

Histoire des Sciences

HIST-F-101

« 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
2006-2007

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

pmarage@ulb.ac.be

Plan du cours

0. Prélude

*Quelle histoire des sciences ?
La science avant la science*

1. Histoire du Ciel et de la Terre

*Le « miracle grec »; les Grecs et le cosmos
Les Arabes; le Moyen-âge occidental
La révolution copernico-galiléenne*

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

La science moderne et l'expérimentation

3. Histoire d'atomes et de molécules

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
Génétique, biochimie, biologie moléculaire; vers un nouveau paradigme
L'aspect de la Terre; une révolution scientifique : la tectonique des plaques*

5. Histoires de mathématiques

Les nombres et le zéro; l'infini; les géométries non-euclidiennes; l'indécidabilité

6. Ici et ailleurs

La science chinoise : une autre science ? Et pourquoi ici et pas là-bas ?

7. Le paradigme du changement de paradigme

Relativité, mécanique quantique (juste mentionné !)

8. Éternels regrets

*Machines à vapeur (science et technique); machines à calculer (informatique)
La science aujourd'hui : enjeux, défis, responsabilités
etc.*

3

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 pouvoirs (politique, militaire, économique); des techniques ; des autres sciences ; de la philosophie; et aussi sociologie des communautés scientifiques
- ✓ L'« *invention* » des sciences, reconnaissance de la *construction* sociale des objets scientifiques

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. Fr. Bacon 1561-1603) : *Induction* à partir des observations / expériences
 - Mais* limite de l'induction (D. Hume 1711-1776) : impossible de vérifier *toutes* les conséquences d'une théorie
 - K. Popper (1902-1994) : « falsificationnisme » : les théories scientifiques se caractérisent par la possibilité d'être mises en défaut par les faits – puissance d'une théorie ↔ sa « prise de risque »
 - Mais* « faits scientifiques » sont i) chargés de théorie, et ii) leur reconnaissance même est objet de discussion
 - Th. Kuhn (1922-1996): 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* (en posant les « bonnes questions »)
 - science normale ↔ présence d'*anomalies* (prises au sérieux par *certains* groupes de scientifiques) → *révolution scientifique* → nouveau paradigme (v. aussi G. Bachelard)
- > limite : « programme fort » en sociologie des sciences : ramener la science *essentiellement* à ses aspects sociologiques, faisant abstraction de son objet spécifique, en réduisant les critères de validité scientifique à des enjeux purement sociaux

4

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, Hurappa), 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 pithecanthrope (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	araire, 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 (chars)

-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
1	l 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

La science grecque

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)

Qu'est-ce que l'être ? Qu'est-ce que le mouvement ? Qu'est-ce que le savoir ?

- Les physiologues ioniens : un « principe » unique « laïc » à la base de toutes choses
Thalès de Milet (l'eau), Anaximandre (l'indéterminé), Anaximène (l'air), Héraclite d'Éphèse (le feu)
- Pythagore et les pythagoriciens : « *les nombres sont tout* » - la démonstration
- Les Éléates : Xénophon, Parménide, Zénon (apories) : ontologie (doctrine de l'Être) : « L'être est, le non-être n'est pas »; le changement n'est qu'illusion
- Les pluralistes : Empédocle : les quatre éléments (feu, air, terre, eau), sous l'action de l'« Amour » et de la « Haine »; Anaxagore
- Les atomistes : Leucippe, Démocrite
- Les sophistes : Protagoras, Gorgias, Prodicos : « L'homme est tout »
- La collection hippocratique : Hippocrate de Cos; médecins des École de Cos (plus « théoriciens ») et de Cnide (plus « empiriques »)

Socrate (-470, -399) primauté de la morale

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.

9

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 :

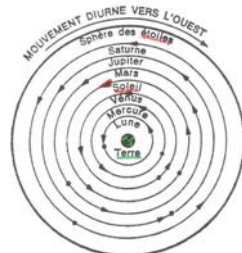
- mouvement « *naturel* » de chaque corps vers son « *lieu naturel* », qui découle de sa « *nature* » ;
- mouvement « *forcés* » ou « *violents* »
- + différence fondamentale entre repos (au sein du « lieu naturel ») et mouvement.

➤ Monde sublunaire :

- Terre sphérique, immobile au centre de l'Univers;
- monde du changement, de la corruption, de l'imperfection; 4 éléments;
- mouvements naturels (imparfaits), vers le bas (corps « graves », comportant une grande composante de terre) et vers le haut (corps légers, ignés); les corps plus denses ou plus lourds tombent plus vite;
- les mouvements « violents » ne persèverent 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 :

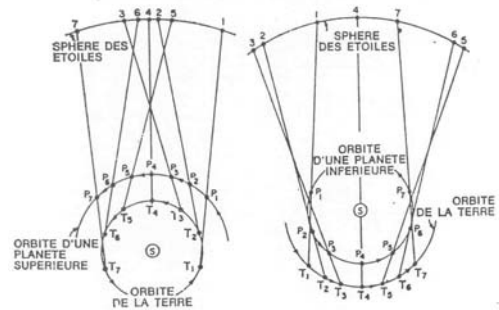
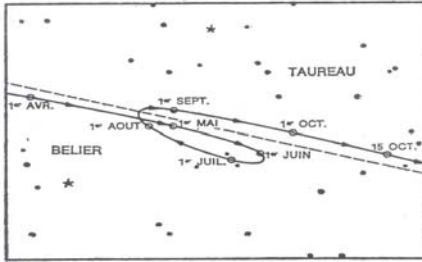
- univers sphérique, plein (milieu = « quintessence »), complètement contenu à l'intérieur de la sphère des étoiles (*rien* à l'extérieur, pas même le vide);
 - astres « parfaits », immuables, animés de mouvements circulaires parfaits (car sans commencement ni fin) sur des sphères cristallines concentriques ;
 - pour les planètes, combinaison de mouvements circulaires (sphères d'Eudoxe).
- Impossibilité du vide car mouvement y serait impossible
- ni mouvements naturels : pas de haut, pas de bas, pas de centre
 - ni mouvements violents : seraient infiniment rapides, car pas de résistance du milieu.



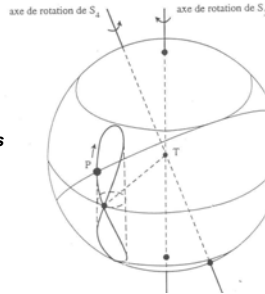
10

Les sphères concentriques d'Eudoxe

Stations et rétrogradations



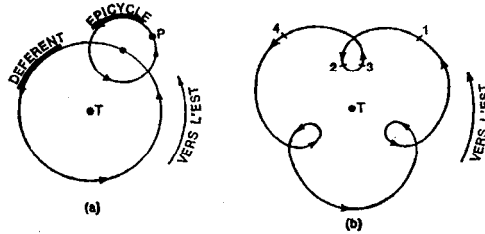
Combinaison des mouvements des sphères



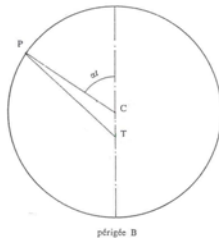
11

L'astronomie de Ptolémée

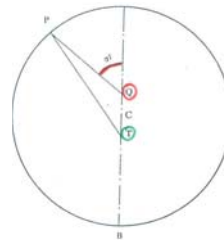
Déférent et épicycle (Hipparque)



Excentrique



Point équant



Ce système « **saue 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 + on ne ressent pas un mouvement de la Terre)
Pas d'anachronisme à ce propos !

12

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 phénomènes* » (c.-à-d. les décrire -) notamment dans un but pratique : l'astrologie) - contraste avec la culture « hellénique ».

13

La fin de l'Antiquité

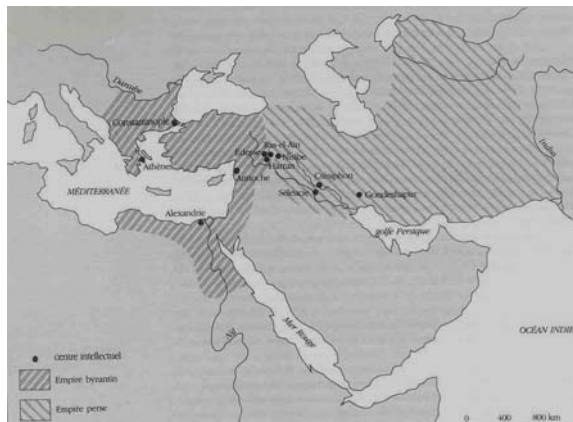
Peu de contributions « romaines » aux sciences, sauf
en médecine : Galien (immense influence)
en géographie : Strabon

Désintérêt / hostilité du christianisme (édit 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 : empires perse et byzantin



14

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

- Thales 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)
- 388 Héraclide du Pont (-388, -310) hypothèse de la rotation diurne de la Terre; Mercure et Vénus autour du Soleil
- 310 Aristarque de Samos (-310, -230) héliocentrisme; évaluation de la 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

ca. : « circa » = environ (dates approximatives)

15

L'Antiquité (2)

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 Ménélaos (fl. ca. 100) Alexandrie; géométrie sphérique
- 270 Diophante (fl. 270) théorie des nombres; équations indéterminées
- 280 lamblique (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 hydraulique, 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 »

Rome

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 Édikt 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, Ménélaos, Diophante, lamblique, Pappus, etc. !
- 490 Jean Philopon (490, 566) (Byzance) critique de la physique et de la cosmologie d'Aristote

techniques

- 100 aqueduc avec deux siphons à Pergame
- I 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

fl. = « floruit » : période d'activité avérée

16

Le Moyen-Âge arabo-musulman;

le Moyen-Âge occidental

L'Islam

Mahomet (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 : *mouvement des traductions* (du grec et du syriaque) - Unayn ibn Ishaq (808, ap. 856)

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

Nécessité d'inventer le vocabulaire savant et philosophique, de recouper les textes, de vérifier les 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

Optique

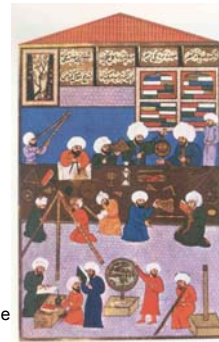
Médecine, hygiène publique

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

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

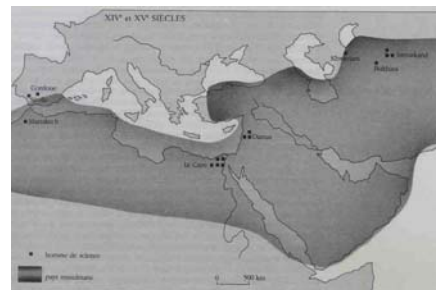
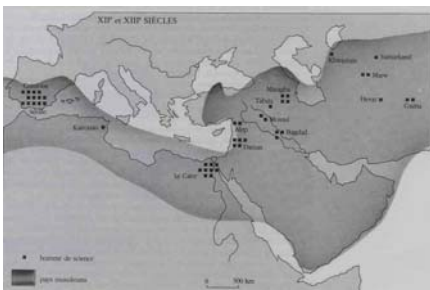
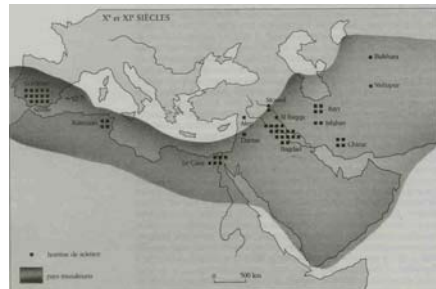
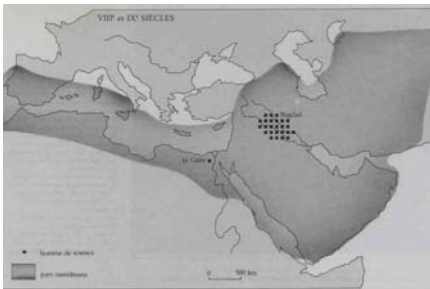
Astronomie – astrologie

mathématiques – calcul



19

Savants et lieux de savoir



20

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 (près de Babylone) les philosophes chassés d'Athènes par Justinien
- 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-Kindī (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 Sīna) (980,1037) (né à Boukhara) médecin, philosophe, esprit universel
- 1126 Averroès (Ibn Rush) (1126,1198) Aristote et la "double vérité", rationnelle et révélée
- 1135 Maimonide (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) chiffres indiens; algèbre; équations quadratiques
- 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-Haitham (Al-Hazen) (965,1039) (Le Caire) astronomie, optique
- 973 Al-Bīrdī (973,1030?) (né à Khwarizm, Inde) astronomie, minéralogie, géologie
- 1029 Ibn-Said (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"

21

L'Occident médiéval

A la fin de l'« Antiquité tardive » (VI^{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, perte des sources antiques.

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

✓ innovations techniques (provenant notamment de Chine via le 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 (Paris, 1079,1142) et la scolastique : critique des textes, argumentation, la *raison* au service de la foi.

22

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

23

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 foi
- empirisme (savants d'Oxford: mathématiques, optique)
- libérer une réflexion sortant des carcans aristotéliens (Parisiens : Buridan, Nicole Oresme).



24

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
v. 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
XII s 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 Adélard de Bath (1090,1160)
1114 Gérard de Crémone (1114,1187)
1135 Jean de Séville (fl. 1135,1153)
Hermann de Carinthie (fl. 1138, 1143)
XII s Dominique Gundisalvo, Platon de Tivoli, Robert de Chester, Pierre Alfonso, Savasorda, Alfred l'Anglais, Michael Scot, Hermann l'Allemand

25

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 + savants arabes
(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*
1230 Witelo (1230,1275) optique, réfraction
1230 Guillaume de Moerbeke (1230,1286) traductions d'Aristote directement 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 : propriétés des aimants
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 cathare)
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 aristotéliciennes par Etienne Tempier, évêque de Paris
1289 Montpellier (médecine)
1308 Cracovie
1386 Heidelberg
1426 Louvain

nouvelles techniques

1200 début de la 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

26

La révolution copernico-galiléenne

La Renaissance

A la fin du XIII^{ème} siècle, l'aristotélisme thomiste s'impose comme la doctrine officielle de l'Église.
Mais 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 1347), guerres (guerre de Cent Ans).

Reprise, d'abord en Italie (fin du XIV^{ème}), puis générale (XV^{ème} - au XVI^{ème} siècles)

- essor du capitalisme banquier 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 XV^e 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, 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 – « tout est possible »
- à la fois curiosité sans bornes et esprit d'aventure
 - et immense crédulité (magie, sorcellerie, alchimie)...

29

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 ottomans
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): <i>Le Prince</i>
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) <i>Le Decameron</i> (1355)
1387	Chaucer: <i>Canterbury Tales</i>
1431	François Villon (1431, >1463)
1494	Rabelais (1494,1553) <i>Gargantua</i> (1532)
1522	du Bellay (1522,1561) <i>Défense et Illustration de la langue française</i> (1549)
1524	Ronsard (1524,1585)
1530	La Boétie (1530,1563)
1533	Montaigne (1533,1592) <i>Les Essais</i> (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: <i>Très riches Heures du Duc de Berry</i>
1432	Van Eyck: <i>l'Agneau mystique</i> (Saint-Bavon, Gand)
1460	Hans Holbein (1460-70,1520)
1471	Albrecht Dürer (1471,1528) recherches géométriques (perspective)
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	Érasme de Rotterdam (1469,1527) <i>Éloge de la Folie</i> (1510)
1470	première imprimerie en France à la Sorbonne
1478	Thomas More (1478,1535) <i>L'Utopie</i> (1516)
1530	institution du Collège de France
1549	Plantin installe ses presses à Anvers

30

les savants

ingénieurs

- 1382 Taccola (1382?, 1458?) (Sienne) ingénieur militaire
 - 1404 Alberti (1404, 1472) ingénieur, urbaniste
 - 1405 Kyaser: *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 Gallée (1564, 1642) observations à la lunette (1610); *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde* (1632); *Discours concernant deux sciences nouvelles* (1638)
- 1571 Kepler (1571, 1630) 1^{er} et 2^{ème} loi (1609); 3^{ème} 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, devient un astronome renommé.

Retour en Pologne en 1503, 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 (peut-être 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);
- > 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 Soleil.



Avantages : essentiellement //harmonie du système (cf. platonisme) :

- > 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 des épicycles pour expliquer en détail les observations.

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

Copernic est 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. »

Pourtant 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 et Galilée, en rupture avec la pensée aristotélicienne.

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

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

33

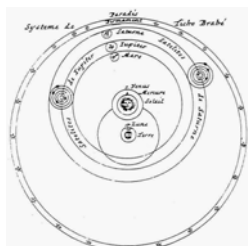
Tycho Brahe (1545-1601)

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

En 1572 observe l'apparition 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 tournent autour du Soleil, qui lui-même tourne autour de la Terre immobile.



Le système de Tycho

Tycho à Uraniburg, avec le grand cadran



34

Johannes Kepler (1571-1630)

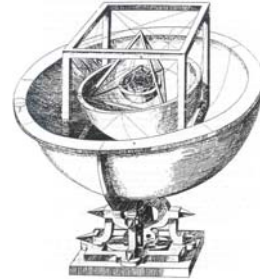
Astronome de l'Empereur, successeur de Tycho dont il a été l'assistant. C'est un homme de la Renaissance, disciple ardent de Copernic, pénétré de la conviction néoplatonicienne sur les régularités mathématiques gouvernant le monde.



Les trois lois de Kepler :

- 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 toute la façon traditionnelle de penser
 - Désaccord de 8 minutes entre calculs ptoléméens et observations de Tycho sur l'orbite de Mars
- la *loi des aires* lui est suggérée par sa mystique solaire
 - Du Soleil émane une force motrice qui pousse les planètes avec une force inversement proportionnelle à leur distance
- 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 »



35

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.



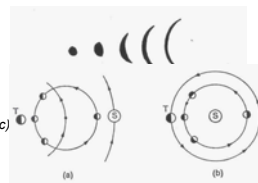
Ses observations astronomiques fournissent la preuve que le cosmos d'Aristote n'est pas conforme à la réalité

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



- phases de Vénus, qui donc tourne autour du Soleil

Éclairage de Vénus par le Soleil selon (a) Ptolémée, (b) Copernic



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

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

36

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 sacrés 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 copernicanisme

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 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, Galilée 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 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 frappée.

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* », 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 :

- la chute des corps est 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.: la vitesse acquise par un pendule lui permet de remonter à la même hauteur

→ idem sur un double plan incliné → mouvement à l'infini si le second plan est horizontal

- Galilée 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.

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'una sfera.



IN LEIDA.

Appresso gli Elzeviri. M. D. C. XXXVIII.

Alty
Phisice

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

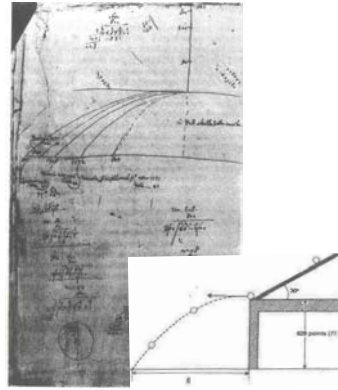
L'expérimentation

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.

41

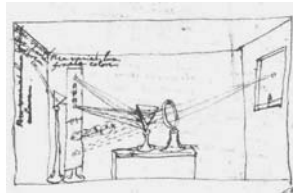
Newton (1642-1727) et la mécanique

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)

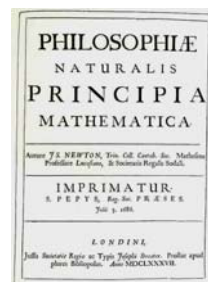
1672 : entre à la Royal Society

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

Toutes les bases de la mécanique et de la gravitation :

- 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 lois 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.



42

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.

43

« Je n'imagine pas d'hypothèses »

Contrairement à 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 (Hypothèses 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)

(On sent cependant les regrets de Newton. L'action à distance de la gravitation lui semble particulièrement 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 XVIII^{ème} 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 vaudra.

(...) 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.*

Perspective : le devenir de la mécanique

La mécanique céleste s'élève comme un monument à la nouvelle science, en particulier avec l'œuvre de Laplace, 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*



Pierre-Simon Laplace (1749-1827)

Parallèlement, évolution vers une abstraction toujours plus grande:

- Lagrange (1736-1813) : présentation purement mathématique de sa « 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 » du XVII^{ème} siècle

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 appuyés 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 1^{ère} et Jacques 1^{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 automatiques les opérations de la géométrie
- physique :
 - le mouvement inertiel est rectiligne (≠ Galilée : circulaire)
 - conservation de la « quantité de mouvement » (scalaire chez D.; 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 »).



49

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.

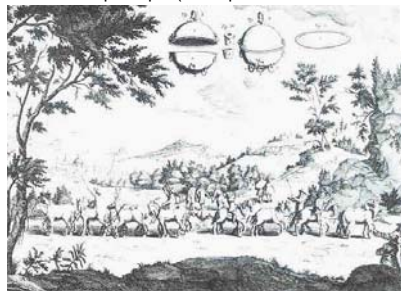
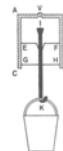
Les scolastiques font de l'« horreur du vide » un *principe*, de statut supérieur aux lois de la nature (l'eau ne s'écoule pas d'un vase scellé percé d'un petit trou dans le bas).

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 la pompe (→ découvre l'élasticité de l'air), et démontre spectaculairement la force de la pression atmosphérique (hémisphères de Magdebourg, 1654).



50

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

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

Robert Boyle (1627-1691)

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

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.

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)
- ✓ explorations géographiques
- ✓ 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 ancienne)

- 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)

53

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 XVII^e 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 fut 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*

54

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, quelques 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. Marin 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: mêle 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-Petersbourg (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)

55

XVIII^{ème} siècle : de la vogue mondaine à la science professionnelle

La vogue scientifique dans les salons aristocratiques ou bourgeois

Passion des « cabinets de curiosité » dans la Hollande bourgeoise, calviniste et prospère : plantes, animaux, minéraux, fossiles
Démonstrations de chimie (Lémery à Paris), d'électrostatique spectaculaire
Fureur du « magnétisme » à la fin du XVIII^{ème}

La vulgarisation : les traités « pour les dames »

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

1751L'« Encyclopédie, ou Dictionnaire raisonné des Sciences, des Arts et des Métiers » de Diderot et d'Alembert

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



De 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 « *humboldtienne* » du XIX^{ème} siècle
W. von Humboldt, Université de Berlin, 1810

56

L'âge classique (1)

événements politiques	1732 Haydn (1732,1809)
1609 indépendance des Provinces-Unies	1746 Goya (1746,1828)
1618 guerre de Trente Ans : princes allemands, France, Suède	1748 David (1748,1825)
1635 isolement du Japon	1756 Mozart (1756,1791)
1642 mort de Richelieu, de Louis XIII (1643)	1759 Schiller (1759,1815)
1649 exécution de Charles I d'Angleterre; Cromwell Lord protecteur 1653-1658	
1682 Pierre le Grand tsar (1682,1725)	philosophes
1685 révocation de l'Edit de Nantes	1561 Francis Bacon (1561,1626)
1710 famines	1588 Hobbes (1588,1672)
1715 mort de Louis XIV	1592 Gassendi (1592,1655)
1740 Frédéric II roi de Prusse	1596 Descartes (1596,1650) <i>Discours de la Méthode</i> (1637)
1776 déclaration d'indépendance des Etats-Unis	1623 Pascal (1623,1662)
1789 Révolution française	1624 1632 Spinoza (1632,1677)
	1632 Locke (1632,1704)
	1646 Leibniz (1646,1716)
littérature, arts	1647 P. Bayle (1647,1707) <i>Dictionnaire historique et critique</i> (1695)
1577 Rubens (1577,1640)	1689 Montesquieu (1689,1755) <i>L'Esprit des Loix</i> (1748)
1594 Poussin (1594,1665)	1694 Voltaire (1694,1778)
1606 Corneille (1606,1684)	1694 Quesnay (1694,1774)
1606 Rembrandt (1606,1669)	1712 Rousseau (1712,1778)
1622 Molière (1622,1673)	1713 Diderot (1713,1784)
1631 "La Gazette" de T. Renaudot	1724 Kant (1724,1804) <i>Critique de la Raison pure</i> (1781)
1632 Lullii (1632,1687)	1743 Condorcet (1743,1794)
1635 fondation de l'Académie française par Richelieu	1748 Bentham (1748,1832)
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)	

57

L'âge classique (2)

vie scientifique	1707 Euler (1707,1783) tout ! – en particulier analyse, fonctions complexes
1620 correspondance de Mersenne (1588,1648)	1710 Simpson (1710,1761) trigono.
1657 Accademia del Cimento (Florence) (1657,1667)	1713 Clairaut (1713,1765) géométrie
1660 Royal Society (charte en 1662)	1717 d'Alembert (1717,1783) équations différentielles
1665 <i>Philosophical Transactions</i> (Londres)	1736 Lagrange (1736,1813) calcul des variations (1763)
1666 <i>Journal des Savants</i> (Paris)	1743 Condorcet (1743,1794) statistiques
1666 Fondation de l'Académie royale des Sciences par Colbert	1746 Monge (1746,1818) <i>Traité de géométrie descriptive</i> (1799)
1675 Observatoire de Greenwich	1749 Laplace (1749,1827) fonctions harmoniques; probabilités (1812)
1686 Fontenelle (1657,1757) <i>Entretiens sur la pluralité des mondes</i>	1752 Legendre (1752,1833) nombres; analyse; intégrales elliptiques
1700 Académie royale de Berlin et Observatoire	
1724 Académie des Sciences de Saint-Petersbourg	mécanique, astronomie, géodésie
1751 <i>L'Encyclopédie</i> (1751,1772)	1548 Simon Stevin (1548,1620) statique
1752 <i>Journal de Physique</i>	1564 Galilée (1564,1642) chute des corps (<i>Discorsi</i> , 1638)
1753 fondation du British Museum	1625 Cassini (1625,1712) Directeur Observatoire de Paris
1768 <i>Encyclopedia Britannica</i>	1629 Huygens (1629,1695) dynamique; anneaux de Saturne
1783 création de l'École des Mines	1635 Hooke (1635,1702)
	1642 Newton (1642,1727) <i>Philosophiae Naturalis Principia Mathematica</i> (1687))
les savants	1656 Halley (1656,1742) observations de la comète en 1682
mathématiques	1698 Maupertuis (1698,1759) principe de moindre action (1747)
1591 Desargues (1591,1661) géométrie projective	1713 Clairaut (1713,1765) géodésie; mécanique céleste
1596 Descartes (1596,1650) géométrie analytique (1637)	1717 d'Alembert (1717,1783) mécanique rationnelle
1598 Cavalieri (1598,1647) les "indivisibles"	1725 Bradley: aberration des étoiles fixes
1601 Fermat (1601,1665) théorie des nombres; probabilités; géométrie analytique; analyse	1734 expéditions géodésiques: Pérou (La Condamine) et Laponie (Clairaut, Maupertuis)
1623 Pascal (1623,1662) géométrie; arithmétique; probabilités; précurseur de l'analyse	1736 Lagrange (1736,1813) <i>Mécanique analytique</i> (1788), <i>Géométrie analytique</i> (1795)
1629 Huygens (1629,1695) géométrie	1738 W. Herschell (1738,1822) astronome: Uranus (1780)
1642 Newton (1642,1727) calcul différentiel et intégral	1749 Laplace (1749,1827) <i>Mécanique céleste</i> (1798-1825)
1646 Leibniz (1646,1716) calcul différentiel et intégral, analyse combin.	
1654 Jacques I Bernoulli (1654,1705) analyse; calcul exponentiel	pression atmosphérique, vide
1654 Varignon (1654,1722) statique; composition des forces, déplacements virtuels	1643 Torricelli (1608,1647) pression atmosphérique
1667 Jean I Bernoulli (1667,1748) problèmes d'analyse	1648 expériences de Pascal (1623,1662) sur le vide
1667 Moivre (1667,1754) trigono. des imaginaires	1654 expérience des hémisphères de Magdebourg par O. von Guericke (1602,1686)
1685 Taylor (1685,1731) analyse	
1698 Mac-Laurin (1698,1746) analyse	
1704 Cramer (1704,1752) déterminants; systèmes d'équations	

58

L'âge classique (3)

	optique		chimie
1621	Snell (1580,1626) loi de la réfraction	1620	Mariotte (1620,1684) loi des gaz (1679)
1637	Descartes (1596,1650) <i>Dioptrique</i>	1627	Boyle (1627,1691) <i>The Sceptical Chymist</i> (1661); loi des gaz (1662)
1640	(env.) Fermat (1601,1665) polémique avec Descartes; "Principe de Fermat"	1660	Stahl (1660,1734) phlogistique
1665	Grimaldi (1618,1663) diffraction	1734	Priestley (1734,1804) oxygène
1665	anneaux de Hooke (1635,1702), dits "de Newton"	1737	Guyton de Morveau (1736,1816) nomenclature chimique
1666	Newton (1642,1727) travaux sur l'optique; <i>Optique</i> (1704)	1742	Schelle (1742,1786)
1669	Bartholin: la double réfraction	1743	Lavoisier (1743,1794) combustion (1773); nomenclature
1676	Römer: mesure de la vitesse de la lumière (215 000 km/s)	1748	Berthollet (1748,1822) nomenclature
1678	Huygens (1629,1695) théorie ondulatoire de la lumière	1754	Black identifie le gaz carbonique; méthodes quantit. en chimie des gaz
	électricité	1754	Proust (1754,1826)
1660	machine électrostatique de O. von Guericke (1602,1686)	1755	Fourcroy (1755,1809) nomenclature
1731	Cavendish (1731,1810)	1756	Chaptal (1756,1832)
1733	hypothèse des deux types d'électricité	1766	Cavendish identifie l'hydrogène comme composant de l'eau
1736	Coulomb (1736,1806) "loi de Coulomb" 1785	1766	Dalton (1766,1814)
1744	"bouteille de Leyde" (Van Musschenbroek, von Kleist)	1772	découverte de l'azote, du chlore (Scheele)
1750	(env.) Franklin (1706,1790) électricité atmosphérique, pointes, conservation de la charge	1774	découverte de l'ammoniac et de l'oxygène (Priestley, Scheele)
1791	Galvani (1737,1798): effet physiologique des courants (grenouilles)	1781	synthèse de l'eau par Cavendish
1800	Volta (1745,1827) pile		ingénieurs
	théorie de la chaleur	1736	Watt (1736,1819) machine à vapeur
1768	J. Fourier (1768,1830) théorie de la chaleur	1753	L. Carnot (1753,1823) <i>Essai sur la puissance des machines</i> (1782)
1778	Rumford: études sur la chaleur dégagée par frottement		médecine, biologie
1780	mémoires de Laplace et Lavoisier sur la chaleur	1578	Harvey (1578,1657) circulation du sang (1628)
	crystallographie	1628	Malpighi (1628,1694)
1736	Romé de l'Isle (1736,1790) cristallographie; constance des angles des cristaux	1632	Leeuwenhoek (1632,1723) observation des spermatozoïdes (1677), des bactéries (1681), des globules rouges (1688)
1743	Hauy (1743,1822) minéralogie géométrique : <i>Essai d'une théorie sur la structure des cristaux</i> (1783)	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) <i>Leçons d'anatomie comparée</i> (1800)
		1771	Bichat (1771,1802)

59

L'âge classique (4)

	instrumentation; métrologie		progrès techniques
1610	lunette de Galilée	1640	production de coke à partir du charbon
1618	premier microscope	1690	essais de combustion de la poudre dans un corps de pompe (Papin, Huygens)
1631	invention du verrier	1692	pouvoir éclairant du gaz de houille (Clayton)
1643	baromètre de Torricelli	1698	machine à vapeur de Savery (mines)
1645	machine à calculer de Pascal	1705	première machine à vapeur de Newcomen
1650	pompe à vide de O. von Guericke	1709	fonte au coke
1657	pendule de Huygens	1712	Réaumur: études sur l'acier
1659	machine pneumatique de Boyle	1733	industrie textile: navette volante de J. Kay
1661	manomètre de Huygens	1735	première exploitation du pétrole
1668	télescope à miroir de Newton	1740	prairies artificielles
1670	balance de Roberval	1742	acier fondu
1681	soupape de sûreté de D. Papin	1744	métier à tisser de Vaucanson
1714	échelle des températures de Fahrenheit	1747	production industrielle d'acide sulfurique; paratonnerre de Franklin
1742	échelle Celsius	1749	machine à carder le coton
		1750	semoir mécanique
		1751	tour à chariot 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>

60

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, ...)

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 formée à partir d'une matière unique)

✓ Arabes : VIII^{ème} siècle : Jabir ibn Hayyam (Geber); anthologie 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, préparation de l'alcool et de l'acide nitrique, etc.).

✓ Passage en Occident au XII^{ème} siècle : R. Bacon, Albert le Grand, R. Lulle, ...

✓ Renaissance :

Paracelse (1493-1541)

- diffusion de l'*hermétisme*

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

- Paracelse : + principe du « 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 + 2 (ou 3) principes + le « *phlogistique* », principe du feu, qui se dégage lors de la combustion (Stahl, 1660-1734).

La théorie du phlogistique, décriée depuis Lavoisier, rend compte de nombreux faits, et stimule les nombreuses recherches expérimentales.

Jean-Baptiste Van Helmont
(1577-1644)



Joseph Priestley
(1733-1804)

Les gaz

- J. B. Van Helmont : découverte des « 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 déphlogistique » (oxygène), « air phlogistique » (azote), HCl, NH₃, SO₂; Scheele : chlore
- 1783 : synthèse de l'eau par Cavendish, avec conservation de la masse.

Laurent Antoine Lavoisier et son épouse



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 :

- ✓ un « programme de recherche » (cf. le 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.

Lavoisier, *Traité élémentaire de Chimie*, 1789

- ✓ un cadre théorique : la nouvelle théorie de la combustion, la rupture avec les 4 éléments et les « principes »
- ✓ un outillage méthodologique (la méthode expérimentale) et instrumental (au premier rang, la balance)
- ✓ 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)
- ✓ - une équipe (Berthollet, Fourcroy, Guyton de Morveau, ...)
 - son organe : les *Annales de Chimie*
 - son outil d'enseignement : le *Traité élémentaire de Chimie*
- ✓ un soutien de « l'opinion publique » (expériences spectaculaires).

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

- Noms anciens	Noms nouveaux	
Acide de soufre	Acide sulfurique	
Acide vitriolique		
Huile de vitriol		
Espirit de vitriol		
Alkali végétal caustique		Potasse
Alkali volatil caustique		Ammoniaque
Diamme		Argent
Lune		
Argent		
Espirit de sel		
Espirit de vin	Acide muriatique oxygéné (futur acide chlorhydrique)	
Kermis minéral	Alcool	
Orpiment	Oxide d'antimoine julfuré rouge	
Oxigène	Oxide d'arsenic julfuré jaune	
Huile de l'air vital	Oxigène	
Principe acidifiant	Principe hypoborique de Stahl	
Phlogistique	Oxide de fer [...]»	
[safran de Mar]		

«(La chimie est) en attente (du) nouveau Paracelse (qui opérera) une révolution qui placera la Chimie dans le rang qu'elle mérite, qui la mettra au moins à côté de la physique calculée. (...) Se trouvant dans une position favorable et profitant habilement des circonstances heureuses, (il) saura 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 *Chimie* de L'Encyclopédie

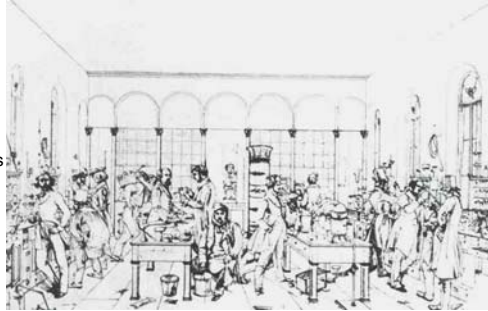
Chimie industrielle et chimie académique

Avec la thermodynamique (science des machines), la chimie est la science reine du XIX^{ème} 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^{ème} 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.

65

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 (←→ 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. Galilée, Newton, Boyle sont plutôt atomistes. Certains savants 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 constants de masse lors des réactions chimiques ≠ mélanges)

1805 Dalton : hypothèse atomique → poids atomiques des différents corps

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

1811 hypothèse d'Avogadro : un volume donné de gaz contient un nombre donné de molécules

Mais comment déterminer les poids relatifs des atomes ? quelles sont les formules chimiques ?
utilisation d'une « règle de simplicité » assez arbitraire

1814 Wollaston oppose aux hypothétiques atomes, qui échappent à l'expérience, les « poids équivalents », seuls à être directement mesurés

De nouvelles découvertes, vues aujourd'hui comme supportant l'atomisme, confortent plutôt les « équivalentistes » :

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

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

1833 Faraday : électrolyse : dissociation électrique des électrolytes en « masses équivalentes »



66

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 de l'expérience :

Hypothèses 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), le premier congrès scientifique moderne
- débuts de la chimie structurale : noyau du benzène (Kekulé, 1866); chiralité (Pasteur)
- le tableau de Mendeleïev (1869), basé sur les poids atomiques des corps, prédit l'existence et les propriétés de nouveaux éléments.



De leur côté, les physiciens Maxwell, Boltzmann proposent une interprétation atomiste (« mécanique statistique ») de la thermodynamique. En outre, 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.

*James-Clerk Maxwell
(1831-1879)*



*Ludwig Boltzmann
(1844-1906)*

Victoire de la théorie atomiste avec la publication décisive par J. Perrin en 1911 (*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).

Histoire de la Terre et de la Vie

Biologie, géologie, paléontologie;
théorie de l'évolution

La biologie ancienne

➤ **Savoirs pratiques très anciens**

- chasseurs-cueilleurs du paléolithique – cf. peintures animales de Lascaux
- révolution néolithique (Proche-Orient, env. -10 000) : invention de l'agriculture et de l'élevage (sélection), qui permettent sédentarisation et division du travail, et dès lors développement des autres techniques
- savoirs médicaux

➤ **Forts enjeux idéologiques** (mythes d'origine, magie, religion), à toutes les époques (aujourd'hui encore: intégristes chrétiens (USA) et islamistes)

Grands empires fluviaux (Chine, Égypte, Mésopotamie) : connaissances agronomiques, médicales, physiologiques, anatomiques.

Grèce

✓ Aristote fonde la biologie scientifique (surtout zoologie)

- **systématique** : définition des espèces (reproduction) et classification des animaux

animaux à sang rouge (quadrupèdes vivipares (mammifères, dont cétacés et chauves-souris; quadrupèdes ovipares : lézards, tortues, batraciens + serpents; poissons; oiseaux), et dépourvus de sang rouge (corps mou: céphalopodes; corps mou + écailles : crustacés; corps mou + coquille: coquillages, oursins; insectes + vers); ces groupes subdivisés à leur tour

- **biologie fonctionnelle** : anatomie des animaux (observations minutieuses), incluant l'homme

« *pourquoi* tel organe est-il comme il est ? quelle est sa fonction ? » ; « la nature ne fait rien en vain »

NB: cette recherche des **causes finales**, typiquement biologique, imprènera toute sa philosophie.

Botanique : Théophraste (son successeur au Lycée); Dioscoride (1^{er} s.).

✓ Hippocrate de Cos (v. 460, 377) et l'école hippocratique : observations empiriques et efforts de rationalisation

Travaux expérimentaux à Alexandrie (Hérophile, Érasistrate : les seules dissections humaines jusqu'à la Renaissance) + écoles de médecine rivales (« méthodique », « empirique », « éclectique »).

Rome

Peu de travaux originaux, mais grande influence au Moyen-âge de l'« Histoire naturelle » de Pline (en fait, une compilation de niveau peu élevé, incluant animaux légendaires, etc.)

Un très grand médecin : Galien (v. 131-200) – qui aura une énorme influence jusqu'à la Renaissance
– théorie de l'équilibre des humeurs (quatre humeurs, quatre tempéraments – cf. quatre qualités)
– mais insuffisance de certaines observations (dissections animales seulement).

Arabes

Bases théoriques de la science grecque (4 éléments, 4 qualités) + préoccupations pratiques, notamment :

- médecine : hygiène, hôpitaux, pharmacies, soin apporté au diagnostic (fièvre, pouls, urines) et recueils de cas cliniques, ophtalmologie, chirurgie, usage d'anesthésiques, découverte de la petite circulation (cœur-poumons)
grands médecins philosophes : le traducteur Hunayn ibn Ishaq, Rhazès (Al-Razi, v. 854-v. 930); Avicenne (Ibn Sina, 980-1037 : *Canon de la Médecine*), Maimonide
- agriculture : irrigation, importation d'espèces extrême-orientales.

71

De nouveaux mondes...

A la Renaissance, redécouverte des Anciens + observations scrupuleuses → plusieurs renouveaux :

- zoologie (dont poissons, insectes) et (plus encore) botanique; descriptions, classifications; herbiers et jardins botaniques (Pise 1543); traités (+ planches gravées : importance de l'imprimerie)
- anatomie et physiologie :
 - dissections par A. Vésale (1514-1564), contredisant Galien (« *Structure du corps humain* », 1543)
 - circulation du sang, par W. Harvey (1628) : le cœur comme pompe (vivisections, mesures quantitatives - cf. philosophie mécaniste) (précurseur M. Servet, exécuté à Genève).

Mais surtout, du XV^{ème} au XIX^{ème} siècle, découvertes de nouveaux mondes

1. les grandes découvertes géographiques

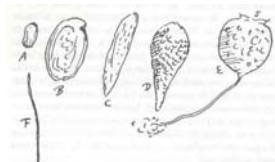
Afrique (contournement par les Portugais au XV^{ème} s.), Amérique → nouvelles faunes et flores
plantes d'Amérique : manioc, maïs, pomme de terre, tomate, courgette, tabac, etc.

Voyages systématiques d'exploration au XVIII^{ème} (Pérou, Sibérie, Sénégal, Extrême-Orient, ...)

2. le monde microscopique (1612, cf. l'invention de la lunette)

Dans la 2^{ème} moitié du XVII^{ème} (et malgré la qualité médiocre des instruments), le microscope permet le développement ou l'apparition de nouvelles disciplines, et la découverte de nouvelles espèces

- R. Hooke (*Micrographia*, 1665) : notamment yeux de la mouche; « cellules » du liège
- Swammerdam : dissections d'insectes au microscope; globules rouges
- M. Malpighi : étudie les tissus (histologie); embryologie du poulet; capillaires
- N. Grew : sexualité des plantes (étamines = organes mâles) (contre Aristote)
- et surtout A. Leeuwenhoek (1632-1723) : noyau cellulaire, spermatozoïdes; protozoaires première observation de bactéries



3. les mondes éteints (fossiles)

72

La classification des espèces (1)

Devant la multiplicité des formes animales et végétales, effort continu de classification scientifique, l'unité « de base » étant l'espèce.

> Définition de l'espèce

Affermissement progressif du critère de la reproduction, notamment avec J. Ray au XVII^{ème}. Avec Buffon, les descendants eux-mêmes doivent être fertiles

contre la confusion des traditions populaires des monstres nés d'accouplements « contre-nature » entre espèces différentes

Clarification progressive de la distinction espèce – variété.

> Mais pourquoi classer ? selon quels critères ? avec quelle conception sous-jacente de la nature ?

1. pour identifier :

dans une conception « nominaliste » (cf. Ockham), les classifications sont conventionnelles, artificielles, seuls existent les individus – variante : seules existent les espèces

les critères de classification visent à l'efficacité → approches souvent dichotomiques (flores)

2. pour découvrir l'ordre de la nature :

les espèces, et éventuellement les taxons supérieurs, correspondent à une réalité

- soit une réalité idéale, qui renvoie à « l'essence » (immuable) des individus : essentialisme

« Socrate et Aristote ont en partage leur nature d'hommes »

Cette approche correspond assez à l'enseignement de la Bible : Dieu a créé les espèces; Noé a sauvé du Déluge un couple par espèce

- soit à une réalité matérielle des taxons supérieurs – renvoyant éventuellement à des ancêtres communs (dans une philosophie transformiste).

Les regroupements visent alors à être naturels, et à faire intervenir *tous* les caractères

B. et L.-A. de Jussieu, Adamson (fin du XVIII^{ème} - début XIX^{ème} s)

phénétique numérique (années 1950); cladistique (ancêtre commun)

73

La classification des espèces (2)

Botanistes du XVI^{ème} - XVII^{ème} s. :

- A. Césalpin (1519-1603) utilise l'analyse de toute la plante, et en particulier fleur, fruit et graine

- J. Ray (1627-1705), physiologiste, classe plus de 18 000 plantes (1686)

- Tournefort (1656-1708) : tenant d'un système naturel (plantes), pressent la notion de genre.

Au XVIII^{ème} s., deux protagonistes majeurs :

- **Linné** (1707-1778) : essentialiste, esprit religieux; collaboration de nombreux élèves et grand prestige

- classification artificielle, basée pour les plantes sur la seule fructification

- introduit la classification binomiale genre – espèce, encore à la base du système actuel.



- **Buffon** (1707-1788) : intendant du Jardin du Roi (créé en 1635), représentant typique des Lumières, grand retentissement dans le public cultivé

(« *Histoire générale des animaux* »,

40 volumes, de 1749 à 1804)

- rejette cette classification artificielle

- lui oppose la description de l'ensemble des caractères :

anatomie, comportement, distribution géographique (biogéographie)

- inclut l'homme dans l'échelle animale.



74

Géologie (1) : le contexte

Remarques préliminaires :

1. Double dimension de la géologie
 - porte sur l'origine de la Terre et de ses transformations → dans toutes les cultures, forte imprégnation mythique et religieuse
 - préoccupations pratiques (terrains métallifères, découvrir les filons miniers, pétrole); en retour, la pratique fournit de nombreuses données : disposition des filons, découvertes de fossiles (mines, aménagement de routes et canaux).
2. En Occident, jusqu'au XIX^{ème} s., le cadre est fixé par la Bible, lue littéralement :
 - histoire courte : 6 000 ans
 - événement catastrophique : le Déluge, dont les eaux ont recouvert toute la Terre.
3. L'histoire de la géologie est étroitement liée à celle de la biologie : paléontologie (nature des fossiles et leur rôle pour dater les couches géologiques).

Renaissance

- reconnaissance de terrains d'origines sédimentaire ou volcanique (mais nombreuses lacunes et erreurs)
- discussions sur la nature des fossiles : « végétations de pierre », engendrés par la roche (+ influences astrales), ou d'origine vivante et datant du Déluge (Fontenelle : fossiles = « médailles incontestables du Déluge »).

XVII^{ème} s.

- théories diverses sur l'origine et la structure de la Terre (Descartes, Leibniz), et sur les fossiles (Hooke)
- début de la stratigraphie : Niels Steensen (Sténon 1638-1686) explique la structure géologique de la Toscane par des processus physiques : superposition de couches sédimentaires + effondrements → couches inclinées et fossilifères; les couches les plus basses sont les plus anciennes.

75

Géologie (2) : actualisme ou catastrophisme ?

XVIII^{ème} s.

1. - reconnaissance des corrélations à grande distance des mêmes couches (Werner)
 - levé de cartes géologiques (Guettard et Lavoisier)
 - progrès de la minéralogie (R.-J. Haüy).
2. Débat concernant la genèse des reliefs (orogénèse – études des Alpes par H.-B. de Saussure) :
 - A. G. Werner (1750-1817) : théorie « neptunienne » : origine sédimentaire de toutes les roches + succession d'événements catastrophiques (effondrements)
 - approche « catastrophiste », compatible avec une histoire « courte »
 - J. Hutton (1726-1797) : théorie « plutonienne » : chaleur interne de la Terre + pression + érosion → processus continus de génération des roches et des reliefs (plissements)
 - « uniformitarisme » ou « actualisme » : changements graduels dus aux causes encore actuelles
 - Avicenne avait déjà reconnu l'influence sur les paysages du volcanisme et de l'érosion – causes actuelles
 - doutes concernant l'âge de la Terre : l'approche actualiste implique une histoire « longue »
 - Buffon « *Les époques de la Nature* » (1778) utilise vitesse de sédimentation → Terre a « au moins » 75 000 ans

Lyell (1797-1875) et l'actualisme

Reconnaît le rôle de la pression et de la température dans le métamorphisme de certaines roches sédimentaires

Actualisme : non-recours à la divinité; les mêmes causes agissaient dans le passé qu'aujourd'hui, avec des intensités semblables; les changements géologiques sont essentiellement graduels malgré les événements violents et malgré les discontinuités stratigraphiques.

Influence de ces idées sur Darwin – même si Lyell est initialement fixiste en paléontologie



76

Fixisme ou transformisme (1) ?

- Dieu a créé telles quelles les espèces que nous connaissons aujourd'hui, qui sont séparées par des barrières étanches : **fixisme** ⇒ tous les regroupements de taxons supérieurs sont artificiels
 - Linné : évolue du fixisme des espèces vers la possibilité d'une origine commune des espèces d'un même genre, mais reste nominaliste en ce qui concerne les niveaux supérieurs
 - Au XIX^{ème} s. : Cuvier, Lyell, Agassiz sont fixistes.
- les espèces ont évolué et les taxons supérieurs correspondent à des ancêtres communs : **transformisme**
 - Buffon : transformisme « modéré »; reconnaît la disparition de certaines espèces, et les différences entre les faunes de l'Ancien et du Nouveau Monde
 - Autres protagonistes : Maupertuis (1698-1759), E. Darwin, Et. et I. Geoffroy Saint-Hilaire, Lamarck, Ch. Darwin

Cuvier (1769-1832) et la paléontologie

- anatomie comparée
 - principes de « corrélation des formes » et de « subordination des caractères »
 - corrélations entre forme de l'intestin, type d'alimentation (herbivore / carnivore), dents, griffes, etc.
- fonde la **paléontologie** (vertébrés), qui utilise ces principes → succès spectaculaires
- reconstitution des caractères généraux à partir de fragments (mammouth; utilisation des dents)
- succession des faunes : espèces différentes dans des couches différentes (**paléontologie stratigraphique**)
 - i) **extinctions d'espèces** : catastrophes
 - ii) nouvelles espèces : migrations entre continents ? créations répétées ?



Cuvier s'oppose farouchement au transformisme (opposition à Lamarck, débat avec Etienne Geoffroy Saint-Hilaire devant l'Ac. des Sciences en 1830) :

- corrélation des formes conçue de façon presque mathématique
 - pas de place pour des formes intermédiaires
- philosophie essentialiste : discontinuités franches entre espèces
- et aussi fidélité à la lettre de la Bible (mais probablement secondaire)



sanguis fossile (marsupial)
planche de Cuvier

77

NB: cet essentialisme accompagne « naturellement » son travail sur le rôle des fossiles dans la datation des couches: indispensable stabilité des espèces.

Fixisme ou transformisme (2) ?

Lamarck (1744-1829) et le transformisme

Ressemblances entre espèces + observation que les fossiles les plus anciens (couches les plus profondes) sont les plus différents des espèces actuelles
→ **évolution** des espèces (« *Philosophie zoologique* » 1809)

Mécanisme de l'évolution :

- Processus lent et graduel dû à l'**adaptation** aux modifications de l'environnement : « la fonction crée l'organe »
- changements de l'environnement → changement des actes → changement des formes (développement ou atrophie)
- transmission aux descendants des caractères modifiés



Philosophie sous-jacente :

- **progrès** constant des espèces (contrairement à la sélection naturelle chez Darwin)
- pas d'extinctions (contrairement à Cuvier)
- approche en fait déterministe (contrairement au rôle du hasard chez Darwin)

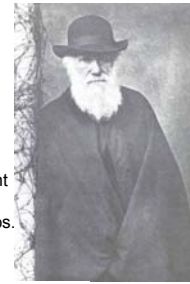
Vives critiques de Cuvier : les formes intermédiaires ne sont pas observées – pas de continuité. Lamarck se défend en invoquant les lacunes des archives.

Darwin (1809-1882) et l'évolution

Petit-fils d'Érasme Darwin (1731-1802), évolutionniste proche des idées de Lamarck.
1831-36 : naturaliste à bord du Beagle, visite l'Amérique du Sud, l'Océanie, les Galápagos.

Est frappé par

- la proximité entre certaines espèces vivantes et éteintes (tatous)
- la plus grande proximité entre espèces géographiquement proches, même dans des environnements physiques différents, qu'entre espèces de continents différents, même vivant dans des environnements physiques semblables
- la grande variabilité des espèces isolées géographiquement : tortues, pinsons des Galápagos.



→ **Évolution** des espèces (influence des idées actualistes de Lyell)

- « horizontalement » : variabilité géographique, importance de l'isolement

→ **biogéographie** (cf. Buffon, A. von Humboldt);

- « verticalement » : entre espèces fossiles et vivantes.



pinsons des Galapagos

→ Mécanisme : **sélection naturelle** (influence de Malthus)

- influence de l'environnement et luttes interspécifiques, pouvant mener à la disparition d'espèces

≠ Lamarck, pour qui les espèces s'adaptent

- luttes **intra**spécifiques, entre individus de la même espèce, sélectionnant graduellement les caractères favorables
ce rôle de la variabilité individuelle, même de peu d'ampleur ≠ Lamarck
cf. sélection artificielle des éleveurs.

Avant de publier ses conclusions (plus de 20 ans après leur élaboration), travaux approfondis en systématique.

A. R. Wallace (1823-1913), naturaliste en Amazonie (massifs forestiers isolés par bras de l'Amazonie) et en Malaisie, est arrivé indépendamment aux mêmes conclusions que Darwin (évolution + sélection naturelle).



Wallace

Présentation conjointe de deux communications à la Linnean Society le 1/7/1858.

79

L'accueil du darwinisme

1859 « *L'origine des espèces* » : évolution et sélection naturelle (+ sexuelle), sur base de la variabilité individuelle :

- arguments détaillés, basés sur biogéographie, paléontologie, anatomie et physiologie comparées, morphologie, embryologie (grands progrès depuis l'époque de Lamarck !)
- inclut l'homme dans l'évolution (cf. « *La descendance de l'Homme* », 1871).

➤ **révolution scientifique** : accueil favorable chez beaucoup de naturalistes et de paléontologues (contrairement à Lamarck, 50 ans plus tôt); diffusion active par Th. Huxley (Angleterre, 1825-1895), E. Haeckel (embryologiste, Allemagne, 1834-1919 : l'ontogenèse comme répétition de la phylogenèse)

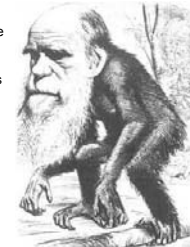
➤ événement **culturel** majeur – cf. Copernic

- ✓ scandale et réactions virulentes des Églises (création des espèces selon la Bible, et surtout l'homme fruit de l'évolution → Adam et le péché originel !?)

L'évêque anglican Wilberforce : « M. Huxley, j'aimerais savoir : est-ce par votre grand-père ou par votre grand-mère que vous descendez du singe ? »

Huxley : « Entre avoir pour grand-père un misérable singe ou un homme richement doté par la nature et possédant une grande influence, mais qui utilise cependant ses facultés et son influence dans le but d'introduire le ridicule dans une grave discussion scientifique, j'affirme sans hésiter ma préférence pour le singe ! »

- ✓ accueil enthousiaste des milieux progressistes (notamment Marx et Engels)



Impact

- monde évolutif plutôt que statique – pour la première fois, irruption du **temps** dans la science
- négation de l'essentialisme
- processus matérialiste de la sélection naturelle plutôt que recours aux desseins divins ou à des processus téléologiques

Mais débats, qui dureront jusqu'à la « synthèse évolutionniste » des années 1930-40 (v. + loin) :

- sélection naturelle ← → hérédité des caractères acquis
- gradualisme ← → évolutions brusques (« mutations »)

En outre, utilisations sociales et politiques du darwinisme : « darwinisme social », eugénisme (F. Galton, cousin de Darwin).

80

Génétique, biochimie, biologie moléculaire : vers le nouveau paradigme

Génération et reproduction aux XVII^{ème} – XVIII^{ème} s.

1. Question de la génération spontanée

Croyance longtemps partagée, y compris pour les animaux supérieurs (anguilles; Van Helmont pour les souris)

XVII^{ème} : premières expériences la contredisent

1668 (Fr. Redi) : pas de génération d'insectes dans enceinte isolée où ponte impossible

Spallanzani (1729-1799) : pas d'apparition des êtres microscopiques (infusoires) dans un milieu suffisamment chauffé et isolé.

Mais objection des spontanéistes : le chauffage a tué la « force générative ».

Pasteur : polémique avec Pouchet (1861), techniques expérimentales scrupuleuses, stérilisation → microbiologie.

Louis Pasteur (1822-1895)



2. La reproduction

Reproduction sexuée : immenses progrès dans la deuxième moitié du XVII^{ème} s. (microscope)

spermatozoïdes (Leeuwenhoek 1677); sexualité des plantes (Camerarius 1694; connue par les agriculteurs depuis l'Antiquité, mais niée par Aristote); ovulation chez les mammifères (ovule observé pour la première fois par von Baer, 1819)

Mais aussi : parthénogenèse du puceron (Leeuwenhoek, Ch. Bonnet)

Qui porte le principe actif ?

- la femelle (« *ovisme* ») : la semence mâle ne sert qu'à réveiller l'ovule - cf. parthénogenèse
- le mâle (« *spermisme* ») : l'ovule n'est qu'une matière nutritive
- les deux ?

3. Préformation ou épigenèse ?

Comment se fait la génération des formes ?

- préformation : préexistence du vivant dans les germes (opposés à la génération spontanée) – emboîtement des germes (« *homunculus* ») – cf. philosophie mécaniste
- épigenèse : construction progressive des formes pendant le développement de l'embryon (K. F. Wolff 1733-1794), sous l'effet d'une « *virtu formative* », « *principe vital* », par opposition au mécanisme.

Cytologie, embryologie (XIX^{ème} s.)

A partir du début du XIX^{ème} s. :

- perfectionnements du microscope (combattre les aberrations; fabricant Zeiss) et des techniques de préparation
 - choix judicieux des matériels : végétaux, protozoaires, tissus (*histologie* : X. Bichat).
 - ✓ - universalité de la cellule
 - *théorie cellulaire* vers 1840 (Schleiden, Schwann)
 - distinction entre cytoplasme et *noyau* (Brown, 1831)
 - 1830-1840 divisions cellulaires (« *mitose* ») durant le développement de l'embryon (von Baer, Reichert).
 - ✓ - les spermatozoïdes sont nécessaires à la fécondation de l'ovule
 - expériences de Spallanzani sur le crapaud; Nägeli chez les mousses et fougères
 - les gamètes (ovule et spermatozoïde) sont donc *ensemble* à l'origine de la formation de l'œuf
 - 1875 : observation directe de la pénétration du spermatozoïde dans l'ovule (oursin)
 - ✓ - v. 1875-1885 : lors de la division cellulaire, fractionnement de la matière du noyau en *chromosomes* (Van Beneden, 1846-1910), en nombre pair caractéristique de chaque espèce
 - 1887 : ovule et spermatozoïde comportent un nombre moitié de chromosomes (haploïdie) : réduction chromatique lors de la division des cellules mères des gamètes, la *méiose* (Van Beneden); l'œuf reconstitue la diploïdie.
 - ✓ - dès lors, noyau et chromosomes sont reconnus comme siège de l'hérédité;
A. Weismann (1887) distingue catégoriquement la lignée « germinale » (gamètes : *génotype*) et la lignée « somatique » (autres cellules : *phénotype*) → modifications affectant la lignée somatique ne peuvent affecter l'hérédité, portée par le « plasma germinatif ».
- *néodarwinisme*
- négation de l'hérédité des caractères acquis (que Darwin lui-même acceptait dans une certaine mesure)
 - variabilité génétique due à la recombinaison sexuelle (crossing-over durant la méiose).

83

La génétique mendélienne

Gregor Mendel (1822-1884, Moravie) : croisement de pois (1865)

- procédure expérimentale soignée :
 - choix du matériel : lignées pures, caractères bien identifiés
 - éviter les contaminations (pollinisation artificielle)
- quantification des résultats (+ admettre variance statistique)
ceci le différencie de ses contemporains (Naudin, Nägeli; aussi éleveurs et grainetiers)

→ lois probabilistes, s'expliquant par l'indépendance des caractères (a choisi des caractères portés par des chromosomes différents), le type étant déterminé par la combinaison des gamètes des parents; distinction des facteurs dominant et récessif.

Mais *pas d'impact immédiat* de ces travaux :

- publie peu : fonctions monastiques, et aussi éprouve des difficultés d'interprétation de nouvelles expériences
- en l'absence de théorie sous-jacente, ses résultats sont essentiellement non interprétables.

En 1900, « redécouverte » des lois de Mendel par H. De Vries (1848-1935), et indépendamment par E. von Tschermak et par C. Correns : depuis Mendel, le contexte a fort évolué (cytologie, travaux de Weismann).

De Vries insiste sur le rôle des variations héréditaires brusques et de grande ampleur (« *mutations* »), s'écartant ainsi du gradualisme darwinien (sélection de variations individuelles légères, mais induisant un avantage compétitif, même faible); minimisation du rôle dynamique de la sélection naturelle, qui se limiterait à éliminer les « mauvaises » mutations.

A partir de 1910, T. H. Morgan (1866-1945) montre (mutations de la drosophile) que les « *facteurs mendéliens* » (les *gènes*) sont portés par les chromosomes : repérage de caractères sur les chromosomes sexuels; liaison entre caractères (*linkage*), qui peuvent cependant être dissociés par enjambement (*crossing-over*), d'autant plus facilement qu'ils sont plus éloignés → réalisation de « cartes chromosomiques ».

En 1927, H. J. Müller provoque artificiellement des mutations par exposition aux rayons X.



84

Biochimie, ADN et code génétique

Fin du XIX^{ème} et XX^{ème} s. : développement considérable

- des techniques physiques et physico-chimiques
ultracentrifugation, microscopie électronique, marquage radioactif, électrophorèse, chromatographie
- des techniques biologiques et génétiques
cultures *in vitro*, construction de lignées mutées, génie génétique.

✓ A partir de la moitié du XIX^{ème} s., développement de la **biochimie de la cellule** (métabolisme) :

- enzymes (fermentation)
- protéines, reconnues comme macromolécules par centrifugation (1920)
- cycles énergétiques (ATP 1929).

✓ **Biologie moléculaire**

- années 1930 : étude des mutations → loi : « *un gène, un enzyme* », qui lie génétique et métabolisme
- O. T. Avery (1945), M. Delbrück (1952, « groupe du phage ») : l'information génétique est portée par l'ADN; relations quantitatives entre les 4 bases des nucléotides de l'ADN
- 1953 : Watson, Crick, Wilkins, Franklin : diffraction de rayons X par l'ADN
 - ✓ modèle de la double hélice
 - ✓ l'ADN agit comme un **code**
(triplets de base correspondent à l'un des 20 acides aminés)
- rôle de l'ARN pour transporter hors du noyau l'information de l'ADN, en vue de la synthèse des protéines (gènes codants et gènes régulateurs).

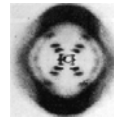


image par rayons X de l'ADN
Rosalyn Franklin

NB. code = solution originale au problème préformationnisme / épigenèse

Le nouveau paradigme

Années 1930-1940 (Haldane, Wright, Fisher; puis Dobzhansky, Mayr, G.G. Thomson, J. Huxley) :

théorie synthétique de l'évolution, unissant génétique chromosomique et génétique des populations :

recombinaisons chromosomiques (*crossing-over*) et (micro-)mutations expliquent la variabilité au sein des populations; la sélection naturelle, particulièrement au sein de populations restreintes et géographiquement isolées, est le moteur de l'évolution.

Théorie aujourd'hui largement popularisée

(bien que probablement avec un accent unilatéral sur le rôle des mutations par rapport à la sélection).

Influence forte sur les autres sciences (physico-chimie, certaines sciences humaines) :

place du **temps**, de l'**histoire**, de la notion de **bifurcation**.

A partir des années 1950, la biologie moléculaire devient **le nouveau paradigme** de la biologie :

- ✓ cadre explicatif puissant, englobant **tous** les domaines de la biologie, en particulier génétique, évolution, métabolisme cellulaire;
- ✓ outillage expérimental spécifique et très développé : équipements physico-chimiques; génie génétique;
- ✓ programme de recherche : modalité d'expression des gènes; décryptage du génome;
- ✓ forte structuration : institutions, équipements, financements;
- ✓ enjeux sociaux majeurs : médecine, agriculture;
- ✓ forte influence sur les autres sciences : notion de code.

Paradigme extrêmement efficace, à la base d'une « science normale » qui est une formidable machine à produire des résultats. Cependant,

- éloignement de la simplicité du cadre d'origine (*un gène, une protéine; le décryptage du code génomique fournira les clefs*), complexification (*plusieurs gènes, un caractère; un gène, plusieurs caractères; portions « non-codantes », dormantes, redondantes du code, etc.*)
→ réévaluation révolutionnaire dans un avenir (plus ou moins) proche ?
- caractère non matérialiste, téléologique des idées de « code », « signal », etc. ?

Épistémologie de la biologie

1. Ne pas perdre de vue les contextes :
 - même si elle fournit le cadre paradigmatique contemporain, la biologie moléculaire n'est pas toute la biologie actuelle: physiologie (médecine), écologie scientifique
 - place des problèmes éthiques et rôle économique de la biologie (biotechnologies) au XXI^{ème} siècle.

2. L'histoire de la biologie peut se raconter comme l'explicitation progressive de processus matériels à l'œuvre dans le vivant
 - le vivant ne requiert ni intervention divine
 - émérgence progressive de la vie et modalités matérielles de l'évolution, plutôt que création divine
 - ni intervention d'un esprit vital non matériel
 - pas de séparation essentielle entre molécules prébiotiques et êtres vivants, pas de différence entre composés organiques et de synthèse, compréhension des mécanismes matériels de la reproduction et de la morphogénèse

3. Ceci ne conduit cependant pas à un « réductionnisme » pur et simple du biologique au physico-chimique :
 - la composition matérielle du vivant ne diffère pas de celle du monde inorganique, et les processus dans le monde du vivant ne contredisent pas les phénomènes physico-chimiques (pas de « vitalisme »)
 - souvent, étudier les phénomènes biologiques du point de vue de la molécule peut être très éclairant (ex. aspects moléculaires de la génétique)
 - cependant, les phénomènes biologiques concernent également les individus et les populations dans leur ensemble, où l'intégration des parties est la source de processus qui ne peuvent être compris par le simple examen des processus physico-chimiques sous-jacents (opposition au mécanisme)
 - de manière générale, la connaissance des niveaux hiérarchiques inférieurs dans l'ordre de la complexité n'éclaire que partiellement le fonctionnement des niveaux supérieurs, qui appellent des concepts différents (gène, mutation, recombinaison, population, isolement, etc.).
 - Dans l'histoire de la biologie, l'approche purement mécaniste a généralement été un échec (« animaux-machines » de Descartes; préformationnisme opposé à l'épigénèse)

4. l'épistémologie de la biologie, c'est-à-dire son fonctionnement en tant que science, n'est donc pas la même que celle de la physico-chimie, et ne peut s'y ramener :
 - par rapport à la physique la biologie se caractérise par le rôle central de l'histoire, du temps (embryologie, immunologie, évolution), qui joue un rôle actif, constructif, alors qu'il est essentiellement absent de la physique (il n'y apparaît que comme « toile de fond »)
 - ceci est lié au fait qu'en biologie l'aléatoire exerce une fonction dynamique, car en se déployant dans le champ immense des possibles, il sculpte l'évolution (des individus comme des espèces)
 - la biologie ne se reconnaît donc pas dans le déterminisme de la physique classique (prédictibilité, reproductibilité des phénomènes), ni même quantique (déterminisme statistique), – même si bien entendu il existe un déterminisme des processus physico-chimiques, de la physiologie (effet des poisons, des médicaments, etc.), et jusqu'à un certain point de l'hérédité
 - en fin de compte, c'est le sens même de l'intelligibilité qui diffère entre physique et biologie :
 - avec la révolution scientifique a triomphé, dans la physique classique, l'intelligibilité comme relation constante (mathématique) entre phénomènes
 - mais alors que la description mathématique joue un rôle constitutif pour la physique, elle n'a aucune puissance explicative en biologie
 - les mathématiques ne jouent en biologie qu'un rôle d'appui, p. ex. pour une modélisation de certains problèmes, et ne prétendent pas relever de l'explication
 - en effet, la biologie, singulièrement pour étudier l'évolution et la morphologie, renoue avec la question du « pourquoi », - du moins en tant qu'approche heuristique, excluant cependant finalisme et vitalisme.

87

88

L'aspect de la Terre

L'âge de la Terre

Jusqu'au XIX^{ème} s. : influence générale d'une lecture littérale des Écritures

- histoire courte (6000 ans)
- catastrophisme : succession de Déluges – cf. neptunisme

Cette chronologie courte est remise en cause :

- par le courant « actualiste », se référant aux vitesses actuelles de sédimentation, d'érosion (cf. Buffon)
- et suite au développement de la stratigraphie (superpositions locales des couches et corrélations à distance : cartes géologiques) et de la paléostratigraphie (corrélations avec les fossiles)
 - définition d'« étages » superposés : p. ex. d'Orbigny (1802-1857) : 28 étages (et autant de « créations » !)

A la fin du XIX^{ème} siècle, une image globale se forme (incorporant la théorie de l'évolution) → estimation de l'ordre de quelques milliards d'années

cependant, estimation sensiblement plus courte (env. 40 millions d'années) basée sur les bilans énergétiques par le physicien Kelvin, car il ne prend pas en compte la radioactivité, pas encore découverte

Au cours du XX^{ème} s. : chronologie absolue par la radioactivité des roches.

La dérive des continents

Au cours du XIX^{ème} s., reconnaissance de continuités géologiques et faunistiques entre continents.

A la fin du siècle, la géologie se sent arrivée à maturité (publication d'une « carte de la Terre »)

- Théorie générale, basée sur le refroidissement de la Terre (E. Suess (1831-1914) : « *La face de la Terre* »)
- le refroidissement de la Terre entraîne sa contraction → aspect « fripé » dû à l'effondrement de morceaux de croûte
- les continuités sont dues à d'anciens ponts continentaux effondrés

Cependant,

- *gravimétrie* : les continents (sial) sont moins denses que le substrat (sima) → effondrements impossibles
- découverte de la *radioactivité* des roches : s'oppose à la théorie du refroidissement

La tectonique

F. Bacon, Buffon, von Humboldt avaient reconnu la similitude d'aspect des côtes européennes et américaines

1910 : Frank B. Taylor : chaînes du Tertiaire dues à des collisions entre protocontinents

1912-14 : Alfred Wegener (1880-1930, climatologue) :

- critique de la théorie des effondrements; continuités géologiques et paléontologiques, similitude des côtes; études paléoclimatiques indiquant que les pôles se trouveraient sous 45° de latitude

- aspect actuel de la Terre dû à la fragmentation de la « Pangée »
- compression → montagnes étirements → zones océaniques

années 1930 : Du Toit (1878-1948) :

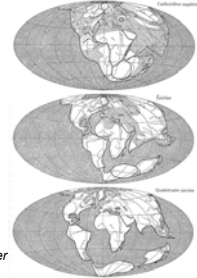
- 2 grands ensembles, sur base stratigraphique : Gondwana (Amérique du Sud, Afrique, Inde, Madagascar) et Laurasia (Amérique de Nord et Eurasie)

Cependant, dérive mal accueillie :

- nombreuses critiques de détail sur les continuités relevées
- surtout : incohérence théorique

Wegener prétend expliquer fragmentation et dérive des continents par les effets de marée lunaires, alors que ceux-ci sont beaucoup trop faibles (+ de 10 ordres de grandeur !), et de surcroît auraient dû arrêter la rotation de la Terre en 1 an !

Reconstitution de la dérive des continents selon Wegener



91

Un nouveau paradigme

Après la deuxième guerre mondiale : convergence entre

➤ nouvelles données expérimentales

- paléomagnétisme : les pôles se sont déplacés de 50° (peu compatible avec stabilité de la rotation de la Terre), et les déplacements évalués sur différents continents ne correspondent pas
- études des fonds océaniques : existence des *dorsales*, sièges d'activité volcanique; les couches sédimentaires à proximité des dorsales sont moins épaisses et plus jeunes qu'attendu, et d'autant plus jeunes que plus proches
- paléomagnétisme des laves : inversions du champ magnétique → bandes parallèles aux dorsales, qui se correspondent si on prend en compte des glissements parallèles aux dorsales (failles transformantes)

➤ nouveau cadre théorique

A. Holmes (1890-1965) : volcanisme insuffisant pour évacuer la chaleur d'origine radioactive

- courants de convection + force de Coriolis → tensions et compressions sous la croûte

Années 1960 : la nouvelle vision s'impose → paradigme pour géologie, volcanologie, paléomagnétisme, etc.

Pourquoi ce long délai, alors que Wegener avait avancé l'essentiel des arguments retenus aujourd'hui comme convaincants ?

- le paradigme régnant (depuis Descartes et Hutton), à savoir feu central et refroidissement, fournit un cadre suffisant à de nombreux spécialistes
- la géologie pratique (mines etc.) n'est pas affectée par le cadre théorique général, – même si les recherches spécialisées (océanographie, paléomagnétisme) apportent progressivement de nouveaux éléments.

En fait, l'approche de Wegener

- vient « trop tôt » (cf. Mendel) : il n'y a pas d'urgence à changer de paradigme
- et surtout elle ne possède pas de support théorique satisfaisant (l'explication de W. n'est pas plausible).

92

Histoires de mathématiques

Histoire des nombres et du zéro

Histoire de l'infini

Les géométries non-euclidiennes

A propos de l'histoire des mathématiques

Par rapport aux sciences naturelles, spécificités de l'histoire des maths. :

permanence des questions, pertinence continuée des méthodes et des résultats

→ dimension internaliste accentuée

- questions posées par les sciences connexes (astronomie, physique, économie, etc.) peuvent être sources d'inspiration, mais l'histoire des math dépasse de très loin celle des math appliquées;
- faible dépendance par rapport à l'instrumentation;
- sociologiquement : travail individuel ou en très petits groupes, fertilisé par des séminaires.

→ périodisation moins marquée en termes de paradigmes, de révolutions scientifiques et de « science normale ».

→ on peut cependant retrouver les caractéristiques principales de l'analyse kuhnienne :

- reconnaissance d'« anomalies » et identification de questions cruciales;
- l'identification de ces questions et les réponses qui y sont apportées caractérisent différentes « visions du monde », autour desquelles se développent des « écoles »;
- impact de ces développements révolutionnaires sur les autres sciences et sur la culture.

en particulier :

- débats sur les « fondements » : géométries non-euclidiennes; mathématisation de l'infini (Cantor); théorèmes d'indécidabilité (Gödel, Cohen), qui ont tous les aspects de « révolutions scientifiques »
- alternances entre périodes de recherches « empiriques » (début de l'analyse) et de « rigueur » (analyse et construction des réels au XIX^{ème} s.), entre « intuition » et « formalisme » (début du XX^{ème} s.)
- qui sont en fait des alternances dans la fertilité des approches

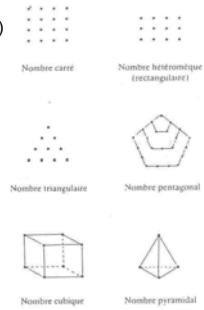
En outre, débat sous-jacent sur la nature même des objets mathématiques :

- les objets mathématiques « préexistent » dans le monde des Idées (Platon), un « troisième monde » (Popper)
- les objets mathématiques comportent une dimension de construction sociale
 - par abstraction (Aristote) : nombre, ligne, etc.
 - en raison de leur utilité, de leur fertilité (mathématique).

Les nombres (1) : nombres et dénombrement

En bref : l'histoire des nombres = l'histoire d'un élargissement progressif

- Entiers naturels = instruments du dénombrement (nombres comme abstraction – cf. Aristote)
- + fractions entières (de numérateur 1, quasi « naturelles »)
 - + extension aux rationnels
 - + racines (carrées et de degré plus élevé)
- voir Égypte, Mésopotamie.



Grèce

- école pythagoricienne : « *les nombres (naturels) sont tout* » :
 - mystique des nombres, législateurs de l'univers, aux propriétés merveilleuses; étude de leurs caractéristiques qualitatives (nombres premiers, géométriques, etc.)
 - nombres *parfaits*, égaux à la somme de leurs diviseurs (ex. 6, 28, 496)
 - paires de nombres *amiables* dont chacun est égal à la somme des diviseurs de l'autre (ex. 220 et 284)
 - triades – telles 3-4-5 et 6-8-10 – dont la somme des carrés des deux premiers est égale au troisième *nombres pythagoriciens*
- insistance sur la rigueur de la *démonstration*, contrairement aux calculs pleins de dextérité des babyloniens, mais qui ne font pas la différence entre résultats exacts et approchés

« Crise des irrationnels » : $\sqrt{2}$ ne peut s'écrire sous la forme $p/q \rightarrow$ n'est pas un nombre

Soient a et b les deux plus petits entiers dont le rapport soit égal à $\sqrt{2}$.
 $\sqrt{2} = a/b \Rightarrow a^2 = 2b^2 \Rightarrow a^2$ est pair $\Rightarrow a$ est pair $\Rightarrow a^2$ est multiple de 4 $\Rightarrow b^2$ est pair $\Rightarrow b$ est pair $\Rightarrow a$ et b sont tous deux multiples de 2, contrairement à l'hypothèse.

- \rightarrow la *géométrie* prend le pas sur le calcul (cantonné dans la sphère du pratique), car elle se prête à des démonstrations rigoureuses : Euclide, Apollonios, Archimède, etc.
- l'existence de lignes « incommensurables » (côté et diagonale du carré) est reconnue, mais on n'en prend pas le rapport \rightarrow ne renvoie pas aux irrationnels.

95

Les nombres (2) : les Arabes, l'algèbre

Al-Khwarizmi (Bagdad, IX^{ème} s., Maison de la Sagesse)

- \rightarrow rapporte d'Inde la numération décimale et la notation de position, c.-à-d. les neuf chiffres + zéro comme *chiffre*
- « *Traité sur l'art de compter des Indiens* » : présentation du système décimal + les opérations élémentaires + problèmes pratiques issus du commerce (change) et calculs d'héritages

- \rightarrow étude systématique de l'équation du deuxième degré

- six formes canoniques + algorithmes pour les résoudre

Six types d'équations, à coefficients positifs et racines réelles:

$$ax^2 = bx \quad ax^2 = c \quad bx = c \quad ax^2 + bx = c \quad ax^2 + c = bx \quad bx + c = ax^2$$

($ax^2 + bx + c = 0$ n'ayant pas de solution positive n'est pas admise)

- pour s'y ramener : usage de *al-jabr* et *al-muqabala* : **algèbre**

Résolution par *al-jabr* et *al-muqabala* de l'équation (en notation moderne)
al-jabr: "complément"; se ramener à coefficients positifs
al-muqabala: "réduction"; balancement: réduire les termes des deux membres
 coefficient 1 pour x^2

$$2x^2 + 100 - 20x = 58$$

$$2x^2 + 100 = 20x + 58$$

$$2x^2 + 42 = 20x$$

$$x^2 + 21 = 10x$$

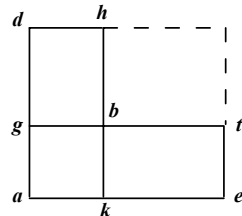
- démonstrations géométriques des algorithmes; seules les racines positives sont admises : ni nombres négatifs, ni zéro (ce n'est pas un *nombre*, c'est le *néant*) – cf. mathématique grecque

« Que le carré et dix racines valent 39 unités.

La règle est que tu divises les racines en deux moitiés, ici on obtient 5, que tu multiplies par lui-même, on a 25, que tu ajoutes à 39 et on obtient 64. Tu prends la racine qui est 8, tu en retranches la moitié du nombre des racines qui est 5, il en vient 3 qui est la racine du carré que tu cherches, le carré est 9. »

On retrouve bien l'algorithme moderne, avec pour seule solution acceptée la solution positive.
 Al-Khwarizmi donne la preuve en posant un carré a , qui représente le carré de l'inconnue; son côté est donc l'inconnue. Deux côtés perpendiculaires du carré sont prolongés d'une longueur de la moitié de 10 soit 5. On peut alors construire sur ces côtés du carré deux rectangles, les rectangles g et t , dont un côté vaut l'inconnue et l'autre 5. Le total des deux rectangles vaut donc dix fois l'inconnue et celui de la figure formée par le carré posé au départ et les deux rectangles vaut 39, puisqu'il correspond à la valeur du carré de l'inconnue et de dix fois l'inconnue. Si on complète cette figure pour en faire un carré en ajoutant un carré de côté 5, la surface de ce dernier carré aura pour aire 5^2 , soit 25 qui s'ajoutent à 39 pour donner 64. Le côté du grand carré d vaut donc $\sqrt{64}$, soit 8. Pour connaître l'inconnue, il reste à retirer 5 de 8, ce qui fait 3.

P. Benoit et F. Micheau, *L'intermédiaire arabe*, in : M. Serres éd., p. 168



96

Les nombres (3) : Moyen-âge et Renaissance

Successeurs arabes : géomètres algébristes (Omar Khayyam, ca. 1050, 1123, Samarkand, Ispahan) : solutions géométriques de l'équation du troisième degré

Résoudre $x^3 + ax^2 + b^2x + c^2 = 0$
 On substitue $x^2 = 2py$ parabole
 → il vient $2pxy + 2a py + b^2x + c^2 = 0$ hyperbole
 la solution est l'intersection des deux courbes

Moyen-âge occidental

- Gerbert d'Aurillac (940, 1003) : contacts avec les Arabes en Espagne; première introduction des chiffres « arabes »
- les traducteurs (XII s): traductions d'Euclide, Ptolémée, Al-Khwarizmi, etc.
- XIIIe siècle : Léonard de Pise, dit Fibonacci (1180, 1250), fils de commerçant établi en Afrique du Nord : chiffres arabes + problèmes algébriques + questions difficiles de théorie des nombres
- mais au sein de l'Université (quadrivium), l'arithmétique = propriétés pythagoriciennes des nombres.

Renaissance

Sous l'influence du développement de la banque, développement de l'intérêt pour le calcul et nouveau milieu de mathématiciens professionnels (hors des universités)

- traités pratiques (problèmes de change, comptabilité en partie double, partages de bénéfices); algèbre moins attachée aux démonstrations géométriques
- premières solutions négatives acceptées
influence de la comptabilité en partie double ?
affirmation du zéro comme *nombre*
- mise en place d'une notation symbolique.
Algébristes allemands : noter x pour la racine (la « chose »); signes + - = $\sqrt{\quad}$
S. Stevin (1548, 1620) : notation des exposants pour les puissances
F. Viète (1540, 1603) : utilisation de lettres pour les paramètres



Renaissance : algébristes et abacistes

Remarque : dans une tradition mathématique différente, marquée par l'intuition, l'analogie et l'association plutôt que par la rigueur grecque, les mathématiciens indiens ont manipulé le zéro comme *nombre* dès le VII^{ème} s. :

Brahmagupta (fl. 628) : solution générale de l'équation quadratique (y compris solutions irrationnelles et négatives)
 Bhaskara (1114, ca. 1185) : le résultat de la division par zéro est l'infini.

97

Les nombres (4) : les imaginaires

Dans un contexte de « défis » entre mathématiciens : découverte d'algorithmes pour la résolution de l'équation du troisième degré (Fiore, Tartaglia, Cardan)

Soit $x^3 + ax^2 + b^2x + c^2 = 0$. On fait la substitution $t = x + a/3$
 d'où $t^3 + pt^2 + q = 0$
 On pose $t = y + z$ d'où $(y^3 + z^3 + q) + (y + z)(3yz + p) = 0$
 Résoudre séparément $y^3 + z^3 + q = 0$ (1)
 et $3yz + p = 0$ (2)
 (2) dans (1) → $y^3 - (p/3y)^3 + q = 0$
 d'où $y^6 + qy^3 - (p/3)^3 = 0$ → y^3 par équation quadratique en y^3 → y, z → t → x

→ solutions pour lesquelles l'algorithme implique la racine de nombres négatifs !

$x^3 = 15x + 4$ admet pour solution 4, alors que l'algorithme donne $x = (2 + \sqrt{-121})^{1/3} + (2 - \sqrt{-121})^{1/3}$

Autre problème impliquant des racines de nb. négatifs : trouver deux nb. dont la somme est 10 et le produit 40 : $5 + \sqrt{-15}$ et $5 - \sqrt{-15}$

Bombelli (Bologne, ca. 1522, 1572) a "une pensée sauvage", qui "semble reposer sur un sophisme" : il traite formellement et opère avec $\sqrt{-1}$.

Progressivement, on s'habitue à manipuler les racines de nombres négatifs comme intermédiaires dans les calculs

Euler : $e^{ix} = \cos x + i \sin x$; la trigonométrie cesse d'être une branche indépendante des maths.. étude systématique de l'équation de degré n → solutions complexes

Gauss : représentation géométrique (cf. vecteurs) et notation $a + bi$: appel à l'évidence géométrique

Leonhard Euler (1707-1783)



Le concept de nombre s'est ainsi élargi aux négatifs (et au zéro), aux irrationnels et aux imaginaires.

Pendant, au XIX^{ème} s. encore, certains mathématiciens (Kronecker) refusent de considérer les irrationnels comme des nombres.

Définition rigoureuse des irrationnels à partir des rationnels par Dedekind, à la fin du XIX^{ème} s. (concept de *coupure*).



Carl Friedrich Gauss (1777-1855)

Infini (1) : les apories de l'infini

Zénon d'Élée (v. -490, v. -425) : le mouvement est impossible si l'espace est indéfiniment divisible

La Dichotomie : une mobile issue d'un point pour en atteindre un autre doit d'abord parcourir la moitié de la distance, puis la moitié de la distance restante, puis encore la moitié de cette moitié, etc. Il ne pourra donc pas atteindre son objectif en un temps fini.

L'Achille : Achille ne pourra rattraper la tortue partie avant lui : quand il atteindra l'endroit d'où est partie la tortue, elle aura progressé jusqu'en un autre point ; quand il atteindra ce point à son tour, la tortue aura de nouveau avancé, etc.

Zénon montre par d'autres apories (la flèche, le stade) que si l'espace et le temps ne sont pas indéfiniment divisibles, le mouvement est également impossible

→ pour les Éléates (Xénophon, Parménide, Zénon), le monde n'est qu'illusion.

L'infiniment grand est également contradictoire

Si d'une ligne supposée infinie on enlève une partie finie, le restant est soit fini, soit infini ;

- dans le premier cas, la somme de deux quantités finies (ce qui est enlevé et le reste) serait infinie, ce qui est absurde

- dans le deuxième cas, la ligne tronquée mais infinie serait aussi grande que la ligne infinie initiale, et la partie stricte serait aussi grande que le tout, ce qui est absurde.

En géométrie, le rejet de l'infini se traduit pas la méthode d'exhaustion

Exemple : démontrer que le rapport de l'aire de deux cercles est comme le rapport du carré de leurs diamètres.

Soient les cercles d'aires a et A , de diamètres d et D . Il faut démontrer que $a/A = d^2/D^2$.

Supposons qu'il n'en soit pas ainsi, et que $a/A > d^2/D^2$.

Dès lors, il existe un cercle d'aire a' , avec $a' < a$, tel que $a'/A = d^2/D^2$ (1)

Il existe donc un polygone d'aire p , inscrit dans a , et tel que $a' < p < a$ (2)

Considérons le polygone d'aire P , semblable à p et inscrit dans A . On sait par ailleurs que le rapport p/P est égal au rapport d^2/D^2 des carrés des diamètres des cercles circonscrits a et A .

On a donc $p/P = a'/A$, par (1). Comme $p > a'$ par (2), il faut donc $P > A$, ce qui est absurde puisque P est inscrit dans A .

Une autre discussion par l'absurde, où $a/A > d^2/D^2$, complète la démonstration.

On n'a donc en aucune manière considéré le cercle comme un polygone à nombre infini de côtés infiniment petits. On ne le considère pas non plus comme la limite d'une suite de polygones, notion étrangère aux Grecs. Tout se joue dans le fini.

99

Infini (2) : la pensée grecque

Le rejet de l'infini en mathématique rejoint sa dévalorisation générale par l'ensemble de la pensée grecque.

La notion d'*infini* renvoie d'ailleurs à celle d'*indéfini* (απειροσ), de chaos initial, de matière brute d'un monde non encore structuré, non mis en forme.

1. La distinction entre acte et puissance chez Aristote

« L'être est, le non-être n'est pas » : Parménide nie non seulement le vide, mais aussi le mouvement (qui est passage de l'être au non-être et du non-être à l'être) et le monde que nous croyons connaître, qui ne sont donc qu'illusion (cf. apories de Zénon).

Solution d'Aristote : distinction entre acte (ce qui existe réellement) et puissance (ce qui n'existe pas réellement, mais est contenu en puissance dans l'existant, et peut venir lui-même à l'existence).

Le mouvement est l'acte de ce qui est en puissance, en tant que qu'il est en puissance

L'infini n'existe pas en acte, réellement (cf. apories), mais il peut exister en puissance, comme dans la suite des nombres naturels, qui n'a pas de fin mais dont le terme (l'infini en acte) n'est jamais atteint.

Cependant, potentiel est inférieur à actuel, car il lui manque un bien suprême, l'existence.

2. Physique et cosmologie

- le système d'Aristote est construit autour de la notion de monde sphérique, structuré autour d'un centre, qui est immobile, et forme le lieu naturel des graves

Ceci est incompatible avec un univers infini (pas de centre, pas de référence pour le repos et le mouvement, toute la physique des lieux s'effondre).

- opposition radicale à l'atomisme, où les atomes dérivent dans le vide d'un monde infini.

NB. : pour Aristote, le monde est éternel, mais cette éternité du temps échappe aux impossibilités de l'infini en acte, car le passé et le futur ne coexistent pas → le temps n'est pas infini en acte.

3. Logique

pas de régression infinie des causes

Il existe un premier moteur, cause du mouvement dans l'univers, et ce premier moteur est immobile. Sinon, ce premier moteur devrait lui-même être mis en mouvement, et ainsi de suite

100

Infini (3) : une valorisation progressive

Fin de l'Antiquité et Moyen-âge : abondantes discussions

- contexte scientifique aristotélicien
- mais nouvelles composantes: néoplatonisme et monothéismes (Philon, saint Augustin, Avicenne), qui mettent à mal le cadre aristotélicien.

1. En accord avec la Révélation, le monde ne peut être éternel, car cela conduirait à des infinis absurdes
Mais pour certains savants (croyants) ces arguments sont incorrects → nouvelles réflexions sur l'infini

La Lune et le Soleil auraient tous deux parcouru un nombre infini de révolutions, mais en raison de leurs périodes différents, ces deux infinis seraient différents, ce qui est absurde

Réponse de N. Oresme (1302-1382, Sorbonne et évêque de Lisieux) : on ne peut comparer des infinis différents.

Le nombre des âmes formerait un infini actuel, ce qui est absurde

Réponse d'Avicenne : l'infini en acte ne vaut que pour ce qui a une dimension matérielle.

Par contre Dieu est éternel, et ceci n'est pas contradictoire.

En effet : l'infini ne vaut que dans le quantitatif, et Dieu échappe à la quantité.

2. L'infini est progressivement associé à Dieu

Théologie négative : Dieu ne peut être défini que négativement : il est *in-crée*, *in-fini*, etc.

En retour, l'infini se charge désormais d'une valeur positive

Lors de la condamnation à Paris des 219 thèses « averroïstes » en 1272, affirmation très forte de la toute-puissance de Dieu, qui ne peut être limitée par les cadres aristotéliciens (en particulier en ce qui concerne le vide et l'infini).

Renaissance

- Valorisation de l'infini éclate : N. de Cuse, G. Bruno (1548-1600)

Dans son infinie bonté, Dieu a peuplé l'univers infini d'une infinité de mondes → Bruno est copernicien, mais va plus loin que Copernic, qui était resté fidèle à un univers sphérique et fini.

- Les réflexions sur l'infinité de Dieu et sa toute-puissance conduisent à penser un espace infini (mais non coextensif à Dieu), qui servirait de réceptacle au monde

Rupture avec Aristote, où un corps et un « espace » séparé ne peuvent occuper le même lieu - préparation à l'espace newtonien

101

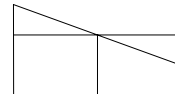
Infini (4) : naissance du calcul différentiel et intégral

Les scolastiques

Au XIV^{ème} s., travaux sur le mouvement, préparant la notion de vitesse instantanée

Démonstration du théorème de la vitesse moyenne par N. Oresme (mouvement « uniformément difforme » = accélération constante)

Le temps est porté en abscisse, la vitesse (uniformément variée) en ordonnée. L'aire sous la courbe (trapèze) représente le chemin parcouru = aire du rectangle de même base et de hauteur égale à la moyenne des vitesses initiale et finale.



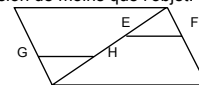
Le tournant du XVII^{ème} s.

➤ Kepler manipule (assez brutalement) des « infiniment petits » pour calculer le volume des tonneaux (1615)

➤ Cavalieri (1598, 1647) : les « indivisibles » : pas définis précisément, mais ont une dimension de moins que l'objet. C. évite de faire la « somme » d'un nombre infini d'éléments de taille « nulle »

A démontrer : que la diagonale divise un parallélogramme en deux triangles égaux. Démonstration : à chaque indivisible (câd à chaque segment) de l'un des triangles (ex. EF) correspond un indivisible de l'autre (GH) → les deux triangles ont même aire.

NB. qu'on n'a pas dit que chaque triangle est la somme de ces indivisibles, mais on se sert de la correspondance entre eux pour calculer.



➤ Torricelli, Roberval, Fermat, Pascal, Wallis, Barrow : travaux d'approche de la sommation (« quadratures », c.-à-d. mesure de la surface sous une courbe = intégrale définie) et de la différenciation (tangentes)

➤ Fondation de l'analyse par Newton (dès 1666 mais non publié) et Leibniz (1685) (querelle de priorité...)

- *Leibniz* (1646-1716) : calcul différentiel → « algèbre des infiniment petits », intégrales définies; notations efficaces → large diffusion sur le Continent (avec Jacques et Jean I Bernoulli)

- *Newton* : se concentre sur l'intégrale indéfinie (taux de variation de l'aire)

Mais difficultés d'interprétation → 3 versions successives :

- infiniment petits – mais qu'est-ce qu'une somme infinie d'infiniment petits ?

- « *fluxions* » = vitesse instantanée de variation de quantités (*fluentes*) variant continûment avec une variable de référence (temps) – plus intuitif, mais le problème est simplement déplacé

- « *méthode des premières et dernières raisons* » : la « *dernière raison des variations évanouissantes* » est la limite du rapport des fluentes; proche de la notion moderne de dérivée

Leibniz



102

Infini (5) : de l'empirisme à la rigueur

Malgré la faiblesse des bases philosophiques, extraordinaire efficacité du calcul différentiel et intégral aux XVII^{ème} - XVIII^{ème} s.

- une pratique « empirique » de l'analyse
- où la notion de fonction continue est centrale (Euler, Lagrange).

Mais une rigueur accrue devient nécessaire

problème des cas « pathologiques », p. ex. Bolzano : fonction continue non différentiable (1834)

Cauchy (1789-1857)



Le XIX^{ème} s. : le siècle de la rigueur

- définitions systématiques par A.-L. Cauchy
les concepts de nombre, variable, fonction, limite remplacent l'intuition géométrique ou cinématique comme bases de l'analyse; notions centrales = dérivée (pas différentielle) et somme (pas primitive)
- K. Weierstrass : *arithmétisation de l'analyse*
introduction du formalisme encore en vigueur aujourd'hui; la notion vague d'*infinitésimal* disparaît de l'analyse
- Dedekind : définition des réels (coupure)
- Georg Cantor : construction de l'arithmétique à partir des ensembles.



Weierstrass (1815, 1897)



Cantor
(1845, 1916)



Dedekind
(1831, 1916)

103

Infini (6) : une mathématique de l'infini

Cantor : les ensembles fondent les naturels, mais comment établir une théorie des ensembles infinis ?
en particulier, quand définir 2 ensembles infinis comme « égaux » ?

cf. la remarque de Gallée : l'ensemble des naturels semble plus grand que celui des pairs; pourtant, à chaque entier positif correspond son double, et inversement à chaque pair correspond un entier.

→ notion d'égalité remplacée par celle de « puissance » (« cardinal ») :

2 ensembles ont même puissance si on peut établir entre eux une bijection (p. ex. entre naturels et pairs)

C'est un retournement : les « paradoxes » de l'infini sont utilisés pour le définir

Dedekind : ensemble infini : qui peut avoir la même puissance qu'une de ses parties strictes; ensemble fini : qui n'est pas infini

Sur cette base, et avec la notion d'*ordre*, une mathématique de l'infini devient possible :

➤ nouveaux nombres : *transfinis*

le plus petit nombre transfini ω est plus grand que tous les nombres finis, mais n'a pas de prédécesseur immédiat

➤ comparer les infinis : parmi les réels, il existe 2 classes :

- on peut établir une bijection entre rationnels et naturels – ils ont la « *puissance du dénombrable* »

les rationnels peuvent être classés selon un ordre défini, avec chacun son numéro, d'après la somme de leur numérateur et de leur dénominateur

- les réels forment une classe qui n'est pas dénombrable – ils ont la « *puissance du continu* »

si une suite dénombrable de tous les réels était prétendue exister, on pourrait construire un nouveau réel qui n'appartiendrait pas à cette suite : représenter les réels de la suite sous forme décimale, et créer un nombre qui diffère du 1^{er} terme par la 1^{ère} décimale, du 2^{ème} par la 2^{ème}, etc.; ce nouveau nombre serait différent de chaque nombre de la suite, et n'y appartiendrait pas.

Si de tels nombres étaient en quantité dénombrable, ils pourraient être ajoutés à la suite sans que celle-ci cesse d'être dénombrable, et on pourrait recommencer le raisonnement → ils doivent être indénombrables.

104

Infini (7) : de l'infini à l'indécidabilité

AU début du XX^{ème} siècle, la théorie des ensembles semble offrir une base solide à l'arithmétique, qui elle-même fonde l'analyse.

Mais cet espoir d'une parfaite rigueur subit de terribles ébranlements :

- de nouveaux paradoxes obligent à la prudence (redéfinition des définitions acceptables des ensembles)
paradoxe de Russel : soit l'ensemble E de tous les ensembles qui ne sont pas une partie d'eux-mêmes. Cet ensemble fait-il partie de E ? Répondre oui (E est une partie de E) comme répondre non (E n'est pas une partie de E) mène à une contradiction
- surtout : dans le cadre d'un système d'axiomes supposé consistant, il existe des propositions *indécidables* (pouvant être vraies et pouvant être fausses) – en particulier, celle de savoir si le système est consistant ! (Gödel 1931)
- dans le cadre du système d'axiomes qui fondent l'arithmétique, l'*axiome du choix* (en pratique, la question de savoir si la puissance du continu est immédiatement supérieure à celle du dénombrable) est *indécidable* (Cohen 1963);

Avec les théorèmes d'indécidabilité, les mathématiques ont sans doute connu une « révolution », au sens de Kuhn : désormais, tout est différent !



Gödel et Einstein,
Princeton 1950

105

Les géométries non-euclidiennes

Des géométries *anti*-euclidiennes aux géométries *non*-euclidiennes

Durant l'Antiquité, au Moyen-âge arabe (notamment O. Khayyam), au XVII^{ème} (Wallis), nombreuses tentatives de *démonstrations par l'absurde* du postulat d'Euclide.

L'espoir est d'arriver à des contradictions si l'on part d'une hypothèse contredisant le postulat ou l'une de ses conséquences (p. ex. la somme des angles d'un triangle = deux droits).

Au XVIII^{ème} siècle, Lambert, Saccheri, Taurinus s'inscrivent dans ce programme, mais obtiennent des séries de « théorèmes » non-contradictaires.

Les mathématiciens se convainquent alors progressivement qu'il n'est sans doute pas possible de démontrer le postulat, - mais la plupart continuent à penser que seule la géométrie euclidienne a *du sens*.

Vers 1825, N. Lobatchevsky et J. Bolyai *construisent* des géométries non-euclidiennes cohérentes. Leurs travaux sont violemment rejetés

K. F. Gauss (1777-1855), arrivé aux mêmes résultats, s'abstient de publier afin d'éviter les polémiques.

Après 1850, les choses changent progressivement suite aux travaux de Riemann (1826-1866), et surtout avec la présentation de modèles de géométries non-euclidiennes sur des surfaces (p. ex. sphère) plongées dans l'espace euclidien.

Nicolas Lobatchevsky
(1793-1856)



Janos Bolyai
(1802-1860)



106

Intuitionnisme et formalisme

Dans la deuxième moitié du XIX^{ème} siècle, opposition virulente de mathématiciens « intuitionnistes » :

« On ne peut servir deux maîtres à la fois; on ne peut servir à la fois le vrai et le faux. Si la géométrie euclidienne est vraie, alors la géométrie non-euclidienne est fausse; et si la géométrie non-euclidienne est vraie, alors c'est la géométrie euclidienne qui est fausse. » (Fr. Frege)

Mais beaucoup de mathématiciens reconnaissent que le critère de vérité d'une géométrie réside seulement dans sa cohérence, et non dans son adéquation avec l'intuition ou le monde physique.

Cette reconnaissance du caractère mathématiquement satisfaisant des géométries non-euclidiennes représente un choc profond, en rupture avec l'approche kantienne fondée sur l'évidence *a priori* de l'espace euclidien.

« Pour autant que la géométrie est certaine, elle ne nous dit rien du monde réel; et pour autant qu'elle nous dit quelque chose touchant notre expérience, elle est incertaine. » (A. Einstein)

Avec les travaux sur l'infini, cette « révolution copernicienne » va conduire aux tentatives de construction purement axiomatique des mathématiques, sans recours à aucune forme d'intuition (D. Hilbert).

Mais cette approche formaliste elle-même connaîtra ses limites dans les théorèmes d'indécidabilité (Gödel, Cohen).

David Hilbert (1862-1943)



Ici et ailleurs : la science chinoise

109

Un immense empire fluvial

Un empire très étendu, autour des deux grands fleuves (Fleuve Jaune = Huanghe + rivière Wei; Yangzijang), dès le néolithique (-2500)

Succession de divisions et d'unifications + invasions des « barbares du Nord » (malgré la Grande Muraille)

unification à l'âge du bronze (dynastie Shang, -1520)

Royaumes combattants (-V^{ème} – -III^{ème} s.)

empire de Qin Shi Huangdi (-221) et des Han (-202, 220)

Trois Royaumes (III^{ème} s.)

unification Jin, Song : (265-milieu V^{ème} s.)

divisions (V^{ème} – VI^{ème} s.)

unification Sui, Tang (581-906)

divisions X^{ème} s.

unification Song (960)

1136 : invasions tartares -> dynasties Jin au Nord; Song du Sud au Sud

invasion mongole (1260) -> dynastie Yuan

dynastie Ming (1368-1644)

invasion mandchoue -> dynastie Qing 1644-1911

Mais continuité culturelle et politique

- écriture idéogrammatique (premiers textes écrits : -1760)
- à partir des Hans, classe bureaucratique des lettrés confucéens

110

Courants idéologiques et philosophiques

A l'époque des Royaumes Combattants (époque « classique », politiquement troublée), définition des grandes orientations idéologiques : recherche de l'harmonie, ou interventionnisme ?

- la recherche d'harmonie (modèle de l'agriculture)
 - confucianisme : l'harmonie sociale
Confucius (Kongfuzi -552,-479) : connaître l'homme et la société, en vue d'une politique sage, ordonnée et juste; respect des parents, des rites, idéalisation du passé
Mencius (Mengzi -380, -289): sociologie
Zhuangzi (*Tchouang-tseu*) : harmonie entre l'homme et l'univers (=> peu d'intérêt pour l'étude de la nature)
 - taoïsme : le Tao de l'homme dans l'Univers
Tao = « Voie », « *Ordre de la Nature* », *conçue comme immanente* <-> *ordre autoritaire, imposé*
mélange de religion, philosophie et science magique et primitive
individualisme, immortalité de l'individu (gymnastique, drogues, alchimie); retrait de la société – nostalgie de la société égalitaire primitive
intérêt pour la biologie et l'alchimie
- les interventionnistes (modèles volontaristes de l'élevage, de la navigation) :
 - Mo Di (les « mohistes », -IV s) : propagande active de la paix (organisation militaire d'autodéfense); expérimenter pour connaître; intérêt pour la physique et la logique
 - les légistes : gouvernement fort, sous Qin Shi Huangdi (-221) : brûler les livres et les lettrés
quantification, standardisation (largeur des routes, des roues des chars)

Sous les Han : réaction contre les excès des légistes -> appel aux confucéens -> sorte de religion d'Etat, syncrétisme avec le taoïsme

A partir des troubles V-VI^{ème} s -> influence bouddhiste croissante. Réaction sous les Tang (845)

Taoïstes souvent mêlés aux jacqueries paysannes

111

Technologies, sciences et idéologie

- ✓ Remarquables **réalisations technologiques**, très en avance sur le reste du monde et en progrès constants:
 - agriculture, transport, métallurgie, art de la guerre, médecine, techniques diverses : manivelle, papier et imprimerie, porcelaine, horloges mécaniques, instruments de musique, ...
 - diffusion des innovations par la bureaucratie confucéenne pour la gestion de l'empire : sismographe, nivomètres, etc.

- ✓ **Connaissances scientifiques** avancées, tournées vers la pratique

- sciences naturelles, géographie, cartographie
- optique, acoustique, magnétisme, astronomie :
manifestations des affinités du cosmos
- mathématiques : algèbre mais pas la géométrie rigoureuse des Grecs
- accent sur les classifications

Reconstit. du sismographe de Zhang Hen (II^{ème} s)
L'onde sismique provoquait la chute d'une balle dans la gueule d'un des crapauds, indiquant sa direction



- ✓ Une **approche** différente de celle de l'Occident

- le monde comme grand **organisme** (incluant l'homme) :
chaque phénomène est lié à tous les autres suivant un ordre hiérarchique, de l'individu à l'univers entier
- **équilibre** entre les 2 forces fondamentales :
yin : nuages et pluie, féminin, intérieur, froid, sombre
yang : rayonnement solaire, virilité, chaleur, ardeur
+ **correspondances** : 5 éléments (ou principes : feu, métal, bois, terre, eau), 5 points cardinaux, 5 couleurs, 5 goûts, 5 planètes, etc.
- accent sur les **relations**, les correspondances plutôt que sur l'ontologie, l'individuel (en particulier, pas de philosophies atomistes)
 - privilégient action à distance – cf. magnétisme, acoustique, sismologie, etc.
plutôt que contacts mécaniques
 - « **une autre science** » ?

112

Révolution scientifique occidentale et science chinoise

Pendant deux millénaires, la Chine dispose d'une avance technologique et scientifique considérable dans presque tous les domaines (sauf la géométrie).

Pourquoi l'Occident a-t-il pu soudain, en deux siècles (XVI^{ème} – XVII^{ème} s.), rattraper et dépasser la Chine ?

- ce n'est pas parce que la Chine se serait « arrêtée » : le progrès y est continu
- c'est parce que l'Occident a connu la révolution scientifique

Pourquoi celle-ci n'a-t-elle pas eu lieu en Chine ?

J. Needham tente de dégager des éléments ayant pu favoriser en Occident la révolution scientifique (en contraste avec la Chine) :

- au plan épistémologique :
 - rôle de la notion de « lois » (divines et / ou naturelles – en Chine souvenir traumatique de la période des légistes)
 - rejet de la continuité microcosme – macrocosme, et en particulier de l'action à distance, au profit de l'efficacité de l'approche mécaniste
- au plan social :
 - en Occident, développement d'une classe bourgeoise très dynamique, qui s'empare des inventions pour briser les cadres
 - en Chine, la bourgeoisie est bridée par la classe bureaucratique, dont l'objectif est d'assurer l'« harmonie » de l'ordre social

113

Chronologie politique chinoise (très) sommaire

- 2500 civilisation néolithique autour du Fleuve Jaune (agriculture, villages, poteries, textiles; contacts avec l'Amérique)
- 1520 **unification** : dynastie *Shang* (Anyang) : âge du bronze; écriture (os divinatoires)
- 1030 dynastie *Zhou* : société féodale; 722 : déplacement vers l'Est (Zhou de l'Est ??)
- 480 **division** : *royaumes combattants* : époque « classique »; âge du fer, irrigation; Confucius, Mo Ti, etc.
- 221 **unification** Qin, empereur Qin Shi Huangdi : standardisation (route, roues des chars,...); Grande Muraille
- 207 dynastie *Han*; bureaucratie confucéenne; papier; arrivée du bouddhisme; désordres
- 221 **division** : « *Trois Royaumes* » (Shu, Wei, Wu)
- 265 **unification** : dynastie *Jin*, dynastie *Song* (420-479); technologies militaires
- fin V^e **division**
- 581 **unification** : dynastie *Sui* (581-618) Grand Canal (Fleuve Jaune – Yangzijiang, 1800 km)
- dynastie *Tang* (618-906) : expansion du bouddhisme; relations avec l'étranger (751, affrontement avec musulmans); art et littérature; porcelaine, poudre
- X^e **divisions**
- 960 **unification** : dynastie *Song*; prospérité, activité culturelle, science et technologie
- 1126 invasion tartare : dynastie *Jin* = tartare Ruzhen au Nord (1115-1234)
- dynastie des *Song du Sud* (1127-1279)
- 1260 invasion mongole -> dynastie mongole *Yuan* ; Marco-Polo en Chine; atlas, observatoires astro.
- 1368 révoltes paysannes -> dynastie *Ming*; explorations maritimes; botanique, pharmacopée
- 1644 dynastie mandchoue *Qing*; arrivée des Jésuites
- 1912 république

114

Technologies et sciences chinoises (1)

agriculture

- V s sériculture
- V s soc de charrue en fer
- II s tarare rotatif (pour séparer les balles du grain) *harnais à traits, image Han (-I s)*
- II s semoir à rangs multiples
- I s pompes à godets pour l'irrigation



transports et énergie

- IV s harnais à traits
- IV s cerf-volant
- IV s utilisation du pétrole et du gaz naturel
- I s harnais à collier
- I s brouette, Europe XII s
- I s forages pour le gaz naturel
- I s transmission par courroie
- I s force hydraulique (moulins horizontaux) pour souffleries
- I s gouvernail
- II s navires à compartiments étanches
- III s étriers de fer et de bronze (-> Byzance VI s; essentiel pour guerre en Occident : chevalerie)
- V s bateaux à aubes
- X s transmission par chaîne
- X s écluses à sas (Europe XIV s)

brouette traditionnelle, charge au-dessus de l'axe



métallurgie

- IV s fonte - pagode de fonte de Luoning coulée 1105
- IV s soufflet à piston à double action
- II s oxygénation de la fonte -> décarburation (méthode des « cent raffinages ») -> acier à 0.1 – 1.8% de C (« procédé Bessemer »)
- V s cofusion de fonte et fer doux -> acier (« procédé Martin »)

pagode en fonte de Luoning (1105) hauteur 24 m



géographie, sciences de la Terre

- 130 sismographe
- II s représentations cartographiques avec quadrillage
- III s cartes en relief
- X s projection Mercator

115

Technologies et sciences chinoises (2)

art de la guerre

- IV s arbalète
- IV s gaz, bombes
- IX s poudre à canon : fusées, canons
- X s lance-flammes
- XIII s canons, fusils et mortiers

génie civil

- III s Grand Muraille
- I s ponts suspendus ? en chaîne en fer ?
- VII s ponts à arc surbaissé
- VII s Grand Canal (1800 km)

techniques diverses : manivelle, papier, porcelaine, horloge, imprimerie, rouet, etc.

- II s manivelle (IX s en Occident)
- II s suspension Cardan
- II s papier
- III s porcelaine
- III s moulinet de canne à pêche
- VII s alcool distillé (« vin de gel »)
- VIII s horloge à échappement (hydraulique) -> Occident XIII s
cf. tour-horloge astronomique de Su Song (1092), 10 m de haut
- VIII s imprimerie : impression par blocs gravés au VII s; gravures bouddhistes puis livres en milliers d'exemplaires au IX s; poychrome
- XI s imprimerie à caractères mobiles (idéogrammes) en céramique
- IX s papier monnaie
- XI s rouet pour fil de soie



canon lançant des obus fumigènes empoisonnés



fusées attachées à des pointes empoisonnées (XIV s)

sciences de la vie et médecine

- VI s circulation du sang (*yi*) à partir du cœur (pouls) + souffle *qi*
- II s rythmes circadiens du corps
- III s utilisation de la lutte biologique en agriculture (fourmis tueuses pour protéger mandariniers)
- VII s diagnostic du diabète
- X s inoculation de la petite vérole -> répandue fin XVI s -> Turquie -> Occident

116

Technologies et sciences chinoises (3)

magnétisme; boussoles

- II s boussoles en forme de cuiller pour la géomancie (orientation des Palais)
- III s cadrans à index
- III s chariot montrant le sud pour géomancie
- IX s observation de la déclinaison magnétique terrestre
- IX s boussoles maritimes : avéré en 1117 (premières utilisations entre 850 et 1050 ?) ; Europe 1190, Islam
- XI s aimantation par refroidissement dans le champ magnétique terrestre (importance de l'acier pour fabrication boussoles)

cuiller en magnétite, plaque en bronze



astronomie

- IV s observation des taches solaire, systématique à partir du -I s
- VI s queue des comètes due à « esprit (qi) du Soleil » (observation systématique des comètes : 40 avant 1500)
- X s projection de Mercator



« chariot montrant le sud » (IIs) (reconstit.)



compas de marine

sciences physiques

- II s structure des cristaux de neige
- II s lanterne magique

mathématiques

- XVI s système décimal
- IV s chiffre 0
- II s nombres négatifs (jonchets rouges)
- I s solutions d'équations numériques; calcul de racines carrées et cubiques
- I s fractions décimales
- III s valeur de π avec 5 décimales
- XII s triangle de Pascal

acoustique

- VI s grande cloche accordée
- II s tambours accordés
- 1584 tempérament égal



cloche en bronze à deux notes (-Vs)

D'après Temple, op. cit.

Les révolutions scientifiques du XX^{ème} s. en physique

Relativité Mécanique quantique

Unifications et synthèses

I. Première moitié du XX^{ème} siècle : la mise en place

1. lumière, électricité, magnétisme
 - nature ondulatoire de la lumière (franges d'interférence, T. Young 1801); 2 polarisations transversales
 - électrostatique : XVII^{ème} s. : O. von Guericke; salons du XVIII^{ème} s.; Cavendish, Coulomb
 - courants : suite à l'invention de la pile par Volta (1800); Ampère; Faraday
 - magnétisme : propriétés des aimants : W. Gilbert (XVII^{ème} s.)
 - effets magnétiques des courants : Oersted, Ampère
2. développement du machinisme et thermodynamique
 - S. Carnot : « *Réflexions sur la puissance motrice du feu* », 1824
 - l'énergie et l'impossibilité du mouvement perpétuel de première espèce : Joule (1845), Meyer
 - l'entropie et l'impossibilité du mouvement perpétuel de seconde espèce : Clausius (1850), Kelvin
3. atomisme

II. Deuxième moitié du XX^{ème} siècle : le temps des unifications

- > synthèse électromagnétique
 - unification de l'électricité et du magnétisme par Maxwell (1864)
 - utilisation des concepts de champ (Faraday 1830) et de potentiel (cf. Lagrange en mécanique)
 - unification avec la lumière, comprise comme une onde électromagnétique
 - production et détection d'ondes « radiométriques » par Hertz (1887)
- > synthèse mécanique et atomique
 - synthèse newtonienne de la physique et de la cosmologie
 - interprétation de la thermodynamique en termes de mécanique statistique (Maxwell, Boltzmann, Gibbs)

« Une science presque achevée »

Vers la fin du XIX^{ème} siècle, optimisme de « la Belle Époque »

- progrès de l'industrialisation (malgré les crises de surproduction périodiques)
- colonisation triomphante et « mission civilisatrice » (par le sabre et le goupillon !)
- progrès social : mouvement ouvrier
- recul de « l'obscurantisme clérical » (« *Scientia vincere tenebras* »)

Dans les sciences également, c'est l'euphorie :

- sciences de la Vie : progrès foudroyants de la médecine (Cl. Bernard, Pasteur); théorie de l'évolution; biochimie
- sciences de la Terre : pour la première fois, la Terre entière est connue; géologie, paléontologie
- explosion de la chimie, organique et inorganique, académique et industrielle
- la physique semble inébranlable

« *La science physique forme aujourd'hui, pour l'essentiel, un ensemble parfaitement harmonieux, un ensemble pratiquement achevé.* »
Lord Kelvin

Au tournant du siècle :

- - confirmation de l'atomisme
- structure corpusculaire de la matière : découverte des électrons (rayonnement cathodique) (J. Perrin, J.-J. Thomson 1897)
- des découvertes absolument inattendues :
 - rayons X (Röntgen 1895)
 - la radioactivité (Becquerel 1896)
 - nouveaux corps (polonium, radium : P. et M. Curie 1898, 1902)
 - transmutation radioactive (Rutherford et Soddy 1902)
 - noyau de l'atome (Rutherford 1911)

Pourtant, Lord Kelvin avait identifié « *deux nuages* », concernant

- la mesure de la vitesse de la lumière à travers l'éther – le point de départ de la Relativité restreinte
- le rayonnement du corps noir – le point de départ de la Mécanique quantique

121

La théorie de la relativité

« Paradoxes » de la propagation de la lumière

- onde, mais le milieu vibrant (*l'éther*) non détecté lors du mouvement. des planètes (espace « vide » de la méca. de Newton)
- expériences de Michelson et Morley (1881 et 1887) : invariance de la vitesse c de la lumière, malgré mouvement de la Terre dans l'éther => violation de la loi galiléenne d'addition des vitesses

Dimension *fondamentale* du « principe de relativité » (Poincaré, Einstein – cf. les 2 principes de la thermodynamique)

impossibilité de détecter mouvement inertiel (cf. Galilée)

cad : les lois de la physique doivent être *invariantes* pour transformations galiléennes - or les équations de Maxwell ne le sont pas (ex. : constance de c)

- 1905 Einstein et Poincaré (cadres différents, mais mathématiquement équivalents) → **Relativité restreinte**
 - abandon du temps absolu de Newton
 - deux événements simultanés pour un observateur ne le sont pas nécessairement pour un autre; abandon de la simultanéité, de l'antériorité et de la postériorité absolues
 - modifications de l'espace-temps
 - dilatation du temps, contraction des longueurs* d'un corps, lorsque mesurés par un observateur en mouvement (transformations de Lorentz)
 - unification de la masse et de l'énergie : $E = m c^2$
 - chez Einstein : abandon de l'éther
- 1917 Einstein : extension du principe de relativité : équivalence entre mouvement uniformément accéléré et champ gravitationnel (le paradigme de l'ascenseur) → **Relativité générale**
 - vérification en 1919 : Eddington : déviation de la lumière d'une étoile par le Soleil lors d'une éclipse

Révolution scientifique « paradigmatique » (!)

- ✓ rôle d'une « anomalie » prise comme enjeu central pour certains savants → nouveau paradigme
- ✓ remise en cause du *cadre* newtonien (espace et temps absolus) – changement de *point de vue*
- ✓ mécanique newtonienne = *cas particulier* de la mécanique relativiste (pas simple alternance de théories !)

De plus, Relativité = violent **choc culturel**, au-delà même de la physique

- ✓ bouleversement des notions du temps, de l'espace, de la matière – abandon des conceptions de Kant (= *a priori*)
- ✓ climat de l'époque : « *tout est relatif* » : cf. effondrement des empires après la guerre ; cf. Freud et l'inconscient
- ✓ 2^{ème} moitié du XX^{ème} s. : diffusion de la théorie du Big Bang, dans le cadre de la Relativité générale

122

La mécanique quantique

Planck 1900 : spectre de rayonnement du corps noir implique émission discontinue d'énergie
Einstein 1905, 1907 : lien avec l'effet photoélectrique; diminution de la capacité calorifique des atomes à basse T
Rutherford 1911, Bohr 1913 : stabilité du modèle planétaire de l'atome expliquée par quantification du rayonnement
Einstein 1917 : émission spontanée et induite; concept de photon; Compton 1923 : vérification de la nature corpusculaire du photon
de Broglie 1924 : suggestion de la nature ondulatoire de l'électron; Davisson et G.P. Thomson 1927 : diffraction d'électrons
1925-1926 : mécanique quantique : 3 approches, reconnues mathématiquement équivalentes :

1. Schrödinger; 2. Heisenberg, Born et Jordan, et Bohr; 3. Dirac
Born : interprétation probabiliste de l'onde de Schrödinger (pas une onde matérielle)

Heisenberg 1927 : principe d'incertitude

Dirac 1928 : équation relativiste et antimatière; observation du positon par Anderson 1932

+ développements de la radioactivité et de la physique nucléaire

- ✓ structure discontinue du monde microscopique (quanta)
- ✓ dualité onde – corpuscule (équation de Schrödinger; diffusion Compton et diffraction d'électrons)
- ✓ nature intrinsèquement probabiliste du monde microscopique (principe d'incertitude)
- ✓ « réduction du paquet d'onde » lors de l'observation (cf. chat de Schrödinger)

Débat épistémologique (en particulier Einstein – Bohr Conseils Solvay de 1927 et 1930) :

l'aléatoire = notre ignorance (Einstein variables cachées, EPR), ou caractère intrinsèque du microscopique (Bohr) ?
la théorie quantique est-elle en ce sens « complète » ?

Nouvelle révolution scientifique, encore plus fondamentale que la révolution relativiste

- ✓ énorme impact sur pratiquement tous les aspects de la science et de la technologie (toute la micro- et nanophysique; toute la chimie; à travers elle toute la chimie du vivant; aussi physique nucléaire et physique des particules; cosmologie)
- ✓ ici aussi, physique classique *réinterprétée* dans nouveau cadre, comme cas limite
- ✓ du point de vue épistémologique : « *Personne ne comprend la mécanique quantique* » (R. Feynman)
 - remise en cause de la causalité « classique » (incluant dans ce terme la relativité)
 - rôle de l'observateur (réduction du paquet d'onde)
 - nouveau positivisme (abandon du réalisme « traditionnel »)

123

L

Le progrès de la science ne s'accomplit pas seulement en ce sens
que nous apprenons à connaître et à comprendre des faits nouveaux,
mais également en ce sens que nous apprenons sans cesse
ce que signifie le mot « comprendre »

W. Heisenberg

124

Indications bibliographiques (1)

On trouvera ci-dessous une liste délibérément très limitée d'ouvrages de référence, en français et pouvant offrir une première approche d'accès plutôt aisé, le plus souvent en édition de poche. Cette liste ne comprend pas les ouvrages spécialisés sur des questions particulières, et omet aussi – afin de ne pas être trop étendue – des références de qualité, en particulier en philosophie des sciences, qui pourraient répondre pas à mes critères.
Ny figurent pas non plus une série d'ouvrages dont la qualité ne pe semble pas suffisante pour qu'ils soient mentionnés.

Références principales

Histoire des sciences

M. Serres (dir.) : « *Éléments d'Histoire des Sciences* », Bordas, Larousse

Excellent ouvrage, très lisible, composé de 30 chapitres autonomes comportant une mise en contexte des questions abordées. Un exemple de bonne histoire des sciences !

Épistémologie

T. Kuhn : « *La structure des révolutions scientifiques* », Champs, Flammarion

Analyse philosophique et historique du fonctionnement de la science. Texte fondateur essentiel : notions de paradigme, de « science normale », de « révolution scientifique ».

D. Pestre : « *Introduction aux 'Science studies'* », coll. Repères, La Découverte

Excellente mise au point, introduction d'ensemble.

Références générales

Histoire des Sciences

M. Daumas (dir.) : « *Histoire de la Science* », *Encyclopédie de la Pléiade*, Gallimard 1957

Exposé systématique ; plusieurs contributions forment toujours de bonnes mises en perspective.

B. Gille (dir.) : « *Histoire des Techniques* », *Encyclopédie de la Pléiade*, Gallimard 1978

Synthèse remarquable sur l'histoire des techniques.

D. Lecourt (dir.) : « *Dictionnaire d'histoire et de philosophie des sciences* », *Quadrige*, PUF 2003

Complet, lisible ; mais présentation forcément hachée (dictionnaire).

C. Ronan : « *Histoire mondiale des Sciences* », *Points-Sciences S129*, Seuil

Introduction générale, d'accès aisé ; chapitres sur les sciences non européennes, en particulier chinoise.

R. Tatou (dir.) : « *Histoire des Sciences* », *Quadrige*, PUF, 4 volumes

Exposé systématique – la référence de base.

125

Indications bibliographiques (2)

Philosophie des Sciences

A. Chalmers : « *Qu'est-ce que la science ?* », *La Découverte*

Bonne introduction générale à la philosophie des sciences ; accès aisé.

J.-P. Changeux et A. Connes : « *Matière à penser* », *Points* – Odile Jacobs OJ22

Débat entre deux éminents scientifiques (un neurobiologiste, un mathématicien) sur la philosophie des math. : découverte ou construction ?

P. Feverabend : « *Contre la méthode* », *Points-Sciences S56*, Seuil

Approche brillante et iconoclaste, par l'une des personnalités les plus fortes de l'histoire des sciences du XXème siècle, – à prendre avec le grain de sel.

S. Langier et P. Wagner (dir.) : *Philosophie des Sciences*, *Vrin* 2004, 2 volumes

Anthologie de textes essentiels du XXème siècle.

D. Lecourt (dir.) : « *Dictionnaire d'histoire et de philosophie des sciences* », *Quadrige*, PUF 2003

Complet, lisible ; mais présentation forcément hachée (dictionnaire !)

K. Popper : « *La connaissance objective* », *Champs*, Flammarion

Plusieurs essais de Popper, permettant d'approcher sa philosophie de la science

P. Wagner (dir.) : « *Les Philosophes et la Science* », *Folio Essais 408*, Gallimard 2002

Présentation et discussion des positions de philosophes importants sur la science

Sociologie de la science

M. Callon (dir.) : « *La science et ses réseaux* », *La Découverte*

Analyses sociologiques de divers cas intéressants.

H. Collins et R. Pinch : « *Tout ce que vous devriez savoir sur la science* », *Points-Sciences S142*, Seuil

Discussion éclairante de plusieurs controverses scientifiques.

B. Latour et S. Woolgar : « *La vie de laboratoire* », *La Découverte*

L'un des livres fondateurs de l'approche « ethnologique » de la science.

126

Indications bibliographiques (3)

Sciences particulières

Biologie

C. Cohen : « *Le destin du mammouth* », *Points-Sciences S156*, Seuil

A travers l'histoire de l'intérêt pour le mammouth, une histoire inattendue de la paléontologie - intéressant et bien fait.

J.-P. Deléage : « *Une histoire de l'écologie* », *Points-Sciences S96*, Seuil

Une introduction.

J.-M. Drouot : « *L'écologie et son histoire* », *Champs Flammarion*

Une introduction.

S. J. Gould : plusieurs articles historiques parmi les nombreux ouvrages publiés chez *Points-Sciences (Seuil)* et *Livre de Poche*

Approches critiques et découpantes, par un savant de tout premier plan et un grand humaniste.

F. Jacobs : « *La logique du vivant : une histoire de l'hérédité* », *Tel 2*, Gallimard 1968

Un classique de l'histoire de la biologie, par l'un des pères de la génétique contemporaine.

E. Mayr : « *Histoire de la biologie* », *Livre de Poche « références »*, LP16-17

Par l'un des fondateurs de la synthèse darwinienne, fresque très complète de l'histoire de la biologie. Intérêt particulier pour les questions d'épistémologie, notamment par rapport à l'épistémologie de la physique. Très grand livre.

M. Morange : « *Histoire de la biologie moléculaire* », *La Découverte*

Présentation de l'histoire de la biologie moléculaire par un grand scientifique, dans une perspective « kuhniennne ».

A. Pichot : « *Histoire de la notion de gène* », *Champs 423*, Flammarion 1999

Récit détaillé de débuts touffus.

A. Pichot : « *Histoire de la notion de vie* », *Tel 230*, Gallimard 1993

Anthologie commentée, d'Aristote à Darwin.

Sciences de la Terre

A. Halami : « *Une révolution dans les sciences de la Terre* », *Points-Sciences S5*, Seuil

L'histoire de la tectonique des plaques.

G. Gohau : « *Une histoire de la géologie* », *Points-Sciences S66*, Seuil

Pas mauvais, mais assez confus et manque de hauteur.

Mathématiques

Dahan-Dalmedico et J. Peiffer : « *Une histoire des mathématiques* », *Points-Sciences S49*, Seuil

Bonne introduction, accessible.

J. Dieudonné : « *Pour l'honneur de l'esprit humain* », *Pluriel 8515*, Hachette (math.)

Par l'un des plus grands mathématiciens français (Bourbaki). Plus difficile, mais intéressant et profond.

Remarque : il existe d'une part plusieurs traités savants d'histoire des maths, souvent dans une perspective encyclopédiste traditionaliste d'« histoire découverte », que je n'ai pas repris ici, et d'autre part quelques ouvrages « journalistiques » de niveau assez médiocre. L'histoire des maths, poserait-elle plus de problèmes que celle d'autres disciplines ?

127

Indications bibliographiques (4)

Physique

I.B. Cohen : « *Les origines de la physique moderne* », *Points-Sciences S65*, Seuil

Aristote – Galilée – Newton ; par un grand spécialiste, d'accès aisé.

J. Gaspard : « *Et pourtant elle tourne* » *Science Ouverte*, Seuil (mécanique)

Excellente discussion, allant jusqu'à l'époque contemporaine.

B. Malte : « *La Lumière* », *Points-Sciences S28*, Seuil 1981

Introduction, accès aisé.

E. Segrè : « *Les physiciens classiques et leurs découvertes* », *Fayard 1987*, « *Les physiciens modernes et leurs découvertes* », *Fayard 1990*

Plutôt une vulgarisation (de haut niveau) de la physique qu'à proprement parler une histoire – mais très bonne référence.

S. Shapin et S. Schaffer : « *Léviathan et la pompe à air ; Hobbes et Boyle entre science et politique* », *La Découverte 1993*

La pompe à vide, Boyle et la « science expérimentale » ; un classique, remarquable.

Chimie

B. Bensauve-Vincent et I. Stengers : « *Une histoire de la chimie* », *La Découverte*

Approche centrée sur les enjeux et les débats – tout en fournissant les cadres.

M. Eliade : « *Forgerons et alchimistes* », *Champs Flammarion*

La dimension spirituelle de l'alchimie, par un très grand spécialiste de l'histoire des religions

Époques et régions particulières

A. Diebbar : « *Une histoire des sciences arabes* », *Points-Sciences S144*, Seuil

Par un éminent spécialiste, une introduction à l'histoire des sciences arabes. Intéressant mais souffre du style décousu d'un dialogue.

D. Jacquart : « *L'épopée de la science arabe* », *Découvertes*, Gallimard

Excellente introduction, très accessible mais scientifiquement rigoureuse, richement illustrée.

G. E. R. Lloyd : « *Une histoire de la science grecque* », *Points-Sciences S92*, Seuil 1993

Par un grand spécialiste, accessible.

J. Needham : « *La science chinoise et l'Occident* », *Points-Sciences S9*, Seuil

Plusieurs essais mettant en contraste la science chinoise et la science occidentale, par le spécialiste incontesté de la science chinoise.

A. Pichot : « *La naissance de la science. I. Mésopotamie, Égypte. II. Grèce présocratique* », 2 vol., *Folio Essais 154, 155*, Gallimard 1991

Bonne introduction.

P. Rossi : « *Aux origines de la science moderne* », *Points-Sciences S159*, Seuil

Mise en perspective de la « révolution scientifique » par un grand spécialiste, très lisible.

S. Shapin : « *La révolution scientifique* », *Nouvelle Bibliothèque scientifique*, Flammarion

Introduction synthétique à la période.

R. Temple : « *Le génie de la Chine, 3000 ans de découvertes et d'inventions* », *Editions Ph. Piquier, Paris 2000*

Technologies et sciences en Chine, et leur avance sur l'Occident – d'après J. Needham.

Illustrations

Les illustrations sont reproduites d'après M. Serres (dir.), A. Pichot, R. Temple, op. cit., ainsi que les sites Internet du *Muséum d'Histoire naturelle* (Paris), du *Museum of History of Science* (Oxford), de *Mac Tutor History of Mathematics archive* (univ. de St Andrews) et de l'encyclopédie en ligne *Wikipédia*.