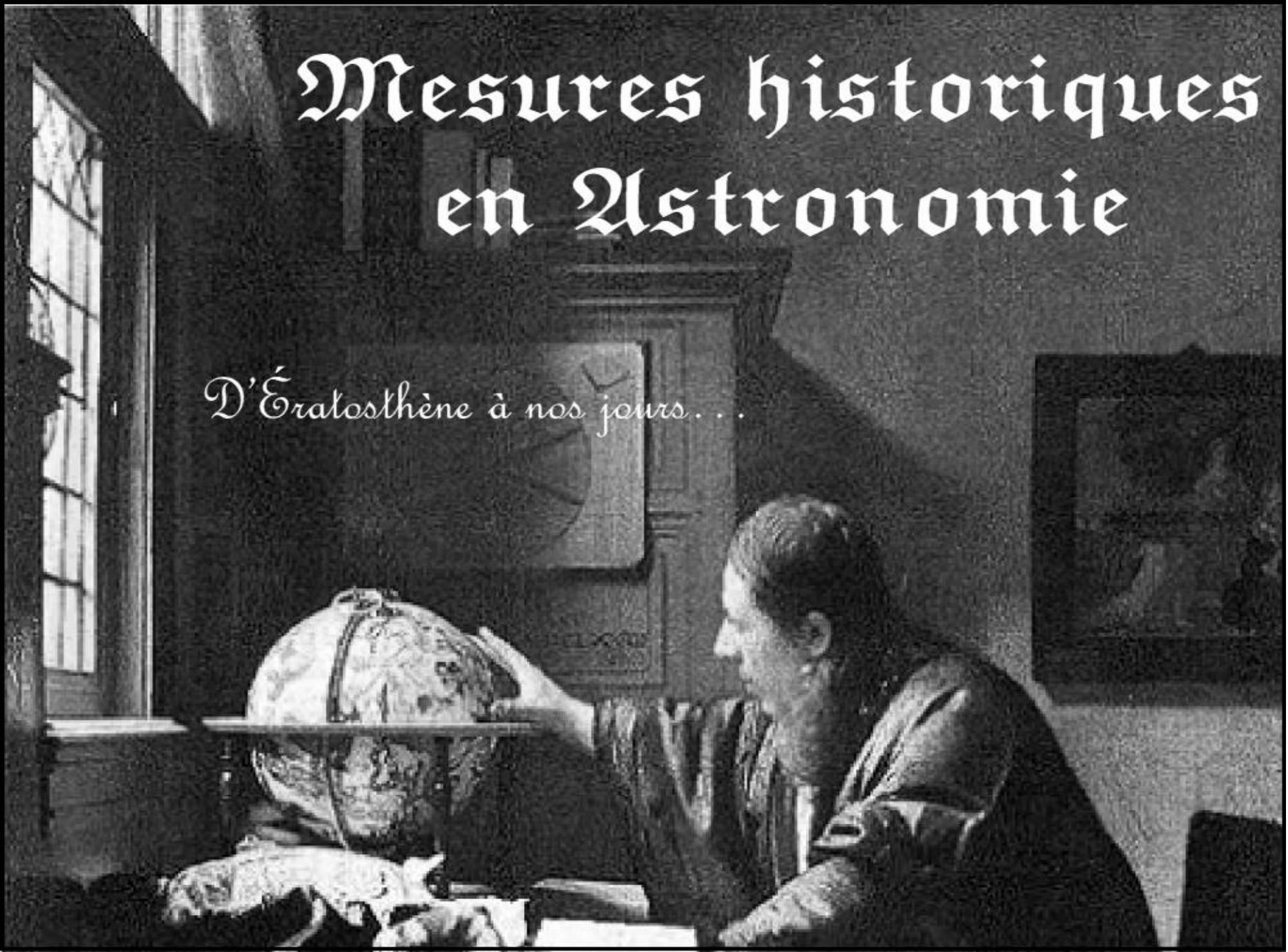


Mesures historiques en Astronomie

D'Ératosthène à nos jours...



Introduction

Comment nos ancêtres ont-ils calculé le rayon terrestre, celui de la Lune, la distance Terre – Lune, la distance Terre – Soleil, puis la distance de la Terre aux autres planètes du système solaire ?

Nous aborderons dans une progression logique les méthodes historiques utilisées pour connaître ces grandeurs, dont la mesure quantitative est cruciale dans l'élaboration d'une « vision du monde ».

Vision du monde \Leftrightarrow Expériences / mesures possibles

(Ex: gravitation universelle, pomme - Lune - étoiles binaires)

Comment procède-t-on de nos jours pour déterminer la masse d'un amas globulaire, les masses et les rayons d'étoiles particulières ?

Plan

- La Terre
 - Mesure du rayon terrestre
- La Lune
 - Mesure du rayon lunaire
- Système Terre-Lune
 - Mesure de la distance Terre-Lune
- Système Terre-Lune-Soleil
 - Mesure de la distance Terre-Soleil
- Les autres planètes
 - Mesure de la masse du Soleil
 - Mesure de la distance des planètes au Soleil
- Les étoiles
 - Mesure des masses stellaires
 - Mesure des rayons stellaires
- Les amas d'étoiles
 - Mesure de la masse des amas globulaires

Antiquité :

Etoiles → « sphère des fixes »

Planètes → « astres errants » (πλανητειν)

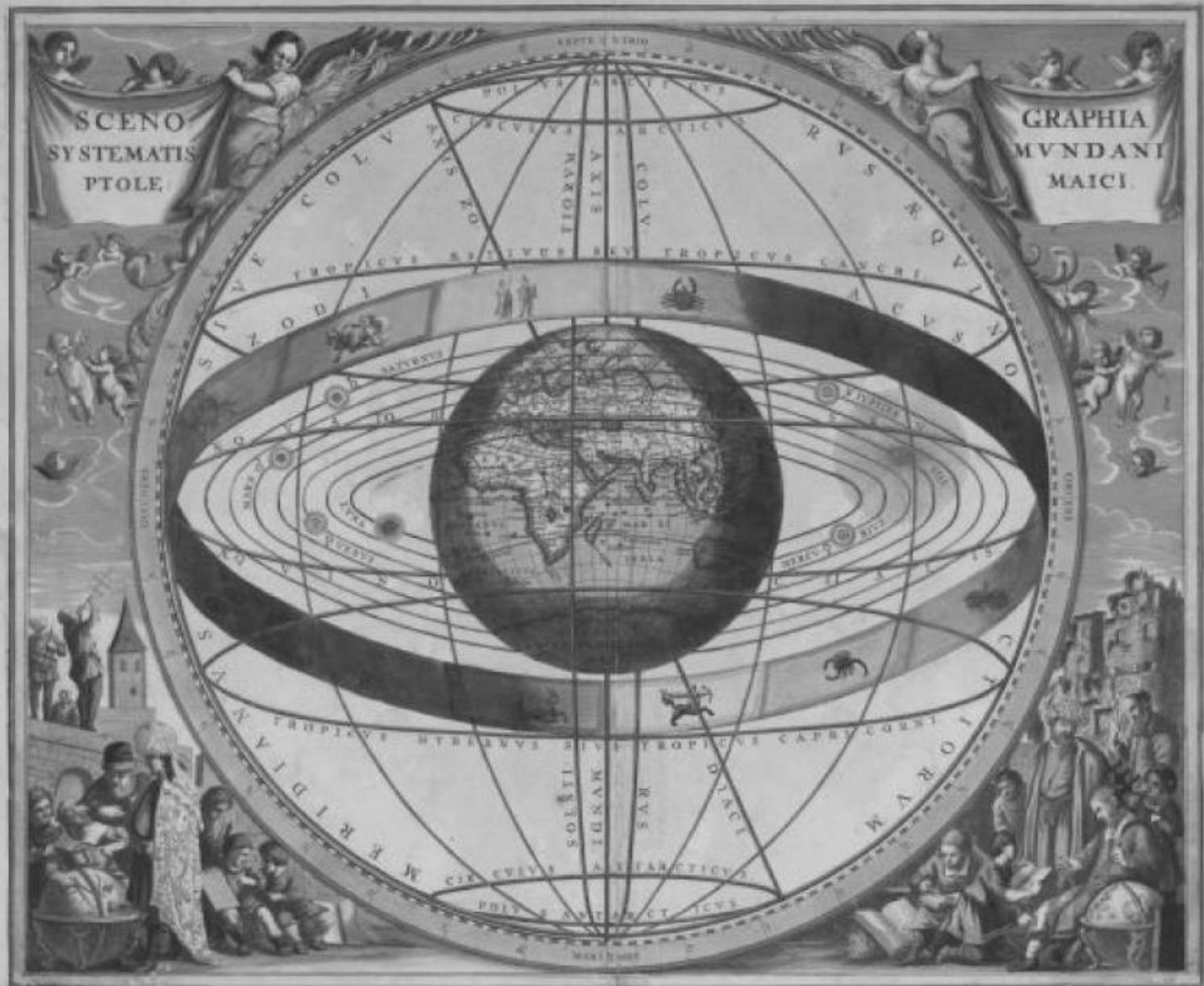
Il existe des théories **géocentriques** et **héliocentriques**, qui peuvent être considérées comme des tentatives d'expliquer l'univers, doublées d'une conception philosophique de ce monde.

C'est pourquoi, en l'absence « d'expériences cruciales » possibles, les deux peuvent cohabiter.

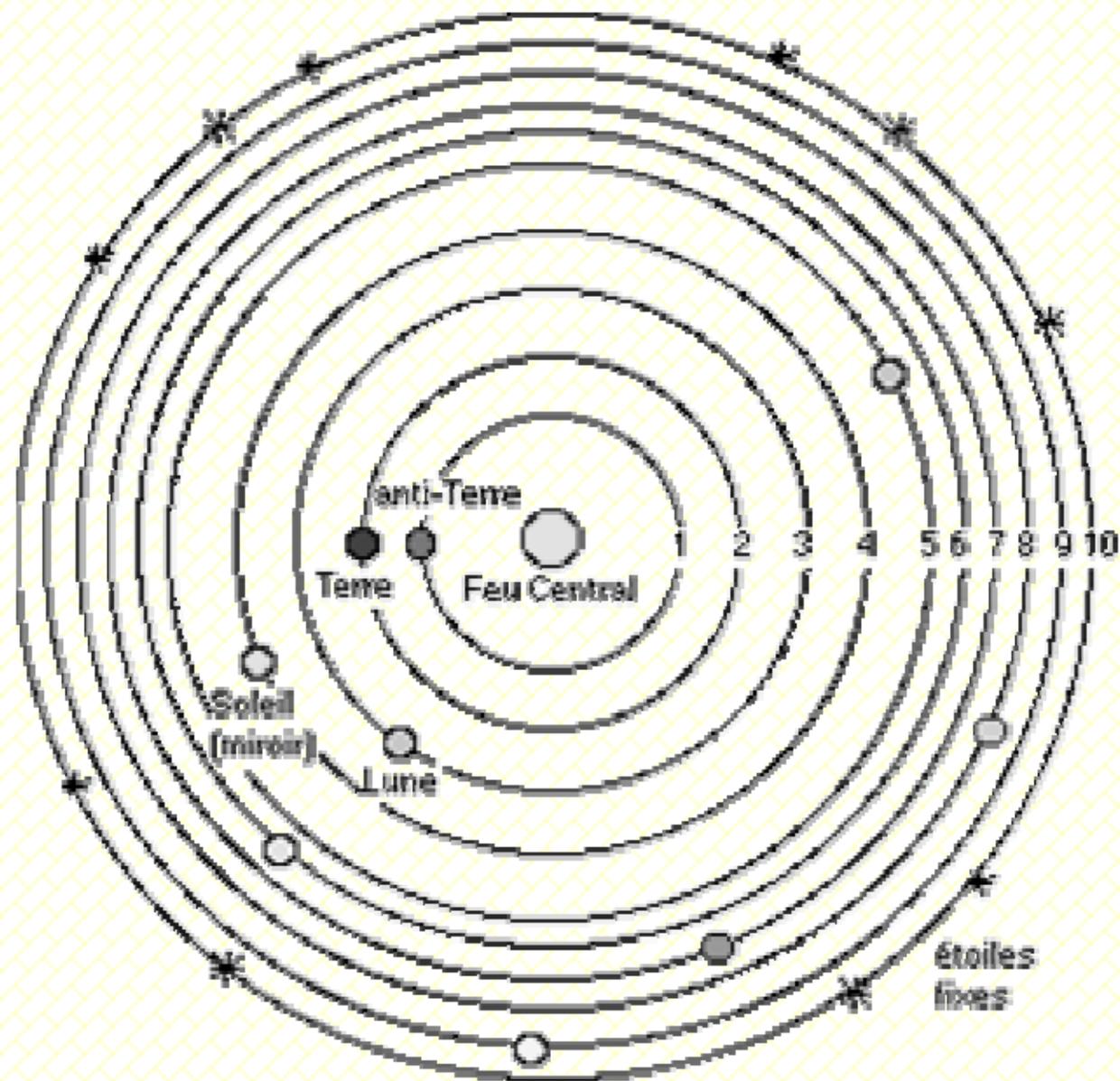
Géocentrisme → *Pythagore, Platon, Aristote, Ptolémée.*

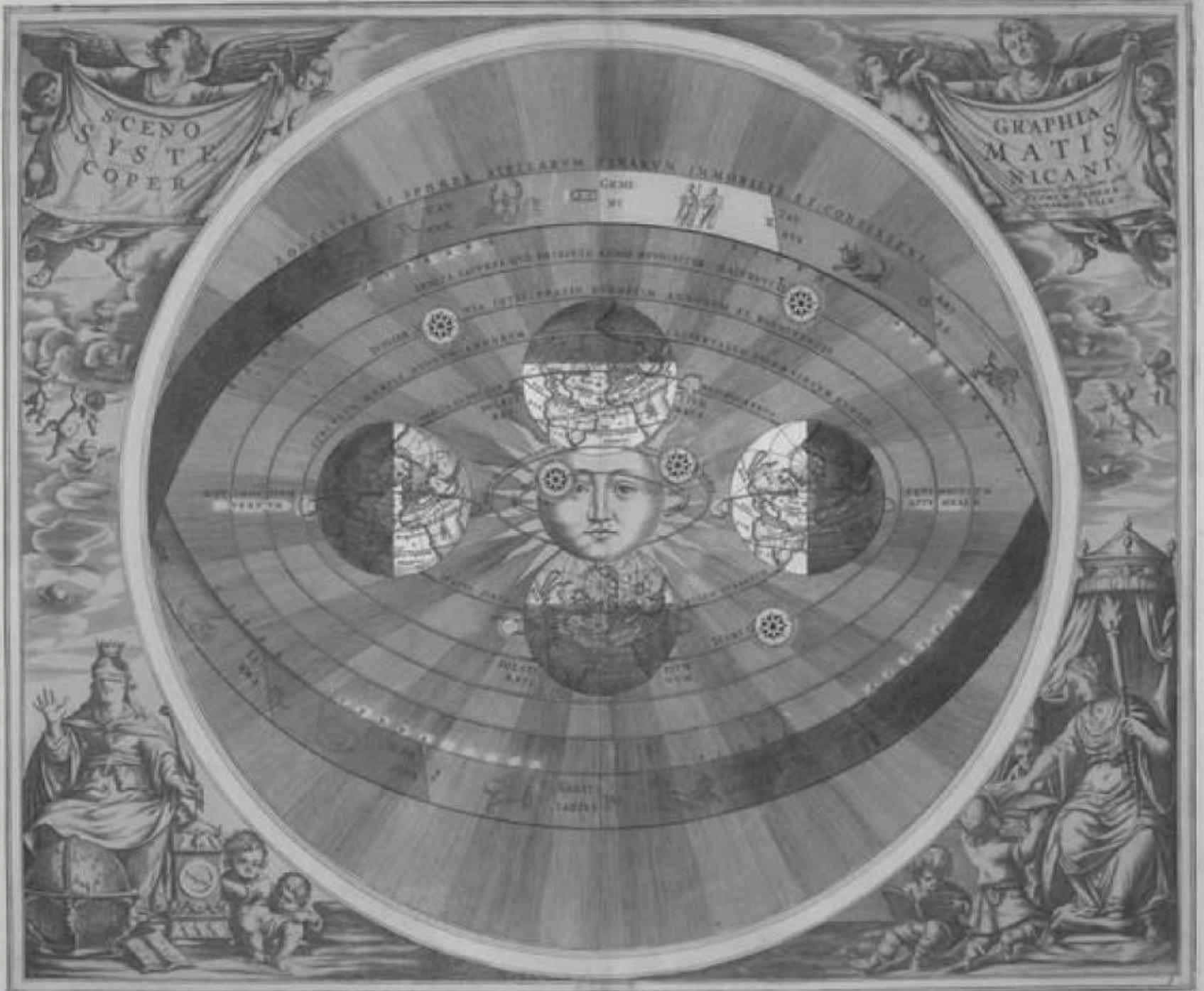
Héliocentrisme → *Philolaos, Aristarque*

Systeme de Ptolémée



Système de Philolaos

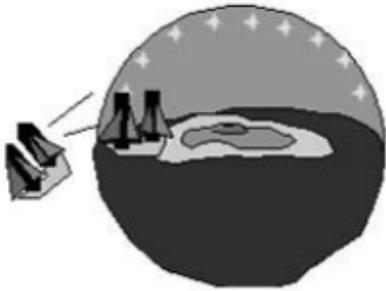




⊕ La Terre

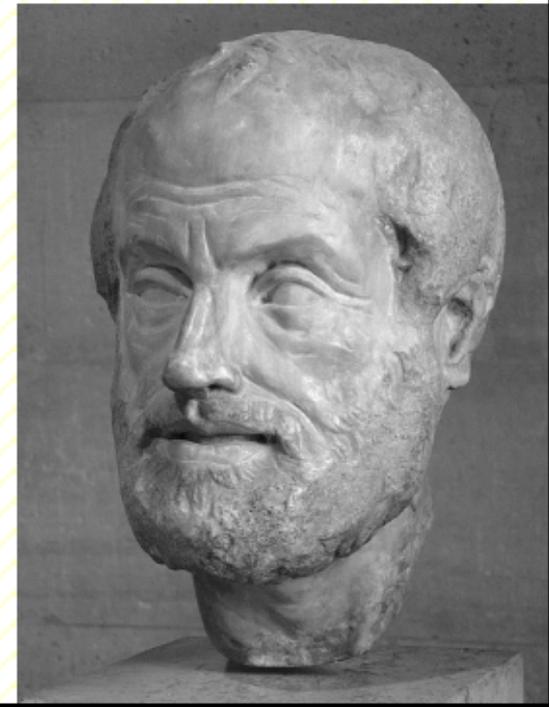
Thalès (-640, -562) →

la Terre est un disque plat au centre du monde,
elle flotte sur un grand océan.



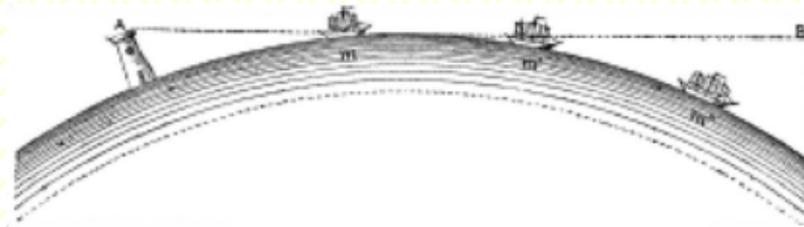
Aristote (-384, -322) →

la Terre doit avoir une forme parfaite :
la sphère.



Quelques observations antiques

- Lorsque l'on regarde au loin, l'horizon semble plat ; mais les bateaux disparaissent à l'horizon...



- Selon l'endroit où l'on se trouve sur Terre (latitude...), les étoiles sont à différentes hauteurs dans le ciel (! Mesure du temps !). +schéma
- Lors des éclipses de Lune, l'ombre de la Terre est un arc de cercle (!Interactions modèle – observations!)

Préliminaires (rappels)

L'angle entre la direction Terre-Soleil et le plan de l'Equateur est sa déclinaison. Elle est nulle au point vernal. Lorsque le Soleil a tourné d'un quart de tour, sa déclinaison devient maximale, c'est le Solstice d'été qui a lieu de 21 juin.

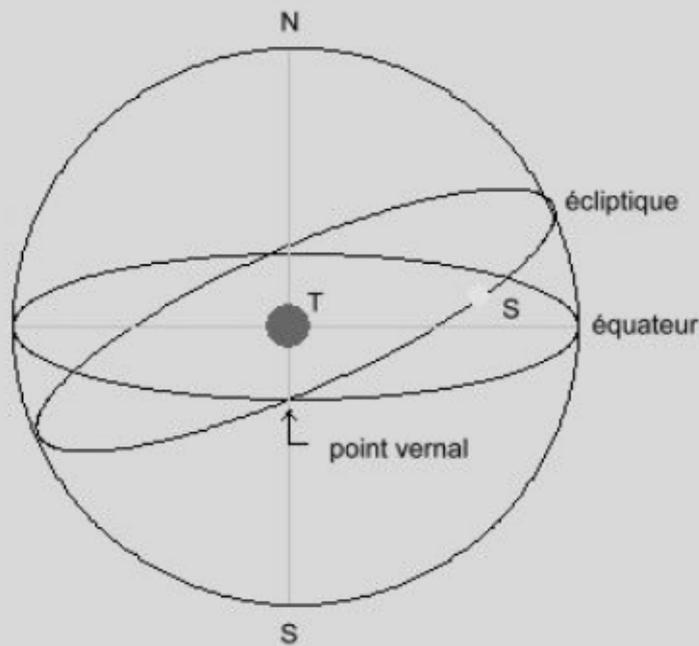


fig 1

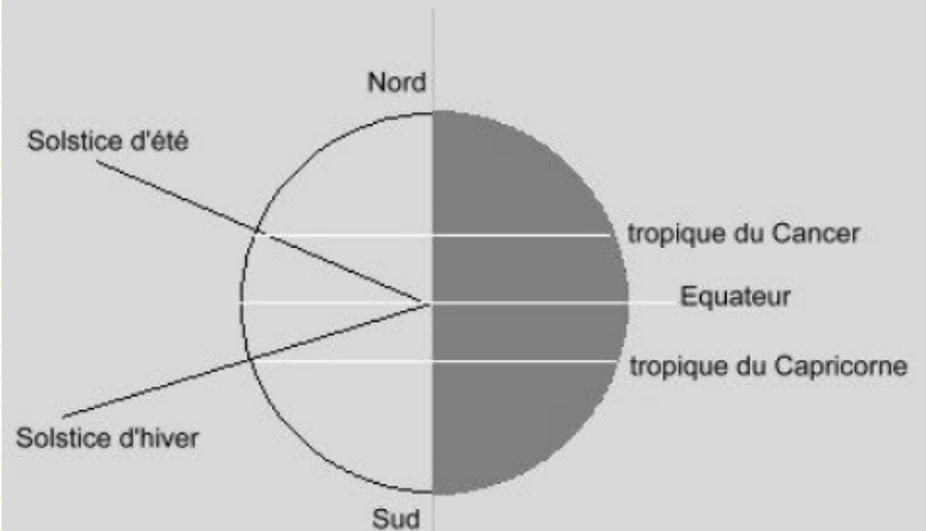
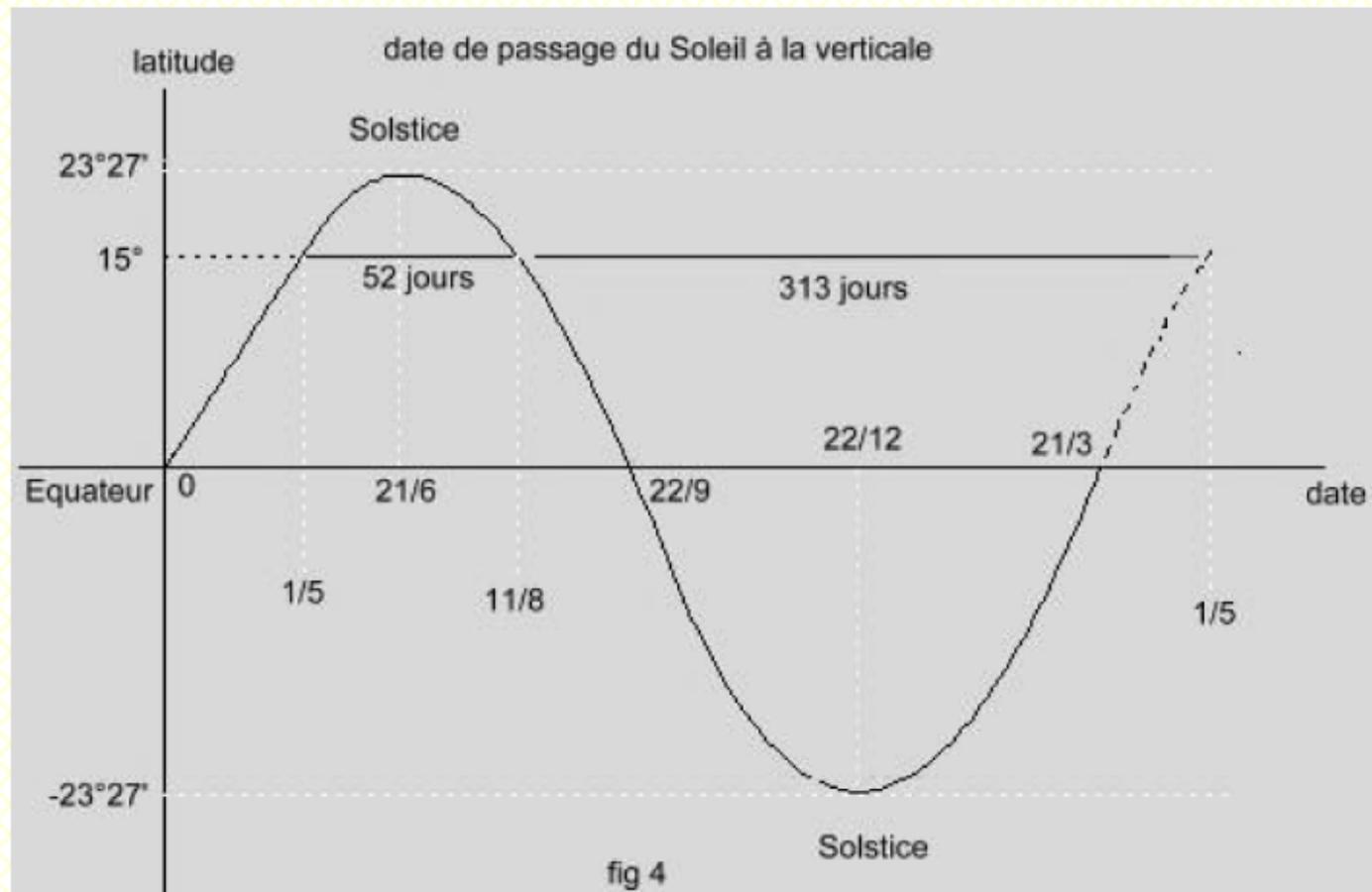


fig 2

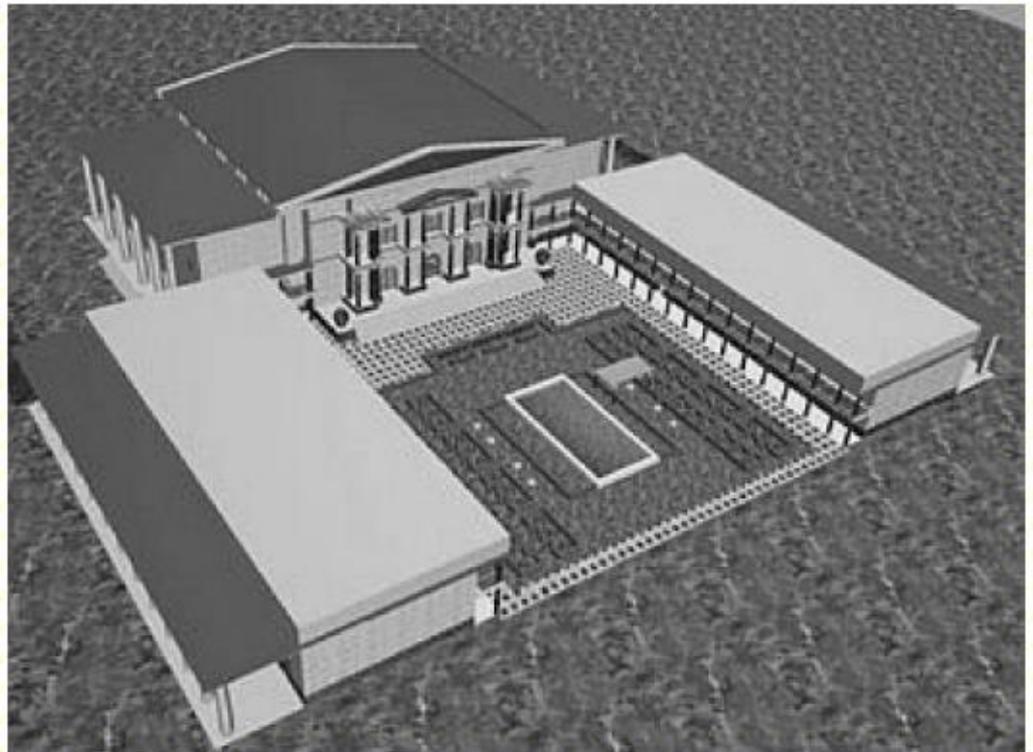
Le **Solstice d'été** est le seul jour de l'année où le Soleil passe à la verticale des lieux placés sur le Tropique du Cancer c'est à dire dont la latitude est de $23^{\circ}27'$. Entre les deux tropiques, le Soleil passe à la verticale deux fois par an. A l'Equateur le Soleil passe à la verticale une fois tous les 6 mois, (à l'équinoxe de printemps le 21 mars et à l'équinoxe d'automne le 22 septembre).

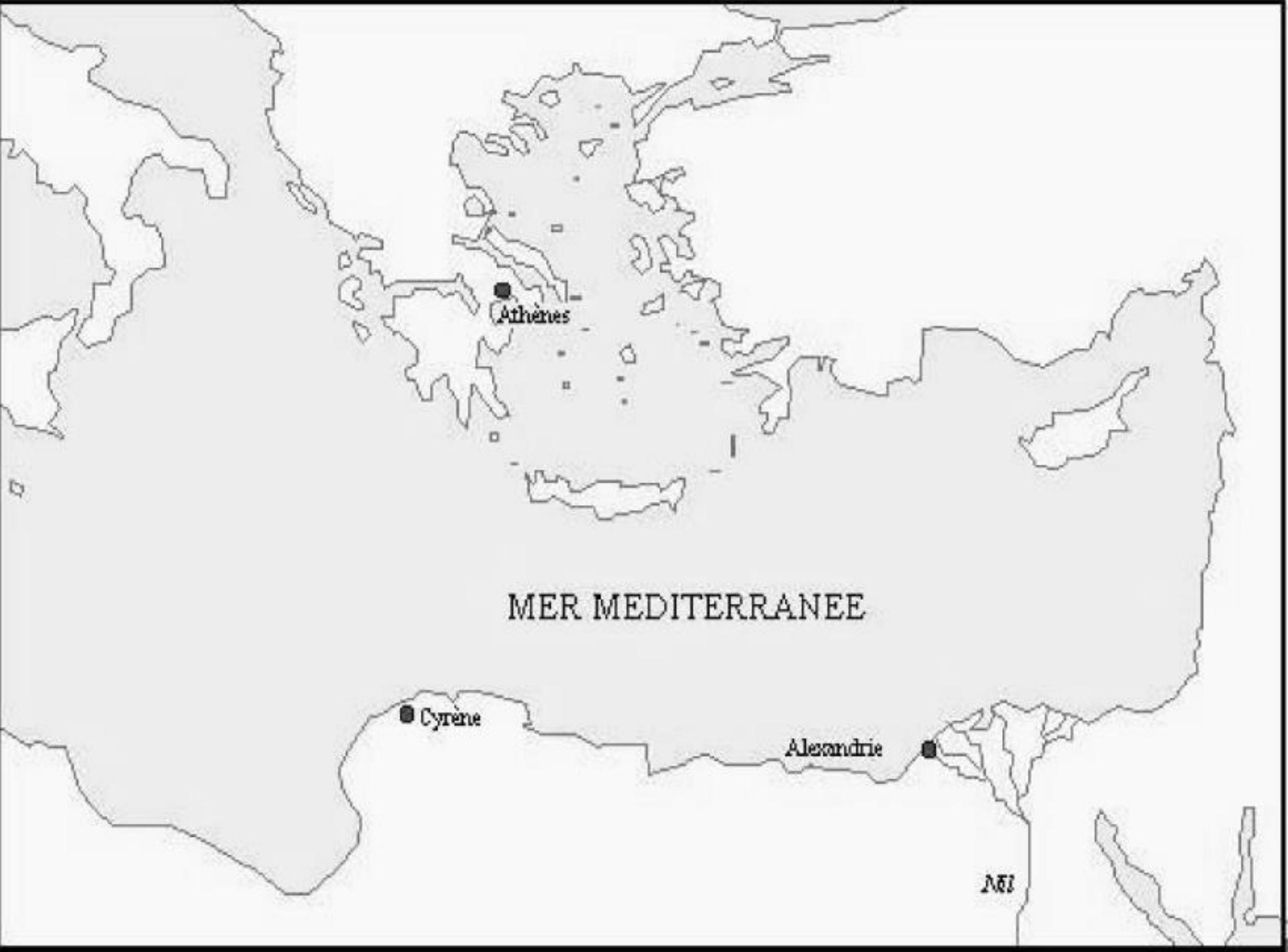


Mesure du rayon terrestre R_{\oplus}

Premier calcul du rayon terrestre : env. **350 av.JC.**

Par : **Ératosthène de Silène** (Cyrène 280 – Alexandrie 198 av. JC),
responsable de la bibliothèque d'Alexandrie





MER MEDITERRANEE

Athènes

Cyrene

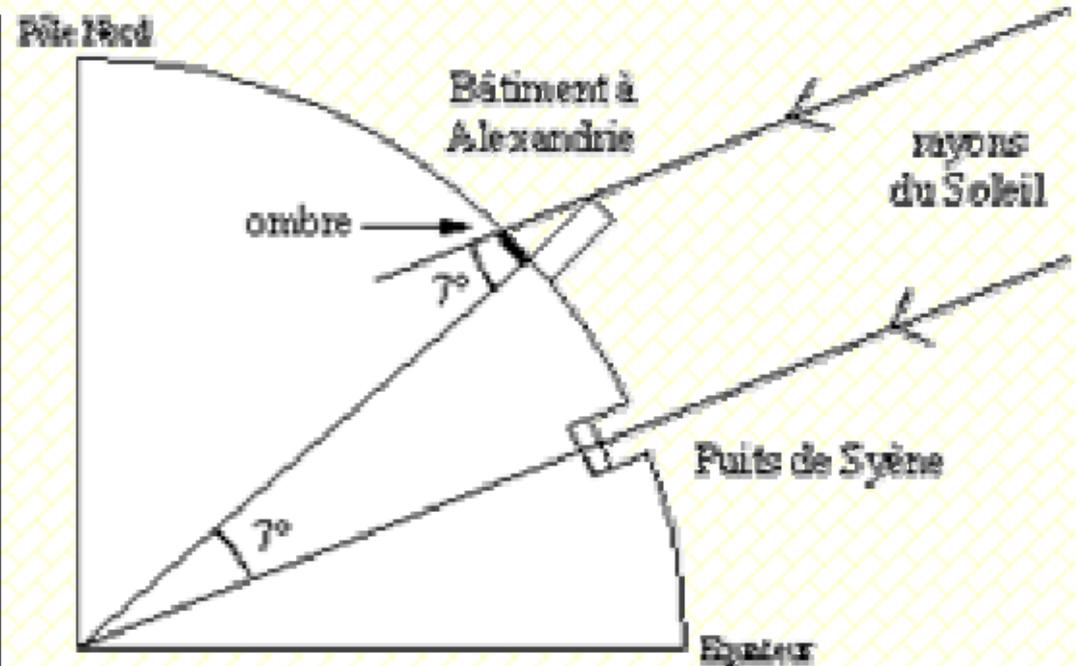
Alexandrie

NILE

1) Méthode / Observations

A midi, le jour du solstice d'été, dans deux villes de l'actuelle Égypte, Assouan (anciennement **Syène**) et **Alexandrie**, Ératosthène fait deux observations :

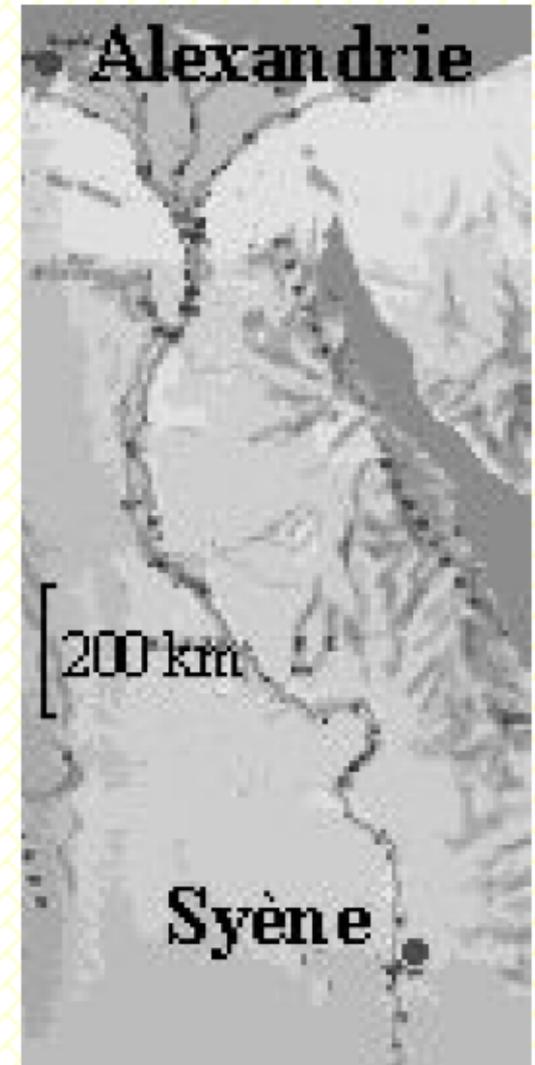
- A Assouan : le Soleil est au zénith, les rayons solaires atteignent le fond du puits le plus profond.
- A Alexandrie : un obélisque vertical a une ombre dont la mesure indique que le Soleil fait un angle de 7.2° par rapport à la verticale.



La distance entre Syène et Alexandrie était connue des Égyptiens, excellents arpenteurs : ils ont trouvé environ 5000 stades (1 stade ~ 157 m)

II) Hypothèses

- 1) Soleil situé à l'infini
- 2) Assouan et Alexandrie sont situées sur le même méridien
- 3) La Terre est sphérique (!).



III) Calcul

$$7.2^\circ \rightarrow d = 5000 \text{ stades}$$

$$360^\circ \rightarrow \text{Périmètre} = 2\pi R_\oplus = x \text{ stades}$$

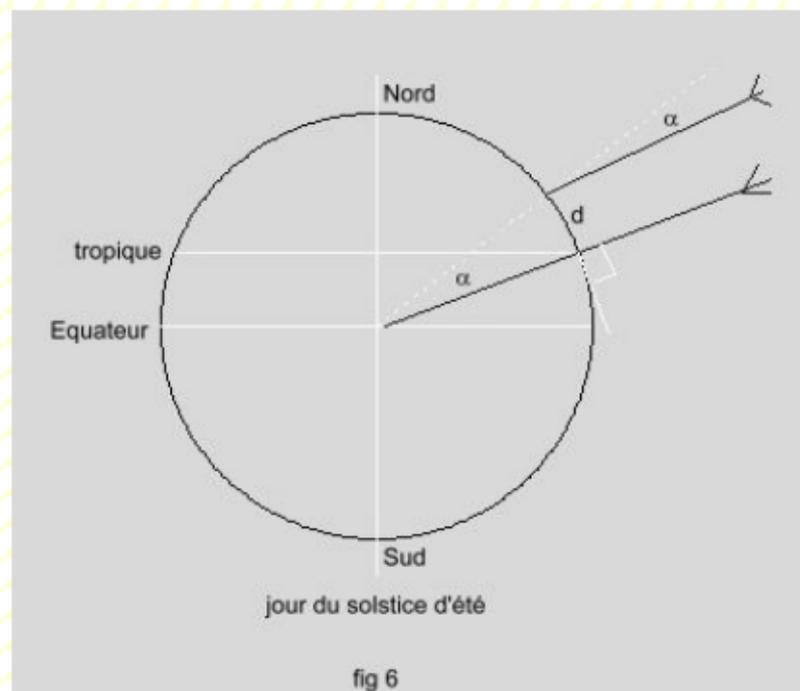
$$\Rightarrow \text{Périmètre} = 250'000 \text{ stades} = 39'250 \text{ km}$$

$$\Rightarrow R_\oplus = \frac{39'250 \text{ km}}{2\pi} = 6247 \text{ km}$$

Méthodes modernes

$$R_\oplus = 6378 \text{ km}$$

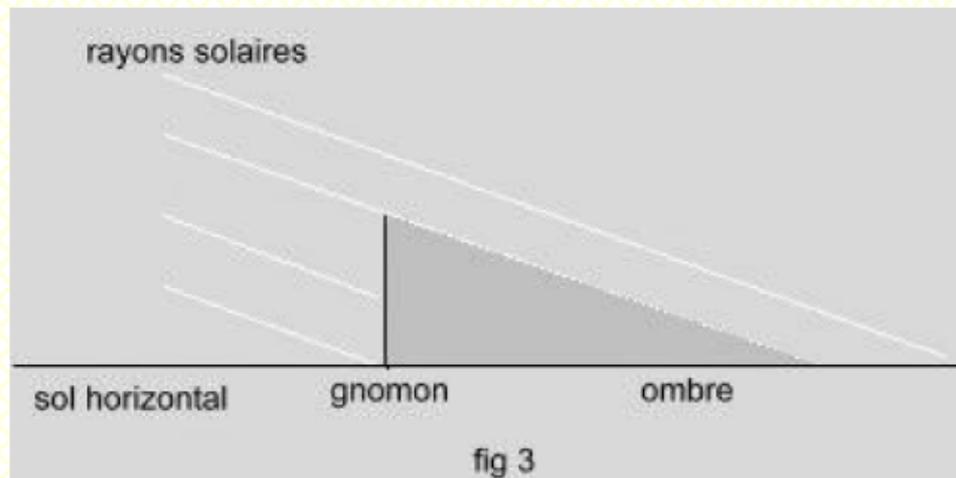
Erreur relative: seulement 2% !!!



Alexandrie est à 3 degrés à l'Ouest d'Assouan ; la Terre tourne de 15 degrés par heure, cela signifie que la Soleil passe au méridien d'Alexandrie 12 minutes après son passage au méridien d'Assouan, mais l'erreur qui en découle est négligeable.

IV) Discussion des mesures

Pour déterminer la date du solstice d'été à l'époque d' Eratosthène les Egyptiens observaient la longueur de l'ombre d'un gnomon, tous les jours au moment où le Soleil est le plus haut dans le ciel.



On a beaucoup discuté sur la nature de l'objet servant aux mesures (pyramides, obélisques, piquets etc...) Les gnomons étaient de véritables instruments de mesure de dimensions réduites (quelques décimètres) et surtout gradués. Parfois munis d'un fil à plomb pour bien repérer la verticale du lieu. On peut voir un tel instrument au musée du Louvre à Paris,(antiquités égyptiennes).

On a beaucoup spéculé pour savoir comment Eratosthène avait fait pour mesurer la **distance entre Alexandrie et Syène**.

→compteurs de pas ?

→ cadastre des bords du Nil?

→caravaniers (distance moyenne parcourue en une journée)?

En réalité on ne sait pas comment il opérerait car les textes écrits de sa main n'existent plus.



La Lune

Premiers modèles

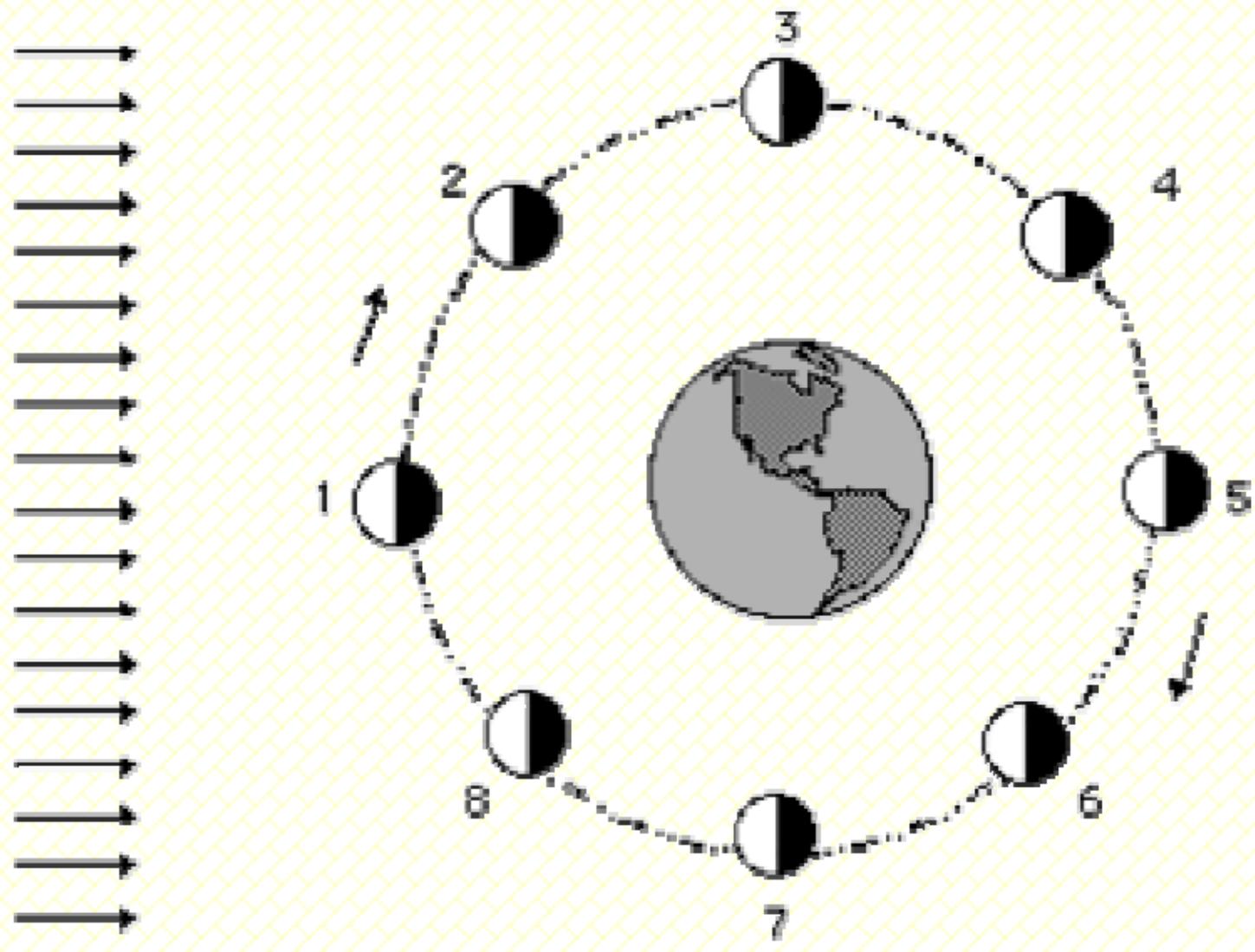
Depuis l'Antiquité, on a toujours pensé que la Lune tournait autour de la Terre.

Observation des phases de la Lune

On pense que la Lune est un astre « éteint », elle ne produit aucune lumière et ne fait que réfléchir celle du Soleil

La Lune est sphérique (un disque plat tournant autour de la Terre ne donnerait pas de telles observations en (3) et en (7)).

Le Soleil se trouve très loin du système Terre-Lune (sinon on ne ferait pas de telles observations en (2),(3) et (7),(8)).

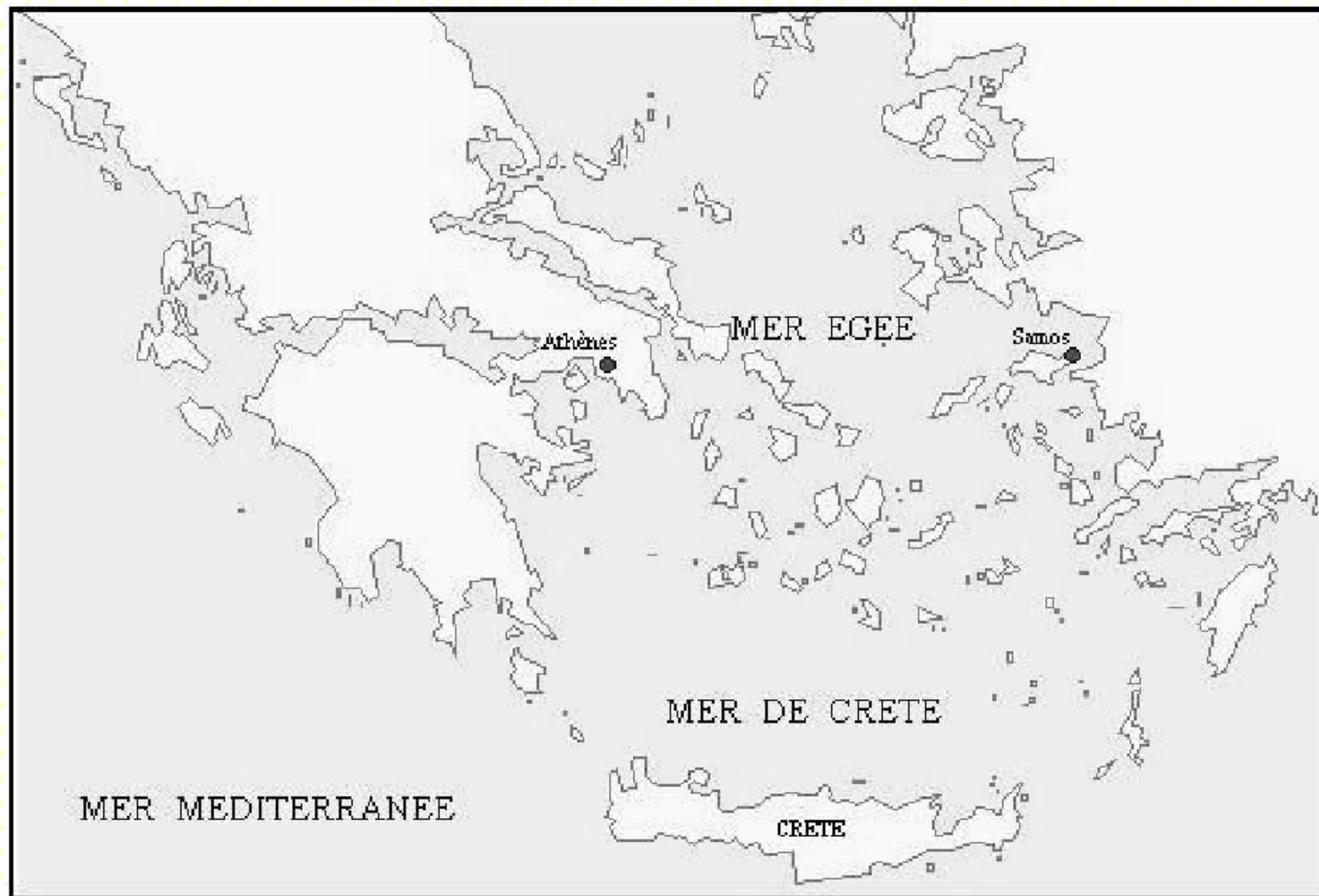


Mesure du rayon de la Lune

Aristarque de Samos (-310, -230)

Il a émis l'hypothèse que la Terre tourne sur elle-même et autour du Soleil. Il a aussi déterminé la distance Terre-Lune, et, avec une grosse imprécision, la distance Terre-Soleil

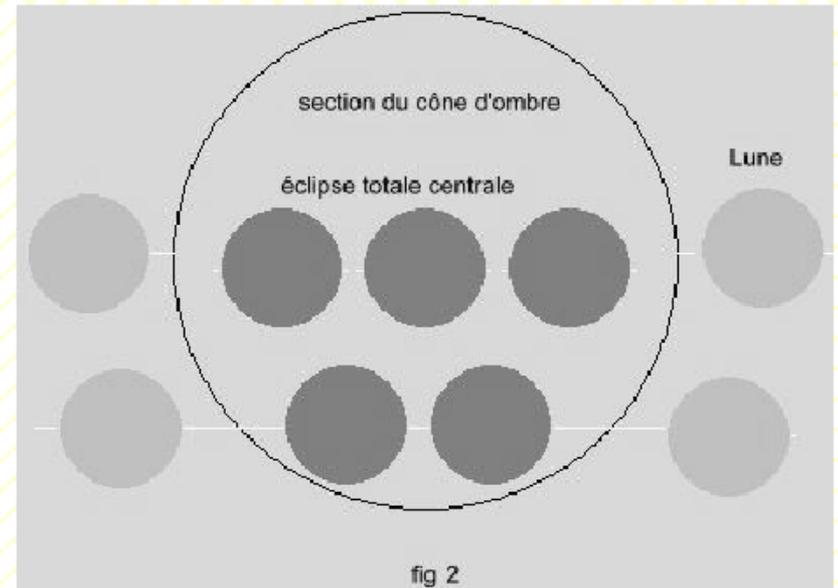
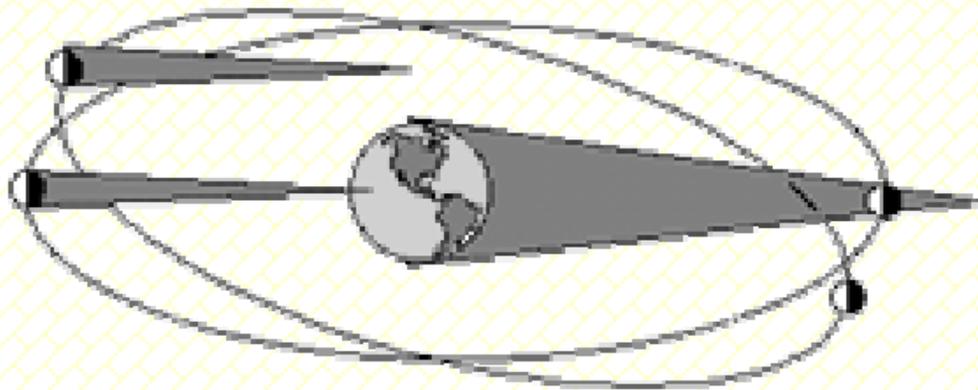




I) Méthode / Observations

La plus longue éclipse de Lune jamais observée a duré 2 heures

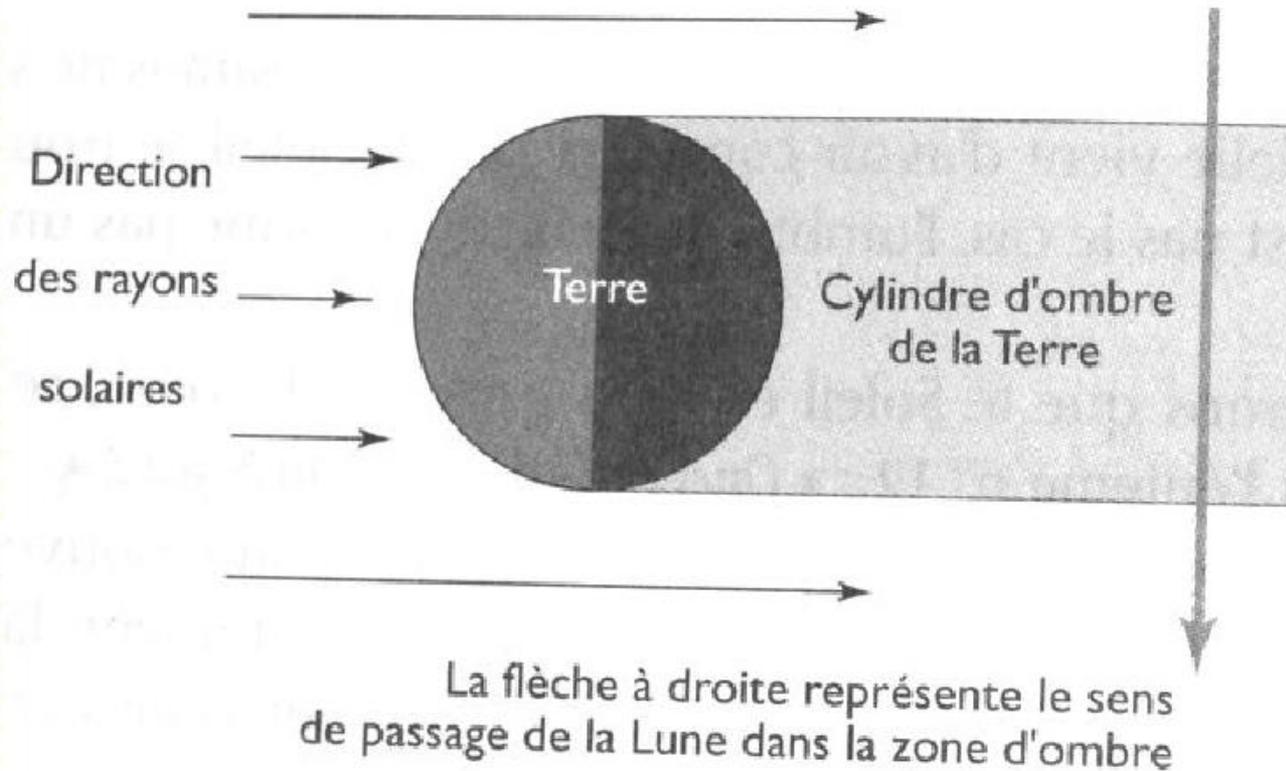
La Lune bouge par rapport aux étoiles : elle avance chaque heure d'une distance équivalente à son diamètre apparent par rapport à la « sphère des fixes ».



→ Utiliser l'éclipse de Lune pour calculer le rapport entre le diamètre de la Lune et celui de la Terre

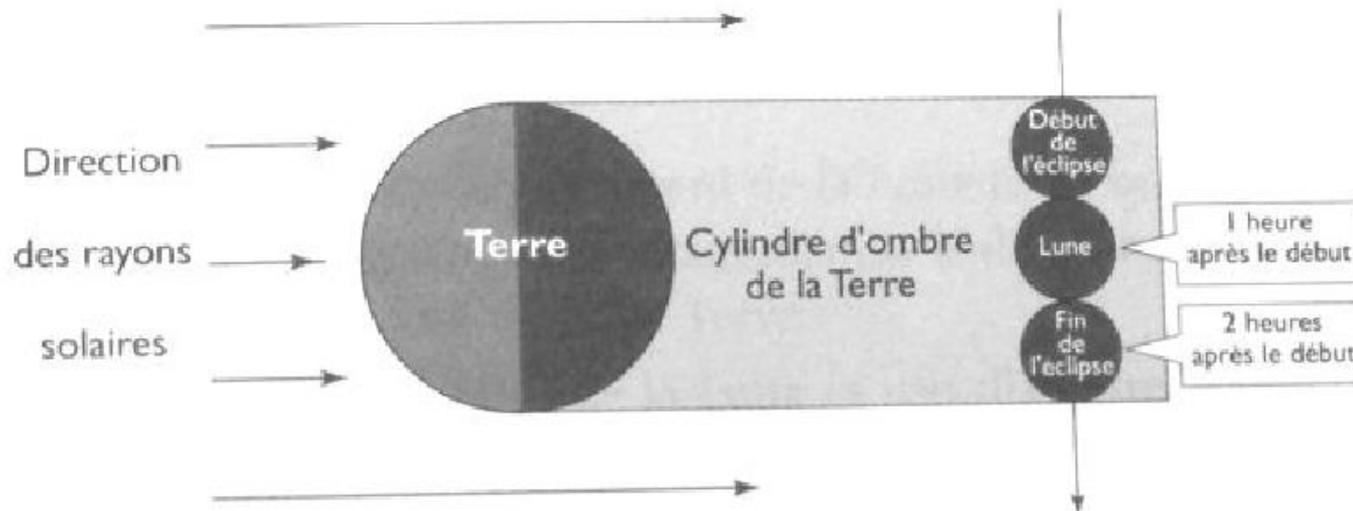
II) Hypothèses

Le Soleil se trouve très loin du système Terre-Lune; donc l'ombre de la Terre est un cylindre.



III) Calcul

L'éclipse de Lune permet de déterminer le rapport entre le diamètre de la Terre et celui de la Lune.



A partir de ces données, on peut déterminer la distance Terre-Lune.

On voit que :

$$D_{\oplus} = 3D_{Lune}$$

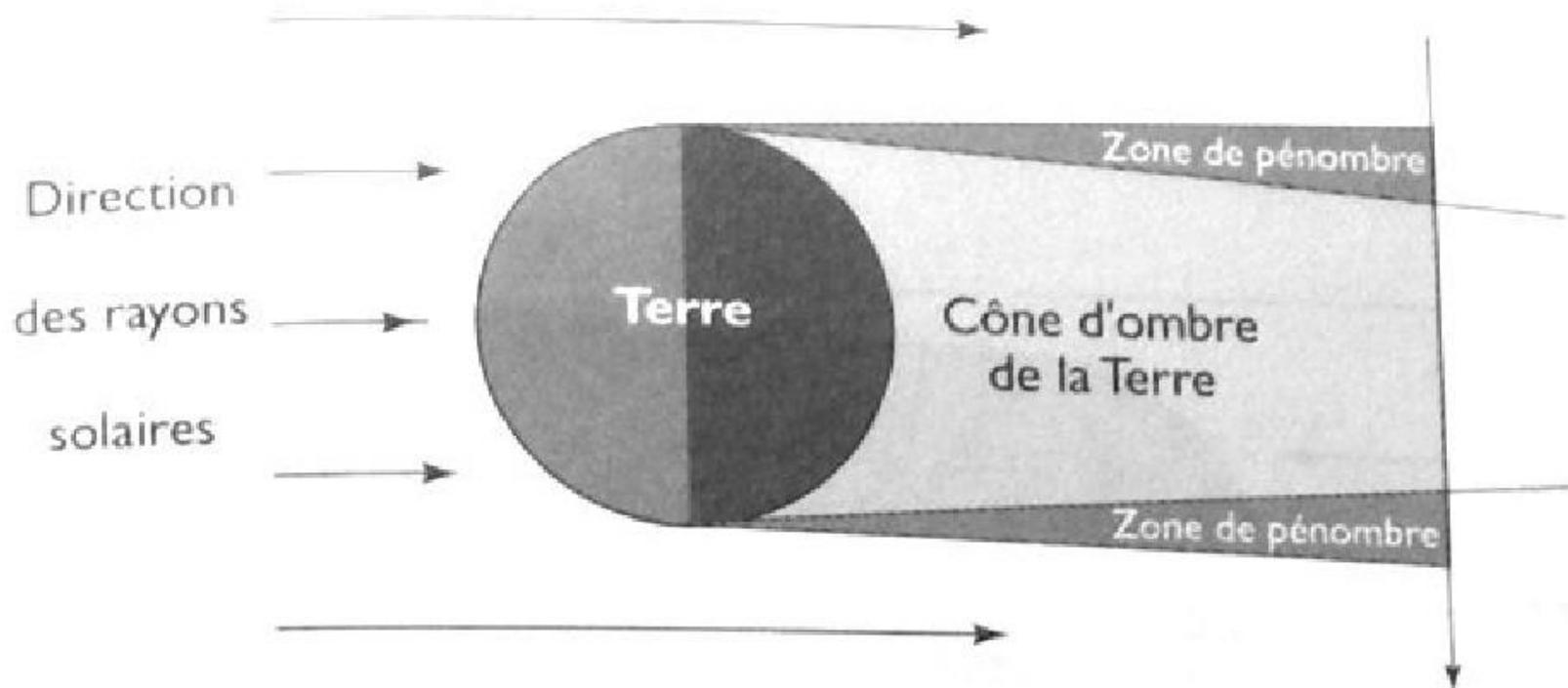
Avec le rayon terrestre de l'expérience d'Ératosthène, on trouve :

$$D_{Lune} = 1/3 \cdot D_{\oplus} = (2 \cdot 6250km) / 3 = \boxed{4166km}$$

IV) Discussion des mesures

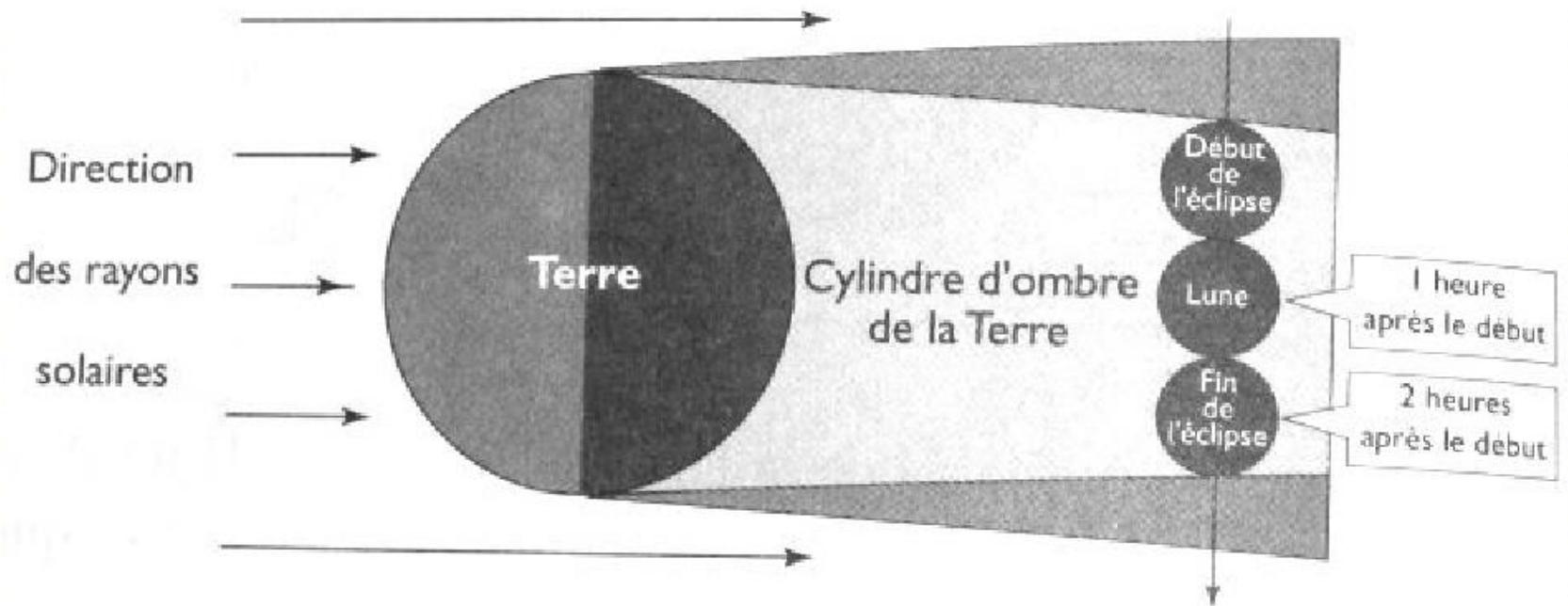
La plus importante source d'imprécision de cette méthode vient d'avoir considéré le Soleil comme se trouvant à une distance infinie du système Terre-Lune.

Si ce n'est pas le cas, l'ombre de la Terre n'est plus un cylindre mais un cône.



La Lune est donc plus... petite ;-)

$$D_{\oplus} > 3D_{Lune}$$



Mesure moderne : $D_{Lune} = 3476km$

Terre - Lune

Détermination de la distance Terre - Lune

I) Méthode / Observations

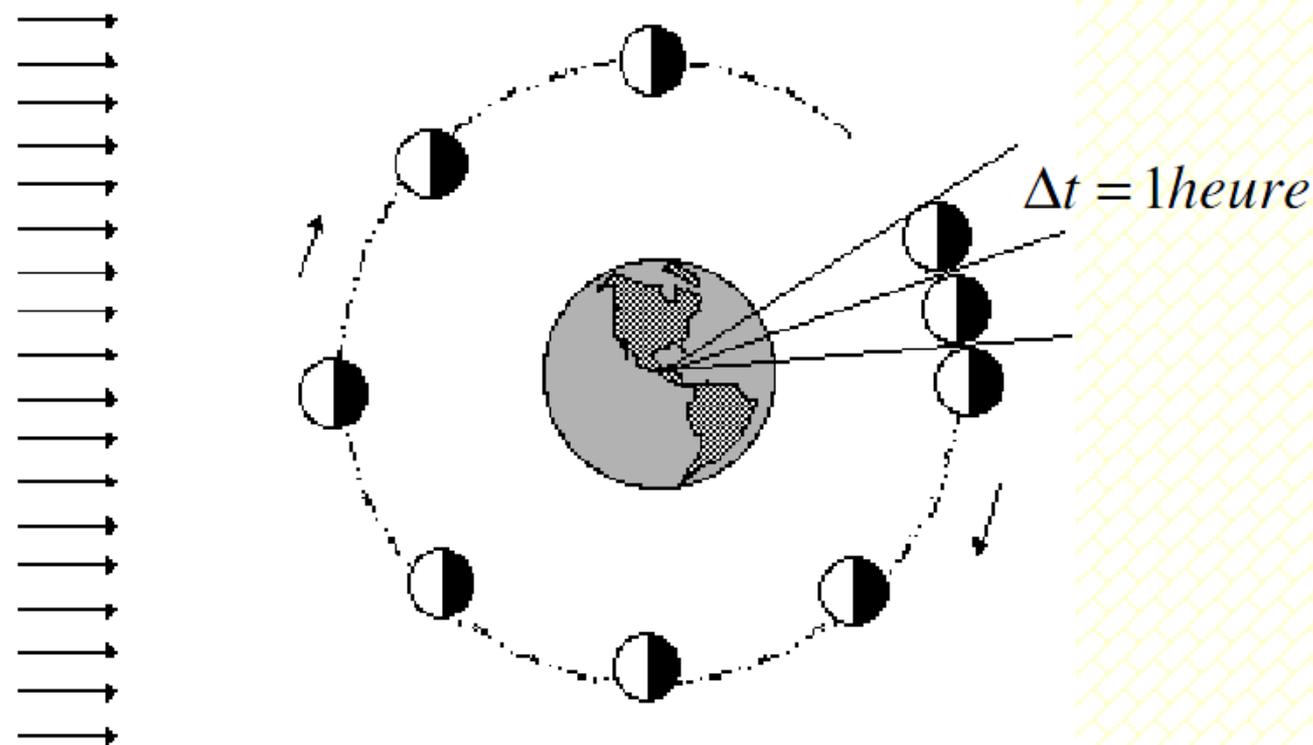
- (Rappel) La Lune avance chaque heure d'une distance équivalente à son diamètre apparent par rapport à la « sphère des fixes ».
- Une lunaison (révolution de la Lune autour de la Terre) dure environ 29 jours. (! Comment réaliser cette mesure ? Problème de la mesure du temps (cadrans solaires, clepsydres) !)

→ Utiliser ces observations pour déduire, par « règle de trois », le rayon de l'orbite lunaire.

II) Hypothèses

La Lune tourne autour de la Terre sur une orbite circulaire.

Sa vitesse est constante sur cette orbite.



III) Calcul

A partir de ces données, on peut déterminer la distance Terre-Lune :

$$\frac{D_{Lune}}{1h} = \frac{2\pi \cdot d_{\oplus Lune}}{29j}$$

Avec le rayon lunaire de la méthode d'Aristarque, on trouve :

$$d_{\oplus Lune} \frac{D_{Lune} \cdot 29j \cdot 24h}{2\pi} \approx \boxed{461'475km}$$

Mesure moderne : $d_{\oplus Lune} = 384'400km$

Entre parenthèses : une autre méthode !

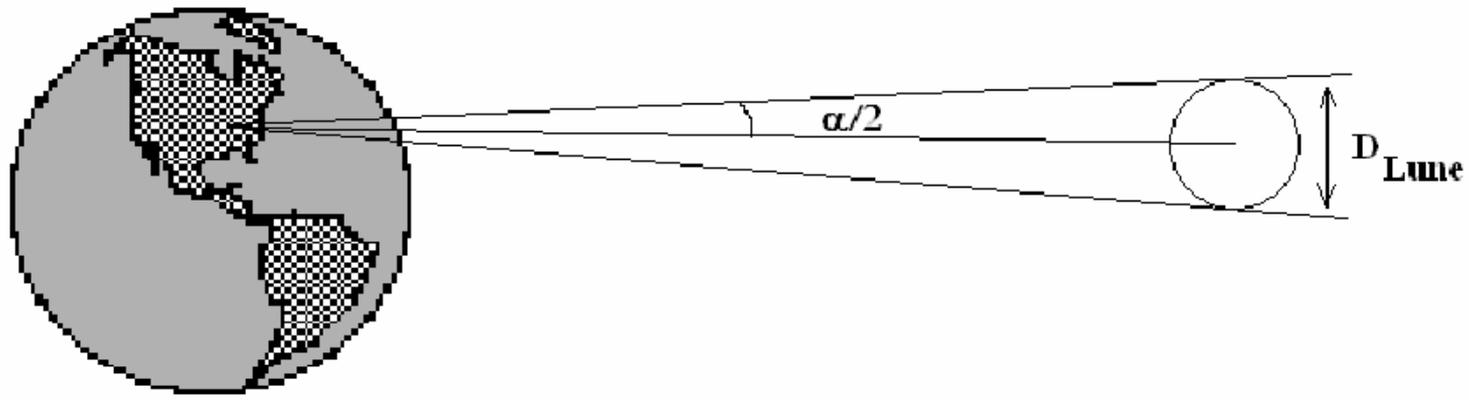
- Mesure du diamètre apparent de la Lune

La Lune parcourt $\frac{360^\circ}{29} = 12.4^\circ$ en 1 jour = 24 heures

Or elle parcourt un diamètre apparent en 1 heure, donc :

$$D_{Lune} = \frac{12.4^\circ}{24} = 0.517^\circ = 31'$$

- Mesure de la distance Terre-Lune



$$tg(\alpha/2) = \frac{R_{Lune}}{d_{\oplus Lune}} \Rightarrow d_{\oplus Lune} = \frac{R_{Lune}}{tg(\alpha/2)} \stackrel{\text{Aristarque}}{\simeq} \boxed{461'863km}$$

