La science à partir d'Aristote et la révolution oubliée...

Club de Science de St Charles, 3 décembre 2018

Thierry Masson

Centre de Physique Théorique & Centre Gilles Gaston Grangier
Marseille, France





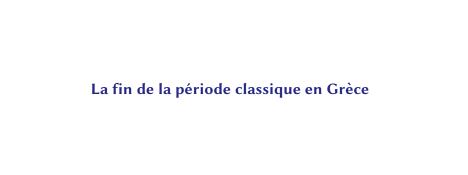






Plan de l'exposé

- 1 La fin de la période classique en Grèce
- 2 La révolution oubliée
- 3 Après la révolution oubliée



Aristote

384 av. J.C. - 322 av. J.C.

- Il distingue les connaissances sensibles et les connaissances scientifiques (obtenues par des démonstrations).
- Contrairement à Platon, il admet que les sens peuvent donner accès au monde des idées, auquel il ôte donc le statut d'immuabilité.
- Il pense que l'observation est la source de la connaissance.
- Il se soucie des objets sublunaires : il fonde l'histoire naturelle.

La conception du monde et de la Nature selon Aristote est une théorie cohérente.

- Les quatre éléments ne sont l'aspect que d'une seule substance première. Il postule l'existence de quatre qualités fondamentales :
 - le chaud et le froid, qualités actives;
 - le sec et l'humide, qualités passives.

Ces qualités agissent sur la substance première :

- l'Eau est le froid et l'humide;
- l'Air est le chaud et l'humide;
- la Terre est le froid et le sec;
- le Feu est le chaud et le sec.

Humide \triangle AIR Chaud ∇ EAU FEU \triangle Froid TERRE ∇ Sec

Qualités secondaires et dérivées : le subtil et l'épais, le lourd et le léger, l'âcre, l'amer et le doux, le fluide et le visqueux...

- → Principe d'unification...
- Le vide n'existe pas.
 - → Question pertinente jusqu'au XVII^e siècle...

La Physique d'Aristote est une théorie du mouvement

- Chaque élément a un *lieu naturel de repos* qui dépend de sa densité.
 - Dans l'ordre de pesanteur : Terre, Eau, Air, Feu.
 - Les corps composés héritent d'un lieu naturel de repos.
 - Le ciel est au dessus, il est constitué de l'Éther, immuable et incorruptible.
 - Dans le monde sublunaire, les corps peuvent être corrompus : il peuvent changer, se transformer, se détruire...
 - Fondements de l'alchimie.
 - Conception de la Nature qui perdurera jusqu'à la Renaissance.

- Mouvements naturels :
 - les mouvements des objets qui rejoignent leur lieu naturel.
 - Une goutte de pluie descend de l'Air pour aller vers la Terre;
 - une bulle remonte dans l'Eau pour aller rejoindre l'Air;
 - le Feu monte pour se placer au dessus du reste.

Le mouvement naturel sublunaire est rectiligne et vertical.

→ Le mouvement dépend de la composition d'un corps.

Le mouvement des astres est parfait et éternel : circulaire et uniforme.

- Mouvements violents (forcés): qui s'opposent aux mouvements naturels.
 Ils ne peuvent exister que si une action, une force, est appliquée sur l'objet.
 Une fois cette force interrompue, le mouvement naturel reprend le dessus.
- Mouvements volontaires : ceux des êtres vivants, humains et animaux.

- Actions motrices et actions résistantes.
 - Un mouvement ne peut avoir lieu que si l'action motrice est supérieure à l'action résistante.

 → Il n'y a mouvement que s'il y a action sur l'objet.
 - 2 la vitesse est proportionnelle à l'action motrice et inversement proportionnelle à l'action résistante :

vitesse =
$$\frac{\text{action motrice}}{\text{action résistante}}$$

Deux problèmes :

- 1 Cette relation implique en particulier que deux objets de même taille et de même forme, mais de masses différentes, ne chutent pas de la même façon. Ce fait n'est pas vérifié expérimentalement, comme on le sait depuis Galilée.
- 2 L'action motrice s'arrête lorsque l'objet a quitté la main, or le mouvement ne devient pas vertical pour autant (mouvement naturel). Aristote invoque l'action du milieu, qui agit sur l'objet grâce à des petits tourbillons créés par le passage de l'objet (comme les tourbillons derrière un bateau).

- La Terre est immobile puisqu'on ne ressent pas son mouvement.
 Si la Terre tournait sur elle-même, chaque objet décrirait un cercle.
 Or, dans le monde sublunaire, le mouvement naturel est rectiligne, donc la Terre ne tourne pas!
- La cosmologie d'Aristote est géocentrique.
 L'Univers ne va pas au delà de la sphère des étoiles fixes.
 Il n'y a rien au delà de cette dernière sphère, même pas d'espace.
 Entre la Terre et cette sphère, on retrouve l'ordre platonicien.
 Les sphères ne sont pas que des objets mathématiques :
 - elles remplissent l'espace (pas de vide);
 - leurs mouvements sont dépendant les uns des autres.

Aristote a abordé tous les domaines de son temps, comme :

- La logique : principes des raisonnements « sûrs » et « corrects »...
 - → fondement de la science mathématique et expérimentale.
- La théorie des causes : matérielle, formelle, efficiente, finale...
- La biologie : première étude systématique du monde animal.
 - Précurseur de la taxonomie, l'écologie, la physiologie, l'anatomie, l'éthologie...
 - ► Il décrit près de 500 espèces animales.
 - ▶ 1/4 de son œuvre.
 - Son élève Théophraste continue son œuvre en botanique.

Aristote est un précurseur de la méthode expérimentale associée à une théorisation.

- Méthode appliquée avec efficacité à la biologie.
- Le Lycée (son école de pensée) est l'un des premiers lieux d'activité « scientifique ».



La « révolution oubliée »...

Russo, The Forgotten Revolution, How Science Was Born in 300 BC and Why it Had to Be Reborn, 2004

Thèse essentielle:

- Conquêtes d'Alexandre le Grand (meurt en 323 av. J.C.).
- Installation de colonies grecques dans des nouveaux territoires.
- Confrontation de la méthode rationnelle grecque et de la technologie empirique des égyptiens et des mésopotamiens.
 - On ne s'intéresse plus seulement au « naturel » mais aussi à l'« artificiel ».
 - Mise en scène de phénomènes impliquant principalement les gaz et les liquides...
 - Naissance de la méthode scientifique au sens « moderne ».
- Les lieux : la ville d'Alexandrie principalement, mais aussi Syracuse, Rhodes...
 - ▶ Ptolémée I^{er} Sôter s'installe au pouvoir en Égypte.
 - ▶ Il fonde la bibliothèque et le musée d'Alexandrie.
- La durée : le début de la période helléniste (323 av. J.C. ~212 av. J.C.)
 - → Les conquêtes romaines marquent la fin de cette période...

La fin de la période helléniste est fixée à 415, année du lynchage de la première mathématicienne de l'histoire par des fanatiques religieux chrétiens : **Hypatie d'Alexandrie** (\sim 360 – 415).



L'empire d'Alexandre le Grand

Euclide

~325 av. J.C. - ~265 av. J.C.

C'est l'un des plus grands mathématiciens de l'Histoire.

- Son œuvre majeure : les *Éléments*, comporte 13 livres,
 - → Il a influencé les mathématiciens jusqu'à aujourd'hui.
- Approche axiomatique des mathématiques :
 - ▶ il pose des définitions (point, droite, angle, triangle...) et cinq postulats;
 - à partir de ces prémisses, il construit un ensemble de propositions mathématiques à l'aide de raisonnements logiques.
- Euclide est le précurseur des mathématiques modernes, telles qu'elles sont encore élaborées aujourd'hui.
- Euclide écrit un traité d'optique (de la vue) dans le style des Éléments.
 - Il pose les principes de l'optique géométrique :
 - les rayons visuels sont des droites qui relient l'œil et l'objet;
 - il n'introduit pas de « flèche » sur les rayons!
 - Pas de traitement de la réflection ou de la réfraction.

Ctésibios d'Alexandrie

~IIIe siècle av. J.C.

Grand ingénieur, fondateur de l'école de mécanique d'Alexandrie.

- Science des systèmes hydrauliques;
- science des systèmes pneumatiques (gaz compressibles).

On lui doit:

- Amélioration des clepsydres,
- pompe aspirante et refoulante,
- monte-charge,
- canons à eau et à air comprimé,
- principe du siphon,
- clapet/soupape, piston, pompe, clavier → hydraule (orgue fonctionnant à l'eau),
- hydraule + clepsydre → horloge musicale,
- ...

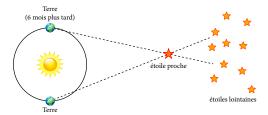
Aristarque de Samos

~310 av. J.C. - ~230 av. J.C.

Il est le premier à proposer un modèle héliocentrique des planètes.

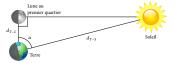
Mais ce modèle est mal accepté pour diverses raisons :

- Il ôte la Terre de sa position privilégiée.
- Selon la physique d'Aristote, la Terre est l'élément le plus lourd, donc elle doit se trouver au centre de l'Univers.
- L'Univers ne peut avoir qu'un seul centre de rotation.
 Or la Lune tournerait autour de la Terre qui tournerait autour du Soleil.
 La découverte des satellites de Jupiter par Galilée démontera cette objection.
- L'absence de parallaxe visible des étoiles fixes.
 Il faudra attendre 1837 pour que Bessel mesure la première parallaxe.



Aristarque effectuent les premières mesures entre la Terre, la Lune et le Soleil.

1 Au premier quartier de Lune, TLS est un triangle droit.



Mesure de l'angle α ,

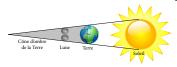
$$\rightarrow$$
 $\frac{d_{T-S}}{d_{T-L}}$ = 19 (la valeur exacte est 390).

2 Les angles apparents du Soleil et de la Lune sont les mêmes vus de la Terre.



→ le Soleil est 19 fois plus gros que la Lune.

3 Le cône de lumière de la Terre peut contenir 2 fois la taille de la Lune.



$$\rightarrow$$
 D_L = 0.35 D_T , et D_S = 6.7 D_T

Ératosthène évalue le diamètre de la Terre à $D_T=77\,000\,\mathrm{stades}$ (1 stade $\simeq 160\,\mathrm{m}$): $D_L=27\,000\,\mathrm{stades}$ $D_S=515\,000\,\mathrm{stades}$ $d_{T-L}\simeq 40\,D_T$ $d_{T-S}\simeq 760\,D_T$ Les distances exactes sont $d_{T-L}\simeq 30\,D_T$ et $d_{T-S}\simeq 12\,000D_T$.

Archimède

287 av. J.C. - 212 av. J.C.

Il était géomètre et mécanicien.

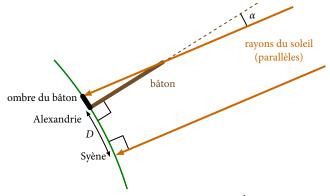
- Il a calculé des longueurs, des aires et des volumes par la méthode d'exhaustion d'Eudoxe.
- Il est connu pour sa loi des corps flottants :
 « tout corps plongé dans un fluide subit une poussée verticale, dirigée de bas en haut, égale au poids du fluide déplacé ».
- On lui doit la théorie des leviers.
 Son approche est très inspirée par les Éléments d'Euclide :
 - 1 il introduit des postulats de départ qui décrivent les lois élémentaires de l'équilibre ;
 - 2 il en déduit, par le raisonnement mathématique, des propositions sur l'équilibre dans différentes configurations.
- Il construit un planétarium capable de reproduire le mouvement rétrograde des planètes, probablement basé sur la théorie héliocentrique d'Aristarque.

Archimède est aussi connu pour ses apports en mécanique (poulies, palans, leviers, catapultes, vis sans fin...) et en optique (les miroirs qui auraient enflammé la flotte romaine lors du siège de Syracuse).

Ératosthène

275 av. J.C. - 175 av. J.C.

Il a mesuré le rayon de la Terre : $R_T = 38500$ stades.

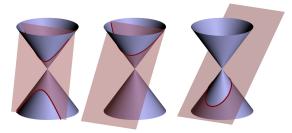


Configuration géométrique utilisée par Ératosthène pour calculer le rayon de la Terre.

Apollonius de Perga

~262 av. J.C. - ~190 av. J.C.

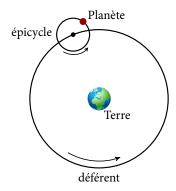
Il a étudié les coniques.



Les coniques sont définies comme l'intersection d'un double cône avec un plan.

En astronomie, il introduit le mouvement « réel » (héliocentrique) et le mouvement « mathématique » (géocentrique), basé sur des épicycles :

- le déférent est centré sur la Terre;
- l'épicycle est centré sur le déférent.



- Reproduction du mouvement rétrograde des planètes à l'aide de cercles.
- Permet de calculer de façon effective.

Hipparque

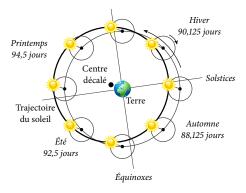
190 av. J.C. - 120 av. J.C.

C'est le plus grand astronome de l'antiquité, c'est aussi un mathématicien.

- Observations précises grâce à des instruments très perfectionnés pour l'époque.
- Conception d'un Univers infini, dans lequel les étoiles peuvent se déplacer.
- Il réalise un catalogue de 850 étoiles : position et magnitude apparente.
 → Catalogue utilisé en 1718 par Halley, mouvement propre de certaines étoiles.
- Il invente la trigonométrie.
- Il découvre la précession des équinoxes (en utilisant un catalogue d'étoiles établi un siècle plus tôt par Timocharis d'Alexandrie).
- Il a recalculé la distance Terre-Lune en utilisant la parallaxe terrestre.
 - → Confirme les valeurs d'Aristarque.
- Il découvre que les saisons ont des durées distinctes.

Reborn, 2004, chapitre 10.

Hipparque, comme Apollonius de Perga, introduit un modèle mathématique géocentrique basé sur deux mouvements circulaires, dont l'un a un centre décalé.



Hipparque (en compagnie d'astronomes contemporains) a probablement développé une *théorie héliocentrique dynamique* fondée sur le principe d'inertie et l'équilibre entre la force centrifuge et une force de gravitation due au Soleil (termes modernes). Voir Russo, *The Forgotten Revolution, How Science Was Born in 300 BC and Why it Had to Be*

23

Souvenir d'une « révolution oubliée »...

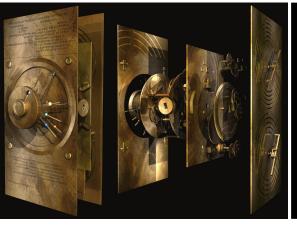
Restes d'un mécanisme trouvés dans une épave en 1901, près de l'île grecque d'Anticythère (entre Cythère et la Crète).



Mécanisme en bronze fabriqué entre 100 et 150 av. J.C.

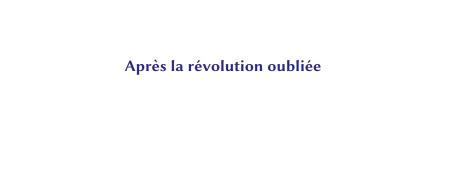
La machine d'Anticythère

Un siècle après sa découverte, le mécanisme a livré ses secrets...





- Position des 5 planètes visibles, du Soleil, de la Lune (avec ses phases).
- Calendrier égyptien, prédiction des dates des éclipses.
- Manivelle pour « faire avancer le temps ».



La fin de la démarche scientifique

Après la conquête romaine, les choses changent...

- Expulsion des grecs d'Alexandrie par Ptolémée VIII vers 145 av. J.C.
- Arrêt des découvertes « scientifiques ».
- Retour à du savoir plus ancien (souvent « magique »).
- Désintérêt et rejet de tout concept « théorique » dans la culture romaine.
- Sextux Empiricus (~200, courant des sceptiques) écrit contre la possibilité de construire des modèles théoriques.
- Les structures mathématiques deviennent des objets « réels » :
 - Les sphères Eudoxe de Cnide et les épicycles d'Apollonius de Perga sont remplacés par des sphères cristallines...
 - Les rayons visuels d'Euclide deviennent réels et sont émis par l'œil...
- Dispersion des contenus des bibliothèques hellénistes.
- La « philosophie helléniste » devient incompréhensible...
- Intérêt pour les travaux d'Aristote vers le I^{er} siècle av. J.C.

Ptolémée

~90 - 168

Il a repris de nombreux travaux de ces prédécesseurs.

Il a ajouté ses propres conceptions.

- Traité de géographie dans lequel il compile toute la connaissance de l'époque.
 - ▶ Il perfectionne le système des longitudes et latitudes introduites par Hipparque.
 - ▶ Il oriente les cartes avec le Nord en haut et l'Est à droite.
 - ▶ Il invente le principe des projections cartographiques.
- Il a rédigé un traité en 13 volumes : *L'Almageste* (le « très grand » en arabe).
 - → Traité traduit en arabe avant de revenir en occident.
- Il propose un modèle d'Univers géocentrique :
 - Changement d'ordre de certaines planètes : Mercure et Vénus se trouvent après la Lune et avant le Soleil.
 - Le mouvement des planètes est le mouvement parfait : circulaire uniforme.
 - Épicycles d'Apollonius pour expliquer le mouvement rétrograde des planètes.
 - ▶ Épicycles d'Hipparque pour décentrer les orbites.
 - Équants pour rendre compte de la non uniformité des mouvements. (la planète ne tourne pas à vitesse constante par rapport au centre du référent, mais par rapport à un « centre » délocalisé.)
 - → Le modèle mathématique d'Apollonius et Hipparque devient *la* réalité.

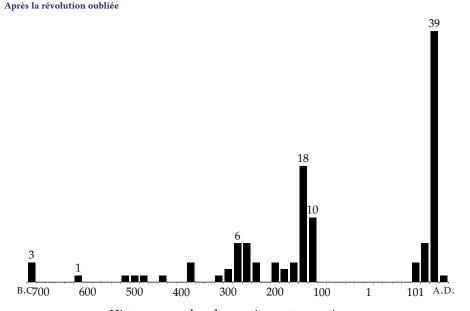
- Modèles avec de nombreux paramètres ajustables : rayons, vitesses, centres...
- Précision de l'ordre du degré d'arc.
- Respect du « bon sens » : la Terre au centre de l'Univers.
- Conforme à la physique d'Aristote.
- Donne un ordre de grandeur de la taille de l'Univers.

Ce modèle est compliqué : il ne reproduit pas correctement les mouvements en latitude, les équants sont assez artificiels.

Ptolémée s'en justifie :

Il faut, autant qu'on le peut, adapter les hypothèses les plus simples aux mouvements célestes; mais si elles ne suffisent pas, il faut en choisir d'autres qui les expliquent mieux. Car si, après avoir établi des suppositions, on en déduit aisément tous les phénomènes comme autant de conséquences, quelle raison aura-t-on de s'étonner d'une si grande complication dans les mouvements des corps célestes? En effet, il n'y a rien dans la nature qui s'oppose [...], tout cela marche de concert, sans empêchement, sur les orbites respectives [...].

Ptolémée, Almageste, d'après LINDEMANN, Mécanique : une introduction par l'histoire de l'astronomie, 1999



Histogramme des observations astronomiques mentionnées dans l'Almageste de Ptolémée (d'après Russo).

La transmission jusqu'à la Rennaissance...

Les idées d'Aristote et de Ptolémée domineront jusqu'à la Renaissance...

Mais...

- La science helléniste sera l'objet de commentaires à travers les siècles.
- Déjà sous la domination de l'empire Romain.
- Vers le VI^e siècle.
- Pendant la Renaissance Islamique à partir du VIII^e siècle.
 - Nombreuses traductions.
 - Apports nouveaux.
- Utilisation dans diverses « industries » : textiles, métaux, navires, alchimie...
- Retour en occident (traductions latines) à partir du XII^e siècle.
- Intérêt et redécouverte plus profonde à la Renaissance, dès le XVe siècle.
 - → Léonard de Vinci essaie de comprendre les travaux d'Archimède...
- À partir du XVI^e siècle, progrès cumulatifs : Copernic, Galilée, Kepler, Newton...
 - → La démarche scientifique renaît!