

# 3ème cours

## Astronomie Alexandrine

La plus développée des sciences alexandrines, celle qui mérite complètement le nom de science dans le sens moderne, est l'astronomie.

C'est dans l'astronomie que l'intuition de Pythagore et de Platon que le monde est gouverné par les mathématiques, se réalise enfin.

L'astronomie Alexandrine est non seulement la science la plus développée de l'antiquité, mais aussi celle de laquelle est émergée la science moderne.

Dans l'astronomie, l'idée platonique d'une description mathématique précise de la nature trouve son vrai premier triomphe. Le programme d'Aristote est de donner une description précise au mouvement des cieux. Comme les cieux sont faits d'éther, leur mouvement est imaginé régulier et mathématique. Le problème est donc de décrire ce mouvement régulier.

Si le mouvement est régulier, il doit être possible de faire des prévisions exactes sur les positions futures des astres. L'objectif de l'astronomie ancienne est de faire ces prédictions.

Il y a plusieurs grands astronomes en Grèce. Nous discutons seulement des plus grands.

## **Eratosthène (276 – 194, directeur de la bibliothèque d'Alexandrie)**

Après Aristote, le consensus est complet sur le fait que la terre est sphérique. Arguments forts:

- Les éclipses de lune sont observées à des heures solaires *différentes*, à des longitudes (East-West) différentes.
- La hauteur de l'étoile polaire change avec la latitude
- L'ombre de la Terre projeté sur la Lune durant une éclipse est un disque. (Noté par Aristote.)

Or, si la Terre est sphérique, quelle est donc sa dimension ?

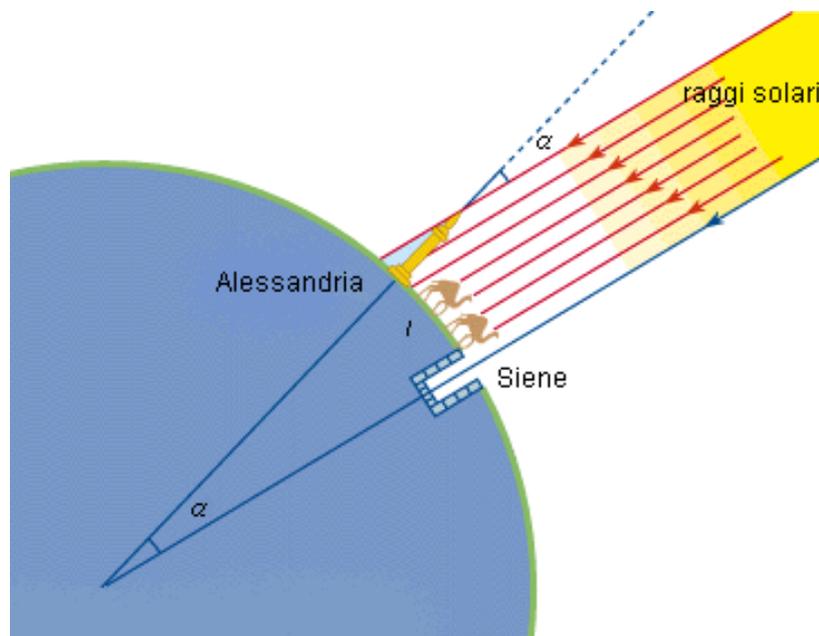
Eratosthène est le premier à mesurer avec grande précision la *dimension* de la Terre.

*La mesure d'Eratosthène :*

A Syène (Assam) dans le sud de l'Egypte, il y a un jour de l'année où le Soleil est au zénith (exactement au dessus de la tête). Cela est bien mis en évidence par le fait que ce jour, le Soleil est réfléchi par le fond des puits.



Ce même jour, à Alexandrie l'angle entre les rayons et la verticale, mesuré en mesurant l'ombre d'une obélisque, est de 7,2 degrés = 1/50 de 360 degrés.



Observez la figure : l'angle  $\alpha$  entre la verticale et les rayons de Soleil est précisément l'angle au centre de la Terre entre Alessandria et Siène !

Donc cet angle est  $360^\circ/50$  et donc, le périmètre de la Terre est 50 fois la distance entre Alessandria et Siène.

Eratosthène estime la distance entre Alessandria et Siène à 5000 stades. Donc la circonférence de la Terre est de 50 fois 5000 = 250 000 Stades.

1 stade = 157,5 m, donc le résultat de Eratosthène est que le méridien terrestre mesure

39 690 Km.

C'est un résultat très bon ! Même "trop bon", vu que la vraie circonférence de la Terre est 40 000 Km. ! Une erreur de moins que 2% !

Pour la première fois, l'humanité comprend la dimension de la planète sur laquelle elle vit !

(Le nombre « rond » 250 000 Stades peut être du à la même raison pour laquelle aujourd'hui la longueur du méridien est le nombre « rond » de 40 000 Km. : l'unité de mesure a été redéfinie pour obtenir cela, comme a été fait par les français avec la définition du mètre. Avant Eratosthène, il avait beaucoup de définitions de « stade » différentes, et les unités variaient largement. Exemple : 1 pied correspond à 31,6 cm à Athènes, 31,4 cm à Egine, 31,6 cm en Etrurie, 31,8 cm à Milet, à Olympie.)

### **Aristarque de Samos (310-240)**

Etudie à Alexandrie. Dirige le Lycée d'Aristote à Athènes.

- *Mesure de la distance de la Lune, utilisant une éclipse de Lune :*

i. Une pièce de 1/2 cm de diamètre cache la Lune à 57 centimètres de l'œil. Donc le rapport diamètre distance est = 1/114. La dimension angulaire de la lune est donc 1/2 degré. (Parce que  $\tan(0,5^\circ) = 1/114$ .)

ii. Dimension du diamètre de l'ombre de la Terre = à peu près 2,5 fois l'ombre de la Terre. (Observé durant une éclipse:

(Note: l'ombre de la Terre est circulaire: la terre est sphérique!)



iii. Approximation: Soleil à l'infini: ombre de la Terre est un cylindre.

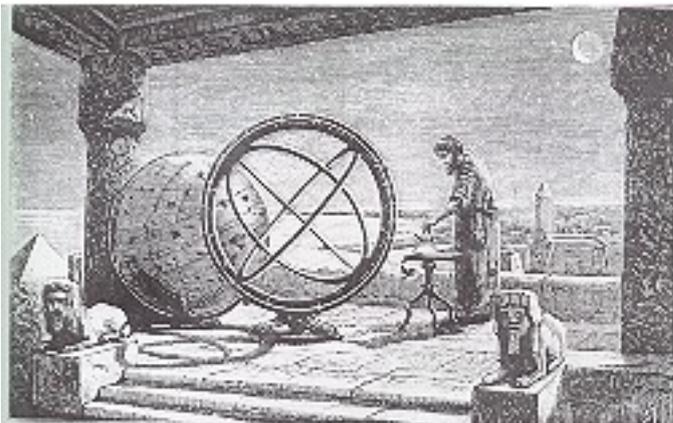
Donc, la distance de la lune est 114 fois le rayon de la Terre divisé par 2,5. Or  $114/2,5 = 45,6$  diamètres de la Terre = 92 rayons de la Terre. (Hipparque va faire mieux bientôt.)

- *Mesure de la distance du Soleil.*

Mesure la distance du Soleil, en mesurant l'angle entre la Lune et le Soleil dans le ciel, quand nous voyons la Lune à la demi-lune exacte. Mesure pas très précise, mais suffisant pour le convaincre que le Soleil est très loin. S'il est très loin, il est très grand. S'il est très grand, C'est difficile penser que c'est lui en mouvement !

Aristarque développe donc un système héliocentrique: le mouvement diurne est dû au mouvement de la terre de rotation. Le mouvement annuel, est dû au mouvement de la terre autour du soleil. Très belle idée! (et vraie !) Mais attention, ce n'est pas quantitatif !! C'est une idée bien connue (aussi par Copernic), mais ce n'est pas suffisant d'avoir une belle idée, il faut la faire fonctionner: faire voir qu'elle simplifie les calculs et nous permet de faire des prévisions. Et après, tester ces prédictions avec des observations. Aristarque, n'est pas capable de faire ça. Son idée est bonne (en effet, elle est complètement juste), mais pour long temps, c'est un idée qui ne sert à rien.

## Hipparque



**Hipparque de Nicée (194 à 120)**

Née à Nicée sur la côte de l'actuelle Turquie, il s'installe à Rhodes à 30 ans. C'est avec lui que l'astronomie se transforme de science descriptive à science *prédictive*.

Il perfectionne les instruments d'observation : dioptré, astrolabe ; il aurait systématisé la subdivision du cercle en  $360^\circ$ , et crée le 1er globe céleste. On lui attribue un traité en 12 livres sur le calcul des cordes (la trigonométrie). Donc la trigonométrie que vous étudiez à l'école a été créée largement par Hipparque. Il établit le premier catalogue d'étoiles (en coordonnées écliptiques).

Découvre la précession des équinoxes : l'équinoxe, c'est à dire le point d'intersection de l'écliptique avec l'équateur céleste n'est pas fixe dans ciel, mais tourne lentement. Il fait un tour tous les 25 800 ans. C'est sa découverte la plus célèbre. Comment a-t-il pu observer un changement si petit dans le ciel ?

Il compare ses observations avec les observations faites par deux astronomes d'Alexandrie, Timocari et Aristillo, 170 ans plus tôt. Ces astronomes avaient mesuré avec précision la position de l'étoile Spica par rapport à la lune durant une éclipse lunaire. Comme Hipparque pouvait calculer la distance de la lune de l'équinoxe au moment de l'éclipse, il se rend compte que Spica (et toutes les étoiles) se sont déplacées par rapport à l'équinoxe. Il estime le changement à 36" d'arc par siècle. La valeur considérée correcte aujourd'hui est 52" d'arc par siècle.

Hipparque développe un système planétaire à excentrique et épicycles qui sera développé par Ptolémée.

Tous ses ouvrages sont perdus sauf une œuvre de jeunesse

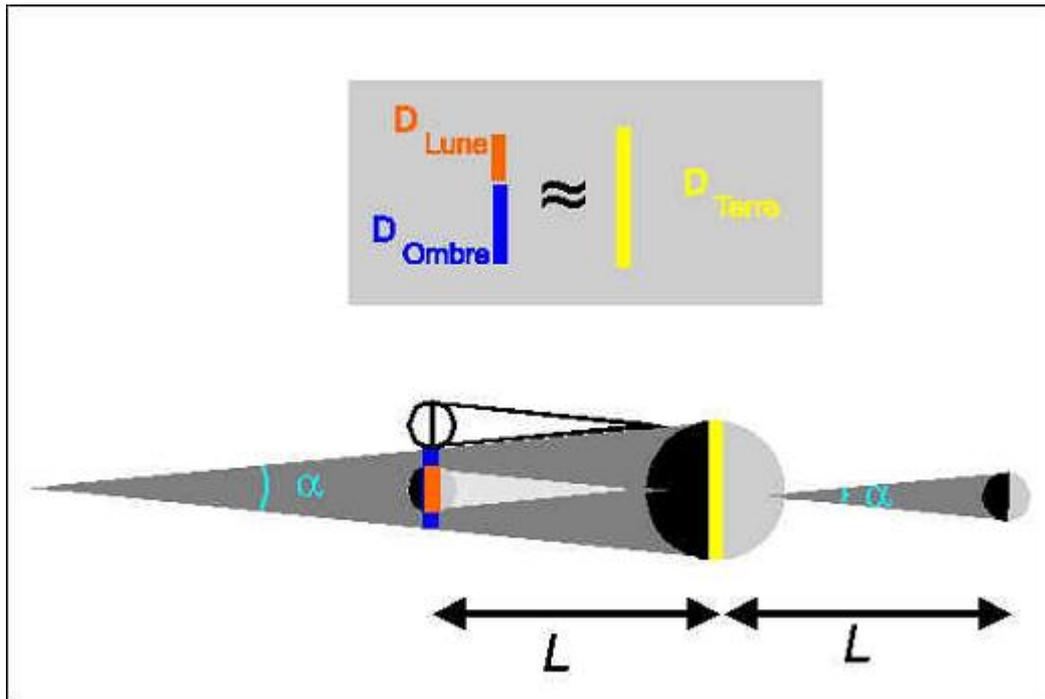
- A beaucoup de données de Babylone
- Donne une mesure précise de la distance de la Lune, en utilisant la parallaxe.

Des nombreux résultats d'Hipparque, nous en allons voir deux :

1. Théorie de la lune
2. Théorie des planètes: déférent -- épicycle

*- Calcul précis de la distance de la Lune.*

Version plus précise qu'Aristarque. Le Soleil n'est pas à l'infini. La terre a un cône d'ombre. Donc l'ombre de la lune est plus petite que la terre.



$$D_{\text{ombre}} + D_{\text{lune}} = D_{\text{terre}}$$

$$D_{\text{ombre}} = 2,5 D_{\text{lune}}$$

$$D_{\text{lune}} = 1/3,5 D_{\text{terre}}$$

$$\text{Distance} = 114 D_{\text{lune}} = 114/3,5 D_{\text{terre}} = 32 D_{\text{terre}}$$

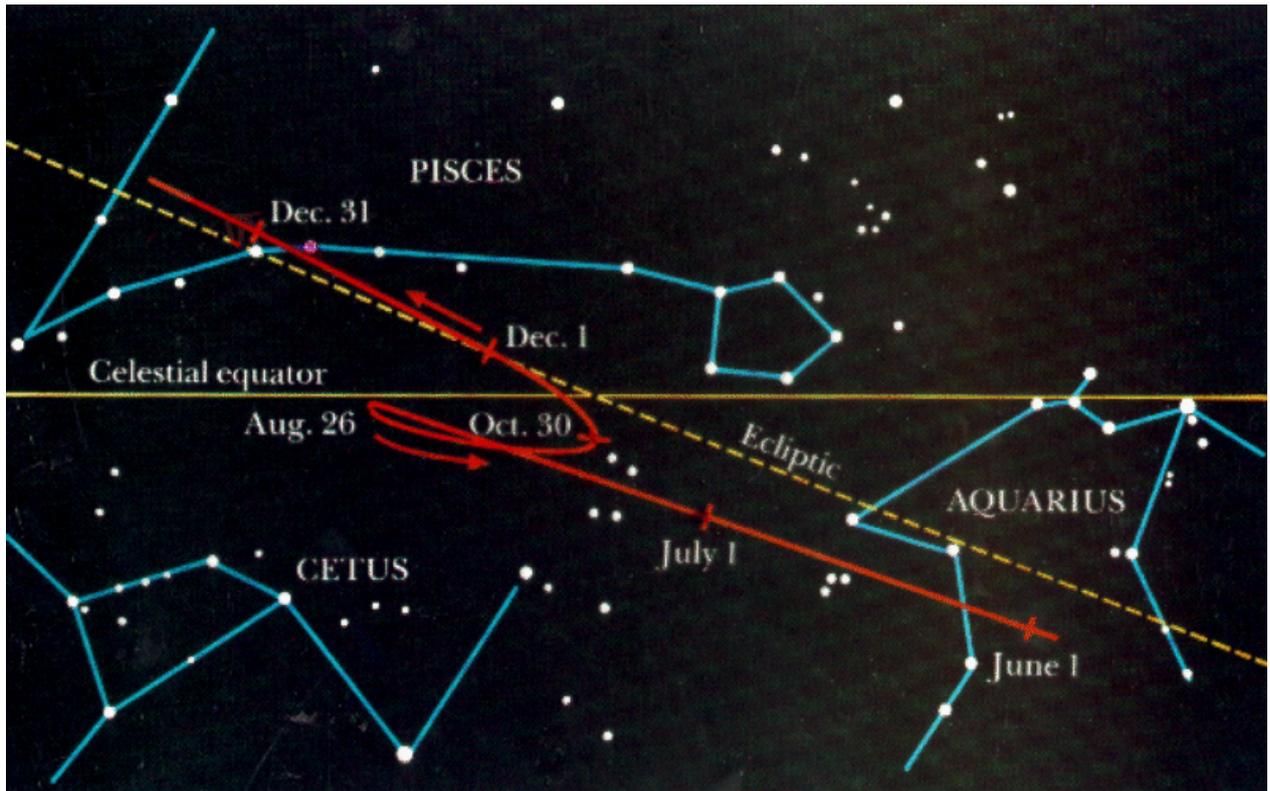
Donc la distance de la lune est 32 fois le diamètre de la Terre !

Correct !

Mesure de la distance du soleil, à la demie lune, mesurer l'angle entre la lune et le soleil.  
(beaucoup plus difficile : résultat incertain, mais clair que le soleil est beaucoup plus grand que la Terre)

- *Le problème des planètes*

- mouvement rétrograde entre les étoiles : dans la figure suivante, le mouvement de Mars entre les étoiles durant quelque mois est indiqué en rouge:



[ Ciel du mois

[http://www.planetarium.montreal.qc.ca/Information/ciel\\_du\\_mois.html](http://www.planetarium.montreal.qc.ca/Information/ciel_du_mois.html)

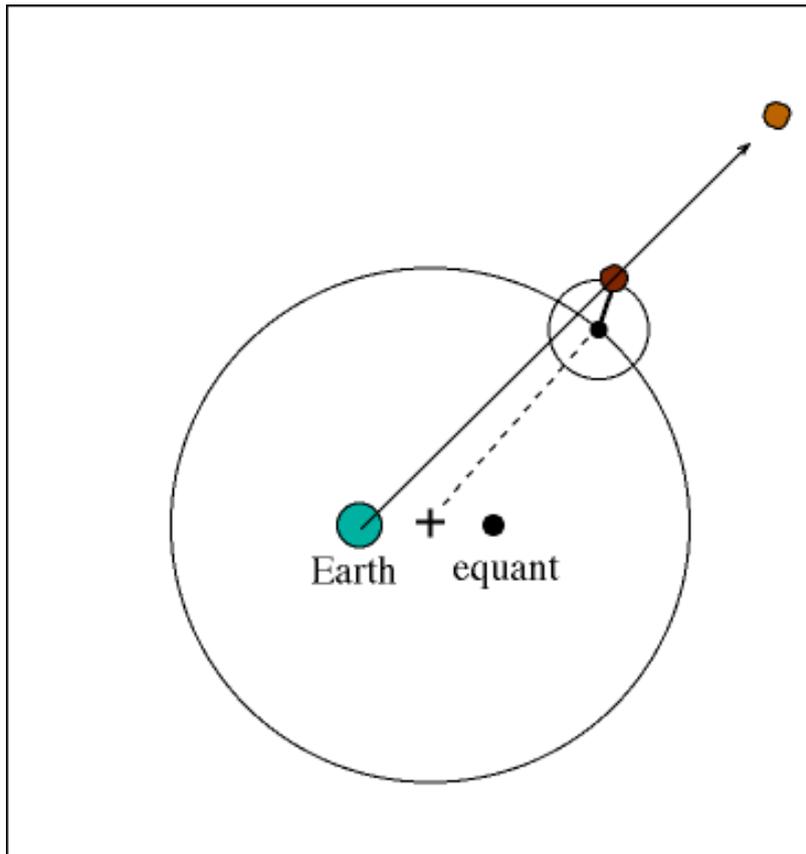
<http://www.futura-sciences.com/sinformer/e/>

<http://perso.wanadoo.fr/astronomie.magazine/>

<http://www.astrosurf.com/astro-myans/page4.html> ]

Solution (proposée par Eudoxe): composition de deux mouvements: épicycle, déférent.

La Terre est (presque) au centre. Chaque planète suit un petit cercle (épicycle) qui est centré sur un point qui suit un grand cercle (déférent) autour de la Terre. Voir l'image.



Voir :

<http://www.astronomynotes.com/history/epicycle.htm>

La rotation combiné du déferent (grand cercle) et de l'épicycle (petit cercle) génère le mouvement des planètes dans le ciel que nous voyons.

Observation importante pour la suite. Les lignes (rayons) des *déférents* de Venus et de Mercure sont en ligne avec le Soleil. Les *épicycles* de Mars, Jupiter et Saturne, sont aussi en ligne avec le soleil. Hipparque apparemment ne se demande pas pourquoi.

Avec ce système, Hipparque arrive à faire des prédictions de la position de toutes les planètes dans le ciel avec une précision très bonne par rapport aux observations.

Conclusion sur Hipparque. Vraie science, au sens moderne. Très bonne et très précise. Modèles mathématiques, prédictions. Observations avec grande précision, image générale de l'Univers.

## Ptolémée



**Ptolémée d'Alexandrie (85 à 165)**

Beaucoup plus tard (empire romain). Très grand astronome de l'antiquité. Second seulement à Hipparque. Livre : « Synthèse mathématique » de 13 livres appelée *Almageste* (le grand) par les Arabes (mélange d'Arabe *-al-* et de grec *-magest-*), et aujourd'hui.

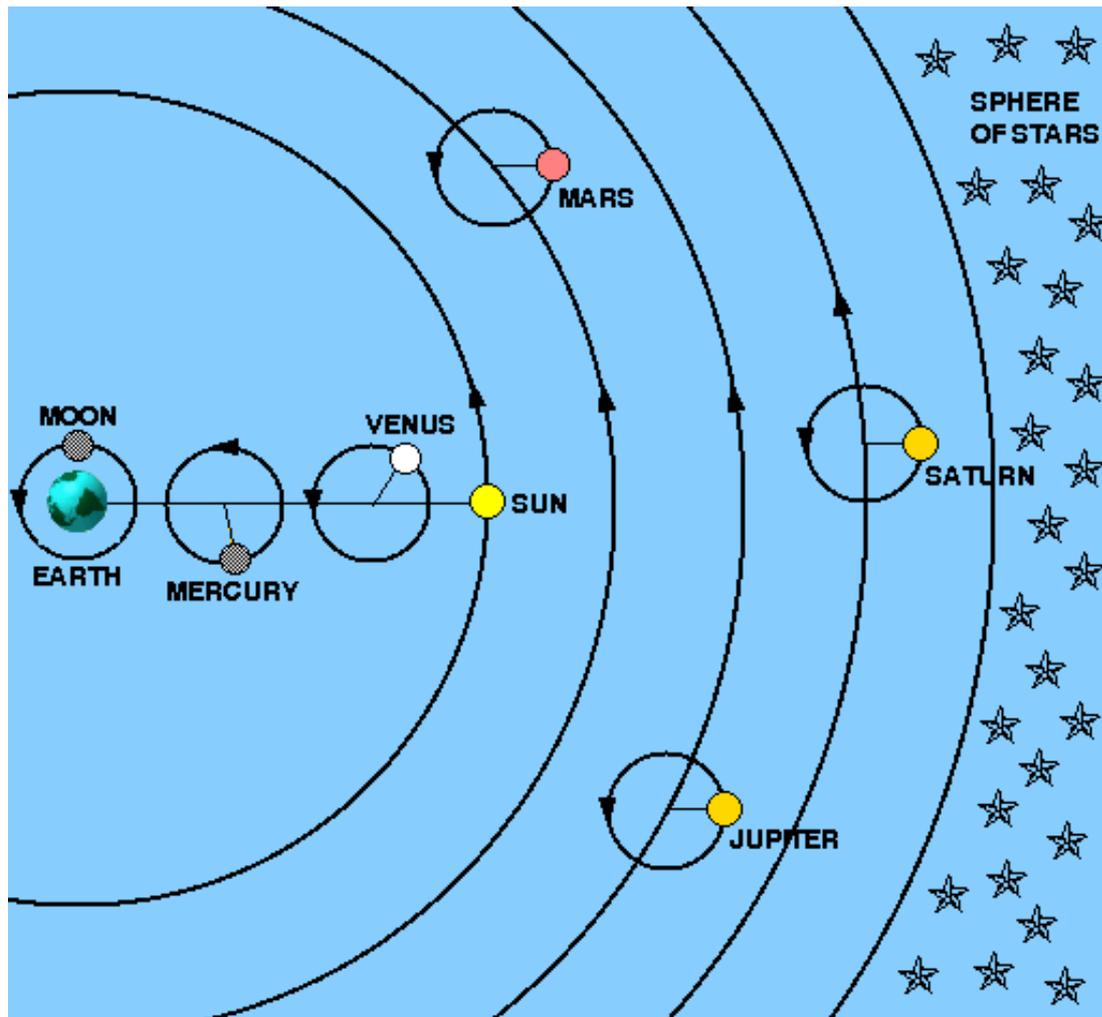
Important pour plusieurs raisons.

- Change et améliore la théorie de Hipparque ;
- Arrive à un système de prévisions du mouvements des planètes pratiquement *parfait* ;
- Ecrivit un livre extraordinaire, l'*Almageste*, que nous avons, qui est un modèle de traité scientifique.

Logique, précis, avec les données bien expliquées, problèmes bien expliqués, un peu sec, sans redondances. Très rationnel. Jusque ici et là, Ptolémée se laisse aller à quelque considération sur la grande fascination de l'étude des cieux. Il dit, poétiquement, que étudier les cieux est comme s'approcher des dieux :

*"Je sais que je suis mortel, mais quand j'étudie les immense cercles des cieux, je suis égal aux dieux, je m'assois à leur côté, et je bois l'Ambroisie de dieux".*

Le modèle de Ptolémée simplifié :



- la nouveauté technique de Ptolémée est l' *équante*, mais nous n'allons pas le discuter ici, parce ce que c'est compliqué.

Il utilise une géométrie sphérique (difficile), et calcule des tables de positions des astres qui sont très précises et qui sont encore bonnes mille ans après.

Son livre comprend aussi des tables trigonométriques.

Son livre comprend aussi une belle discussion précise sur la possibilité que la terre tourne, mais écarte l'idée.

### **Considérations finales sur l'astronomie Alexandrine:**

- des mouvements très irréguliers sont réinterprétés en terme de mouvements simples.

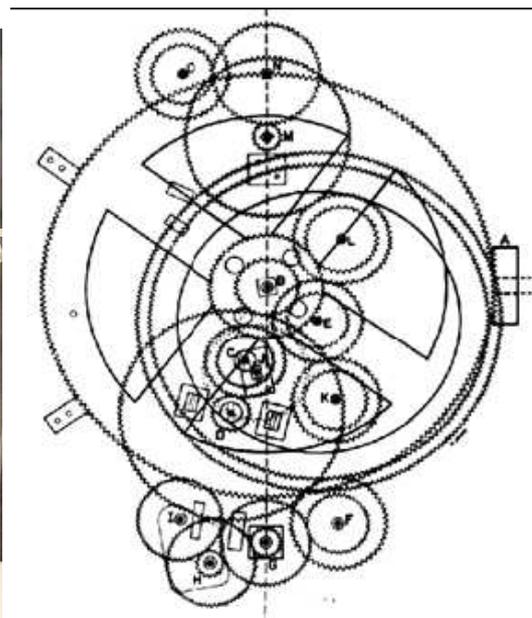
- lois de nature/ tout corps céleste est en mouvement sur des cercles à vitesse uniforme ou bien sur des cercles composés à vitesse uniforme.

- Très solide succès de la physique céleste de Aristote (cercles).  
Mais, des variations importantes par rapport à Aristote: pas des sphères, pas de mouvement autour du centre de l'univers.  
plutôt une unité de comportement.
- Il y a des lois mathématiques exactes dans le ciel.
- importance des observations précises. Importance et succès des mathématiques.  
Paradigme: mesure très précise et systématique, et mathématique, en forme de modèles mathématiques précis.
- mais seulement dans le ciel parce que, comme a dit Aristote "le ciel est parfait".

### L'« ordinateur » d'Anticythère

La complexité et la richesse du développement de la science alexandrine ont été sous-estimées dans le passé, et sont en train d'être réévaluées.

Une belle illustration de ce changement de notre connaissance de la science grecque est la découverte récente de la machine d'Anticythère, une espèce d'horloge mécanique de fabrication Alexandrine, pour lequel c'est difficile ne pas employer le terme « ordinateur ». Il s'agit en effet d'un mécanisme complexe, qui calcule la position du Soleil, lune et planètes dans le ciel à n'importe quelle date donnée. Des mécanismes de ce type avaient été décrits par des textes anciens, par exemple Cicero, mais ces descriptions n'étaient pas prises au sérieux, avant la découverte de la machine d'Anticythère.



L'horloge astronomique grecque d'Anticythère 75 av. J.C. et une reconstruction de son mécanisme.

## La fin de la science ancienne

Avec l'empire romain, le développement de la science s'arrête presque complètement. L'arrêt est complet avec l'arrivée au pouvoir du Christianisme.

Raisons de la fin de la civilisation scientifique grecque :

- L'anti-intellectualisme Romaine. L'abyssale ignorance scientifique romaine.
- L'influence du Christianisme. Condamnation de la recherche rationnelle. St Augustin condamne tout le savoir ancien.
- La grande bibliothèque d'Alexandrie est détruite par les chrétiens quand l'empire se christianise.

Comme nous allons voir dans le cours prochain, la recherche va continuer, notamment après la diffusion de l'Islam, mais à une vitesse incomparablement plus lente que dans la période Alexandrine.

L'obscurantisme : non pas manque de civilisation, mais arrêt de la recherche, du parcours de recherche rationnelle de connaissance.

Mille ans de progrès sont perdus.

Une leçon pour aujourd'hui ? Y a-t-il des antirationalismes aujourd'hui ?

### **Résumé 3**

- Extraordinaire développement de l'astronomie dans la période Alexandrine, avant l'empire de Rome.
- Eratosthène mesure la dimension de la Terre en utilisant la différence entre l'angle du Soleil entre deux villes à distance connue. Il obtient une valeur très bonne de la dimension de la Terre.
- Aristarque fait une première mesure de la distance de la lune et propose un modèle du monde avec le soleil au centre.
- Les deux grands astronomes de l'Antiquité sont Hipparque et Ptolémée.
- Hipparque construit un modèle mathématique quantitatif précis du mouvement du Soleil, basé sur l'idée que la Terre n'est pas dans le centre exact du cercle du Soleil (excentrique), et sur les données des nombres de jours entre solstices et équinoxes. Il développe en détail le système épicycle / déferent. Il mesure la précision des équinoxes.
- Ptolémée, un des très grandes scientifiques de l'histoire, met en place un modèle mathématique très détaillé qui permet de prédire exactement la position des planètes du Soleil et de la lune (et donc, par exemple, les éclipses) dans le ciel. Le modèle fonctionne très bien encore deux mille ans après, avec des écarts minimaux par rapport aux observations.
- Avec l'empire Romain, le Christianisme, le Moyen âge, l'approche rationnel au monde est attaqué, et s'arrête. Il n'y a plus de progrès de connaissance rationnelle, plus d'effort de connaissance rationnelle du monde, plus de progrès technique. En Inde et dans le monde Arabe, les connaissances de l'antiquité sont préservées, et quelques progrès des mathématiques sont fait, mais la science avance très peu.
- Mille ans de possible progrès sont perdus.

### **Devoir**

1. Mesurez vous mêmes, avec des moyens simples, la distance angulaire de la Lune. C'est à dire, trouvez le rapport entre le diamètre de la Lune et sa distance.
2. Expliquez avec vos mots, dans la façon la plus claire possible comment Aristarque a compris que le Soleil est beaucoup plus grand que la Terre. Seriez-vous capable de l'expliquer à un ami, un jour sans nuages, en regardant la Lune et le Soleil dans le ciel ? Essayez de donner l'argument complet.

### *A. Questions*

**1) Les prédictions sur les mouvements des astres faites par les astronomes grecques étaient :**

- a) Fausses
- b) Exactes
- c) Très bonnes, dans la limite des capacités d'observations qu'on avait.

**2) La science grecque était capable de faire des prédictions exactes sur le mouvement futur:**

- a) De toute sorte de corps
- b) Des corps célestes
- c) D'aucun corps.

**3) Au sens large du terme "science", les Grecs :**

- a) N'avaient autre science que l'astronomie
- b) Avaient développé beaucoup de sciences, mais sans aucune application pratique
- c) Avaient développé beaucoup de sciences et d'applications pratiques.

**4) En utilisant la durée différente des saisons, Hipparque a découvert que :**

- a) La distance entre le Soleil et la Terre n'est pas toujours la même
- b) Le Soleil ne bouge pas sur un cercle parfait
- c) La vitesse réelle du Soleil n'est pas constante.

**5) Aristarque a déterminé la distance entre la Terre et la Lune utilisant :**

- a) La hauteur de l'ombre du Soleil
- b) La réflexion du Soleil au fond d'un puits
- c) Une éclipse de Lune.

**6) La différence entre la détermination de la distance de la Lune d'Aristarque et de Hipparque est que :**

- a) Hipparque tien compte du fait que l'ombre de la Terre est un cône.
- b) Aristarque mesure aussi la distance du Soleil
- c) Hipparque utilise l'ombre de la Terre durant une éclipse

**7) Le plus grand astronome de l'antiquité est probablement :**

- a) Aristarque
- b) Hipparque

- c) Euclide
- d) Archimède

**8) Archimède a contribué à :**

- a) L'optique
- b) Aux mathématiques
- c) La mécanique statique
- d) Toutes ces disciplines

**9) Le système des épicycles est :**

- a) Une description absurde et redondante du mouvement des planètes
  - b) Une théorie non scientifique
  - c) Une théorie scientifique très efficace, précise, et prédictive
  - d) La démonstration du manque d'esprit scientifique ancien.
- 

**Devoir.**

Envoyez vos devoirs par email à [rovelli@cpt.univ-mrs.fr](mailto:rovelli@cpt.univ-mrs.fr). Vous avez deux semaines, à partir de la date de dépôt du texte en ligne.