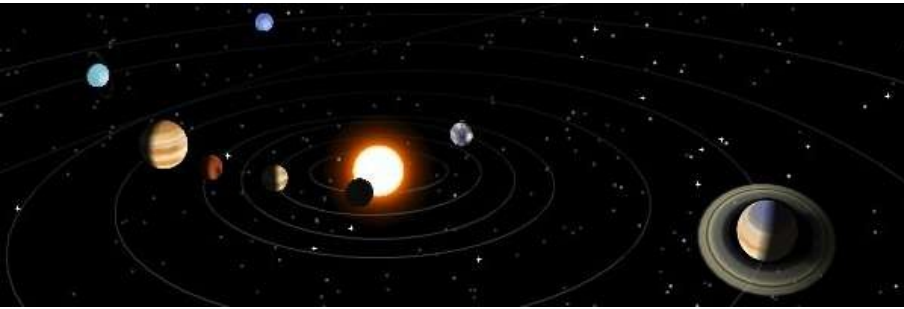


Unité d'ouverture

Evolution des idées sur l'Univers

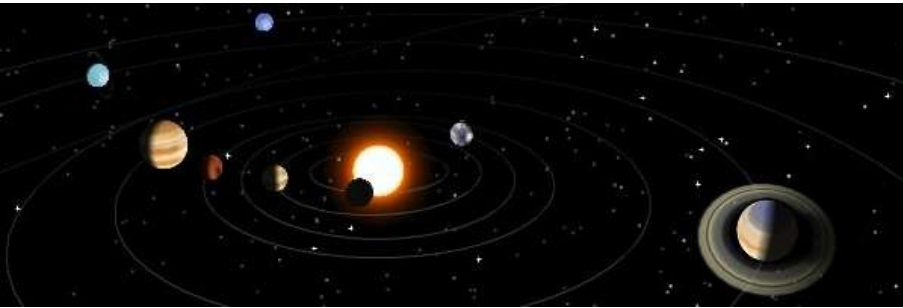
GillesTheureau
LPC2E, CNRS, Orléans

L'Univers : la vue contemporaine



Un système planétaire ...

L'Univers : la vue contemporaine

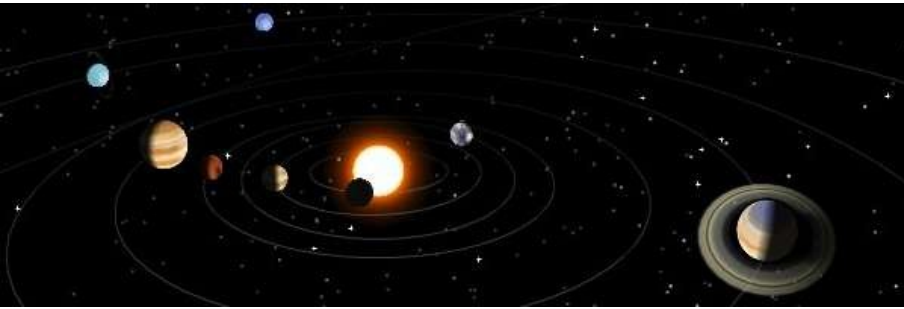


Un système planétaire ...



... à la périphérie
d'une galaxie ...

L'Univers : la vue contemporaine

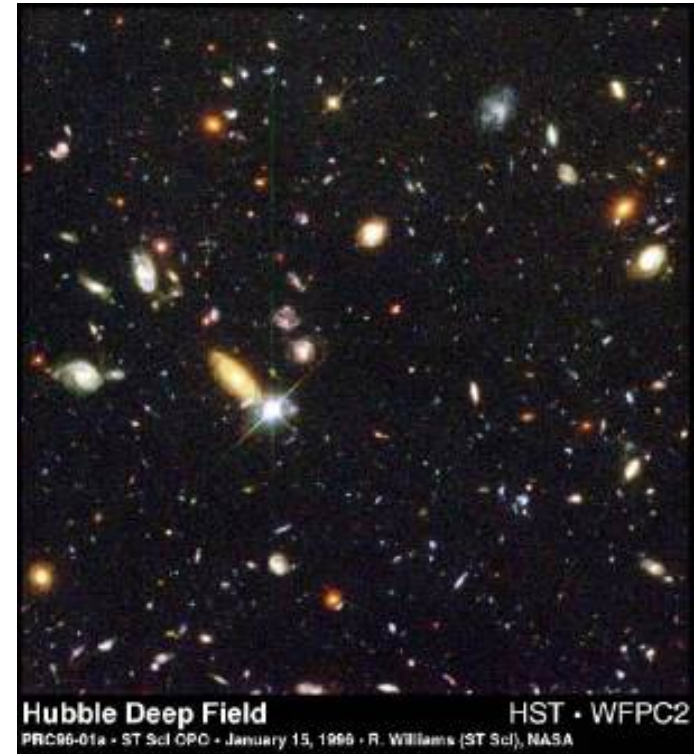


Un système planétaire ...



... à la périphérie
d'une galaxie ...

**Comment sommes-nous
arrivés à cette vue-là ?**



... dans un ensemble de
milliards de galaxies.

Plan du cours

- **20/1** Le ciel de l'antiquité grecque et le modèle géocentrique : mesures et observations
- **27/1 pas de cours**
- **3/2** Les Systèmes du Monde, la Voie Lactée: de la mythologie aux premières spéculations philosophiques
- **10/2** Les problèmes du système géocentrique et l'avènement d'une nouvelle conception héliocentrique de l'Univers
- **17/2** Pourquoi les planètes se meuvent-elles? Développement des idées sur la gravitation
- **2/3** La naissance de l'Astrophysique
- **9/3** La Voie Lactée comme strate d'étoiles. Structures et modèles
- **16/3** La nature des nébuleuses et les théories cosmogoniques
- **23/3** La nature du Soleil et des Etoiles, Extinction interstellaire, rotation Galactique et échelle de distances : vers la synthèse finale
- **30/3 pas de cours**



<http://ipc2e.cnrs-orleans.fr/~theureau/histoire.html>

theureau@cnrs-orleans.fr

Chapitre 1

Le ciel de l'antiquité grecque et le modèle géocentrique, mesures et observations.

Un peu d'astronomie à l'œil nu

Que voyons-nous dans le ciel ?

Que voyons nous dans le ciel ?



- Cliché ciel entier, pose longue
- Étoiles
- Voie lactée (galaxie)
- Aucune notion de la distance des objets: apparence d'une « sphère céleste »

Constellations

Contours :

Mésopotamie
(-4000)

Noms et mythes
associés :

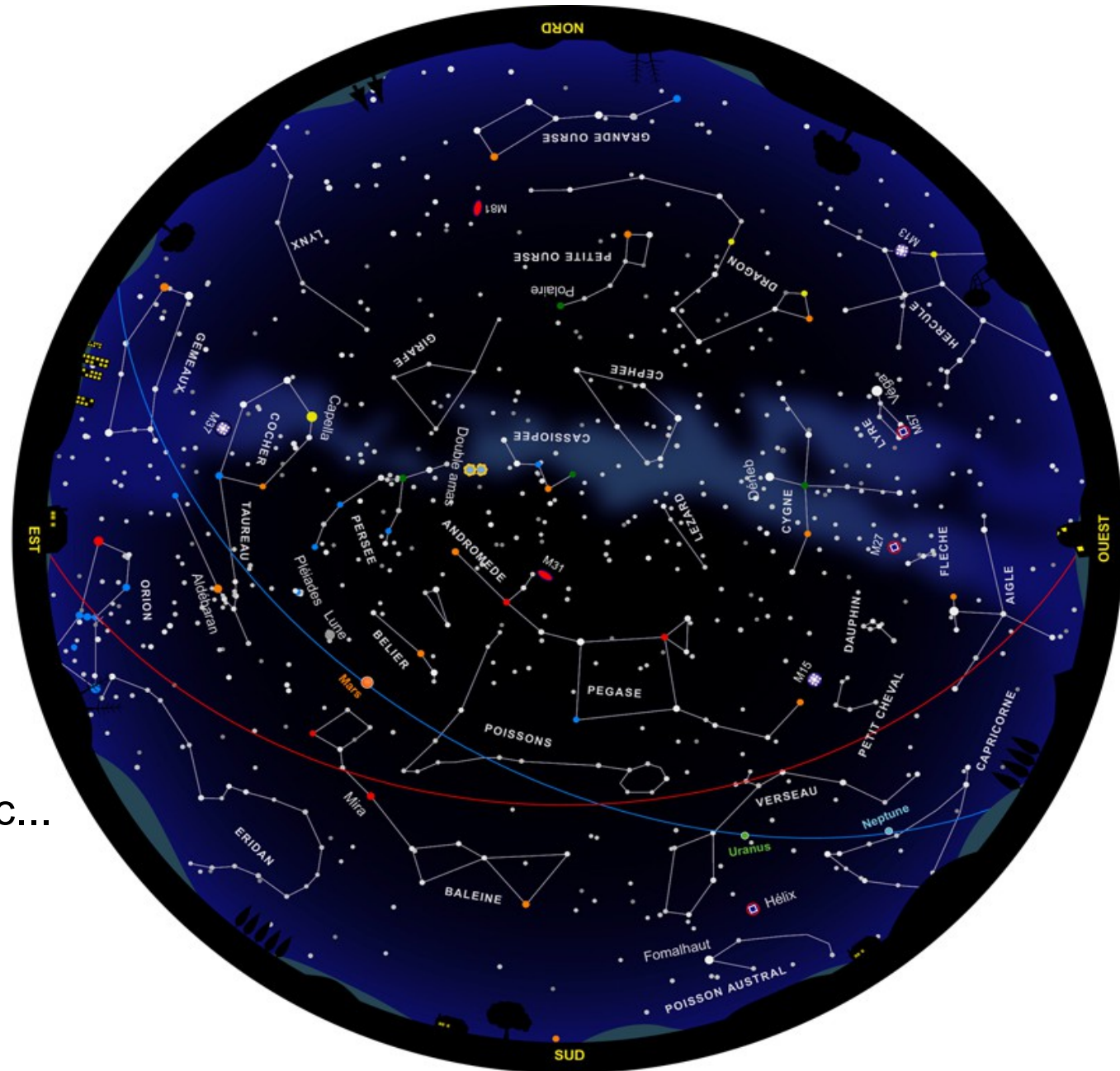
Grèce VI-V av JC
(cf Ératostène
III av JC)

Ciel Austral :

Réticule, télescope,
boussole, compas etc...
(occidentaux > XVe)

UAI 1930 :

88 constellations



Mouvement diurne du ciel

- Avec une caméra fixe (pose de quelques heures), on voit / croit voir la rotation des étoiles autour du pôle céleste (« étoile polaire »).
- Les étoiles apparaissent fixées sur la sphère céleste (« étoiles fixes »).
- Qui tourne : nous (la Terre) ou le ciel ? → vues héliocentrique et géocentrique.



Se repérer dans le ciel

Vues du ciel à γ 14 heures d'intervalle.
Repérage à partir des constellations.



étoile polaire

coucher

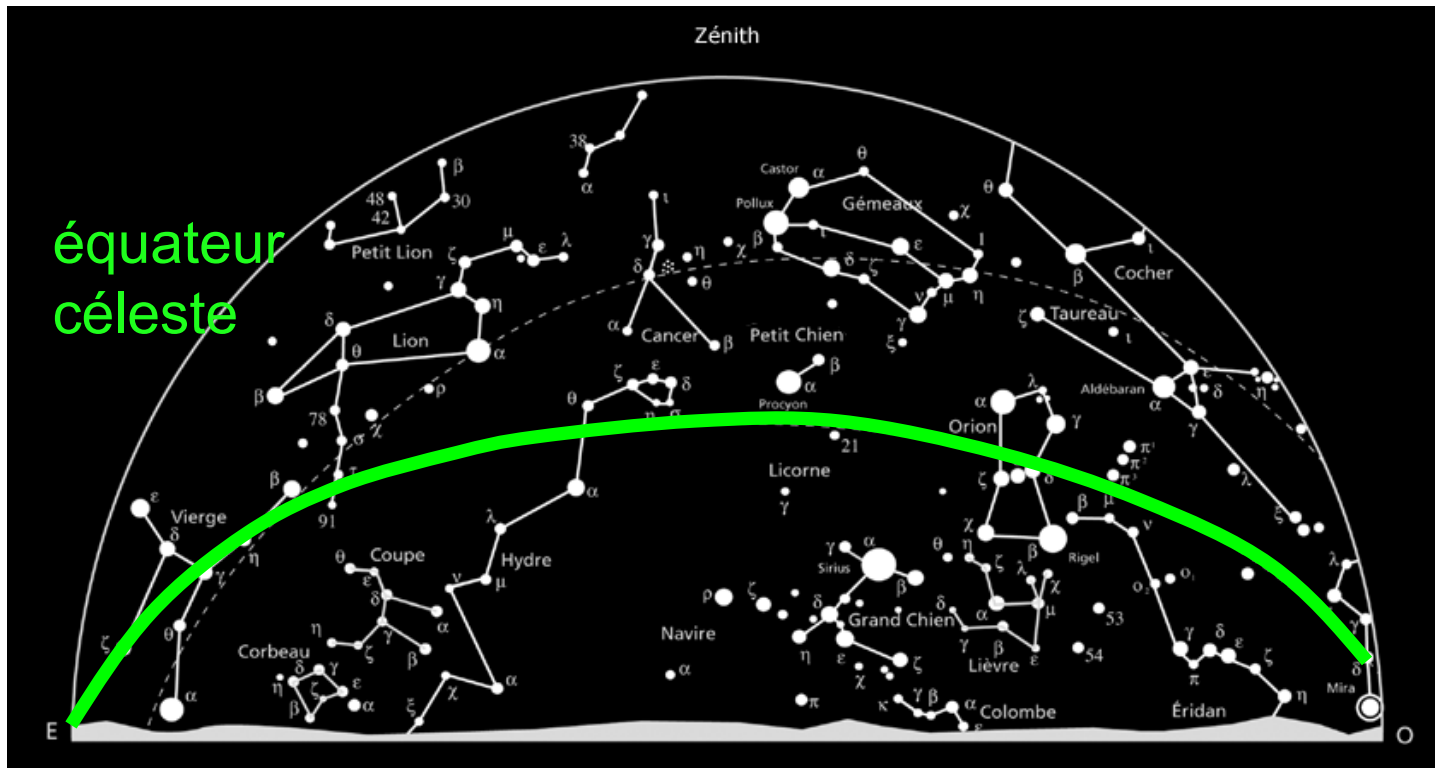
lever

La sphère céleste



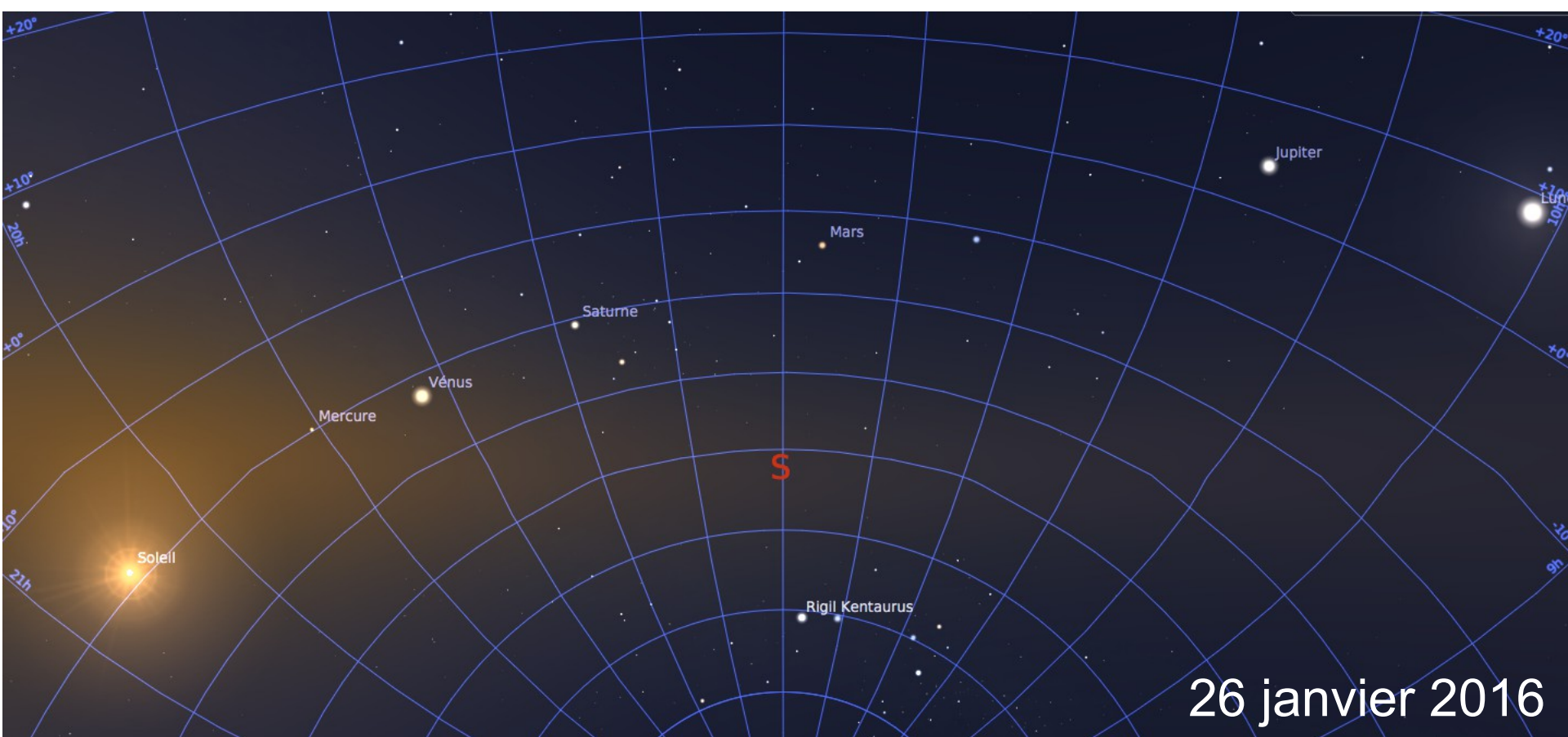
Nous distinguons sur une sphère qui tourne :

- l'axe de rotation, pôles (→ étoile polaire)
- l'équateur (intersection sphère - plan perpendiculaire à l'axe).

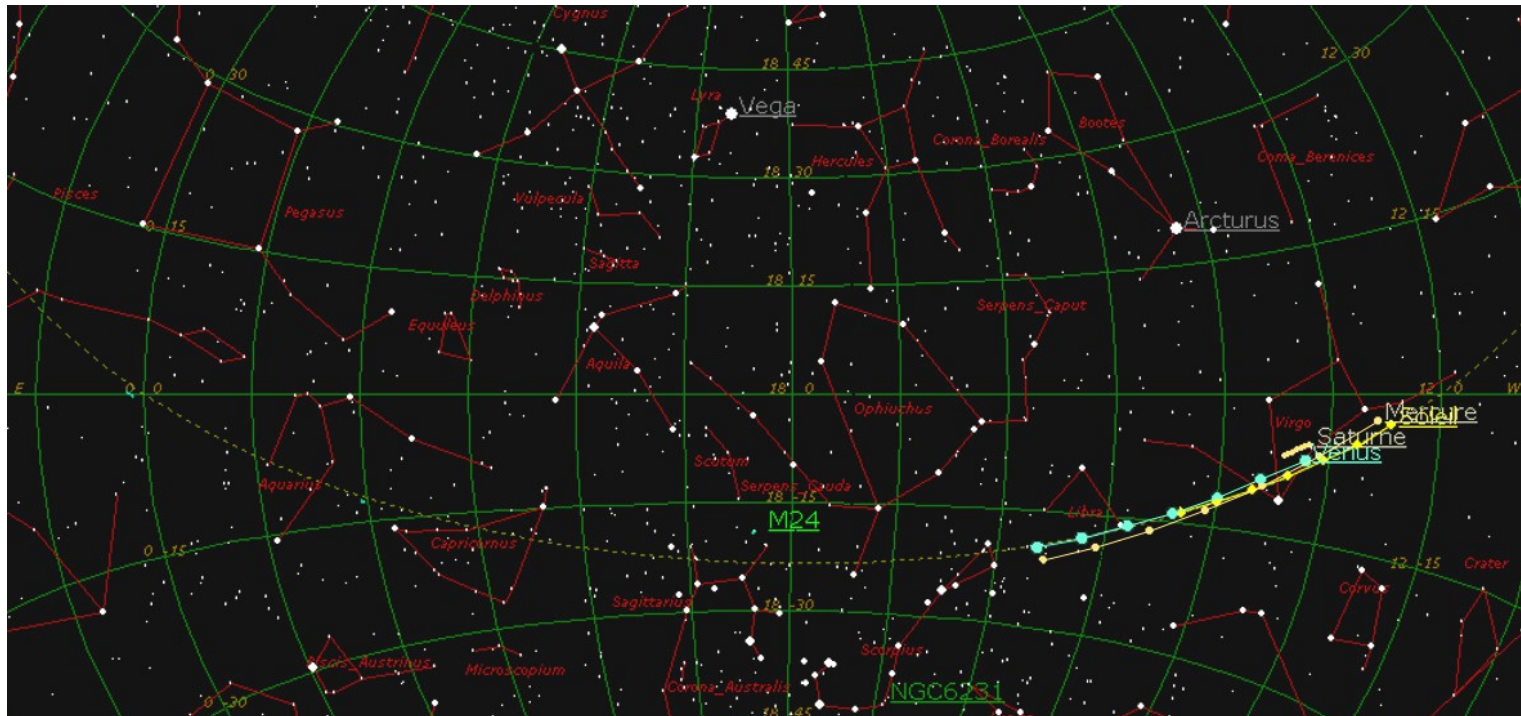


L'équateur de la Terre se projette sur la sphère céleste en tant qu'équateur céleste (à 90° du pôle céleste).

Les 'planètes' devant le fond des étoiles 'fixes'



Les 'planètes' devant le fond des étoiles 'fixes'



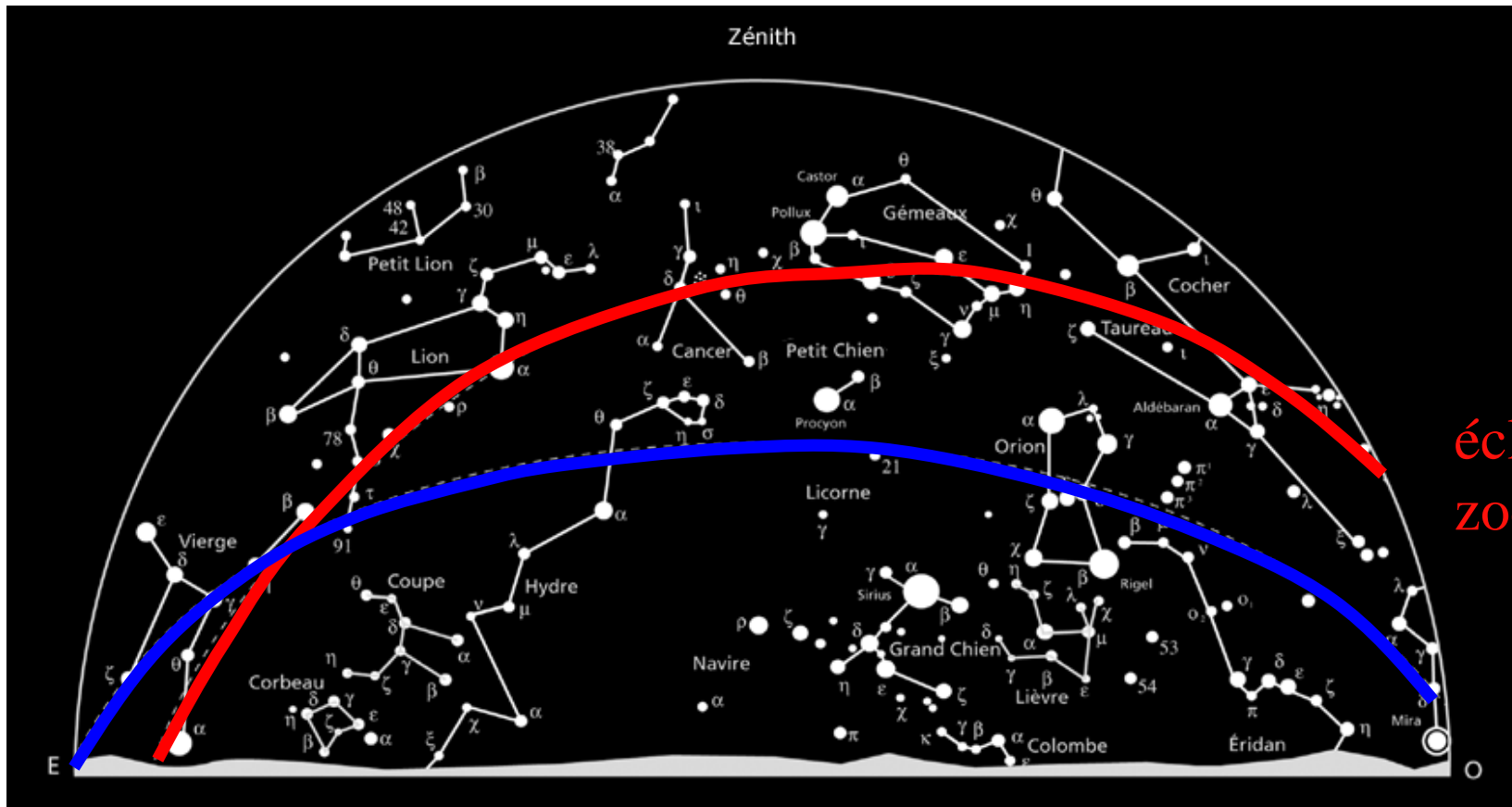
<http://www.astrourf.com/saf/>

- Lune, Soleil, planètes se déplacent sur le fond des étoiles « fixes »
- planètes & Soleil suivent presque la même trajectoire⁽¹⁾
- Déplacement plus rapide pour Mercure et Vénus (planètes proches) que pour Jupiter et Saturne (planètes lointaines).
- Trajectoire du Soleil (modèle géocentrique) : **écliptique** (héliocentrique → projection de l'orbite de la Terre)

(1) interprétation héliocentrique : parce que leurs orbites autour du soleil se situent presque dans le même plan

Sphère céleste, équateur, zodiaque

Positions des Planètes : le long de l'écliptique

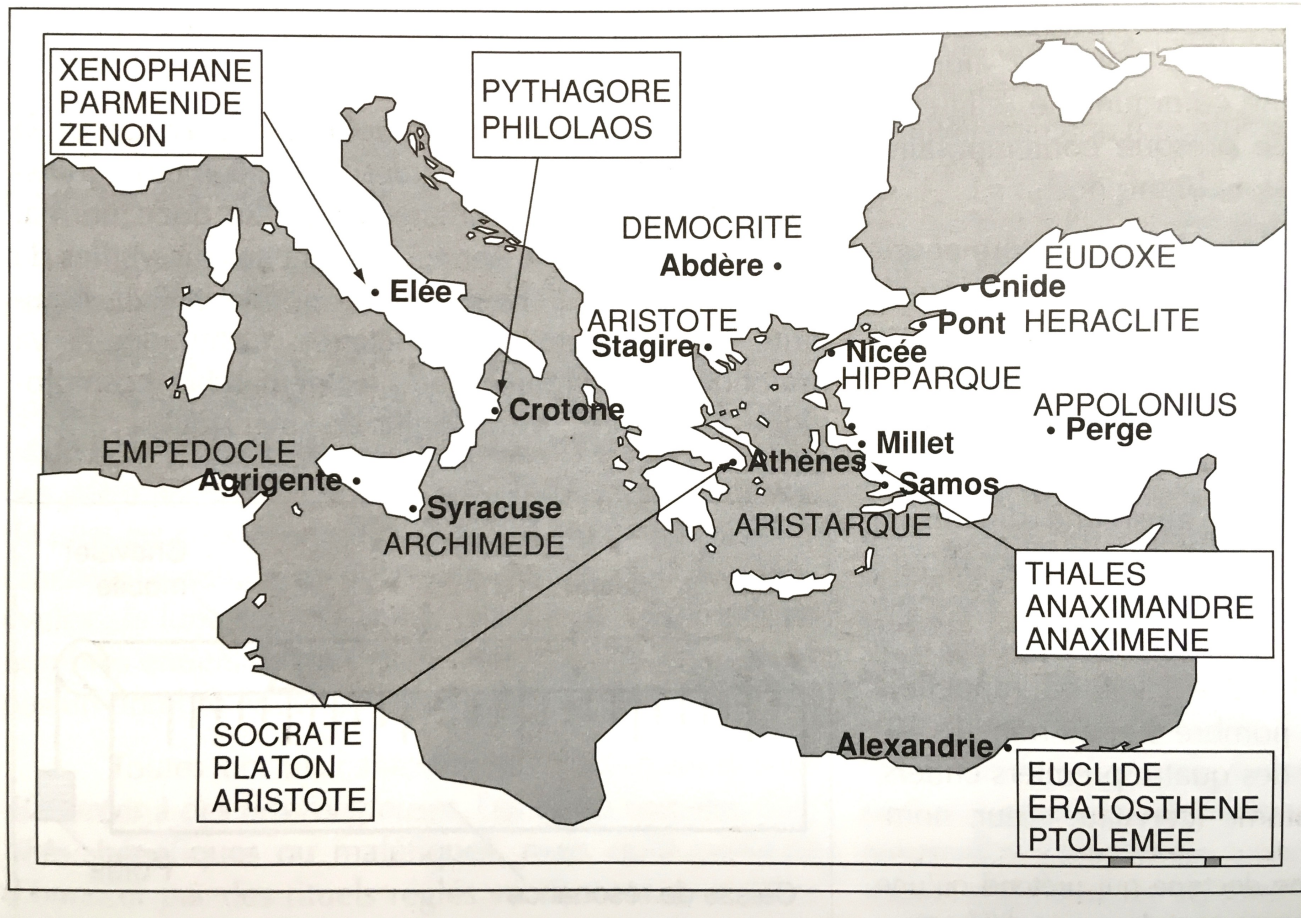


écliptique -
zodiaque

équateur
céleste

Début des réflexions non-mythologiques sur la Terre et l'Univers chez les Grecs (pré-Socratiques Asie mineure et Italie du Sud, puis Athènes) :

« Ce cosmos - il est identique pour tous les êtres - ne fut créé
par aucun Dieu et aucun homme. » (Héraclite, γ 576-480)



Milet : Thalès

Crotone : Pythagore

Abdère :
Leucippe, Démocrite

Athènes :
Platon, Aristote

L'astronomie dans l'antiquité grecque (1)

COMPRENDRE

- Qu'est-ce que le ciel ? Quelle est la position de la Terre dans l'Univers ?
- La forme de la Terre et la nature des mouvements des astres (Lune, Soleil, planètes, étoiles)

POSTULATS (4^{ème} siècle av JC)

- Formulation mathématique par Platon : décrire les mouvements des 'planètes' à l'aide d'orbites circulaires
- Formulation physique cohérente par Aristote

DES MODÈLES « qui sauvent les apparences »

- Plus tard (période hellénistique, > 3^{ème} siècle av JC : Aristarque, Hipparque)
 - développer des modèles et les utiliser pour mesurer l' « Univers »
 - système planétaire, entouré de la sphère des étoiles « fixes »
- Formulation la plus élaborée du modèle géocentrique : Ptolémée (2^{ème} siècle ap JC). Modèle se maintient jusqu'au début du 17^{ème} siècle (Copernic, Galilée, Kepler).

L'astronomie dans l'antiquité grecque (2)

Peu de réflexions sur la nature des astres :

- **Anaxagore** (~500-428 av JC):

« Le Soleil, la Lune et les étoiles sont des pierres incandescentes qui suivent la révolution de l'éther ... Le Soleil dépasse par sa taille le Péloponnèse. La Lune n'a pas de lumière propre, mais la reçoit du Soleil. »(1)



- **Aristote** (~384-322 av JC): astres = matière à part, différente des éléments qui forment la matière terrestre.

L'astronomie cherche à comprendre les mouvements des astres.

L'astrophysique étudie la nature des astres (à partir du 19ème siècle).

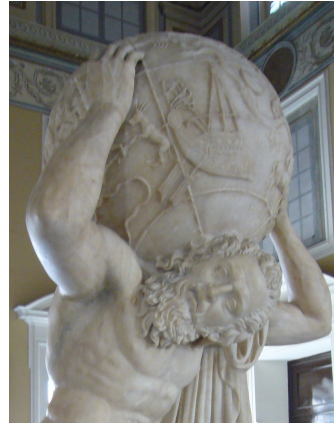
(1) La dernière affirmation me semble contredire la première; problème de traduction ?

La position de la Terre et le mouvement (apparent) des étoiles

Une réflexion scientifique aux conséquences lourdes: le mouvement diurne des astres

- Certains astres semblent décrire des cercles autour du pôle céleste.

- Comment interpréter les lever et coucher des autres astres (Soleil, Lune, la majorité des étoiles) ?



- Tradition (mythologie):
 - Terre et ciel sont contigus.
 - Le ciel doit être maintenu pour ne pas tomber sur la terre (Atlas ...), car expérience quotidienne : corps lourds tombent vers « le bas »
 - transport des astres du coucher vers le lever ; mort et renaissance ...



coucher

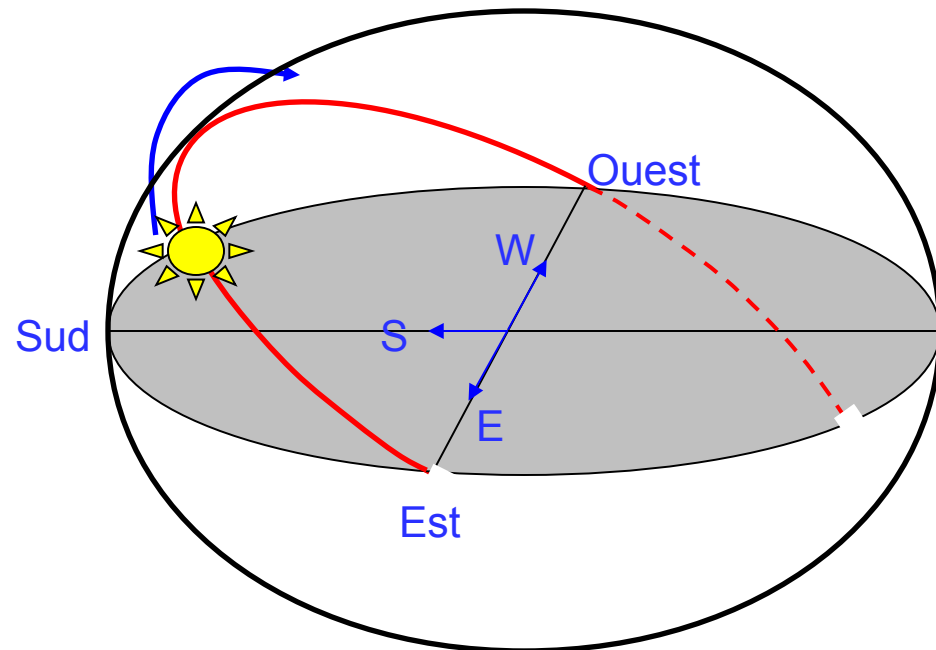
lever

Est-ce compatible avec ce que nous voyons?

Une réflexion scientifique aux conséquences lourdes: le mouvement diurne des astres

- Anaximandre (Milet, 610-547 BC) : les astres complètent leurs orbites au-dessous de l'horizon

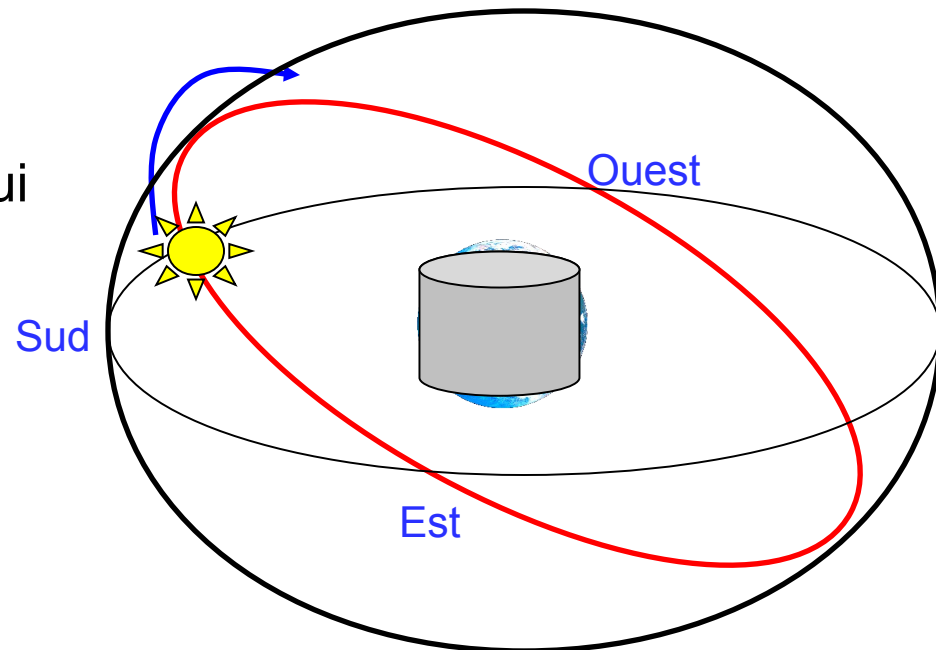
Le mouvement diurne d'un astre : lever, culmination, coucher



Une réflexion scientifique aux conséquences lourdes: le mouvement diurne des astres

- Anaximandre (Milet, 610-547) : les astres complètent leurs orbites au-dessous de l'horizon
- Une conséquence inouïe: *la Terre flotte librement dans l'espace !*
- Mais nous savons que tout corps tombe vers « le bas ». Qu'est-ce qui maintient le sol (= la Terre) là où il est ?
- Une réponse (plausible jusqu'à Newton, 17^{ème} siècle) : la Terre repose au *centre* du monde (voir plus tard: notion pesanteur d'Aristote)

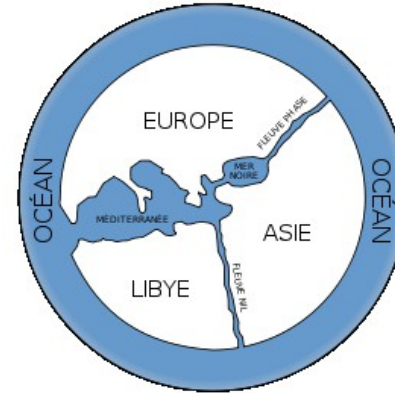
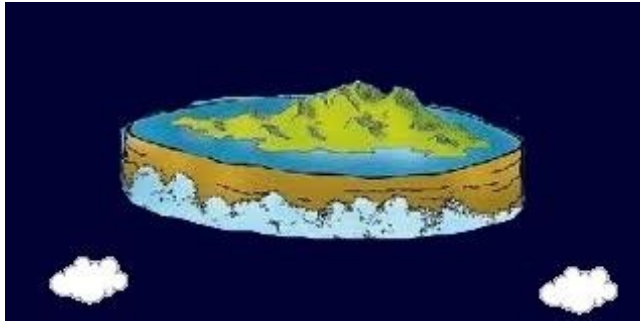
Le mouvement diurne d'un astre : lever, culmination, coucher



La forme de la Terre

Du disque vers la sphère

La forme de la Terre: les premières idées physiques chez les pré-socratiques



- Surface plate:
disque cylindrique (diamètre = 3 Y hauteur; Anaximandre),
disque plat (Anaximène, milieu 6^{ème} siècle)
- Surface courbe (début 5^{ème} siècle; Parménide ?)
- Sphère (milieu 5^{ème} siècle; Parménide, Pythagoriciens ?)

Sphéricité et chute des corps

- Plus ancien document écrit :

Platon vers 363 av JC (le Phédon) – spéculation philosophique

« Socrate : Eh bien donc, reprit-il, je suis persuadé pour ma part que tout d'abord, si la terre est de forme sphérique et placée au milieu du ciel, elle n'a besoin, pour ne pas tomber, ni d'air ni d'aucune autre pression du même genre, mais que l'homogénéité parfaite du ciel seul et l'équilibre de la terre seule suffisent à la maintenir ; car une chose en équilibre, placée au milieu d'un élément homogène, ne pourra ni peu ni prou pencher d'aucun côté et dans cette situation elle restera fixe. Voilà, ajouta-t-il, le premier point dont je suis convaincu. »

- **Aristote** (*Traité du ciel*¹ Livre II ch. 14) – réflexions sur la chute des corps

«Quant à sa forme [celle de la Terre], il est nécessaire qu'elle soit sphérique. En effet, chaque morceau de terre a une pesanteur jusqu'à ce qu'il arrive au centre. ... Que donc, si les parties se portent de toutes parts vers un centre unique à partir des extrémités de la même manière, il soit nécessaire que la masse qu'elles forment [=la Terre] soit identique à elle-même de tous côtés, c'est manifeste. »

(1) Aristote, *Traité du ciel*, traduction C. Dalimier & P. Pellegrin, GF Flammarion 2004

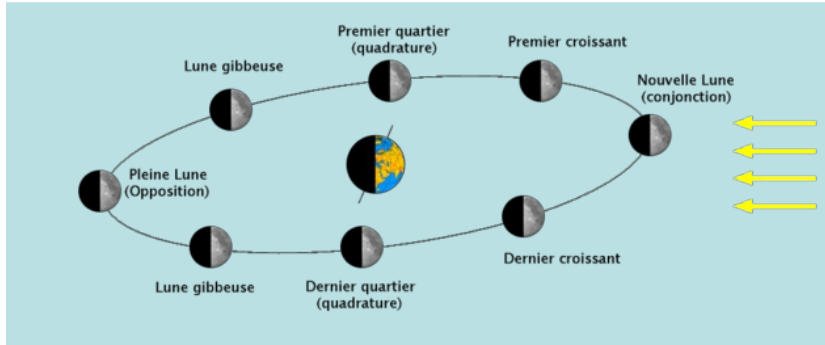
Les éclipses

... et une observation (élément nouveau par rapport à Platon !):

«De plus, il y a aussi des phénomènes saisis par la perception. ... dans les figures qu'elle prend tous les mois, la lune présente toutes les divisions (droite, biconvexe, concave), mais au cours des éclipses la ligne qui limite la Lune est toujours convexe, de sorte que, puisqu'il y a éclipse du fait de l'interposition de la Terre, c'est la circonférence de la Terre qui, étant sphérique, est cause de cette figure. »



Les éclipses



- Comparaison d'une éclipse (forme de l'ombre de la Terre toujours convexe) et des phases de la Lune



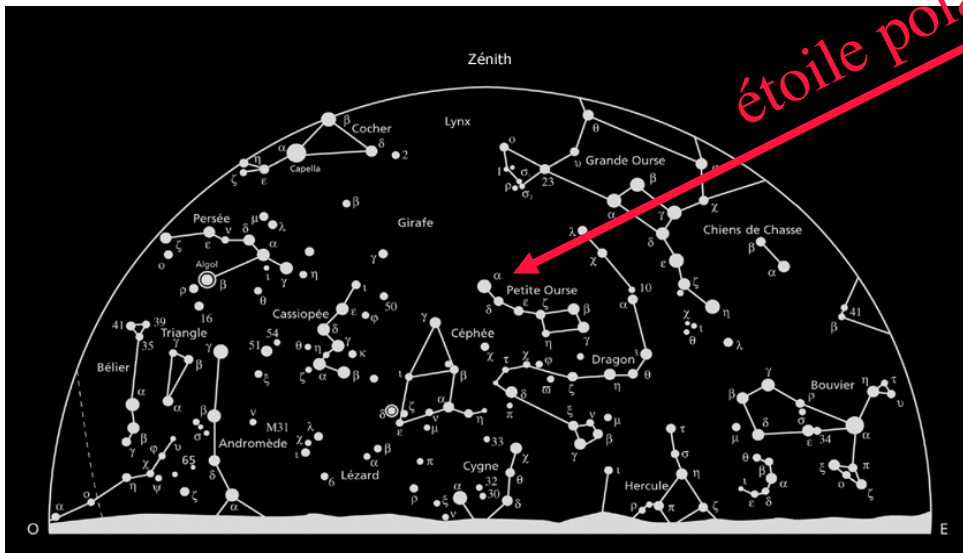
Phases lunaires

Dimanche	Lundi	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi	Samedi
						1
2 	3 DQ à 12:46 HN	4 	5 	6 	7 	8
9 	10 NL à 07:03 HN	11 	12 	13 	14 	15
16 	17 PQ à 01:57 HN	18 	19 	20 	21 	22
23 	24 	25 PL à 05:32 HN	26 	27 	28 	29
30 	31 					

La Terre dans l'Univers

Se meut-elle ou le ciel tourne-t-il
autour d'elle ?

- Vue du ciel, direction nord, mars



étoile polaire

Soc. Astro. France, <http://www2.iap.fr/saf/accueil.html>

- Les constellations (ci-dessus)
- Cliché du ciel avec caméra fixe (à droite)



Une question

- Comment argumenteriez-vous pour convaincre quelqu'un prétendant que la Terre est immobile au centre du monde, et que les planètes et étoiles tournent autour ?

Des éléments de réponse

- La parallaxe des étoiles : les étoiles proches décrivent une ellipse annuelle par rapport aux étoiles lointaines, du fait du mouvement de la Terre autour du Soleil.
- L'aberration de la lumière : la lumière des étoiles lointaines arrive à la Terre dans une direction inclinée, comme la pluie sur le pare-brise d'une voiture en mouvement ou sur le parapluie d'un piéton.
- Le mouvement propre des étoiles : *avec un télescope*, on voit que des étoiles proches se déplacent, au fil des ans, sur le fond des étoiles lointaines. Les étoiles ont donc des distances différentes (fait difficile à saisir quand on regarde le ciel !) et nous observons l'effet de perspective.

Des éléments de réponse

- La parallaxe des étoiles : les étoiles proches décrivent une ellipse annuelle par rapport aux étoiles lointaines, du fait du mouvement de la Terre autour du Soleil.
 - L'aberration de la lumière : la lumière des étoiles lointaines arrive à la Terre dans une direction inclinée, comme la pluie sur le pare-brise d'une voiture en mouvement ou sur le parapluie d'un piéton.
 - Le mouvement propre des étoiles : *avec un télescope*, on voit que des étoiles proches se déplacent, au fil des ans, sur le fond des étoiles lointaines. Les étoiles ont donc des distances différentes (fait difficile à saisir quand on regarde le ciel !) et nous observons l'effet de perspective.
- **Des arguments techniques pertinents, mais peu intuitifs et non accessibles aux observations à l'œil nu. Une longue marche vers la reconnaissance (16^{ème}-17^{ème} siècles) que la réalité physique diffère de la première impression visuelle.**

Comment interpréter le mouvement des astres ?

- Alternative 1: Les étoiles sont « fixées » sur la sphère céleste qui tourne autour de la Terre.
- Alternative 2: La Terre tourne autour d'elle-même, le mouvement diurne des étoiles en est le reflet.
- L'idée que la Terre est mobile est évoquée en Grèce avant Aristote (Pythagoriciens) et après (Aristarque), mais ne s'impose pas. L'immobilité de la Terre est la conséquence d'un ensemble d'observations et de réflexions (astronomie & physique) formulé pour l'essentiel par Aristote.

Pourquoi la Terre est-elle immobile au centre de l'Univers (Aristote) ?

Les arguments clefs de l'antiquité grecque contre la mobilité de la Terre :

- Le mouvement de la Terre - rotation ou orbite - implique une force (appelée aujourd'hui **force centrifuge**) : elle n'est pas perceptible, donc Terre au repos.
vrai à l'époque, faux aujourd'hui - nous savons que la Terre est aplatie aux pôles

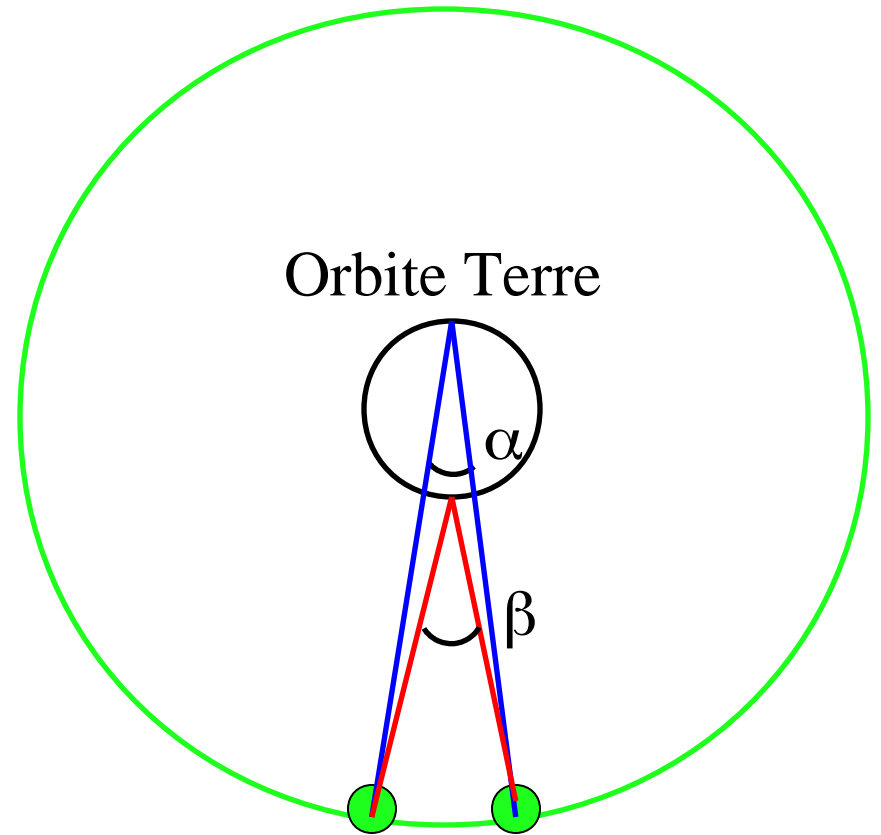
Pourquoi la Terre est-elle immobile au centre de l'Univers (Aristote) ?

Les arguments clefs de l'antiquité grecque contre la mobilité de la Terre :

- Le mouvement de la Terre - rotation ou orbite - implique une force (appelée aujourd'hui **force centrifuge**) : elle n'est pas perceptible, donc Terre au repos.
vrai à l'époque, faux aujourd'hui - nous savons que la Terre est aplatie aux pôles
- Si la position de la Terre changeait par rapport aux étoiles, on verrait des **effets de perspective**.
Effet non observé à l'époque, parce que les étoiles sont lointaines

Mouvement orbital de la Terre ?

- Visée de deux étoiles sur la sphère céleste à deux instants différents au cours du mouvement orbital de la Terre.
- On s'attend à mesurer deux angles différents: $\alpha < \beta$
- Cet effet n'est pas mesuré par les astronomes grecs (mesuré pour la première fois au 19^{ème} siècle !)
→ **conclusion : la Terre est immobile**



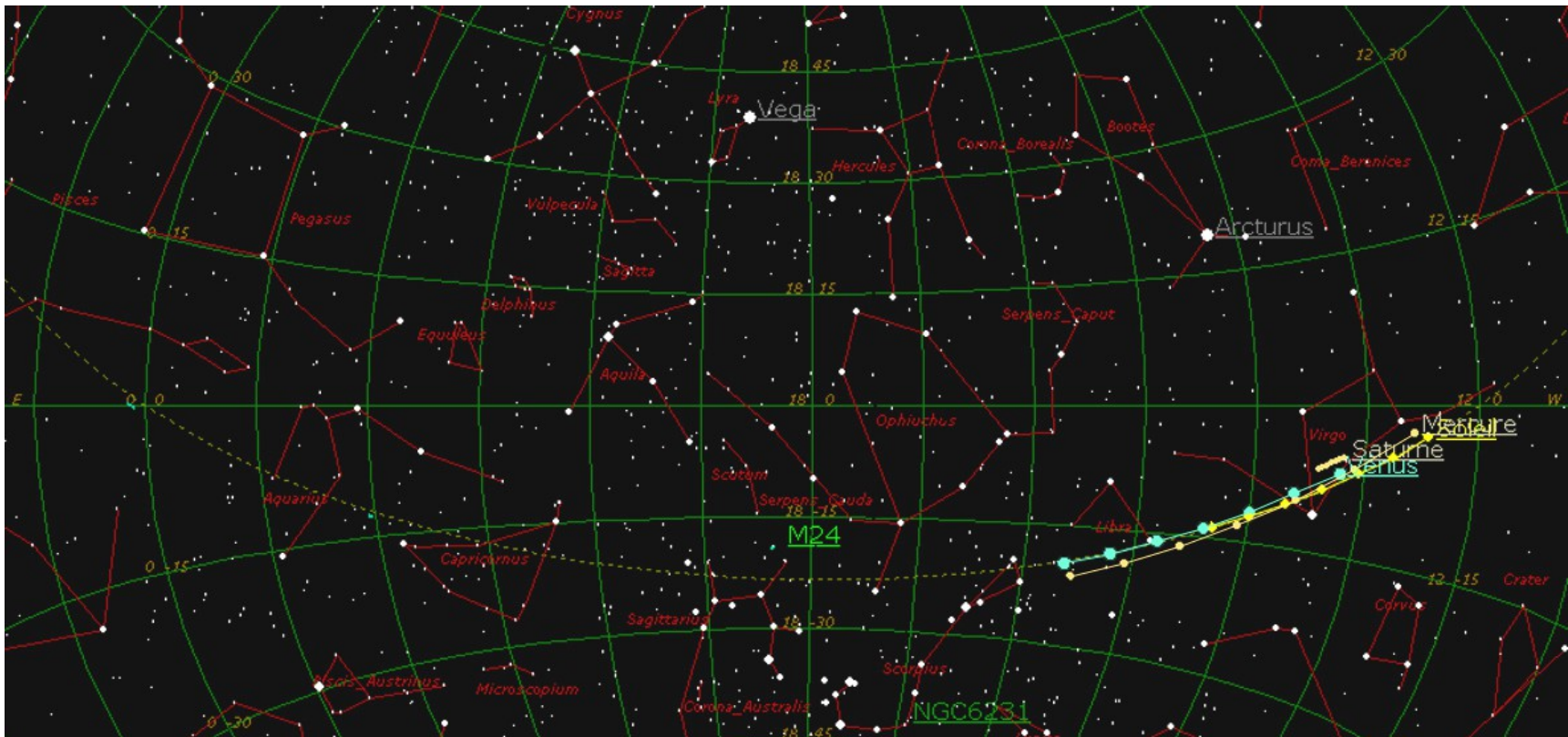
2 étoiles sur la sphère céleste

Pourquoi la Terre est-elle immobile au centre de l'Univers (Aristote) ?

Les arguments clefs de l'antiquité grecque contre la mobilité de la Terre :

- Le mouvement de la Terre - rotation ou orbite - implique une force (appelée aujourd'hui **force centrifuge**) : elle n'est pas perceptible, donc Terre au repos.
vrai à l'époque, faux aujourd'hui - nous savons que la Terre est aplatie aux pôles
- Si la position de la Terre changeait par rapport aux étoiles, on verrait des **effets de perspective**.
Effet non observé à l'époque, parce que les étoiles sont lointaines
- Qu'est-ce qui fait chuter les corps ?
Pour Aristote : **la pesanteur** est dirigée vers le centre de l'Univers, donc la Terre est au centre de l'Univers (sinon, elle y chuterait).

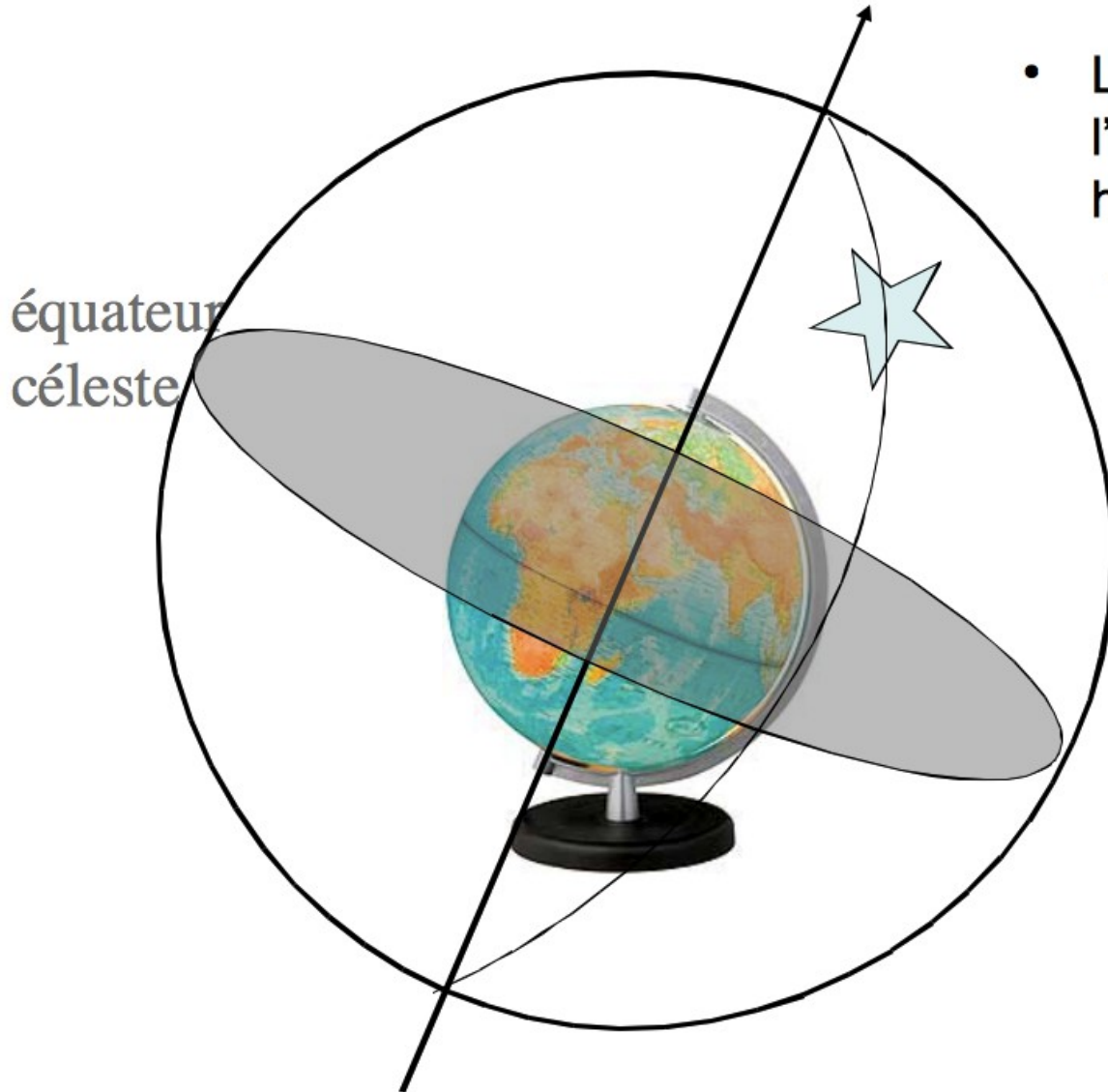
Comment alors comprendre le mouvement des planètes et du ciel ?



Les sphères homocentriques (Eudoxe de Cnide, Aristote, ...)

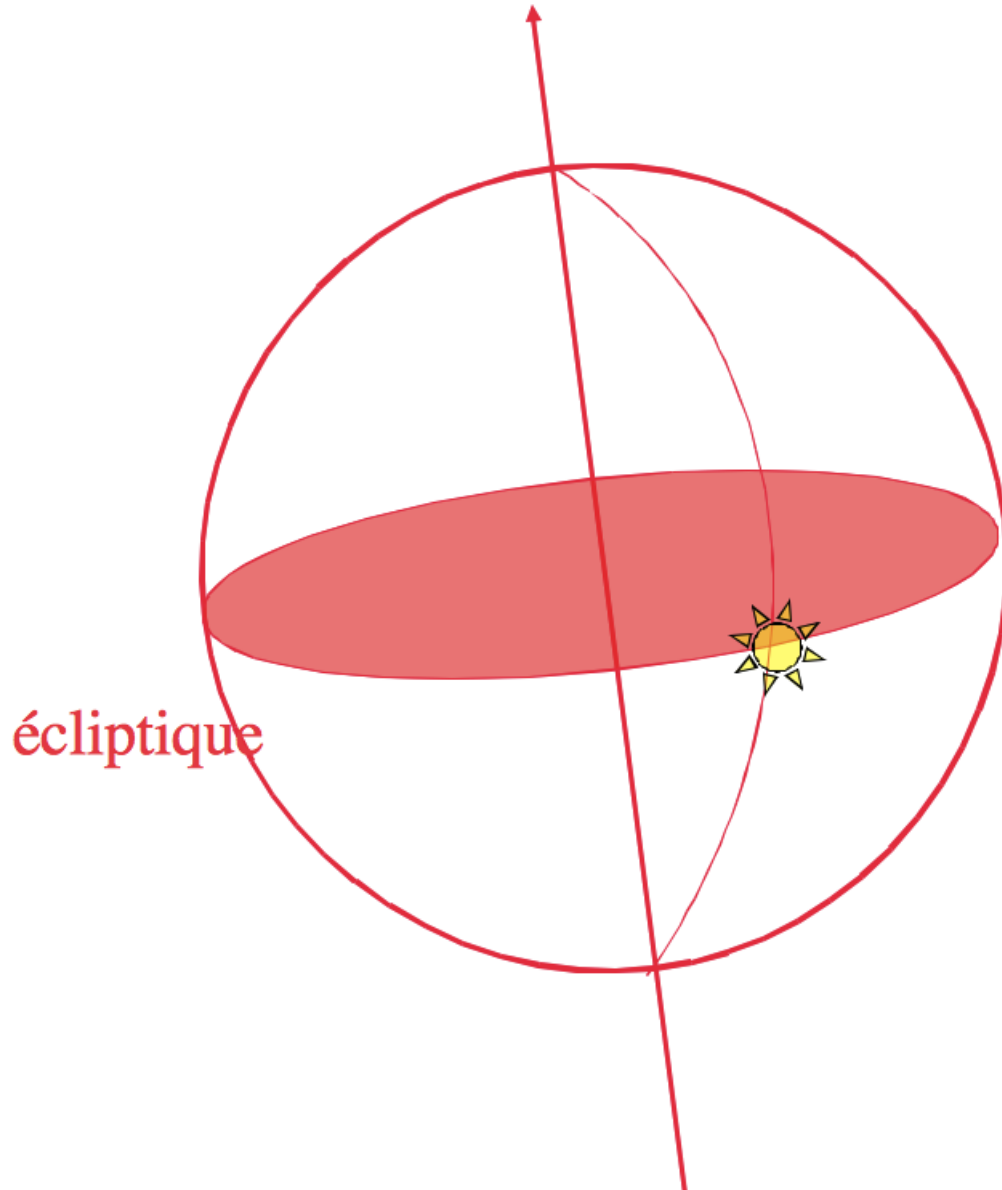
- **Expliquer les mouvements des planètes par**
 - un système de sphères concentriques (« homocentriques » du mot « homoios » = commun) en rotation autour d'axes différents;
 - chaque sphère est montée dans une autre, la dernière étant la sphère des étoiles 'fixes' ;
 - les vitesses de rotation ne varient pas au cours du temps, mais sont différentes pour différentes 'planètes' (y compris Soleil, Lune).
 - **Eudoxe de Cnide** (408-355) : construction géométrique
 - **Aristote** (384-322) : réalité physique
- La combinaison de différentes sphères pour une 'planète' donnée permet de représenter l'ensemble de ses mouvements :

Les sphères homocentriques (Eudoxe de Cnide, Aristote, ...)



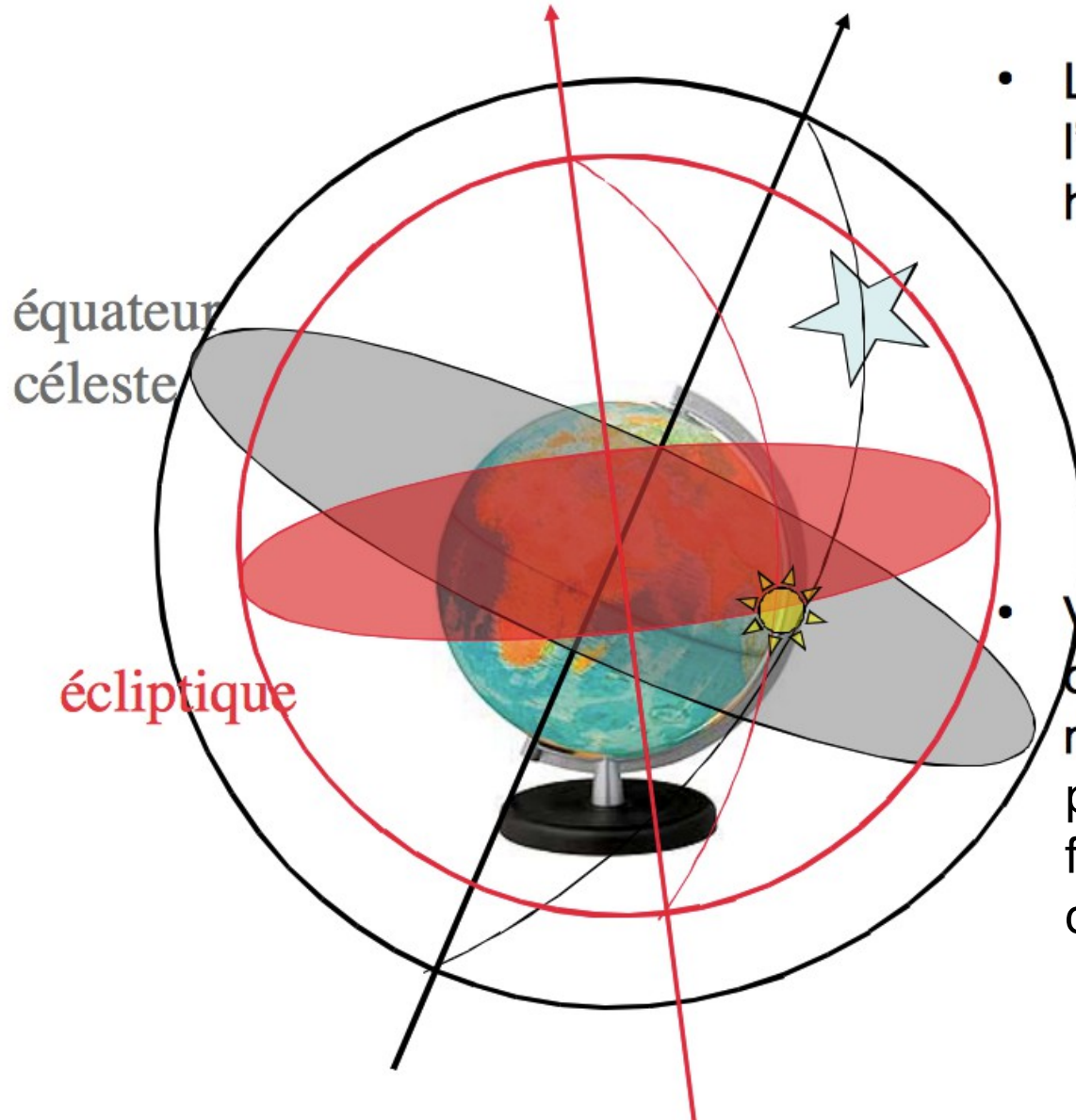
- La Terre au centre de l'Univers, entourée de sphères homocentriques :
 - Sphère céleste portant les étoiles 'fixes'

Les sphères homocentriques (Eudoxe de Cnide, Aristote, ...)



- La Terre au centre de l'Univers, entourée de sphères homocentriques :
 - Sphère céleste portant les étoiles 'fixes'
 - Sphère portant la 'planète' (ici : Soleil)

Les sphères homocentriques (Eudoxe de Cnide, Aristote, ...)

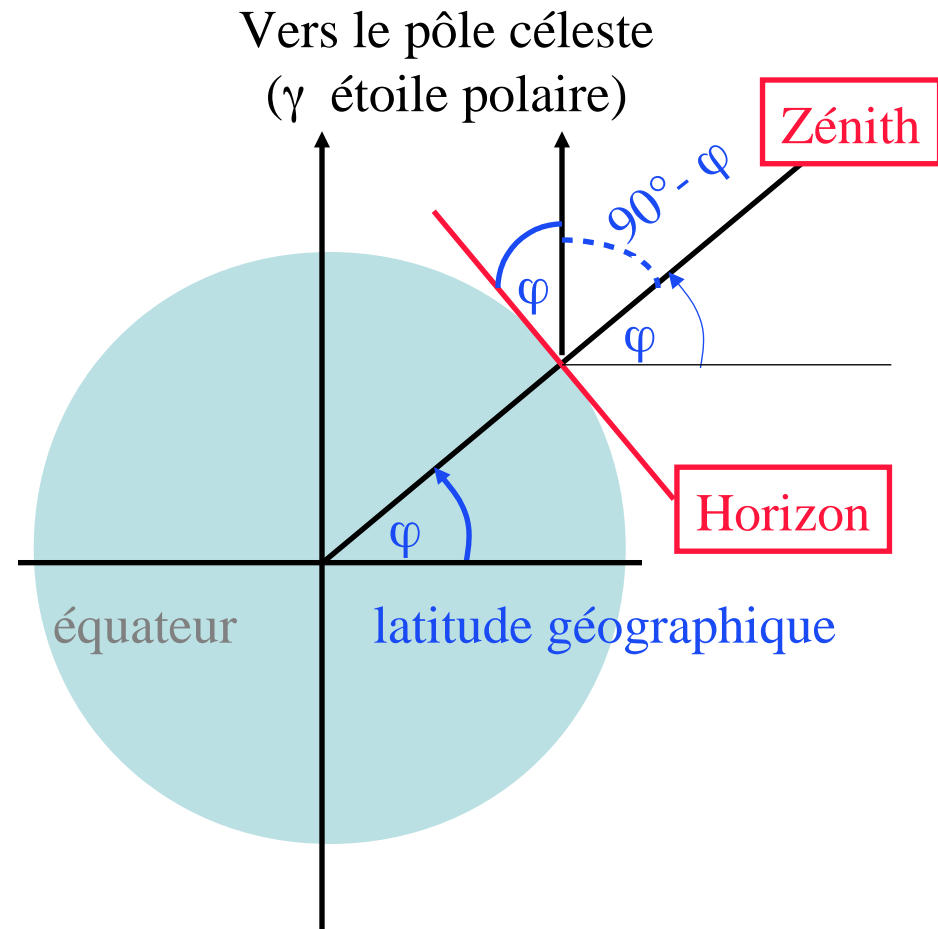


- La Terre au centre de l'Univers, entourée de sphères homocentriques :
 - Sphère céleste portant les étoiles 'fixes'
 - Sphère portant la 'planète' (ici : Soleil)
- Vitesses de rotation constantes de chaque sphère, mais différentes : Soleil, planètes, se meuvent devant le fond des étoiles fixes avec des vitesses différentes

Mesurer les positions sur la
Terre et celles des astres

Se repérer sur la Terre sphérique

- On mesure les positions sur la sphère par deux angles - p.ex. latitude et longitude géographiques.
- Orléans : 46°N 03°E
- Latitude géographique = hauteur (élévation) du pôle céleste au-dessus de l'horizon



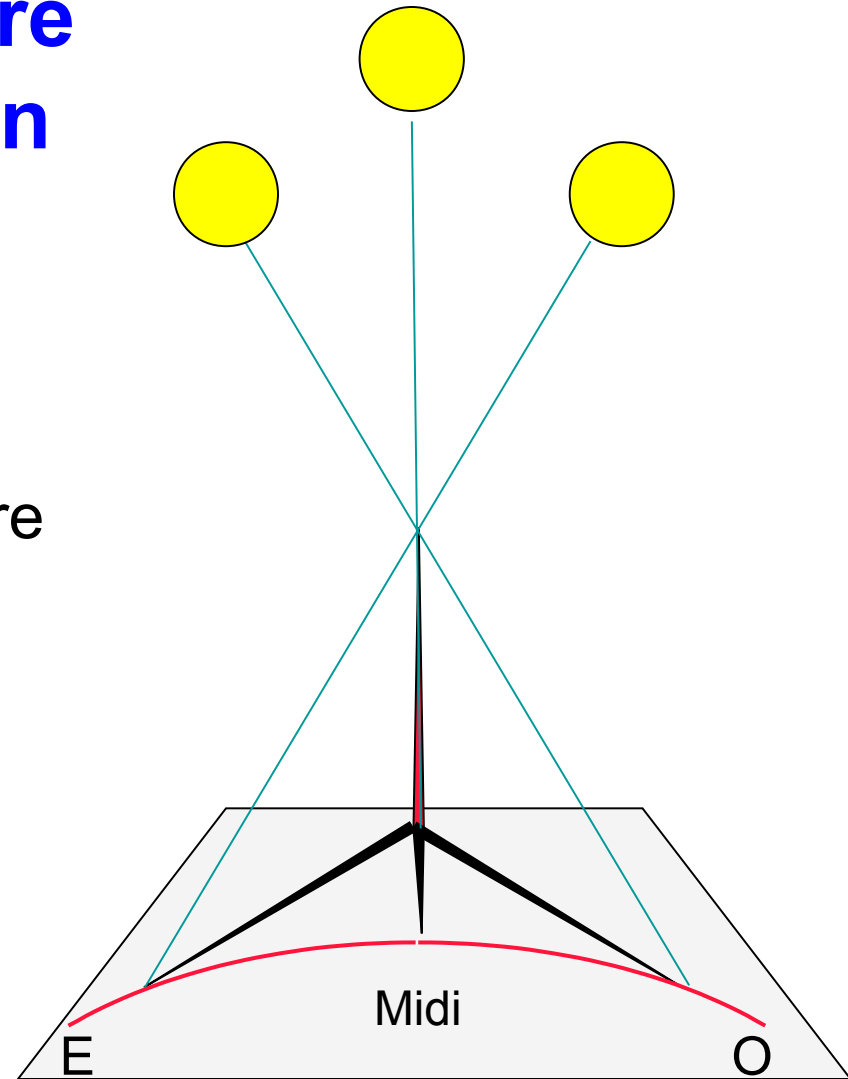
Se repérer sur la Terre sphérique

- Latitude géographique = hauteur (élévation) du pôle céleste au-dessus de l'horizon
 - Mesurer l'élévation de l'étoile polaire. Problème : l'étoile 'polaire' n'est pas exactement au pôle nord céleste.
 - Mesurer le minimum et le maximum de l'élévation d'une étoile circumpolaire, prendre la moyenne



Un instrument de mesure élémentaire : le gnomon

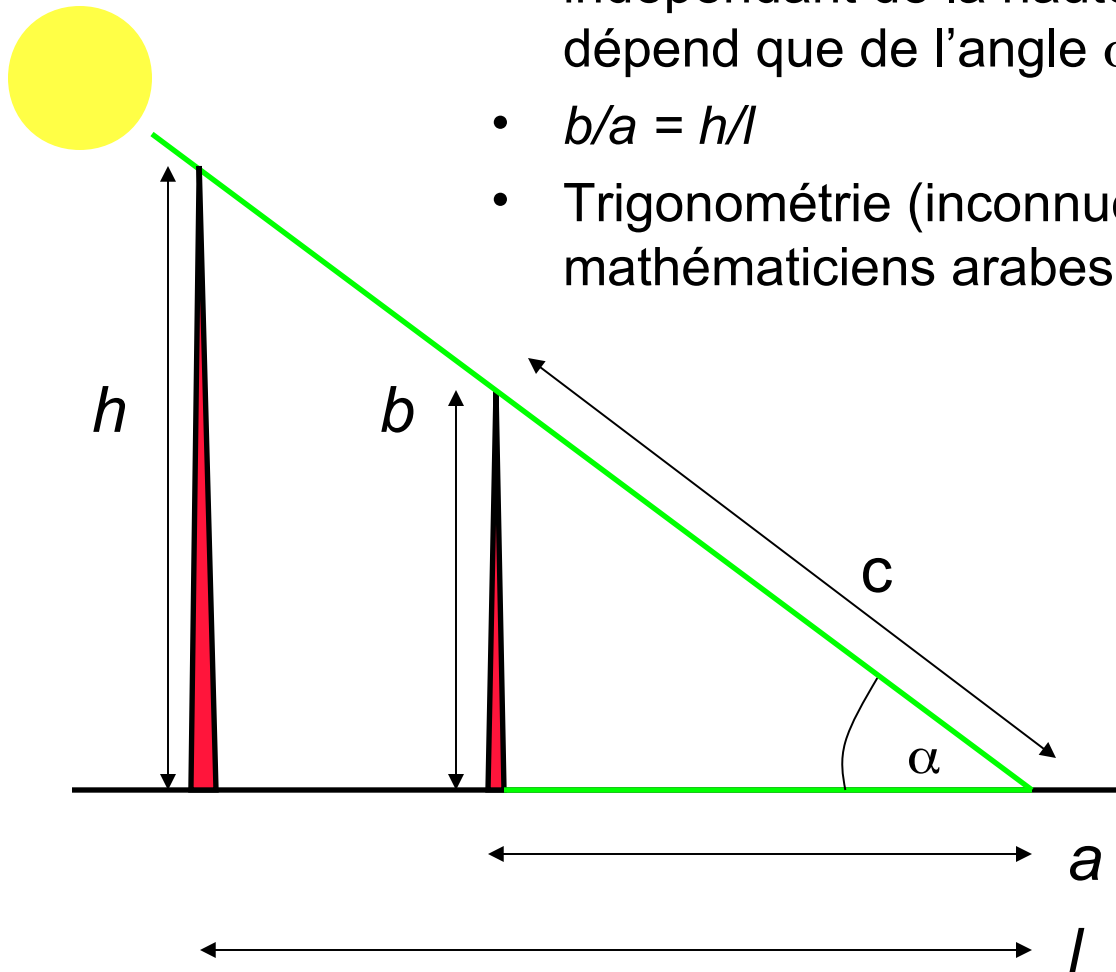
- Baguette verticale
- Midi : Soleil au plus haut / ombre la plus courte (mesures de l'instant du midi et de la durée du jour solaire; cadran solaire)
- Midi : Soleil au sud / ombre en direction nord-sud (mesure de la méridienne du lieu d'observation)



Rappel de trigonométrie

Rapport entre hauteur de l'objet et longueur de l'ombre

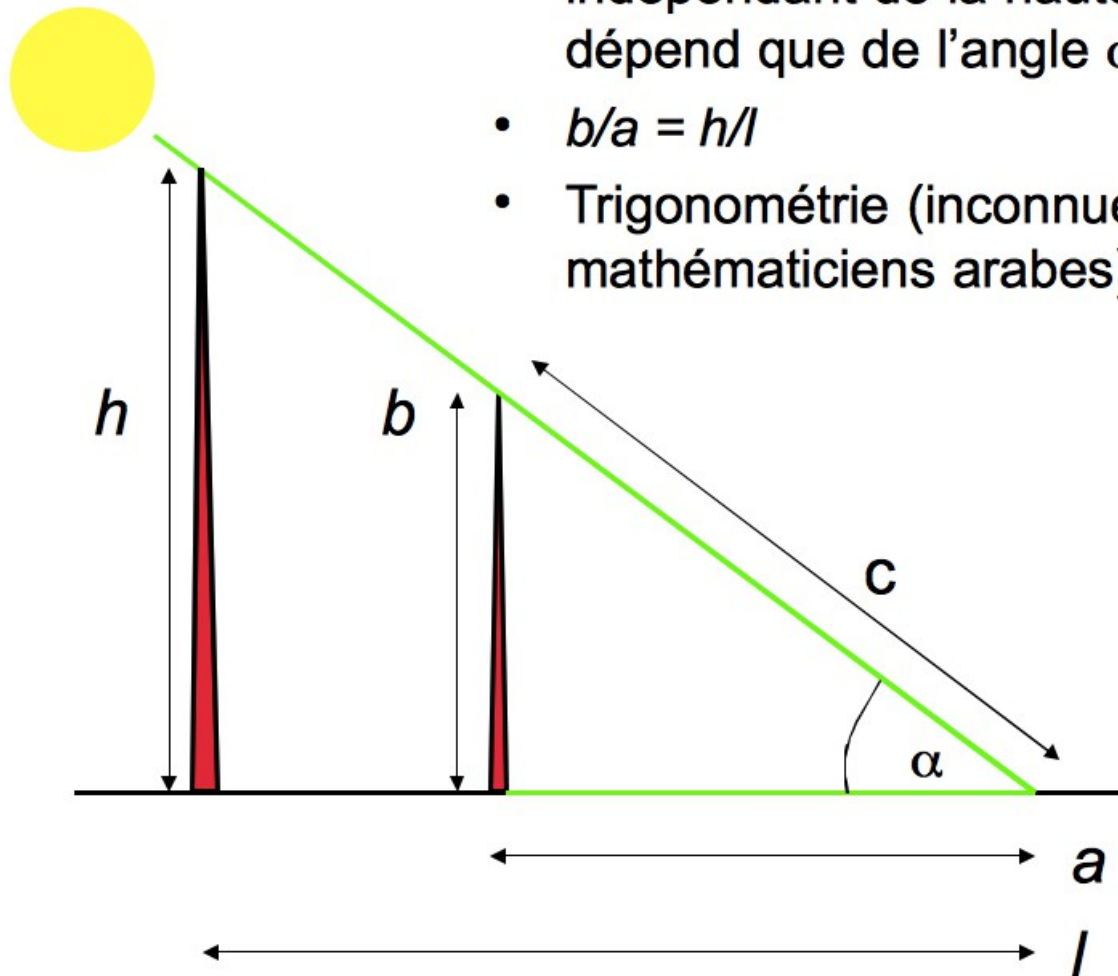
- indépendant de la hauteur de l'objet; ne dépend que de l'angle α (Thales)
- $b/a = h/l$
- Trigonométrie (inconnue des Grecs; mathématiciens arabes) :



Rappel de trigonométrie

Rapport entre hauteur de l'objet et longueur de l'ombre

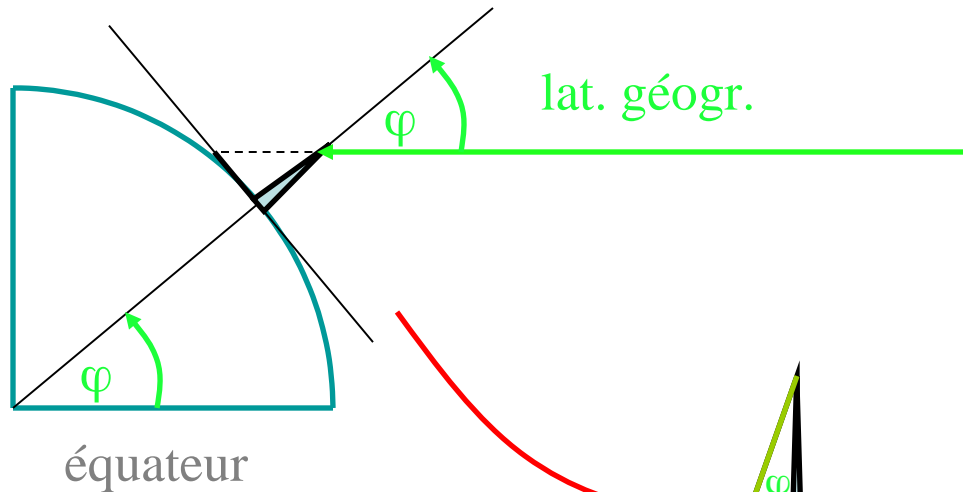
- indépendant de la hauteur de l'objet; ne dépend que de l'angle α (Thales)
- $b/a = h/l$
- Trigonométrie (inconnue des Grecs; mathématiciens arabes) :



$$\frac{b}{a} = \frac{h}{l} = \tan \alpha$$

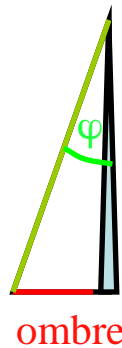
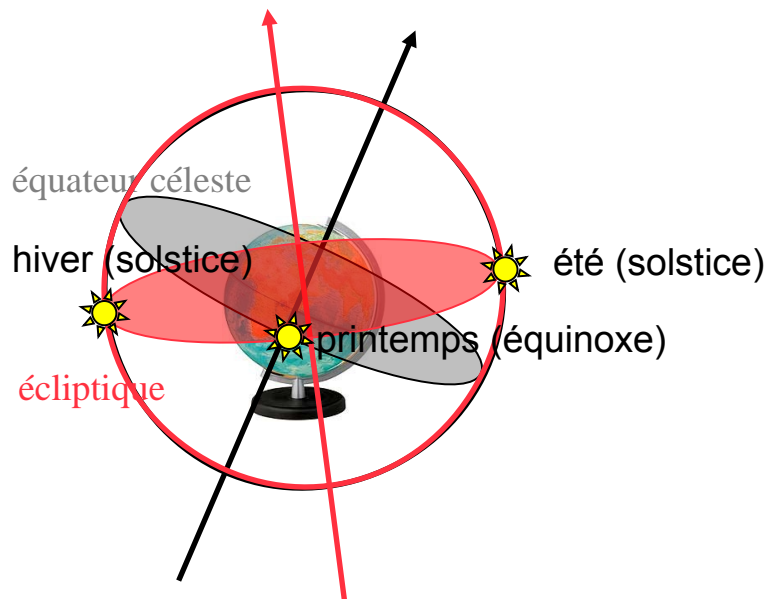
$$\frac{a}{c} = \cos \alpha$$

Encore une fois: mesurer la latitude géographique

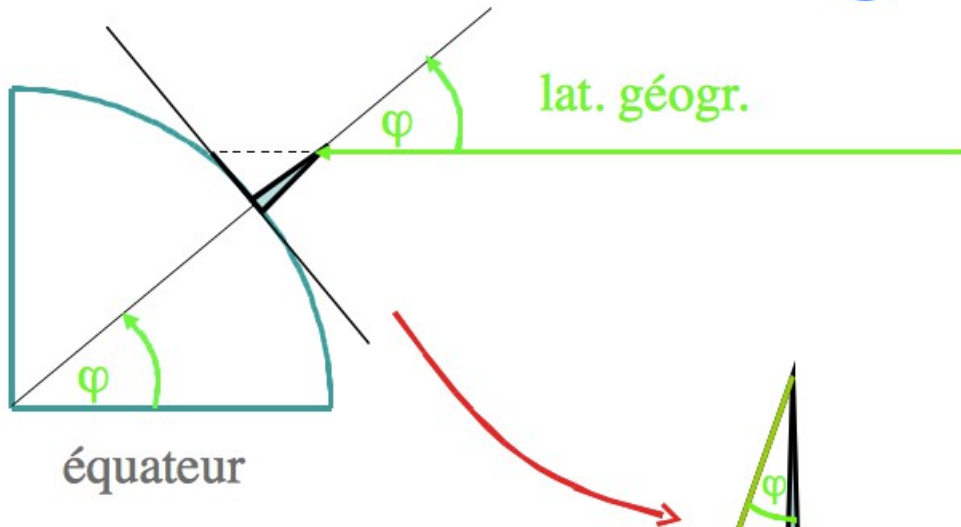


Equinoxe :

- Soleil à l'équateur céleste,
- angle (rayons Soleil - verticale locale) = latitude géographique



Encore une fois: mesurer la latitude géographique

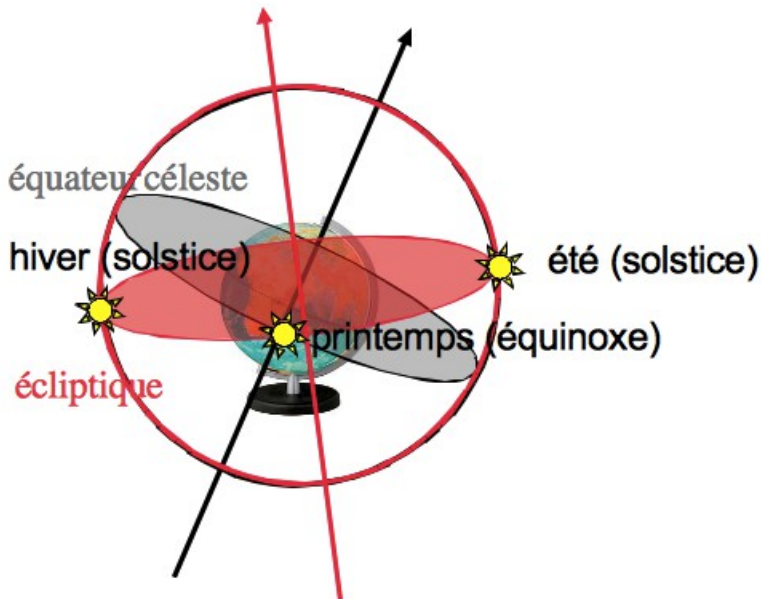


Equinoxe :

- Soleil à l'équateur céleste,
- angle (rayons Soleil - verticale locale) = latitude géographique

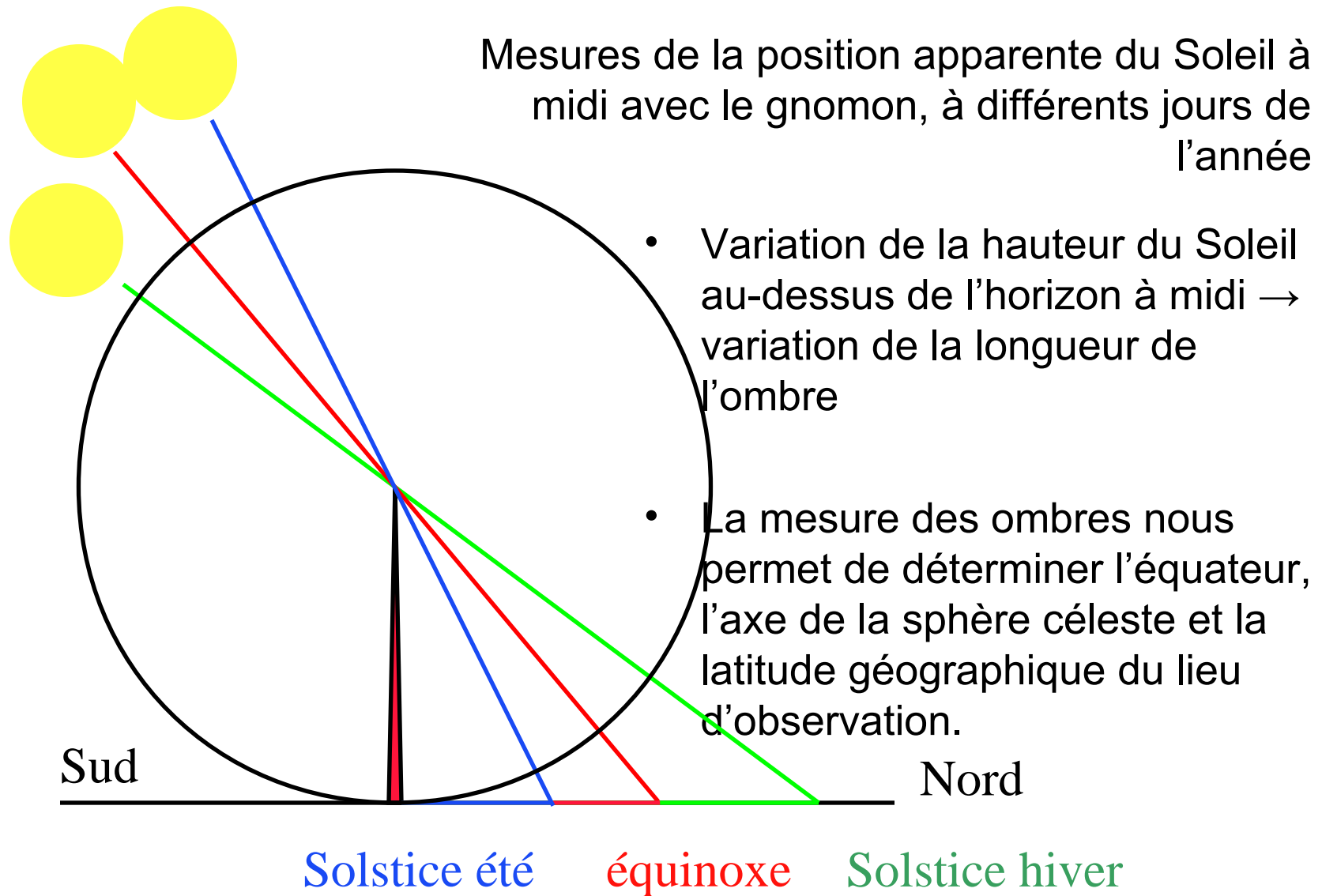


ombre



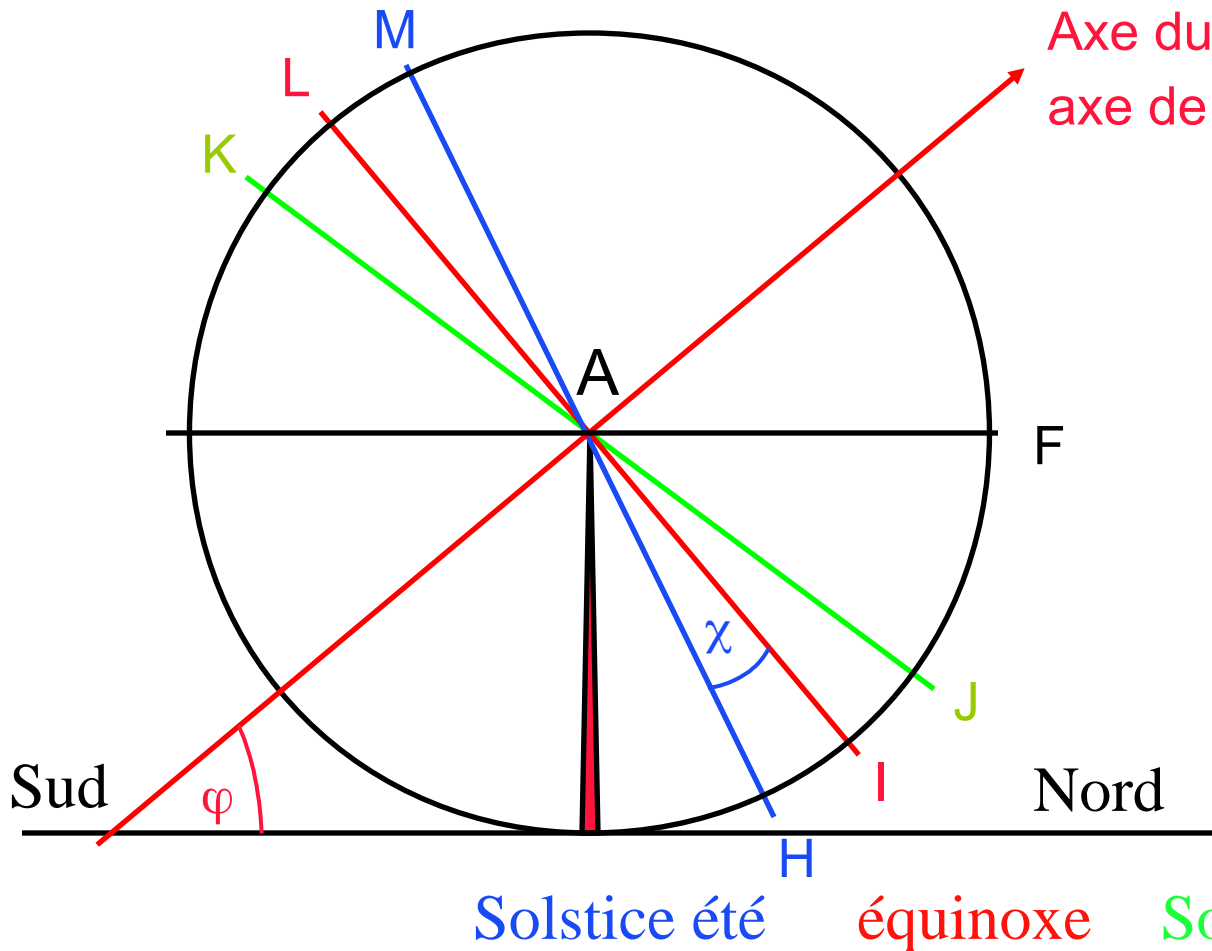
$$\tan \varphi = \frac{\text{longueur(ombre)}}{\text{longueur(gnomon)}}$$

Déterminer la sphère céleste



Déterminer la sphère céleste

- Si sphère céleste a extension (quasiment) infinie : pointe du gnomon (A) = centre du monde. (LI) = directions vers Soleil aux équinoxes, (KJ) au solstice d'hiver, (MH) au solstice d'été.



Axe du monde (aujourd'hui :
axe de rotation de la Terre)

AF horizon

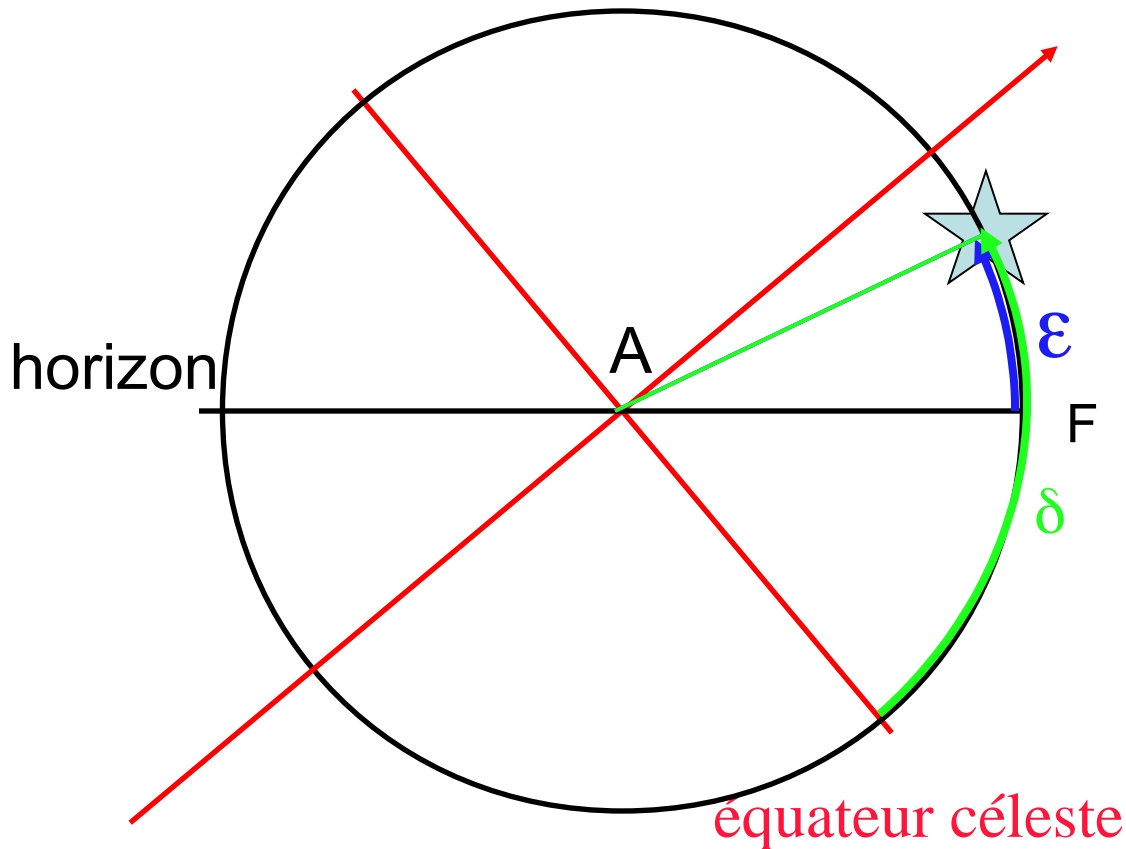
LI équateur céleste

φ Angle (plan de
l'horizon, axe du
monde) = latitude
géographique

χ Angle (plan de
l'écliptique, plan de
l'équateur)

Déterminer la sphère céleste

- Nous pouvons donc mesurer la position d'un astre (étoile, ...) sur la sphère céleste de deux façons :

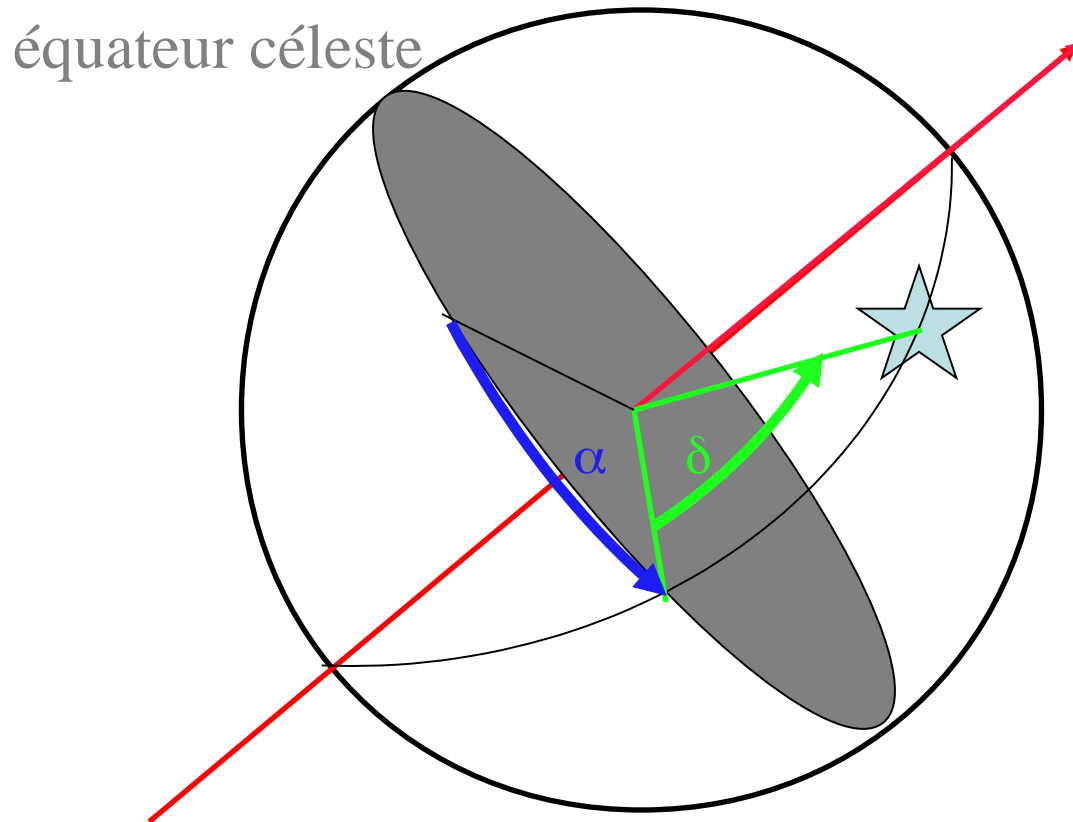


Élévation ϵ (=angle au-dessus de l'horizon; change au cours du temps (rotation de la sphère céleste / de la Terre))

Déclinaison δ (= angle par rapport à l'équateur)

Déterminer la sphère céleste

- En 2 dimensions (sphère) :

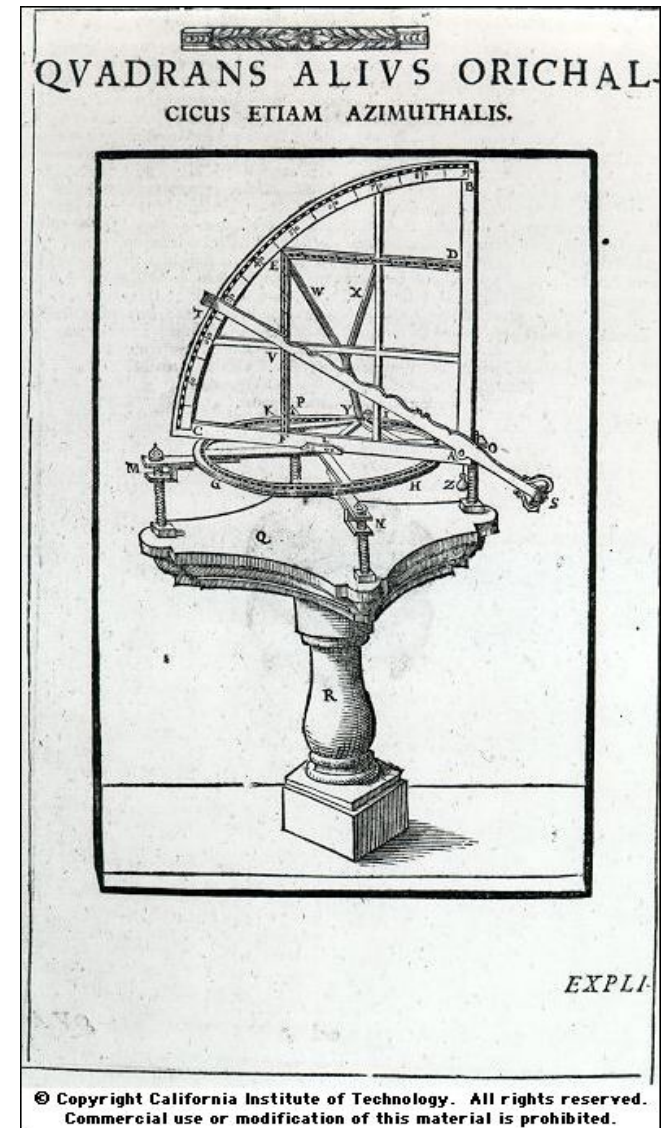


- Ascension droite α = angle mesuré dans le plan équatorial, depuis un point de référence (position Soleil équinoxe printemps)
- Déclinaison δ = angle par rapport à l'équateur
- Ces angles resteraient constants au cours du temps, si l' « axe du monde » était stable. Ce n'est pas le cas : « précession des équinoxes », Hipparque de Nicée, env. 180-125 av JC)

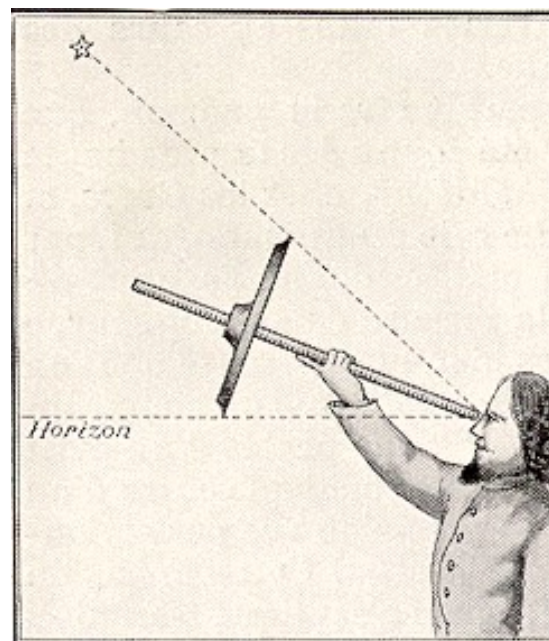
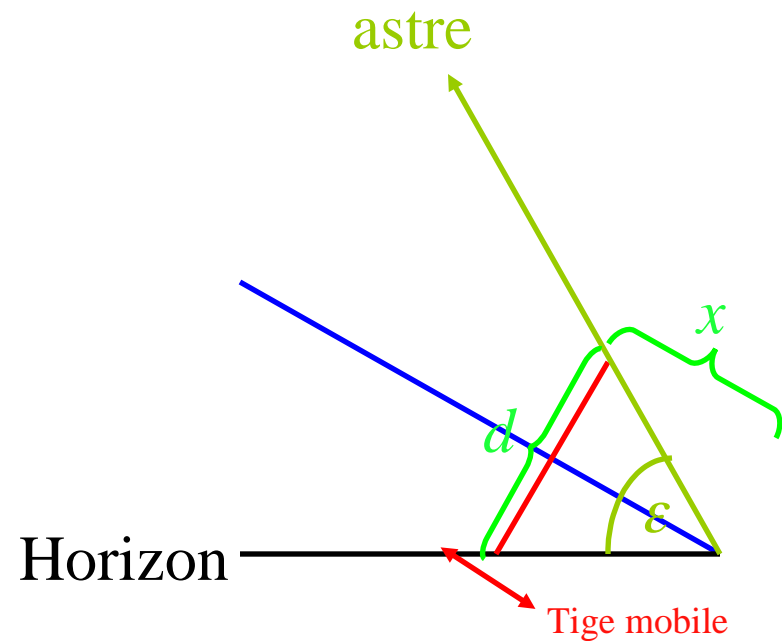
Instruments de mesure : le quart de cercle



- Viser l'astre avec deux pinnules alignées
- Plus grande sophistication chez Tycho Brahe (fin 16^{ème} siècle)



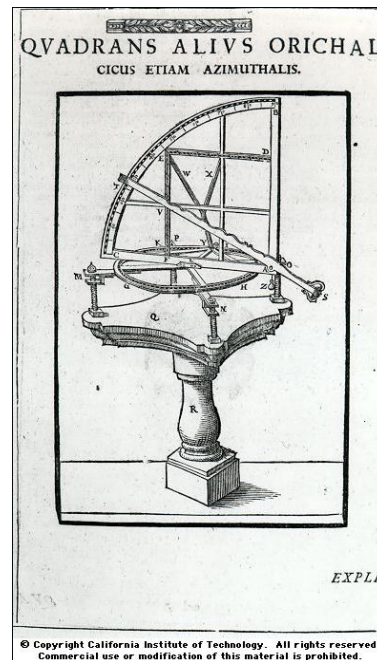
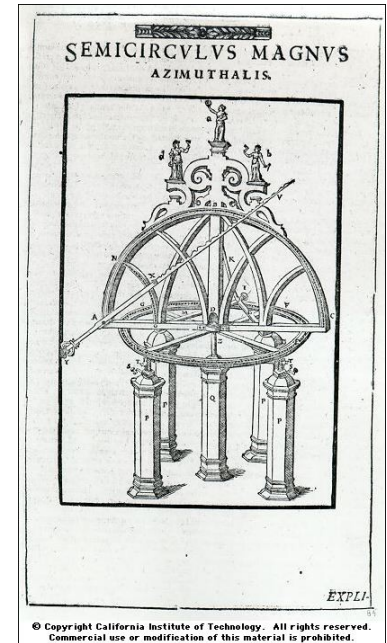
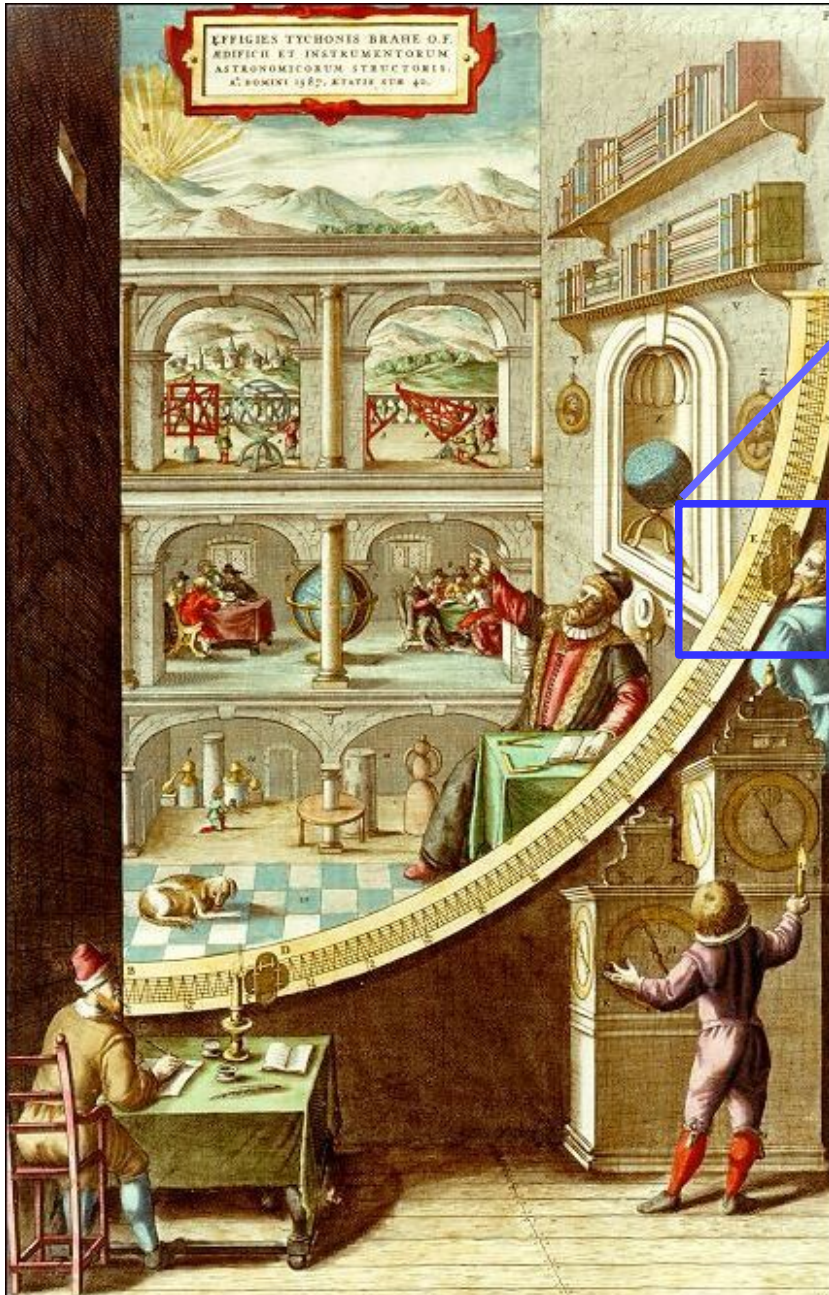
Instrument de mesure : le bâton de Jacob (fin Moyen Age)



- L'élévation de l'astre est d'autant plus grande que le rapport x/d est petit (x variable, selon position de l'astre)

En termes de trigonométrie (inconnue des Grecs) : si ϵ est l'élévation, on mesure x et on calcule $\tan(\epsilon/2) = d / 2x$

Le perfectionnement par Tycho Brahe (1546-1601)

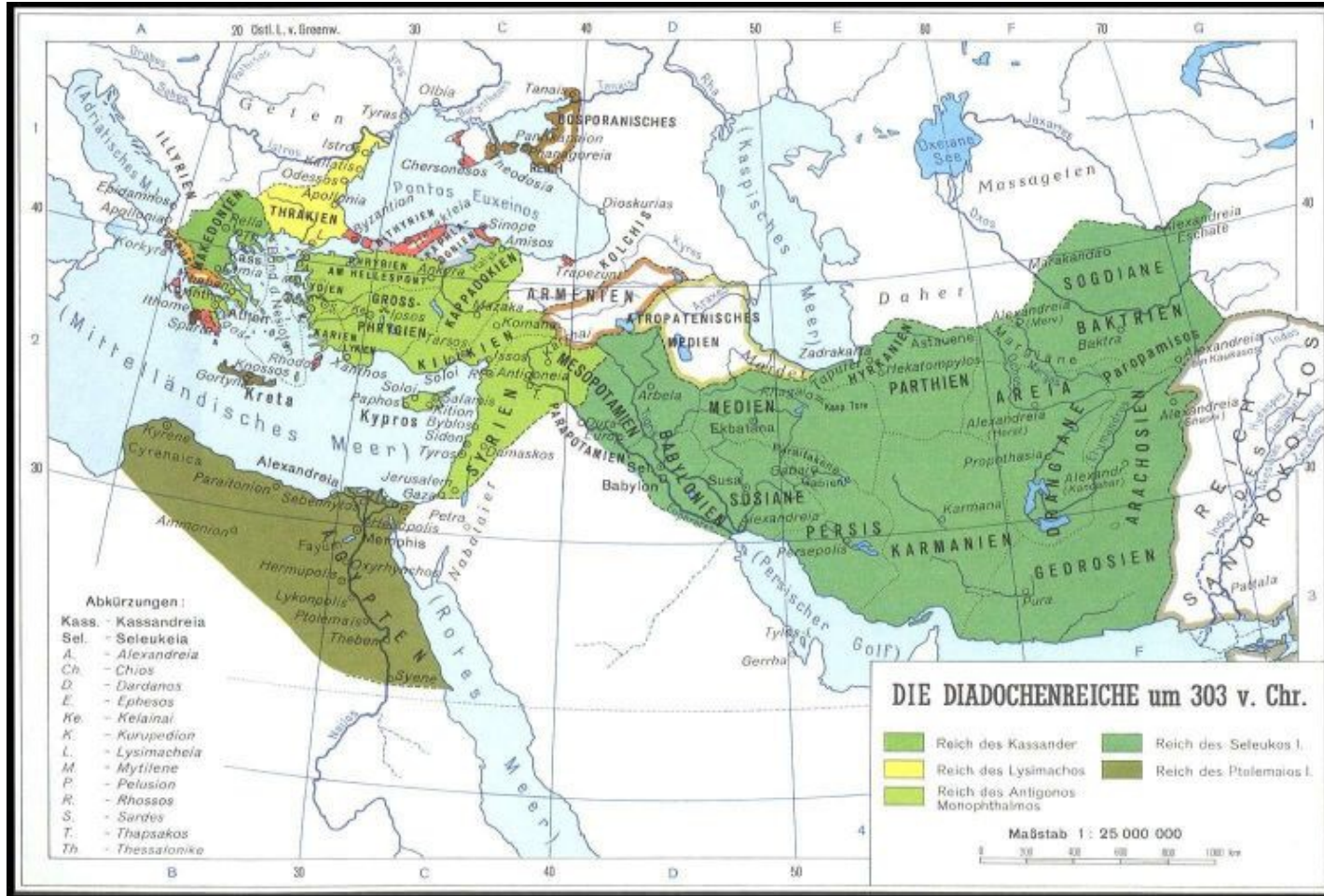


- Apogée des appareils pré-télescopiques
- précision vs. taille: parallaxe stellaire $< 1''$

Alexandrie, l'époque hellénistique

Apogée des mesures
astronomiques dans la Grèce
antique

Le monde hellénistique

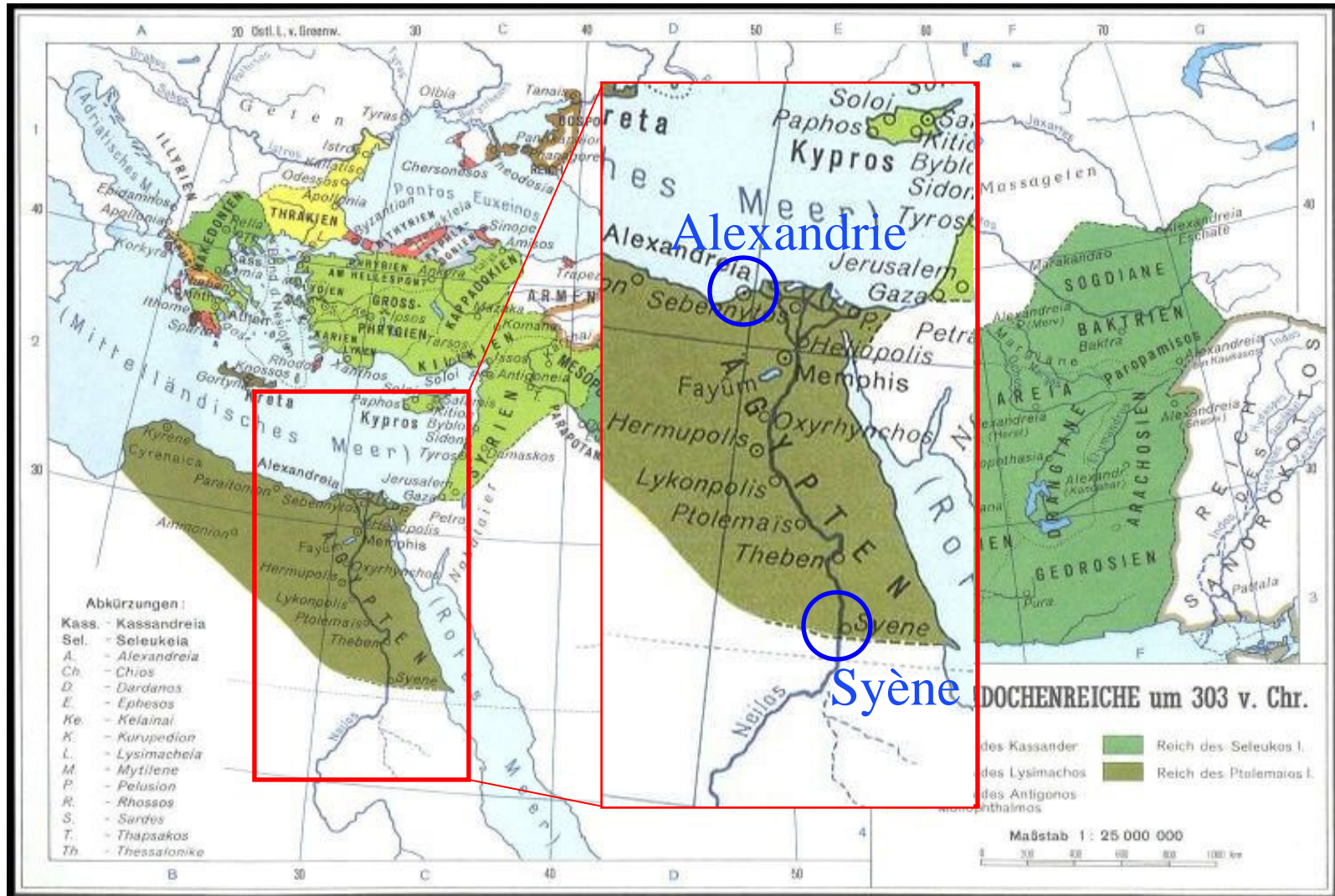


Empires des Diadoques :

Alexandrie haut-lieu de l'astronomie après 300 av JC

Aristarque (310-230), Eratosthène (285-210), Hipparque (180-125), Ptolémée (100-170)

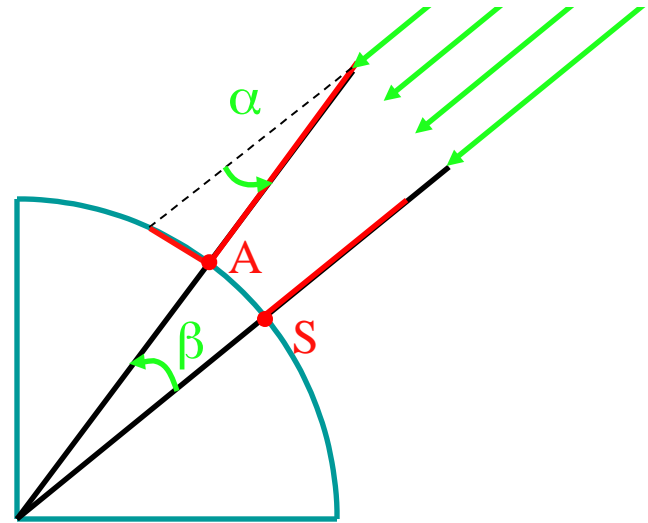
Mesure de la circonférence de la Terre (Eratosthène de Cyrène, env. 285-210)



Mesure de la circonférence de la Terre (Eratosthène de Cyrène, env. 285-210)

- Postulat : la Terre est un point par rapport aux astres (distance quasiment infinie)
 - rayons du soleil parallèles pour tout observateur terrestre
- À Syène (S) près d'Assouan, à midi (solstice) : rayons du soleil parallèles au gnomon (pas d'ombre)

En même temps (midi) à Alexandrie (A), distance 5040 stades : l'ombre du gnomon montre un angle α



Géométrie: $\alpha = \beta$,
Mesure $\alpha \rightarrow AS \approx 1/50$ de la
circonférence du cercle

→ circonférence de la Terre
50 \times 5040 stades
= 252000 stades

Mesure de la circonférence de la Terre (Eratosthène de Cyrène, env. 285-210)

- Incertitude sur la valeur du *stade*
- Néanmoins : estimation du rayon assez proche de la valeur actuelle (1 stade égyptien = 175,5 m :
252000 stades γ 44200 km)
- Mais:
 - pas de mesure précise au sens contemporain, estimations utilisant nombres faciles à manipuler;
 - Syène et Alexandrie n'ont pas la même longitude (le Nil ne s'écoule pas en direction sud-nord)
- Mesure approximative Syène-Alexandrie = 5040 stades: durée voyage des caravanes ou des bateaux + corrections empiriques.
 $1^\circ = 252000 \text{ stades} / 360 = 700 \text{ stades}$ « un nombre trop 'rond' pour être le fruit du hasard » (J. Lefort, *L'aventure cartographique*, Bélin)



Une conséquence: la voie maritime vers les Indes

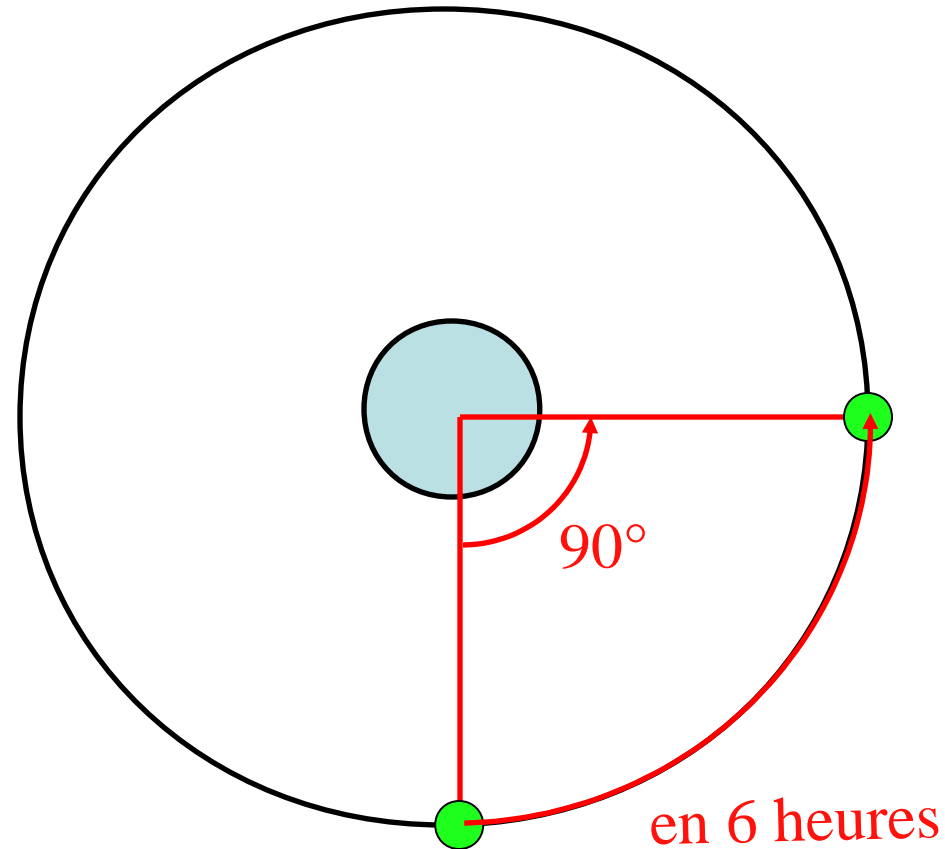
**Il doit être possible d'atteindre l'Inde en navigant
vers l'ouest sur l'Océan Atlantique**

- **Aristote**, *Traité du ciel* : « ... ceux qui supposent que la région des Colonnes d'Hercule touche à celle des Indes, et que de cette manière il n'y a qu'une seule mer, ne semblent pas faire une hypothèse trop incroyable. »
- **Eratosthène**: « On pourrait donc, si la taille de l'Océan Atlantique ne l'empêchait, naviguer le long d'un parallèle de l'Espagne aux Indes sur une distance qui correspond à la différence entre la circonférence de la Terre et la distance restante (= entre l'Espagne et les Indes). Cette dernière vaut plus d'un tiers du cercle. »
- **Sénèque** (-4, +65): « Quelle est la distance entre la côte extrême de l'Espagne et les Indes ? C'est une distance de quelques jours, si un vaisseau navigue sous des vents favorables. »

Comment mesurer la longitude géographique ?

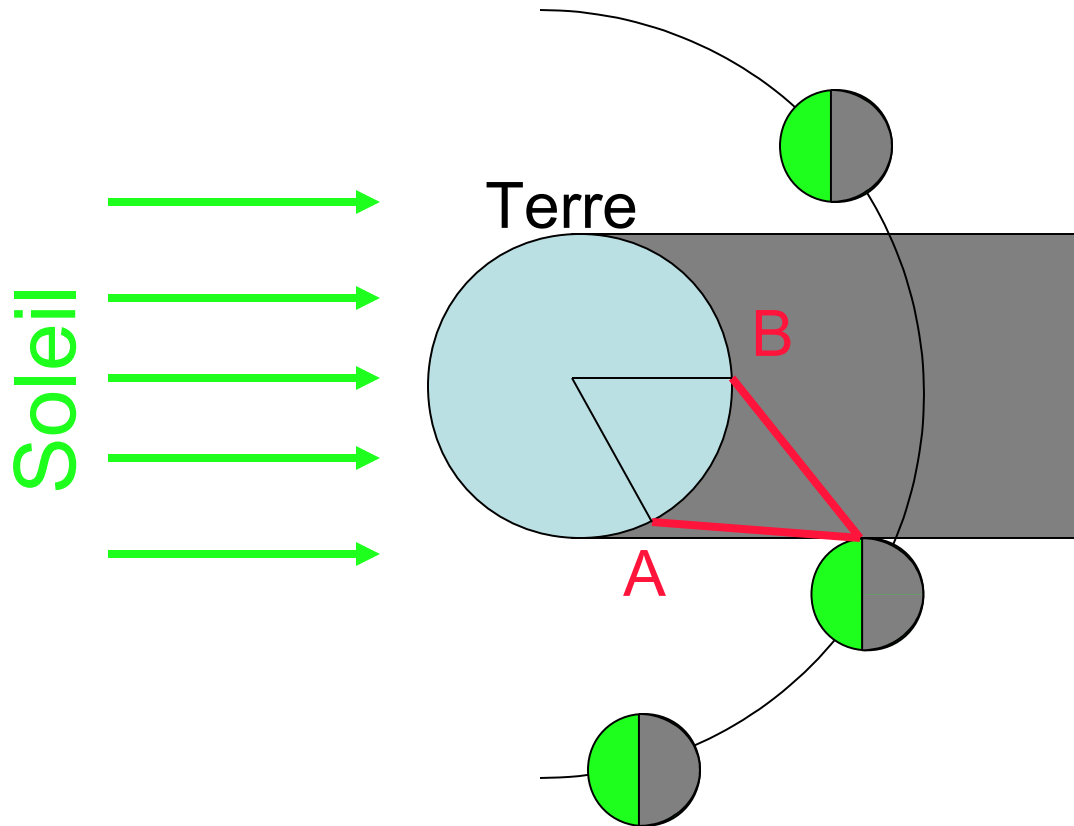
Un astre « tournant » autour de la Terre parcourt en 6 heures un angle de 90° (= 15° en 1 heure etc.). Même résultat si Terre tourne autour de son axe.

- **Différence des longitudes géographiques de 2 endroits**
 - différence des heures de passage de l'astre aux méridiens (=au sud).
 - mesurer la différence des heures de passage au méridien du même astre aux deux endroits.
- **Problème** : comment mesurer cette différence de temps (horloges stables ou communication instantanée) ?
- **Tentatives antiquité** : mesurer différence d'heures locales d'un phénomène simultané aux deux endroits (éclipse).



Vue sur la Terre depuis son pôle nord

Une éclipse de Lune vue de différents endroits sur la Terre



- Mesurer l'entrée de la Lune dans l'ombre de la Terre.

- vers 19 heures (locales) en A
- à minuit en B

- Différence γ 5 heures en heure locale \leftrightarrow différence en longitude $\sim 5/24 \times 360^\circ = 75^\circ$

Mesure du temps chez les Grecs

- Cadran solaire : heure solaire locale, non transportable
- Sablier, pouls ...
- Horloge hydraulique (« clepsydre ») : écoulement d'eau d'un récipient à un autre (non transportable) ⁽¹⁾
- Avant l'invention d'horloges mécaniques stables (Renaissance), on ne pouvait comparer le temps à deux endroits éloignés.

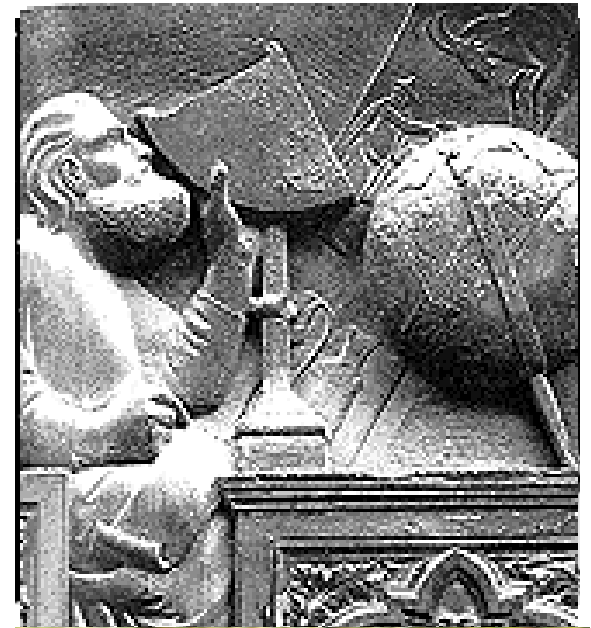
(1) Horloge hydraulique de l'Agora à Athènes (4ème siècle av JC): installée sur une route passagère; début évacuation au lever du Soleil, durée d'évacuation 17 heures



Résumé : la Terre dans l'Univers selon l'antiquité grécque

- **Problème** : instruments rudimentaires (mesures angles: gnomon; temps: cadran solaire, sablier, clepsydre).
 - **Approche sceptique** de l'observation et de la méthode empirique (ex.: mythe de la caverne) à l'époque classique (mais : différence Platon - Aristote).
- **forte influence de réflexions philosophiques non reliées à des faits observés (orbites circulaires)⁽¹⁾**

(1) critère qui persiste aujourd'hui: « beauté », « élégance » d'une description physique



Résumé (suite)

- Importance attribuée à la perception sensorielle à partir d'Aristote (≠ Platon !), à côté de la spéculation philosophique :
- Mesures des distances sur la Terre et du système Terre-Lune-Soleil, fondées sur des modèles (époque hellénistique) - ingénieuses, bien que parfois peu précises.
- Cadre :
 - modèle géocentrique du monde, justifié par des observations et une profonde (bien que partiellement erronée) réflexion sur la physique,
 - notamment sur la dynamique (pesanteur) - d'où la conception du centre de l'Univers comme centre d'attraction où la Terre doit se situer (voir cours suivants).



<http://ipc2e.cnrs-orleans.fr/~theureau/histoire.html>

theureau@cnrs-orleans.fr