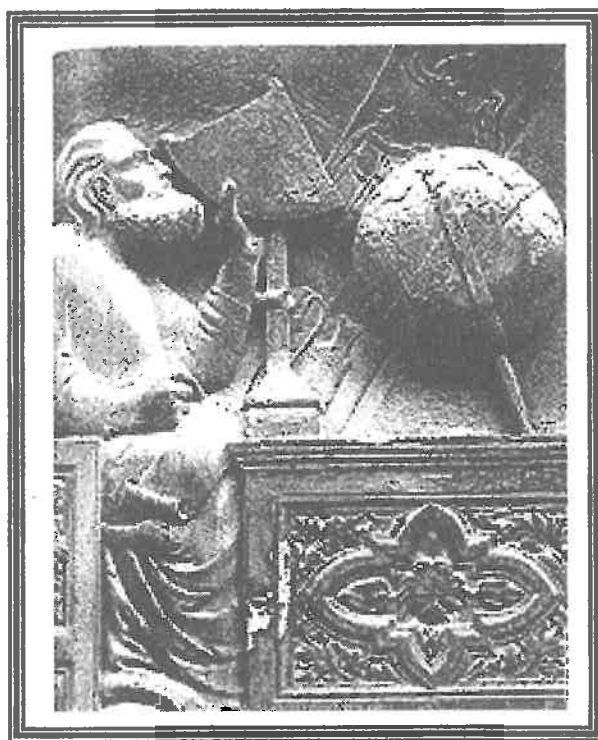


Société Astronomique de Lyon



PTOLEMEE

HISTOIRE DE L'ASTRONOMIE

N° 1

Septembre 2002

HISTOIRE DE L'ASTRONOMIE

I- L'essor de la science astronomique : la Grèce.

Les anciennes civilisations mésopotamiennes issues de celles d'Uruk, de Sumer, de Nippur ont probablement été les premières à transmettre un savoir basé sur l'observation du ciel. Les Babyloniens nous ont laissé des calendriers ainsi que des relevés de constellations. L'étude de ces dernières, dans leurs rapports avec les levers et couchers du Soleil se développe lentement. Elle est à l'origine de l'astrologie. Les préoccupations de ces époques sont en effet largement religieuses. Elles sont centrées principalement sur le développement de calendriers qui permettent la codification temporelle des rites et les prédictions astrologiques. Aucune explication autre que religieuse et mythique n'est donnée au cosmos. Les Egyptiens, les Chinois, les Indiens et plus tard les populations précolombiennes n'auront pas d'autre vision. Ce sont les Grecs qui à la fois tentent d'expliquer l'Univers et développent une connaissance véritablement scientifique fondée sur la géométrie.

1. Les premières explications du Cosmos.

1.1. Les sources antiques

Les Babyloniens se servaient de calendriers lunaires ou luni-solaires, qui d'ailleurs ont été utilisés par les Grecs jusqu'au cinquième siècle avant J.-C. (mais pas par leurs astronomes qui utilisaient un calendrier de type égyptien).

Le calendrier chez les Egyptiens répondait à une nécessité agricole. L'année comportait 365 jours ; elle était divisée en douze mois de trente jours plus cinq jours supplémentaires.

Il s'agissait d'une astronomie d'observation : éclipses et mouvements des planètes. Le but des astronomes était de prédire le retour des saisons et de mettre à jour les calendriers. Ils avaient aussi un important rôle divinatoire : c'est l'origine de l'astrologie.

Parmi les instruments disponibles, le gnomon aurait été apporté aux Grecs par Anaximandre de Milet. Il aurait été utilisé par les Babyloniens dans un cadran solaire primitif.

1.2. Les visions mythologiques du Cosmos : Homère et Hésiode.

D'une manière générale, tous les éléments du ciel et de la terre avaient leurs dieux. L'astronomie d'Homère n'a rien de scientifique. Pour lui, l'Univers a une forme de dôme constitué par l'Ether. A la base se trouve la Terre, plate, et tout autour un fleuve. « En haut » se trouvent le paradis et les dieux et en bas (sous la Terre) les enfers ou Hadès. Le Soleil et la Lune tombent dans l'océan mais Homère (comme Hésiode) ne dit pas comment ils rejoignent chaque jour leur point de lever.

Homère, dans l'Odyssée, décrit l'utilisation des constellations par les marins. Ulysse quittant Calypso : « *Assis près de la barre, .../... son œil fixait les Pléiades et le Bouvier, qui se couche si tard, et l'Ourse, qu'on appelle aussi le Chariot, la seule des étoiles, qui jamais ne se plonge aux bords de l'Océan, mais tourne en même place en guettant Orion ; l'avis de Calypso était de toujours naviguer en gardant l'Ourse à gauche de la main.¹* ». Mais ces références sont rares ; les grecs préfèrent naviguer de jour lorsque « *l'Aurore aux doigts de rose* » se lève. Cette phrase et la lecture d'Homère nous apprennent qu'à son époque, seule la Grande Ourse était décrite. Il ne semble pas que la Petite Ourse et avec elle l'Etoile Polaire n'aient été reconnues. L'origine du nom de cette constellation vient de la transformation de la déesse Callisto en ourse. Les récits varient sur le responsable de cette métamorphose: Zeus pour les uns, voulant cacher Callisto enceinte à son épouse, Héra pour les autres.

Hésiode dans « *La Théogonie* » (v. 700 av. J.-C.) ou naissance des dieux, raconte à la fois la généalogie des divinités mais aussi l'origine de Cosmos. Du Chaos naissent les Ténèbres et la Nuit qui engendrent l'Ether, le Jour, Gaia (la Terre) qui enfante elle-même Ouranos (le ciel étoilé) et Pontos la mer. Océanos est le fleuve qui tourne autour de la Terre en forme de disque. Son ouvrage « *Les travaux et les jours* » montre le cultivateur Persès à qui Hésiode prodigue ses conseils. Les travaux sont rythmés par les saisons mais aussi par les astres.

Ainsi : « *commence les moissons au lever des Pléiades², filles d'Atlas, les labours à leur coucher* » recommande Hésiode. Il faut couper le bois « *au moment de l'année où Sirius prend beaucoup à la nuit mais peu au jour...* », c'est à dire à l'automne, « *car il craint moins le ver* ». Il ne faut pas « *labourer au solstice d'hiver* » sous peine de moissonner peu. « *Lorsque Zeus a mené à son terme le soixantième jour après le solstice d'hiver, l'étoile Arcturus quitte le cours sacré de l'Océan, elle s'élève radieuse au début de la nuit ... taille tes vignes.* » Il faut biner la vigne quand les Pléiades sont absentes du ciel, Sirius invite au repos et aux ardeurs sexuelles de l'été caniculaire mais quand paraît Orion il faut vanner le blé ; enfin il faut vendanger lorsque « *Orion et Sirius auront gagné le milieu du ciel et que l'Aurore aux doigts de rose verra Arcturus* ».

Mais les étoiles guident aussi les marins : « *Quand les Pléiades, fuyant la force du vigoureux Orion, s'abîment dans l'Océan brumeux, les vents, de concert, déchaînent leur souffle* ». Il faut alors rester au port.

C'est donc une astronomie d'observation et utilitaire que connaissent les anciens grecs. Elle est toute associée aux dieux omniprésents. La rationalité n'a que peu de place dans cette vision de l'Univers. Il est à noter qu'il n'est fait aucune mention des planètes dans l'ouvrage, peut être à cause de leur errance peu fiable.

¹ Ulysse naviguait vers l'Est.

² Mai et octobre.

2. L'avènement de la découverte de la nature (par rapport au surnaturel) ; de l'essor de la critique et de la discussion rationnelle (Llyod).

Dans cette nouvelle période l'astronomie garde une fonction utilitaire. Mais les Grecs vont réellement dépasser le stade de l'observation pour faire de l'astronomie une science en relation avec le développement des mathématiques et particulièrement de la géométrie.

2.1. Sources : Il est important de dire ici qu'elles sont presque toutes indirectes. Ce sont des citations d'autres auteurs dont les écrits nous sont parvenus souvent après de multiples réécritures. Seuls quelques fragments d'œuvre subsistent pour quelques auteurs. Ils parlent peu d'astronomie. Deux écueils nous guettent lorsque nous parlons des anciens Grecs. D'une part leurs propos ont déjà été déformés par nos prédécesseurs qui, souvent, les ont cités soit pour appuyer leurs propres propositions soit pour les dénigrer. Le second risque est celui que nous prenons soit en s'émerveillant "devant tant de connaissances" car elles sont incertaines, soit "devant tant d'ignorance". Il convient donc de rester prudent dans nos propos y compris lorsque des œuvres nous ont été transmises directement, dans la mesure où nous ne disposons que de traductions successives (du grec en arabe, de l'arabe en hébreu, de l'hébreu en latin et enfin du latin en français) et cela sur de nombreux siècles.

2.2. Quatre écoles vont se développer successivement :

L'école de Milet sur les côtes de l'actuelle Turquie et les îles proches qui disparaîtra lors de l'invasion des Perses.

La Grande Grèce (Italie du sud et Sicile) avec les Pythagoriciens.

L'école d'Athènes avec l'Académie et le Lycée (Platon et Aristote).

L'école d'Alexandrie enfin avec Hipparque, Erathostène et Ptolémée.

2.2.1. - L'Ecole Ionienne

Thalès de Milet (v. 640-562) décrit une substance fondamentale, l'eau, dont dérivent toutes les autres. La Terre flotte sur l'Océan qui en s'évaporant donne l'air. Il aurait, selon Hérodote, prédit l'éclipse de 585. Peut-être aurait-il eu accès aux tables babyloniennes qui prédisaient, grâce à leurs observations, la périodicité de ces phénomènes (tous les 18 ans).

Anaximandre de Milet (v. 611-545) est un disciple de Thalès. C'est le premier Grec à avoir conçu un modèle mécanique du monde. Pour lui la terre n'est supportée par rien. Elle est en équilibre au centre de l'Univers. Elle a curieusement une forme cylindrique, plus large que haute: sa hauteur est le tiers de son diamètre. La Terre ne reposant sur rien les astres peuvent dès lors passer en dessous. Les astres les plus proches de nous sont les étoiles suivies par le Soleil et la Lune. Il a donné par ailleurs une taille plus importante au Soleil que ses prédécesseurs qui ne voyaient en lui qu'un feu à peine plus gros qu'une maison. Le Soleil devait être loin puisqu'on le voyait petit. Les étoiles et le Soleil sont des roues de feu. Leur lumière nous parvient par des « tuyaux ». Les éclipses, le jour et la nuit sont dus à des fermetures de ces conduites. Néanmoins il pense que les astres évoluent à des distances variables de la Terre et sont donc des corps indépendants.

Anaximènes de Milet (v. 525- ?). Pour lui les objets célestes sont plats et flottent comme des feuilles dans l'air sur un axe de rotation dirigé vers le Nord. Les montagnes nous empêchent de voir la partie la plus au Nord : c'est la raison de la nuit. Le Soleil tourne autour de la Terre mais... ne passe pas en dessous. Il ne nous dit pas comment le Soleil retourne à l'est le matin!

Anaxagore de Clazomènes (499-428) est un élève d'Anaximènes. Les informations qui nous viennent de lui sont de Platon et d'Aetius qui le citent. Il vient à Athènes où il rejoint Périclès. Il introduit la philosophie dans cette cité vers 480 av. J.-C. Il affirme que "*Rien ne se détruit, rien ne se crée, ... il n'y a que des transformations*" et cela 2000 ans avant Lavoisier, mais il est vrai sans argument scientifique. Son livre "*De la Nature*" ne nous est pas parvenu. Il introduit dans la cosmologie des réflexions géométriques. Pour lui, les planètes et la Lune sont faites de la même matière que la Terre. Les éclipses de Lune sont dues à son passage dans l'ombre de la Terre qui flotte dans les airs. Le Soleil et la Lune sont des pierres incandescentes qui ont un mouvement circulaire, entraînées par l'Ether. La Lune est éclairée par le Soleil. Le Soleil aurait la taille du Péloponnèse.

Xenophanes de Colophon (v. 570-490), émigre en Italie du sud en emmenant les connaissances des Milésiens avec lui. Selon Aetius il pensait que les astres s'éclairaient et s'éteignaient en restant dans leur même position. Le centre de l'univers est constitué de feu. La Terre et les autres astres tournent autour de ce feu central. Pour expliquer la plus grande fréquence des éclipses de Lune sur celles du Soleil, il imagine une anti-Terre située à l'opposé de notre planète. Elle serait responsable de certaines éclipses de Lune.

Au milieu du VI^e siècle les Perses envahissent la région et Milet est détruite en 494. Les savants ont émigré en Grande Grèce, c'est à dire en Italie du sud et en Sicile.

2.2.2. - La Grande Grèce (Italie du sud) et l'Ecole Pythagoricienne.

Pythagore (530 -) n'a rien laissé d'écrit. Son enseignement était oral. C'est Philolaos qui aurait révélé ses écrits. Il faut parler plus d'école pythagoricienne que de Pythagore lui-même. La Terre est immobile au centre de l'univers. Les distances des planètes sont représentées par des nombres harmoniques comme les sons. Elles sont placées sur des sphères concentriques.

Parménide d'Elée (v. 540-450) imagine le monde comme une couronne de feu centrale et une sphère périphérique, entre lesquelles se meuvent la Terre et les Planètes.

Philolaos (450-400) : le soleil tourne autour d'un feu central (siège des dieux) mais la terre tourne autour de ce feu en présentant toujours la même face. Il n'est donc pas le père de l'héliocentrisme.

Les Pythagoriciens affirment que la Terre est sphérique en s'appuyant sur plusieurs arguments. Lorsque les bateaux s'éloignent du rivage on voit disparaître d'abord la coque puis le mât. En descendant vers le sud les constellations changent et enfin les planètes sont rondes ; si elles étaient plates on les verrait parfois sous d'autres formes.

2.3. - L'école d'Athènes.

2.3.1. La synthèse platonicienne

Platon (427-347) est un élève de Socrate. A l'inverse des philosophes précédents il a laissé de nombreux livres conservés jusqu'à nos jours, parmi lesquels trois parlent d'astronomie : *la République*, *les Lois* et surtout *Timée*. Il a fondé l'*Académie*, sorte d'école privée où viennent volontairement ceux qui veulent apprendre auprès des maîtres.

- Ce qu'on connaissait à l'époque de Platon :

- Mouvement diurne des étoiles d'Est en Ouest
- Mouvement de longue période des astres errants (dont le Soleil) sur l'écliptique incliné par rapport à l'équateur céleste (Anaximandre).
- Le mouvement des planètes s'effectue dans une bande centrée sur l'écliptique où se situent les constellations du Zodiaque.
- Le retour périodique du lever et du coucher du Soleil dans les mêmes constellations du zodiaque aux mêmes saisons.
- Les irrégularités du mouvement des planètes avec les rétrogradations.
- La durée différente des saisons (Euctémon).
- L'étoile du matin et l'étoile du soir correspondent à la même planète : Vénus (Anaximandre).

- A partir de ces connaissances Platon décrit un système cohérent.

Il est largement aidé sur le plan astronomique par certains de ses élèves de l'Académie, Eudoxe de Cnide puis Calyppe de Cyzique.

C'est la première fois qu'est posé le principe du caractère exact, mathématique de l'astronomie. A partir de Platon les astronomes cessent de n'être que des observateurs : ils cherchent, pour expliquer l'Univers, des combinaisons de mouvements circulaires (jusqu'à Képler) pour coller aux observations qui montrent que ces mouvements ne sont pas aussi parfaits.

L'Univers est constitué de quatre éléments qui sont le feu, la terre, l'eau et l'air. (Timée 31,32 b) ; il a une forme de sphère (Timée 32,33 b). la sphère est en effet la forme la plus belle. Le second argument est plus scientifique. Platon fait observer que les contraintes des forces s'exerçant sur un objet déformable le conduisent à se transformer en sphère.³ Les mouvements observés dans cet univers sont circulaires : ce sont des révolutions (Timée 33,34 a). Il y a deux sortes d'astres : les étoiles fixes et les astres errants, les planètes ; planomai = errer en grec (Lois VII, 822 a). Les planètes sont au nombre de sept, elles tournent autour de la Terre. Les distances entre ces astres sont dans des rapports semblables à ceux des sons harmoniques (République X, 617 b).

Toutes les planètes ne se meuvent pas de la même façon. La Lune qui est sur le premier cercle et le Soleil font leur révolution sans irrégularité. Au contraire Vénus, l'astre du matin et Hermès (Mercure) ont un temps de révolution égal à la course annuelle du Soleil mais sont doués d'un effet en sens inverse qui rend compte des irrégularités de leurs rotations.

Platon décrit une façon imagée de se représenter l'Univers :

- Prenons une bande de papier. Coupons-la en deux bandes égales. Plaçons-les l'une sur l'autre avec un angle pour former un X allongé. L'angle entre ces deux bandes

³ Si on souffle dans un ballon de baudruche en forme de cube, la pression ne tardera pas à le transformer en sphère. Il en est de même des gouttes d'eau posées sur un support non mouillable : la rosée du matin sur les feuilles.

sera celui que fait l'écliptique sur l'équateur. Leurs extrémités sont ensuite collées pour former un cercle. L'équateur, placé horizontalement décrit un mouvement d'est en Ouest. Il est extérieur, il porte les étoiles et représente le mouvement diurne. Platon l'appelle « le Même ».

Le second cercle de papier est intérieur ; il est appelé « l'Autre » par Platon. Il tourne dans le sens est-ouest : ce sont les mouvements de longue période des planètes. Il est découpé en sept cercles concentriques qui portent les planètes. Leurs diamètres sont différents : petits près de la Terre, plus larges lorsqu'on s'en éloigne. Les distances entre les cercles de papier sont comme celles qui séparent les notes de musiques (dans l'harmonie occidentale).

Trois cercles se meuvent avec une vitesse à peu près égale, ceux qui portent le Soleil, Mercure (Hermès) et l'Astre du Matin (Vénus). Les quatre autres se meuvent à des vitesses différentes des trois précédentes et différentes entre elles.

Le mouvement du Soleil se fait en hélice. Il est en effet la résultante du mouvement diurne et de la révolution autour de la Terre. Chaque jour il décrit un cercle différent (il se lève, atteint une hauteur et se couche en des repères différents. Platon imagine que ce mouvement ne se fait pas sur des cercles concentriques mais bien en continu d'où son aspect en hélice.

Platon n'explique pas les avances et les retards des planètes inférieures par rapport au Soleil.

Les circuits des planètes sont courts ou longs en fonction de leurs distances par rapport à la Terre. Les périodes sont différentes et certaines planètes en rattrapent d'autres.

Le temps n'existait pas avant que le Ciel ne fût né (Timée 37 e). Cette conception est très actuelle puisqu'il en est ainsi dans la théorie du Big-Bang. C'est le Temps qui gère le mouvement des planètes. Le jour est défini par le mouvement diurne. Le mois est défini lorsque la Lune a tourné sur son orbite et rattrapé le Soleil. Une année s'est écoulée lorsque le Soleil a fait le tour de son orbite. Platon déclare que la différence des temps de révolution des planètes n'a pas d'explication connue des hommes. Il existait cependant des planétaires qui permettaient de montrer les mouvements de ces différents astres.

Platon estime par principe qu'aucune explication certaine du Monde en devenir n'est possible. Il n'encourage pas les recherches. Il développe l'idée que la géométrie prime sur l'observation, qu'il faut développer un modèle géométrique de l'Univers (ce que fera son élève Aristote). Cependant il ne déprécie pas trop l'observation car dit-il « *tout l'Univers a été créé intentionnellement. Il faut bien le connaître pour ne pas risquer l'impiété* » ; lorsqu'on sacrifie aux dieux il faut le faire aux bonnes périodes, celles prédites grâce à une bonne connaissance de l'Astronomie.

Eudoxe de Cnide (408-355) modifie le système de Platon pour « coller » mieux aux « irrégularités » des mouvements. Il décrit 27 sphères : quatre pour les cinq planètes, trois pour le Soleil et la Lune et une pour les étoiles. Mais surtout il fait construire un observatoire à Cnide; le résultat de ses recherches est publié dans deux ouvrages "*Miroir*" et "*Phénomènes*" qui constituent les bases de l'observation astronomique et auxquelles se référa Hipparque.

Par ailleurs il était mathématicien et semble avoir été le premier à montrer son intérêt pour la météorologie.

Callype de Cyzique ajoute sept autres sphères: une pour Mars, Vénus et Mercure et deux pour le Soleil et la Lune. Il est le premier à mettre en évidence l'inégalité de longueur des saisons.

Ces modèles sans doute très complexes ne sont pas décrits dans des textes connus de nous. Ils ne devaient certainement pas tout expliquer et les recherches en géométrie astronomique se sont donc poursuivies.

2.3.2. Aristote (384-322) mérite notre attention ne serait-ce que parce que "aristos" en grec veut dire "excellent". Et puis deux mille trois cent vingt quatre ans après sa mort, on parle toujours de sa doctrine: "les aristotéliens", de son école "*le Lycée*", et même de ses élèves les "péripatéticiens"⁴, bien que ce soit souvent au féminin et que le sens ait un peu dérivé depuis.

Socrate a eu pour élève Platon qui a eu pour élève Aristote qui a eu pour élève Alexandre le Grand. Lequel, malgré ses conquêtes qui l'avaient emmené très loin de sa terre natale, n'oubliait pas son ancien maître et lui faisait parvenir des végétaux, des animaux, des fossiles pour enrichir sa collection d'histoire naturelle. Car Aristote comme beaucoup de génies était maître dans beaucoup de matières². Jusqu'à la fin du Moyen-Age "*Aristote l'a dit*" équivalait à "*la philosophie enseigne*".

La contribution d'Aristote à l'Astronomie sera surtout de lui avoir donné une forme considérée comme définitive pendant des siècles en accord avec les observations de tout un chacun et avec une Physique cohérente.

L'Astronome Callippos, à cause des désaccords persistant entre la théorie et les observations, complique encore le système de Callype de Cyzique en introduisant de nouvelles sphères dites "compensatrices". Hélas elles ne compensaient pas vraiment et Aristote doit en porter le nombre à cinquante cinq. Pourtant la première des cosmologies physiques est née, elle aura la vie dure. Et si elle satisfait aux exigences formulées par Platon sur la circularité des mouvements, elle n'explique pas certains phénomènes révélés par l'observation: les variations considérables de l'éclat de Mars, de Vénus, les variations du diamètre apparent de la Lune, la non-uniformité du mouvement apparent du Soleil sur l'écliptique... Elle suppose en effet que les distances de la Terre au Soleil, à la Lune et aux planètes sont invariables, ce qui est loin d'être le cas. Aristote laisse la Terre solidement fixée au centre de tout et l'Univers est irrémédiablement clos. Il serait inexact de réduire la physique d'Aristote à un amas d'incohérences, car elle repose sur une base philosophique élaborée; elle est soutenue par une théorie scientifique systématique et en accord avec le sens commun et l'expérience quotidienne. Certes la science aristotélienne est fautive⁵ mais gardons-nous de sourire en pensant au temps qui nous en sépare. Il est également vrai que cet univers, aussi restreint que fermé, qui a satisfait de nombreuses générations, nous donnerait maintenant des bouffées d'angoisse métaphysique.

Pour Aristote il y a quatre éléments: la terre et l'eau qui sont pesants et attirés vers le centre de la terre; l'air et le feu au contraire s'élèvent vers le haut.

Il distingue les mouvements naturels qui sont lents et les mouvements violents, dont la rotation des astres. Les planètes sont donc fixées sur des sphères cristallines qui, elles, tournent. La Terre ne peut être en mouvement car en tombant, elle irait plus vite que les objets qui sont posés sur elle du fait de son poids plus élevé et ceux-ci se retrouveraient bien vite flottant au-dessus d'elle.

Il distingue deux espaces dans le cosmos: le monde sublunaire où tout change, tout est corruptible et "impur" et le monde supra-lunaire où circule l'éther (le cinquième élément, la quinte essence), monde parfait et immuable.

⁴ Nommés ainsi parce qu'ils marchaient tout en enseignant.

⁵ En particulier il enseigne que les corps chutent à une vitesse proportionnelle à leur poids. Galilée montrera qu'au contraire la chute des corps ne dépend pas de leur poids.

Héraclide de Pont (388-315) a deux idées nouvelles de grande importance. Il décrit la rotation de la Terre sur elle-même et la révolution de Vénus autour du Soleil. Ce dernier ainsi que les autres étoiles tournent autour de la Terre. Jusqu'à Copernic, cette conception ne sera pas retenue par les astronomes.

2.4. - D'Aristote à Ptolémée : mathématisation et simplification. L'école d'Alexandrie.

C'est une époque d'observations précises et de développement de la géométrie. Des mesures exactes sont tentées.

Aristarque de Samos (v. 290 av. J.-C. -v. 330) mathématicien est astronome; il invente le gnomon de forme hémisphérique dont la précision de lecture était supérieure à celle de tous les cadrans solaires existants. On lui doit des calculs précis:

- Estimation de la distance de la Terre au Soleil (figure 1). Alors que jusqu'à lui on pensait que le Soleil était assez proche, il estime qu'il est 19 fois plus loin de la Terre que la Lune (en fait 390 fois plus éloigné).

- Le diamètre du Soleil serait d'après ses calculs 19 fois plus gros que la Terre. La dernière estimation correspondait à la taille du Péloponnèse. Pour la Lune il l'estime trois fois plus petite que la Terre. (figure 2)

- Il estime la distance de la Lune

- Pour lui, la Terre tourne autour du Soleil (univers héliocentrique). Il faillit pour cela être condamné pour impiété.

Eratosthène d'Alexandrie (v. 273 – v. 192 av. J.-C.) s'est intéressé à de multiples problèmes. Il fit des découvertes en histoire (chronologies), mathématiques et trigonométrie, en géographie et en astronomie (catalogue de 44 constellations et 675 étoiles fixes, mesure du méridien terrestre).

Il est surtout connu pour sa méthode de calcul de la circonférence puis du diamètre de la Terre (figure 3). La valeur de la circonférence trouvée par Eratosthène est de 42 000 km soit une erreur de 5% seulement.

Hipparque (v. 190 – v. 125 av. J.-C.) est le véritable fondateur de "l'Astronomie mathématique". On lui doit la division du cercle en 360° et du degré en 60'.

- Il invente la sphère armillaire faite de cinq anneaux. Elle permet de mesurer les coordonnées écliptiques des astres. Il utilise aussi pour ses mesures d'angle l'Alidade issue du dioptré inventé par Archimède et de nombreux autres instruments cités par Ptolémée comme l'Astrolabe.

- On lui doit de nombreuses observations de la position des étoiles effectuées à Rhodes.

- Il décrit la précession des équinoxes

- Il précise la distance de la Terre à la Lune et le diamètre de la Lune. Cette mesure est réalisée en mesurant le cône d'ombre de la Terre lors d'une éclipse de Lune (figure 4).

Claude Ptolémée (v. 110 – v. 160)

Il serait né à Ptolemaïs d'Hermias près de Thèbes. Il nous est connu par son livre «*l'Almageste* » ou la «*Très Grande*» comme l'ont appelé les Arabes mais dont le titre grec était «*Syntaxe mathématique* ». Cet ouvrage traduit ensuite en latin est resté durant plus de treize siècles le livre de référence en astronomie.

L'apport de cet ouvrage est triple:

- Il donne une représentation géocentrique du système solaire avec des estimations fiables et reproductibles du mouvement des planètes grâce à la théorie des épicycles. Il apporte aussi la définition du centre de révolution de la Lune et des planètes. Pour Ptolémée ce centre ne se confond pas avec la Terre, il est décentré et, de plus, il n'est pas fixe. Cet artifice lui permet avec celui des épicycles de donner une description précise des mouvements des planètes tout en leur conservant des orbites circulaires.

- L'Almageste est aussi un recueil d'observations très fiables des étoiles avec leurs coordonnées et leur magnitude. En fait ces données seraient celles d'Hipparque, recopiées par les compilateurs de l'œuvre de Ptolémée. En effet l'astronome Delambre a montré que les coordonnées des étoiles sont faites pour la latitude de Rhodes où vivait Hipparque.

Pour Orion, Rigel est décrite comme «l'étoile brillante qui est au pied gauche, en commun avec l'eau». Elle est de magnitude 1 et ses coordonnées sont les suivantes: longitude de $36^{\circ} 10'$ et latitude de $30^{\circ} 50'$.

- Il donne une description des outils nécessaires aux observations qui est aussi empruntée à Hipparque comme le précise Ptolémée lui-même dans son ouvrage.

Le système solaire décrit par Ptolémée est centré sur la Terre. Autour d'elle tourne la Lune en un mois. Puis viennent Mercure, Vénus et le Soleil qui parcourent leur orbite en un an. Viennent Mars, Jupiter et Saturne. Enfin les étoiles fixes parcourent le ciel en un jour. Le cosmos est très petit et tous ces objets célestes sont très proches. Les mouvements aberrants des planètes, la variabilité des distances, des orientations respectives du Soleil et des étoiles ne peuvent être expliqués que par des artifices: sphères homocentriques reliées entre elles (quatre pour une planète), les épicycles et les mouvements circulaires décentrés par l'équant.

Ces démarches que l'on peut qualifier de scientifiques resteront inégalées pendant de nombreux siècles. Les visions du monde d'Aristote et de Ptolémée deviendront des dogmes qui ne commenceront à être reconsidérés qu'au XIII^e siècle avec prudence, puis plus vivement avec le retour de l'astronomie scientifique à la Renaissance.

Co-auteurs Juin 2002

Alain Brémond

Claude Desuzinge

Dominique Livet

Références

Brundige Helen N. Inventing the solar system : early greek scientists struggle to explain how the heavens move. <http://www.perseus.tufts.edu/GreekScience/>

Cohen I. Bernard. Les origines de la physique moderne. Paris 1993 Le Seuil édit.

Danielson D.R. The book of the cosmos. Cambridge (MA) 2001 Perseus publishing

Encyclopédie Universalis. Articles: Astronomie et astrophysique, Anaxagore, Eratosthène de Cyrène, Eudoxe, Héraclide du Pont, Ptolémée, Thalès de Milet,

Van Helden Albert. Ptolemaic system.
http://es.rice.edu/ES/humsoc/Galileo/things/ptolemaic_system.html

Hésiode. Les travaux et les jours, la Théogonie. Paris 1995, Arlea édit.

Homère. Odyssée. Paris 1960. Armand Colin édit.

Geoffrey E.R. Lloyd. Les débuts de la science grecque. De Thalès à Aristote. Paris 1974. Maspero édit.

Platon. La République, Timée, Les Lois. La Pléiade. Paris 1950. Gallimard édit.

<http://www.coll-ferry-montluçon.pays-allier.com>

Serre Michel. Gnomon: les débuts de la géométrie en Grèce. In Eléments d'histoire des sciences. Paris 1989 Bordas édit.

Stirn François. Aristote. Paris, 1990, Armand Colin édit.

Verdet Jean-Pierre. Une histoire de l'Astronomie. Paris 1990 Le Seuil édit.

Estimation de la distance Terre-Soleil par Aristarque de Samos (figure 1).

Il pense qu'au moment d'un quartier, la Lune reçoit les rayons du Soleil perpendiculairement à sa surface. L'angle formé par la Terre, la Lune et le Soleil est de 90° .

L'autre angle formé par la Lune, la Terre et le Soleil est d'autant plus grand que le Soleil est plus éloigné. Il se rapproche de plus en plus de 90° (sans jamais atteindre réellement cette valeur).

Aristarque mesure cet angle et le trouve de 87° . En réalité il est difficile de savoir exactement à quel moment la Lune est exactement au quartier. La mesure actuelle de l'angle est de $89,85^\circ$.

Avec cette mesure de 87° Aristarque en déduit la distance Terre-Soleil par rapport à la distance Terre-Lune.

Les Grecs de son époque connaissent la trigonométrie. Ils ont établi des tables.

$\text{Terre-Lune} / \text{Terre-Soleil} = \cos$ de l'angle mesuré. Il en déduit que le Soleil est 19 fois plus éloigné de la Terre que ne l'est la Lune.

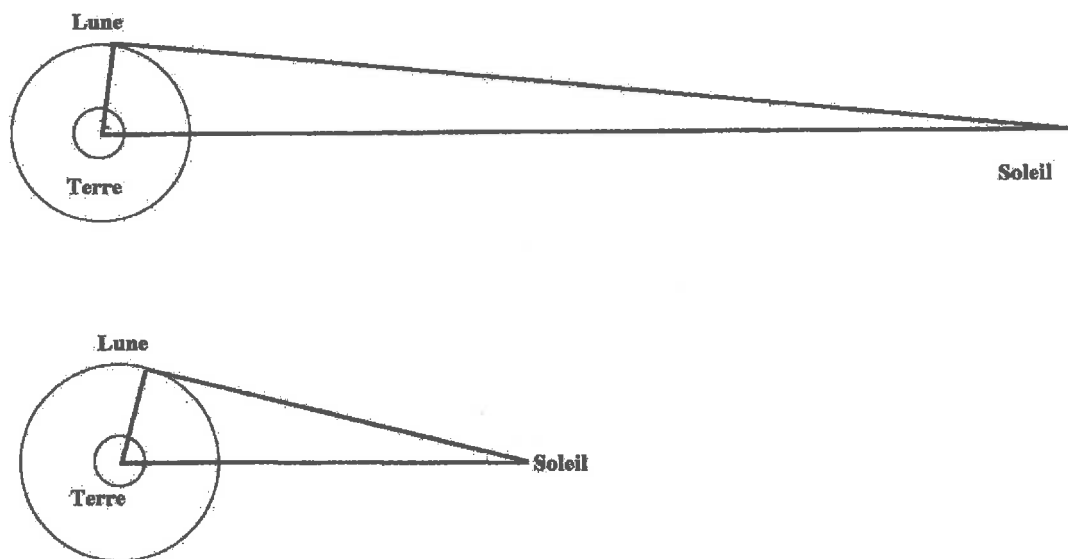


Figure 1 : estimation de l'éloignement du Soleil.

Estimation du diamètre du Soleil par Aristarque (figure 2)

Il observe les éclipses de Lune. Il constate que les plus longues éclipses durent environ deux heures. A chaque heure la Lune avance par rapport à l'ombre de la Terre de une fois son diamètre. Il en conclut que le diamètre de la Lune est environ trois fois plus petit que celui de la Terre.

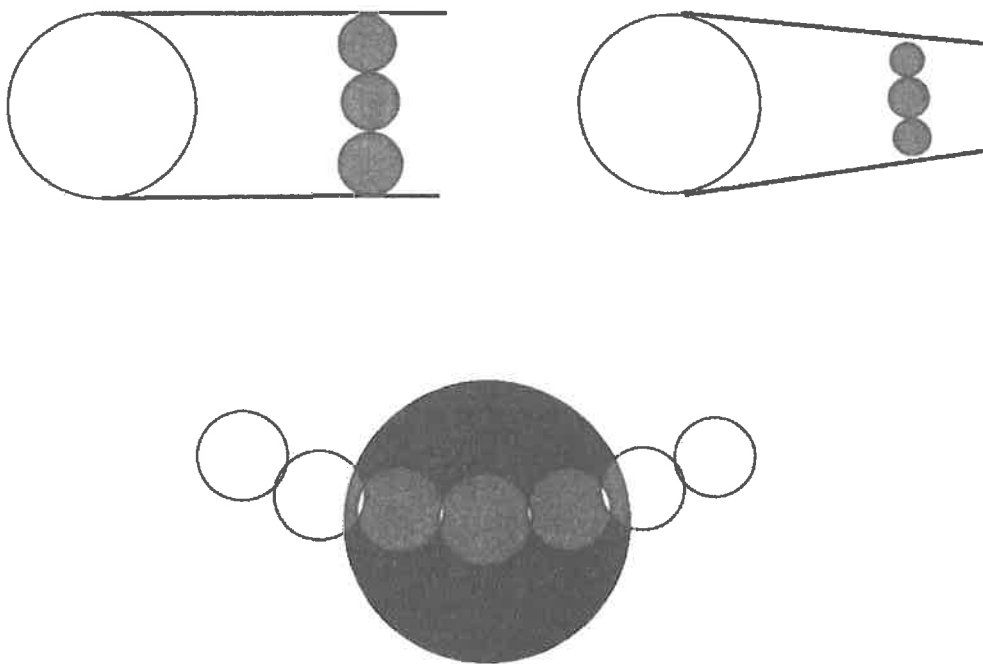
Au moment d'une éclipse de Soleil, le diamètre apparent de la lune est à peu près égal à celui du Soleil.

Comme le Soleil est 19 fois plus éloigné de la Terre que la Lune, il en déduit que le diamètre du Soleil est $19 \times \frac{1}{3}$ soit $19 \times 0,3$ six fois plus gros que la Terre.

Il restera à mesurer le diamètre de la Terre pour connaître ceux de la Lune et du Soleil.

En réalité ces estimations sont erronées. Nous avons vu l'erreur de mesure de l'angle Lune-Terre-Soleil mais Aristarque surestime le diamètre de la Lune car il ne sait pas que l'ombre de la Terre lors d'une éclipse est un cône et non un cylindre. Le Soleil est 97,5 fois plus gros que la Terre mais ces calculs étaient déjà révolutionnaires puisque beaucoup à cette époque pensaient le Soleil de la même taille que la Lune et bien plus proche de la Terre.

Figure 2 : Estimation de la taille de la Lune.



Mesure de la circonférence de la Terre par Eratosthène d'Alexandrie (figure 3).

Eratosthène savait, grâce aux travaux d'Aristarque que le Soleil était très éloigné de la Terre. Il en déduit qu'on pouvait représenter les rayons du soleil comme des droites parallèles.

Il avait entendu raconter qu'à Syène, au sud de l'Egypte, à midi, le jour le plus long de l'année le Soleil éclairait le fond d'un puits. Les rayons étaient donc en ce lieu dirigés exactement au centre de la Terre. Il connaissait exactement la distance qui séparait cette ville d'Alexandrie grâce aux mesures faites par les arpenteurs appointés par le Pharaon.

Il eut donc l'idée de mesurer à midi, au jour le plus long de l'année l'ombre portée par un obélisque situé à Alexandrie.

Les connaissances géométriques accumulées depuis Thales lui permirent un calcul simple :

- L'angle mesuré à partir de l'ombre de l'obélisque à midi était de 7° .

- La distance Syène-Alexandrie correspond donc à une portion de la circonférence terrestre égale à $7/360$. La distance connue équivaut à 850 de nos kilomètres.

- La circonférence de la Terre est donc de $820 \times 360/7$ soit 42000 km.
 - Le rayon de la Terre est donné par la formule de la circonférence $= 2 \times \text{PI} \times \text{Rayon}$
- Ces mesures ne sont pas loin de la réalité d'aujourd'hui qui, avec un angle de $7,5^\circ$ conduisent à une circonférence de 39 360 km.

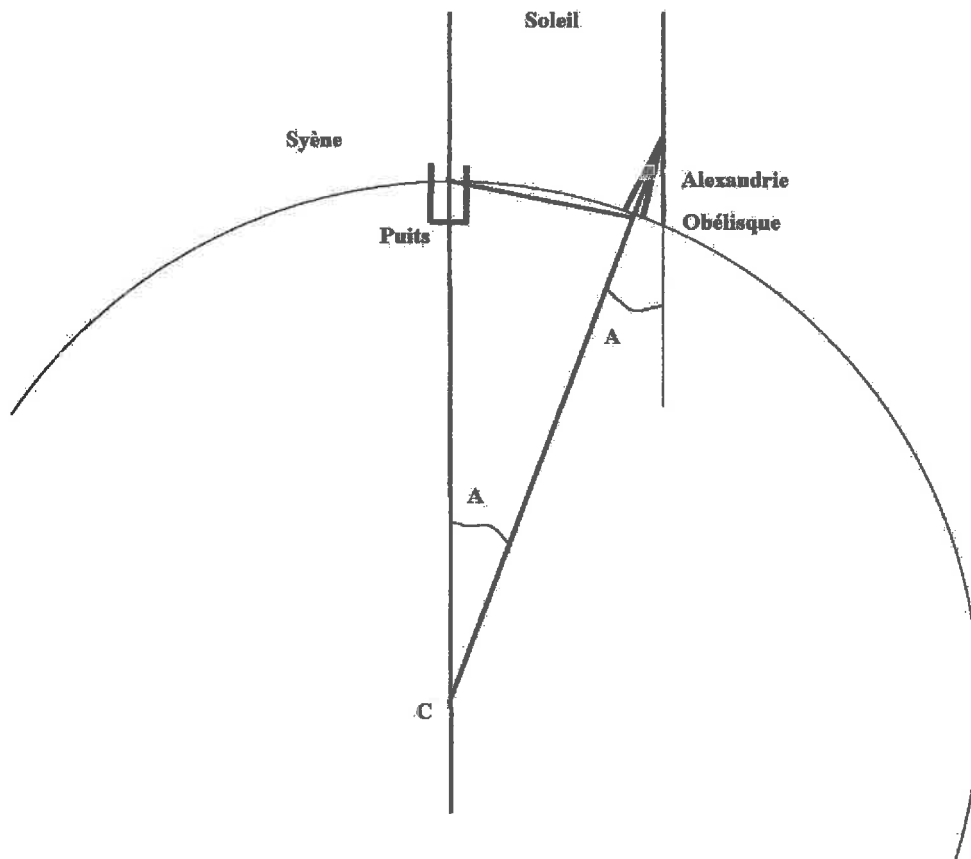


Figure 3 : mesure de la circonférence de la Terre.

L'estimation du diamètre du Soleil devient ensuite possible

Mesure de la distance Terre-Lune par Hipparque.(figure 4).

Il observe que la durée d'une éclipse de Lune doit être en rapport avec la distance Terre-Lune. Plus cette distance est petite, c'est à dire la Lune proche de nous, plus la durée de l'éclipse sera longue.

Il sait

- Par les travaux d'Aristarque que le Soleil est très éloigné et qu'ainsi ses rayons sont parallèles.

- Que la Lune fait le tour de la Terre en 29,5 jours soit 708 heures.

- Que les éclipses les plus longues durent deux heures et demie.

Il en déduit que la durée de l'éclipse correspond à $2,5/708$ soit 0,35% de la durée de révolution de la Lune autour de la Terre.

Vu de la Terre, le diamètre angulaire du Soleil est mesuré par Hipparque à $0,5^\circ$.

Connaissant le diamètre de la Terre (Eratosthène), il en déduit la distance Terre-Lune soit 65 fois le rayon de la Terre.

Voici la démonstration de Hipparque :

$a = 0,5^\circ$ diamètre angulaire du Soleil

$b = 2,5 \times 360^\circ / 708 \text{ h}$ la durée de l'éclipse est de 2,5 heures et la période de rotation de la Lune de 708 heures.

c est à peu près égal à 90° si le Soleil est très éloigné de la Terre.

d est inconnu

On a sur la figure :

$$a/2 + c + d + b/2 = 180^\circ \quad d = 180^\circ - (a/2 + c + b/2)$$

En remplaçant les angles par leurs valeurs $d = 180 - 0,25 - 90 - 0,63 = 89,12^\circ$

Avec cela Hipparque calcule la distance de la Terre à la Lune :

Distance Terre-Lune (CL) = Diamètre de la Terre (CT) $\times \cos 89,12 = 65$ fois le rayon de la Terre calculé par Ératosthène.

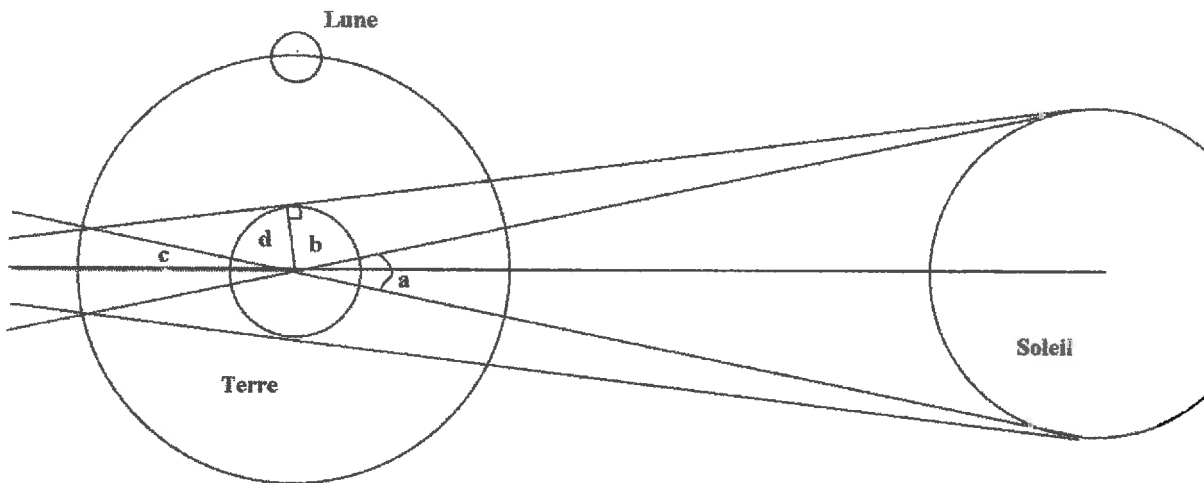


Figure 4 : calcul précis de Hipparque de la distance Terre-Lune.