces disparues. Apprécié et adulé à la cour de France, il paye cher son hypothèse d'un ancêtre commun à l'homme et au singe qui contredit les enseignements de la Bible et fait de lui un précurseur des évolutionnistes. Il subit un interrogatoire pénible au terme duquel il retire son hypothèse et réintègre la cour. A partir de Ray et surtout Linné, une conception **fixiste** tendaient à s'imposer, qui voyait dans chaque espèce une entité immuable. Buffon se range derrière une variabilité limitée, intrafamiliale. Il envisage l'action modificatrice du milieu. Maupertuis est en revanche partisan d'un **transformisme** intégral. En 1754, il explique que la génération s'opère au moyen de molécules séminales dont la combinaison peut s'avérer irrégulière.

4.2.6.4. Le problème de la génération

Le problème de la génération voit, comme à l'époque d'Aristote et Hippocrate, s'opposer les partisans de la préexistence des germes dans le sperme ou dans l'oeuf et les épigénistes pour qui l'embryon se forme graduellement. Pour les tenants de la préexistence des germes, l'être futur existe d'avance dans un germe imperceptible. Charles Bonnet (1720-1793) découvre la parthénogénèse des pucerons (reproduction sans mâle). En 1759, Caspar Friederich Wolff (1733-1794) réduit à néant les efforts des préformationnistes en mettant en évidence sous microscope la formation graduelle des organes lors du développement de l'embryon du poulet. Lazzaro Spallanzani (1729-1799) procède à la fécondation d'oeufs de grenouilles en récupérant le sperme de mâles (qu'il avait vêtu de caleçons). Il réalise l'insémination artificielle d'une chienne et étudie la régénération animale. Depuis des temps reculés, la viande en putréfaction était supposée

4.2. La révolution scientifique des lumières

engendrer des asticots, l'humidité et la saleté puces et poux et le sable humide les moules. Humidité et chaleur suffisaient pensait-on à créer la vie. En 1668, Francesco Redi montre que les asticots proviennent d'œufs présents dans la viande. Leeuwenhoek arrive à la même conclusion concernant les moules dans le sable. Pourtant, l'idée de génération spontanée reste fermement ancrée comme le prouvent les expériences destinées à la démontrer qui sont effectuées par John Needham (1713-1781). Après avoir chauffé du jus de mouton, il montre l'apparition d'animalcules. Spallanzani est le critique le plus virulent. Il réfute les idées de Needham en étudiant des échantillons dans des flacons chauffés et hermétiquement clos. Il avance l'hypothèse que l'air pouvait être à l'origine de la vie.

4.2.6.5. La dérive raciste

Linné comme Buffon distinguent plusieurs races humaines, la théorie de la dégénération de Buffon montrant comment l'acclimatation à l'environnement avait conduit aux caractères propres de chacune des races. Ces théories, ne représentant qu'une part marginale des travaux de Linné et Buffon, contribuent néanmoins à donner un fondement scientifique aux thèses racistes de l'époque ^[8]. **Emmanuel Kant** donne une forme pseudo-savante aux préjugés sur les femmes, les noirs et les juifs. John Atkings (1685-1757) développe la théorie du polygénisme selon laquelle les races humaines descendent d'un ancêtre différent (Adam pour la race blanche). Voltaire (1694-1778), l'un des plus grands défenseurs de la tolérance, est aussi polygéniste, raciste et antisémite ! Le premier traité à vocation exclusivement raciste est "*Essai sur l'inégalité des races humaines*" publié en 1853-1855 par le français Gobineau. En s'appuyant sur la théorie des dégénération de Buffon, il divise la race blanche en sous-races allant de la race aryenne à la race sémite selon leur taux de métissage avec d'autres races et en particulier la race noire ⁽²⁹⁾ .

4.2.6.6. Médecine

L'anatomie a été révolutionnée par William Harvey (1578-1657) qui découvre la circulation sanguine. John Hunter (1728-1783) est le plus grand chirurgien de cette époque. Il encourage une chirurgie plus scientifique et invente de nombreuses techniques chirurgicales. L'inoculation d'une maladie dans le but de provoquer une affection bénigne apparaît au début du XVIII^{ème} siècle mais n'est véritablement étudiée que dans les années

⁽²⁹⁾ En France, les nobles sont les descendants des francs, aryens, arrivés avec Clovis alors que la bourgeoisie descend des gallo-romains et est donc d'une race inférieure. La révolution correspond selon lui à une dégénérescence de la société française.

1780 par un élève de Hunter, Edward Jenner (1749-1823). La publication de ses travaux en 1796 étend très rapidement la pratique de la vaccination.

4.2.6.7. Géologie

La paléontologie débute au XVII^{ème} siècle avec notamment Robert Hooke mais c'est surtout les idées relatives à la Terre qui se développent à cette époque. En 1644, **René Descartes** suggère que la Terre a dû être en fusion à l'origine et que désormais seul un noyau en son centre l'est resté. Il propose l'existence de deux couches au dessus du noyau. : une première métallique et une seconde, de densité moindre, à la surface de laquelle gisaient les eaux souterraines. Dans les années 1650, un évêque irlandais calcule à partir de la généalogie biblique d'Adam et Ève la date de la création de la Terre : 4004 av. J.C. ! L'idée d'une Terre beaucoup plus ancienne fait son chemin au XVIII^{ème} siècle (Edmond Halley, ...). Niels Stensen pose les fondements de la géologie moderne dans un ouvrage de 1671. Il fait l'hypothèse que les couches rocheuses sont horizontales après leur déposition mais qu'elles ont été déformées par des mouvements géologiques.

5. LE XIX^{ème} SIÈCLE

5.1. La société nouvelle du XIX^{ème} siècle

L'Europe connaît des bouleversements sans précédent avec le changement de régime, l'abolition de l'esclavage, la lutte des classes, la constitution républicaine fondée sur la démocratie, le socialisme, la liberté de penser. L'Église est menacée par les idées modernes et tente de réagir contre le modernisme. Le XIX^{ème} siècle voit le triomphe des idées libérales. En France, la révolution est jusqu'en 1792 libérale avant de devenir démocratique et républicaine après le renversement de la monarchie. Au pouvoir, Napoléon instaure un ordre centralisateur : les valeurs romaines réémergent (l'empire, le code civil, l'esthétisme dirigé). Il stabilise la société en la munissant d'une administration hiérarchisée. A l'aristocratie héréditaire se substitue une aristocratie de fonctions et d'argent. Napoléon, qui avait suivi une formation mathématique à l'école militaire va favoriser la science. Il restructure l'enseignement en créant les académies et les lycées. Les arts, les lettres et la philosophie déclinent.

5.1.1. La révolution industrielle du XIX^{ème} siècle

Au XVIII^{ème} siècle en Angleterre, des inventions empiriques permettent la systématisation du geste de l'ouvrier. Les paysans-artisans qui filaient à domicile sont contraints pour survivre de quitter la terre et de rejoindre les manufactures. En réaction, des bris de machines ont lieu ("*luddisme*"). La métallurgie se développe grâce aux revenus du commerce colonial. La machine de Watt (1769), utilisée pour évacuer l'eau des mines, est adaptée au textile et à la métallurgie. En France et en Rhénanie, le développement est plus lent. L'introduction du machinisme crée les conditions d'une production de masse. A une première phase d'investissements succède une seconde phase qui voit la science influencer sur le développement industriel (thermodynamique, électricité). Science et capitalisme entreprennent de transformer de manière irréversible une nature qu'ils se donnent pour but de dominer. Le positivisme triomphe. Dans une troisième

phase, le capitalisme se tourne vers la consommation. Il s'appuie sur le développement du chemin de fer et l'apparition du secteur tertiaire. Cette nouvelle orientation consumériste et les luttes ouvrières amènent la promulgation de lois sociales. Le capitalisme a besoin de la recherche et dès 1830, les gouvernements offrent titres et pensions aux scientifiques.

5.1.2. Le nouvel ordre social

La révolution technique bouleverse l'ordre social. Des types sociaux nouveaux font leur apparition. Un patronat plus étroitement lié à la banque se développe grâce au libéralisme triomphant. Un prolétariat d'ouvriers d'industrie fait son apparition dès la fin du XVIII^{ème} siècle en Angleterre et vers 1830 en France. Les conditions de travail sont les plus dures qui soient : 15 ou 16 heures de travail quotidien, jamais de repos (ni même les dimanches ou les fêtes religieuses) et sans limites d'âge (très jeunes enfants, 5 ou 6 ans, et vieillards travaillent). La condition des ouvriers, véritables animaux industriels, entraîne des révoltes (révolte des canuts de Lyon en 1831) et l'accroissement de la fracture sociale entre ouvriers et patrons. Une dépression économique entre 1815 et 1851 et la forte pression démographique jouent en défaveur des ouvriers. La grève est considérée comme une entrave à la liberté du travail. En 1864, Napoléon III accorde droits de grève et de formation de coalitions. En 1884, la loi Waldeck-Rousseau octroie aux ouvriers la liberté syndicale.

Enfin, une classe moyenne rassemble la bourgeoisie, la noblesse et les nouveaux fonctionnaires (postiers, instituteurs et cheminots avec le développement des chemins de fer). La France change de physionomie dans les années 1840-1860.

5.1.3. Libéralisme, démocratie et socialisme

5.1.3.1. Libéralisme

Le libéralisme est une philosophie politique et sociale révolutionnaire qui se définit par le refus de l'absolutisme. La société doit être fondée pour les libéraux sur la liberté avec un état gendarme au pouvoir limité, une séparation des pouvoirs et la décentralisation. Les libéraux sont également anti-cléricaux. L'individu doit passer avant la raison d'état. Le libéralisme est l'expression des intérêts de la bourgeoisie émancipée par la Révolution. En 1820, le libéralisme prend la forme de conspirations militaires qui échouent. En 1830, la révolution de juillet éclate en Europe et conduit à l'abdication de Charles X en France et à l'indépendance de la Belgique vis-à-vis des Pays-Bas. Le XIX^{ème} siècle a été l'âge d'or du libéralisme.

5.1. La société nouvelle du XIX^{ème} siècle

5.1.3.2. Démocratie

A partir des années 1840, les démocrates contestent et combattent l'ordre libéral. L'idée démocratique repose sur l'égalité et refuse les distinctions et les discriminations. Elle conteste le vote censitaire. Deux conceptions de la démocratie ne tardent pas à s'opposer. La première affirme que l'exercice des libertés requiert l'absence de d'inégalités sociales et revendique l'intervention de l'État pour réduire ces inégalités. La seconde reste attachée aux principes de liberté et ne conçoit aucune intervention de l'État. Au XIX^{ème} siècle, les démocrates se partagent entre parlementaristes et autoritaires. La démocratie autoritaire a trouvé son expression avec le régime bonapartiste des I^{er} et IInd empires.

Face à la menace démocratique, la bourgeoisie se rapproche peu à peu de l'aristocratie demeurée puissante et influente. L'idée démocrate fait peu à peu son chemin. Les nouveaux états de l'ouest américain sont d'inspiration démocratique et adopte le suffrage universel, imités par la suite par les autres états. Les États-Unis élisent leur premier président au suffrage universel en 1828 (Jackson). En France, l'établissement du suffrage universel est une des premières décisions du nouveau gouvernement provisoire après la révolution de 1848. L'enseignement primaire devient universel, obligatoire et gratuit entre 1879 et 1885 avec Jules Ferry. La liberté de la presse est totale en 1881. Les exemptions à la conscription militaire sont supprimées et l'impôt sur le revenu imposé au début du XX^{ème} siècle. Entre 1880 et 1885, Bismarck met en place un système de protection sociale. Dans de nombreux pays, la première guerre mondiale précipitera la transition démocratique. La seconde guerre aura le même effet aux XX^{ème} siècle. D'un gouvernement resserré menant une politique économique non-interventionniste, la tête de l'État évolue peu à peu dans tous les pays vers un gouvernement aux multiples attributions (et donc ministères) et aux multiples responsabilités (sociales, sanitaires) vis à vis des gouvernés et donc avec une pression fiscale accrue.

5.1.3.3. Le socialisme

Le socialisme s'est peu à peu imprégné des préoccupations de la classe ouvrière (Babeuf ne parlait que du partage des fruits de la terre). Au spectacle de la misère massive que les crises économiques périodiques (9 ou 10 ans) accroissent, le socialisme apporte une réponse reposant sur le refus de l'idée libérale individualiste. Le socialisme se développe suivant deux axes : syndical et politique. La première Internationale se tient à Londres en 1864. Le socialisme antérieur à 1848 est optimiste et, selon Marx, largement utopique (l'accord de tous pour l'amélioration de la société). Celui postérieur à 1870 est marxiste et repose sur la lutte des classes.

5.2. Les sciences au XIX^{ème} siècle

(Bibliographie : 24, 27)

5.2.1. Biologie au XIX^{ème} siècle

5.2.1.1. La théorie de l'évolution

5.2.1.1.1. L'évolutionisme lamarckien

Maillet défend au milieu du XVIII^{ème} siècle l'idée de mutabilité des espèces, estimant que tout ce qui vit vient de la mer. Après les travaux précurseurs de Buffon mais aussi les réflexions sur le sujet d'**Emmanuel Kant**, Erasmus Darwin (né en 1731), docteur en médecine, élabore à partir de 1794 une théorie assez complète de la formation graduelle et du perfectionnement du règne animal dûs aux causes extérieures. **Jean-Baptiste de Monet, chevalier de Lamarck** (1744-1829), disciple de Bernard de Jussieu, infortuné botaniste puis zoologue poursuit le travail de classification de Linné. Il développe en 1809 une théorie évolutionniste. S'appuyant sur des exemples d'élevage sélectif, il montre que les mutations sont bien dues aux conditions extérieures. Il introduit l'idée selon laquelle le développement des organes les plus sollicités par l'environnement est le plus rapide. Un changement de circonstances provoque un changement des habitudes, provoquant lui-même un changement des actes qui provoque à son tour un changement de la forme. De nouveau, il ne peut y avoir évolution des espèces que s'il y a transmissibilité des caractères acquis. Le lamarckisme suscite peu d'enthousiasme et fût réfuté par Cuvier qui montra que l'organisme ne répond pas toujours au milieu et que l'expérience infirme la transmissibilité des caractères acquis.

5.2.1.1.2. La paléontologie

Georges Cuvier ^[6] (1769-1832), très célèbre anatomiste de l'époque mais premier grand paléontologue, croit quant à lui à la fixité des espèces. Il est le fondateur de l'anatomie comparée, i.e. l'étude des corrélations entre vertébrés. Il s'élève contre l'idée répandue d'une échelle unique des êtres : selon l'organe que l'on suit, on peut obtenir une échelle différente. Cuvier s'oppose également vivement à la théorie de l'archétype ⁽³⁰⁾. Selon lui, les fossiles sont des animaux anté-déluviens. Il se conforme à l'opinion

⁽³⁰⁾ Au début du XIX^{ème} siècle, apparaît la théorie de l'archétype fondée sur l'idée que l'ensemble du squelette n'est qu'une répétition de parties homologues. L'idée est due à Goethe qui, ramassant un crâne de mouton un jour de 1790, le voit formé de vertèbres.

5.2. Les sciences au XIX^{ème} siècle

communément admise à la fin du XVIII^{ème} siècle selon laquelle aucun homme n'a vécu à la même époque que les animaux disparus. Au début du XIX^{ème} siècle, on admet leur existence mais on rejette toute filiation de ces hommes avec l'humanité actuelle. En 1823, Ami Boué découvre une moitié de squelette humain près de Strasbourg. Les preuves s'accumulent entre 1826 et 1829. Après la découverte en 1856 de l'homme de Néanderthal, on reconnaît cette filiation dans les années 1860. Le problème est clos en 1891 avec la découverte par Eugène Dubois à Java du pihtécantrope dont le cerveau a un volume de 900 cm^3 .

5.2.1.1.3. La théorie darwinienne

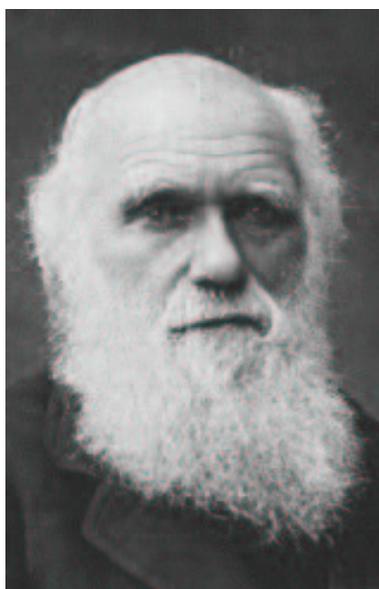


Figure 30 : [Fig 1] Portrait de C. Darwin.

Petit-fils d'Erasmus Darwin, **Charles Robert Darwin** (1809-1882) s'embarque en 1832 après son échec à des études de médecine, pour un voyage de cinq ans sur le *Beagle* vers l'Amérique du sud. Au cours du voyage, il étudie les travaux de Charles Lyell (1797-1875) qui affirme qu'une lente évolution plutôt que de grands cataclysmes est responsable de la forme des strates géologiques et que chaque espèce est née dans un lieu particulier à partir duquel elle a essaimée. Darwin développe l'hypothèse de l'élévation et l'affaiblissement des sols. De son retour en 1836 jusqu'à la publication en 1858 de "*L'origine des espèces*", il mûrit lentement l'idée d'une évolution des espèces par sélection naturelle. Best-seller en 1859, son ouvrage soulève une tempête de protestations, notamment de la part du paléontologue Robert Owen (1771-1858) qui s'était déjà opposé à la théorie

d'Erasmus Darwin et de l'évêque Wilberforce ⁽³¹⁾ . Les évolutionnistes acquièrent une adhésion très large. Comme dans le cas des travaux des naturalistes du XVIII^{ème} siècle, la théorie de l'évolution a donné lieu à des interprétations racistes. Le cousin de Darwin, Francis Galton (1822-1911) introduit la théorie du "darwinisme social" qui justifie selon lui l'eugénisme. A la suite de ces travaux et de ceux d'Alfred Ploetz (1860-1940), des recherches "raciologiques" sont entreprises en Allemagne au début du XX^{ème} siècle dans le but de prouver par exemple l'hérédité des différences raciales.

5.2.1.1.4. L'après-Darwin

De 1860 à 1890, d'importants efforts sont accomplis en morphologie pour essayer de trouver des relations entre les individus au sein d'une espèce et entre deux espèces. Ernst Haeckel (1834-1919), darwiniste convaincu et chef de file des morphologues, avance l'hypothèse que l'embryon présente successivement les stades adultes de sa lignée d'ancêtres. Cette proposition est rejetée à la fin du XIX^{ème} siècle par les jeunes biologistes, Wilhelm Roux (né en 1850) et Hans Dreisch (1867-1941) travaillant sur des embryons aux premiers stades de leur développement. Hugo de Vries (1848-1935) montre dans les années 1890 que l'évolution ne se faisait pas par de très petits changements comme le pensait Darwin mais par sauts importants qu'il appela des mutations.

5.2.1.2. La génération spontanée de la vie

Franz Schultze (né en 1815) démonte l'hypothèse de Spallanzani selon laquelle l'air pouvait être à l'origine de la vie. Il fait arriver de l'air à travers de l'acide sulfurique. Pour faire taire les critiques, Theodor Schwann (1810-1882) chauffe l'air entrant dans le flacon. Il faut attendre les travaux de **Louis Pasteur** ⁽³²⁾ (1822-1895) dans les années 1860 et surtout ceux

⁽³¹⁾ L'évêque Wilberforce demande en public en 1860 à Thomas Huxley (1825-1895), ami de Darwin et ardent défenseur de ses idées, si c'est du côté de sa famille paternelle ou maternelle qu'il y a un singe dans la famille. Ce à quoi Huxley répond qu'il préfère être un singe perfectionné qu'un Adam dégénéré.

⁽³²⁾ D'abord cristallographe, Pasteur découvre en 1848 l'hémiédrie et son rapport avec le sens de déviation de la polarisation de la lumière. Il réalise alors que la dissymétrie moléculaire est le propre des organismes vivants. Professeur à Strasbourg, il est appelé en 1854 à Lille pour optimiser le processus industriel de fermentation de la bière. Il explique la fermentation par l'existence de micro-organismes se nourrissant de sucre et libérant de l'alcool.

5.2. Les sciences au XIX^{ème} siècle

de **John Tyndall** (1820-1893) dans les années 1880 pour que la théorie de la génération spontanée soit définitivement abandonnée. Tous d'eux mirent au point de nouvelles méthodes de stérilisation (pasteurisation et tyndallisation). Des progrès importants concernant le monde microscopique sont réalisés à cette époque. En 1860, le chirurgien Ignác Semmelweis (1818-1865) découvre l'importance de l'asepsie pour éviter les infections. La chirurgie est révolutionnée par l'introduction de l'anesthésie et de l'asepsie. En chauffant une culture de choléra, Pasteur découvre fortuitement en 1880 l'atténuation des virus et réalise que la diminution de la virulence permet son inoculation. Il applique cette méthode dans la mise au point d'un vaccin contre le charbon en 1881 et contre la rage en 1882. En 1885, il sauve un jeune alsacien de la rage.



Figure 31 : [Fig 1] Portrait de L. Pasteur.

5.2.1.3. La théorie cellulaire

Robert Hooke avait le premier utilisé le mot cellule en observant le liège. En France vers 1800, l'autopsie permet un examen détaillé des organes notamment par Xavier Bichat (1771-1802) qui identifie 21 types de tissus, fondant ainsi l'histologie dont les objets d'étude sont les éléments constituant les organes. La théorie cellulaire est développée entre 1824 et 1830 par les français Turpin, Brisseau et Mirbel. Mais c'est avec la mise au point du microscope achromatique vers 1830 par Ernst Abbe et Carl Zeiss que sont formalisées à partir de 1838 les idées de la théorie cellulaire avec en particulier Matthias Schleiden (1804-1881) et Theodor Schwann (1810-1882). Par la suite, en 1858, Rudolf Virchow (1821-1902) affirme que les cellules proviennent d'autres cellules et ne sont pas créées par un quelconque processus chimique isolé comme on le pensait alors. Claude

Bernard (1813-1878) étudie la cellule et ses rapports avec les liquides du corps. Des arguments décisifs sont apportés vers la fin du siècle par les embryologistes qui après avoir démolé la théorie de la préformation du fœtus mirent en évidence le rôle joué par le sperme (Oskar Hertwig (1849-1922) et Hermann Fol en 1876) dans le processus de développement de l'œuf. La substance transférée à l'œuf est activement recherchée ce qui conduit à la découverte des chromosomes entre 1875 et 1884 par Eduard Strasburger (1844-1912) chez les plantes et Walter Fleming (1843-1915) chez les animaux. En 1891, Henking découvre le chromosome X.

5.2.1.4. Du magnétisme animal à l'hypnose et la psychothérapie

En 1766, le viennois Franz Anton Mesmer suggère dans sa thèse de doctorat en médecine que l'attraction décrite par Kepler et Newton agit non seulement sur les corps célestes mais aussi sur le corps et l'âme. Selon Mesmer, les êtres vivants véhiculent un "*fluide universel*" susceptible d'être transféré d'un corps à l'autre par le biais d'un aimant en produisant un afflux d'énergie curatif ^[3¹]. Il consulte dans un cabinet où les patients sont reliés entre eux par une barre métallique plongeant dans un mélange d'éclats de verre, de limaille de fer et de soufre. Mesmer parcourt les rangs muni d'une baguette de fer magnétisée. Un de ses disciples inventera l'écriture automatique pour entrer en contact avec le magnétisme animal.

Mesmer provoque des crises de convulsion chez ses patients. Pour les guérir, Armand Marie-Jacques de Chastenet, marquis de Puységur, plonge ses patients dans un état somnambulique avant de les soumettre à des séances de magnétisme. Le somnambulisme devient à la mode. L'abbé Faria (1756-1819) met en évidence le rôle du psychisme et les propriétés analgésiques de l'anesthésie sous sommeil induit. Il rejette toute action du magnétisme. Il est le précurseur de la psychothérapie verbale.

Au XIX^{ème} siècle, l'hypnose est étudiée par des médecins. Un médecin généraliste de la banlieue nancéenne, Ambroise Liébault offre à ses patients le choix entre la médecine officielle payante et l'hypnose gratuite. Il pressent l'infantile et le passé réminiscent comme causes de maladie. Hyppolyte Bernheim, professeur à la faculté des médecine de Nancy se fait son apôtre et reçoit une clientèle internationale dans sa clinique privée. Freud lui rendra visite à Nancy dans sa jeunesse.

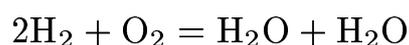
5.2.2. La chimie au XIX^{ème} siècle

Au cours du XIX^{ème} siècle, la chimie connut un développement considérable dans l'élaboration d'une théorie atomique et dans l'apparition de la chimie organique.

5.2. Les sciences au XIX^{ème} siècle

5.2.2.1. La théorie atomique et la classification des éléments

La renaissance de la théorie atomique est l'œuvre de **John Dalton** (1766-1844). Il découvre la loi d'addition des pressions partielles des mélanges gazeux et étudie la dyschromatopsie (ou daltonisme) dont il est affecté mais sa contribution la plus importante à la science est son ouvrage "*New System of Chemical Philosophy*" publié en 1808. Il y postule que tous les éléments chimiques ont leur propre type d'atome qu'il notent par des cercles et que les réactions chimiques ne font que les combiner de manières différentes. Sa théorie s'oppose à celle de Prout (1802) selon laquelle tous les éléments sont des combinaisons de l'hydrogène. **Louis Joseph Gay-Lussac** (1778-1850) montre par électrolyse que l'eau est composé en volume de deux tiers d'hydrogène et d'un tiers d'oxygène. **Amadeo Avogadro** (1776-1856) explique la différence entre le volume de la vapeur correspondant à l'eau électrolysée par Gay-Lussac et les volumes d'hydrogène et d'oxygène obtenus en utilisant le concept de molécules appliquée à la réaction



soit trois molécules d'un côté et deux de l'autre.



Figure 32 : [Fig 1 Fig 2] Portraits de A. Avogadro (à gauche) et L. Gay-Lussac (à droite).

Le suédois **Jöns Jakob Berzélius** (1779-1849) introduit les symboles des éléments actuels et, comme Pierre Dulong (1785-1838) et Alexis Petit (1791-1820), établit une table précise des poids atomiques. Ce personnage très influent développe des méthodes analytiques, comprend les phénomènes d'isomérisation, polymérisation, catalyse (ces termes sont de lui...), et rédige des traités et comptes rendus sur l'état de la chimie annuellement. Il a notamment donné une théorie dualiste de l'affinité qui est la première

théorie moderne de la liaison chimique. Elle est basée sur le classement des substances suivant des critères d'électropositivité et d'électronégativité (en effet, au cours d'une expérience, il constate que les hydrogènes et les métaux vont toujours vers la cathode, et que les groupements acides vont toujours vers l'anode.) L'électrochimie, rendue possible par la pile de Volta après 1800, a été étendue par **Humphry Davy** (1778-1829). Il découvre entre 1807 et 1808 le sodium, le potassium, le strontium, le bore, le calcium et le magnésium. Il découvre le chlore en 1810, l'iode en 1812 et le brome en 1826. Les théories électrochimiques ont été développées par **Jöns Jakob Berzélius**. Il découvre quant à lui le cérium en 1801, le sélénium en 1817, le silicium et le zirconium en 1824, le thorium en 1828. En 1829, il dénombre 54 corps simples. L'analyse spectrale permet de nouvelles découvertes dans les années 1860. Davy montre en 1812 que l'acide muriatique (chlorhydrique) contient du chlore et non de l'oxygène et donc que Lavoisier s'était trompé en associant l'oxygène au principe acide. Ses expériences d'électrolyse lui permettent d'affirmer que les attractions chimiques et électriques ont la même cause. Son assistant, Faraday poursuit ses recherches. Davy, Faraday et Berzelius tentèrent sans succès de substituer aux forces gravitationnelles les forces électriques dans la cohésion des molécules. Berzélius décrit la liaison chimique comme une liaison dipolaire mais Jean-Baptiste Dumas (1800-1884) et son élève Auguste Laurent (1808-1853) montrent en 1834 que cette hypothèse est fautive.



Figure 33 : [Fig 1 Fig 2] Portraits de J. Dalton (à gauche) et D. Mendeleïev (à droite).

En 1869, **Dimitri Ivanovitch Mendeleïev** (1834-1907) classe l'ensemble des éléments (63) en un système périodique suivant l'ordre de progression des poids atomiques et prévoit l'existence de trois nouveaux éléments. Paul Emile Lecoq de Boisbaudran (1838 - 1912) montre spectroscopiquement

5.2. Les sciences au XIX^{ème} siècle

l'existence d'un de ces nouveaux éléments qu'il nomme le gallium. En 1879, on découvre le scandium puis en 1886, le germanium. Ces découvertes apportent une notoriété considérables aux travaux de Mendeleïev. En 1895, William Ramsay (1852-1916) découvre un nouveau gaz : l'hélium, aussi inactif que l'argon et dont le spectre présente une raie qu'on retrouve dans le spectre solaire. En 1898, Ramsay et Travers (1872 - 1961) découvrent les gaz krypton, néon et xénon par distillation fractionnée de l'air liquide, mettant ainsi en évidence l'existence d'une huitième colonne du tableau de Mendeleïev, celle des gaz rares.

5.2.2.2. La recherche de la nature atomique

En 1867, lord Kelvin, adversaire d'une théorie corpusculaire, développe une théorie atomique basée sur l'hypothèse d'un espace rempli d'un fluide incompressible et sans frottements. Des parties de ce fluide sont en mouvement tourbillonnaire et constitue, pensait-il, chacun un atome. Helmholtz avait montré la conservation du nombre de tourbillons dans un tel fluide. Lord Kelvin consacre pendant plus de 20 ans la plus grande partie de son temps à cette théorie de l'atome tourbillonnaire qui rend compte par exemple des écarts connus à la loi des gaz parfaits. Toutefois, à partir de 1887, il émet quelques réserves et il montre en particulier que la vitesse des anneaux tourbillonnaires doit diminuer avec la température. L'ingénieur Osborne Reynolds rappelle que la vitesse du son augmente avec la température.

Johann Joseph Loschmidt étudie la diffusion des gaz et donna en 1865 la première estimation de la densité ρ d'atomes dans un gaz. Il part de la relation $\pi r^2 \lambda \rho = 1$ où $r \simeq 5.10^{-8} \text{ cm}$ est le rayon atomique qu'il estime en supposant les atomes en contact dans un solide, λ le libre parcours moyen obtenu par des mesures de viscosité. Van der Waals donne une nouvelle estimation $\mathcal{N} \simeq 6.0.10^{23} \text{ mol}^{-1}$ en reliant \mathcal{N} au paramètre b de sa loi des gaz réels. En 1910, Jean Perrin étudie un système de minuscules billes de gomme en suspension grâce à la pression osmotique $P = \frac{2}{3}ne$ où n est la densité de particules de soluté et e leur énergie cinétique moyenne qu'il estime par le théorème d'équipartition ($e = \frac{3}{2}RT/\mathcal{N}$). Il obtint la valeur $\mathcal{N} \simeq 7.05.10^{23} \text{ mol}^{-1}$. Les expériences destinées à mesurer la charge de l'électron permettent également d'estimer le nombre d'Avogadro. Ainsi, l'expérience de Thomson en 1898 donne $\mathcal{N} \simeq 8.05.10^{23} \text{ mol}^{-1}$ et celle de Millikan en 1909, $\mathcal{N} \simeq 7.2.10^{23} \text{ mol}^{-1}$. En mesurant la charge de la particule α , Rutherford arrive en 1908 à la valeur $\mathcal{N} \simeq 6.2.10^{23} \text{ mol}^{-1}$.

5.2.2.3. La chimie organique

Au XIX^{ème} siècle, on réalise que les molécules organiques peuvent être synthétisées ex-vivo avec en particulier la synthèse de l'urée ($\text{H}_2\text{N} - \text{CO} -$

NH₂) par Friedrich Wöhler en 1828. La chimie organique se développe avec les nouvelles méthodes d'analyse mises au point par Justus von Liebig (1803-1873). En 1823, Liebig et Wöhler synthétisent respectivement de l'acide fulminique et de l'acide cyanique qui ont même composition (CNOH) mais dont on découvre qu'ils ont des propriétés différentes. Le paradoxe est expliqué par **Jöns Jakob Berzélius** par l'assemblage différents des atomes dans la molécule (**isomérisie**). **Gay-Lussac** découvre en 1815 le radical cyanogène (CN), Wöhler et Liebig en 1832 le radical benzoïle (C₇H₅O), Liebig en 1834 le radical éthyle et Jean-Baptiste Dumas (1800 - 1884) en 1835 le radical méthyle. William Perkin découvre par hasard au cours de ses recherches un colorant synthétique pourpre, couleur dont la rareté du colorant naturel le réservait à l'époque aux plus riches. En se lançant dans sa commercialisation, Perkin inaugure l'ère de la grande industrie chimique. **August Kékulé von Stradonitz** (1829-1896) arrive à la conclusion qu'il était préférable de placer les atomes dans la formule chimique d'un composé suivant la manière dont ils sont réellement disposés. Il introduit le concept de valence en 1857, caractéristique intrinsèque de chaque élément, et met en évidence le cycle benzénique, respectant la tétravalence du carbone.

5.2.3. La physique triomphante

5.2.3.1. L'algébrisation de la mécanique

5.2.3.1.1. La mécanique analytique

En 1788, Lagrange publie "*Mécanique Analytique*" où il réalise l'algébrisation complète de la mécanique. Il parvient à faire une synthèse des quatre principes de la mécanique : conservation des forces vives (Huyghens), conservation du mouvement du centre de gravité (**Newton**), conservation des moments ou loi des aires (Euler) et principe de moindre action. Si la configuration et la position d'un système matériel donné peuvent être définies à un instant donné par un certain nombre fini de paramètres, indépendants une fois qu'on a tenu compte des liaisons, l'équilibre s'exprime par l'équation des travaux virtuels pour toute variation infinitésimale arbitraire de ces paramètres. Il en découle autant d'équations différentielles du second ordre qu'il y a de paramètres :

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

A la même époque, Laplace est à la recherche d'une justification des lois de la mécanique. En utilisant le principe galiléen de relativité (i.e. de l'invariance sous les transformations de Galilée), il retrouve une loi de la

5.2. Les sciences au XIX^{ème} siècle

gravitation en $1/r^2$ (il n'envisage toutefois pas la possibilité d'un temps différent sur des trajectoires différentes). Laplace montre que traiter un masse soumise à une interaction gravitationnelle se propageant à vitesse finie est équivalent au problème d'un corps se déplaçant dans un milieu dont la résistance est proportionnelle à la vitesse de la source gravitationnelle. Il étudie également les conditions de stabilité du système solaire et donne une solution du problème de l'accélération séculaire de la Lune. De 1799 à 1825, il publie "*Mécanique Céleste*", synthèse des connaissances de l'époque. Laplace généralise la mécanique analytique de Lagrange à toute relation entre force et vitesse (et plus seulement proportionnalité de la force et l'accélération).



Figure 34 : [Fig 1 Fig 2 Fig 3] Portraits de Lagrange (à gauche), Laplace (au centre) et Poisson (à droite).

En 1809, Poisson simplifie les équations de Lagrange en introduisant le lagrangien $L = T - V$. Il introduit les crochets de Poisson qui pour des intégrales premières du mouvement sont des invariants. En 1834, Hamilton reformule la mécanique lagrangienne en remplaçant les n équations de Lagrange du second ordre par $2n$ équations premier ordre :

$$\dot{q}_i = -\frac{\partial H}{\partial p_i}, \quad \dot{p}_i = \frac{\partial H}{\partial q_i}$$

où $H = \sum p_i \dot{q}_i - L$ et $p_i = \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i}$. En 1842, Jacobi apporte quelques modifications pour rendre l'ensemble rigoureux et donne une nouvelle formulation du principe de moindre action. "*Au milieu du XIX^{ème} siècle, la mécanique rationnelle semblait assise sur des fondements aussi inébranlables que ceux en lesquels Euclide a affermi la géométrie*" (P. Duhem, 1903).



Figure 35 : [Fig 1] Portrait de Hamilton.

5.2.3.1.2. Le changement de référentiel

En 1832, Coriolis établit les lois de composition de la vitesse et de l'accélération. En 1833, F. Reich mesure une déviation de 28 *mm* d'un projectile lors de sa chute dans un puits de mine 158 *m* de profondeur à Freiberg (Saxe). En 1851, Léon Foucault (1819-1868) présente sa série d'expériences démontrant la rotation terrestre au moyen d'un pendule ⁽³³⁾. En 1852, il invente le gyroscope.

5.2.3.1.3. L'hydrodynamique

Les théories hydrodynamiques d'Euler et de Lagrange étaient limitées à des fluides irrotationnels et excluaient donc par exemple les tourbillons. A partir de 1822 et pendant près de 20 ans, Cauchy élabore un langage commun entre élasticité et mécanique des fluides. Il introduit comme variables de Lagrange la déformation locale en chaque point. En 1852, Lamé parvient à écrire les équations générales de l'élasticité. En 1846, Jean-Léon Poiseuille entreprend des recherches expérimentales sur le frottement interne des liquides et des gaz. En 1883, l'expérience d'Osborne Reynolds montre l'importance des tourbillons, même dans le cas apparemment simple de l'écoulement dans un tuyau rectiligne.

5.2.3.2. L'astronomie au XIX^{ème} siècle

(Bibliographie : 32)

L'astronomie se modifie considérablement au XIX^{ème} siècle : d'une science intéressée par les planètes et leur mouvement au XVIII^{ème} siècle, elle

⁽³³⁾ Le pendule du panthéon pèse 28 *kg* et est suspendu à un fil d'acier de 67 *m*.

5.2. Les sciences au XIX^{ème} siècle

mue en une physique des corps stellaires. Cette modification est due au développement des télescopes et pour partie à l'influence de William Herschel. Les premiers miroirs argentés apparaissent en 1856 sous l'impulsion de Karl von Steinheil en Allemagne et Léon Foucault (1819-1868) en France après que von Liebig ait introduit une méthode d'argenture. Les télescopes bénéficient à la même époque des progrès de la mécanique lourde. En 1838, Friedrich Wilhelm Bessel (1784-1848) mesure la première distance d'une étoile (61 de la constellation du cygne) à la Terre (600.000 fois la distance au soleil). Tout au long du XIX^{ème} siècle, les distances de nombreuses autres étoiles sont mesurées. A partir des années 1850, les astronomes utilisent la photographie. Après la formulation en 1771 de la loi de Johann Titius et Johann Bode et la découverte d'Uranus par Herschel en 1781, on découvre la ceinture d'astéroïdes entre Mars et Jupiter. Dès 1821, les astronomes réalisent que la trajectoire d'Uranus présente des irrégularités. John Couch Adams (1819-1892) calcule de 1842 à 1845 la position de la planète responsable de cette anomalie mais l'astronome royal anglais (1801-1892) ne parvient pas à l'observer. En France, Urbain le Verrier (1811-1877) arrive à la solution en 1846 et cette fois, Johann Galle de l'observatoire de Berlin réussit à observer cette planète qui fut appelée Neptune.

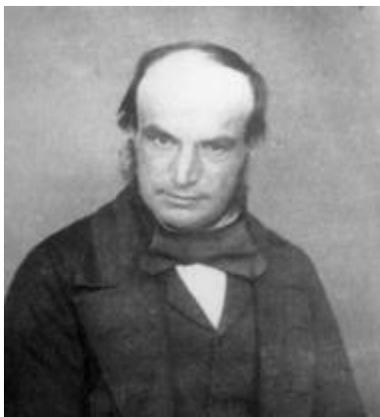


Figure 36 : [Fig 1 Fig 2] Portraits de J. Adams (à gauche) et de U. Le Verrier (à droite).

L'autre grand bond de l'astronomie au XIX^{ème} siècle concerne l'étude des spectres des étoiles. Les premiers travaux sont l'œuvre de l'astronome amateur William Huggins (né en 1824). En 1864, il identifie la nature gazeuse des nébuleuses grâce à la présence de raies brillantes dans leur spectre. En 1842, Christian Doppler (1803-1853) découvre le déplacement des spectres avec la vitesse, effet connu depuis Laplace pour les ondes sonores. Bien que Hippolyte Fizeau (1819-1896) conclut que son observation

était impossible, Huggins met en évidence en 1868 l'effet Doppler-Fizeau de Sirius et estime sa vitesse à 48 km/s (32 km/s en fait).

5.2.3.3. La biréfringence au secours de la théorie ondulatoire

(Bibliographie : 19)

5.2.3.3.1. La biréfringence et l'introduction de la polarisation

Au début du XIX^{ème} siècle, le chimiste William Wollaston (1766-1828) puis le français Haüy, mesurent les angles de réfraction de la calcite et obtiennent à leur grande surprise les valeurs prédites par Huyghens. En réponse à un concours lancé par l'Institut, Etienne Louis Malus (1775-1812) construit en 1808 une théorie mathématique du phénomène. Il reprend les expériences de Huyghens et remarque l'extinction du rayon extraordinaire pour une position particulière du cristal par rapport aux rayons du soleil après réflexion sur une vitre du palais du Luxembourg. Après une rotation de 90°, c'est le rayon ordinaire qui s'éteint. Il en conclut que le rayon réfléchi par une vitre a les mêmes propriétés que les rayons sortant d'un cristal de calcite. Il répète l'expérience la nuit avec une chandelle et une surface d'eau. Newtonien, il estime que la lumière est faite de molécules de forme anisotrope, i.e. possédant des pôles. Ayant montré que la vitesse du rayon extraordinaire est moins grande que celle du rayon ordinaire, il suppose l'existence de forces répulsives à l'entrée du cristal qui orientent les pôles des molécules. Il parle de **polarisation**. D'autres phénomènes de polarisation plus complexes sont découverts par Arago en 1811 et Biot en 1815. Le crédit de la théorie newtonienne s'amenuise.

5.2.3.3.2. Les phénomènes d'interférence

Thomas Young (1773-1829) est d'abord médecin, puis brièvement (de 1801 à 1803) professeur de philosophie naturelle à Londres avant que ses cours trop confus ne provoquent son renvoi. A partir de 1793, il s'intéresse à l'optique physiologique et critique la théorie corpusculaire de la lumière de **Newton** (*pourquoi certains corpuscules seraient réfléchis et d'autres réfractés ?*). Il étudie les implications d'une ondulation de l'éther et imagine le phénomène d'interférences des ondes lumineuses. Il utilise ce concept pour expliquer les anneaux de Newton. Il s'intéresse à la diffraction et montre qu'un masquant un côté de l'objet, on fait disparaître le système de franges, contrairement à ce que prévoit la théorie newtonienne. De nouveau, il donne une explication en terme d'interférences. Il met au point un système interférentiel composé de deux fentes. A partir de la distance entre les franges rectilignes obtenues, il déduit la longueur d'onde de diverses sources. Il publie ses travaux en 1804, ce qui soulève une tempête de réactions négatives en Angleterre.



Figure 37 : [Fig 1 Fig 2] Portraits de T. Young (à gauche) et A. Fresnel (à droite).

5.2.3.3.3. La synthèse de Fresnel et la fin de la théorie corpusculaire

Sans avoir lu Newton, Grimaldi ou Young, Augustin Fresnel (1788-1827), ingénieur des Ponts et Chaussées, présente un mémoire sur la diffraction qui va attirer l'attention d'Arago. Dans un second mémoire, il fait la synthèse des objections à la théorie corpusculaire après avoir répété avec soin les expériences et reformulé les démonstrations en utilisant l'analyse au lieu de la géométrie. En 1819, il étend le principe de Huyghens en expliquant que l'onde est formée de l'interférence de toutes les ondes secondaires émises par chacun des points diffractants. Seuls les phénomènes de polarisation échappent à la théorie de Fresnel. Fresnel et Arago montrent que des rayons polarisés différemment n'interfèrent pas. Ils aboutissent à une formulation mathématique rendant compte de la polarisation mais hésitent à l'interpréter en termes d'ondes transversales car de telles ondes ne sont pas prédites par la mécanique des fluides. Fresnel tente de montrer que des ondes transversales existent dans les fluides en adoptant un modèle discontinu ce qui lui vaut d'essuyer des critiques. Il note que la théorie exige que l'éther soit immobile et donc que le mouvement des astres n'induisse qu'un courant d'éther négligeable. En 1849, Foucault et Fizeau montrent indépendamment et en utilisant un interféromètre que la vitesse de la lumière diminue avec l'indice de réfraction. Ces expériences sonnent le glas de la théorie corpusculaire de Newton.

5.2.3.3.4. La spectroscopie

Le chimiste William Wollaston (1766-1828) observe en 1802 que la lumière solaire décomposée à l'aide d'un prisme présente un spectre avec

des raies noires. En 1814, Joseph von Fraunhofer (1787-1826), fabricant d'instruments d'optique munichoïse, étudie les 576 raies solaires, mesurant les longueurs d'onde correspondantes avec un spectroscopie de son invention. John Herschel (1738-1822) et William Henry Fox Talbot (1800-1877) montrent que certaines substances chauffées émettent un spectre formé d'un certain nombre de raies lumineuses caractéristiques. Talbot mesure l'intérêt de cette découverte pour l'identification des éléments chimiques d'un composé. En 1833, William Allen Miller fait une analyse plus fine des spectres et observe que la lumière traversant un gaz possède un spectre avec des raies noires. Balfour Stewart et Gustav Kirchoff (1824-1887) observent indépendamment en 1858 que ces raies noires se trouvent aux endroits des raies brillantes apparaissant lorsqu'on chauffe le gaz. A partir de 1859, Gustav Kirchoff et le chimiste Robert Bunsen (1811-1897) conçoivent à Heidelberg un système d'analyse chimique fondé sur les raies spectrales. Ils identifient la raie jaune du sodium dans le spectre solaire. En 1860, Bunsen découvre le césium par l'analyse de son spectre, puis en 1861 le rubidium. En 1861, William Crookes (1832-1919) isole de la même manière le thallium.



Figure 38 : [Fig 1] Portrait de G. Kirchoff.

5.2.3.4. La thermodynamique

Au XVIII^{ème} siècle, la propagation de la chaleur est associée à l'écoulement d'un fluide : le **calorique**. Au tournant du siècle, Benjamin Thomson, comte de Rumford, (1753-1814) observant les copeaux de métal détachés lors du forage d'un canon, constate qu'ils sont portés à hautes températures. Il en conclut que la chaleur n'est pas une quantité conservée mais peut être produite par frottement. Il réalise une expérience dans laquelle il transforme l'énergie mécanique fournie par des chevaux en chaleur mise

5.2. Les sciences au XIX^{ème} siècle

en évidence par la fonte de glaçons. La source de chaleur semblait intarissable ce qui était contradictoire avec la théorie du fluide impondérable. **Sadi Carnot** (1796-1832) analyse des machines thermiques en isolant source de chaleur, fluide actif et récepteur de chaleur et avance l'idée en 1824 que la chaleur (*le calorique*) ne peut ni être créé ni détruit et que son transfert se fait toujours des corps les chauds vers les plus froids. L'énergie mécanique produite par les machines provient selon lui de la baisse de température du calorique.



Figure 39 : [Fig 1 Fig 2 Fig 3] Portraits de S. Carnot (à gauche), J. Joule (au centre) et R. Clausius (à droite).

James Prescott Joule (1818-1889) étudie le travail accompli par un gaz en expansion et la chaleur produite lorsqu'il est comprimé. En 1847, il réalise la célèbre expérience où de l'énergie mécanique, obtenue par la chute d'une masse, est transformée en chaleur avec une roue à palettes plongée dans l'eau. **Rudolf Clausius** (1822-1888) publie en 1850 un article sur la théorie de la chaleur où il explique que contrairement à Carnot, il pense que le calorique peut être converti par exemple en énergie mécanique. Il formule les deux premières lois de la thermodynamique en identifiant le calorique de Carnot au concept de chaleur de Joule et en établissant qu' "il n'existe pas de transformation permettant de faire passer de la chaleur d'un corps froid à un corps chaud". En 1865, Clausius introduit le concept d'entropie. **William Thomson**, lord Kelvin, (1824-1907) introduit une échelle absolue de température. Il reprend les travaux de Carnot et entreprend de rechercher l'échelle pour laquelle l'unité de chaleur et de travail sont identiques. Il y parvient grâce aux travaux de Clausius. Clausius et Kelvin mettent en évidence le fait que la chaleur n'est pas un fluide impondérable mais une forme d'énergie. La première loi de Clausius était par conséquent équivalente au principe de conservation de l'énergie posée en

1847 par **Hermann von Helmholtz** (1821-1894).

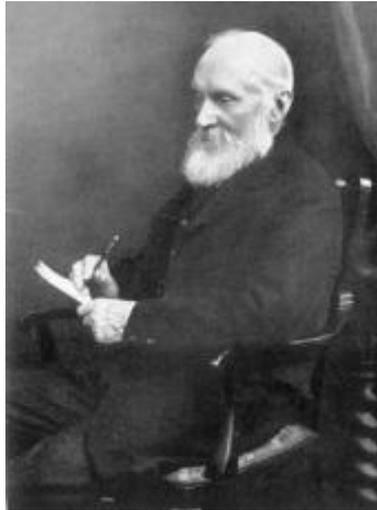


Figure 40 : [Fig 1] Portrait de Lord Kelvin.

5.2.3.5. L'unification de l'électricité et du magnétisme

5.2.3.5.1. La naissance de l'électrocinétique



Figure 41 : [Fig 1] Portrait de G. Ohm.

Au XVIII^{ème} siècle, les physiciens identifient les phénomènes d'électricité statique et parviennent à en rendre compte grâce à une théorie mécanique : l'électricité est constituée par deux fluides, l'un positif, l'autre négatif qui peuvent se séparer par frottement puis tendent à se mêler en s'écoulant l'un vers l'autre. Deux fluides identiques se repoussent alors que ceux de signes

5.2. Les sciences au XIX^{ème} siècle

contraires s'attirent. En 1821, Davy découvre que les propriétés électriques dépendent du diamètre du fil utilisé (on utilisait alors du métal plutôt que la soie comme au XVIII^{ème} siècle). **Georg Ohm** (1789-1854) réalise des expériences avec des fils de longueurs différentes et une balance à torsion de Coulomb et formule en 1826 et 1827 une théorie dans laquelle il introduit le concept de tension électrique responsable du mouvement du fluide qui est reliée à l'intensité par la loi $U = R.I$ où la résistance R ne dépend que du matériau.

5.2.3.5.2. Le phénomène d'induction

La théorie du magnétisme suppose également l'existence de deux fluides qui se repoussent pour des signes identiques et s'attirent pour des signes contraires. Toutefois, en brisant un aimant en deux, on obtient deux aimants donc il faut supposer que le fer, par exemple, est formé de molécules portant les fluides magnétiques à ses extrémités. En 1814, **Hans Christian Oersted** (1777-1851) observe que le courant électrique produit par une pile dévie l'aiguille d'une boussole. Cette dernière tend à s'aligner perpendiculairement au fil. Oersted imagine que les fluides électrique et magnétique s'écoulent autour du fil et l'aiguille et que de leur rencontre naît une force. En 1820, **André Marie Ampère** (1775-1836) reprend les expériences d'Oersted et observe que deux fils parcourus par des courants de même sens s'attirent avec une force en $1/r^2$. Quelques jours plus tard, Arago constate qu'un fil parcouru par un courant attire la limaille de fer.



Figure 42 : [Fig 1 Fig 2] Portraits de H. Oersted (à gauche) et A. Ampère (à droite).

Michæl Faraday (1791-1847) observe les lignes de force en saupoudrant une surface de limaille de fer. Il définit le champ magnétique. Il met en évidence l'effet du champ magnétique sur le courant électrique prédit par

Ampère grâce à deux circuits incluant une bobine enroulée autour d'un anneau de fer. Il remarque qu'un courant apparaît dans l'un des circuits lorsqu'il branche et débranche la batterie dans l'autre. Il met également en évidence l'apparition d'un courant dans une bobine lorsqu'on approche un aimant. Il énonce la loi de l'induction : chaque variation du champ magnétique crée un courant électrique. Enfin, il découvre l'auto-induction. En 1837, Faraday propose une théorie de l'électricité construite sur le concept de lignes de forces emplissant l'espace et dont la distribution est modifiée par les courants électriques. Trop éloignée de la gravitation newtonienne, cette théorie est vivement critiquée.



Figure 43 : [Fig 1 Fig 2] Portraits de M. Faraday (à gauche) et J. Maxwell (à droite).

5.2.3.5.3. La théorie électromagnétique de Maxwell

En 1842, Kelvin note l'équivalence formelle entre la répartition de charge dans un corps sous l'effet d'une machine électrostatique et celle de la chaleur dans un corps chauffé. En 1846, il avance l'idée que les phénomènes électriques peuvent s'expliquer par l'étude de l'éther dont le comportement serait analogue à celui d'un solide élastique. **James Clerk Maxwell** (1831-1879) commence en 1855 son analyse en se basant sur les travaux de Kelvin. Il construit une théorie générale en procédant par analogie. Il suppose que l'espace est rempli de tourbillons, représentant le champ magnétique, qui sont séparés par une couche de particules assurant la transmission du mouvement d'un tourbillon à ses voisins et rendant compte des courants électriques. Il met en évidence que toute perturbation locale d'un tourbillon ou d'une particule entraîne un train d'onde qui se propage. Il parvient aux équations dites de Maxwell et calcule la vitesse de l'onde électromagnétique : 300.000 km/s , i.e. la vitesse que vient de

5.2. Les sciences au XIX^{ème} siècle

mesurer Fizeau pour la lumière. Il montre que l'onde est transversale et que sa propagation se fait perpendiculairement au plan des tourbillons. En 1864, il identifie onde électromagnétique et lumière. Entre 1864 et 1873, les publications de Maxwell sont purement mathématiques et ne font plus référence au modèle des tourbillons. Il est le fondateur en 1871 du laboratoire Cavendish à Cambridge et publie la même année "*Treatise on Electricity and Magnetism*". Aucune de ses conclusions ne fut admise de son vivant et aucune vérification expérimentale entreprise. La théorie obtient son premier succès lorsqu'en 1885, Heinrich Hertz (1857-1894) découvre des ondes produites par une source électromagnétique. On mesure leur vitesse et on constate que le résultat est conforme à la théorie de Maxwell. En 1895, Röntgen découvre les rayons X.

5.2.4. Mathématiques au XIX^{ème} siècle

5.2.4.1. Le développement de l'analyse

Au XIX^{ème} siècle, le développement des mathématiques s'accélère, marqué par une plus grande rigueur et une formulation de plus en plus abstraite. Pour les mathématiciens français, les mathématiques s'inscrivent toujours dans un contexte de philosophie naturelle. En revanche, les mathématiques pures sont devenues une science abstraite en Allemagne. **Carl Friedrich Gauss** (1777-1855) est la figure marquante de ce siècle. Il s'intéresse à tous les champs des mathématiques et démontre lors de sa thèse en 1799 l'existence d'au moins une solution complexe pour toute équation de degré n à coefficients réels. Vers 1825, le norvégien Niels Henrik Abel (1802-1829) prouve qu'il est impossible de résoudre par radicaux les équations générales de degré supérieur ou égal à 5. Évariste Galois [33] (1811-1832) étudie les équations algébriques, travaux qui annoncent la théorie des groupes et classent les corps finis. Richard Dedekind (1831-1916) invente les idéaux et l'algèbre linéaire se développe sous l'impulsion de Arthur Cayley (1821-1895) et Leopold Kronecker (1823-1891).

L'analyse complexe et les séries de Fourier occupent une place importante tant du point de vue théorique que pratique. **Augustin Louis Cauchy** (1789-1857) fournit un cadre rigoureux à l'analyse en mettant notamment la notion de limite à la base du calcul infinitésimal et en donnant des définitions précises de la continuité d'une fonction et de son intégrale. On lui doit également des théorèmes d'existence et d'unicité de la solution d'une équation différentielle. Karl Weierstrass (1815-1897) pose les définitions actuelles de la continuité ("à la ϵ ") et construit de manière rigoureuse l'ensemble des réels vers 1870. Georg Cantor (1845-1918) crée vers 1880 la théorie des ensembles, distinguant en particulier les infinis

dénombrables et indénombrables. La théorie des fonctions est reformulée dans le cadre de la théorie ensembliste. Les paradoxes de la théorie des ensembles (paradoxes de Bertrand Russel ⁽³⁴⁾ ou Jules Richard ⁽³⁵⁾) suscitent dans les années 1890 la naissance de la logique mathématique. Bertrand Russel montre que les paradoxes sont causés par le mélange des niveaux de langage. En 1931, Kurt Gödel montre qu'il n'existe pas de groupe d'axiomes à partir duquel peuvent être démontrées toutes les propositions vraies (**théorème d'incomplétude**). La formulation ensembliste de la théorie des fonctions ne permet pas de justifier le calcul infinitésimal. Le problème ne sera résolu que dans les années 1960 par Abraham Robinson. Ce dernier introduit l'analyse non-standard qui repose sur le fait que les axiomes des mathématiques ne sont pas catégoriques et permettent plusieurs définitions de l'ensemble des entiers naturels. Il introduit donc un ensemble plus gros comprenant un élément plus grand que tous les entiers standards, humainement accessible, de sorte que les sommes infinies par exemple se réduisent à des sommes finies.



Figure 44 : [Fig 1 Fig 2] Portraits de C. Gauss (à gauche) et A. Cauchy (à droite).

5.2.4.2. La géométrie non-euclidienne

La géométrie projective (étude des invariances lors d'une projection) se développe avec Jean-Victor Poncelet (1788-1867). L'assertion des droites parallèles d'Euclide n'avait jamais reçu aucune démonstration. La tentative de Girolamo Saccheri au XVIII^{ème} siècle échoue mais il approche la

⁽³⁴⁾ L'ensemble des ensembles qui ne se contiennent pas ne peut pas être construit.

⁽³⁵⁾ "Le plus petit nombre entier ne pouvant être écrit en moins de quinze mots" définit ce nombre en quatorze mots !

géométrie non-euclidienne. Gauss reprend le sujet et conclut à l'existence possible d'une géométrie non-euclidienne. Nicolaï Lobatchevski (1792-1856) avance l'idée qu'on est libre de postuler qu'il existe une infinité de droites passant par un point et parallèle à une autre droite. Bernhard Riemann ^[30] (1826-1866) part en 1866 du postulat qu'il n'existe aucune droite passant par un point et parallèle à une autre droite.



Figure 45 : [Fig 1] Portrait de B. Riemann.

Les mathématiques s'ouvrent à un champ nouveau : les statistiques, développées par le belge Adolphe Quételet (1796-1874) qui étudiait la physique sociale et à qui on doit la courbe normale (ou gaussienne) et par Denis Poisson (1781-1840). Francis Galton (1822-1911) applique les statistiques à la génétique et introduit le concept de corrélation et de régression.

6. LE XX^{ème} SIÈCLE

6.1. L'évolution de la philosophie des sciences

(Bibliographie : 14, 17)

6.1.1. Le triomphe de la science du début du siècle

A la fin du XIX^{ème} siècle, la physique semble proche de son aboutissement. La mécanique classique et la théorie électromagnétique de Maxwell permettent d'expliquer la plupart des faits expérimentaux et ces théories ont permis la révolution industrielle. En 1871, lors de son discours inaugural à Cambridge, Maxwell a résumé l'opinion de la plupart des physiciens : *...in a few years, all the physical constants will have been approximately estimated and [...] the only occupation which then be left to the men of science will be to carry these measurements to another place of decimal.* La propagation du dogme scientifique, au détriment de la religion ⁽³⁶⁾, est encouragée par le mouvement républicain. La vulgarisation scientifique débute aux États-Unis avant de s'étendre à l'Europe. Le public montre un enthousiasme inattendu. La théorie de la relativité est très largement médiatisée.

6.1.2. La philosophie positiviste

6.1.2.1. La théorie positiviste de Comte

Auguste Comte (1796-1857) propose une classification des sciences partant des phénomènes les plus simples qui se trouvent être étrangers à

⁽³⁶⁾ *Dieu est mort* a écrit Nietzsche, qui critique les valeurs du christianisme qui, à ses yeux, enferment l'humanité dans de fausses valeurs morales et limitent sa puissance de connaissance en lui donnant des réponses illusives et apaisantes à ses ignorances. L'idéal ascétique prôné par l'Église est selon lui contre nature : la sexualité y est répudiée, l'innocence niée, le doute interdit, la science et la philosophie bannies.

6.1. L'évolution de la philosophie des sciences

l'homme et allant jusqu'à la science positive que doit devenir la sociologie. Les méthodes d'observation et d'expérimentation scientifiques représentent selon lui le modèle de rationalisme qui doit guider le développement des sciences sociales alors émergentes (**positivisme**), en particulier la sociologie (projet entrepris par E. Durkheim). Selon Auguste Comte, l'humanité est passée d'abord par l'état théologique dans lequel les causes étaient personnalisées sous la forme de dieux, de génies ou d'esprits puis à son apogée par un seul dieu, puis par l'âge métaphysique qui cherchait encore à expliquer les choses mais qui croyait pouvoir le faire en invoquant des entités très générales telles que la Nature et souvent indéfinissables. Elle serait à l'époque parvenue à l'âge positiviste, lequel reconnaît la vanité de la question "*pourquoi ?*" et se limite donc à la pure et simple description des faits. A noter que le positivisme freina longtemps l'emploi de la notion d'atome (à l'image de Mach). Pour Comte, La science doit permettre l'évolution de l'humanité vers une civilisation supérieure ⁽³⁷⁾ . Cette idée est reprise par le courant **moderniste**. Certains comme Poincaré restent néanmoins **pragmatiques** : un objet n'a d'existence que parce que quelqu'un en formule une représentation et pas en tant que tel. La physique ne s'intéresse pas à l'existence des objets mais aux relations entre eux, ce qui fait des mathématiques le langage le plus adapté.

6.1.2.2. Réalisme physique et instrumentalisme

L'introduction de la relativité restreinte marque le passage du **réalisme physique** de la mécanique classique qui utilise les notions intuitives de masse, force, ... au **réalisme mathématique** qui utilise des grandeurs définies opératoirement. La mécanique quantique ébranle l'idée d'une théorie scientifique universelle. Elle remet en cause l'hypothèse de localité ⁽³⁸⁾ . L'idée d'**instrumentalisme** se répand parmi les physiciens. Les théories physiques ne sont que des instruments permettant à partir de faits observés de prédire les résultats d'observation. Comme l'a noté Heisenberg, l'instrumentalisme n'est pas strict : la mécanique statistique par exemple repose sur une définition de l'entropie qui n'est pas issue de l'expérience.

Ce nouveau point de vue de la physique, appuyée par les nouvelles théories de ce début de XX^{ème} siècle, est à rapprocher du mouvement vers une physique pure observé dans les années 1918-1919 et causé par l'utilisation massive de nouvelles technologies de destruction, fruits du

⁽³⁷⁾ Marx et Hitler représentent la dérive la plus extrême de cette pensée.

⁽³⁸⁾ On peut toutefois montrer que les influences instantanées de la mécanique quantique ne permettent pas de transmettre un signal utilisable, conformément à la théorie de la relativité

progrès scientifique, lors de la première guerre mondiale (gaz moutarde, explosifs, aviation, ...).

6.1.2.3. Le positivisme logique du cercle de Vienne

Le positivisme logique du **cercle de Vienne**, dont les bases sont posées par la publication en 1929 d'un manifeste par Schick, Hahn et Carnap, est construit sur l'affirmation que la seule vraie connaissance est scientifique et l'expérience sensible sa seule source. Influencés par la logique développée à la fin du XIX^{ème} siècle par Bertrand Russel, Alfred Whitehead, Gttlob Frege et Ludwig Wittgenstein, ils affirment que toute connaissance doit être exprimable en totalité au moyen de signes logiques définis précisément. Les positivistes logiques rejettent donc la théorie de la connaissance d'**Emmanuel Kant** qui pense que les lois générales de la raison humaine sont issues de la constitution de notre esprit, la découverte des géométries non-euclidiennes discréditant selon eux l'esthétique transcendantale. Le cercle de Vienne reprend de Wittgenstein le postulat que le sens d'une proposition, c'est sa méthode de vérification. Le positivisme logique requiert donc le recours à l'**induction** pour établir la vérité des théories par exemple en utilisant la définition de Bertrand Russel : plus grand est le nombre de cas n où A a été associé à B , plus grande est la probabilité ($1/\sqrt{n}$) qu'elle soit toujours associé à B pour tendre vers la certitude lorsque n tend vers l'infini. Comme Mach l'avait montré à propos de la masse, les positivistes logiques affirment que certaines questions ("*Qu'est-ce qu'une chose ?*") sont purement métaphysiques et doivent être éliminées. Après l'exil de nombreux philosophes allemands aux États-Unis dans les années 1930, le positivisme logique s'est développé dans les grandes universités américaines.

6.1.2.4. La théorie faillibiliste de Popper

Méditant sur la relativité générale acceptée avant d'être testée expérimentalement, **Karl Popper** développe en 1934 une théorie de la connaissance s'opposant à toute forme d'empirisme. Selon lui, la démarche scientifique n'est pas inductive mais hypothético-déductive. Les **faillibilistes** posent en principe qu'on ne saurait utiliser l'induction sans la justifier (problème déjà posé par Hume puis Kant). Pour les faillibilistes, l'expérience ne peut pas servir à prouver une théorie mais seulement à la réfuter. Une théorie scientifique donne généralement une infinité de prédictions dont on ne peut tester expérimentalement qu'un sous-ensemble fini. Par conséquent, on ne peut pas prouver qu'elle soit vraie. En revanche, si une seule de ses prédictions n'est pas vérifiée, la théorie est fausse. Selon Karl Popper, une science doit être potentiellement réfutable

6.1. L'évolution de la philosophie des sciences

et se démarque par là des doctrines affligées d'invulnérabilité qui sont renvoyées à la métaphysique. En 1944, Karl Popper, reprenant Bertrand Russell, critique le totalitarisme comme retombée de la doctrine platonicienne du philosophe-roi. Il dénonce également le marxisme et la psychanalyse pour leur dogmatisme qui ne leur confère pas selon lui le statut de science (absence de réfutation possible).

6.1.3. Le post-modernisme

Le modernisme décline dans la seconde moitié du XX^{ème} siècle après la prise de conscience collective de la responsabilité des idées rationalistes dans la seconde guerre mondiale et de la puissance de la technologie qui permet dès lors la destruction de l'humanité entière. Les critiques à l'encontre du modernisme connaissent un écho important dans les années 1960. Le modernisme laisse place au **post-modernisme**, né du constat que le progrès de l'humanité ne peut être garanti par une croissance continue et linéaire de la technologie moderne. A contre-pied de la doctrine moderniste qui a favorisé l'émergence de régimes totalitaires, le courant post-moderniste est dépourvu de projet humaniste et prône le libéralisme. Michel Foucault (1926-1984), l'un de ses chefs de file, se fait l'écho de la désillusion vis-à-vis du formidable espoir de progrès par la science, cet enthousiasme issu des Lumières et dont il conteste le rôle dominant dans l'histoire sociale moderne. Le post-modernisme est un courant **relativiste** : les affirmations de fait, mythes traditionnels ou théories scientifiques, ne peuvent être considérées comme vraies ou fausses que par rapport à une certaine culture (ou par rapport à un des paradigmes scientifiques dont parle Kuhn).

6.1.3.1. La révision du faillibilisme de Lakatos

Imre Lakatos (1922-1974), philosophe hongrois émigré aux États-Unis en 1956 étend le falsificationnisme naïf de Popper. Selon lui, la science s'organise en programmes de recherche composés d'un noyau dur inattaquable (tel que les trois lois du mouvement et de l'attraction gravitationnelle de Newton), d'une ceinture de protection (optique newtonienne) et d'un ensemble de techniques admissibles (calcul différentiel introduit par Newton). Ces programmes sont soumis à une sorte de sélection naturelle dans laquelle entrent les facteurs technologiques, sociaux et économiques.

6.1.3.2. La théorie des révolutions de Kuhn

Nombreux sont les philosophes d'après-guerre, dont on peut citer Norwood Hanson (1924-1967) ou Thomas Kuhn par exemple qui pense que l'observation pure n'existe pas mais se fait toujours dans le cadre d'une théorie. Kuhn qualifie de normale l'activité des scientifiques en dehors des

périodes de crise. Hors de ces périodes, les scientifiques se bornent à mettre en oeuvre dans tel ou tel cas particulier les théories existantes qu'il regroupe sous le terme de paradigme. Lors des périodes de crise, l'attachement des scientifiques au paradigme s'accompagne d'entorses à la rigueur. La crise cesse lors de la mise en place d'un nouveau paradigme.

6.1.3.3. La réfutation de la méthode de Feyerabend

En 1975, l'ancien poppérien viennois Paul Feyerabend (1924-1994) publie "*Contre la méthode*" dans lequel il affirme que la science se moque de toute méthodologie et que la transgression des règles est une condition *sine qua non* du progrès. Se réclamant de l'anarchie épistémologique, il pense qu'en science, n'importe quoi fait l'affaire. La seule fin semble être le confort intellectuel et le pouvoir des autorités académiques en place. La méthode, c'est le pouvoir des experts et donc la fin de la liberté.

6.1.3.4. L'"affaire" Sokal et la crise de la science de la fin du siècle

Certains post-modernistes ont parfois eut tendance à étayer abusivement leur propos des conclusions de la science moderne, de la mécanique quantique notamment. Les abus de cette approche ont été dénoncés en 1996 par A.D. Sokal qui a fait publié dans une revue de sociologie forte américaine un article dont les références détournées à la physique mettent en lumière selon lui l'absence de légitimité de la réappropriation des concepts scientifiques, en particulier de ceux de la physique, par les sciences humaines [25]. L'emprunt est généralement fait dans le but de récupérer tout ou partie de son autorité scientifique. Face aux réactions de colère des sociologues, un certain nombre de physiciens américains prendront la défense de Sokal en montrant leur foi aveugle dans leur discipline. Le prix Nobel S. Weinberg écrit "*les lois de la physique sont réelles à peu près au même sens que les cailloux dans un champ, et pas du tout au sens où les lois du base-ball le seraient.*" (39) .

Selon les sociologues, la classification des sciences comme une catégorie sociale parmi d'autres (la science est sociale de part en part selon B. Latour)

(39) Ils semblent néanmoins oublier que bien que les théories reproduisent de plus en plus fidèlement la trajectoire d'un électron dans un champ magnétique par exemple, elles n'auront jamais que le statut de modèles car la nature de l'électron et du champ magnétique est inaccessible à l'expérience. Comme l'avait déjà expliqué Poincaré, seule les relations entre objets sont sondables. Les modèles de la nature ne sont pas contraint par l'expérience et donc des facteurs sociaux peuvent contribuer à les sélectionner. On aurait pu construire une théorie de la relativité générale sans le recours aux espaces non-euclidiens.

6.2. Les sciences au XX^{ème} siècle

est vécue comme une provocation par certains scientifiques. Cette réaction du milieu scientifique n'est certainement pas étranger au fait que la science fondamentale est en crise depuis la dernière décennie du XX^{ème} siècle. Le compromis social rêvé par les scientifiques dès la fin du XIX^{ème} siècle : un État keynesien finançant une recherche désintéressée mais qui promet à la société des retombées technico-économiques, est à l'oeuvre lors de la guerre froide (CERN, CEA, CNRS, recrutements massifs dans les années 1970) mais est remis en cause après la chute du bloc soviétique et le triomphe du libéralisme. Les effectifs des étudiants dans les universités scientifiques s'effondrent à la fin des années 1990 et le financement publique s'orientent vers des projets dont les répercussions économiques sont clairement identifiées. La réponse des scientifiques est inappropriée parce qu'apolitique et focalisée sur la montée de l'irrationalisme.

6.2. Les sciences au XX^{ème} siècle

(Bibliographie : 24, 26)

6.2.1. La révolution de la biologie au XX^{ème} siècle

6.2.1.1. La physiologie

Au début du XX^{ème} siècle se développe une vision mécaniste des phénomènes de la vie qui n'est pas sans rappeler celle de Descartes. Le chef de file de ce mouvement est Jacques Loeb (1859-1924), un adepte de la philosophie positiviste. Se basant en particulier sur les mouvement des insectes vers une source lumineuse, il pense que les êtres vivants sont des machines programmées pour réagir à des excitations élémentaires [7]. Ses idées, présentées en 1908, sont largement adoptées dans les années 1920. Cette conception se heurte à celle des holistes qui tentent de relier comportement et organisation de l'organisme et pour qui les êtres vivants sont non pas de simples assemblages de molécules comme le pensait von Helmholtz mais plutôt à la manière de Claude Bernard des systèmes d'un haut degré de comportement auto-organisé. Les deux écoles s'intéressent au système nerveux (neurobiologie) avec en particulier le réductionniste Ivan Pavlov (1849-1936) qui met en évidence l'apprentissage par consolidation des réflexes (réflexe conditionné en associant un stimulation nouvelle à une réaction existante) et le holiste Charles Sherrington (1857-1952) qui étudie les neurones et leur interaction. John Watson (1878-1958) étudie le comportement de rats dans des labyrinthes et construit la théorie **behavioriste**. Il pense que l'homme et les animaux n'héritent à la naissance d'aucun programme comportemental et doivent tout apprendre. Son élève Burrhus Skinner (1904-1990) parvient à renforcer les processus d'apprentissage par

une récompense ou une punition. Skinner prétend qu'il suffit de lui confier un enfant pour qu'il en fasse à souhait un génie ou un idiot. John Garcia montre en 1966 que l'apprentissage est plus efficace s'il existe un lien naturel entre le stimulus et la réponse attendue ^[7]. Konrad Lorentz s'oppose aux behaviouristes. En 1941-43, il pose les bases d'une théorie évolutionniste de la connaissance d'inspiration kantienne : l'*a-priori* qui harmonise la pensée et le monde (espace, temps, ...) est le produit d'une sélection naturelle.

6.2.1.2. La génétique

Les travaux de Gregor Mendel (1822-1884) qui dans les années 1850-1860 effectua une série d'expériences sur l'hérédité des plantes et en particulier du pois, distinguant des caractères héréditaires récessifs et dominants, sont redécouverts dans les années 1900 par Hugo de Vries, K. Correns et E. von Tschermak. En 1902, Walter Sutton montre que les facteurs de Mendel pourraient être les chromosomes. En 1911, Thomas Hunt Morgan (1866-1945) adopte au terme d'expériences sur la drosophile la théorie de Mendel et avance l'idée que les facteurs mendéliens sont disposés en ligne sous forme de filaments le long des chromosomes et qu'il appelle gène.

6.2.1.3. La biochimie

Frederick Gowland Hopkins (1861-1947) découvre que les acides aminés, essentiels pour l'organisme ne peuvent y être synthétisés et doivent être apportés par l'alimentation (vitamines). La dégradation des graisses lors de la respiration mitochondriale est un des thèmes de recherche importants de la première moitié du siècle. De 1890 à 1925, on explore la nature et le rôle des enzymes avec en particulier von Liebig et Wöhler puis jusqu'en 1960, les chercheurs s'intéressent plus particulièrement à leur structure. En 1925, Theodor met au point l'ultracentrifugeuse qui permet de mesurer les poids moléculaires des protéines révolutionnant ainsi la discipline. En 1940, on utilise la chromatographie découverte en 1906 par Mickael Tswett. Au milieu des années 1940, on vérifie la théorie de Linus Pauling (1901-1994) et Robert Corey (né en 1928) proposée dans les années 1930 d'après laquelle les protéines sont enroulées sur elles-mêmes en forme d'hélice.

6.2.1.4. La biologie moléculaire

Après la seconde guerre mondiale, la recherche fondamentale reprend d'abord dans les pays victorieux (USA, Royaume-Uni, France). En URSS, Trofim Lyssenko (1898-1976) rejette globalement la génétique de Mendel. Sa conception lamarckienne devient la théorie officielle de 1944 à 1955 car elle cadre avec l'idée marxiste d'un environnement, et non de l'hérédité, déterminant. En occident, l'analyse aux rayons X, méthode inventée par

6.2. Les sciences au XX^{ème} siècle

William Bragg (1862-1942) en 1912, se généralise dans les années 1960 sous l'impulsion de Max Perutz (né en 1914) qui détermine la structure tridimensionnelle de l'hémoglobine, et de John Kendrew. Comme l'avait imaginé Garrod en 1909, il apparaît à la fin des années 1950 que les gènes influent sur le métabolisme cellulaire. V.M. Ingram montre entre 1949 et 1957 que les gènes déterminent l'arrangement en séquence des acides aminés dans les protéines. Dans les années 1940, il est mis en évidence que l'injection d'ADN (acide désoxyribonucléique) à une bactérie peut en changer le type génétique. En 1952, Alfred Hershey et Martha Chase utilisent des traceurs radioactifs pour suivre la réplication de l'ADN. James Watson (né en 1928) et Francis Crick (né en 1916) découvrent la structure en double hélice enroulées l'une autour de l'autre de l'ADN. Les mécanismes d'expression des gènes sont déterminés par Jacob, Perrin, Sanchez, Monod ^[20] dans les années 1960.

6.2.2. Les changements de paradigme en physique au XX^{ème} siècle

6.2.2.1. La relativité restreinte et générale

6.2.2.1.1. Les difficultés de la mécanique classique

Très tôt, on réalise que l'attraction universelle de **Newton** devrait conduire à un effondrement gravitationnel en l'absence de force de répulsion. En 1758, Boskovic propose de remplacer la loi en $1/r^2$ par une loi plus complexe incluant un terme répulsif à courte distance. **Ernst Mach** (1838-1916) est l'un des critiques les plus lucides de la fin du XIX^{ème} siècle. Il souligne que notre connaissance ne porte que sur des mouvements relatifs mais que le choix d'un système de référence type n'est pas indifférent (la même rotation s'explique par le mouvement de la Terre par rapport aux astres aussi bien que par un mouvement des astres par rapport à la Terre). Il attire l'attention sur le fait qu'il faut traiter toutes les masses de l'univers comme étant en interaction donc la loi d'interaction en $1/r^2$ entre deux corps n'est peut-être qu'une loi effective.

Alors que pour Kant espace et temps sont des notions a-priori, innées à l'esprit humain, **Henri Poincaré** ^[5] montre que la nature de l'espace nous est inaccessible. Ainsi, le caractère euclidien ou non de l'espace est purement conventionnel ^[21]. Aucune expérience ne peut permettre de trancher en faveur d'une géométrie. La raison en est qu'on ne peut déterminer que les relations entre objets mais pas leur nature. Ainsi, la dilatation thermique des corps au voisinage d'une source de chaleur pourrait être interprétées comme une courbure de l'espace. Poincaré affirme que la

mécanique doit être enseignée comme une science expérimentale comme on le fait en Angleterre. Il montre qu'il n'y a pas d'espace absolu : nous ne concevons que des mouvements relatifs ni de temps absolu et même la notion de simultanéité n'est pas intuitive. D'autre part, la rotation de la Terre n'est pas vérifiable expérimentalement mais admettre cette hypothèse simplifie les calculs. Si on ne s'était pas rendu compte de la rotation terrestre, les forces inertielles auraient été considérées comme réelles et interprétées comme dues à une attraction mutuelle des corps (force centrifuge d'entraînement) et à des frottements (force centrifuge composée). Selon Poincaré, le principe général : "*l'accélération d'un corps ne dépend que de la position et des vitesses (relatives) des autres corps*" dont découle le principe d'inertie ne pourra jamais être soumise à une expérience décisive : toute déviation à cette loi comme par exemple un terme $\frac{d^4 \vec{r}}{dt^4}$ pourra toujours être réinterprétée comme résultant de l'action de particules invisibles. De plus, la relation $\vec{F} = m\vec{\gamma}$ est habituellement utilisée pour définir à la fois la force et la masse. On doit donc accepter que les masses ne sont que des coefficients arbitraires utiles au calcul et dont un choix approprié permet la simplification des équations. L'égalité de deux forces et donc la mesure avec un dynamomètre par exemple requiert de supposer vrai le principe d'action-réaction. Il s'avère donc que les lois de Newton sont des définitions et non des lois. Toutefois, Poincaré se démarque des nominalistes pour qui les principes sont purement conventionnels et donc puisque la science découle logiquement de ces principes, elle est elle-même conventionnelle.

6.2.2.1.2. La relativité restreinte

- 1632 Dans son ouvrage "*Dialogue sur les deux systèmes du monde*", Galilée décrit le mouvement relatif et donne l'exemple suivant : le mouvement de translation uniforme d'un bateau ne peut être détecté par les éventuels occupants de sa cale.
- 1782 William Herschel découvre que le soleil est en mouvement par rapport aux autres étoiles. Il ne peut donc pas servir pour construire un repère fixe.
- 1881 Les tentatives expérimentales de mise en évidence du vent d'éther et donc une composition de la vitesse de la lumière $c \rightarrow c + v_{\text{Terre}}$ ont toutes échouées (de Arago en 1818 à Zeeman en 1914). Albert Michelson tente de mesurer des effets d'ordre v^2/c^2 . L'expérience ne montre aucune différence entre les vitesses de la lumière dans les directions parallèle et perpendiculaire au mouvement de la Terre.
- 1887 W. Voigt montre que les transformations connues plus tard sous le nom de transformations de Lorentz laissent l'équation des ondes invariante. H. Poincaré montre que les équations de Maxwell sont

6.2. Les sciences au XX^{ème} siècle

également invariantes sous ces transformations.

- 1887 Avec l'aide d'Edward Morley, Michelson reprend son expérience qui se solde de nouveau par un échec.
- 1889 George Fitzgerald émet l'hypothèse que le bras de l'interféromètre de Michelson et Morley a pu subir une légère contraction dans la direction du mouvement de la Terre. Cette contraction serait due à des forces causées par le vent d'éther.
- 1892 Dans sa théorie de l'électron, Lorentz suppose l'existence d'un éther immobile servant de référentiel absolu. Dans le référentiel du corps en mouvement, il introduit un **temps local** dépendant du temps absolu et de la vitesse. En négligeant les termes en v^2/c^2 , les équations de l'électromagnétisme sont les mêmes dans les deux référentiels. Des effets d'ordre v^2/c^2 sont mis évidence dans l'expérience de Michelson-Morley.



Figure 46 : [Fig 1 Fig 2] Portraits de A. Lorentz (à gauche) et H. Poincaré (à droite).

- 1892 Pour reproduire le mouvement des rayons cathodiques dans un champ magnétique, Lorentz introduit à son tour une contraction des longueurs $l = l_0 \sqrt{1 - v^2/c^2}$. Toutefois, cette contraction des corps apparaît pour Lorentz et Poincaré comme un coup de pouce arbitraire. De plus, les expériences pour mettre en évidence cette contraction échouent. Lorentz admet alors que l'effet peut être masqué par une augmentation conjointe de la masse électromagnétique $m = m_0 / \sqrt{1 - v^2/c^2}$, la masse écanique étant conservée. L'électron devient alors dans la théorie de Lorentz un corpuscule de rayon fini, susceptible de variations élastiques avec le mouvement.

- 1905 H. Poincaré soupçonne la difficulté profonde de la simultanéité par l'impossibilité des signaux instantanés.
- 1905 Outre ses articles sur le mouvement brownien (qui pose la théorie atomique), l'effet photoélectrique (qui introduit la quantification du rayonnement électromagnétique), **Albert Einstein** ^[3] (1879-1955) publie la théorie de la relativité restreinte. Il y présente la théorie du mouvement des corps dans les référentiels d'inertie.

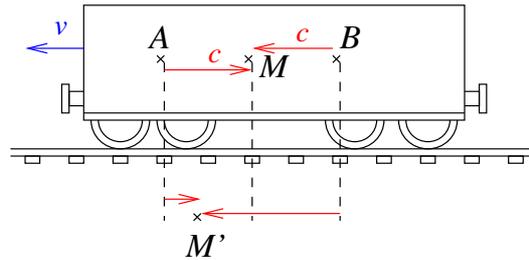


Figure 47 : [Fig 1] Einstein définit A et B comme simultanés si des photons émis en A et B arrivent au point médian M au même instant. La simultanéité n'est pas conservée par un changement de référentiel. Il n'y a donc pas de simultanéité absolue. Cette impossibilité entraîne la contraction des longueurs et la dilatation du temps et non des forces causées par un mouvement relatif par rapport à l'éther.

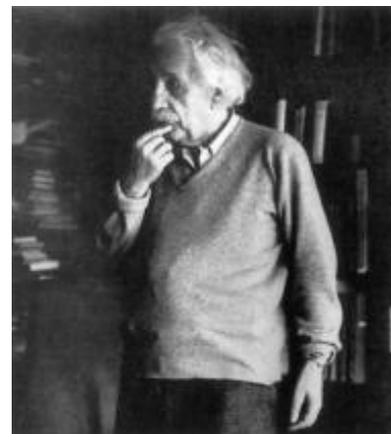


Figure 48 : [Fig 1 Fig 2 Fig 3] Portraits de Minkowski (à gauche) et d'A. Einstein.

6.2. Les sciences au XX^{ème} siècle

1905 Dans un second article, Einstein montre que les lois de conservation de la masse et de l'énergie se combinent en une seule : $d((m - m_0)c^2) = 0$. Il en conclue l'équivalence de la masse et l'énergie.

6.2.2.1.3. La relativité générale

Le principe de relativité restreinte se traduit par la covariance des lois de la physique lors une transformation de Lorentz. Il ne s'étend pas aux systèmes accélérés dont le mouvement est décelable (pendule de Foucault).

1832 Coriolis étudie la composition des mouvements.

1851 Foucault met en évidence la rotation terrestre en observant la rotation du plan d'oscillation d'un pendule sous l'effet de la force de Coriolis.

1883 **Mach** attribue le caractère privilégié des référentiels d'inertie à l'intervention des masses éloignées. La rotation du pendule de Foucault est due selon lui à l'influence de ces astres.

1889 Roland von Eotvos teste à l'aide d'une balance à torsion l'équivalence entre masses gravitationnelle et inertielle.

1894 Hertz imagine des masses cachées imposant des contraintes se manifestant sous la forme d'une force d'inertie. La trajectoire obéit à un principe de moindre contrainte.

1907 En se basant sur le principe d'équivalence (égalité des masses inertielle et gravitationnelle) constaté expérimentalement, Albert Einstein note l'équivalence entre un champ gravitationnel et un référentiel convenablement accéléré.

1911 Albert Einstein prédit le décalage gravitationnel vers le rouge et la déflexion de la lumière.

1912 Des expériences testent la vitesse de la lumière dans des référentiels accélérés. On dispose des miroirs sur le pourtour d'un disque. Deux faisceaux lumineux, issus d'une même source et séparés par une lame semi-transparente, peuvent accomplir en sens inverse le même chemin optique. En faisant tourner le disque à une pulsation ω , une différence de marche $\Delta t = 4\omega S/c^2$ où S est la surface du disque est observée. Sagnac réalise l'expérience dans l'air, Harress dans le verre et Pogany dans l'eau avec à chaque fois le même résultat.

1912 Albert Einstein montre l'incompatibilité des transformations de Lorentz avec le principe d'équivalence.

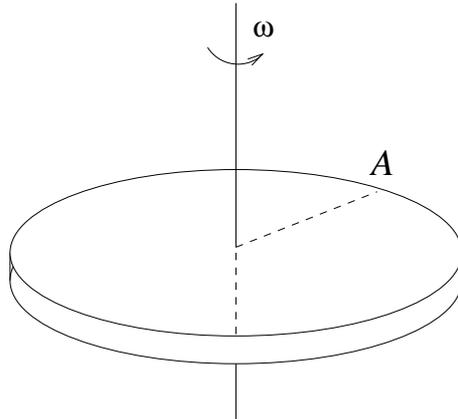


Figure 49 : [Fig 1] Lorsqu'un observateur se déplace le long de la circonférence d'un disque en rotation, la circonférence qu'il mesure subit une contraction de Lorentz. En revanche, s'il se déplace vers le centre, le rayon qu'il mesure ne présente aucune contraction car son déplacement est perpendiculaire au mouvement du disque. Par conséquent, en calculant le rapport circonférence sur rayon, il obtient une valeur inférieure à 2π .

- 1913 Elie Cartan avait montré que les effets d'une force d'inertie peuvent toujours être rejetés sur la structure géométrique de l'espace-temps. Einstein entreprend alors l'étude avec son ami mathématicien Marcel Grossmann des travaux récents sur les espaces courbes de Riemann, Ricci et Levi-Civita. Ils proposent une théorie relativiste de la gravitation pour les champs faibles.
- 1915 (*juin*) Albert Einstein présente ses travaux à David Hilbert et Oscar Klein lors d'un séjour d'une semaine à Göttingen. Albert Einstein et David Hilbert découvrent simultanément une erreur commise dans la théorie Einstein-Grossmann.
- 1915 (*18 nov*) Albert Einstein calcule l'avancée du périhélie de Mercure, mesuré en 1859 par Urbain-Joseph Le Verrier. Les tables newtoniennes donnent une avance séculaire du périhélie de Mercure de $539''$ d'arc. Le Verrier mesure en 1850 une avance résiduelle de $38''$ et Newcomb en 1880, $42''$. Einstein prédit une avance résiduelle de $42.9''$ d'arc.
- 1915 (*20 nov*) David Hilbert soumet un article comportant les équations de la théorie de la relativité générale.

6.2. Les sciences au XX^{ème} siècle



Figure 50 : [Fig 1] Portrait de D. Hilbert.

- 1915 (25 nov) Albert Einstein soumet *Les équations du champ de la gravitation* fixant la théorie de la relativité générale.
- 1916 Karl Schwarzschild découvre une solution exacte des équations d'Einstein.
- 1919 Profitant d'une éclipse solaire à l'île du Prince dans le golfe de Guinée, Arthur Eddington vérifie expérimentalement la valeur de la déflexion des rayons lumineux dans le champ gravitationnel solaire prédite par la relativité générale.
- 1948 Adam isole pour les raies des atomes excités à la surface du soleil l'effet Doppler gravitationnel. La même expérience est reprise en 1954 par Popper pour l'étoile 40 Eri B.

6.2.2.1.4. Les conséquences cosmologiques de la relativité

- 1917 Albert Einstein propose un modèle cosmologique statique qui l'oblige à modifier ses équations en y introduisant la constante cosmologique.
- 1922 Alexandre Friedmann propose des solutions dynamiques des équations d'Einstein pour des espaces ouverts et fermés. Il repousse l'âge de l'univers à 10^{10} années. En 1924, il y ajoute une solution à courbure négative.
- 1925 Georges Lemaître montre comment on peut introduire de nouvelles coordonnées dans l'univers de de Sitter qui rendent la métrique non statique.
- 1925 Edwin Hubble montre que les nébuleuses spirales sont d'autres systèmes d'étoiles analogues à notre galaxie. Vesto Slipher avait

mis en évidence le décalage vers le rouge des raies spectrales du rayonnement de ces galaxies.

- 1927 Georges Lemaître relie l'expansion de l'univers découlant des solutions cosmologiques de la relativité générale avec les observations sur la vitesse de fuite des nébuleuses extragalactiques. Il propose la loi qui sera établit expérimentalement par Hubble en 1929.
- 1929 En observant un décalage vers le rouge des spectres des étoiles, Edwin Hubble suggère la relation $v = Hr$ où v est la vitesse de récession d'une galaxie, H la constante de Hubble et r la distance à cette galaxie.
- 1931 George Lemaître présente sa théorie inflationniste de l'atome primitif.

6.2.2.2. La mécanique quantique

Au début du XX^{ème} siècle, si la mécanique classique était adaptée aux points matériels, la thermodynamique, l'optique ondulatoire et l'électromagnétisme, toutes trois développées au XIX^{ème} siècle, faisaient abstraction de toute structure discontinue de la matière. Clausius, Maxwell et Boltzmann tentent d'édifier des théories cinétiques basées sur la notion d'atomes et de molécules. Lorentz remplace la théorie électromagnétique de Maxwell en faisant intervenir les électrons. Ces tentatives soulèvent une opposition violente de la part de l'école "énergiste" qui est fondamentalement positiviste.

6.2.2.2.1. Période pré-quantique - théorie des quanta

Entre 1880 et 1910, les preuves de la discontinuité de la matière s'accumulent (décharge dans les gaz, électrolyse, rayons cathodiques, ...). La physique statistique explique le mouvement brownien. Vers 1910, les atomistes sont triomphants. Toutefois, la thermodynamique ne permet toujours pas d'expliquer la répartition spectrale du rayonnement du corps noir et prédit une catastrophe ultraviolette.

- 1885 Johann Blamer (1825-1898) mesure les longueurs d'onde d'une série de raies du spectre de l'hydrogène et construit une loi empirique.
- 1893 Wilhelm Wien découvre la relation de proportionnalité liant l'intensité émise par un corps noir et l'inverse de sa température.
- 1896 Wilhelm Wien propose une loi de distribution spectrale pour l'intensité émise par un corps noir valable à hautes fréquences.
- 1896 Pieter Ziemann découvre le "splitting" des lignes spectrales en présence d'un champ magnétique.

6.2. Les sciences au XX^{ème} siècle

1900 Lord Rayleigh propose une loi de distribution spectrale pour l'intensité émise par un corps noir. James Jeans corrige une erreur de Rayleigh.



Figure 51 : [Fig 1 Fig 2] Portraits de M. Planck (à gauche) et N. Bohr (à droite).

- 1900 Max Planck démontre la loi de Rayleigh-Jeans au prix d'une hypothèse de quantification : émission et absorption de lumière ne peuvent se faire que par paquets, les quanta.
- 1905 Albert Einstein explique l'effet photoélectrique découvert en 1887 par Heinrich Hertz en introduisant la quantification de l'énergie du rayonnement électromagnétique $E = h\nu$. Le seuil photoélectrique correspond alors à l'énergie minimale V_0 nécessaire pour extraire un électron et son énergie cinétique est linéaire avec ν ($h\nu - V_0 = \frac{1}{2}mv^2$).
- 1911 Ernest Rutherford met en évidence l'existence d'un noyau atomique en observant la diffusion de particules α sur des feuilles d'or et propose un modèle atomique de type planétaire. Toutefois, le modèle ne permet pas d'expliquer la stabilité des atomes. L'électron, à cause de son accélération centripète, devrait spiraler en direction du noyau en émettant un rayonnement.
- 1913 Niels Bohr, alors stagiaire au laboratoire de Rutherford à Cambridge, ajoute au modèle de Rutherford des conditions ad-hoc de quantification qui assure la stabilité et rendent compte des spectres expérimentaux. Il avance l'idée que les transitions électroniques d'une orbite à l'autre s'accompagne d'une émission électromagnétique emportant l'excédent d'énergie. La théorie de Bohr permet l'interprétation

de la classification périodique des éléments proposée en 1869 par **Mendeleïev** .

- 1913 Johannes Stark découvre le "splitting" des lignes spectrales en présence d'un champ électrique.
- 1914 James Franck et Gustav Hertz observent expérimentalement la quantification des niveaux d'énergie atomiques.
- 1916 Sommerfeld étend le modèle de Bohr en y introduisant les corrections relativistes. Lui et ses continuateurs mettent en évidence la structure fine et développent les théories des effets Zeeman et Stark.
- 1917 Einstein met en évidence la liaison entre la quantification de l'énergie de l'atome de Bohr et la quantification introduite par Planck.
- 1918 Niels Bohr propose le principe de correspondance. Pour Bohr, l'instant de la transition n'est accessible que par le biais d'une probabilité de transition qui traduit le fait que les transitions quantiques sont des processus instantanés échappant à toute description en terme d'espace et de temps.
- 1921 Otto Stern et Walter Gerlach (Franckfort) mettent en évidence la quantification du moment magnétique de l'électron. Pour cela, ils font évaporer des atomes d'argent dans un four et les collimate en un mince faisceau. Après avoir traversé un champ magnétique, les atomes se déposent sur une plaque de verre froide en formant deux bandes.
- 1923 Arthur Compton observe la quantification de l'énergie et de l'impulsion des rayons X.

6.2.2.2. Mécaniques ondulatoire et quantique

- 1923 Dans sa thèse de doctorat, Louis de Broglie jette les bases de la mécanique ondulatoire en postulant l'existence d'une onde de matière dont il donne les caractéristiques :

$$E = \frac{hc}{\lambda}, \quad p = \frac{h}{\lambda}$$

La dualité onde/photon s'étend selon lui aux électrons et les orbites de Bohr correspondent à des ondes stationnaires. Il prédit la diffraction des électrons.

- 1924 Satyendranath Bose démontre la loi de Planck en utilisant des règles de dénombrement qui impose une nouvelle statistique. Albert Einstein applique la technique au gaz parfait.

6.2. Les sciences au XX^{ème} siècle

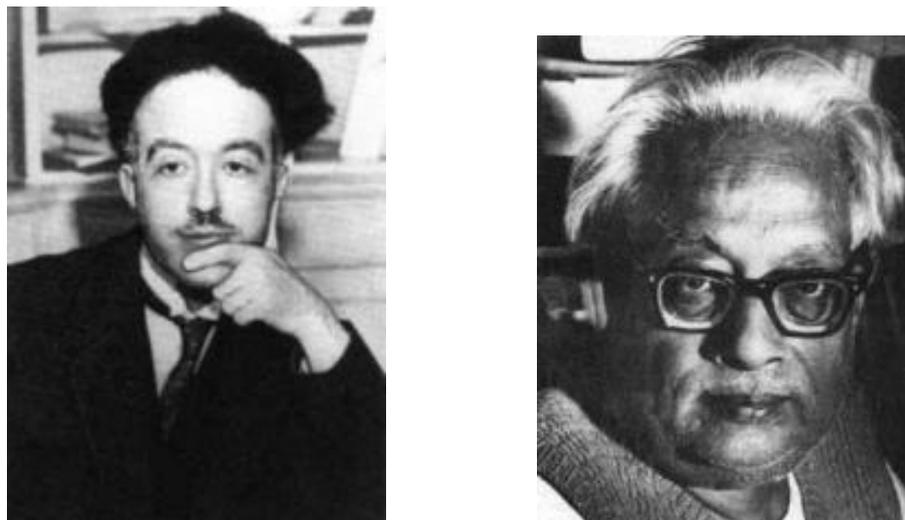


Figure 52 : [Fig 1 Fig 2] Portraits de L. de Broglie (à gauche) et S. Bose (à droite).

- 1925 Wolfgang Pauli introduit un degré de liberté de spin pour les électrons à l'intérieur d'atomes et démontre le principe d'exclusion.
- 1925 George Uhlenbeck et Samuel Goudsmit (Hollande) proposent l'existence d'un moment angulaire interne à l'électron (spin) en se basant sur des données spectroscopiques.
- 1925 Werner Heisenberg, Max Born et Pascual Jordan formulent une approche matricielle de la mécanique quantique.
- 1926 Enrico Fermi ^[34] découvre la statistique des particules obéissant au principe d'exclusion de Pauli. Paul Dirac la redécouvre indépendamment.
- 1926 Erwin Schrödinger propose une équation d'onde pour la fonction d'onde.
- 1926 Erwin Schrödinger montre l'équivalence de son approche avec celle de Heisenberg, Born et Jordan.
- 1926 Erwin Schrödinger développe la théorie des perturbations en mécanique quantique.
- 1926 Max Born propose l'interprétation statistique de la fonction d'onde. Il développe également une théorie quantique de la diffusion d'une particule.
- 1926 Erwin Schrödinger, puis indépendamment Klein et Gordon découvrent l'équation d'onde relativiste d'une particule de spin nul.
- 1926 G. Wentzel, H.A. Kramers et L. Brillouin développent l'approximation *WKB*.

- 1927 Clinton J Davisson, Lester H. Germer (Bell Lab., New York) et George Paget Thomson ⁽⁴⁰⁾ (Aberdeen, Écosse) observent la diffraction des électrons par un cristal.
- 1927 Werner Heisenberg découvre le principe d'incertitude.
- 1927 Ehrenfest démontre le théorème liant les grandeurs classiques à la théorie quantique.



Figure 53 : [Fig 1 Fig 2 Fig 3] Portraits de M. Born (à gauche), E. Schrödinger (au centre) et W. Heisenberg (à droite).

6.2.2.2.3. Théorie des champs

- 1927 Paul Dirac introduit la méthode de la seconde quantification. Il construit également une théorie quantique de l'électromagnétisme (QED).
- 1927 Eugene Wigner propose la conservation de la parité.
- 1928 Paul Dirac propose une équation d'onde relativiste pour les particules de spin 1/2.
- 1930 Oppenheimer met en évidence l'existence de divergences ultraviolettes dans la self-énergie de l'électron.
- 1932 Eugene Wigner introduit la transformation d'inversion du temps en mécanique quantique.
- 1932 John Von Neumann place la théorie quantique sur des bases mathématiques solides en utilisant l'algèbre opératoire.

⁽⁴⁰⁾ J.J. Thomson obtient le prix Nobel en 1906 pour avoir prouvé que l'électron était une particule et son fils, G.P. Thomson l'obtient en 1937 pour le caractère ondulatoire de l'électron.

6.2. Les sciences au XX^{ème} siècle

- 1934 Enrico Fermi construit une théorie de l'interaction faible qui le conduit à postuler l'existence d'une nouvelle particule de masse nulle : le neutrino.
- 1935 Hideki Yukawa propose une théorie de l'interaction forte dans laquelle le vecteur de l'interaction est une particule massive : le méson π .



Figure 54 : [Fig 1 Fig 2] Portraits de W. Pauli (à gauche) et P. Dirac (à droite).

- 1943 Heisenberg développe le formalisme de la matrice S .
- 1943 Tomonaga propose une théorie covariante de l'électrodynamique quantique.
- 1947 Bethe calcule le "Lamb Shift" dans le cadre d'une théorie de l'électrodynamique non-relativiste.
- 1948 Schwinger estime le facteur de Landé à $g_e = 2(1 + \alpha/2\pi) \simeq 2(1 + 1.16 \cdot 10^{-3})$ en accord avec la mesure de Kusch et Fowley en 1947 $g_e \simeq 2(1 + 1.19 \cdot 10^{-3})$.
- 1948 Feynmann, Schwinger, Tati et Tomonaga développent la théorie covariante de l'électrodynamique quantique. Dyson montre en 1949 que les méthodes utilisées sont équivalentes.
- 1948 Richard Feynman développe le formalisme des intégrales de chemin.
- 1950 Ward établit les identités de Ward.
- 1953 Stückelberg et Gell-Mann développent la technique du groupe de renormalisation dans le cadre de la théorie des champs.
- 1954 Yang et Mills introduisent l'invariance locale de jauge.

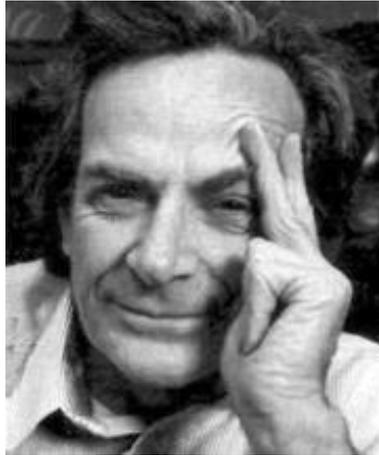


Figure 55 : [Fig 1] Portrait de R. Feynmann.

6.2.2.3. Physique des particules

6.2.2.3.1. Rayons cathodiques

Pour étudier les gaz au spectroscope, les physiciens et les chimistes utilisaient des tubes à décharge. A la fin du XIX^{ème} siècle, il fut observé un rayonnement sur la paroi en verre du tube lorsque celui-ci avait été vidé de son gaz, et qui semblait causé par ce qui fut appelé des rayons cathodiques provenant de la cathode. William Crookes pensait que les rayons cathodiques étaient un résidu de gaz.

- 1894 Philipp Lenard montre que les rayons cathodiques peuvent traverser une feuille de métal et ne sont donc pas moléculaire comme le pensait Crookes.
- 1895 Wilhelm Röntgen (1845-1923) observe que le rayonnement produit sur la paroi du tube rend luminescent une feuille de papier de papier couverte de platinocyanure de baryum. Il montre que le rayonnement n'est pas dévié par un champ électrique ou magnétique et qu'il n'est pas réfracté par une lentille. Il lui attribue le nom de rayons X.
- 1895 Joseph John Thomson (1856-1940) et son assistant Ernest Rutherford (1871-1937) observent au laboratoire Cavendish que lorsque les rayons X traversent un gaz, celui-ci conduit l'électricité.
- 1896 J.J. Thomson estime la vitesse des rayons cathodiques à environ $c/1600$ et conclut qu'il s'agit de particules plus petites qu'un atome. Le nom **électrons** leur est attribué. Il mesure le rapport e/m de leur charge sur leur masse. Pour cela, il ionise avec des rayons X de l'air saturé de vapeur d'eau. Les particules chargées forment alors des germes de condensation. Thomson mesure la chute des gouttelettes

6.2. Les sciences au XX^{ème} siècle

ainsi formées. Il modifie les équations de Maxwell, remplaçant les courants par des mouvements de charges.

- 1892 et 1895 Hendrik Anton Lorentz (1853-1928) développe sa théorie de l'électron dans deux traités. Il suppose l'existence d'un éther partout immobile et de particules chargées. En introduisant la force de Lorentz, il rend compte presque de tous les phénomènes électriques, magnétiques et optiques. Il explique également le terme $1 - 1/n^2$ de l'expérience de Fizeau.
- 1897 John Townsend, élève de J.J. Thomson, parvient à mesurer séparément la charge e des électrons.
- 1903 Charles Glover Barkla, élève de J.J. Thomson au Cavendish Lab. étudie le rayonnement X secondaire diffusé par un bloc de carbone. Il parvient à le polariser ce qui confirme sa nature ondulatoire. Les expériences se poursuivent jusqu'en 1914 au Cavendish Lab.
- 1904 W. Bragg propose une théorie corpusculaire des rayons X .
- 1909 Robert Millikan (1868-1953) affine la valeur de e .
- 1912 Walther Friedrich, Paul Knipping et Max Laue découvrent que les rayons X sont diffractés par les cristaux.
- 1913 William et Laurence Bragg inventent un spectromètre à rayons X .
- 1922 Après une thèse en 1916 et une année post-doctorale au Cavendish Lab. sous la direction de Rutherford en 1920, Arthur Holly Compton met en place un programme d'étude de la diffusion des rayons X à l'université de S^t Louis (Missouri, USA) en 1920. Il montre en 1922 que la diffusion implique une collision élastique entre un quantum de rayonnement (photon) et un électron.
- 1924 Alors que l'interprétation de Compton acquiert peu à peu l'adhésion de la communauté scientifique, il met en évidence la réflexion interne des rayons X par les cristaux confirmant cette fois leur caractère ondulatoire.

6.2.2.3.2. Radioactivité

- 1896 Henri Becquerel (1852-1908) découvre que l'uranium émet en permanence des rayons qui comme les rayons X , rendent un gaz conducteur lorsqu'ils le traversent.
- 1898 Pierre ^[23] (1859-1906) et Marie Curie (1867-1934) isolent de nouveaux éléments radioactifs : le polonium et le radium.
- 1898 Rutherford découvre que la radioactivité se divise en deux types : les particules α et β . En compagnie de Frederick Soddy, il conclut qu'il s'agit de particules.

- 1900 Paul Villard découvre les rayons γ mais sa conclusion quant à leur nature corpusculaire est mise en cause.
- 1903 Rutherford et Soddy découvrent que les éléments radioactifs se désintègrent spontanément.
- 1904 Séjournant jusqu'en 1907 à Adélaïde en Australie, W. Bragg étudie le rayonnement γ et l'imagine comme une paire de particules α et β .
- 1907 Rutherford, assisté de Hans Geiger (1882-1949), découvre que les particules α sont des noyaux d'hélium ${}^4\text{He}$ et les particules β des électrons.
- 1910 William Bragg découvre que les rayons X et γ peuvent éjecter des électrons d'un atome et donc se comporter comme des particules ce qui met fin à polémique sur la nature des rayons γ .
- 1914 Chadwick observe que le spectre des rayons β est continu ce qui est contraire à la loi de conservation de l'énergie.

6.2.2.3.3. La découverte de nouvelles particules

- 1919 Francis Aston, ancien assistant de J.J. Thomson, découvre que le gaz néon peut exister sous plusieurs formes de poids atomiques différents.
- 1919 Rutherford découvre le proton.
- 1930 Pauli explique le spectre continu des rayons β par l'hypothèse de l'émission d'une particule neutre lors de la désintégration β (pour assurer la conservation de l'énergie).
- 1931 Dirac prédit l'existence du positron et de l'anti-proton.
- 1932 Carl Anderson découvre le neutron.
- 1932 Chadwick met en évidence le neutron lors de la réaction $\alpha + \text{Be} \longrightarrow C + n$.
- 1932 Heisenberg suggère que le noyau est composé de protons et de neutrons, ce qui permet d'expliquer l'isotopie observée par Aston en 1919.
- 1932 Pauli propose l'existence du neutrino apparaissant dans la désintégration $n \longrightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$.
- 1937 Neddermeyer et Anderson observent le muon.
- 1937 Majorana propose une théorie du neutrino.
- 1940 Williams et Roberts observent la désintégration du muon $\mu^- \longrightarrow e^- + (\bar{\nu}_e + \nu_\mu)$.

6.2. Les sciences au XX^{ème} siècle

1947 Lattes, Occhialini et Powell observent le méson π^- et mettent en évidence la désintégration $\pi^\pm \longrightarrow \mu^\pm + \nu_\mu$.

Un grand nombre de particules sont découvertes dans les années 1950 : π^0 , K^\pm , Λ , K^0 , Δ^{++} , Ξ^- , Σ^\pm , $\bar{\nu}_e$, \bar{p} , $K_{L,S}$, \bar{n} , Σ^0 , $\bar{\Lambda}$, Ξ^0 , ...

1956 Première observation expérimentale du neutrino.

1957 En 1956, Lee et Yang proposent des expériences susceptibles de tester la conservation de la parité dans les interactions faibles. Wu *et al.* mettent en évidence la violation de la parité lors de la désintégration β : ${}^{60}\text{Co} \longrightarrow {}^{60}\text{Ni} + e^\mp + \bar{\nu}_e$. Plusieurs expériences confirment ce résultat dans les mois qui suivent.

6.2.2.4. Astrophysique

6.2.2.4.1. Observation

A la fin des années 1860, Secchi classe les spectres stellaires en introduisant cinq catégories d'étoiles mais c'est la classification d'Edward Pickering et son équipe à Harvard qui est basée sur les travaux de Henry Draper qui est adoptée par la communauté. Ejnar Hertzsprung relie de manière empirique le spectre des étoiles à leur éclat réel tabulé dans la classification de Draper. Il peut ensuite estimer les distances d'autres étoiles en mesurant leur spectre et leur éclat apparent. Henry Norris Russel utilise la classification de Draper pour estimer la température des étoiles. En 1888, Norman Lockyer établit une relation entre température et types spectraux.

La puissance des télescopes est beaucoup améliorée au XX^{ème} siècle, en particulier grâce à George Ellery Hale qui conçoit notamment les observatoires des monts Wilson (1908) et Palomar (1948). La découverte des galaxies dans les années 1920 est une conséquence immédiate de ces progrès. Henrietta Leavitt découvre en 1912 les céphéïdes, des étoiles dont l'éclat oscille avec une période qui dépend de leur éclat réel. La mesure de l'éclat apparent et de la période de ses oscillations lui permet une mesure indirecte de leur distance. Edwin Hubble prouve au mont Wilson que tous les spectres sont décalés vers le rouge ce qui signifie que toutes les galaxies s'éloignent de la nôtre et ce d'autant plus vite qu'elles sont éloignées. En 1932, l'ingénieur radio Karl Jansky remarque que plusieurs des sources des parasites radio se situent dans la direction de la voie lactée. Ce n'est qu'après la seconde guerre mondiale que se développe la radio-astronomie initialement en Grande-Bretagne et en Australie. En 1963, on découvre les quasars qui sont probablement des galaxies à un stade primitif. En 1967, des pulsars, cadavres d'étoiles très denses ou étoiles à neutrons sont observés pour la première fois. En 1956, Herbert Friedman apporte la preuve de l'existence de sources X.

6.2.2.4.2. Modèles théoriques

Emmanuel Kant avait émis l'hypothèse que le soleil et les planètes s'étaient formés par condensation à partir d'une nébuleuse en forme de disque. Cette idée fut approfondie par Pierre de Laplace dans son traité "*Mécanique céleste*". Dans les années 1850, Helmholtz analyse du point de vue de la thermodynamique le comportement de la nébuleuse gazeuse de Kant. Au XIX^{ème} siècle, cette théorie perd peu à peu tout crédit.

- 1838 Claude Pouillet mesure le taux de dissipation de l'énergie solaire. La valeur gigantesque qu'il obtient fait prendre conscience à la communauté scientifique que le soleil ne peut pas être éternel et qu'il finira par s'éteindre.
- 1848 Mayer, puis Thomson en 1854, suggèrent que la surface du soleil est soumise à un bombardement constant de météorites dont l'énergie cinétique est convertie en chaleur et en lumière.
- 1887 Norman Lockyer suggère que le système solaire a pu se former par accréation de météorites.
- 1900 Thomas Chamberlain et Forest Moulton émettent l'hypothèse qu'une autre étoile s'est approchée du soleil et lui a retiré le matériau planétaire.
- 1945 Carl von Weizsäcker relance l'idée de la nébuleuse primitive.

La théorie proposée par Kelvin à la fin du XIX^{ème} siècle et selon laquelle l'énergie du soleil provient de la chaleur dégagée lors de sa contraction, est alors largement acceptée au début du XX^{ème} siècle. L'idée que l'équivalence de la masse et de l'énergie démontrée par Einstein en 1905, peut être à l'origine de la création d'énergie au sein des étoiles se développe. La question de l'origine de l'énergie stellaire est vivement débattue entre 1916 et 1924. En 1920, Eddington démontre que l'énergie nucléaire est la source d'énergie stellaire possible via la radioactivité artificielle.

6.2.2.5. Physique Statistique

- 1738 Daniel Bernoulli publie un traité d'hydrodynamique dans lequel il établit les lois des gaz dans un modèle de "billard". Il propose d'identifier la chaleur avec l'énergie cinétique et attribue la pression sur une surface aux impacts des particules. Sa théorie, en contradiction avec la théorie calorique, fut rapidement oubliée.
- 1820 John Herapath critique la démonstration de Laplace de la loi des gaz et présente une théorie cinétique des gaz.
- 1856 Karl Krönig fait l'hypothèse que les molécules d'un gaz se déplacent en ligne droite jusqu'à entrer en collision avec d'autres molécules.

6.2. Les sciences au XX^{ème} siècle

On pensait auparavant que les molécules oscillaient autour d'une position d'équilibre.

- 1858 Pour répondre à une critique de C.H.D. Buys-Ballot qui affirme que les vitesses importantes dans la théorie cinétique devraient avoir pour conséquence une vitesse de diffusion et de mélange plus rapide que celle observée, Rudolph Clausius introduit le libre parcours moyen.

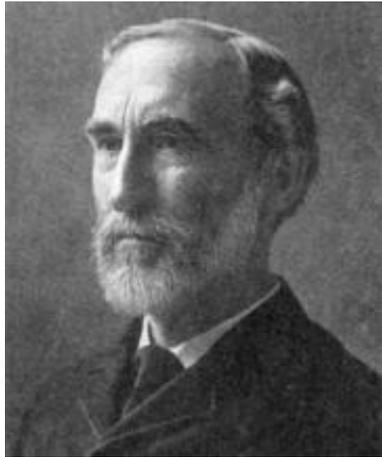


Figure 56 : [Fig 1 Fig 2] Portraits de W. Gibbs (à gauche) et L. Boltzmann (à droite).

- 1860 James Clerk Maxwell calcule la distribution de probabilité de la vitesse sur la base de considérations de symétrie.
- 1865 Rudolph Clausius introduit le concept d'entropie.
- 1872 Ludwig Boltzmann généralise l'approche de Maxwell aux processus hors-équilibre (équation de Boltzmann). Il introduit la fonction H , proportionnelle à l'entropie à l'équilibre et montre qu'elle est strictement croissante au cours du temps (théorème H de Boltzmann).
- 1877 Pour répondre au paradoxe de réversibilité mis en avant par Loschmidt en 1876 (réversibilité des équations de la mécanique mais pas de l'équation de Boltzmann), Ludwig Boltzmann introduit l'espace des phases et montre que l'entropie est proportionnelle au logarithme du volume de cet espace associé à l'état macroscopique.
- 1902 Willard Gibbs publie un traité de mécanique statistique dans lequel il étudie les ensembles microcanonique, canonique et grand-canonique.
- 1905 Albert Einstein et Marian Von Smoluchowski proposent une théorie du mouvement brownien, confirmée expérimentalement par Jean Perrin.

- 1927 John Von Neumann calcule la distribution de probabilité à l'équilibre en rendant maximum l'entropie.
- 1946 N.N. Bogolyubov généralise l'équation de Boltzmann en démontrant la présence de termes impliquant les collisions à plusieurs particules.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] M. Banniard (1986) *Le haut moyen-âge occidental*, Que sais-je ?, PUF.
- [2] E. Bellone (1999) *Galilée*, Les génies de la science, Belin.
- [3] S. Bergia (2002) *Einstein, le père du temps moderne*, Les génies de la science, Belin.
- [4] I. Bernard-Cohen (1962) *Les origines de la physique moderne*, Éditions du Seuil.
- [5] U. Bottazzini (2002) *Poincaré : philosophe et mathématicien*, Les génies de la science, Belin.
- [6] E. Buffetaut (2000) *Cuvier, le découvreur de mondes disparus*, Les génies de la science, Belin.
- [7] G. Celli (2002) *Konrad Lorentz, l'homme qui parlait aux animaux*, Les génies de la science, Belin.
- [8] C. Delacampagne (2000) *Une histoire du racisme*, Le livre de poche.
- [9] D. Descotes (2003) *Pascal, le calcul et la théologie*, Les génies de la science, Belin.
- [10] J-P. Dumont (1993) *La Philosophie antique*, Que sais-je ? PUF (8^{ème} édition).
- [11] J. Gimpel (1985) *La révolution industrielle du moyen-âge*, Éditions du seuil.
- [12] M.A. Granada (1998) *Les audaces cosmologiques de Giordano Bruno*, Hors-série La recherche.
- [13] N. Guicciardini (2003) *Newton, l'horloger du monde*, Les génies de la science, Belin.
- [14] B. Jarosson (1992) *Invitation à la philosophie des sciences*, Éditions du Seuil.
- [15] D. Laurenza (2000) *Léonard de Vinci, artiste et scientifique*, Les génies de la science, Belin.

- [16] J. Le Goff (2000) *Les intellectuels aux moyen-âge*, Éditions du Seuil.
- [17] D. Lecourt (2001) *La philosophie des sciences*, Que sais-je ? PUF.
- [18] A.M. Lombardi (2001) *Kepler, le musicien du ciel*, Les génies de la science, Belin.
- [19] B. Maitte (1981) *La lumière*, Éditions du Seuil.
- [20] M. Morange (2002) *Les mousquetaires de la nouvelle biologie*, Les génies de la science, Belin.
- [21] H. Poincaré (1902) *La science et l'hypothèse*, Flammarion.
- [22] R. Rémond (1974) *L'ancien régime et la révolution (1750-1815)*, éditions du Seuil.
- [23] P. Radvanyi (2001) *Les Curie, deux couples radioactifs*, Les génies de la science, Belin.
- [24] C. Ronan (1988) *Histoire mondiale des sciences*, Éditions du Seuil.
- [25] A. Sokal et J. Bricmont (1997) *Impostures intellectuelles*, Le livre de poche (Odile Jacob).
- [26] R. Taton (1966) *La science contemporaine, le XX^{ème} siècle de 1900 à 1960*, Quadrige, PUF (seconde édition).
- [27] R. Taton (1966) *La science contemporaine, le XIX^{ème} siècle*, Quadrige, PUF (seconde édition).
- [28] R. Taton (1966) *La science moderne, de 1450 à 1800*, Quadrige, PUF (seconde édition).
- [29] R. Taton (1966) *La science antique et médiévale, des origines à 1450*, Quadrige, PUF (seconde édition).
- [30] R. Tazzioli (2002) *Riemann, le géomètre de la nature*, Les génies de la science, Belin.
- [31] B. This (2003) *Freud*, Les génies de la science, mai 2003.
- [32] J-P. Verdet (1990) *Une histoire de l'astronomie*, Éditions du Seuil.
- [33] N. Verdier (2003) *Évariste Galois, le mathématicien maudit*, Les génies de la science, Belin.
- [34] M. de Maria (2001) *Fermi, un physicien dans la tourmente*, Les génies de la science, Belin.

INDEX

- Abélard (Pierre) 2.2.2.5.5. Platonisme augustinien et optimisme naturaliste au XII^{ème} siècle
Ref : 2.2.2.5.5.
- Ampère (André Marie) 5.2.3.5.2. Le phénomène d'induction
- Apollonios 1.2.3.4. Les mathématiques hellénistiques
Ref : 1.2.3.6.
- Archimède 1.2.3.5. Archimède
- Aristote 1.2.2.2. Aristote
- Atome 1.2.1.5. Les atomistes
- Avogadro (Amadeo) 5.2.2.1. La théorie atomique et la classification des éléments
- Bacon (Roger) 2.2.2.7.1. Aristotéliens modérés ou averroïstes et augustiniens
Ref : 2.2.2.7.3.
- Behaviorisme 6.2.1.1. La physiologie
- Berzélius (Jöns Jakob) 5.2.2.1. La théorie atomique et la classification des éléments
Ref : 5.2.2.1., 5.2.2.3.
- Brahé (Tycho) 3.2.4.3. Tycho Brahé et Johannes Kepler
- Bruno (Giordano) 3.2.4.2. La révolution copernicienne de l'astronomie
- Buffon 4.2.6.1. Les "Histoire Naturelles"
Ref : 4.2.6.3.
- Calorique 5.2.3.4. La thermodynamique
- Cardan (Jérôme) 3.2.1. La renaissance de l'abstraction mathématique
- Carnot (Sadi) 5.2.3.4. La thermodynamique
- Cauchy (Augustin Louis) 5.2.4.1. Le développement de l'analyse
- Cercle de Vienne 6.1.2.3. Le positivisme logique du cercle de Vienne
- Clausius (Rudolf) 5.2.3.4. La thermodynamique
- Comte (Auguste) 6.1.2.1. La théorie positiviste de Comte
- Confucius 1.4.1.1. Contexte général de la Chine antique
- Copernic (Nicolas) 3.2.4.2. La révolution copernicienne de l'astronomie
- Coulomb (Charles de) 4.2.3.2. Les débuts de l'électricité
- Cuvier (Georges) 5.2.1.1.2. La paléontologie
- Dalton (John) 5.2.2.1. La théorie atomique et la classification des éléments
- Darwin (Charles Robert) 5.2.1.1.3. La théorie darwinienne

- Davy (Humphry) 5.2.2.1. La théorie atomique et la classification des éléments
 Descartes (René) 4.2.1.1. Descartes et la philosophie naturelle française
 Ref : 3.2.4.1., 4.2.1.2.1., 4.2.1.2.2., 4.2.2.1., 4.2.2.1., 4.2.4.1., 4.2.6.1.,
 4.2.6.7.
 Déterminisme 4.2.1.2.2. L'œuvre de Newton
 Einstein (Albert) 6.2.2.1.2. La relativité restreinte
 Electrons 6.2.2.3.1. Rayons cathodiques
 Élément premier 1.2.1.2. La première science ionienne
 Épicycle 1.2.3.6. L'astronomie hellénistique
 Epigénisme 1.2.2.2.3. La biologie d'Aristote
 Erathostène 1.2.3.6. L'astronomie hellénistique
 Éther 1.2.1.3. Pythagore et son école
 Euclide 1.2.3.4. Les mathématiques hellénistiques
 Euler Leonhard 4.2.4.2. Le siècle de l'analyse
 Faillibilisme 6.1.2.4. La théorie faillibiliste de Popper
 Faraday (Mickael) 5.2.3.5.2. Le phénomène d'induction
 Fixisme 4.2.6.3. Les théories transformistes du XVIII^{ème} siècle
 Force vive 4.2.1.2.3. Le principe de moindre action
 Franklin (Benjamin) 4.2.3.2. Les débuts de l'électricité
 Galien 1.3.2.2. La science romaine
 Galilei (Galileo) 3.2.4.4. La physique nouvelle de Galilée
 Gauss (Carl Friedrich) 5.2.4.1. Le développement de l'analyse
 Gay-Lussac (Louis Joseph) 5.2.2.1. La théorie atomique et la classification des
 éléments
 Ref : 5.2.2.3.
 Grosseteste (Robert) 2.2.2.7.1. Aristotéliens modérés ou averroïstes et
 augustinien
 Ref : 2.2.2.7.3.
 Halley (Edmond) 4.2.1.2.2. L'œuvre de Newton
 Helmholtz (Hermann von) 5.2.3.4. La thermodynamique
 Hermétisme 3.1.2.2. Platonisme et hermétisme
 Herschel (William) 4.2.1.3.2. Les vérifications de la théorie newtonienne
 Hipparque 1.2.3.6. L'astronomie hellénistique
 Hooke (Robert) 4.2.1.2.1. Les pre-newtoniens
 Ref : 4.2.6.2.
 Huyghens (Christiaan) 4.2.2.2. Les théories ondulatoires de Grimaldi et Huyghens
 Ref : 3.2.4.1., 4.2.1.2.1., 4.2.1.3.1.
 Ibn al-Haytham 2.1.2.2. L'optique arabe
 Ref : 3.2.4.1., 3.2.4.1., 4.2.2.1.
 Induction 6.1.2.3. Le positivisme logique du cercle de Vienne
 Instrumentalisme 6.1.2.2. Réalisme physique et instrumentalisme
 Isométrie 5.2.2.3. La chimie organique

Index

- Joule (James Prescott) 5.2.3.4. La thermodynamique
Kant (Emmanuel) 4.1.2.1. Le détachement de la philosophie de la religion
Ref : 4.2.6.5., 5.2.1.1.1., 6.1.2.3., 6.2.2.4.2.
Kékulé von Stradonitz (August) 5.2.2.3. La chimie organique
Kepler (Johannes) 3.2.4.3. Tycho Brahé et Johannes Kepler
Ref : 3.2.4.1., 3.2.4.1., 4.2.1.2.2., 4.2.1.2.2., 4.2.1.2.2., 4.2.2.1.
Lamarck (Jean-Baptiste de Monet) 5.2.1.1.1. L'évolutionisme lamarckien
Laplace (Pierre Simon de) 4.2.3.1. La thermodynamique
Lavoisier (Antoine-Laurent) 4.2.5. La chimie aux lumières
Leibniz (Gottfried) 4.2.4.1. L'introduction de l'analyse et le calcul infinitésimal
Linné (Carl von) 4.2.6.1. Les "Histoire Naturelles"
Mach (Ernst) 6.2.2.1.1. Les difficultés de la mécanique classique
Ref : 6.2.2.1.3.
Maxwell (James Clerk) 5.2.3.5.3. La théorie électromagnétique de Maxwell
Mendeleïev (Dimitri Ivanovitch) 5.2.2.1. La théorie atomique et la classification
des éléments
Ref : 6.2.2.2.1.
Micromètre 4.2.1.3.1. Progrès technologiques et soutien à l'astronomie
Modernisme 6.1.2.1. La théorie positiviste de Comte
More (Thomas) 3.1.1.4. De nouvelles théories politiques
Néoplatonisme 2.2.2.5.5. Platonisme augustinien et optimisme naturaliste au
XII^{ème} siècle
Newton (Isaac) 4.2.1.2.2. L'œuvre de Newton
Ref : 4.2.1.2.3., 4.2.2.3., 4.2.2.3., 4.2.4.1., 4.2.4.1., 4.2.5., 5.2.3.1.1.,
5.2.3.3.2., 6.2.2.1.1.
Nominalisme 2.2.2.5.4. Réalisme et nominalisme
Oersted (Hans Christian) 5.2.3.5.2. Le phénomène d'induction
Ohm (Georg) 5.2.3.5.1. La naissance de l'électrocinétique
Pascal (Blaise) 4.2.3.3. De l'hydrostatique à l'hydrodynamique
Ref : 4.2.4.1.
Pasteur (Louis) 5.2.1.2. La génération spontanée de la vie
Platon 1.2.2.1. Socrate et Platon
Poincaré (Henri) 6.2.2.1.1. Les difficultés de la mécanique classique
Polarisation 5.2.3.3.1. La biréfringence et l'introduction de la polarisation
Popper (Karl) 6.1.2.4. La théorie faillibiliste de Popper
Positivismisme 6.1.2.1. La théorie positiviste de Comte
Post-modernisme 6.1.3. Le post-modernisme
Pragmatisme 6.1.2.1. La théorie positiviste de Comte
Précession des équinoxes 1.2.3.6. L'astronomie hellénistique
Préformationisme 1.2.2.2.3. La biologie d'Aristote
Ptolémée 1.2.3.6. L'astronomie hellénistique
Pythagore 1.2.1.3. Pythagore et son école

Réalisme mathématique	6.1.2.2. Réalisme physique et instrumentalisme
Réalisme physique	6.1.2.2. Réalisme physique et instrumentalisme
Relativisme	6.1.3. Le post-modernisme
Snel (Willebrord)	3.2.4.1. Une physique encore embryonnaire
Socrate	1.2.2.1. Socrate et Platon
Thalès	1.2.1.2. La première science ionienne
Théorème d'incomplétude	5.2.4.1. Le développement de l'analyse
Thomson (William, lord Kelvin)	5.2.3.4. La thermodynamique
Transformisme	4.2.6.3. Les théories transformistes du XVIII ^{ème} siècle
Tyndall (John)	5.2.1.2. La génération spontanée de la vie
Vésale (André)	3.2.2. Médecine et sciences de la nature à la Renaissance
Vinci (Léonard de)	3.2.4.1. Une physique encore embryonnaire
Young (Thomas)	5.2.3.3.2. Les phénomènes d'interférence

Index

SOMMAIRE

1. Antiquité	2
1.1. Les civilisations d'une science embryonnaire	2
1.1.1. L'Égypte ancienne	2
1.1.1.1. Contexte général de l'Égypte ancienne	2
1.1.1.2. La science de l'Égypte ancienne	2
1.1.2. Mésopotamie	4
1.1.2.1. Contexte général de la Mésopotamie	4
1.1.2.2. La science en Mésopotamie	5
1.1.3. Les civilisations d'Amérique	6
1.1.3.1. Les civilisations d'Amérique centrale	6
1.1.3.2. Les civilisations d'Amérique du sud	8
1.2. La Grèce antique	8
1.2.1. La période de l'hellénisme classique	8
1.2.1.1. Les origines de la civilisation grecque	8
1.2.1.2. La première science ionienne	9
1.2.1.3. Pythagore et son école	10
1.2.1.4. Le problème du changement	11
1.2.1.5. Les atomistes	12
1.2.2. La science aristotélicienne	13
1.2.2.1. Socrate et Platon	13
1.2.2.2. Aristote	15
1.2.3. La science hellénistique	17
1.2.3.1. Les sciences appliquées	18
1.2.3.2. Sciences de la vie et médecine	18
1.2.3.3. Épicuriens et stoïciens	18
1.2.3.4. Les mathématiques hellénistiques	19
1.2.3.5. Archimède	19
1.2.3.6. L'astronomie hellénistique	20
1.3. La Rome antique	23
1.3.1. De la cité romaine à la chute de l'empire	23
1.3.2. Science et techniques dans l'empire romain	24

1.3.2.1. Travail des esclaves et mécanisation	24
1.3.2.2. La science romaine	24
1.3.2.3. Le déclin de la science en Occident	25
1.3.2.4. Le rôle du christianisme dans le déclin	25
1.4. L'Orient antique	26
1.4.1. La Chine antique	26
1.4.1.1. Contexte général de la Chine antique	26
1.4.1.2. La science de la Chine antique	27
1.4.2. La civilisation hindoue	28
1.4.2.1. Contexte général de la civilisation hindoue	28
1.4.2.2. La science de la civilisation hindoue	28
 2. Le moyen-âge	 30
2.1. La civilisation islamique	30
2.1.1. Contexte général de la civilisation islamique	30
2.1.2. La science de la civilisation islamique	30
2.1.2.1. L'astronomie arabe	30
2.1.2.2. L'optique arabe	31
2.1.2.3. Les mathématiques arabes	31
2.1.2.4. Médecine et sciences de la vie	32
2.2. Le moyen-âge en Occident	32
2.2.1. Le haut moyen-âge	32
2.2.1.1. De l'empire romain à une société féodale	32
2.2.1.2. L'Église catholique au haut moyen-âge	33
2.2.1.3. La culture du haut moyen-âge	34
2.2.2. Le bas moyen-âge	35
2.2.2.1. L'évolution de la société des XI-XII ^{ème} siècles	35
2.2.2.2. L'affirmation de l'autorité papale	35
2.2.2.3. La révolution industrielle du moyen-âge	36
2.2.2.4. Le progrès technique	39
2.2.2.5. L'épanouissement intellectuel	40
2.2.2.6. Les universités du XIII ^{ème} siècle	43
2.2.2.7. Le savoir au XIII ^{ème} siècle	44
2.2.3. Le déclin du moyen-âge	47
2.2.3.1. Les causes du déclin et les mutations de la société	47
2.2.3.2. Le savoir aux XIV ^{ème} et XV ^{ème} siècles	49
2.2.3.3. Les sciences de la fin moyen-âge	51

2.2.3.4. La physique du XIV ^{ème} siècle	51
3. La renaissance	52
3.1. La renaissance artistique et des idées	52
3.1.1. Humanisme et nouvelles idées à la Renaissance	52
3.1.1.1. L'humanisme de la Renaissance	52
3.1.1.2. Le cas de la question de l'humanité des amérindiens	53
3.1.1.3. Une nouvelle théorie économique	53
3.1.1.4. De nouvelles théories politiques	53
3.1.2. La remise en cause de l'Église catholique à la Renaissance	54
3.1.2.1. La Réforme protestante	54
3.1.2.2. Platonisme et hermétisme	54
3.2. La renaissance scientifique	55
3.2.1. La renaissance de l'abstraction mathématique	55
3.2.2. Médecine et sciences de la nature à la Renaissance	56
3.2.3. De l'alchimie à la chimie	57
3.2.4. L'effondrement du paradigme ptolémaï-aristotélicien	57
3.2.4.1. Une physique encore embryonnaire	57
3.2.4.2. La révolution copernicienne de l'astronomie	59
3.2.4.3. Tycho Brahé et Johannes Kepler	61
3.2.4.4. La physique nouvelle de Galilée	63
4. Le siècle des lumières	66
4.1. La modernisation de la société des lumières	66
4.1.1. Contexte politique et économique des lumières	66
4.1.1.1. L'apparition du capitalisme redéfinit les valeurs	66
4.1.1.2. L'évolution de la société	67
4.1.2. Contexte scientifique et philosophique des lumières	67
4.1.2.1. Le détachement de la philosophie de la religion	67
4.1.2.2. La théorie de la connaissance	68
4.1.2.3. Le soutien publique à la science	68
4.2. La révolution scientifique des lumières	69
4.2.1. La victoire du déterminisme newtonien en mécanique	69
4.2.1.1. Descartes et la philosophie naturelle française	69

4.2.1.2. La mécanique newtonienne	70
4.2.1.3. Les confirmations astronomiques de la théorie de Newton	75
4.2.2. L’optique et la question de la nature de la lumière	77
4.2.2.1. La théorie de Descartes et le principe de Fermat	77
4.2.2.2. Les théories ondulatoires de Grimaldi et Huyghens	78
4.2.2.3. La théorie corpusculaire de Newton	80
4.2.2.4. Progrès technologiques et déclin de l’optique	82
4.2.3. L’apparition de la thermodynamique, l’électricité, l’hydrostatique	82
4.2.3.1. La thermodynamique	82
4.2.3.2. Les débuts de l’électricité	83
4.2.3.3. De l’hydrostatique à l’hydrodynamique	84
4.2.4. Le développement de l’analyse en mathématiques	85
4.2.4.1. L’introduction de l’analyse et le calcul infinitésimal	85
4.2.4.2. Le siècle de l’analyse	85
4.2.5. La chimie aux lumières	86
4.2.6. Les sciences du vivant aux lumières	88
4.2.6.1. Les “Histoire Naturelles”	88
4.2.6.2. L’apparition du microscope et d’une nouvelle biologie	89
4.2.6.3. Les théories transformistes du XVIII ^{ème} siècle	89
4.2.6.4. Le problème de la génération	89
4.2.6.5. La dérive raciste	90
4.2.6.6. Médecine	90
4.2.6.7. Géologie	91

5. Le XIX^{ème} siècle 92

5.1. La société nouvelle du XIX^{ème} siècle 92

5.1.1. La révolution industrielle du XIX^{ème} siècle 92

5.1.2. Le nouvel ordre social 93

5.1.3. Libéralisme, démocratie et socialisme 93

5.1.3.1. Libéralisme 93

5.1.3.2. Démocratie 94

5.1.3.3. Le socialisme 94

5.2. Les sciences au XIX^{ème} siècle 95

5.2.1. Biologie au XIX^{ème} siècle 95

5.2.1.1. La théorie de l’évolution 95

5.2.1.2. La génération spontanée de la vie 97

5.2.1.3. La théorie cellulaire 98

5.2.1.4. Du magnétisme animal à l'hypnose et la psychothérapie	99
5.2.2. La chimie au XIX^{ème} siècle	99
5.2.2.1. La théorie atomique et la classification des éléments	100
5.2.2.2. La recherche de la nature atomique	102
5.2.2.3. La chimie organique	102
5.2.3. La physique triomphante	103
5.2.3.1. L'algébrisation de la mécanique	103
5.2.3.2. L'astronomie au XIX ^{ème} siècle	105
5.2.3.3. La biréfringence au secours de la théorie ondulatoire	107
5.2.3.4. La thermodynamique	109
5.2.3.5. L'unification de l'électricité et du magnétisme	111
5.2.4. Mathématiques au XIX^{ème} siècle	114
5.2.4.1. Le développement de l'analyse	114
5.2.4.2. La géométrie non-euclidienne	115
6. Le XX^{ème} siècle	117
6.1. L'évolution de la philosophie des sciences	117
6.1.1. Le triomphe de la science du début du siècle	117
6.1.2. La philosophie positiviste	117
6.1.2.1. La théorie positiviste de Comte	117
6.1.2.2. Réalisme physique et instrumentalisme	118
6.1.2.3. Le positivisme logique du cercle de Vienne	119
6.1.2.4. La théorie faillibiliste de Popper	119
6.1.3. Le post-modernisme	120
6.1.3.1. La révision du faillibilisme de Lakatos	120
6.1.3.2. La théorie des révolutions de Kuhn	120
6.1.3.3. La réfutation de la méthode de Feyerabend	121
6.1.3.4. L'"affaire" Sokal et la crise de la science de la fin du siècle	121
6.2. Les sciences au XX^{ème} siècle	122
6.2.1. La révolution de la biologie au XX ^{ème} siècle	122
6.2.1.1. La physiologie	122
6.2.1.2. La génétique	123
6.2.1.3. La biochimie	123
6.2.1.4. La biologie moléculaire	123
6.2.2. Les changements de paradigme en physique au XX ^{ème} siècle	124
6.2.2.1. La relativité restreinte et générale	124
6.2.2.2. La mécanique quantique	131

6.2.2.3. Physique des particules	137
6.2.2.4. Astrophysique	140
6.2.2.5. Physique Statistique	141

Bibliographie	144
--------------------------------	-----

Index	146
------------------------	-----