

Histoire des Sciences

HIST-F-101

(leçons 1-6)

« Pour l'honneur de l'esprit humain »

« ... M. Fourier avait l'opinion que le but principal des mathématiques était l'utilité publique et l'explication des phénomènes naturels; mais un philosophe comme lui aurait dû savoir que le but unique de la science, c'est l'honneur de l'esprit humain, et que sous ce titre, une question de nombres vaut autant qu'une question du système du monde. »

C. Jacobi, *Lettre à Legendre*, 1830

P. Marage

2004-2005

<http://homepages.ulb.ac.be/~pmarage>

pmarage@ulb.ac.be

Quelle histoire des sciences ?

- L'« *histoire – découverte* » : la science *découvre* progressivement la vérité, grâce à ses héros
Mais - les débats sont souvent complexes ! → « principe de symétrie » : rendre justice aux deux camps – et donc aussi aux « vainqueurs » ; approfondir la compréhension des concepts *dans leur contexte*
 - l'histoire de la science n'est pas purement « internaliste » : rôle des autres sciences ; des techniques ; de la philosophie et de l'état social en général ; et aussi sociologie des communautés scientifiques
- L'« *invention* » des sciences, la *construction* des objets scientifiques
Limite : le « programme fort » en sociologie des sciences : ramener la science *essentiellement* à ses aspects sociologiques, en faisant abstraction de son objet spécifique, en réduisant les critères de validité scientifiques à des enjeux purement sociaux

Qu'est-ce que la science ?

- Démarche purement déductive (modèle des math. et de la logique, sur base d'« évidences » – cf. Aristote)
- « Science moderne » (ex. F. Bacon) : *Induction* à partir des observations / expériences
- *Mais* limite de l'induction : impossible de vérifier une théorie dans *toutes* ses conséquences
- K. Popper : « falsificationnisme » : les théories scientifiques se caractérisent par la possibilité d'être mises en défaut – puissance d'une théorie \leftrightarrow sa « prise de risque »
- *Mais* multiples procédures « ad hoc » pour défendre le paradigme (« on comprendra plus tard », etc.)
- T. Kuhn : approche plus sociologique, insistant sur les communautés scientifiques :
 - elles se structurent autour de *paradigmes* (« vision du monde »; ensemble de théories, pratiques, instruments, apprentissages, manuels, expériences-clefs), qui assurent la puissance de la *science normale*
 - Science normale \leftrightarrow présence d'*anomalies* (prises au sérieux par *certaines* groupes de scientifiques) \rightarrow *révolution scientifique* \rightarrow nouveau paradigme

Plan du cours

0. Prélude

Quelle histoire des sciences ? (leçon 1)

1. Histoire du Ciel et de la Terre

La science avant la science (leçon 1)

Le « miracle grec »; les Grecs et le cosmos (leçon 2)

Les Arabes; le Moyen-âge occidental (leçon 3)

La naissance de la science moderne : Copernic, Galilée (leçon 4)

2. Histoires du repos et du mouvement, du plein et du vide

La science moderne et l'expérimentation (leçon 5)

3. Histoire d'atomes et de molécules

(leçon 6)

L'alchimie – naissance de la chimie – l'atomisme – la chimie au XIXème siècle

4. Histoire de la Terre et de la Vie

Biologie, géologie, paléontologie, évolution (leçon 7)

Génétique – biochimie – biologie moléculaire; quelle biologie ? (leçons 8 – 9)

Une révolution, scientifique : la tectonique des plaques (leçon 9)

5. Histoire de nombres, histoires de l'infini

(leçons 10 – 11)

y compris géométries non-euclidiennes et théorème de Gödel

6. Le paradigme du changement de paradigme

Relativité, mécanique quantique (juste mentionné !) (leçon 12)

7. Éternels regrets

Machines à vapeur (science et technique); machines à calculs (informatique)

Ici et ailleurs : la science chinoise / pourquoi nous et pas eux ?

La science aujourd'hui : enjeux, défis, responsabilités

etc.

La science d'avant la science

La révolution néolithique : agriculture, élevage, poterie, sédentarisation, urbanisation.

Les empires fluviaux : Nil, Mésopotamie (Tigre et Euphrate), Indus (Mohenjo-Daro, Harappa), Fleuve Jaune.

Riches savoirs techniques.

Invention de l'écriture à Sumer (v. 3200 BC) (pictogrammes → écriture cunéiforme)

Déchiffrement du monde : analyse des présages, astrologie

Les « traités » (...), précisément parce qu'ils n'étaient pas des œuvres de simple enregistrement et d'histoire, mais de science, portant non sur le seul passé, mais sur tous les temps, se devaient de noter, et ce qui était arrivé, de fait, et ce qui pouvait arriver, de droit. » (p. 80)

D'une connaissance de pure constatation, a posteriori, portant sur des cas individuels, la divination est ainsi devenue (...) une connaissance a priori, déductive, systématique, capable de prévoir, ayant un objet nécessaire, universel, et, à sa façon, abstrait, et possédant même ses « manuels ». » (p. 249)

Jean Bottéro, *Mésopotamie – L'écriture, la raison et les dieux*,
Folio Histoire 81, Paris 1997

+ mathématique calculatoire (mais sans distinction entre résultats exacts et approchés – cf. aussi Égypte)

+ observations astronomiques (relations entre microcosme et macrocosme)



Chronologie premiers empires

Temps préhistoriques

- 2 000 000	homo habilis : galets (pebble)
- 1 600 000	homo erectus ou pithécanthrope (choppers)
-600 000	le feu
-400 000	bifaces acheuléens; campements de chasseurs
-250 000	taille Levallois
-120 000	moustérien
-100 000	homo sapiens (Neandertal)
-35 000	homo sapiens sapiens (Cro Magnon)
-16 000	magdalénien (Lascaux)
-10 000	néolithique (Mésopotamie, Proche-Orient, Égypte) élevage, agriculture, sédentarisation, céramique, pierre polie, métaux (cuivre, bronze)

Premiers empires

Indus : Mohenjo-Daro, Hurappa -> -1800

Mésopotamie

-3500	charrue, tour de potier, roue (Sumer)
-3200	bronze à Ur
-3000	verre; premières tablettes d'argile (Uruk)
-2800	le Déluge
-2500	astronomie à Babylone
-2296	Sargon d'Akkad
-1792	Hammourabi, roi de Babylone
-669	apogée de l'Assyrie sous Assourbanipal
-604	prépondérance de Babylone: Nabuchodonosor II
-600	Zoroastre (?)
-539	prise de Babylone par Cyrus le Grand; empire perse
-331	conquête d'Alexandre

Égypte

-4225	premier calendrier (?)
-3000	première dynastie; numération décimale
-2680	les grandes pyramides -> 2200
-1970	temples de Karnak
-1675	introduction du cheval

-1650	papyrus mathématique de Rhind
-1364	Akhenaton
-1290	Ramsès II
-331	Fondation d'Alexandrie

Chine

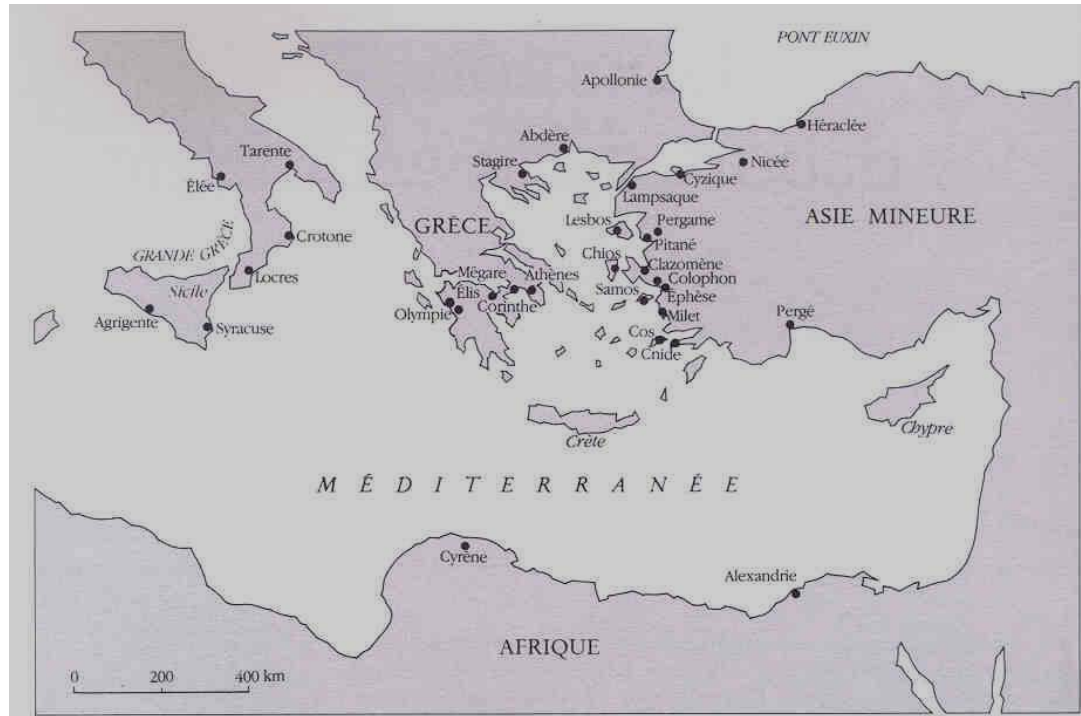
-1760	écriture
-1650	vases de bronze
-1102	(?) manuels d'arithmétique
- 479	mort de Confucius
- 400	débuts de l'alchimie
- 217	achèvement de la grande muraille
- 202	fondation de la dynastie des Han
-120	production du fer dans 49 usines gouvernementales
I s	moulin à eau (souffleries métallurgiques); rouet à main
85	première (?) utilisation de la poudre (feux d'artifice)
100	fabrication du papier; harnais à collier
121	mention de la pierre magnétique
130	sismographe de Zhang Heng
III s	brouette
VI s	co-fusion de la fonte et du fer
725	Yi Xing et Liang Ling-zen: horloge hydromécanique à échappement
770	xylographie pour la diffusion des textes bouddhiques

autres

-1750	ensemble mégalithique de Stonehenge
-1500	(ou avant) fer chez les Hittites
-1100	(ou 1360?) alphabet phénicien
-1000	monte du cheval
-1000	David roi d'Israël
-900	le fer à Hallstatt
-814	fondation de Carthage
-530	Bouddha

Le cosmos des Grecs

Le « miracle grec »



Une description « laïcisée » du monde, une science abstraite, argumentative, rigoureuse (modèle de la géométrie)

cf. l'alphabet, la monnaie, la justice et la politique dans les Cités-États

Les « philosophes »

Les philosophes présocratiques (VI^{ème} – V^{ème} siècles)

- les physiologues ioniens : un « principe » unique à la base de toute chose
Thalès de Milet (v. -625, v. -550), Anaximandre, Anaximène, Héraclite d'Éphèse (v. -540, v. -470)
- Pythagore (v. -580, v. -500) et les pythagoriciens : « *les nombres sont tout* »
- Les Éléates : Xénophon, Parménide (v. -515, v. -450), Zénon : ontologie (doctrine de l'Être)
- Les pluralistes : Empédocle (v. -490, v. -435) : les quatre éléments (feu, air, terre, eau), sous l'action de l'« Amour » et la « Haine », Anaxagore (v. -500, v. -428)
- Les atomistes : Leucippe, Démocrite (v. -460, v. -360)
- Les sophistes : Protagoras, Gorgias, Prodicos
- La collection hippocratique : Hippocrate de Cos (v. -470, v. -377); médecins des École de Cos (plus « théoriciens ») et de Cnide (plus « empiriques »)

Socrate (-470, -399)

Platon (v. -428, -348) et l'Académie (-387) : réalisme des « Idées » : notre monde est le reflet du monde « réel » - archétype : le triangle; « *Que nul n'entre ici s'il n'est géomètre* ».

Aristote (-384, -322) et le Lycée (-335)

logique, métaphysique, biologie, cosmologie, physique, politique, éthique, psychologie
« pourquoi ? » plutôt que « comment ? » (finalisme, influence d'une approche « biologique »)
physique du « bon sens », de l'évidence.

Les autres écoles : stoïcisme, épicurisme (atomistes), cyniques, sceptiques.

Le cosmos d'Aristote et sa physique

Cosmologie appuyée sur la physique, elle-même fondée sur la logique.

1. distinction fondamentale entre mondes *sublunaire* et *supralunaire*;

2. deux sortes de mouvements :

- mouvements « *naturels* » des corps vers leurs « *lieux naturels* », qui découlent de leur « *nature* » ;
- mouvement « *forcés* », ou « *violents* »
- + différence fondamentale entre repos (au sein du « lieu naturel ») et mouvement.

❑ Monde sublunaire :

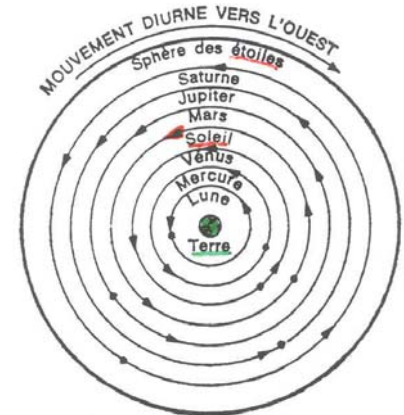
- Terre sphérique, immobile au centre de l'Univers;
- monde du changement, de la corruption, de l'imperfection; 4 éléments (terre, eau, air, feu);
- mouvements naturels imparfaits, vers le haut (corps « graves », comportant une grande composante de terre) et vers le bas (corps légers, ignés); les corps plus denses ou plus lourds tombent plus vite;
- les mouvements « violents » ne persévèrent que tant qu'un moteur agit (« pas d'effet sans cause » - mouvement dû à l'« horreur du vide » qui se créerait derrière le corps), et ils sont inversement proportionnels à la résistance du milieu;
- mouvements forcés et naturel ne peuvent se combiner.

❑ Monde supralunaire :

- univers sphérique, plein (milieu = « quintessence »), complètement contenu à l'intérieur de la sphère des étoiles (*rien* à l'extérieur, pas même le vide);
- astres « parfaits », immuables, animés de mouvements circulaires parfaits (car sans commencement ni fin) sur des sphères cristallines concentriques ;
- pour les planètes, combinaison de mouvements circulaires (sphères d'Eudoxe).

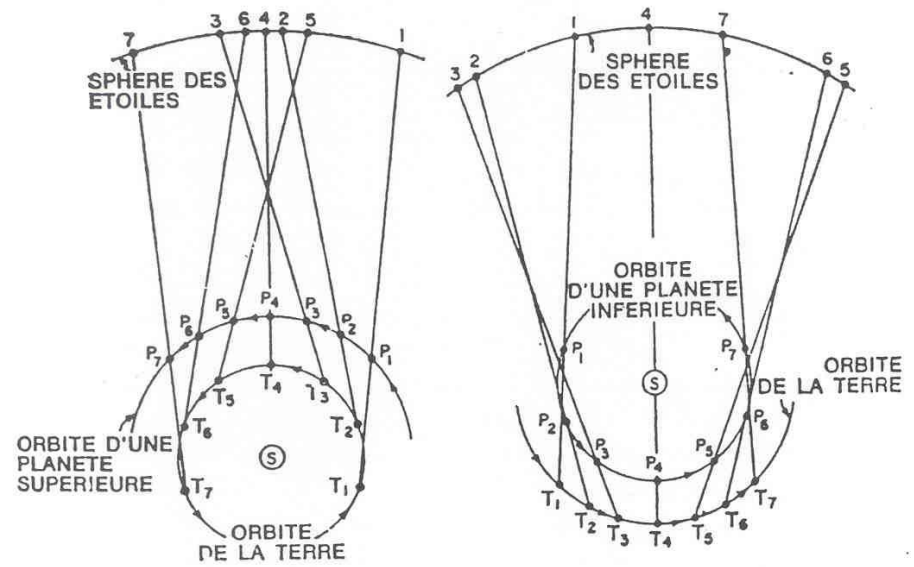
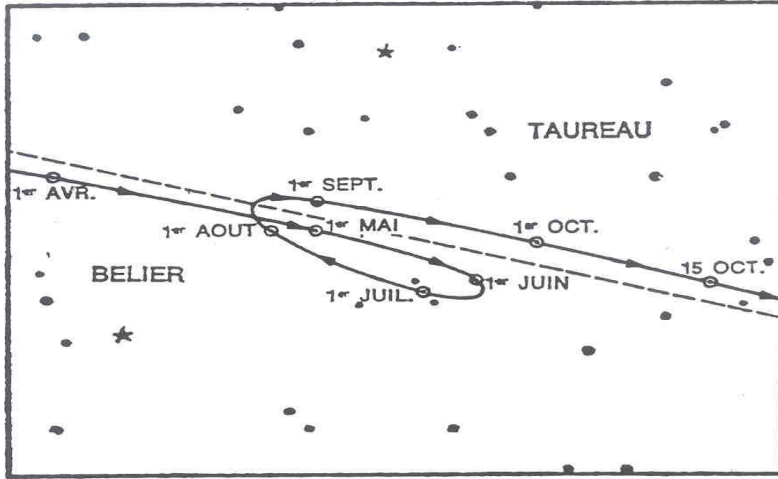
❑ Impossibilité du vide car mouvement y serait impossible

- mouvements naturels : pas de haut, pas de bas, pas de centre)
- mouvements violents : seraient infiniment rapides, car pas de résistance du milieu.

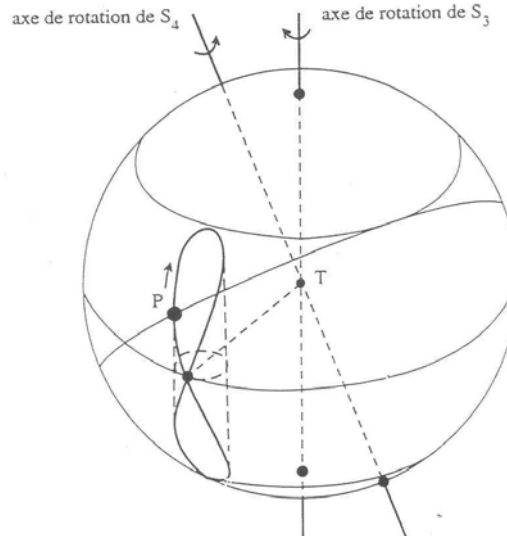


Les sphères concentriques d'Eudoxe

Stations et rétrogradations

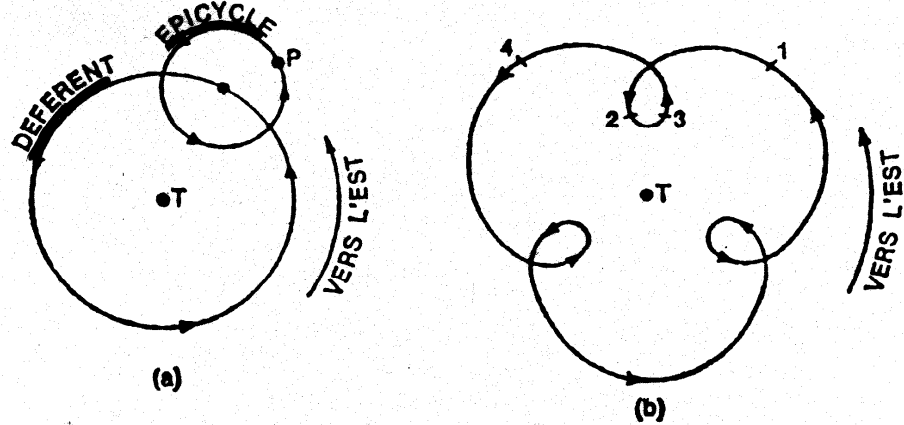


Combinaison des mouvements des sphères

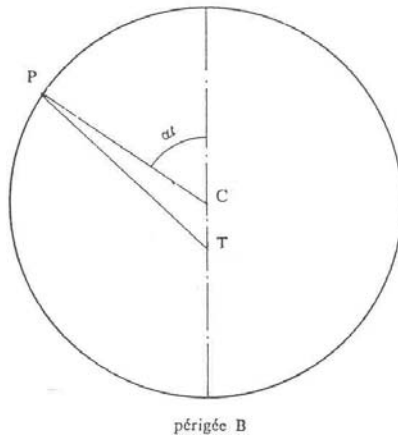


L'astronomie de Ptolémée

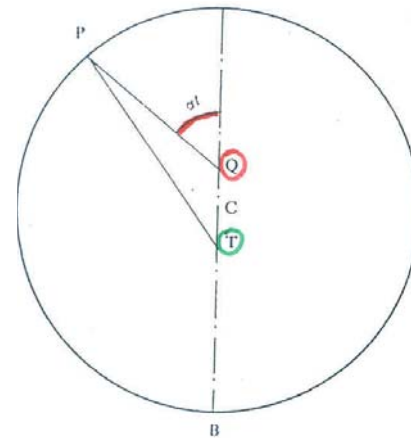
Déférent et épicycle
(Hipparque – 161-125)



Excentrique



Point équant



NB : ce système « sauve les phénomènes », mais abandonne les sphères matérielles d'Aristote

Remarque : le système héliocentrique d'Aristarque de Samos est en fait moins naturel que celui d'Eudoxe et Ptolémée (pas de parallaxe visible → dimensions immenses de l'univers) – pas d'anachronisme !

Alexandrie et le monde hellénistique

Le Musée et la Bibliothèque d'Alexandrie, fondés par Ptolémée Sôter, v. -305

- ✓ *Mathématiques* : géométrie : Euclide (-322, -285), Archimède (-287, -212) , Apollonios (v. -262, v. -180), Ménélaus (v. 100); théorie des nombres : Diophante (v. 270), lamblique (280, 330)
- ✓ *Astronomie* : Eudoxe (-408, -355), Héraclide (-388, -310) , Aristarque de Samos (-310, -230), Hipparque (-161, -125), Ptolémée (90, 168)
- ✓ *Géographie* : Ératosthène (-284, -192) , Hipparque, Ptolémée, Strabon (-58, +25)
- ✓ *Optique* : Ptolémée
- ✓ *Physique* : Archimède (statique)
- ✓ *Médecine et physiologie* : Hérophile, Érasistrate; plusieurs écoles (méthodique, empirique, éclectique...)
- ✓ *Techniques* : Archytas (v. -430, v. -348), Archimède, Philon de Byzance (v. -250), Héron d'Alexandrie (v. 150) malgré de grandes réalisations (Phare d'Alexandrie, machines de siège), mépris affiché pour le travail manuel et les techniques – influence de l'esclavage ?

Bien souvent, l'astronome et le physicien prennent le même chapitre de la Science pour objet de leurs démonstrations; ils se proposent, par exemple, de prouver que le soleil est grand ou que la terre est sphérique.

Mais dans ce cas, ils ne procèdent pas par la même voie; le physicien doit démontrer chacune de ses propositions en les tirant de l'essence des corps, de leur puissance, de ce qui convient le mieux à leur perfection, de leur génération, de leur transformation; l'astronome au contraire les établit au moyen des circonstances qui accompagnent les grandeurs et les figures, des particularités qualitatives du mouvement, du temps qui correspond à ce mouvement.

Souvent, le physicien s'attachera à la cause et portera son attention sur la puissance qui produit l'effet qu'il étudie, tandis que l'astronome tirera ses preuves des circonstances extérieures qui accompagnent ce même effet.

Simplicius, philosophe aristotélicien, env. 500

Dans l'Alexandrie hellénistique, cosmopolite, accent mis sur « *sauver les apparences* » (i.e. décrire les phénomènes) - contraste avec la culture « hellénique »

La fin de l'Antiquité

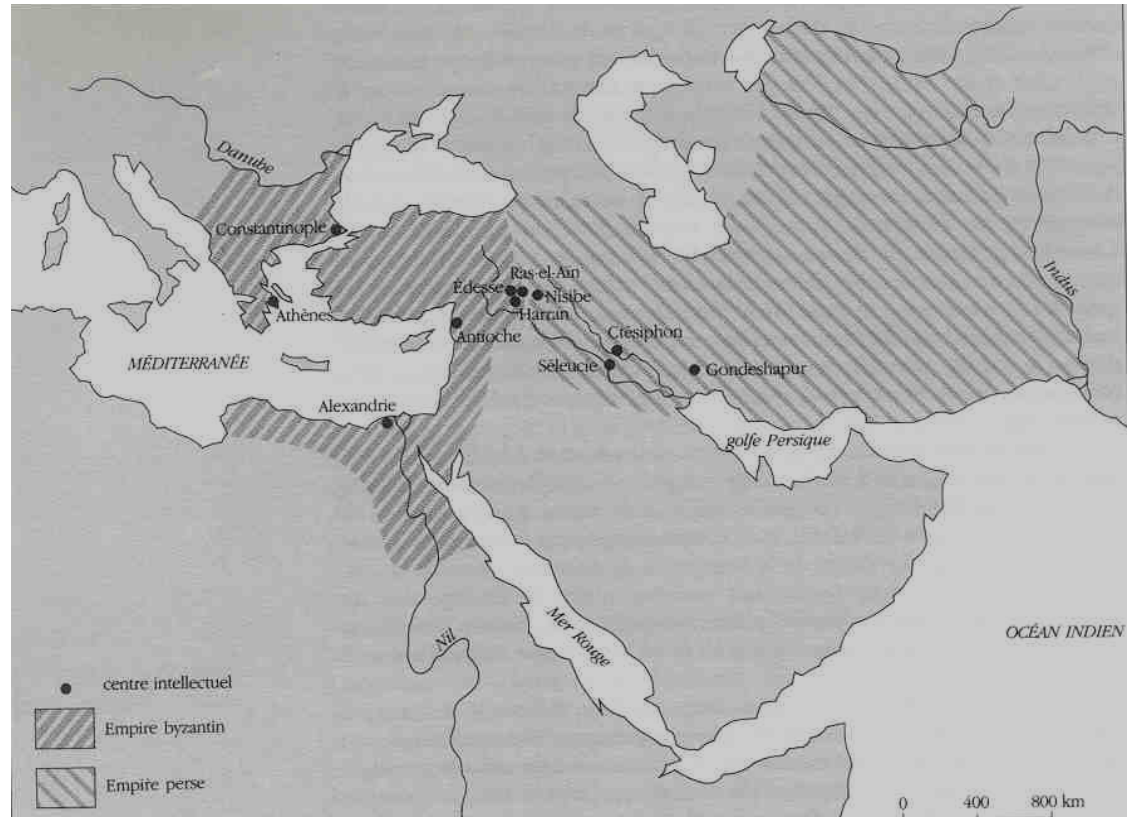
Peu de contributions « romaines » aux sciences, sauf en médecine : Galien (131, 200) et en géographie : Strabon (-58, +25)

Désintérêt / hostilité du christianisme (Edith de Constantin, 313)

- 412 : Meurtre d'Hypatie à Alexandrie
- 529 : Fermeture de l'École païenne d'Athènes par Justinien; fuite des philosophes en Perse

A Byzance: théologie, politique, droit, mais peu de sciences naturelles ou mathématiques

Le Proche-Orient à la veille de l'avènement de l'Islam



L'Antiquité (1)

Grèce

repères généraux

- 1600 civilisation minoenne (-2000, -1500)
- 1400 civilisation mycénienne (-1400, -1200)
- 1200 "siècles obscurs" (-1200, -800)
- 800 Homère
- 776 première olympiade
- 750 vagues de colonisation grecque (-750, -450) (Marseille: -600)
- 594 Solon législateur à Athènes
- 499 Révolte de l'Ionie contre les Perses; Guerres médiques (-492, -479): Marathon (-490)
- 443 Périclès stratège (-443, -429); Sophocle: *Antigone*
- 323 mort d'Alexandre

philosophes présocratiques (VIe - Ve siècles)

les physiologues ioniens

- Thalès de Milet (ca. -625, ca. -550)
- Anaximandre (ca. -610, ca. -545)
- Anaximène (ca. -580, ca. -530)
- Héraclite d'Éphèse (ca. -540, ca. -470)

l'école pythagoricienne

- Pythagore de Samos (ca. -580, ca. -500)
- Alcméon de Crotona (fin VIe, Vs)
- Hippocrate de Chio (Vs)
- Philolaos (ca. -470, fin Vs)

l'école d'Élée

- Xénophane de Colophon (ca. -570, ca. -480)
- Parménide (ca. -515, ca. -450)
- Zénon d'Élée (ca. -490, ca. -425)

les pluralistes

- Empédocle d'Agrigente (ca. -490, ca. -435)
- Anaxagore de Clazomènes (-500, -428)

les atomistes

- Leucippe (ca. -470, ca. -390)
- Démocrite d'Abdère (ca. -460, ca. -360)

les sophistes

Protagoras, Gorgias, Prodicos, Hippias

la collection hippocratique

Hippocrate de Cos (ca. -460, ca. -377)

philosophes

- 470 Socrate (-470, -399)
- 428 Platon (-428, -348)
- 384 Aristote (-384, -322)
- 341 Épicure (-341, -270) atomisme matérialiste; -306: École d'Épicure à Athènes
- IV s Stoïcisme

institutions

- 387 Fondation de l'Académie par Platon
- 335 Fondation du Lycée par Aristote; ses successeurs: Théophraste (-373, -287), Straton
- 305 Fondation de la Bibliothèque et du Musée d'Alexandrie par Ptolémée Sôter

astronomes

- 408 Eudoxe de Cnide (-408, -355) sphères homocentriques (27)
- 336 Callipe (fl -336 à -323) 34 sphères homocentriques
- 388 Héraclide du Pont (-388, -310) rot. diurne de la Terre; Mercure et Vénus autour du Soleil
- 310 Aristarque de Samos (-310, -230) héliocentrisme; distance Terre - Lune - Soleil
- 284 Ératosthène (-284, -192) mesure de la circonférence terrestre
- 161 Hipparque (-161, -125) précession des équinoxes; excentriques et épicycles; mesures de l'année
- 90 Ptolémée (90, 168) l'*Almageste*; aussi géographie, optique

L'Antiquité (2)

Rome

mathématiciens

- 322 Euclide (-322,-285) les *Éléments*
- 287 Archimède (-287,-212) spirale; volumes; grands nombres; "*La Méthode*"
- 262 Apollonios de Perga (ca. -262, ca. -180) sections coniques
- 100 Nicomaque de Gérase (fl. ca. 100) théorie des nombres
- 100 Ménélaus (fl. ca. 100) Alexandrie; géométrie sphérique
- 270 Diophante (fl. 270) théorie des nombres; équations indéterminées
- 280 Iamblique (280,330) théorie des nombres
- 280 Pappus (280,340) *Collection mathématique*

ingénieurs

- 430 Archytas de Tarente (ca. -430, ca. -348) vis, poulie, colombe volante
- 346 Philon d'Athènes (fl. -346) traité de poliorcétique
- 296 Ctésibios (-296,-228) clepsydre à soupapes, orgue hydraul., pompe aspirante et soufflante
- 287 Archimède (-287,-212) machines de guerre
- 279 le phare d'Alexandrie
- 250 Philon de Byzance (fl. -250) pneumatique, automates, clepsydres, machines de guerre
- 250 engrenages à roues dentées
- 150 Héron d'Alexandrie (fl. -150??) "Syntaxe mécanique"

repères généraux

- 754 fondation de Rome
- 264 première guerre punique
- 146 destruction de Carthage
- 58 début de la guerre des Gaules
- 14 mort d'Auguste
- 134 diaspora des Juifs
- 175 Marc-Aurèle (121,161,180): *Pensées*
- 217 Mani (217,266)
- 313 Edith de Milan (Constantin)
- 395 Mort de Théodose; dislocation de l'Empire
- 410 sac de Rome par Alaric
- 472 fin de l'Empire d'Occident
- 527 Justinien empereur (527,565)

savants

- 58 Strabon (-58, +25): géographe
- 23 Pline l'Ancien (23, 79): encyclopédiste
- 131 Gallien (131, 200): médecin
- NB aussi les savants "grecs" de l'Empire: Ptolémée, Héron, Nicomaque, Ménélaus, Diophante, Iamblique, Pappus, etc. !
- 490 Jean Philopon (490,566) critique de la physique et de la cosmologie d'Aristote

techniques

- 100 aqueduc avec deux siphons à Pergame
- 1 s soufflet pour les fours métallurgiques à Rome
- 38 moulin à eau dans le palais de Mithridate
- 20 verre soufflé à Rome

la fin de la science grecque

- 427 saint Augustin (354,430) *La Cité de Dieu*
- 412 Meurtre d'Hypatie à Alexandrie (370,412)
- 529 fermeture de l'école païenne d'Athènes par Justinien

Le Moyen-Âge
arabo-musulman;

le Moyen-Âge
occidental

L'Islam

Mohammad (mort en 632); 622 : Hégire

L'expansion

635 : prise de Damas; 638 : Jérusalem; 640 : Alexandrie; 673 : assaut (repoussé) contre Constantinople;
693 : conquête de l'Afrique; 711 : conquête de l'Espagne; Sicile

Dynastie des Ommeyyades : 650-750 : Damas

Dynastie des Abbassides : à partir de 750 : Bagdad (pris et détruit par les Mongols en 1258)

Ommeyyades d'Espagne (Al-Andalus) : Cordoue

Sur les traces de la conquête, assimilation extrêmement rapide puis enrichissement de la science et de la philosophie grecques (+ contacts avec l'Inde – astronomie, mathématiques)

Première phase : traductions (du grec et du syriaque) - Unayn ibn Ishaq (808, ap. 856)

832 : fondation de la Maison de la Sagesse à Bagdad, par Al-Mamoun (philosophie mu'tazilite)

Confrontation des textes / vérification des données

Les Arabes ont été les maîtres et les éducateurs de l'Occident latin (...), et non seulement et simplement ainsi qu'on le dit trop souvent, intermédiaires entre le monde grec et le monde latin (...). C'est qu'il ne suffit pas de savoir du grec pour comprendre Aristote ou Platon (...) il faut encore savoir de la philosophie (...).

A. Koyré

La science arabo-musulmane

Remarques:

- musulmans mais aussi chrétiens et juifs (Maimonide)
- Arabes mais aussi Perses, Asie centrale, Espagne, ...

Astronomie

importance pratique : début du Ramadan (calendrier lunaire), direction de La Mecque (prières, mosquées), heures des prières

cadre théorique : science hellénistique (« Almageste » de Ptolémée) + retour à Aristote + apports indiens

→ perfectionnement des observations et des instruments (astrolabe, grands observatoires) → tables

NB astronomie stimule le développement des mathématiques (trigonométrie) et de l'optique

Mathématiques

fondation de l'algèbre (nombres « indiens » et zéro; équations du deuxième degré; résolution géométrique de l'éq. du 3^{ème} degré) ;

trigonométrie (sinus < Inde)

géométrie (postulat des parallèles; algébrisation de la géométrie)

Optique

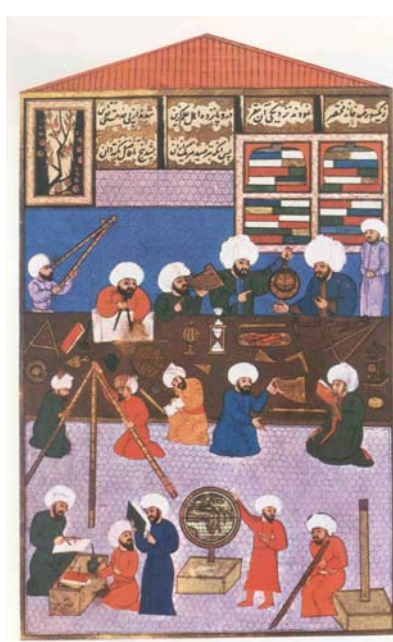
Médecine, hygiène publique

Techniques, en particulier liées à la chimie (parfumerie, distillation, etc.), à l'irrigation, à l'agriculture

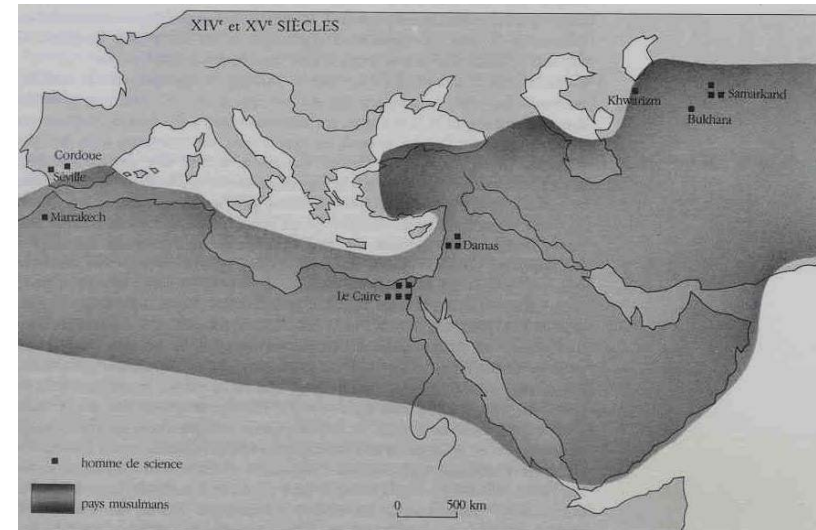
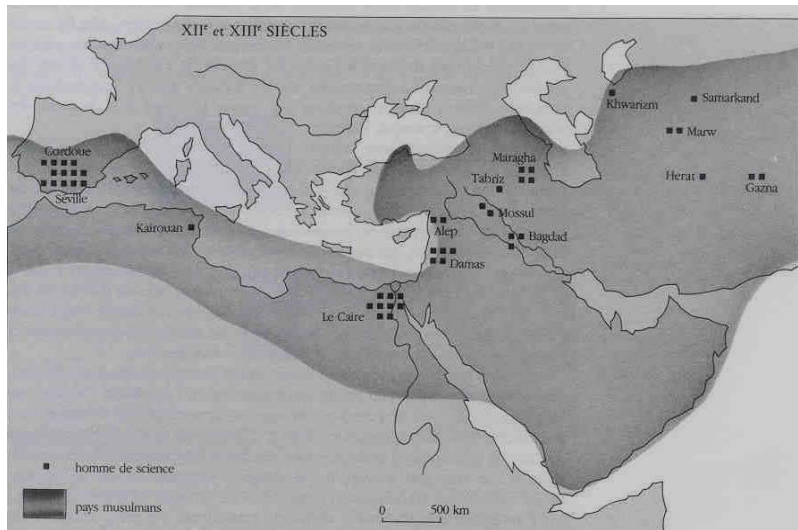
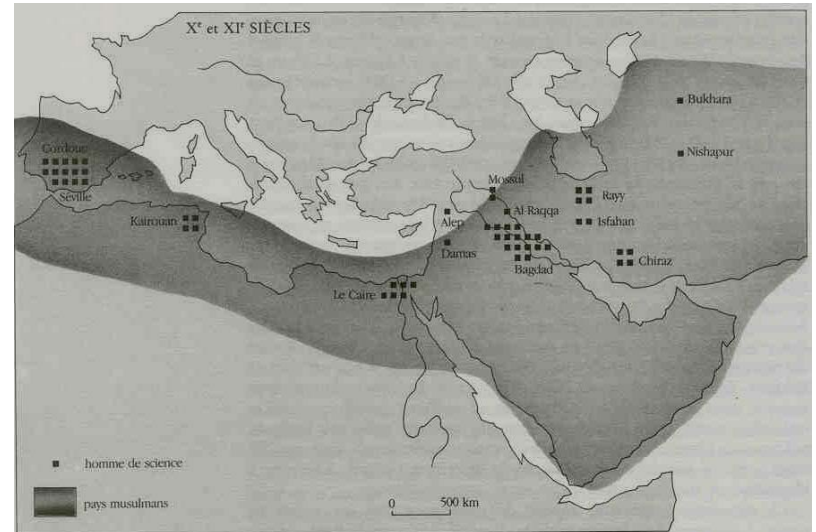
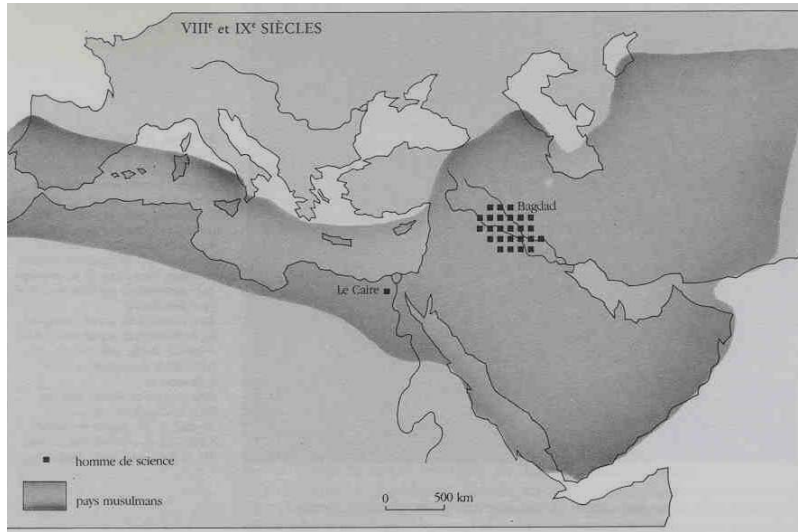
Classification des sciences : sciences « théoriques » et sciences « pratiques »

Astronomie – astrologie

mathématiques – calcul



Savants et lieux de savoir



Moyen-âge arabo-musulman

la conquête

- 622 Hégire
- 635 prise de Damas
- 638 prise de Jérusalem
- 640 prise d'Alexandrie
- 673 assauts contre Constantinople (feu grégeois)
- 693 conquête de l'Afrique (Carthage tombe en 698)
- 711 invasion de l'Espagne
- 732 Poitiers
- 827 les Arabes en Italie du Sud
- 929 Abd el Rahman III (903,986) sultan et calife de Cordoue
- 1230 construction de l'Alhambra de Grenade
- 1258 les Mongols prennent Bagdad

philosophes

- 529 Khosroes accueille à Ctésiphon les philosophes chassés d'Athènes
- 808 Hunayn ibn Ishaq (808,>856) (Bagdad) traductions du grec et du syriaque
- 832 fondation de la Maison de la Sagesse à Bagdad par le calife Al-Mamoun (786,833)
- 796 al-Kindî (796,866 ou 873) (Bagdad) pas d'opposition entre philosophie et vérité prophétique (connaissance des philosophes grecs)
- 860 Rhazès (Al-Razi) (860?,923?) (Iran, Bagdad) médecin, philosophe empiriste
- 872 Al-Farabi (Alfarabius) (872,950) (Turkestan, Damas, Alep) commentateur d'Aristote, néo-platonicien, maître d'Avicenne
- 980 Avicenne (Ibn Sîna) (980,1037) (né à Boukhara) médecin, philosophe, esprit universel
- 1126 Averroès (Ibn Rush) (1126,1198) Aristote et la "double vérité", rationnelle et révélée
- 1135 Maïmonide (1135,1204) (Cordoue) médecin juif; *Livre des Égarés*

astronomes, mathématiciens, etc.

- 800 Geber (Jabir ibn Hayyam) (fl. 800) alchimiste
- 800 Al-Khwarizmi (fl. 800,847?) (Bagdad) équations quadratiques; système décimal
- 861 Al-Farghani (?,>861) astronome, trigono. (tangente)
- 877 Al-Battani (Albatenius) (877?,918?) astronome (excentricité de l'orbite solaire)
- 903 Abd al-Rahman (903,986) *Livre des étoiles fixes*
- 965 Ibn al-Haïtham (Al-Hazen) (965,1039) (Le Caire) astronomie, optique
- 973 Al-Birûni (973,1030?) (né à Khwarizm, Inde) astronomie, minéralogie, géologie
- 1029 Ibn-Sa-id (1029,1070) Tables tolédanes
- 1048 Omar Khayyam (1048,1131) (Nishapur) mathématicien, astronome, philosophe, poète
- 1099 Al Edrisi (1099,1175) (Cordoue) géographe
- 1201 Nasir Eddin Al-Tusi (1201,1274) math., minéralogie
- 1206 Al Jazari : *Traité de la théorie et de la pratique des arts mécaniques*
- 1270 observatoire de Maragha
- 1288 Levi ben Gerson (1288,1344) tables astronomiques
- 1320 mort de Al-Farizi (? ,1320) optique, math.
- 1460 destruction de l'observatoire de Samarkand - "fin de la science arabe"

L'Occident médiéval

À la fin de l'« Antiquité tardive » (VII^{ème} siècle), les « siècles obscurs » (malgré la « petite Renaissance » carolingienne) :

insécurité généralisée, invasions, morcellement et faiblesse du pouvoir central, recul de la population et de la production (*très* faible productivité), abandon des villes (depuis plusieurs siècles), effondrement de l'instruction, pertes des sources antiques

« Redémarrage » aux XI^{ème} - XII^{ème} siècles

✓ innovations techniques (souvent Chine → Moyen-Orient) :

énergie: collier d'épaule, dispositif en file, ferrage des chevaux; moulins

agriculture: assolement triennal (→ avoine → chevaux)

industrie métallurgique (→ équipement agriculture)

transports par route et maritime (gouvernail d'étambot, voile latine en Méditerranée).

✓ → progrès de la productivité agricole et de la démographie → de la production globale

✓ renforcement du pouvoir politique (implications sur la production, sur le commerce)

✓ (ré-)urbanisation : le « *chantier urbain* » (J. Le Goff) – les cathédrales (Chartres, Paris, Reims, etc.)

Besoin de clercs instruits → écoles cathédrales (Chartres)

Découverte de la science antique et arabe : traductions d'Euclide, Ptolémée, Aristote, Al-Khwarizmi, Avicenne, Archimède, Galien, etc., à Tolède (arabe / hébreux / espagnol / latin) et en Sicile

L'optimisme des temps :

Nous sommes comme des nains debout sur les épaules de géants, de sorte que nous pouvons voir plus de choses qu'eux, et plus loin, non parce que notre vue est plus perçante ou notre taille plus haute, mais parce que nous pouvons nous élever plus haut, grâce à leur stature de géants.

Bernard de Chartres, XI^{ème} siècle

Abélard (1079,1142) et la scolastique : critique des textes, argumentation, la *raison* au service de la foi

La naissance des universités

Résistances (Bernard de Clairvaux contre Abélard) !

*Autant de docteurs autant d'erreurs, autant d'auditoires autant de scandales, autant de places publiques autant de blasphèmes.
Marchands de mots!*

Etienne de Tournai, abbé de Sainte-Geneviève, fin XII^{ème} s.

Mais une nouvelle corporation s'impose sur le « chantier urbain » : les universités

première moitié du XII^{ème} siècle : Bologne, Paris, Oxford

XIII^{ème} : essor général : Padoue, Naples, Toulouse, Montpellier, etc.

Facultés des Arts,

de théologie, de médecine, de droit



Arts : enseignement général :

trivium : syntaxe, logique, rhétorique

quadrivium : géométrie, astronomie, arithmétique, musique

Les universités

Enthousiasme pour Aristote, connu en particulier à travers Averroès (Ibn Rush, 1126-1198)

Conciliation difficile avec la doctrine chrétienne (éternité du monde, eucharistie, miracles, survie de l'âme)

- philosophie chrétienne appuyée sur Aristote des dominicains Albert le Grand (1206-1280) et Thomas d'Aquin (1225-1274) (« Somme théologique », 1265)
- la crise (les « artistes » parisiens, Siger de Brabant)
 - doctrine de la double vérité, philosophique et théologique
 - dissolution des âmes individuelles en une « âme intellectuelle » commune à toute l'humanité

1277 : condamnation des énoncés aristotéliens limitant la toute-puissance de Dieu

Conséquences importantes :

- criticisme (Duns Scot, Guillaume d'Ockham) : la raison ne soutient plus la croyance
- empirisme (savants d'Oxford: mathématiques, optique)
- libérer une réflexion sortant des carcans aristotéliens (Parisiens : Buridan, Nicole Oresme)



L'Occident chrétien (1)

- 500 baptême de Clovis
- 800 sacre de Charlemagne
- 981 découverte du Groenland
- 1054 Schisme d'Orient
- 1085 reconquête de Tolède
- 1204 prise de Constantinople par la IVe Croisade
- 1209 croisade contre les Albigeois
- 1216 confirmation des dominicains
- 1223 confirmation des franciscains
- 1227 mort de Gengis Khan (1160,1227)
- 1231 création de l'Inquisition dominicaine
- 1345 début de la Guerre de Cent Ans
- 1347 la peste en France

les siècles obscurs

- 480 Boèce (480,525)
- 570 Isidore de Séville (570,636)
- 672 Bède le Vénérable (672,735) - calendrier
- 800 fondation de l'École de médecine de Salerne

l'essor

- VII s Moulins à vent sur les plateaux iraniens
- 725 étrier à pied à Byzance
- IX s ferrure des chevaux en Occident et à Byzance, selle à arçons, mors
- X s moulins à vent en Espagne; début du collier d'épaule, de la charrue à versoir
- XI s alambic pour la distillation de l'alcool à Salerne; usage de la quenouille en Allemagne
- 1050 débuts de la boussole; moulins à chanvre, moulins foulons
- XII s expansion de l'attelage moderne (collier d'épaule, dispositif en file)
expansion du moulin à eau
développement de l'industrie minière
début de l'assolement triennal
progrès de la navigation (gouvernail d'étambot, voile latine en Méditerranée)

- 1150 début de la croissance démographique, des défrichements, de la culture intensive; moulin à tan; essor urbain "l'abondance des hommes"
- 1160 production d'acide nitrique; construction de digues contre la mer en Hollande
- 1170 introduction du papier
- 1184 pavage des rues à Paris
- emploi de la houille dans les forges

les grands chantiers, les techniciens

- 1120 Chartres
- 1163 Notre-Dame de Paris
- 1210 Reims
- 1250 Villard de Honnecourt (fl. 1250)

les traducteurs

- 1065 Constantin l'Africain (fl. 1065,1085) médecine
- 1090 Adélarde de Bath (1090,1160)
- 1114 Gérard de Crémone (1114,1187)
- 1135 Jean de Séville (fl. 1135,1153)
Hermann de Carinthie (fl. 1138, 1143)
Dominique Gundisalvo, Platon de Tivoli, Robert de Chester, Pierre Alfonso, Savasorda, Alfred l'Anglais, Michael Scot, Hermann l'Allemand

L'Occident chrétien (2)

les savants

- 940 Gerbert d'Aurillac, futur Silvestre II (940?, 1003)
- 990 fondation de l'École cathédrale de Chartres par Fulbert
- 1079 Abélard (1079, 1142) (Paris) méthode scolastique
- 1170 Leonardo Fibonacci (Léonard de Pise) (1170, 1245)
chiffres arabes, algèbre
- 1175 Robert Grosseteste (ca. 1175, 1253) (Oxford) optique
- 1206 Albert le Grand (1206, 1280) (Docteur de l'Église)
Aristote + néoplatonisme + Arabe
(al)chimie, botanique, zoologie
- 1214 Roger Bacon (1214, 1294) ("Le Docteur admirable")
(Oxford) optique, acoustique, alchimie
- 1225 Thomas d'Aquin (1225, 1274) ("Le Docteur angélique")
(Paris) *Somme théologique*
- (1265) aristotélisme
- 1230 Witelo (1230, 1275) optique, réfraction
- 1230 Guillaume de Moerbeke (1230, 1286) traductions
d'Aristote (du grec)
- 1235 Raymond Lulle (1235, 1315) alchimie; mention de
l'acide nitrique
- 1252 Tables alphonsines (1270) (Alphonse de Castille)
(Judas ben Moses, Isaac ibn Sid)
- 1256 Pierre de Maricourt: *De Magnete*
- 1290 Bradwardine (1290, 1349) (Oxford) mécanique
- 1300 Jean Buridan (1300, 1358) (Paris) mécanique
- 1302 Nicole Oresme (1302, 1382) (Paris) mécanique

les universités

- 1119 Bologne (refondation 1187) (droit)
- 1120 prémisses de l'université de Paris (Arts, théologie)
(statuts de Philippe-Auguste en 1215)
- 1130 prémisses de l'université d'Oxford (statuts en 1214)
- 1179 Concile de Latran: une école auprès de chaque cathédrale
- 1222 Padoue
- 1229 Toulouse (contre l'hérésie)
- 1231 1229-1231: grève de l'université de Paris; les Franciscains y
obtiennent une chaire
- 1257 Collège de Pierre de Sorbon à Paris
- 1277 Condamnation de 219 propositions aristotéliennes par
Etienne Tempier, évêque de Paris
- 1289 Montpellier (médecine)
- 1308 Cracovie
- 1386 Heidelberg
- 1426 Louvain

nouvelles techniques

- 1200 > généralisation de la boussole marine
- 1224 rouet à Venise et en France
- 1271 Marco Polo en Chine (1271, 1295)
- 1285 lunettes pour presbytes et hypermétropes
- 1320 premières horloges à poids
- 1327 Guy de Vigevano: recueil de machines de guerre
- 1337 premières armes à feu
- 1346 première utilisation de l'artillerie, à la bataille de Crécy

La révolution copernico-galiléenne

La Renaissance

Au XIII^{ème} siècle, l'aristotélisme thomiste s'impose comme la doctrine officielle de l'Église.

Mais progressivement, dégénérescence de la scolastique, ramenée à des exercices purement formels;
dégénérescence des universités

XIV^{ème} siècle : crise économique (baisse des rendements liée à l'augmentation trop forte de la population),
famines, épidémies (grande peste), guerres (guerre de Cent Ans)

Reprise au XV^{ème}, d'abord en Italie (fin du XIV^{ème})

- essor du capitalisme bancaire et industriel
- renforcement des États
- progrès techniques
 - bielle - manivelle → scie hydraulique, pompes aspirantes et soufflantes, moulins.
 - mines : vive reprise après 1425: machinisme; utilisation de la poudre; grandes exploitations.
 - métallurgie : soufflerie hydraulique, marteau hydraulique, laminoirs, hauts-fourneaux (Liège, dernier quart du XVe siècle)
→ fonte, tréfilerie. *"L'âge du métal commence véritablement à cette époque"* (B. Gille)
 - transports routiers, fluviaux, maritimes (caravelle, galion; cartes; boussole).
 - techniques militaires : artillerie mobile; armes à feu portatives; nouvelles techniques de fortification.
 - imprimerie : de 1439 à 1500: 35 000 éditions, de 20 millions d'ex. (77% en latin, 45% de textes religieux).

Grands voyages de découverte :

route des Indes par le contournement de l'Afrique (Portugais)

découverte de l'Amérique (1492), pillage de son or (Espagnols)

Essor du capitalisme (banques italiennes), du commerce

Des princes brillants (Médicis à Florence, François I^{er}, les grands papes de la Renaissance) s'entourent
d'artistes, de poètes, d'érudits, d'ingénieurs qui font resplendir leur gloire

Libération des consciences : en 1517, Luther affiche ses 95 thèses contre les indulgences, prélude à la Réforme protestante.

De nouveaux intellectuels apparaissent donc, loin de l'université :

- l'humaniste : érudit, homme de cour : retour critique (philologie) aux textes antiques (Érasme), en opposition au rationalisme desséché de la scolastique; exaltation de Platon, « le Poète », opposé à Aristote
- l'artiste et l'ingénieur : souvent le même homme (Léonard de Vinci), art et science entremêlés : planches anatomiques de Vésale, planches botaniques, études sur la perspective (italiens, Dürer)

Frontispice du « De la fabrique du corps humain », de Vésale (1543)



Un sens aigu de la nouveauté apparaît – « tout est possible »

- à la fois curiosité sans bornes et esprit d'aventure
- et crédulité sans bornes (magie, sorcellerie, alchimie)...

La Renaissance (1)

événements politiques

- 1411 révolte de Jean Huss (1369,1415)
- 1429 Charles VII sacré à Reims; Jeanne d'Arc livrée aux Anglais
- 1434 Cosme de Médicis (1389,1464) maître de Florence
- 1453 prise de Constantinople par les Turcs
- 1455 début de la guerre des Deux-Roses
- 1481 institution de l'Inquisition en Espagne
- 1492 expulsion des Juifs d'Espagne; chute de Grenade
- 1494 Savonarole (1452,1498) maître de Florence
- 1513 Machiavel (1469,1527) (Florence): *Le Prince*
- 1513 mort de Jules II, Léon X pape
- 1516 premier esclave africain en Amérique
- 1517 95 thèses de Luther contre les Indulgences
- 1519 Charles-Quint empereur (1500,1558)
- 1531 schisme d'Henri VIII
- 1534 Ignace de Loyola fonde la Compagnie de Jésus
- 1545 Concile de Trente (Contre-Réforme) (1545,1563)
- 1547 mort de François I; mort d'Henri VIII; avènement d'Ivan IV le Terrible
- 1572 massacre de la Saint-Barthélémy
- 1588 défaite de l' "Invincible Armada"

littératures nationales

- 1265 Dante (1265,1361) (Florence)
- 1304 Pétrarque (1304,1374)
- 1313 Boccace (1313,1371) *Le Decameron* (1355)
- 1387 Chaucer: *Canterbury Tales*
- 1431 François Villon (1431,>1463)
- 1494 Rabelais (1494,1553) *Gargantua* (1532)
- 1522 du Bellay (1522,1561) *Défense et Illustration de la langue française* (1549)
- 1524 Ronsard (1524,1585)
- 1530 La Boétie (1530,1563)
- 1533 Montaigne (1533,1592) *Les Essais* (1580)
- 1547 Cervantès (1547,1616)
- 1564 Shakespeare (1564,1616)

les arts

en Italie ...

- 1266 Giotto (1266?,1337) (Florence)
- 1285 Duccio (fl. 1285,1308?) (Sienne)
- 1377 Brunelleschi (1377,1446) (Florence) coupole de la cath. de Florence (1420,1436)
- 1386 début de la cathédrale de Milan; "rencontre des architectes"
- 1386 Donatello (1386,1466) statue équestre de Gattamelata à Padoue (1453)
- 1400 Paolo Uccello (1400?,1475) (Florence) recherches sur la perspective
- 1401 Masaccio (1401,1428) (Florence)
- 1416 Piero della Francesca (1416-20,1492) recherches géométriques
- 1445 Boticelli (1445,1510) (Florence)
- 1452 Léonard de Vinci (1452,1519)
- 1475 Michel-Ange (1475,1564)
- 1483 Raphaël Sanzio (1483,1520)
- 1490 Le Titien (1490,1576)
- 1567 Monteverdi (1567,1643)

... et en Europe

- 1411 Les frères Limbourg: *Très riches Heures du Duc de Berry*
- 1432 Van Eyck: *l'Agneau mystique* (Saint-Bavon, Gand)
- 1460 Hans Holbein (1460-70,1520)
- 1471 Albrecht Dürer (1471,1528) recherches géométriques
- 1475 cathédrales du Kremlin de Moscou
- 1505 François Clouet (1505-10,1572)
- 1525 Pierre Breughel l'Ancien (1525,1569)
- 1540 Le Greco (1540,1614)

la génération humaniste (1490-1520)

- 1463 Pic de la Mirandole (1463,1494)
- 1467 Guillaume Budé (1467,1540)
- 1469 Erasme de Rotterdam (1469,1527) *Eloge de la Folie* (1510)
- 1470 première imprimerie en France à la Sorbonne
- 1478 Thomas More (1478,1535) *L'Utopie* (1516)
- 1530 institution du Collège de France
- 1549 Plantin installe ses presses à Anvers

La Renaissance (2)

les savants

ingénieurs

- 1382 Taccola (1382?, 1458?) (Sienne) ingénieur militaire
1404 Alberti (1404, 1472) ingénieur, urbaniste
1405 Kyeser: *Bellifortis*
1439 Francesco di Giorgio Martini (1439, 1502) (Sienne) ingénieur
1452 Léonard de Vinci (1452, 1519)
1548 Simon Stévin (1548, 1620) ingénieur; statique

mathématiques

- 1436 Regiomontanus (1436, 1476) trigonométrie, astronomie; édition
1445 Luca Pacioli (?1445, 1517) *Summa arithmetica* (1494)
Nicolas Chuquet (1445, 1500) (Lyon) algèbre
1482 première édition imprimée d'Euclide
1500 Tartaglia (1500, 1557) équation du troisième degré (1535); traité de balistique
1501 Cardan (1501, 1576) médecin, mathématicien (équation du 3e degré) (*Ars Magna*, 1545), astrologue, hérétique
1526 Bombelli (1526, 1572) opérations sur les imaginaires; algèbre de Diophante
1540 F. Viète (1540, 1603) conseiller de Henri IV; algèbre
1550 Napier (Néper) (1550, 1617): logarithmes (1614)

astronomie

- 1473 Copernic (1473, 1542) *De Revolutionibus Orbium Caelestium* (1543)
1545 Tycho Brahe (1545, 1601)
1548 Giordano Bruno (1548, brûlé vif 1600)
1564 Galilée (1564, 1642) observations à la lunette (1610); *Dialogue sur les deux grands systèmes* (1632); *Discours concernant deux sciences nouvelles* (1638)
1571 Kepler (1571, 1630) 1e et 2e loi (1609); 3e loi (1619)

médecine

- 1493 Paracelse (1493, 1541) iatrochimie
1509 Michel Servet (1509, brûlé à Genève 1553) médecin, circulation du sang
1514 Vésale (1514, 1564) médecin; dissections: *Anatomie humaine* (1543)
1517 Ambroise Paré (1517, 1590)

autres

- 1510 Bernard de Palissy (1510, 1589) chimie: émaux (1555); fossiles
1544 W. Gilbert (1544, 1603) médecin; magnétisme: *De Magnete* (1600)

progrès techniques

- 1351 automates de la cathédrale d'Orvieto
1375 char à quatre roues et à avant-train mobile
1391 premier moulin à papier à Nuremberg
1401 moulins à vent en Hollande
1405 armes à feu portatives
1410 première représentation du système bielle - manivelle
1439 l'imprimerie en Europe; Gutenberg à Mayence en 1450
1450 nouvel essor des mines d'Europe centrale; exploitation des bancs de morue
1470 premiers laminoirs
1480 premières écluses à sas en bois (Allemagne)
1509 première montre
1527 utilisation de la poudre dans les mines de Schemnitz
1556 Georg Agricola: *De re metallica*
1564 invention du crayon
1565 première bourse de commerce à Londres
1582 calendrier grégorien

les "grandes découvertes"

- 1420 première caravelles portugaises
1488 Bartolomeo Dias double le cap de Bonne-Espérance
1492 Christophe Colomb aux Antilles
1512 Mercator (1512, 1594) *La carte du Monde* (1569)
1520 voyage de Magellan (1470, 1521)
1520 chute de Mexico et de l'empire aztèque
1534 Jacques Cartier explore le Saint-Laurent
1543 explorateurs portugais au Japon
1550 galions sur l'Atlantique

Copernic (1473-1543) et la révolution copernicienne



Voyage dans l'Italie de la Renaissance, et devient un astronome renommé; retour en Pologne en 1503, comme chanoine à Frauenbourg.

Chargé par le pape de travailler à la réforme du calendrier (le calendrier julien, établi par César, est basé sur une année de 365,25 jours, qui est trop longue).

Mais (probablement influencé par les astronomes arabes de Maragha) critique

- la diversité des systèmes existants (sphères homocentriques, épicycles, etc.)
- leur complexité (très nombreuses sphères)
- leur incohérence (point équant de Ptolémée <> mouvement pas réellement uniforme).

Copernic a compris

- que le mouvement de la Terre est inobservable pour un observateur terrestre (relativité);
- en particulier, qu'il n'est pas vrai que la force centrifuge devrait désintégrer une Terre en mouvement;
- que la principale objection au mouvement de la Terre autour du Soleil, l'absence de parallaxe, s'explique si les étoiles sont suffisamment éloignées.

Dans le *Commentariolus* (env. 1512), supprime la distinction entre mondes sublunaire et supralunaire, et *renverse* le système d'Aristote et Ptolémée :

- expliquer le mouvement apparent du Soleil et des étoiles par la rotation quotidienne de la Terre, les cieux restant immobiles,
- expliquer le mouvement apparent des planètes par la rotation des planètes et de la Terre autour du Soleil³¹

Avantages : essentiellement *l'harmonie* du système :

- économie (une sphère pour la rotation de la Terre, au lieu de 2, pour le Soleil et pour les étoiles fixes);
- simplicité de l'explication des rétrogradations;
- explication naturelle du mouvement des planètes inférieures;
- possibilité de *déduire* l'ordre des planètes: leur période augmente avec leur distance.

Cependant, obligé de réintroduire épicycles etc. pour expliquer en détail les observations

Publie finalement ses calculs dans le *De Revolutionibus Orbium caelestium* (1543).

Copernic certainement convaincu de la réalité de son système, mais préface ajoutée anonymement par le théologien Osiander :

*Il n'est pas nécessaire que ces hypothèses soient vraies, elles n'ont même pas besoin d'avoir les apparences de la vérité.
Il est suffisant qu'elles conduisent à des calculs qui s'accordent avec les résultats de l'observation.*

NB cependant peu de réactions des Eglises, catholique ou protestantes

Successeurs :

- certains astronomes « traditionnels » utilisent son modèle pour la plus grande facilité de certains calculs mais NB que le système de Copernic n'est *pas* plus précis que celui de Ptolémée
- des philosophes, comme G. Bruno : plus de « centre de l'univers » → monde infini, multiplicité des systèmes solaires; place de l'homme et de la religion dans ce monde
- des personnalités comme Kepler, Galilée, en rupture avec la pensée aristotélicienne

Une fois prolongée par Kepler et Galilée, cette rupture avec la place privilégiée de l'homme au centre du cosmos → la **révolution copernicienne**

(l'autre révolution scientifique majeure, qui fait perdre à l'homme sa place privilégiée, cette fois au sein du monde vivant : le darwinisme).

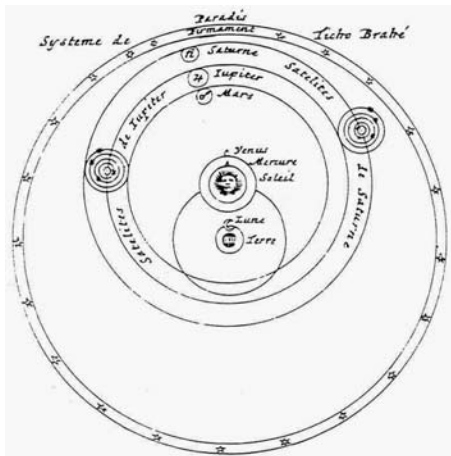
Tycho Brahe (1545-1601)

Le meilleur observateur à l'œil nu de tous les temps, depuis son observatoire d'Uraniburg au Danemark (1/2 diamètre des étoiles, 3mm à 10 m)

En 1572 observe l'explosion d'une nova – les cieux d'Aristote ne sont donc pas immuables !

Cependant n'est pas copernicien : l'absence de parallaxe annuelle (impliquant que les étoiles sont très lointaines par rapport au diamètre de l'orbite terrestre) conjuguée à leur diamètre apparent (en fait dû à la scintillation de l'atmosphère – v. Galilée et lunette) suggère qu'elles ont des dimensions absurdement grandes.

Tycho propose donc un système intermédiaire, équivalent à celui de Copernic sur le plan observationnel : les planètes orbitent autour du Soleil, qui lui-même tourne autour de la Terre immobile.



Le système de Tycho

Tycho à Uraniburg,
avec le grand cadran



Johannes Kepler (1571-1630)

Astronome de l'Empereur, successeur de Tycho dont il a été l'assistant, c'est bien un homme de la Renaissance, disciple ardent de Copernic, pénétré de la conviction néoplatonicienne sur les régularités mathématiques gouvernant le monde.

Les trois *lois de Kepler* :

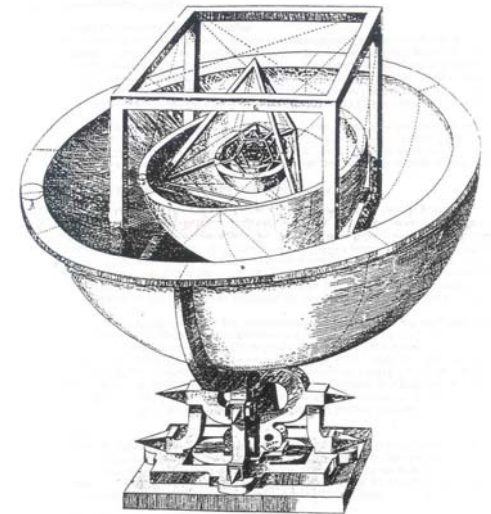
1. convaincu de la justesse des observations de Tycho, il abandonne le mouvement circulaire des planètes et le remplace par un mouvement *elliptique* – c'est un acte intellectuellement héroïque, en rupture totale avec Aristote et toute la façon traditionnelle de penser

(désaccord de 8 degrés entre calculs ptoléméens et observations de Tycho sur l'orbite de Mars)

2. la *loi des aires* lui est suggérée par sa mystique solaire

(du Soleil émane une force motrice qui pousse les planètes avec force inversement proportionnelle à leur distance)

3. la troisième loi ($T^2 / R^3 = c^{te}$) résulte de ses spéculations pythagoriciennes (les orbites des 5 planètes connues sont contenues dans les cinq solides réguliers)



« *Le Mystère du Monde* »

Galilée (1564-1642); la lunette

Né à Pise, professeur de mathématiques (y compris l'astronomie) à Pise (1589) puis à Padoue (1592-1610) :

- recherches expérimentales : étude du mouvement accéléré (plan incliné)
- rupture avec Aristote, devient copernicien.



En 1609-1610, perfectionne la lunette récemment inventée en Hollande.

Ses observations astronomiques fournissent la preuve que le cosmos d'Aristote n'est pas conforme aux observations :

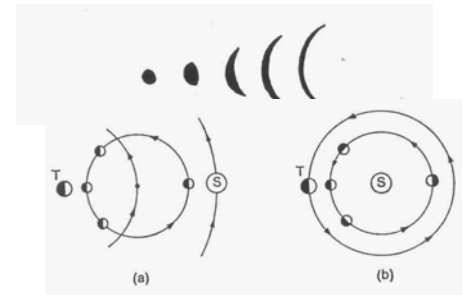
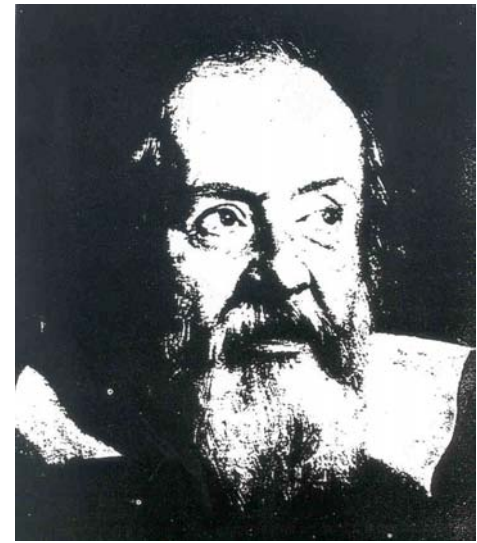
- cratères sur la Lune \Leftrightarrow sphère parfaite
- satellites de Jupiter \Leftrightarrow rôle unique de la Terre comme centre de rotation des corps célestes



- phases de Vénus, qui donc tourne autour du Soleil (a. Ptolémée, b. Copernic)

1610 : Galilée diffuse ses observations à travers toute l'Europe dans l'ouvrage *Le Messager céleste*.

Il convainc les jésuites du Collège romain que ses observations sont correctes et, avec ses amis des cercles éclairés (dont l'Accademia dei Lincei), il entreprend de « convertir » l'Église à la nouvelle astronomie.



Le « Dialogue » et le procès

Mais désormais l'Église oppose à la Réforme protestante la Contre-réforme (concile de Trente, 1545-1563) : pas d'interprétation personnelle des Textes par les fidèles, vérité absolue de l'enseignement des Pères.

En 1600, Giordano Bruno a été brûlé vif à Rome comme hérétique, notamment pour son copernicianisme

Car la Bible est claire : à la demande de Josué, le Seigneur a interrompu le mouvement du Soleil pour lui permettre de remporter une victoire complète sur les ennemis d'Israël.

Galilée est dénoncé à l'Inquisition dont le chef, le cardinal jésuite Bellarmin (celui-là même qui a fait condamner Bruno) suggère à Galilée d'adopter un point de vue relativiste, et non réaliste :

“ (...) vous et monsieur Galilée agiriez prudemment en vous contentant de présenter les choses d'une façon seulement hypothétique et non catégorique. Je crois, d'ailleurs, que c'est toujours sous cette forme hypothétique qu'avait parlé Copernic (réf. à la Préface d'Osiander).

En effet, dire : 'En admettant que la terre se déplace et que le soleil soit immobile, on tient compte de tous les phénomènes observables beaucoup mieux qu'en admettant des excentriques et des épicycles', ce sera fort bien dit, il n'y a pas le moindre danger dans cette déclaration, et elle suffit aux mathématiciens.

(Dire) au contraire que le soleil se trouve réellement au centre du monde (...) et que la terre (...) tourne avec une très grande vitesse autour du soleil (...) risque fort non seulement d'irriter tous les philosophes et théologiens scolastiques, mais aussi de nuire à notre sainte foi en faisant suspecter d'erreur l'Écriture sainte.”

Lettre à Foscarini, 1615

Galilée est dénoncé à l'Inquisition.

Il ne sera pas poursuivi officiellement, mais en 1616 les œuvres de Copernic sont mises à l'Index (elles le resteront jusqu'en ... 1846 !), et il est interdit d'enseigner sa doctrine.

Malgré cela, à l'avènement d'Urbain VIII, G. croit le moment venu de reprendre sa campagne.

Il publie en 1632, en italien et pour un large public, le « *Dialogue sur les deux plus grands systèmes du monde, le copernicien et le ptoléméen* ».



Formellement, le Dialogue ne défend pas Copernic, mais tout l'ouvrage éreinte Aristote, sur base des observations réalisées avec la lunette.

Quant au système de Copernic, Galilée réfute en particulier l'objection selon laquelle nous devrions ressentir le mouvement de la Terre, en exposant le principe de relativité : il n'y a pas de distinction absolue entre repos et mouvement, ces notions sont relatives.

Enfin, le système de Copernic est tellement plus harmonieux !

L'adhésion de Galilée au copernicanisme et sa conviction profonde de la rotation de la Terre sur elle-même et autour du Soleil ne font pas de doute :

« (Le système aristotélicien) est incapable d'expliquer tous les phénomènes qui se produisent. C'est pourquoi il est absolument faux, et le système vrai ne peut être que celui qui correspond très exactement aux phénomènes. »

Formellement, Galilée affirme sa soumission aux interdits de l'Église, mais l'artifice ne peut tromper.

En 1633, il est convoqué devant l'Inquisition, obligé d'abjurer, et condamné à la réclusion à son domicile.

Toute l'Europe savante est atteinte.

Galilée deviendra le symbole de la liberté de la recherche et de l'indépendance de la science, envers et contre toutes les Autorités.

Les relations entre l'Église et la science en seront très durablement détériorées. En 1992 seulement, Jean-Paul II procédera à une soi-disant « réhabilitation » de Galilée, tout en donnant sur le fond essentiellement raison à Bellarmin :

Galilée a eu tort de « refuser la suggestion qui lui était faite (par Bellarmin) de présenter comme une hypothèse le système de Copernic ».
Jean-Paul II à l'Académie pontificale des Sciences, 31 oct. 1992, in
Osservatore Romano, 10 nov. 1992



La naissance de la science moderne (Galilée, Newton)

La naissance de la physique moderne

En 1636, Galilée publie clandestinement en Hollande les « *Discours sur deux sciences nouvelles* », en l'occurrence la résistance des matériaux et les lois du mouvement, ouvrages très riches où il expose notamment ses travaux de jeunesse sur la chute des corps.

La nouvelle physique s'oppose point par point à celle d'Aristote :

- chute des corps indépendante de leur masse, abstraction faite des frottements (cf. argument de S. Stevin)
- relativité du mouvement et du repos (cf. Dialogue)
- principe d'inertie <> nécessité d'une force (dém.: vitesse acquise permet de remonter sur un plan incliné → mouvement à l'infini sur un plan horizontal)
- G. dégage la loi de la chute des corps :
 - vitesse acquise proportionnelle au temps (NB. concept de vitesse instantanée !)
 - espace parcouru proportionnel au carré du temps

En outre, et sans doute le plus important : les *Discours* fondent la science moderne par le recours conjoint à **l'expérimentation** et **aux mathématiques**.

DISCORSI
E
DIMOSTRAZIONI
MATEMATICHE,
intorno à due nuove scienze
Attenenti alla
MECANICA & i MOVIMENTI LOCALI,
del Signor
GALILEO GALILEI LINCEO.
Filosofo e Matematico primario del Serenissimo
Grand Duca di Toscana.
Con una Appendice del centro di gravità d' alcuni Solidi.



IN LEIDA,
Appresso gli Elsevirii. M. D. C. xxxviii.
Al Sig.
P. Murore

L'expérimentation

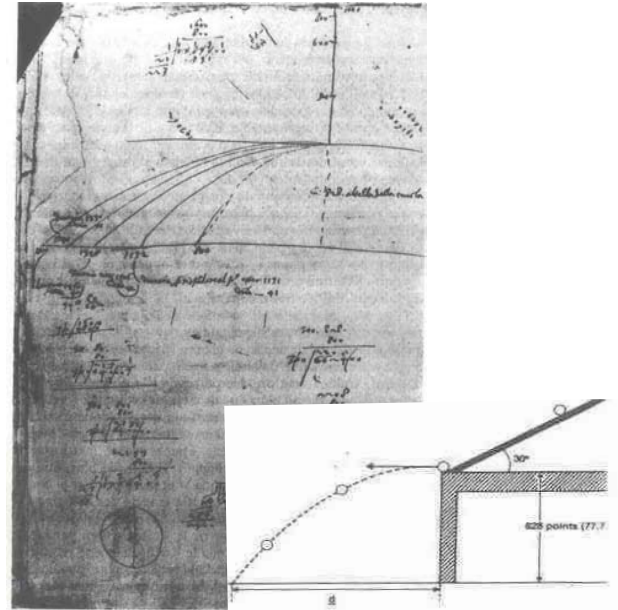
Utilisation de dispositifs artificiels, permettant de poser à la nature des questions spécifiques, en variant les conditions : « mise en scène » de la nature, impliquant

- la rupture avec le mépris traditionnel envers « la technique » ; influence du milieu des ingénieurs de la Renaissance
- la rupture avec l'opposition traditionnelle entre « naturel » et « artificiel » ; confiance dans les instruments (dont la lunette !)

Un bon moyen pour atteindre la vérité, c'est de préférer l'expérience à n'importe quel raisonnement, puisque nous sommes sûrs que lorsqu'un raisonnement est en désaccord avec l'expérience, il contient une erreur, au moins sous une forme dissimulée.

Il n'est pas possible, en effet, qu'une expérience sensible soit contraire à la vérité. Et c'est vraiment là un précepte qu'Aristote plaçait très haut, et dont la force et la valeur dépassent de beaucoup celles qu'il faut accorder à l'autorité de n'importe quel homme au monde."

Galilée, Lettre à Liceti, 1640



Les mathématiques

La philosophie est écrite dans ce vaste livre qui constamment se tient ouvert devant nos yeux (je veux dire l'Univers), et on ne peut le comprendre si d'abord on n'apprend à connaître la langue et les caractères dans lesquels il est écrit.

Or il est écrit en langue mathématique, et ses caractères sont les triangles, les cercles, et autres figures géométriques, sans lesquels il est humainement impossible d'en comprendre un mot, sans lesquels on erre vainement en un labyrinthe obscur.

Galilée, *Il Saggiatore*, 1623

- expression mathématique des lois; rupture avec la réflexion sur « l'essence » des phénomènes, ce qui convient à la « perfection » des corps, etc.
- précision de la mesure; rupture avec l'observation qualitative

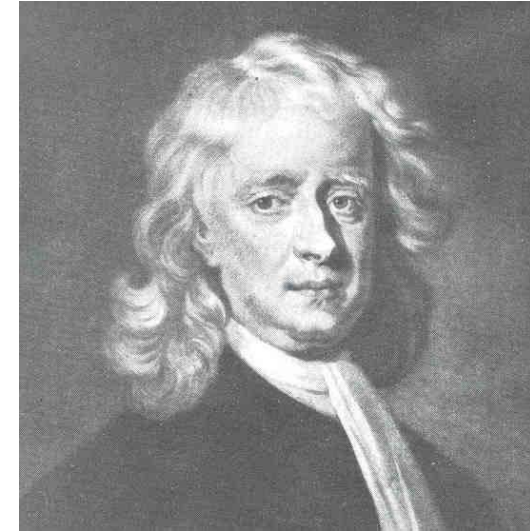
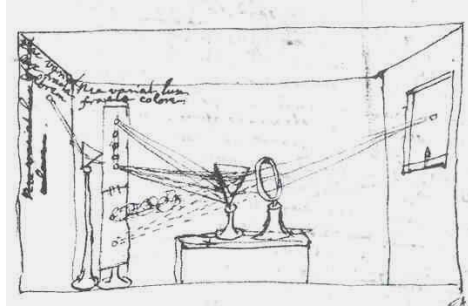
Newton (1642-1727) et la mécanique

Études à Cambridge; travaux d'optique

1666 : « annus mirabilis »:

- décomposition de la lumière blanche
- gravitation : loi en $1/d^2$
- calcul infinitésimal

1668 : invention du télescope à miroir



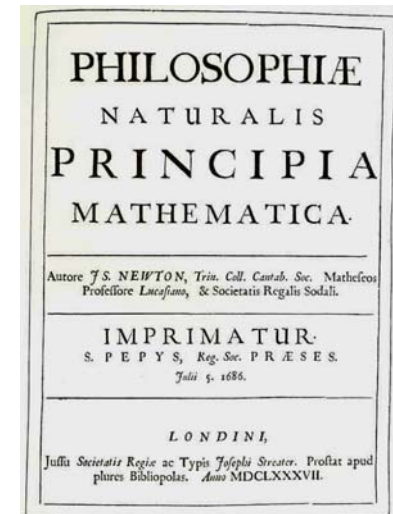
1669 : prof. à Cambridge (Trinity College)

1672 : entre à la Royal Society

1687 : publie les « *Principes mathématiques de philosophie naturelle* ».

Toutes les bases de la mécanique et de la gravitation :

- dans le cadre de l' « espace newtonien », vide (et infini)
 - la masse (inerte) est déterminée par le poids (masse pesante)
 - les trois lois de la mécanique :
 - inertie < Galilée + Descartes (mouvement rectiligne)
 - quantité de mouvement < Descartes + Huygens (vectorielle)
 - action – réaction
 - les loi de la gravitation : $F = G m_1 m_2 / d^2$
où G est universelle (chute de la Lune = chute de la pomme) :
rupture finale avec les deux mondes d'Aristote
- démontre les lois de Kepler



Triumphes :

Halley (1656-1742) reconstruit les trajectoires elliptiques de plusieurs comètes, conformément à la théorie;
il prévoit le retour de « sa » comète

1758 : retour de la comète, avec le décalage calculé par Clairault dû aux perturbations de Saturne et Jupiter

1740-1743 : expéditions géographiques en Laponie (Clairault, Maupertuis) et au Pérou (La Condamine)
confirmant la forme ellipsoïdale de la Terre :

1846 : Le Verrier prédit, d'après les perturbations de la trajectoire d'Uranus, l'existence et la position de
Neptune

« Je n'imagine pas d'hypothèses »

Contrairement à un Descartes, Newton ne construit pas un *système*. Il décrit *mathématiquement* les phénomènes (« Principes mathématiques ...), sans se prononcer sur leurs « causes » :

Je n'ai pu encore parvenir à déduire des phénomènes la raison de ces propriétés de la gravitation, et je n'imagine point d'hypothèses ('Hypotheses non fingo'). Car tout ce qui ne se déduit point des phénomènes est une hypothèse, et les hypothèses, soit métaphysiques, soit physiques, soit mécaniques, soit celles des qualités occultes, ne doivent pas être reçues dans la philosophie expérimentale.

Newton, *Principia* (Scolie générale, 1687)

(A titre personnel, on sent cependant les regrets de Newton. D'ailleurs, l'action à distance de la gravitation lui semble insatisfaisante.)

Cette démarche newtonienne marque une *révolution*, car elle implique une *redéfinition* de ce qu'est la science même.

Son influence sera immense dans tous les domaines de la science, dont la mécanique sera le modèle incontesté au XVIIIème siècle.

Désormais, toute spéculation philosophique ou métaphysique est écartée du champ de la science, seules comptent rigueur mathématique et précision de la mesure.

La science venait de conquérir la notion de phénomène (...)

En renonçant à connaître l'essence des choses, elle s'allégeait d'un poids considérable.

Par le fait même, elle devait formuler à son usage un type d'intelligibilité que les Anciens n'avaient même pas soupçonnée. Jusqu'alors, une vérité était intelligible quand on pouvait y voir un reflet de l'en-soi : idée platonicienne ou essence aristotélicienne, qui nous emmenait hors du monde des apparences. (...) Désormais, la vérité scientifique se définira sur le plan même du phénomène comme l'organisation des apparences par un système de lois, l'en-soi étant ce qu'il voudra.

(...) Il s'agit déjà d'une révolution capitale. Elle entraîne une nouvelle définition de la causalité scientifique. Pour la science, la cause d'un phénomène se sera plus jamais un en-soi métaphysique qui « l'engendre », selon la vieille métaphore biologique d'Aristote, mais un autre phénomène qui se trouve lié à lui par un rapport constant. (...)

*Et cette notion de la cause comporte à son tour une nouvelle définition du donné. (...) Désormais le savant prend comme un fait le donné empirique sans avoir à se demander d'où il vient. Roberval, dans son *Traité de Mécanique* (1636) est le premier à proposer un ensemble de théorèmes sur la composition des forces. Mais qu'est-ce qu'une force ? L'illustre mathématicien ne s'en soucie pas plus que de savoir ce qu'est « en lui-même » le système du monde; il représente les forces par des vecteurs orientés.*

R.P. Lenoble, in: *Histoire de la Science*

Le devenir de la mécanique

La mécanique céleste s'élève comme un monument à la nouvelle science, en particulier avec l'œuvre de Laplace (1749-1827), dont l'« Exposition du système du Monde » montre la parfaite adéquation de la mécanique newtonienne avec toutes les observations.

Sur le plan philosophique, la mécanique semble impliquer le déterminisme absolu :

Nous devons envisager l'état présent de l'univers comme l'effet de son état antérieur, et comme la cause de celui qui va suivre. Une intelligence qui pour un instant donné connaîtrait toutes les forces dont la nature est animée, et la situation respective des êtres qui la composent (...) embrasserait dans la même formule les mouvements des plus grands corps de l'univers et ceux du plus léger atome: rien ne serait incertain pour elle, et l'avenir comme le passé serait présent à ses yeux.

P.-S. Laplace, *Essai philosophique sur les probabilités*



Parallèlement, évolution vers une abstraction toujours plus grande:

- Lagrange (1736-1813) : présentation purement mathématique de sa « Mécanique analytique » (1788)

Je me suis proposé de réduire la théorie de cette science, et l'art de résoudre les problèmes qui s'y rapportent, à des formules générales, dont le simple développement donne toutes les équations nécessaires pour la solution de chaque problème. (...) On ne trouvera point de figures dans cet ouvrage. Les méthodes que j'y expose ne demandent ni constructions, ni raisonnements géométriques ou mécaniques, mais seulement des opérations algébriques, assujetties à une marche régulière et uniforme.

Lagrange, *Mécanique analytique* (1788)

- Hamilton (1805-1865) porte la mécanique à un niveau encore plus abstrait, en l'unifiant avec l'optique

A l'orée du XX^{ème} siècle, Poincaré (1854-1912) met cependant en question le programme déterministe, à l'intérieur même de la théorie classique, par la découverte du « chaos déterministe » en mécanique céleste (problème des trois corps).

XX^{ème} siècle : la relativité et la mécanique quantique admettent la théorie de Newton comme cas limite (vitesses faibles par rapport à celle de la lumière, masses et densités « pas trop grandes », systèmes macroscopiques et non atomiques)

La révolution scientifique

La « révolution scientifique »

1. avec Copernic, Kepler et Galilée, changement complet de paradigme en astronomie (révolution copernicienne ou copernico-galiléenne) :
renversement des cieux d'Aristote, et en particulier de la distinction entre mondes sub- et supralunaire
2. avec Galilée et Newton, également changement complet de paradigme en physique :
relativité du mouvement et du repos, mouvement inertiel rectiligne, au lieu de la doctrine des lieux naturels et des mouvements naturels / forcés d'Aristote
3. → redéfinition complète de ce qu'est la science
 - elle s'attache aux *phénomènes*, que lient des *lois* que l'on cherche à exprimer *mathématiquement*
←→ recherche de l'« en-soi » ou des « causes finales »
 - elle *interroge* la nature au moyen d'*instruments* et de *dispositifs expérimentaux*, dans des conditions *contrôlées* visant à minimiser les phénomènes parasites, en s'attachant à la *précision* quantitative des mesures
←→ déductions à partir de principes généraux, appuyées par des *observations qualitatives*
4. sur cette base se développe une *philosophie mécaniste* (cf. Descartes), dont le modèle est la machine, et particulièrement l'horloge, opposée au vitalisme, aux « forces occultes », à la « sympathie », à la « correspondance » entre microcosme et macrocosme, etc.
5. sens aigu de *l'autonomie* de la recherche par rapport aux Autorités (procès de Galilée; Descartes);
nouvelles formes d'organisation des savants (académies; journaux)

La « méthode scientifique »; Bacon et Descartes



Francis Bacon (1561-1626) (hautes fonctions sous Elisabeth I^{ère} et Jacques I^{er} d'Angleterre)

A la transition entre la Renaissance et l'Age classique, promeut les sciences expérimentales dans l'intérêt de l'État : l'*induction* basée sur l'*expérimentation* doit fournir un savoir sûr, et utile.

Référence philosophique pour les « expérimentalistes » anglais (Boyle).

René Descartes (1596-1650)

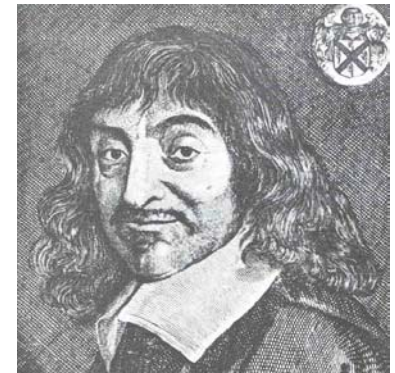
- géométrie analytique : rendre automatique les opérations de la géométrie
- physique :
 - le mouvement inertiel est rectiligne (\neq Galilée : circulaire)
 - conservation de « quantité de mouvement » (mais scalaire ; conservation vectorielle due à Huygens)
- peu d'autres apports scientifiques car « esprit de système » fort spéculatif

Mais impact énorme en philosophie (en particulier en France) :

1. doute systématique – rejet des autorités
2. les « principes de la méthode » scientifique (Discours de la Méthode, 1637) :
 - ne rien accepter que d'évident à mes yeux (le *Je* héroïque de Descartes)

Ne recevoir jamais aucune chose pour vraie, que je ne la connusse évidemment être telle: c'est-à-dire éviter soigneusement la précipitation et la prévention; et de ne comprendre rien de plus en mes jugements, que ce qui se présenterait si clairement et si distinctement à mon esprit, que je n'eusse aucune occasion de le mettre en doute.

- réduire les problèmes complexes en problèmes plus simples
 - réfléchir dans l'ordre adéquat
 - viser à être complet
3. application générale du modèle mécanique (les « animaux-machines »)



Le vide (1) : de la philosophie à l'expérimentation

1) Aristote démontre, sur base de sa physique, l'impossibilité du vide; en fait, c'est un élément essentiel de sa *philosophie*, par opposition aux atomistes.

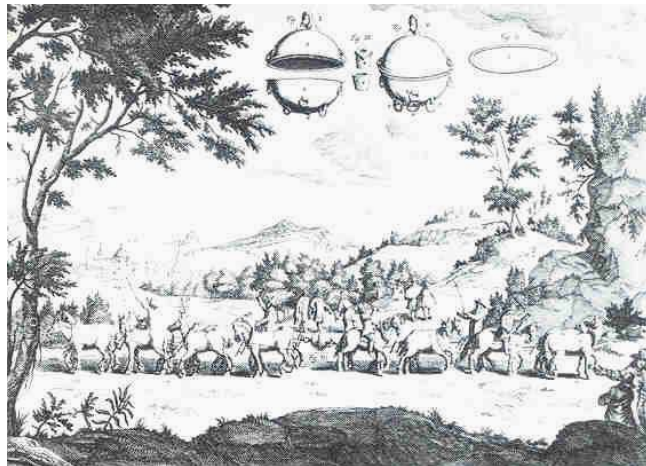
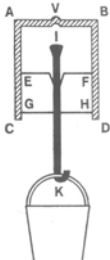
Les scolastiques font de l'« horreur du vide » un *principe*, de statut supérieur aux lois de la nature (l'eau ne s'écoule pas d'un vase scellé percé d'un petit trou dans le bas).

2) Galilée, dans les Discorsi, se réfère à l'« horreur du vide », pour expliquer le fonctionnement des pompes. Mais ce phénomène doit être étudié expérimentalement et quantitativement, avec un dispositif permettant de « mesurer l'horreur du vide » - la perspective a changé du tout au tout!

L'étude expérimentale est menée avec de l'eau, puis en 1643 avec du mercure par Torricelli (1608-1647), qui suggère que « l'horreur du vide » est due en fait à la pression atmosphérique.

3) En France, Pascal (1623-1662) réalise en 1648 l'expérience barométrique du Puy de Dôme, et l'« expérience cruciale » du « vide dans le vide ».

4) L'ingénieur allemand O. von Guericke (1602-1686), dans le cadre de son programme copernicien, réalise une pompe (→ découvre l'élasticité de l'air), et démontre spectaculairement la force de la pression atmosphérique (hémisphères de Magdebourg, 1654).



Le vide (2) : Boyle et les « expérimentalistes »



5) Après Huygens (1629-1695) en Hollande, Robert Boyle (1627-1691) à Londres perfectionne la pompe.

Il en fait l'équipement central de son programme scientifique.

En l'absence d'air : suffocation des animaux; extinction des flammes; extinction du son, mais passage de la lumière; loi quantitative entre pression et volume.

Approche « baconienne » :

- soin minutieux des conditions expérimentales
- description détaillée des protocoles expérimentaux
- observation par des témoins dignes de foi
- pas de spéculations métaphysiques sur le « vide »

Boyle n'était pas "vacuiste" (...) Il n'était pas non plus "pléniste" (...) Ce qu'il s'efforçait de créer, c'était un discours philosophique de la nature, dans lequel de telles questions n'avaient pas à être posées. La pompe à air ne permettait pas de décider si un vide "métaphysique" existait ou non. Ce n'était pas là un défaut de la pompe; c'était au contraire une de ses forces.

S. Shapin et S. Schaffer, *Léviathan et la pompe à air*

De même Newton :

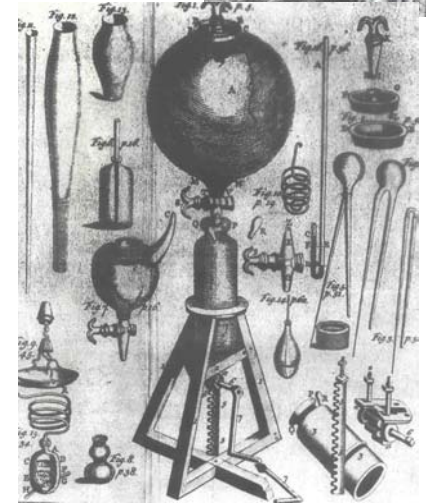
Les projectiles n'éprouvent ici-bas d'autre résistance que celle de l'air, et dans le vide de M. Boyle la résistance cesse, en sorte qu'une plume et de l'or y tombent avec une égale vitesse. Il en est de même des espaces célestes au-dessus de l'atmosphère de la terre, lesquels sont vides d'air.

Newton, *Principia*

Les « expérimentalistes » :

(L'enjeu pour Boyle était de définir) une nouvelle manière de travailler, de parler, de nouer des relations sociales entre philosophes de la nature. Aux yeux de Boyle et de ses collègues, (...) les divergences étaient sans conséquences, voire même fécondes et nécessaires (à l'intérieur) d'une frontière essentielle construite autour des pratiques de la nouvelle forme de vie expérimentale. Les dissensions impliquant une violation de cette frontière (...) étaient quant à elles jugées fatales.

S. Shapin et S. Schaffer, *ibid.*



Le vide (3) : comme technique, et comme problème théorique

- 6) applications pratiques des techniques mises en œuvre dans l'étude du vide : pneumatique → études des gaz (notamment Priestley) – la chimie des gaz : durant le XVIII^{ème} siècle, découverte de l'oxygène, de l'hydrogène, de l'azote, du chlore, du fluor

- 7) machine à vapeur, liée à la compréhension des lois des gaz
Huygens et Papin envisagent d'utiliser le refroidissement de gaz dus à la fusion de la poudre pour récupérer du mouvement.
Papin propose d'utiliser plutôt la vapeur et de la faire se condenser
Application directe à la machine « atmosphérique » de Newcomen

- 8) importance cruciale des technologies du vide pour la découverte au XIX^{ème} siècle du rayonnement cathodique et de l'électron; ampoule électrique d'Edison
technologies des accélérateurs de particules (« ultravide »), de la fabrication des composants électroniques

- 9) au XX^{ème} siècle, « constructions » multiples des concepts de vide : Relativité Générale, vide quantique, « énergie du vide », « fluctuations du vide », « brisure de symétrie du vide », etc.

La recherche expérimentale

Le XVII^{ème} et le XVIII^{ème} siècles pratiquent une *expérimentation systématique*, qui attend ses réponses de la nature elle-même

1) *tous* les domaines sont concernés :

physique (astronomie, optique, pneumatique, magnétisme, électrostatique, calorimétrie)

chimie (en particulier gaz)

physiologie (circulation du sang)

biologie (botanique, zoologie, en part. apports du Nouveau Monde et de l'Afrique; monde microscopique)

exploration géographique, géologie, cristallographie

2) dès que possible: description *quantitative*, mathématique, sur le modèle newtonien

en physique : optique (Newton); élasticité (Hooke); magnétisme (Gilbert); électrostatique (von Guericke); calorimétrie

en chimie : mesure des *affinités* (Newton)

3) confiance et développements de nouveaux *instruments* (dont se méfiait la science classique)

lunette et télescope (Galilée 1609; Newton 1668)

thermomètre (Accademia del Cimento 1660 : la température de la glace fondante; Fahrenheit 1714; Celsius 1742)

baromètre (Torricelli 1643; Pascal 1648)

amélioration continue des horloges (avance initiale de la Chine, Huygens : correction des défauts d'isochronie du pendule; perfectionnements continus des « garde-temps » pour la navigation – détermination des longitudes)

microscope (Galilée 1612, Hooke 1665, Leeuwenhoek 1673 : spermatozoïdes, protozoaires, globules rouges, etc.)

Lunette et microscope, en particulier, révèlent de nouveaux mondes : l'infiniment grand et l'infiniment petit

(cf. les deux infinis de Pascal)

4) parallèlement, extraordinaire développement des *mathématiques*

géométrie analytique (Fermat, Descartes); calcul différentiel et intégral (Newton, Leibniz); trigonométrie (École anglaise);

probabilités (Pascal, Fermat); analyse (Euler); mécanique et mécanique céleste (d'Alembert, Lagrange, Laplace)

Le monde de la précision

Il se peut que le sens profond et le but même du newtonianisme, ou plutôt de toute la révolution scientifique du XVIIe siècle, dont Newton est l'héritier et l'expression la plus haute, soient précisément de supprimer le monde du "plus ou moins", le monde des qualités et des perceptions sensibles, le monde quotidien de l'approximatif, et de le remplacer par l'univers (archimédien) de la précision, des mesures exactes, de la détermination rigoureuse.

A. Koyré, *Études newtoniennes*

Pourtant, la démarche rigoureuse de la *mesure* n'a rien d'évident

Faire de la physique dans notre sens du terme - pas dans celui donné à ce vocable par Aristote, - veut dire appliquer au réel les notions rigides, exactes et précises des mathématiques, et, tout d'abord, de la géométrie. Une entreprise paradoxale s'il en fut, car la réalité, celle de la vie quotidienne, au milieu de laquelle nous vivons et nous sommes, n'est pas mathématique. Ni même mathématisable. Elle est le domaine du mouvant, de l'imprécis, du "plus ou moins", de l'"à-peu-près".

Il est ridicule de vouloir mesurer avec exactitude les dimensions d'un être naturel: le cheval est sans doute plus grand que le chien et plus petit que l'éléphant, mais ni le chien, ni le cheval, ni l'éléphant n'ont de dimensions strictement et rigidelement déterminées. (...)

Jamais (la pensée grecque) n'a voulu admettre que l'exactitude puisse être de ce monde. (...) Elle admettait en revanche qu'il en fût tout à fait autrement dans les Cieux (...). Et de ce fait, l'astronomie mathématique est possible, mais la physique mathématique ne l'est pas.

A. Koyré, *Études d'histoire de la pensée scientifique*

Savants et institutions scientifiques au XVII^{ème} s.

Renaissance : le mécénat princier

ingénieurs (Tartaglia, Léonard, Stevin), médecins (Cardan, Vésale), ecclésiastiques (Nicolas de Cuse); en Italie et à Oxford, qqqs universitaires; figures souvent complexes (astrologie, alchimie, goût du secret, défis)

importance des voyages et des contacts personnels entre savants

1^{ère} moitié du XVII^{ème} s. : des esprits curieux et indépendants

France et Italie : magistrats, avocats, petite noblesse (Peiresc, Viète, Fermat, Pascal père, Cyrano de Bergerac) et ecclésiastiques (Cavalieri (s. j.), Grimaldi (s. j.), Gassendi, Mersenne); cercles d'érudits ("libertins"), "académies" locales (arts, sciences)

Angleterre, Pays-Bas : plutôt les universités (Oxford, Cambridge, Leyde)

Italie : premières Académies : Acc. dei Lincei (Rome 1603, Galilée); Acc. del Cimento (Florence 1657)

Voyages (Descartes en Hollande, en Suède); immenses échanges de correspondance

Le R.P. M. Mersenne: "*L'entremetteur de tous les honnêtes gens*"



2^{ème} moitié du XVII^{ème} s. : les Académies, institutions de l'Etat absolutiste, remplacent le mécénat privé

1660 : Royal Society de Londres

mêles scientifiques (Newton, Boyle), nobles amateurs (Boyle !), artisans; réunions régulières; expérimentateur attaché (Hooke)

1666 : Académie royale des Sciences

fondée par Colbert, remplace diverses réunions privées à Paris; les académiciens sont rétribués

1700 : Académie de Prusse (fondée par Frédéric II) (Maupertuis, Euler, Lagrange, Bernouilli)

1724 : Académie de Saint-Pétersbourg (Bernouilli, Euler)

Journaux scientifiques

Philosophical Transactions (1665), Journal des Savants (1666), Acta Eruditorum (1682, Leipzig), Journal de Trévoux (1701, jésuites), Comptes-rendus de la Royal Society et de l'Académie des Sciences

Augmentation rapide et spécialisation pendant la deuxième moitié du XVIII^{ème} siècle

Journal de Physique (1752); Annales de Chimie (1789, diffusion de la « nouvelle » chimie de Lavoisier)

De la vogue mondaine à la science professionnelle

Au XVIII^{ème} siècle, la vogue scientifique dans les salons bourgeois et mondains notamment avec la passion des « cabinets de curiosité » dans la Hollande bourgeoise, calviniste et prospère : plantes, animaux, minéraux, fossiles
Démonstrations de chimie (Lémercy à Paris), d'électrostatique
Fureur du « magnétisme » à la fin du XVIII^{ème}

Des traités « pour les dames » à l'Encyclopédie

Fontenelle (*Entretiens sur la pluralité des mondes*, 1686), Maupertuis, Euler (*Lettres à une princesse d'Allemagne*)

1751 L'« *Encyclopédie, ou Dictionnaire raisonné des Sciences, des Arts et des Métiers* »

Ce n'est pas un ouvrage d'avant-garde sur le plan scientifique, mais « fait le point » sur les sciences et savoirs, leur assurant une large diffusion, et surtout porte l'esprit nouveau des « Philosophes des Lumières »

1768 *Encyclopedia Britannica*

A la fin du XVIII^{ème} siècle, le recrutement scientifique s'élargit lentement avec les académies militaires et les écoles d'ingénieurs

Lagrange, Monge, Laplace – Napoléon Bonaparte !

Les grands bouleversements dans l'organisation de la science et dans son recrutement :

- la Révolution française et l'Empire

Les savants au service de la Patrie; l'École Normale, l'École Polytechnique

- l'université allemande du XIX^{ème} siècle

W. von Humboldt, Université de Berlin, 1810



L'âge classique (1)

événements politiques

- 1609 indépendance des Provinces-Unies
- 1618 guerre de Trente Ans: princes allemands, France, Suède
- 1635 isolement du Japon
- 1642 mort de Richelieu, de Louis XIII (1643)
- 1649 exécution de Charles I d'Angleterre; Cromwell Lord protecteur 1653-1658
- 1682 Pierre le Grand tsar (1682,1725)
- 1685 révocation de l'Edit de Nantes
- 1710 famines
- 1715 mort de Louis XIV
- 1740 Frédéric II roi de Prusse
- 1776 déclaration d'indépendance des Etats-Unis
- 1789 Révolution française

littérature, arts

- 1577 Rubens (1577,1640)
- 1594 Poussin (1594,1665)
- 1606 Corneille (1606,1684)
- 1606 Rembrandt (1606,1669)
- 1622 Molière (1622,1673)
- 1631 "La Gazette" de T. Renaudot
- 1632 Lulli (1632,1687)
- 1635 fondation de l'Académie française par Richelieu
- 1638 Racine (1638,1699)
- 1645 La Bruyère (1645,1696)
- 1659 Purcell (1659,1695)
- 1668 Versailles (-> 1690)
- 1666 François Couperin Le Grand (1666,1733)
- 1678 Vivaldi (1678,1741)
- 1680 création de la Comédie française
- 1683 Jean-Philippe Rameau (1683,1764)
- 1684 Watteau (1684,1721)
- 1685 J.-S. Bach (1685,1750)
- 1685 D. Scarlatti (1685,1757)
- 1697 Canaletto (1697,1768)

- 1732 Haydn (1732,1809)
- 1746 Goya (1746,1828)
- 1748 David (1748,1825)
- 1756 Mozart (1756,1791)
- 1759 Schiller (1759,1815)

philosophes

- 1561 Francis Bacon (1561,1626)
- 1588 Hobbes (1588,1672)
- 1592 Gassendi (1592,1655)
- 1596 Descartes (1596,1650) *Discours de la Méthode* (1637)
- 1623 Pascal (1623,1662) *Les Provinciales* (1656)
- 1632 Spinoza (1632,1677)
- 1632 Locke (1632,1704)
- 1646 Leibniz (1646,1716)
- 1647 P. Bayle (1647,1707) *Dictionnaire historique et critique* (1695)
- 1689 Montesquieu (1689,1755) *L'Esprit des Lois* (1748)
- 1694 Voltaire (1694,1778)
- 1694 Quesnay (1694,1774)
- 1712 Rousseau (1712,1778)
- 1713 Diderot (1713,1784)
- 1724 Kant (1724,1804) *Critique de la Raison pure* (1781)
- 1743 Condorcet (1743,1794)
- 1748 Bentham (1748,1832)

L'âge classique (2)

vie scientifique

1620	correspondance de Mersenne (1588,1648)
1657	Accademia del Cimento (Florence) (1657,1667)
1660	Royal Society (charte en 1662)
1665	<i>Philosophical Transactions</i> (Londres)
1666	<i>Journal des Savants</i> (Paris)
1666	Fondation de l'Académie royale des Sciences par Colbert
1675	Observatoire de Greenwich
1686	Fontenelle (1657,1757) <i>Entretiens sur la pluralité des mondes</i>
1700	Académie royale de Berlin et Observatoire
1724	Académie des Sciences de Saint-Pétersbourg
1751	<i>L'Encyclopédie</i> (1751,1772)
1752	<i>Journal de Physique</i>
1753	fondation du British Museum
1768	<i>Encyclopædia Britannica</i>
1783	création de l'École des Mines

les savants

mathématiques

1591	Desargues (1591,1661) géométrie projective
1596	Descartes (1596,1650) géométrie analytique (1637)
1598	Cavalieri (1598,1647) les "indivisibles"
1601	Fermat (1601,1665) théorie des nombres; probabilités; géométrie analytique; analyse
1623	Pascal (1623,1662) géométrie, arithmétique, probabilités, précurseur de l'analyse
1629	Huygens (1629,1695) géométrie
1642	Newton (1642,1727) calcul différentiel et intégral
1646	Leibniz (1646,1716) calcul différentiel et intégral, analyse combin.
1654	Jacques I Bernoulli (1654,1705) analyse; calcul exponentiel
1654	Varignon (1654,1722) statique; composition des forces, déplacements virtuels
1667	Jean I Bernoulli (1667,1748) divers problèmes d'analyse
1667	Moivre (1667,1754) trigono. des imaginaires
1685	Taylor (1685,1731) analyse
1698	Mac-Laurin (1698,1746) analyse
1704	Cramer (1704,1752) déterminants; systèmes d'équations

1707	Euler (1707,1783) tout!
1710	Simpson (1710,1761) trigono.
1713	Clairault (1713,1765) géométrie
1717	d'Alembert (1717,1783) équations différentielles
1736	Lagrange (1736,1813) calcul des variations (1763)
1743	Condorcet (1743,1794) statistiques
1746	Monge (1746,1818) <i>Traité de géométrie descriptive</i> (1799)
1749	Laplace (1749,1827) fonctions harmoniques; probabilités (1812)
1752	Legendre (1752,1833) nombres, analyse, intégrales elliptiques

mécanique, astronomie, géodésie

1548	Simon Stévin (1548,1620) statique
1564	Galilée (1564,1642) chute des corps (<i>Discorsi</i> , 1638)
1625	Cassini (1625,1712) Directeur Observatoire de Paris
1629	Huygens (1629,1695) dynamique; anneaux de Saturne
1635	Hooke (1635,1702)
1642	Newton (1642,1727) <i>Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica</i> (1687))
1656	Halley (1656,1742) observations de la comète en 1682
1698	Maupertuis (1698,1759) principe de moindre action (1747)
1713	Clairault (1713,1765) géodésie, mécanique céleste
1717	d'Alembert (1717,1783) mécanique rationnelle
1725	Bradley: aberration des étoiles fixes
1734	expéditions géodésiques: Pérou (La Condamine) et Laponie (Clairault, Maupertuis)
1736	Lagrange (1736,1813) <i>Mécanique analytique</i> (1788), <i>Géométrie analytique</i> (1795)
1738	W. Herschell (1738,1822) astronome: Uranus (1780)
1749	Laplace (1749,1827) <i>Mécanique céleste</i> (1798-1825)

pression atmosphérique, vide

1643	Torricelli (1608,1647) pression atmosphérique
1648	expériences de Pascal (1623,1662) sur le vide
1654	expérience des hémisphères de Magdebourg par O. von Guericke (1602,1686)

L'âge classique (3)

optique

- 1621 Snell (1580,1626) loi de la réfraction
1637 Descartes (1596,1650) *Dioptrique*
1640 (env.) Fermat (1601,1665) polémique avec Descartes; "Principe de Fermat"
1665 Grimaldi (1618,1663) diffraction
1665 anneaux de Hooke (1635,1702), dits "de Newton"
1666 Newton (1642,1727) travaux sur l'optique; *Optique* (1704)
1669 Bartholin: la double réfraction
1676 Römer: mesure de la vitesse de la lumière (215 000 km/s)
1678 Huygens (1629,1695) théorie ondulatoire de la lumière

électricité

- 1660 machine électrostatique de O. von Guericke (1602,1686)
1731 Cavendish (1731,1810)
1733 hypothèse des deux types d'électricité
1736 Coulomb (1736,1806) "loi de Coulomb" 1785
1744 "bouteille de Leyde" (Van Musschenbroeck, von Kleist)
1750 (env.) Franklin (1706,1790) électricité atmosph., pointes, conserv. de la charge
1791 Galvani (1737,1798): effet physiologique des courants (grenouilles)
1800 Volta (1745,1827): pile

théorie de la chaleur

- 1768 J. Fourier (1768,1830) théorie de la chaleur
1778 Rumford: études sur la chaleur dégagée par frottement
1780 mémoire de Laplace et Lavoisier sur la chaleur

crystallographie

- 1736 Romé de l'Isle (1736,1790) cristallographie; constance des angles des cristaux
1743 Hauy (1743,1822) minéralogie géométrique *Essai d'une théorie sur la structure des cristaux* (1783)

chimie

- 1620 Mariotte (1620,1684) loi des gaz (1679)
1627 Boyle (1627,1691) *The Sceptical Chymist* (1661); loi des gaz (1662)
1660 Stahl (1660,1734) phlogistique
1734 Priestley (1734,1804) oxygène
1737 Guyton de Morveau (1736,1816) nomenclature chimique
1742 Schelle (1742,1786)
1743 Lavoisier (1743,1794) combustion (1773); nomenclature
1748 Berthollet (1748,1822) nomenclature
1754 Black identifie le gaz carbonique; méthodes quantit. en chimie des gaz
1754 Proust (1754,1826)
1755 Fourcroy (1755,1809) nomenclature
1756 Chaptal (1756,1832)
1766 Cavendish identifie l'hydrogène comme composant de l'eau
1766 Dalton (1766,1814)
1772 découverte de l'azote, du chlore (Scheele)
1774 découverte de l'ammoniac et de l'oxygène (Priestley, Scheele)
1781 synthèse de l'eau par Cavendish

ingénieurs

- 1736 Watt (1736,1819) machine à vapeur
1753 L. Carnot (1753,1823) *Essai sur la puissance des machines* (1782)

médecine, biologie

- 1578 Harvey (1578,1657) circulation du sang (1628)
1628 Malpighi (1628,1694)
1632 Leeuwenhoek (1632,1723) observation des spermatozoïdes (1677), des bactéries (1681), des globules rouges (1688)
1686 Antoine de Jussieu (1686,1758)
1707 Buffon (1707,1788)
1707 Linné (1707,1778)
1727 Michel Adanson (1727,1806)
1744 Lamarck (1744,1829) transformisme (1800)
1748 Antoine-Laurent de Jussieu (1748-1836)
1749 Jenner (1749,1823) vaccination (1776)
1769 Cuvier (1769,1832) *Leçons d'anatomie comparée* (1800)
1771 Bichat (1771,1802)

L'âge classique (4)

instrumentation; métrologie

1610	lunette de Galilée
1618	premier microscope
1631	invention du vernier
1643	baromètre de Torricelli
1645	machine à calculer de Pascal
1650	pompe à vide de O. von Guericke
1657	pendule de Huygens
1659	machine pneumatique de Boyle
1661	manomètre de Huygens
1668	télescope à miroir de Newton
1670	balance de Roberval
1681	soupape de sûreté de D. Papin
1714	échelle des températures de Fahrenheit
1742	échelle Celsius

progrès techniques

1640	production de coke à partir du charbon
1690	essais de combustion de la poudre dans un corps de pompe (Papin, Huygens)
1692	Clayton: pouvoir éclairant du gaz de houille
1698	machine à vapeur de Slavery (mines)
1705	première machine à vapeur de Newcomen
1709	fonte au coke
1712	Réaumur: études sur l'acier
1733	industrie textile: navette volante de J. Kay
1735	première exploitation du pétrole
1740	prairies artificielles
1742	acier fondu
1744	métier à tisser de Vaucanson
1747	production industrielle d'acide sulfurique; paratonnerre de Franklin
1749	machine à carder le coton
1750	semoir mécanique
1751	tour à charioter de Vaucanson
1756	le ciment
1761	premiers rails en fonte (usine)
1762	législation sur les brevets en France
1765	première machine à vapeur de Watt
1772	premier tour à aléser
1776	premier chemin de fer (mine)
1778	premier tour à fileter
1779	premier pont en fonte, sur la Severn
1783	ascension en ballon des frères Montgolfier
1783	Watt: régulateur à boules
1784	puddlage de la fonte
1787	machine à vapeur dans les filatures de coton
1789	Parmentier: <i>Traité sur la culture et les usages de la pomme de terre</i>

Chimie : de l'alchimie à l'atomisme

Aux origines de la chimie

Savoirs pratiques

cuisine, métallurgie, céramique, médecine, teinturerie, parfumerie, etc., souvent mêlés d'ésotérisme (« mûrissement » des métaux au sein de la Terre // du fourneau; secrets)

Science grecque et hellénistique : les quatre éléments d'Empédocle (terre, eau, air, feu), combinaisons des quatre qualités : sec et humide, chaud et froid

L'alchimie

Apparition à Alexandrie, vers le début de notre ère : influences égyptiennes et orientales (Chine : taoïsme – élixir d'immortalité) + néoplatonisme, gnose chrétienne
→ tradition hermétique (écrits perdus ou corrompus d'Hermès Trismégiste); initiation; secret

Objectif : transmutation des métaux en or – opération matérielle et spirituelle, requérant purification

Correspondances microcosme / macrocosme (7 métaux et 7 planètes; influence de la forme des récipients, ...)

Les quatre éléments + deux principes (soufre = masculin, chaud, sec, actif; mercure = féminin, froid, liquide, passif): en agissant sur les qualités, on peut modifier les corps (car la nature est une)

- ✓ Arabes : VIII^{ème} siècle : Jabir ibn Hayyam (Geber), anthologie shiite des Frères de la Pureté (shiites); mais Rhazès et Avicenne notamment nient la possibilité de la transmutation

Développement de nombreuses techniques (calcination, distillation, sublimation – alambic, alcool, préparation de l'acide nitrique, etc.)

- ✓ Passage en Occident au XII^{ème} siècle : R. Bacon, Albert le Grand, R. Lulle, ...
- ✓ Renaissance : diffusion de l'hermétisme

Chimie pratique (mines et métallurgie, poudre, émaux) + traités techniques

Paracelse (1493-1541) : + principe « sel » ; iatrochimie (contre Galien)



La chimie des gaz; la combustion

Avant 1700 : 12 corps simples connus (antimoine, argent, arsenic, carbone, cuivre, étain, fer, mercure, or, phosphore, plomb, soufre)

XVIII^{ème} siècle : 21 corps simples supplémentaires, en particulier gaz

Cadre théorique : 4 éléments + principes + théorie du « *phlogistique* », principe du feu, qui se dégage lors de la combustion (Stahl, 1660-1734)

Rend compte de nombreux faits, et stimule les nombreuses recherches expérimentales

Les gaz

- J. B. Van Helmont (1577-1644) : découverte de « gaz » ≠ air
(combustion, respiration)

- R. Boyle : cuve à eau → chimie « pneumatique »

- Deuxième 1/2 XVIII^{ème} siècle :

Black (« air fixe » = CO₂); Cavendish (« air inflammable » = hydrogène); Priestley (« air déphlogistiqué » = oxygène; azote = « air phlogistique »); HCl, NH₃, SO₂); Scheele (chlore)

- 1783 : synthèse de l'eau par Cavendish, avec conservation de la masse



Lavoisier et la combustion

1772 : Lavoisier (1743-1794) renverse la théorie de Stahl : combustion due à la *fixation* de la partie combustible de l'air (= l'oxygène de Priestley)

Rôle de la balance, mesures précises, expériences de contrôle

1783 : spectaculaire démonstration de l'analyse et de la synthèse de l'eau, qui n'est donc pas un élément

1785 : le phlogistique n'existe pas, puisqu'on peut s'en passer !



La fondation de la chimie moderne

Ce « renversement » devient une révolution, rupture radicale avec le passé, fondatrice de l'avenir, avec :

1. un « programme de recherche » (cf. la philosophe des sciences I. Lakatos) :
par l'analyse, identifier les *éléments* composant les corps – définis de manière opératoire, et non métaphysique, et placés *au centre* de la recherche :

Tout ce qu'on peut dire sur le nombre et sur la nature des éléments se borne suivant moi à des discussions purement métaphysiques; ce sont des problèmes indéterminés, susceptibles d'une infinité de solutions, mais dont il est très probable qu'aucune en particulier n'est d'accord avec la nature.

(...) nous attachons au nom d'éléments, ou de principes des corps, l'idée du dernier terme auquel parvient l'analyse (Toutes) les substances que nous n'avons encore pu décomposer par aucun moyen sont pour nous des éléments; non pas que nous ne puissions assurer que ces corps que nous regardons comme simples ne soient eux-mêmes composés de deux ou même d'un plus grand nombre de principes, mais puisque ces principes ne se séparent jamais, ou plutôt puisque nous n'avons aucun moyen de les séparer, ils agissent à notre égard à la manière des corps simples, et nous ne devons les supposer composés qu'au moment où l'expérience et l'observation nous en auront fourni la preuve.

Traité élémentaire de Chimie, 1789

2. un cadre théorique : la nouvelle théorie de la combustion, la rupture avec les 4 éléments et les « principes »
3. un outillage méthodologique (la méthode expérimentale) et instrumental (au premier rang, la balance)
4. une nouvelle nomenclature (une « novlangue »)

- qui brise avec le passé : indissolublement liée au programme de recherche, qu'elle exprime et auquel elle force à adhérer
- qui établit la rupture sociale entre les nouveaux chimistes professionnels et les artisans (apothicaires, droguistes)

5. - une équipe (Berthollet, Fourcroy, Guyton de Morveau, ...)

- son organe : les *Annales de Chimie*
- son outil d'enseignement : le *Traité élémentaire de Chimie*

6. un soutien de « l'opinion publique » (expériences spectaculaires)

Extraits de la *Méthode de nomenclature chimique* (1787)

« Noms anciens	Noms nouveaux
Acide du Soufre	Acide sulfurique
Acide vitriolique	
Huile de vitriol	
E[s]prit de vitriol	
Alkali végétal caustique	Potasse
Alkali volatil caustique	Ammoniaque
Diane	Argent
Lune	
Argent	
E[s]prit de Sel	Acide muriatique oxigéné (futur acide chlorhydrique)
E[s]prit de vin	Alcool
Kermès minéral	Oxide d'antimoine sulfuré rouge
Orpiment	Oxide d'arsenic sulfuré jaune
Oxigène	Oxigène
Baïe de l'air vital	
Principe acidifiant	
Phlogistique	
Safran de Mars	Principe hypothétique de Stahl Oxide de fer [...]

“(La chimie est) en attente (du) nouveau Paracelse (qui opérera) une révolution qui placerait la Chymie dans le rang qu'elle mérite, qui la mettrait au moins à côté de la physique calculée. (...) Se trouvant dans une position favorable et profitant habilement des circonstances heureuses, (il) saurait réveiller l'attention des savants, d'abord par une ostentation bruyante, par un ton décidé et affirmatif, et ensuite par des raisons, si ses premières armes avaient entamé le préjugé.”

Venel, article *Chymie* de *L'Encyclopédie*

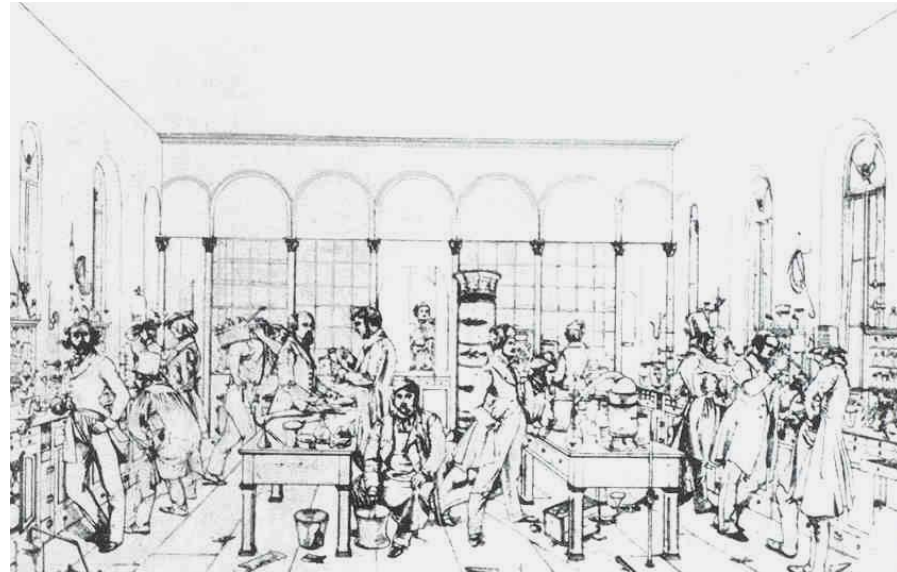
Chimie industrielle et chimie académique

Avec la thermodynamique (science des machines), la chimie est la science-type du XIX^e siècle :

- ✓ - programme lavoisien d'une chimie scientifique
 - surgissement de la chimie organique : production artificielle de l'urée (1828), synthèse de l'acétylène et du benzène (Berthelot 1860) → révolution idéologique : la barrière entre vivant et non-vivant s'effondre
- ✓ la chimie industrielle explose
 - début du XIX^e siècle : fabrication industrielle de la soude (procédé Leblanc, vers 1800), pour l'industrie textile, la sidérurgie, la savonnerie, etc.
 - chimie organique : industrie des colorants (vers 1860), etc.

Unité réussie de la chimie industrielle et de la chimie académique :

- dès la Révolution, chimistes académiques plongés dans la pratique : Berthollet (récolte du salpêtre), Chaptal (fermentation), Thénard, Gay-Lussac (conseillers de l'industrie);
 - en Allemagne, avec le développement de la chimie organique, formation des chimistes de l'industrie dans les grands laboratoires de Liebig et Baeyer
- > nouveau concept de l'université, alliant recherche et enseignement (A. von Humboldt)



La chimie, archétype de la *science positive*, devient l'étendard de l'enthousiasme scientifique qui voit en elle l'union des beautés du savoir et de l'utilité sociale.

Le débat de l'atomisme (1)

L'atomisme philosophique

Comment concilier permanence de l'être (Parménide) et changement ?

(sauf si le changement n'est qu'illusion – paradoxes de Zénon)

Leucippe, Démocrite : par les combinaisons d'atomes indestructibles, dérivant dans le vide (\leftrightarrow Aristote!)

Épicure, Lucrèce : avec cette doctrine, nous n'aurons plus peur ni de la mort, ni des dieux

→ atomisme suspect en permanence (cf. G. Bruno) – en particulier, comment le concilier avec l'eucharistie?

Mais l'atomisme est bien adapté à la philosophie mécaniste (malgré Descartes). Galilée, Newton, Boyle sont plutôt atomistes; certains chimistes expliquent l'acidité par la forme pointue des atomes d'acide, et les réactions chimiques par les arrangements de ces formes.

La naissance de l'atomisme scientifique

1802 Proust : loi des proportions définies (rapports de masse)

1805 Dalton : hypothèse atomique → poids atomiques des différents corps

1808 Gay-Lussac : loi sur les gaz (rapports simples en volumes)

1811 Avogadro : un volume donné de gaz contient un nombre donné de molécules

Mais, outre leurs relents philosophiques, comment déterminer les poids relatifs des atomes ? quelles sont les formules chimiques ? (utilisation d'une « règle de simplicité » arbitraire)

1814 Wollaston leur oppose les « poids équivalents », seuls à être directement obtenus de l'expérience

De nouvelles découvertes confortent plutôt les « équivalentistes » :

1819 Dulong et Petit : produit de la masse par la chaleur spécifique est constant

1819 Mitscherlich : corps cristallisant sous des formes semblables ont des formules similaires

1833 Faraday : électrolyse : dissociation électrique de différents électrolytes en « masses équivalentes »⁶⁴



Le débat de l'atomisme (2)

De nombreux chimistes influents (en France, J.-B. Dumas, M. Berthelot) refusent l'hypothèse atomiste, au nom d'une science « positiviste », qui se refuse à aller au-delà des hypothèses :

Hypotheses non fingo, disait Newton; ce qui signifie que la Science doit être formulée par des lois et non par des hypothèses. En effet, les lois peuvent être proposées, discutées, établies d'une manière définitive; elles sont alors le fondement solide d'une science qui se développe sans cesse, suivant des formules et un langage acceptés de tous.

Eh bien! c'est cette situation heureuse que la Chimie n'a pas encore réussi à réaliser, comme l'ont fait la Physique et l'Astronomie. Certes la chimie, elle aussi, possède des lois, des vérités générales, aussi nettes, aussi bien établies que celles des astronomes et des physiciens. Mais diverses personnes refusent de prendre ces lois comme le point de départ de notre science, et sa seule base légitime.

M. Berthelot, 1877

Cependant, les progrès de la chimie organique en particulier remettent l'atomisme au premier plan:

- nécessité de clarifier la nomenclature (19 formules différentes pour l'acide acétique !)

 - tentative d'unification au Congrès de Karlsruhe (1860) : premier congrès scientifique moderne

- début de la chimie structurale : noyau du benzène (Kekulé, 1866); chiralité (Pasteur)

- tableau de Mendeleïev (1869), basé sur les poids atomiques des corps, prédisant l'existence et les propriétés de nouveaux éléments



Les physiciens Maxwell, Boltzmann proposent une interprétation atomiste (« mécanique statistique ») de la thermodynamique; découverte de l'électron, particule subatomique, par J.-J. Thomson en 1897.

Mais, au tournant du siècle, vives réactions : doctrine positiviste de l'« énergétisme » (Ostwald, Mach, Avenarius, Duhem); dimension spiritualiste

opposée au « matérialisme » atomiste.



Victoire finalement de la théorie atomiste en 1911 avec la publication par J. Perrin (*Les Atomes*) de 13 mesures différentes et concordantes du nombre d'Avogadro, basées sur la science la plus avancée (viscosité, chaleur spécifique, théorie d'Einstein du mouvement brownien, théorie du rayonnement de Planck et Einstein).