

Evolution de l'Univers - évolution de nos idées sur l'Univers

1. Le ciel de l'antiquité grecque, mesures et observations.
2. Les systèmes du monde, la Voie Lactée - spéculations philosophiques.
3. Les problèmes du système géocentrique et l'avènement d'une nouvelle conception de l'Univers.
4. Pourquoi les planètes se meuvent-elles ? Développement des idées sur la gravitation.

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

Gilles Theureau, LPCE Orléans

Karl-Ludwig Klein, Observatoire de Meudon, ludwig.klein@obspm.fr, 01 45 07 77 61

Evolution de l'Univers - évolution de nos idées sur l'Univers

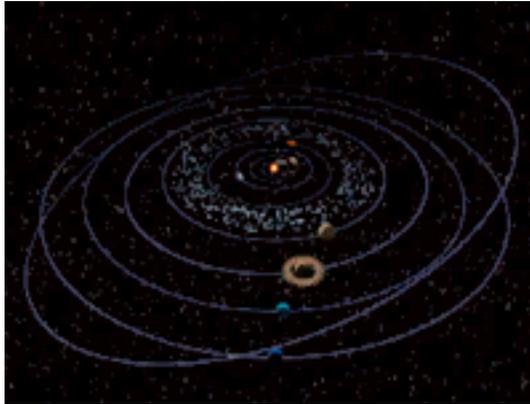
5. La nature du Soleil et des étoiles.
6. La naissance de l'Astrophysique.
7. La Voie Lactée comme strate d'étoiles. Structures et modèles.
8. La nature des nébuleuses et les théories cosmogoniques.
9. Matière interstellaire, rotation Galactique, échelles de distances...
10. La Galaxie : modèles contemporains.

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

Gilles Theureau, LPCE Orléans

Karl-Ludwig Klein, Observatoire de Meudon, ludwig.klein@obspm.fr, 01 45 07 77 61

L'Univers : la vue contemporaine

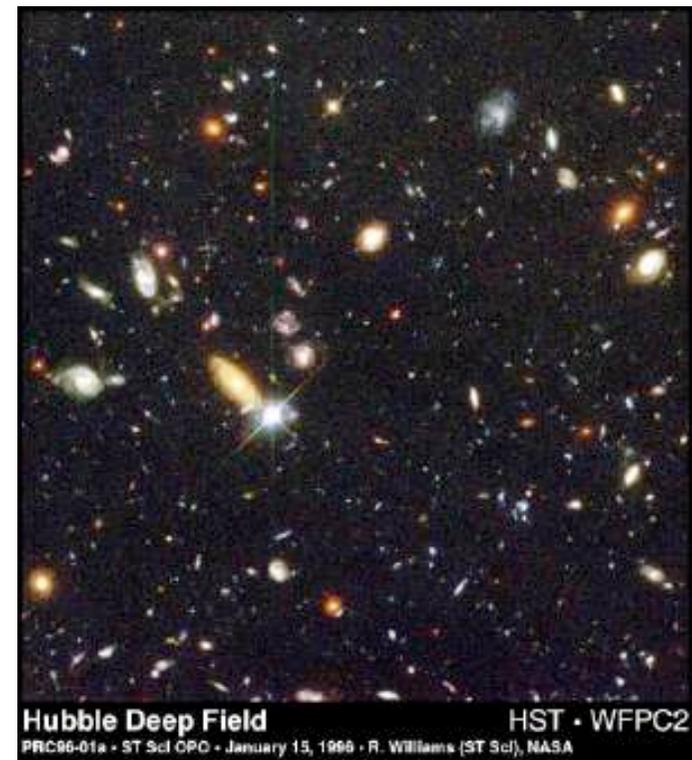


Un système
planétaire ...



... à la périphérie
d'une galaxie ...

Comment sommes-nous
arrivés à cette vue-là ?



... dans un ensemble de
milliards de galaxies.

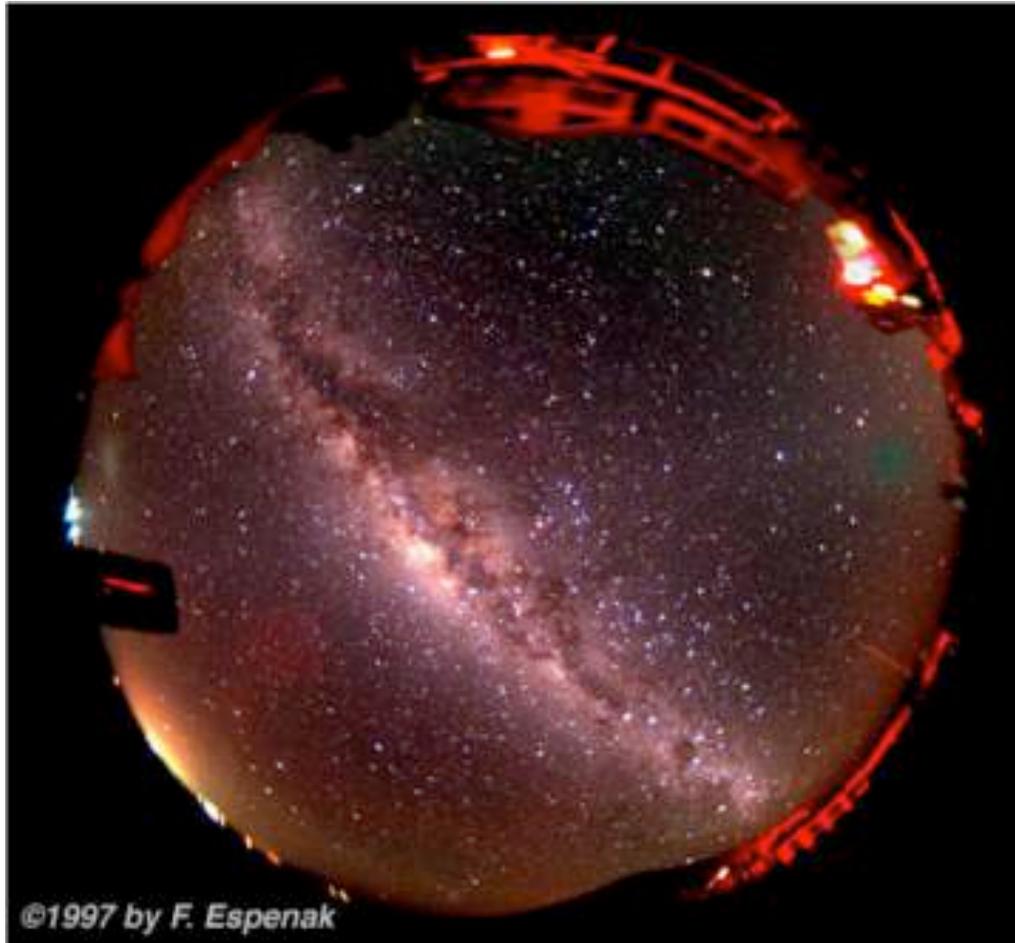
Evolution de l'Univers - évolution de nos idées sur l'Univers

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 ?

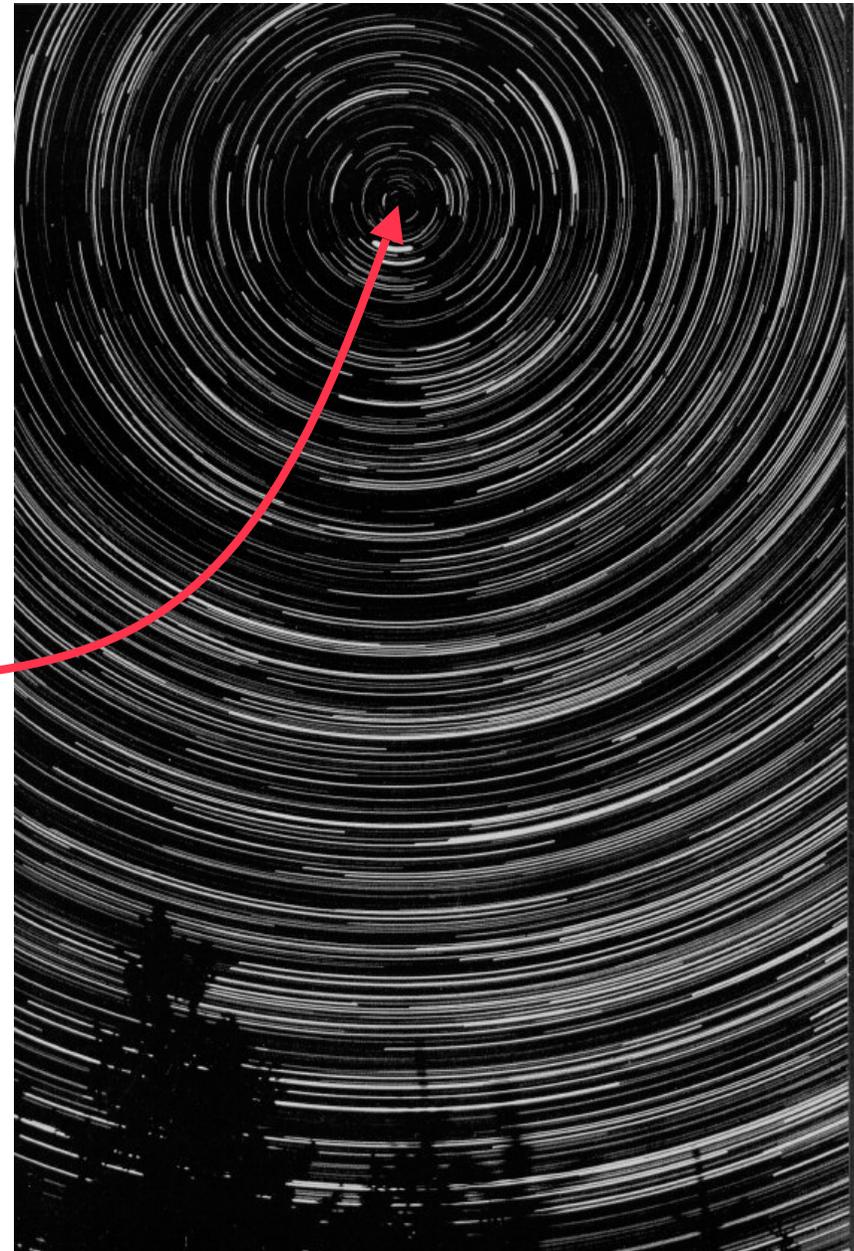


©1997 by F. Espenak

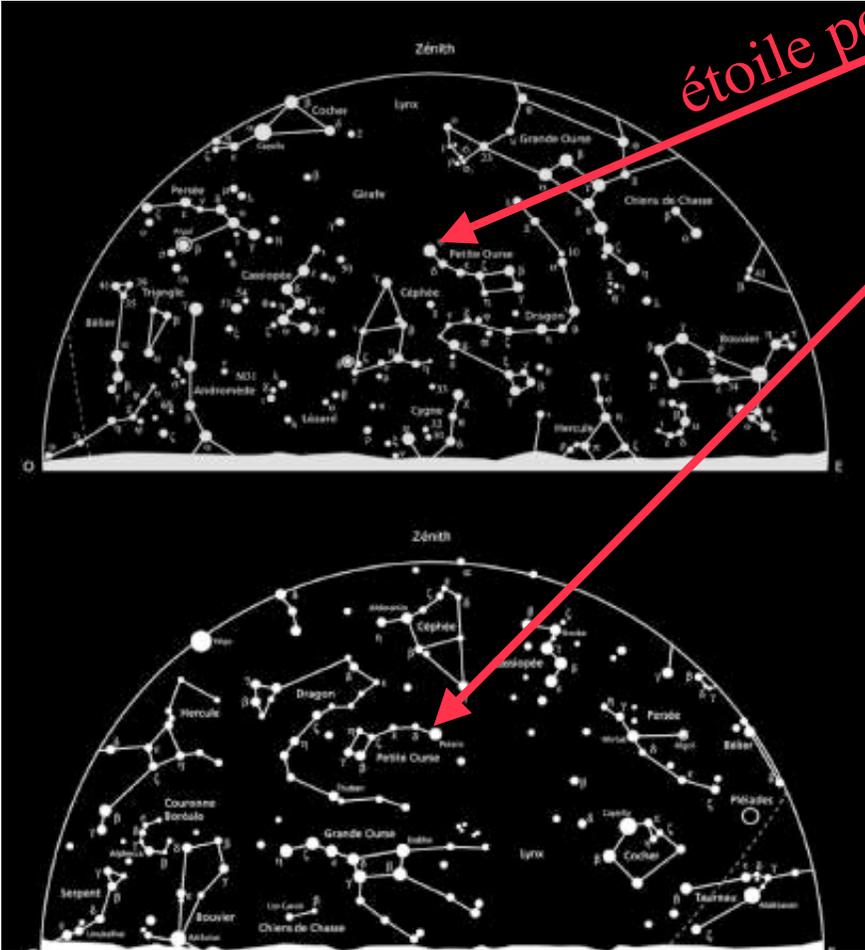
- Cliché ciel entier, pose longue
- Étoiles
- Voie lactée (galaxie)
- Aucune notion de la distance des objets: apparence d'une « sphère céleste »

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 ? \Rightarrow vues héliocentrique et géocentrique.



Vues du ciel à ≈ 14 heures d'intervalle : constellations.



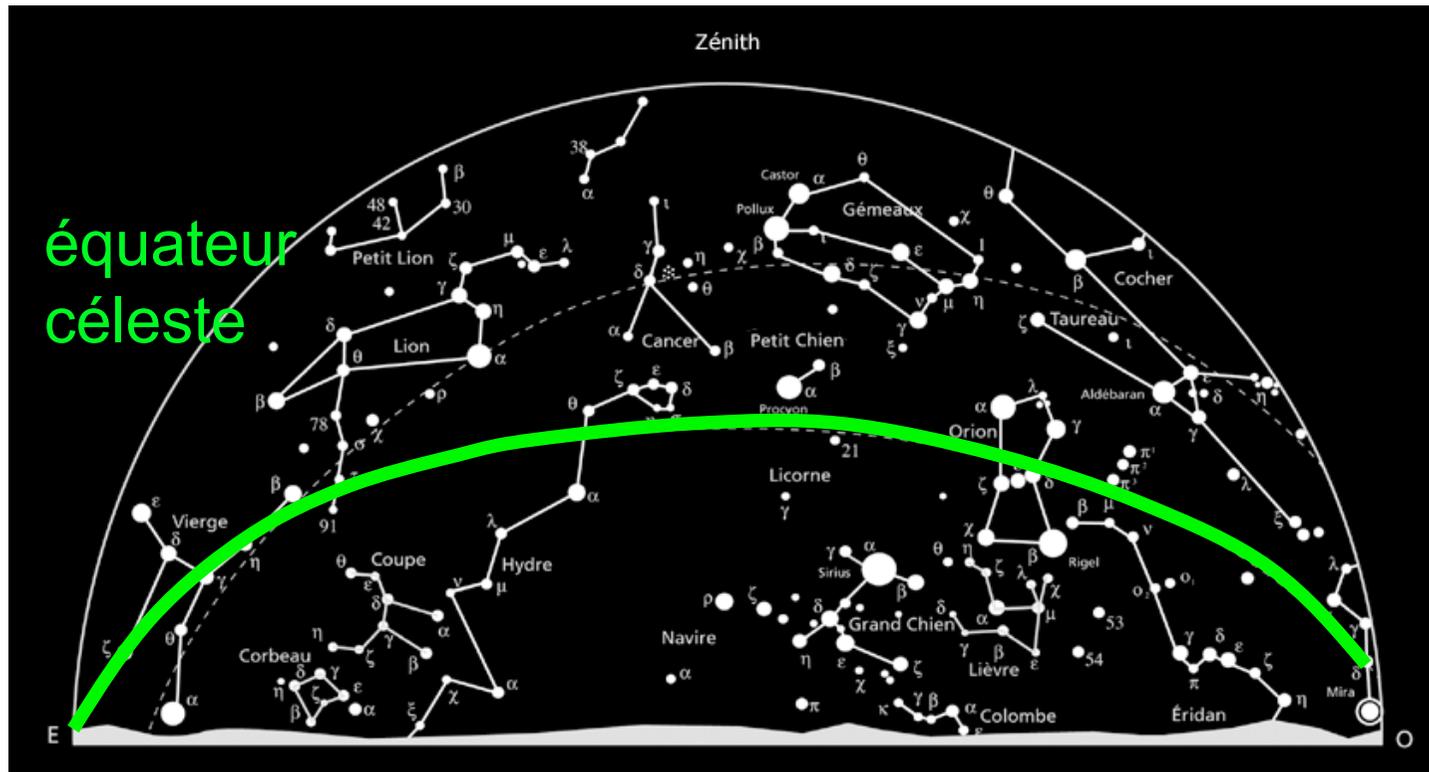
étoile polaire



La sphère céleste

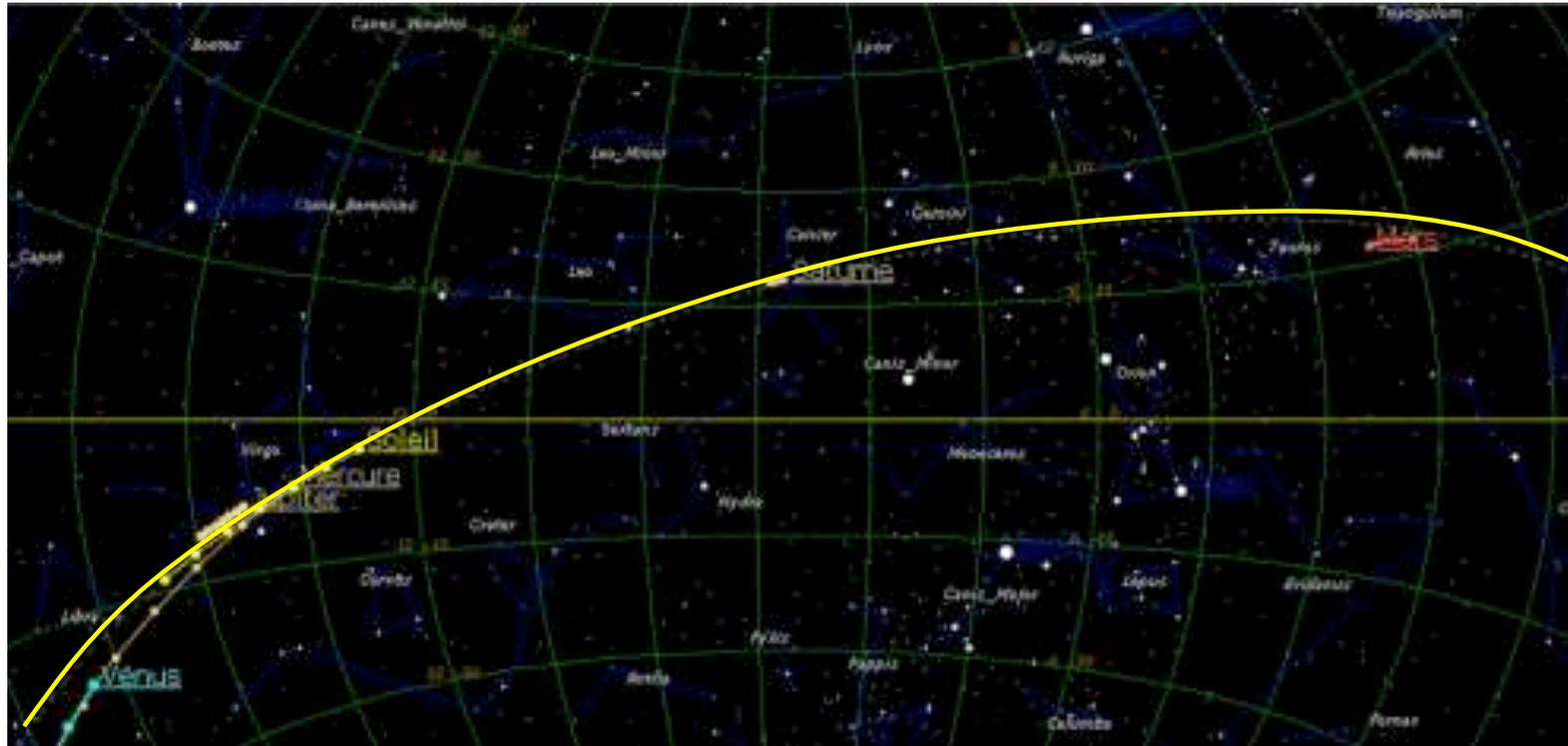


- Nous distinguons sur une sphère qui tourne :
- l'axe de rotation, pôles (→ étoile polaire)
 - l'équateur (intersection sphère - plan perpendiculaire à l'axe).



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'

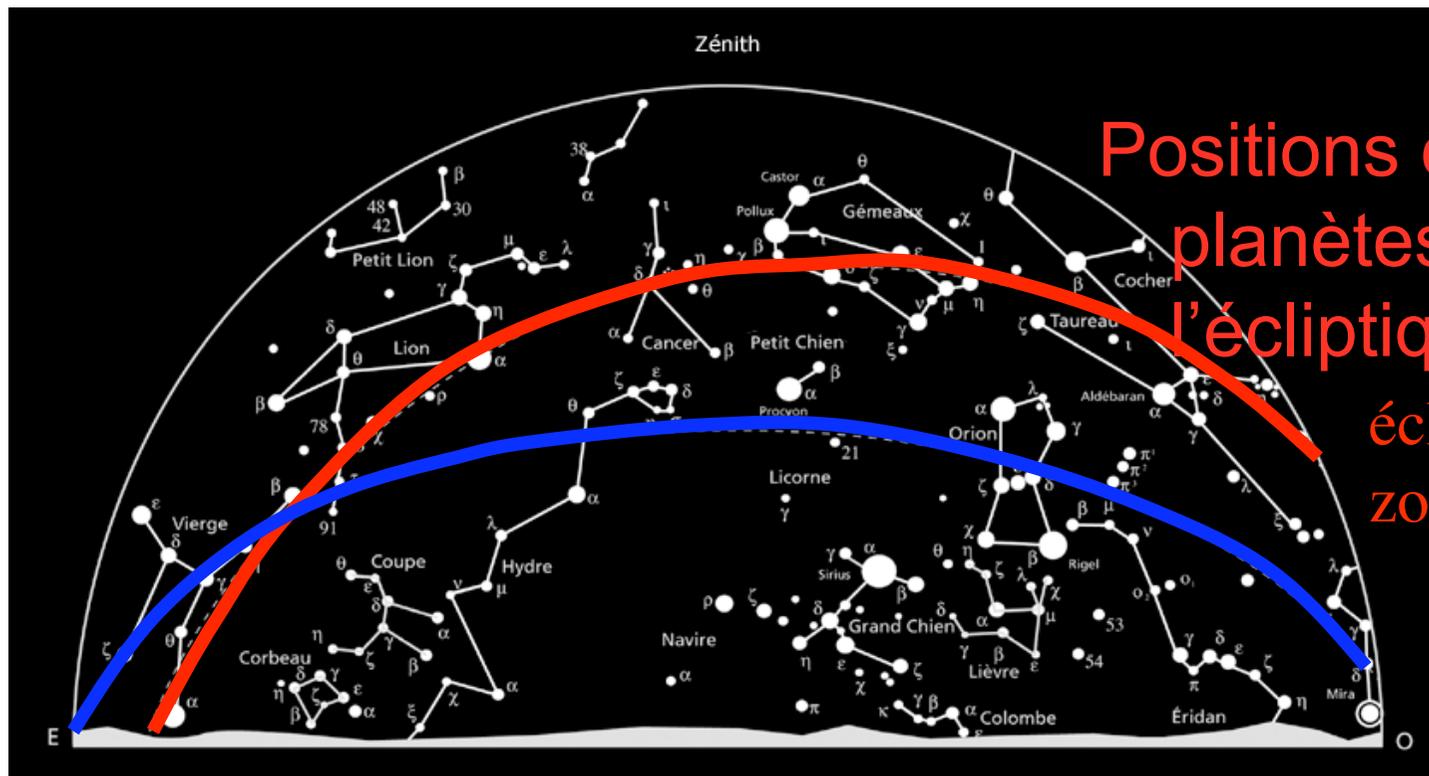


<http://www.astrosurf.com/saf/>

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

(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

La Grèce aux alentours de 432 av JC



http://www.ac-nancy-metz.fr/enseign/lettres/LanguesAnciennes/Textes/URL_doc_acc_grec.html

- Début des réflexions non-mythologiques sur la Terre et l'Univers chez les Grecs (Asie mineure, puis Athènes, Italie du Sud): « Ce cosmos - il est identique pour tous les êtres - ne fut créé par aucun Dieu et aucun homme. » (Héraclite, ~576-480)

L'astronomie dans l'antiquité grecque (1)

- Comprendre la forme de la Terre et la nature des mouvements des astres (Lune, Soleil, planètes, étoiles)
- Développer des modèles et les utiliser pour mesurer l'« Univers » (=système planétaire, entouré de la sphère des étoiles « fixes »)
- Depuis Platon : décrire les mouvements des 'planètes' à l'aide d'orbites circulaires

L'astronomie dans l'antiquité grecque (2)

- Peu de réflexions sur la nature des astres; mais Anaxagore (~ 500-428): « *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): 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 19^{ème} siècle).

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

La forme de la Terre

Du disque vers la sphère

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

- Disque cylindrique (diamètre = $3 \times$ hauteur; Anaximandre), disque plat (Anaximène, milieu 6^{ème} siècle)
- Surface courbe (début 5^{ème} siècle; Parménide ?), flotte librement dans l'espace
- Sphère (milieu 5^{ème} siècle; Parménide, Pythagoriciens ?)

La Terre est une sphère

- Plus ancien document écrit: Platon vers 363 av JC (spéculation philosophique)
- Aristote (*Traité du ciel*¹ Livre II ch. 14) : Conclusion tirée de réflexions sur la chute des corps ...

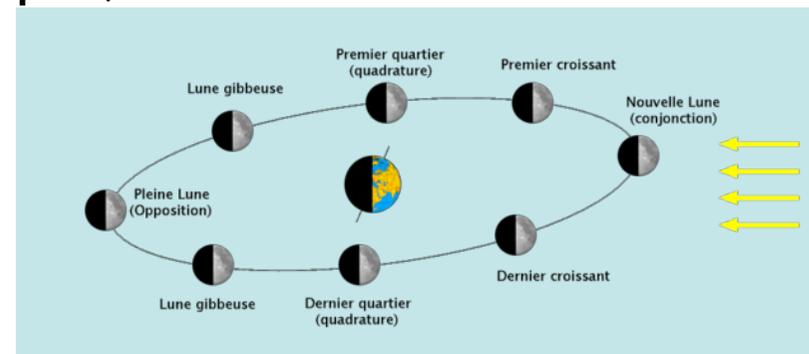
«Quant à sa forme [celle de la Terre], il est nécessaire qu'elle soit sphérique. En effet, chaque morceau de terre a une pesanteur jusqu'à ce qu'il arrive au centre. ... Que donc, si les parties se portent de toutes parts vers un centre unique à partir des extrémités de la même manière, il soit nécessaire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

La Terre est une sphère

- ... et d'une observation:

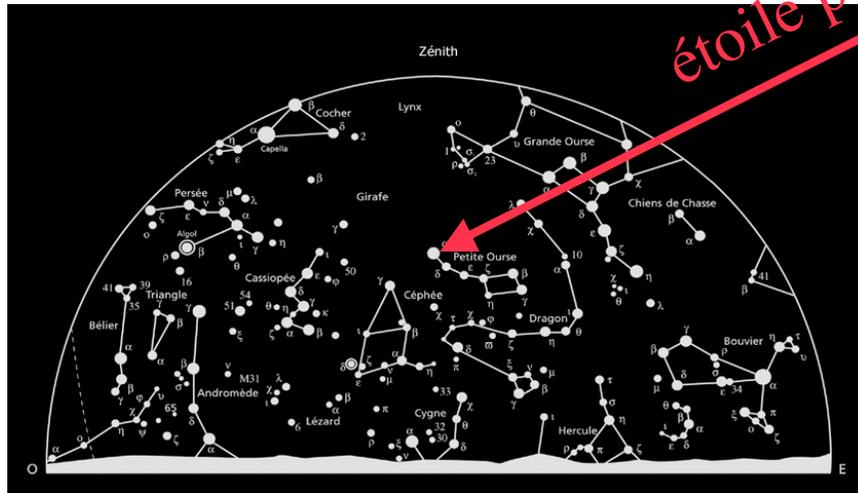
«De plus, il y a aussi des phénomènes saisis par la perception. ... dans les figures qu'elle prend tous les mois, la lune présente toutes les divisions (droite, biconvexe, concave), mais au cours des éclipses la ligne qui limite la Lune est toujours convexe, de sorte que, puisqu'il y a éclipse du fait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



La Terre dans l'Univers

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

- Vue du ciel, direction nord, mars



• Les constellations (cf. dessus)
Soc. Astro. France, <http://www2.lap.fr/saf/accueil.html>

- Cliché du ciel avec caméra fixe (à droite)



Comment interpréter le mouvement des astres ?

1. Les étoiles sont « fixées » sur la sphère céleste qui tourne autour de la Terre.

Ou

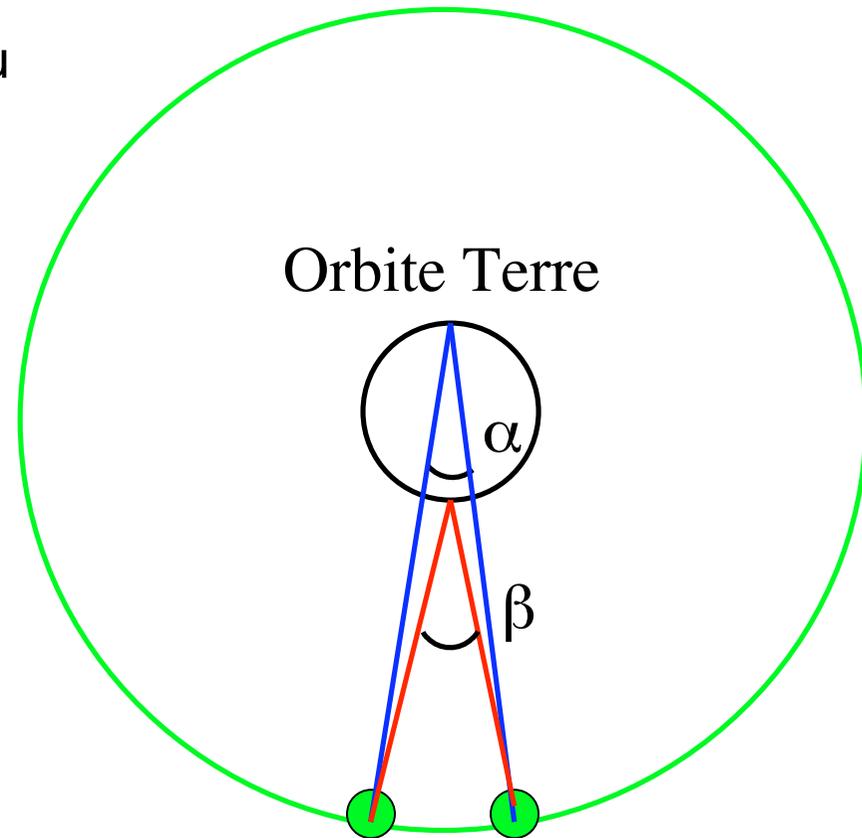
2. La Terre tourne autour d'elle-même, le mouvement diurne des étoiles en est le reflet.
- L'idée que la Terre est mobile existe en Grèce (Pythagoriciens, Aristarque), mais ne s'impose pas. L'immobilité de la Terre est la conséquence d'un ensemble d'observations et de réflexions (astronomie & physique).

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

- Mouvement de la Terre - rotation ou orbite - implique force (nom contemporain : force centrifuge) : elle n'est pas perceptible (vrai à l'époque, *faux aujourd'hui*), donc Terre au repos.
- 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 !) \Rightarrow Terre immobile



2 étoiles sur la sphère céleste

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

- Mouvement de la Terre - rotation ou orbite - implique force (nom contemporain : force centrifuge) : elle n'est pas perceptible (vrai à l'époque, *faux aujourd'hui*), donc Terre au repos.
- 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 étoiles sont lointaines*).
- Pesanteur vers centre de l'Univers, donc Terre au centre de l'Univers.

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



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

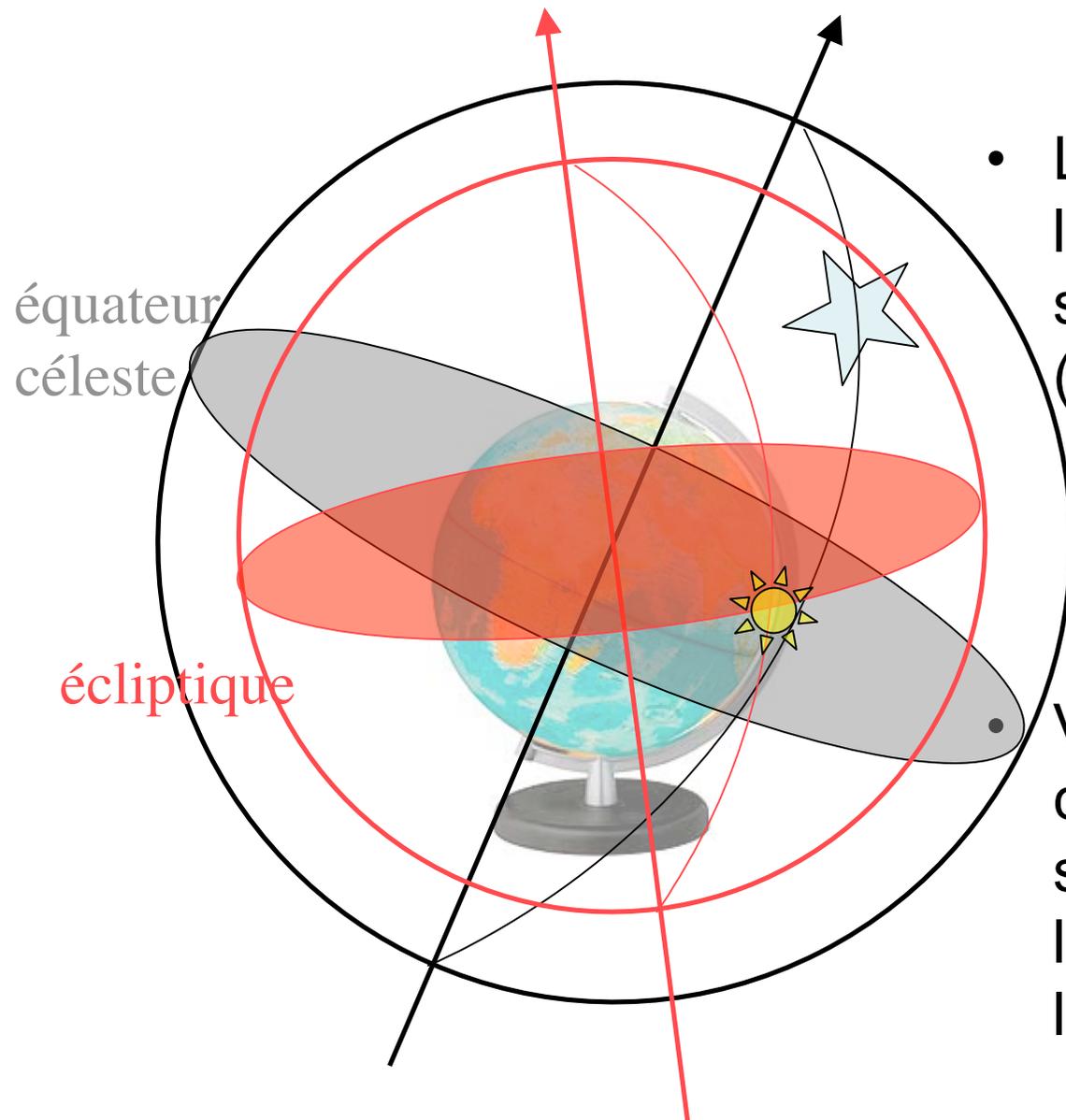
- Lune, Soleil, planètes se déplacent sur le fond des étoiles « fixes »
- Trajectoire du Soleil (modèle géocentrique): écliptique (héliocentrique : projection de l'orbite de la Terre)
- planètes & Soleil suivent presque la même trajectoire⁽¹⁾
- Déplacement plus rapide pour Mercure et Vénus (planètes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

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

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

- Expliquer les mouvements des planètes par un système de sphères concentriques en rotation autour d'axes différents. Chaque sphère est montée dans une autre, la dernière étant la sphère des étoiles 'fixes' ('homo'=commun). Les vitesses de rotation sont constantes, mais différentes.
- Eudoxe de Cnide (408-355) : construction géométrique ? Aristote : 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, ...)

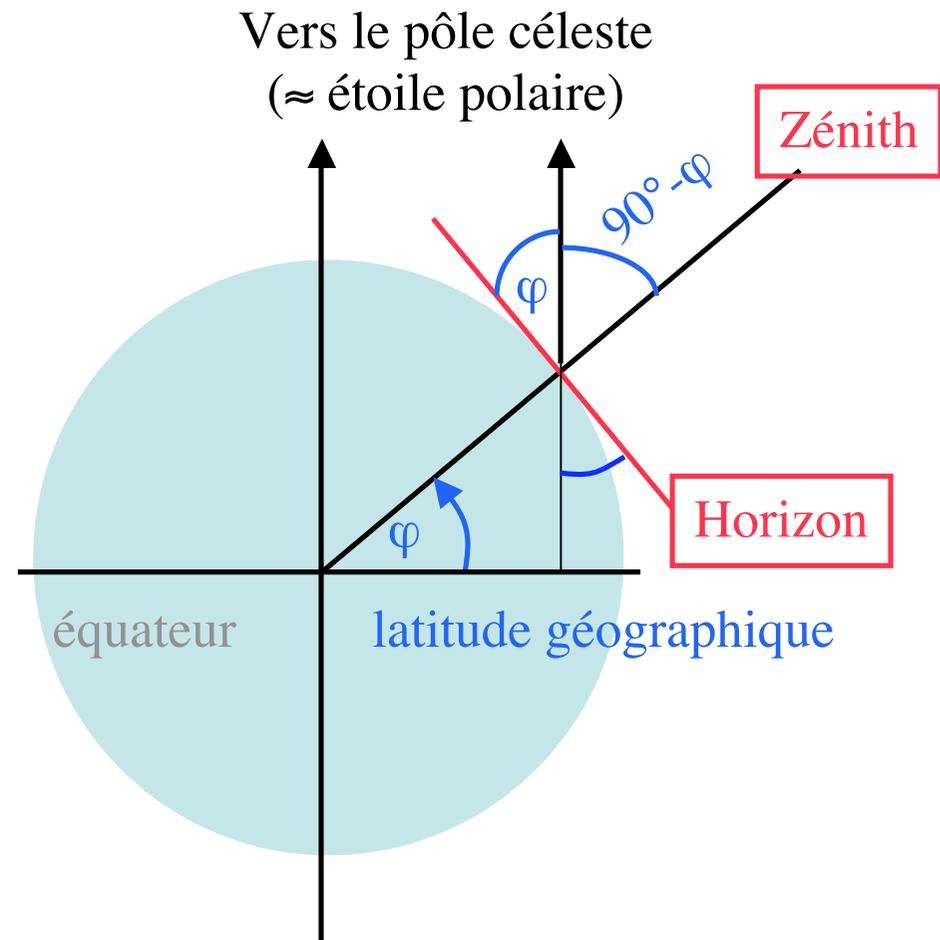


- La Terre au centre de l'Univers, entourée de sphères concentriques ('homocentriques') :
 - Sphère céleste portant les étoiles 'fixes'
 - Sphère portant la 'planète' (ici : Soleil)
- Vitesses de rotation constantes de chaque sphère, mais différentes : le Soleil se meut devant le fond des étoiles fixes.

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



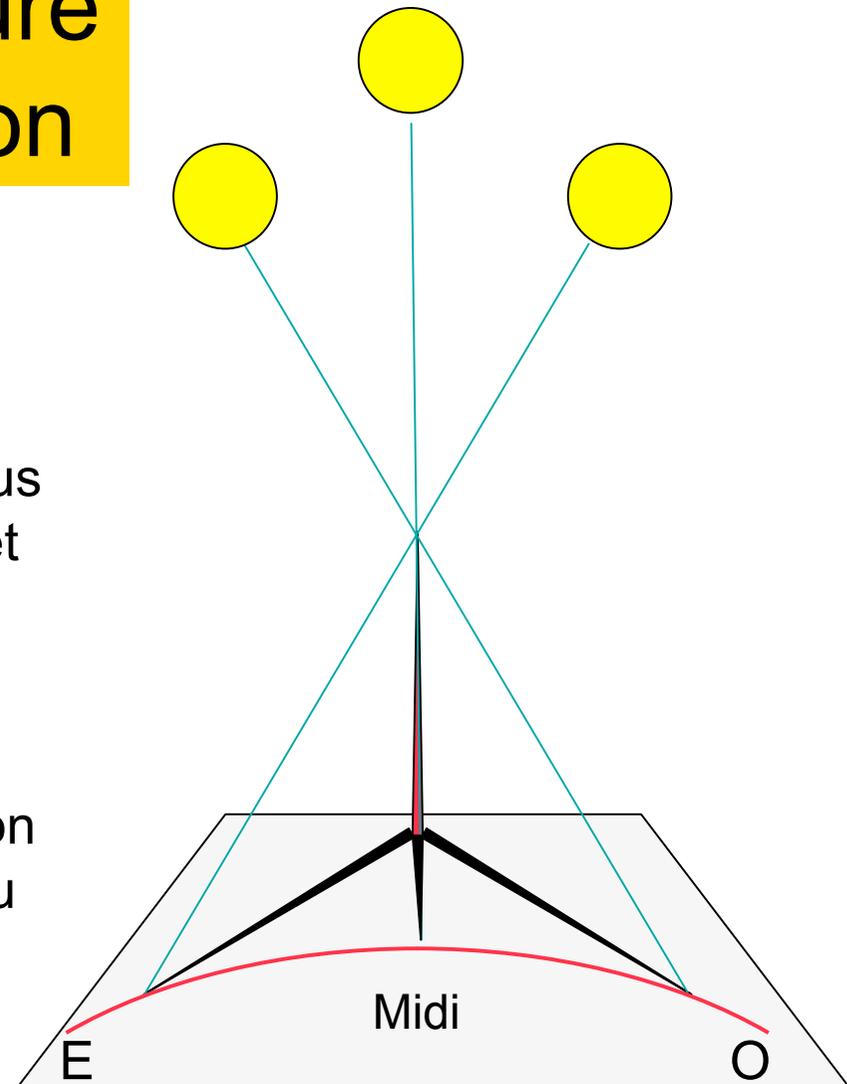
Se repérer sur la Terre sphérique

- Latitude géographique = hauteur (élévation) du pôle céleste au-dessus de l'horizon
 - Mesurer l'élévation de l'étoile polaire
 - Mesurer le minimum et le maximum de l'élévation d'une étoile circumpolaire, prendre la moyenne
 - Mesurer l'élévation du Soleil à midi



Un instrument de mesure élémentaire : le gnomon

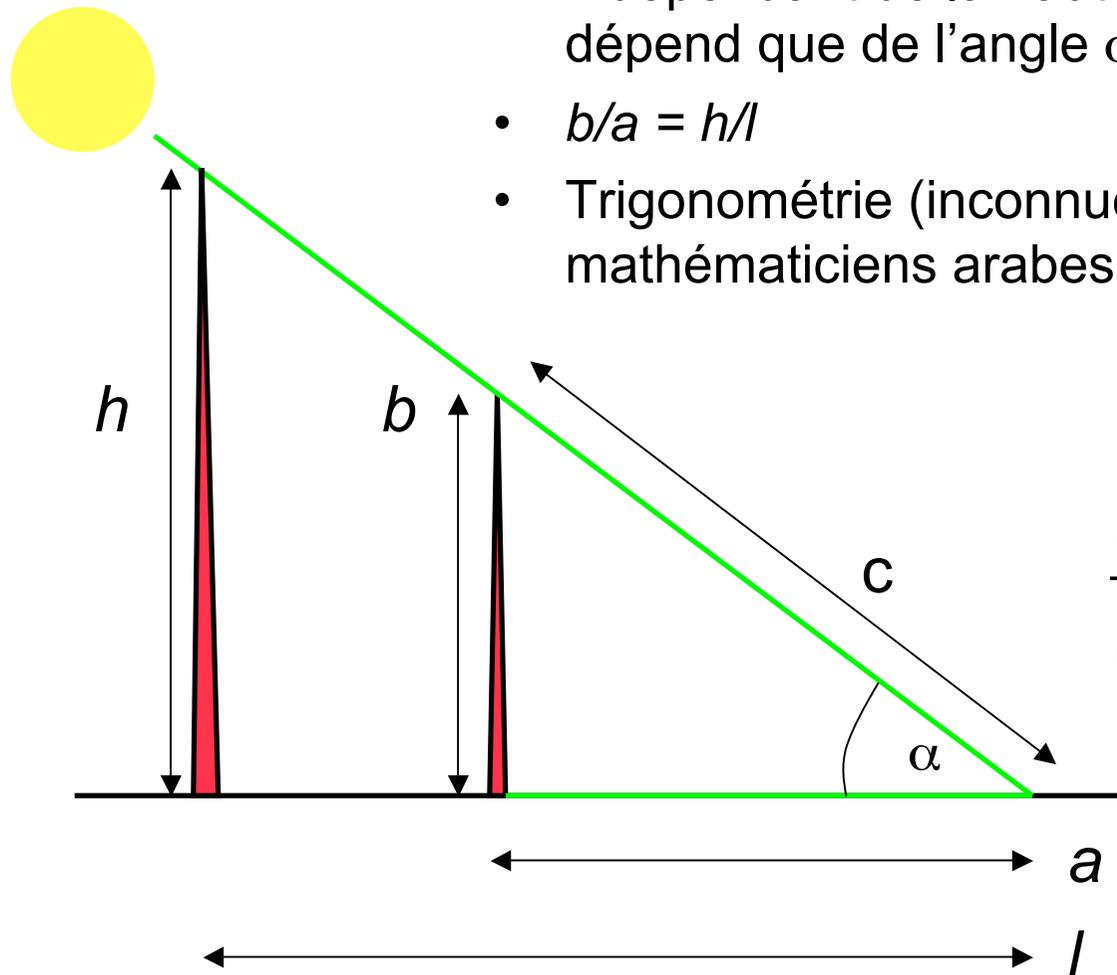
- Baguette verticale
- Midi : Soleil le plus haut / ombre la plus courte (mesures de l'instant du midi et de la durée du jour solaire; cadran solaire)
- Midi: Soleil au sud / ombre en direction nord-sud (mesure de la méridienne du lieu d'observation)



Rappel de trigonométrie

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

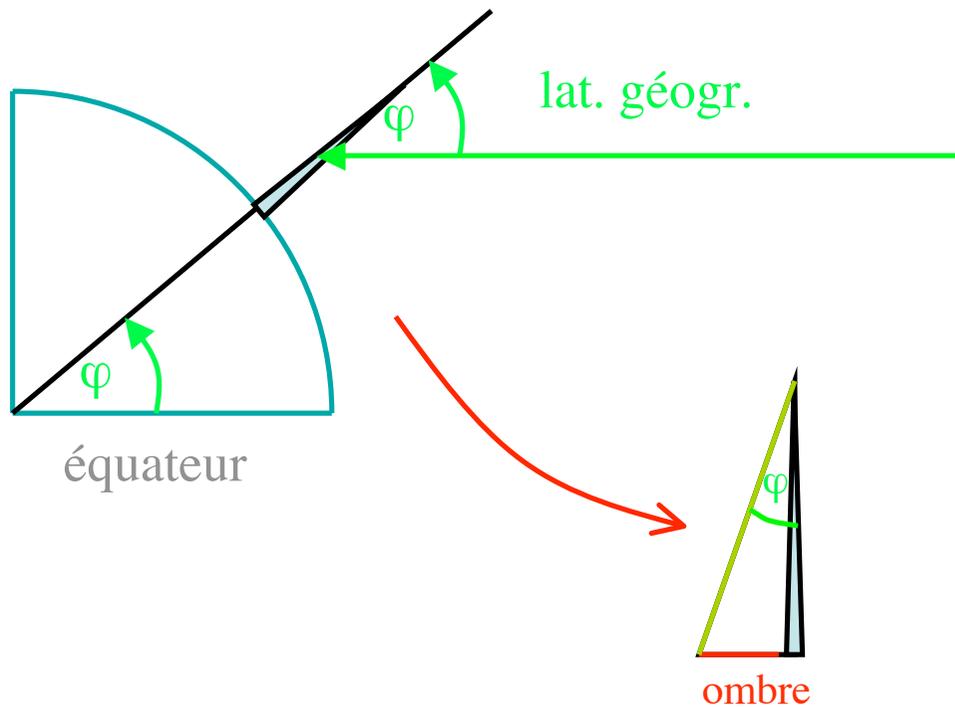
- indépendant de la hauteur de l'objet; ne dépend que de l'angle α (Thales)
- $b/a = h/l$
- Trigonométrie (inconnue des Grecs; mathématiciens arabes) :



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

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

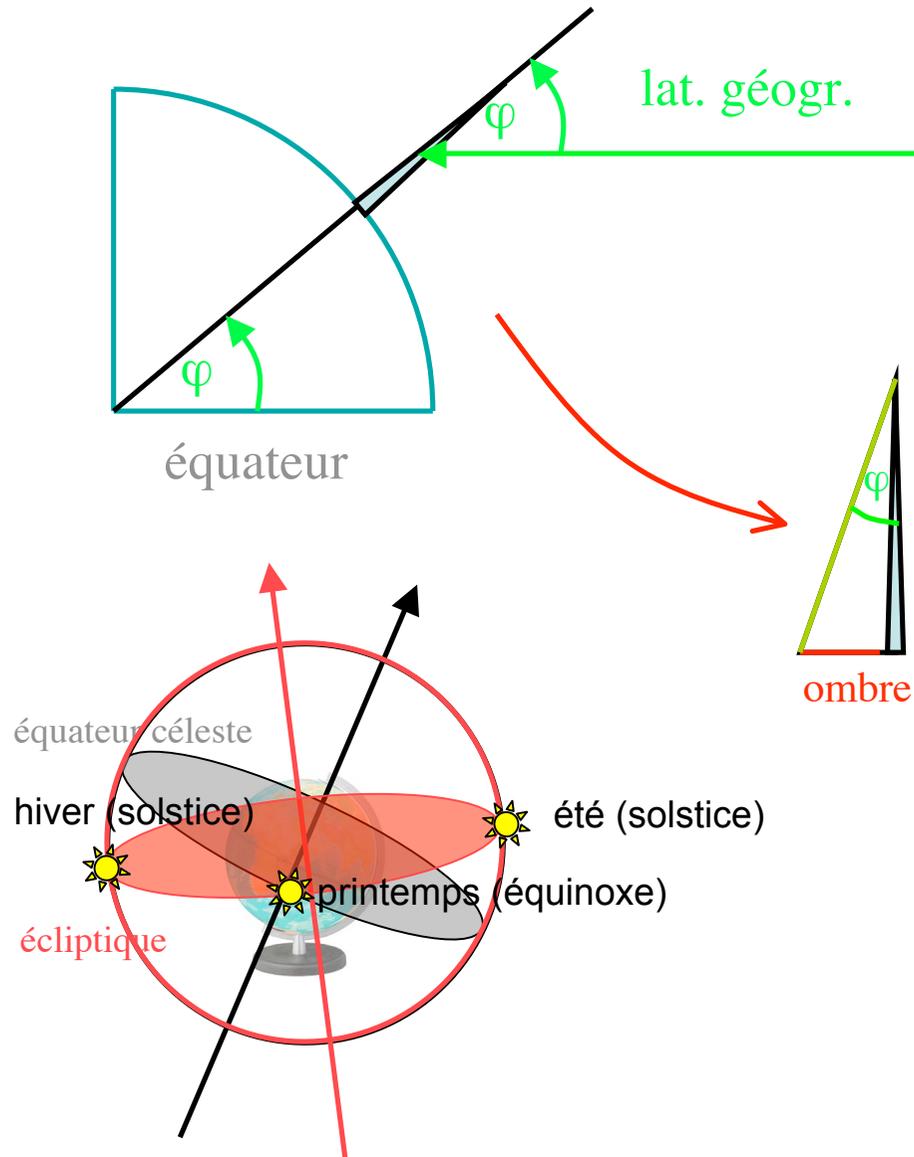
Mesurer la latitude géographique



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

$$\tan \varphi = \text{ombre} / \text{gnomon}$$

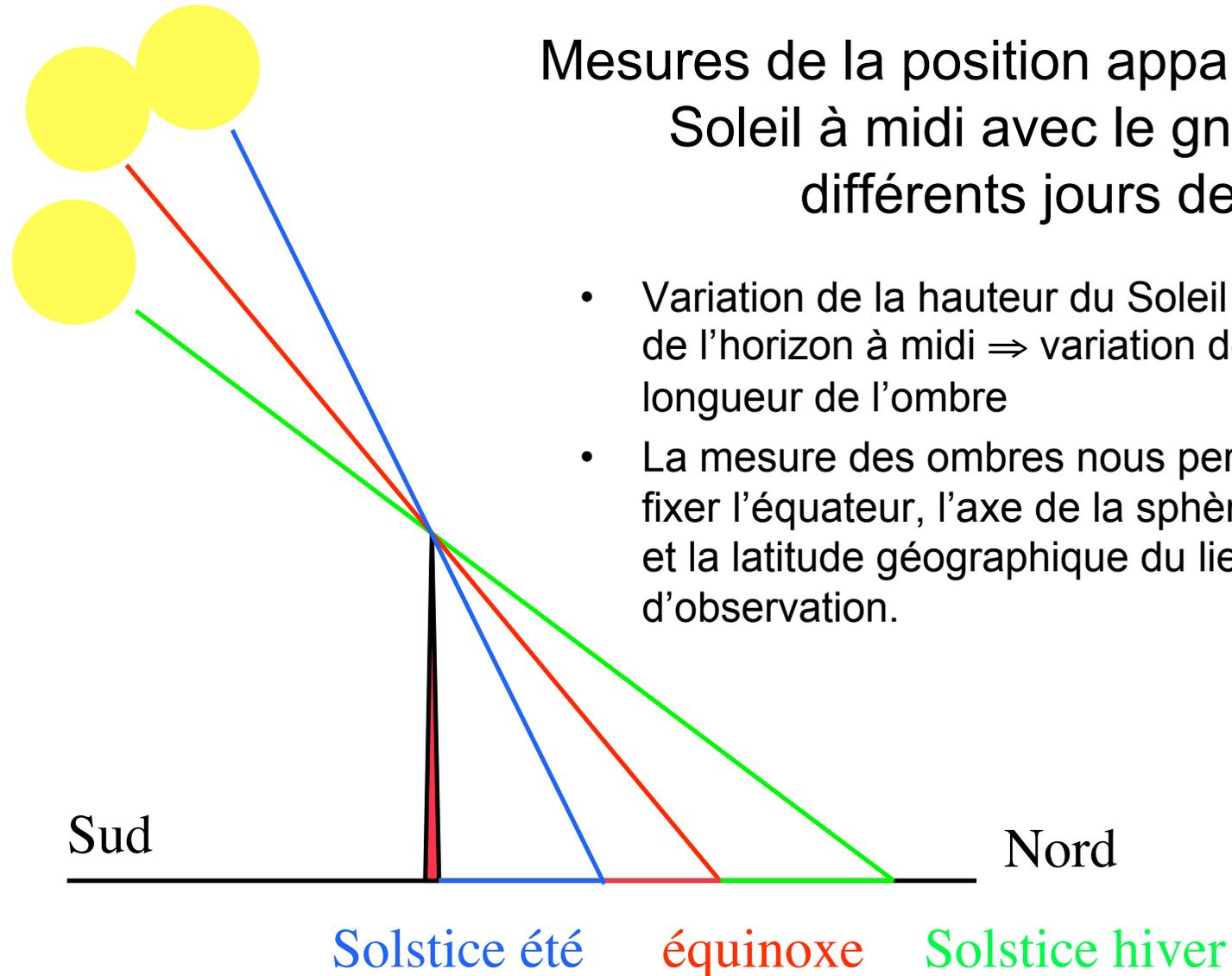
Mesurer la latitude géographique



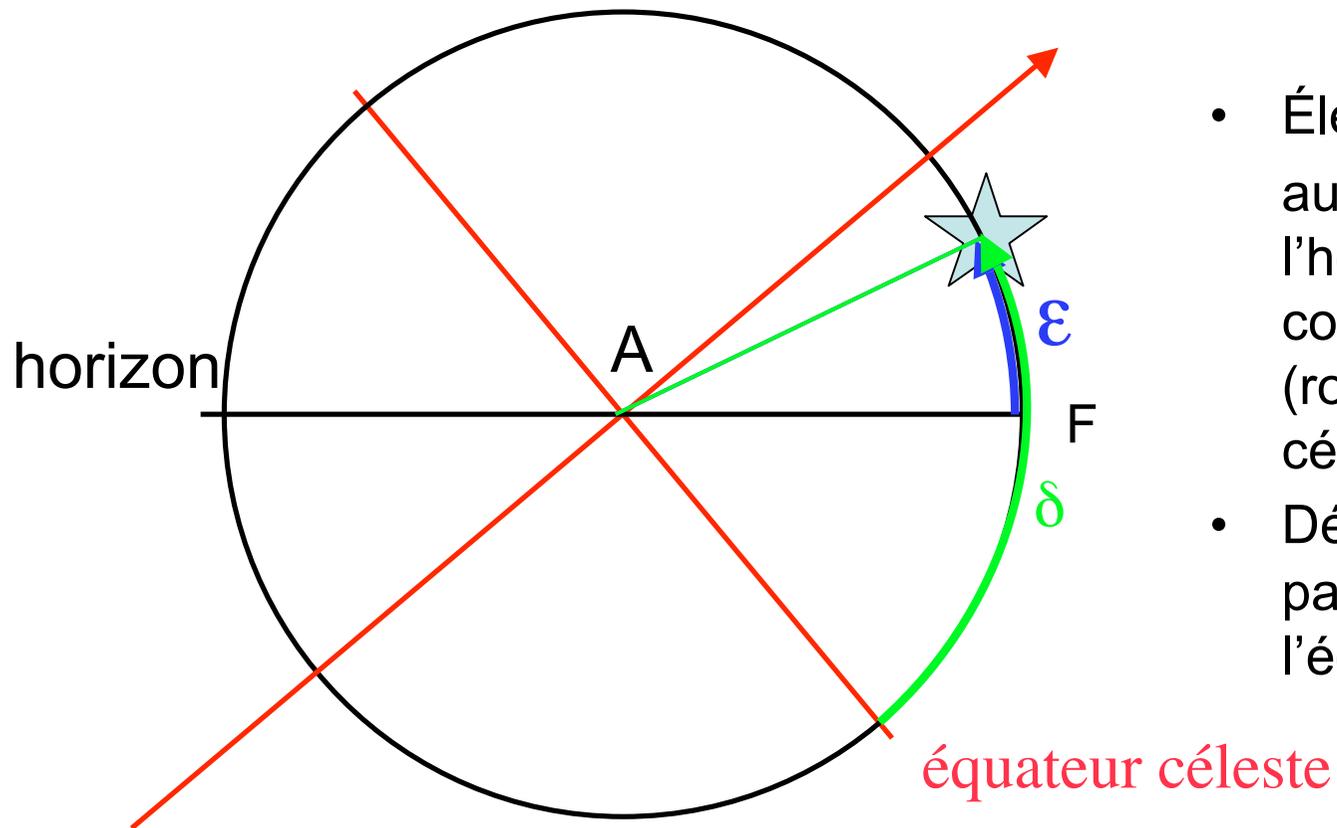
Equinoxe : Soleil à l'équateur céleste, angle (rayons Soleil - verticale locale) = latitude géographique

$$\tan\varphi = \text{ombre} / \text{gnomon}$$

Déterminer la sphère céleste



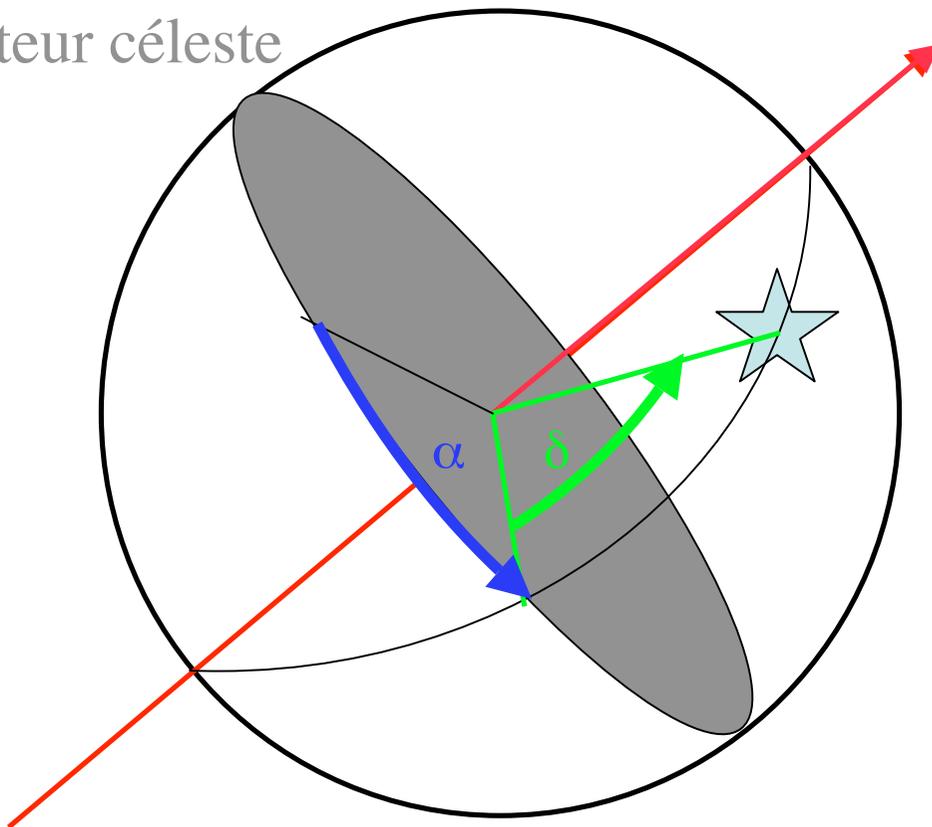
- Nous pouvons donc mesurer la position d'un astre (étoile, ...) sur la sphère céleste de deux façons :



- 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)

- En 2 dimensions (sphère) :

équateur céleste

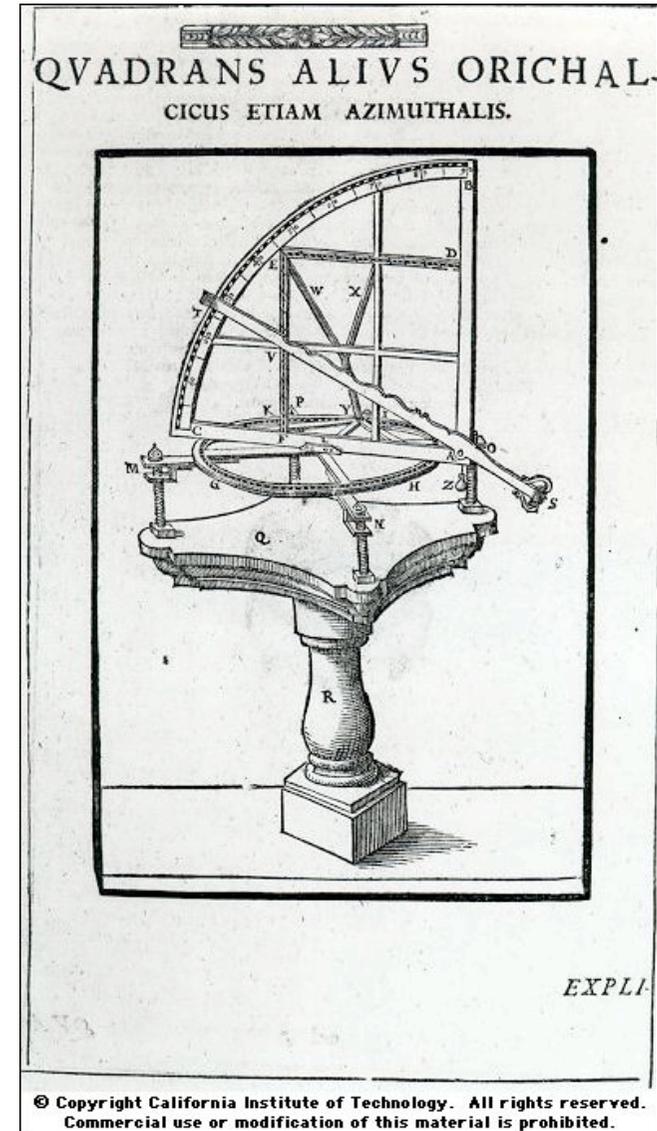


- Ascension droite α
(=angle mesuré dans le plan équatorial, depuis un point de référence (position Soleil équinoxe printemps))
- Déclinaison δ (=angle par rapport à l'équateur)
- Ces angles resteraient constants au cours du temps, si l' « axe du monde » était stable (ce n'est pas le cas: « précession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

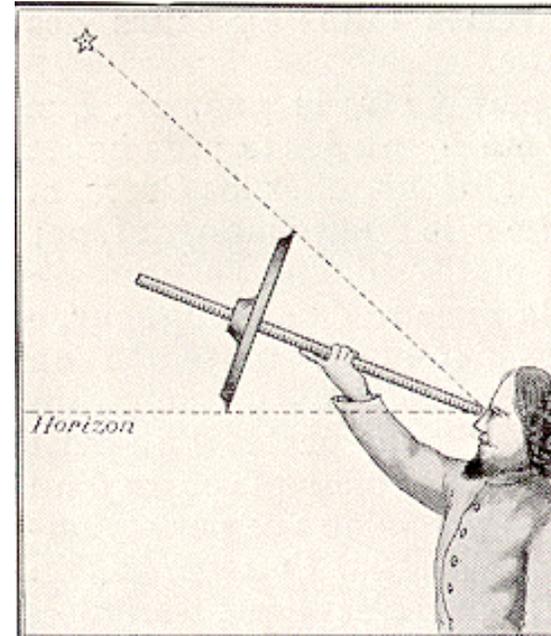
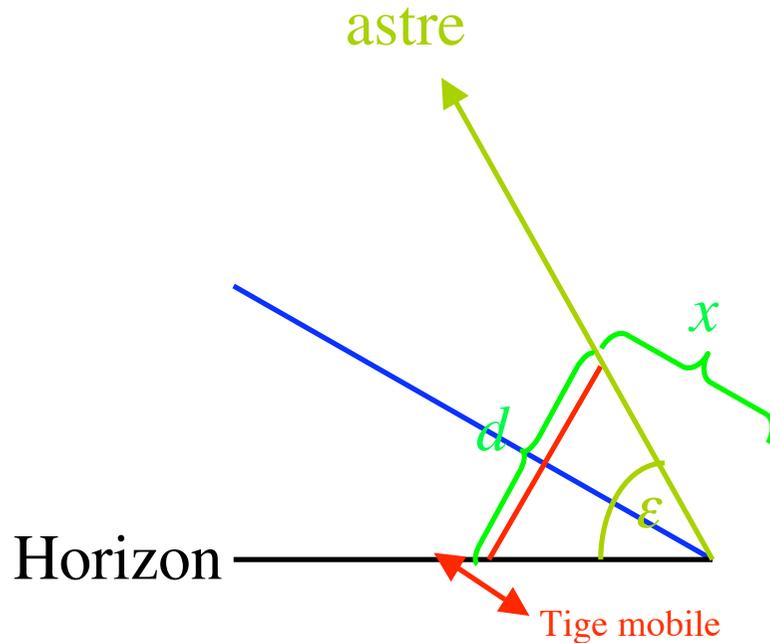
Instruments de mesure : le quart de cercle



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

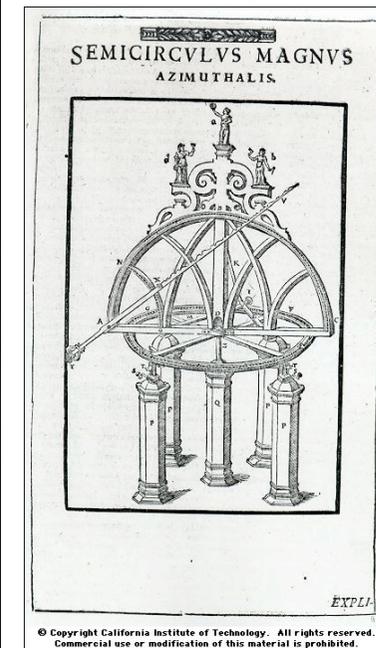
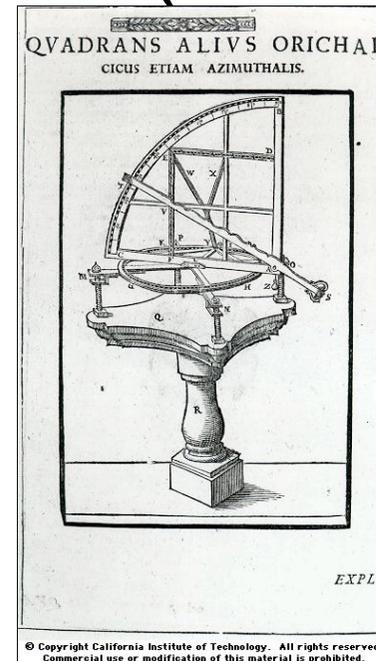
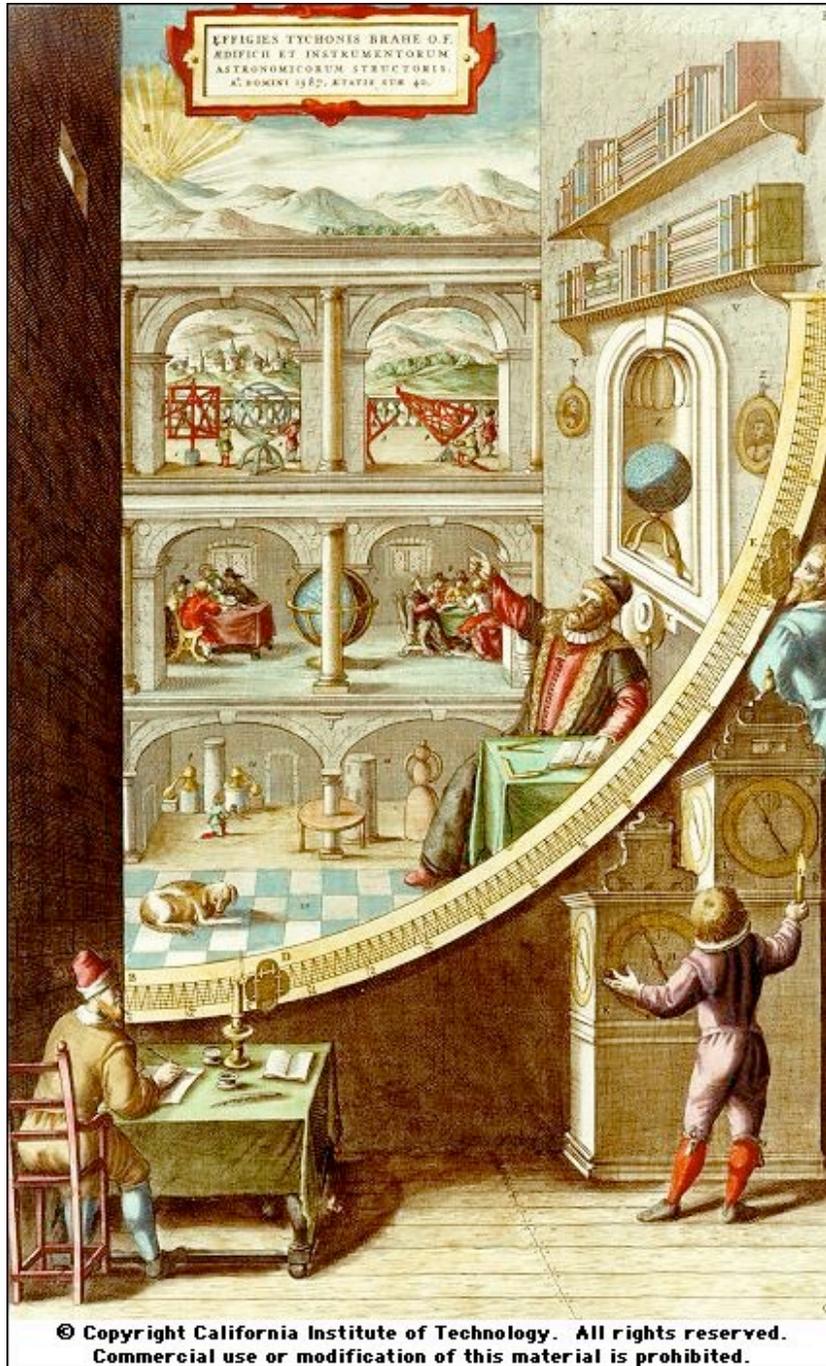


Instruments de mesure : le bâton de Jacob (fin Moyen Age)



- 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 $\tan(\varepsilon/2) = d / 2x$

Le perfectionnement par Tycho Brahe (1546-1601)

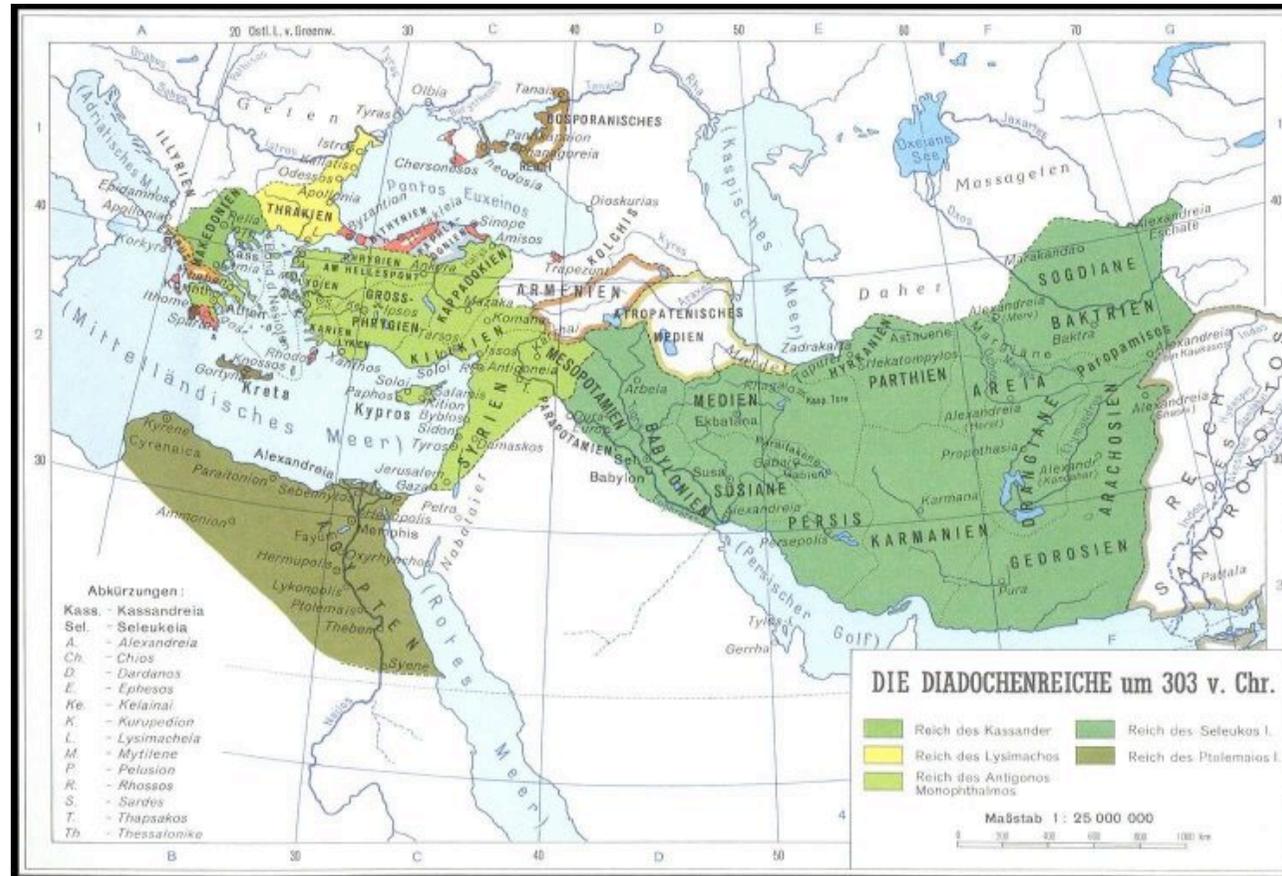


- Apogée des appareils pré-télescopiques
- précision / taille: parallaxe stellaire $< 1'$

Alexandrie, l'époque hellénistique

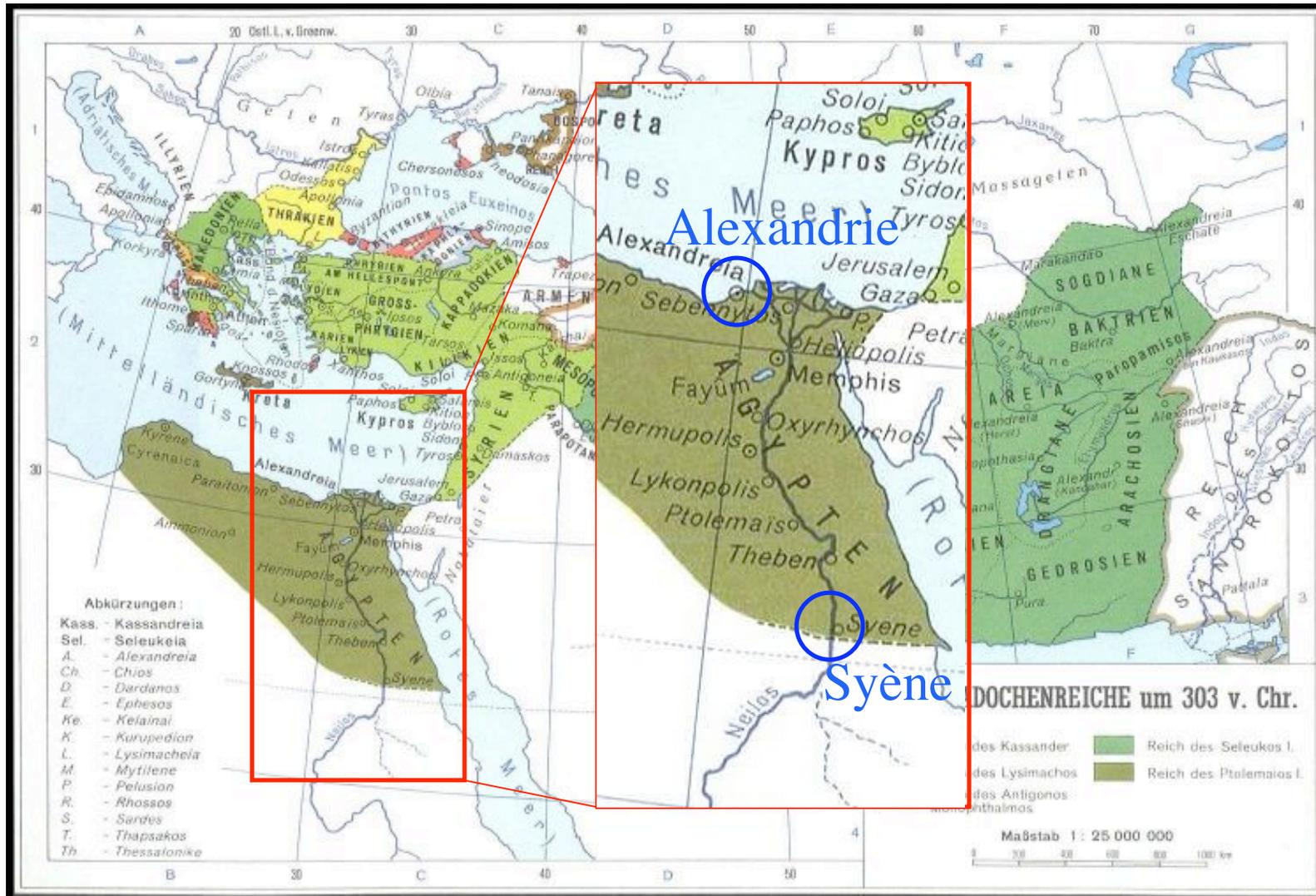
Apogée des mesures
astronomiques dans la Grèce
antique

Le monde hellénistique



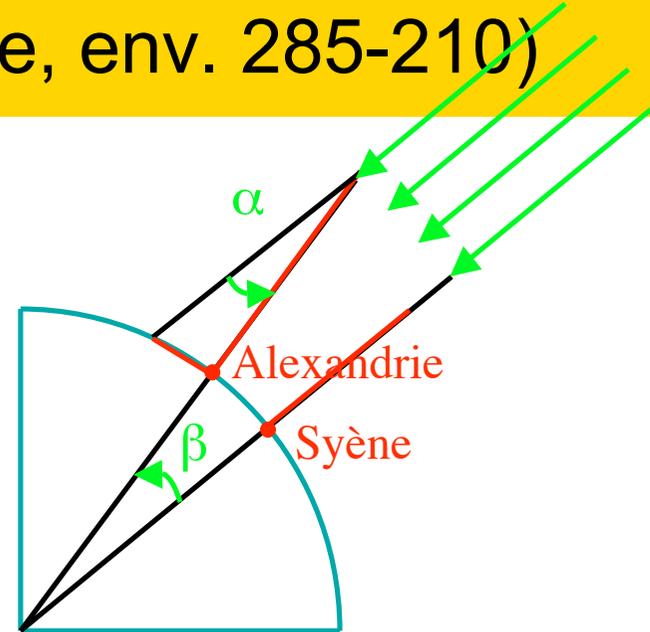
Empires des Diadoques: Alexandrie haut-lieu de l'astronomie après 300 av JC: Aristarque (310-230), Eratosthène (285-210), Hipparque (180-125), Ptolémée (100-170)

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: Terre point par rapport aux astres (distance quasiment infinie)
- \Rightarrow rayons du soleil parallèles pour tout observateur terrestre
- A Syène (S; près Assouan) à midi (solstice) : rayons du soleil parallèles au gnomon (pas d'ombre)
- En même temps (midi) à Alexandrie (A; distance 5040 stades): ombre du gnomon montre angle α



- Géométrie: $\alpha = \beta$,
- Mesure $\alpha \Rightarrow AS \approx 1/50$ de la circonférence du cercle
- \Rightarrow circonférence de la Terre 50×5040 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 \approx 44200 km)
- Mais: pas de mesure précise au sens contemporain, estimations utilisant des 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 de la distance 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)

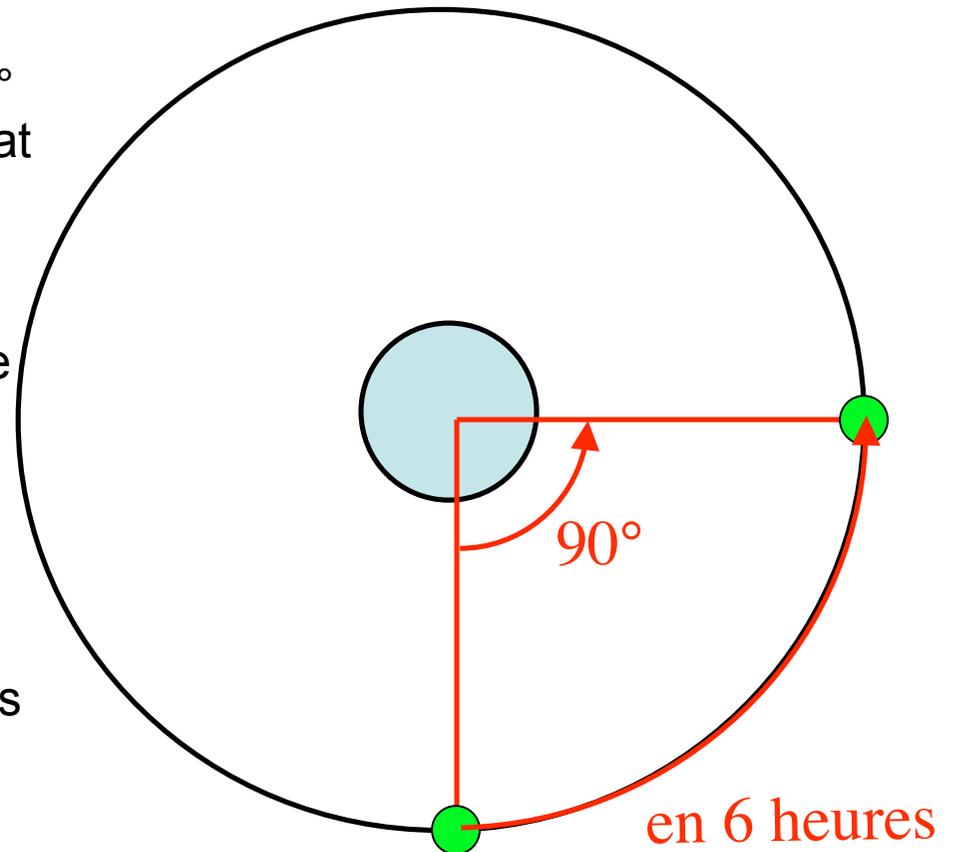


Une conséquence: la voie maritime vers les Indes

- 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 \Leftrightarrow différence des heures de passage de l'astre aux méridiens (=au sud).
- \Rightarrow 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).



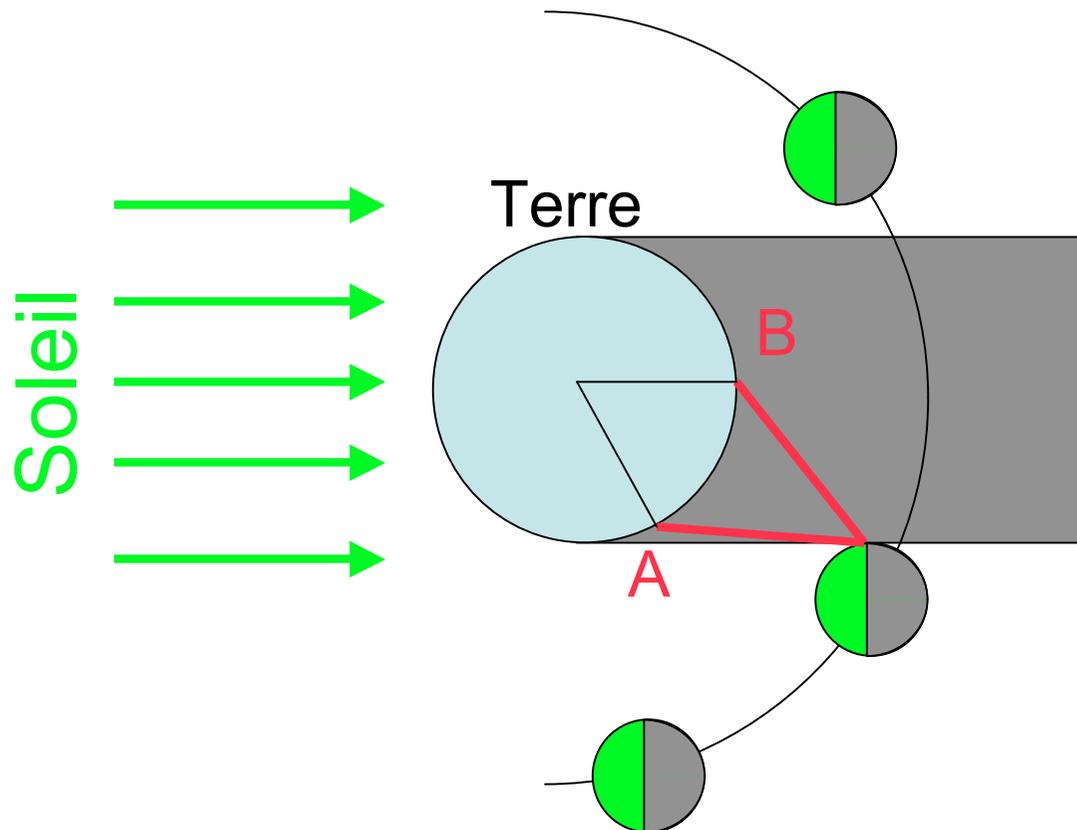
Vue sur la Terre depuis son pôle nord

Mesure du temps chez les Grecs

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



Une éclipse de Lune vue de différents endroits sur la Terre



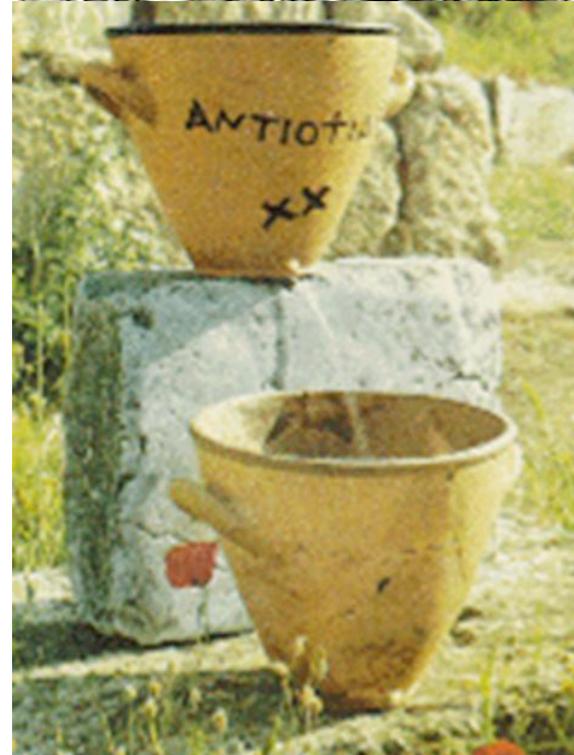
- Différence ≈ 5 heures en heure locale \Leftrightarrow différence en longitude $\approx 5/24 \times 360^\circ = 75^\circ$

- Mesurer l'entrée de la Lune dans l'ombre de la Terre.
 - vers 19 heures (locales) en A
 - à minuit en B

Résumé : la Terre dans l'Univers selon les Grecs anciens

- 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 (\neq Platon !) : mesures, fondées sur des modèles (époque hellénistique) - ingénieuses, bien que parfois peu précises - des distances sur la Terre et du système Terre-Lune-Soleil.
- Cadre : modèle géocentrique du monde, justifié par des observations et une profonde (bien que partiellement erronée) réflexion sur la physique (voir cours suivant).
- Réflexion erronée (mais profonde) sur la dynamique (pesanteur) - d'où la conception du centre de l'Univers comme centre d'attraction où la Terre doit se situer.