

# La structure de l'univers

## 2. Les apparences sont trompeuses

### Quelques idées fausses...

#### Mouvement nocturne des étoiles :

- rotation de la voûte céleste autour de la Terre (1 tour/24h)
- constellations = étoiles groupées dans l'espace

#### Mouvement apparent du Soleil :

- saisons dues à la variation de la distance Terre - Soleil

#### Mouvement apparent des planètes (0.3):

- la position des planètes au sein des constellations du zodiaque lors de la naissance détermine les destinées humaines (astrologie) (1.1 et 7.2)
- la Terre est au centre du cortège planétaire (système géocentrique)
- il n'y a aucun signe apparent du mouvement de la Terre dans l'espace

#### Fuite des galaxies :

- la Terre est au centre de l'univers des galaxies, puisque toutes s'en éloignent

#### Topologie de l'univers :

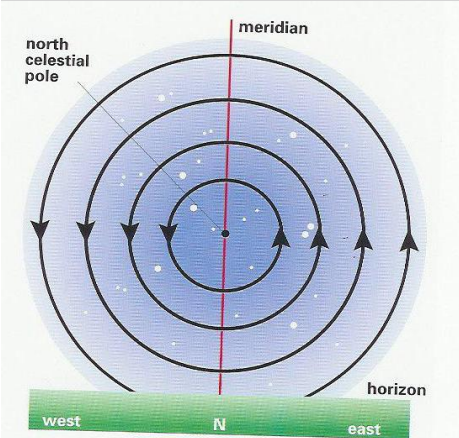
- Toutes les galaxies visibles dans le ciel sont différentes (pas de mirages topologiques) ???



Mouvement nocturne des étoiles (rotation de la voûte céleste) (Sect. 0.2)  
au-dessus de Mauna Kea (Hawaii)

Crédit: <http://antwrp.gsfc.nasa.gov/apod/ap051220.html>

Mouvement nocturne des étoiles (rotation de la voûte céleste) (Sect. 0.2)



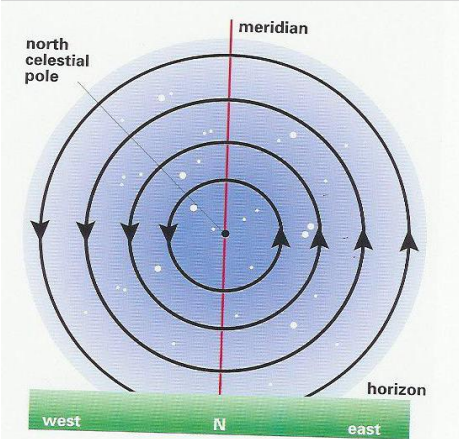
Etoile polaire

Observation vers le Nord

Fig. 0.4

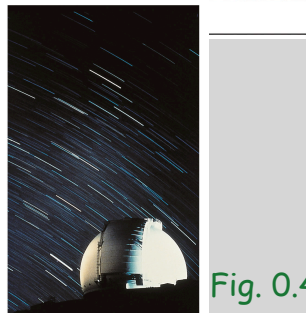
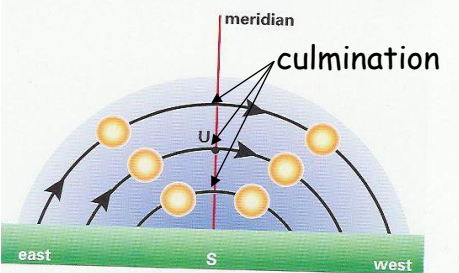
Crédit: Unfolding our Universe, I. Nicolson, Cambridge UP

Mouvement nocturne des étoiles (rotation de la voûte céleste) (Sect. 0.2)



Etoile polaire

Observation vers le Nord



Observation vers le Sud

Fig. 0.4

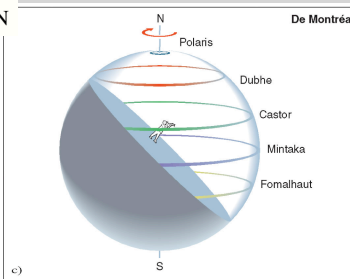
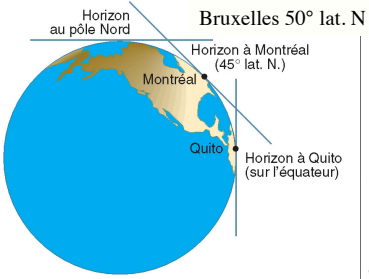
Crédit: Unfolding our Universe, I. Nicolson, Cambridge UP

Mouvement nocturne des étoiles (rotation de la voûte céleste) (0.2)

Etoile polaire



Figure 0.4



Mouvement nocturne des étoiles (rotation de la voûte céleste) (0.2)

Etoile polaire

Hauteur au-dessus de l'horizon = latitude du lieu d'observation

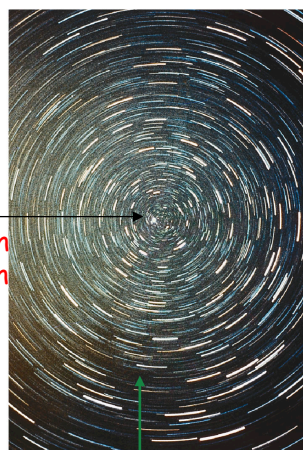
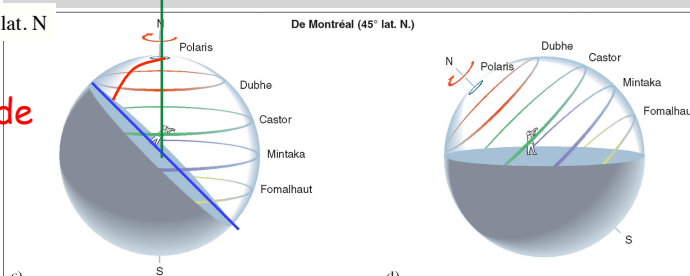
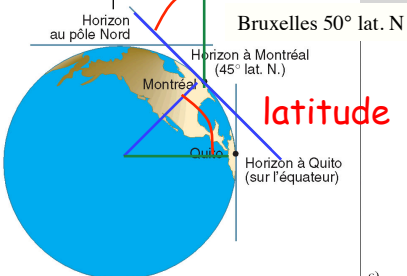


Figure 0.4



Fig. 0.25



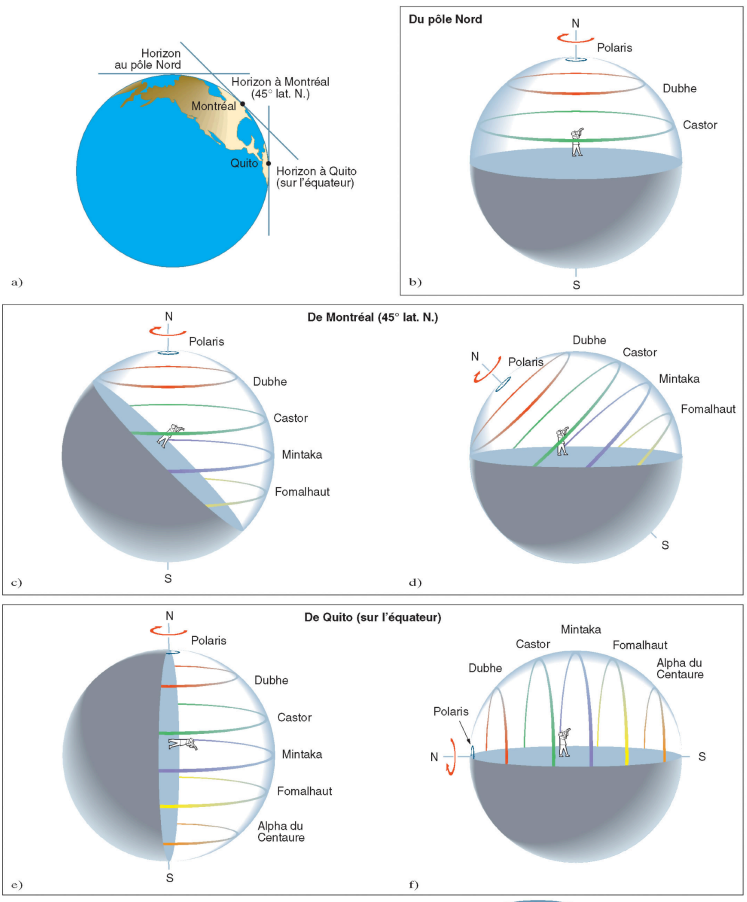


Figure 0.7  
Trajectoires apparentes d'étoiles dans le ciel

Fig. 0.7

constellations

Ex: Orion

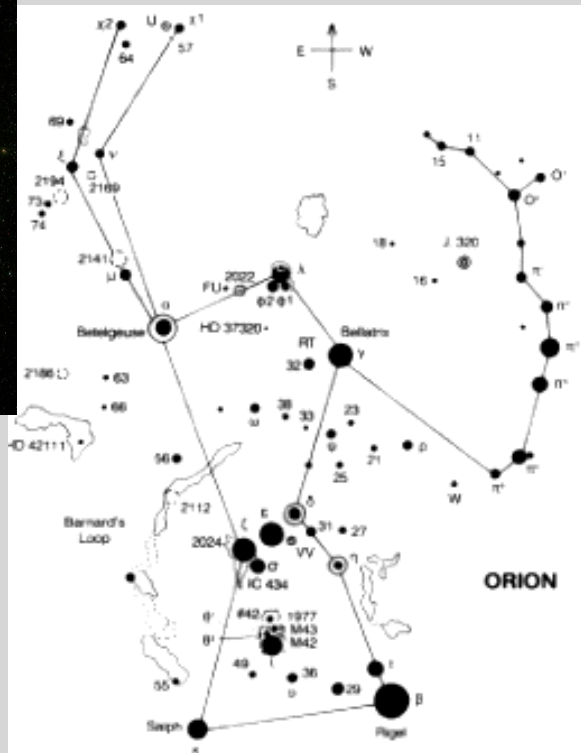
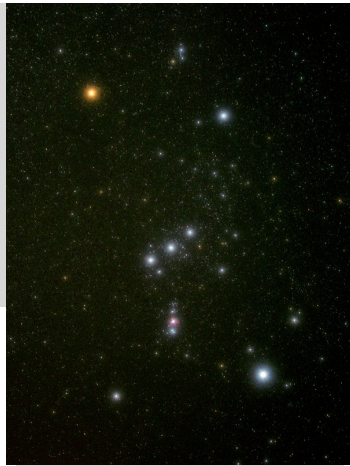
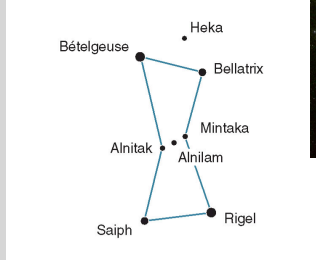


Figure 0.3

# constellations

Ex: Orion

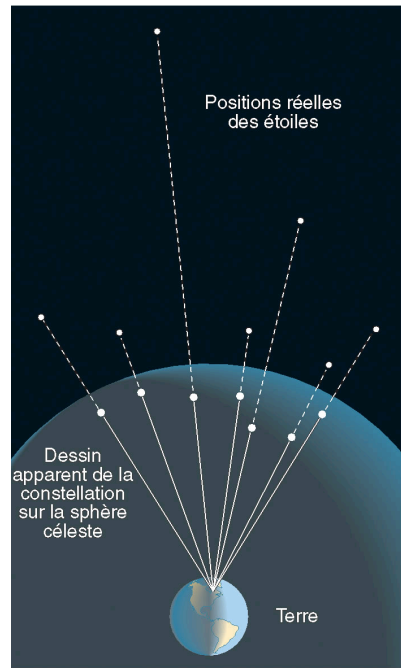
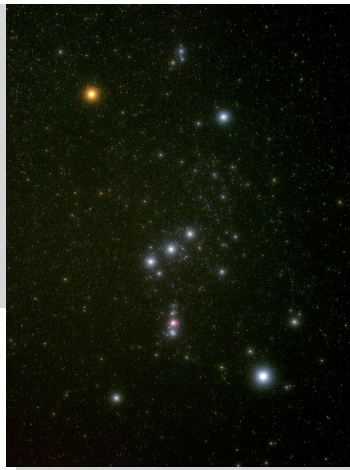
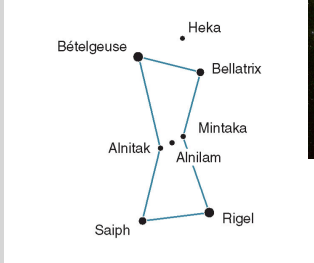


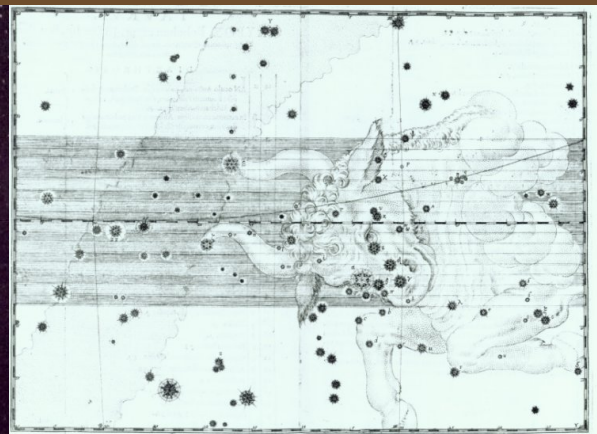
Figure 0.1

= mosaïque de distances  
(éclat apparent  $\neq$  distance  $\neq$  taille)

→ mosaïque d'âges

Ne pas confondre **constellation**...

Ex: Taureau



Copyright © James B. Kaler  
<http://www.astro.uiuc.edu/~kaler/sow/sow.html>

*Bayer's Uranometria*, 1603

Ne pas confondre **constellation**...

... et **amas d'étoiles**

Ex: Taureau

Ex: Pléiades



Fig. 7.6

Copyright © James B. Kaler

<http://www.astro.uiuc.edu/~kaler/sow/sow.html>

### Mouvement apparent du Soleil

(Sect. 0.2, 0.3)

au cours de la journée...

...à différents moments de l'année.

C'est l'origine des saisons...

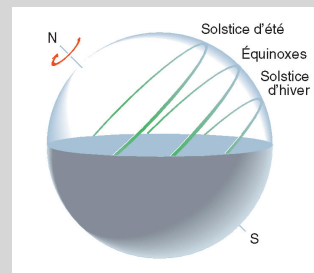


Fig. 0.9

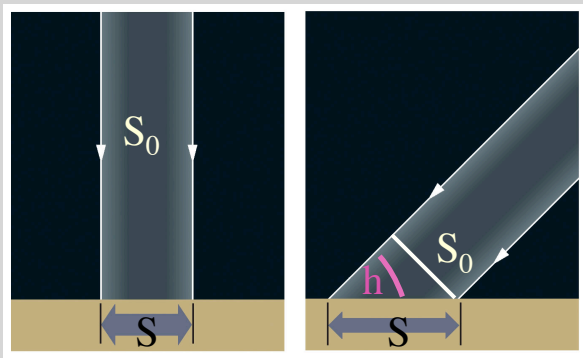


Fig. 0.10

$$S = S_0$$

$$S = S_0 / \sin h$$

... dont le facteur principal  $n'$  est pas la variation de **distance Terre-Soleil** mais la variation de **l'inclinaison des rayons solaires** par rapport au sol

Calculons  $h$  = la hauteur maximale atteinte par le Soleil au cours de la journée en différents lieux terrestres et aux différentes saisons...

## Mouvement apparent du Soleil et saisons

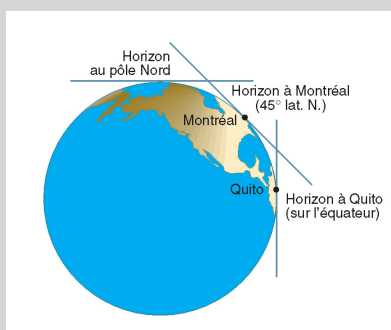
(Sect. 0.2, 0.3)

Calculons  $h$  = la hauteur maximale atteinte par le Soleil au cours de la journée en différents lieux terrestres et aux différentes saisons...

Deux étapes:

- calcul de la hauteur du Soleil au-dessus de l'équateur céleste ( $\equiv$  déclinaison)
- calcul de la hauteur de l'équateur céleste au-dessus de l'horizon

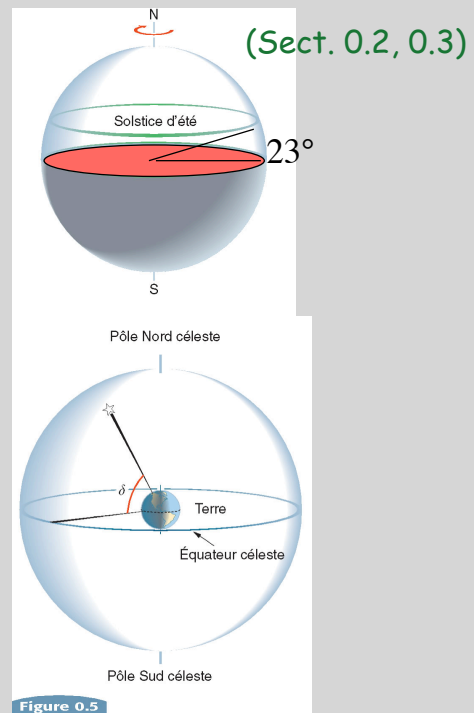
Mouvement apparent du Soleil: hauteur du Soleil au-dessus de l'équateur céleste ?  
au pôle... **Equateur = Horizon**



$\delta$  = hauteur au-dessus de l'équateur  
= *déclinaison*

$$-23^\circ \leq \delta_{\odot} \leq +23^\circ$$

$23^\circ$  = obliquité de l'équateur sur l'écliptique



## Hauteur du Soleil au-dessus de l'équateur céleste ( $\equiv$ déclinaison)

$$-23^\circ \leq \delta_{\odot} \leq +23^\circ$$

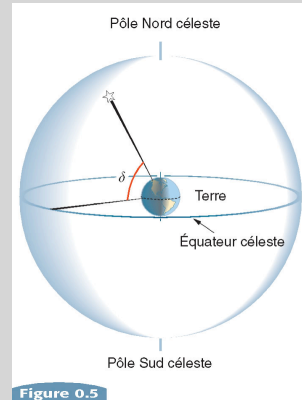
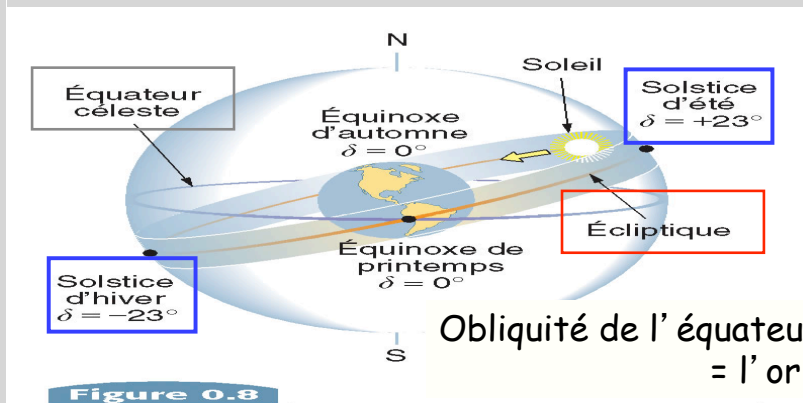


Figure 0.5



Obliquité de l'équateur sur l'écliptique  
= l'origine des saisons!

Figure 0.8

## Hauteur du Soleil au-dessus de l'équateur céleste ( $\equiv$ déclinaison)

### Constellations du zodiaque

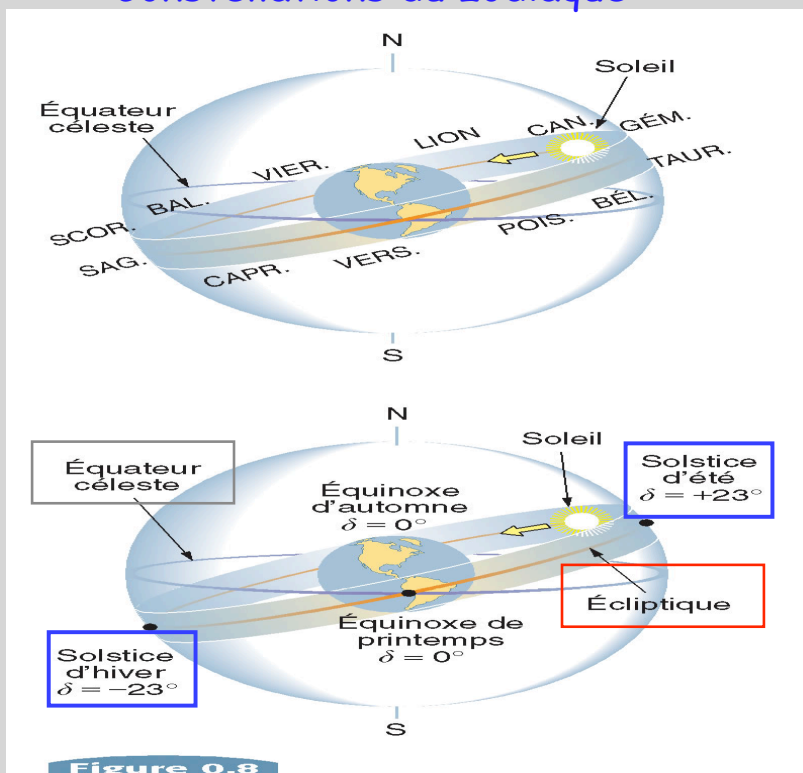
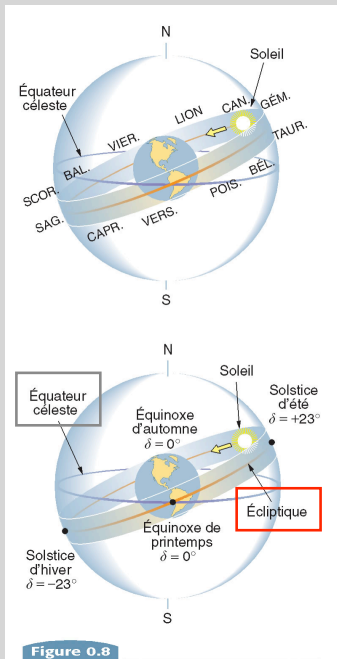


Figure 0.8



# Hauteur du Soleil au-dessus de l'équateur céleste ( $\equiv$ déclinaison)

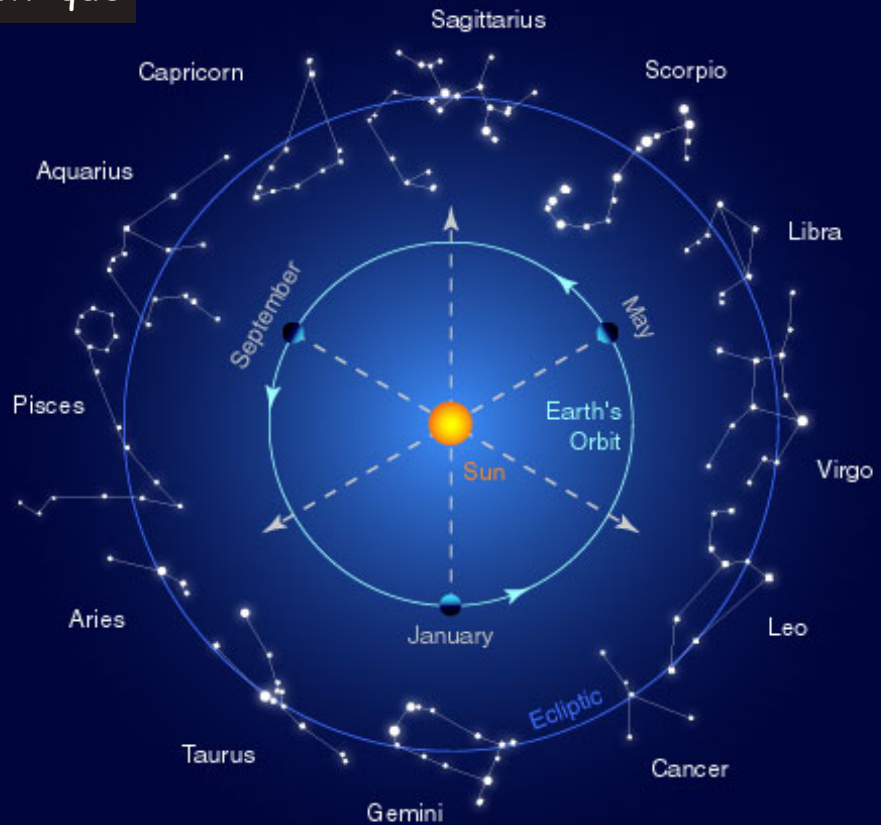
## Vision géocentrique



## Vision héliocentrique



## Vision héliocentrique



## Hauteur de culmination d'un astre (I) (Compl. 0.3)



Etoile polaire

Hauteur au-dessus de l'horizon = latitude du lieu d'observation

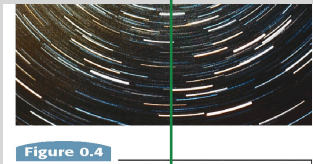
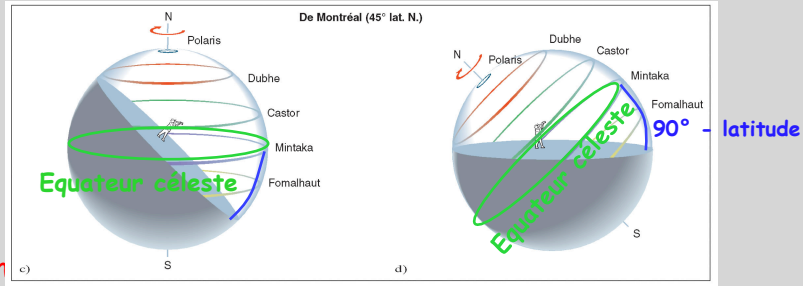
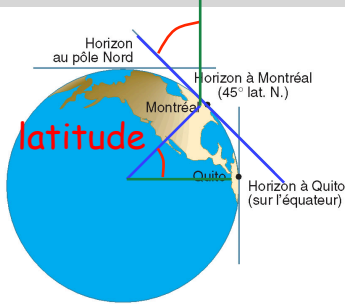
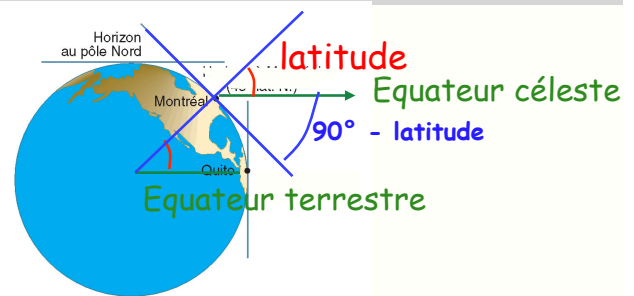


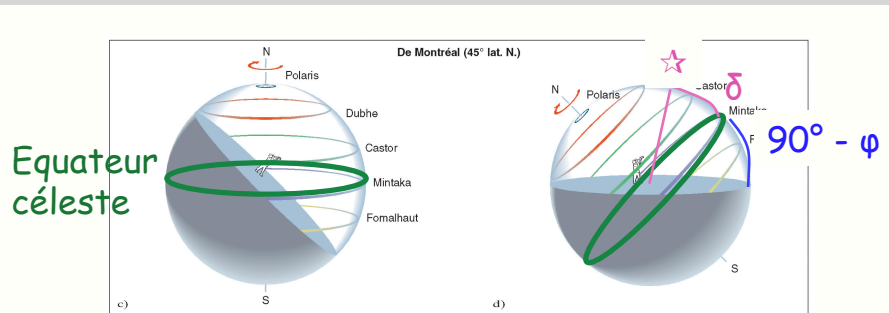
Figure 0.4



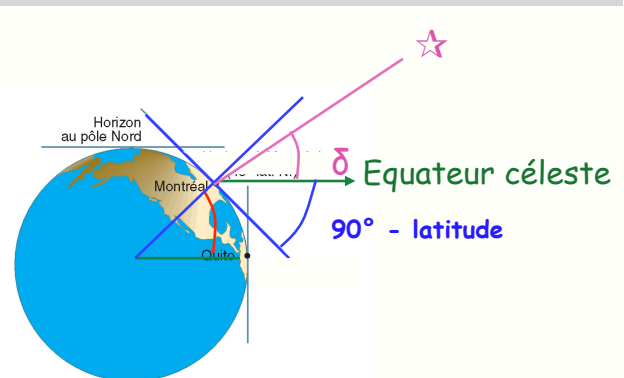
Hauteur maximale de l'équateur céleste au-dessus de l'horizon sud =  $90^\circ - \text{latitude du lieu d'observation}$



## Hauteur de culmination d'un astre (II) (Compl. 0.3)

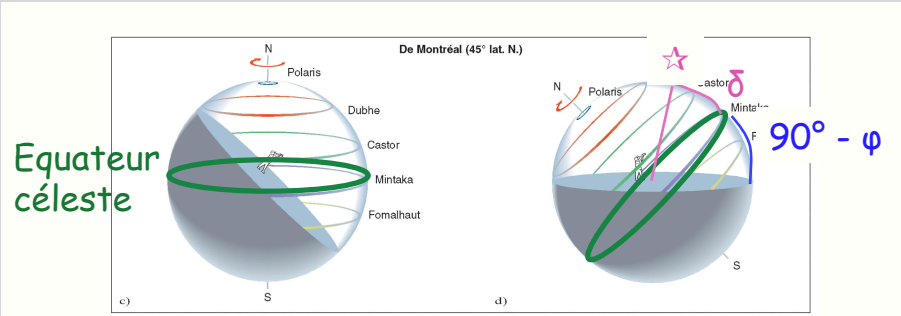


Hauteur de culmination d'un astre au-dessus de l'horizon =  $90^\circ - \text{latitude du lieu d'observation} + \delta$



# Hauteur de culmination d'un astre (III)

(Compl. 0.3)



Hauteur de culmination d'un astre au-dessus de l'horizon =  $90^\circ - \text{latitude du lieu d'observation} + \delta$

$$90 - \varphi - 23 \leq h_{\odot} \leq 90 - \varphi + 23$$

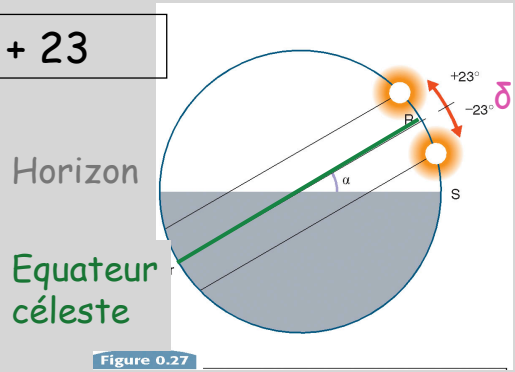
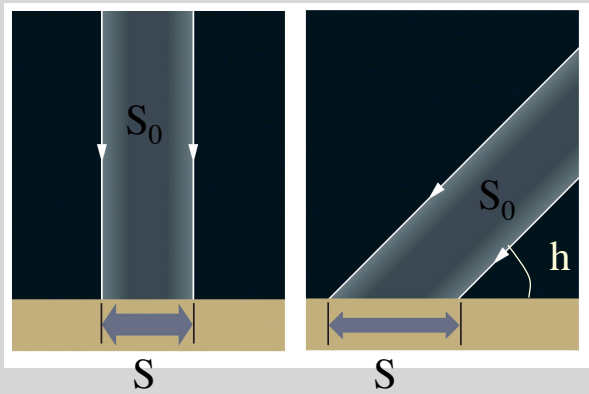


Figure 0.27

# Amplitude des saisons (0.3)



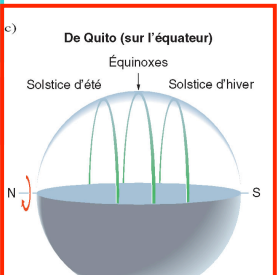
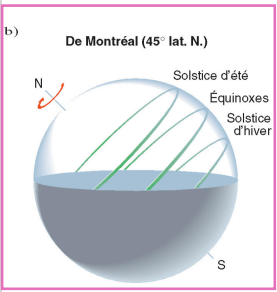
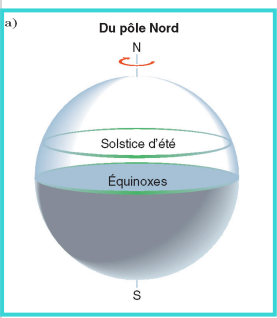
$$S = S_0 / \sin h$$

$$90 - \varphi - 23 \leq h_{\odot} \leq 90 - \varphi + 23$$

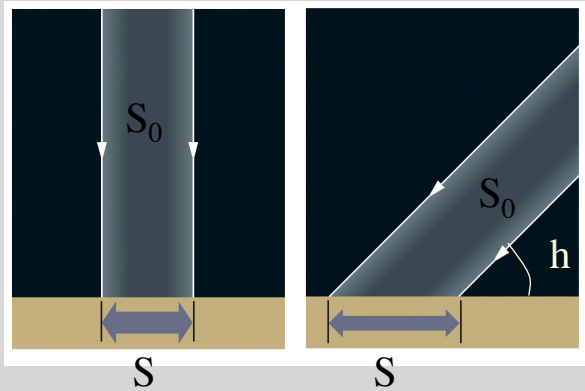
$$\varphi = 90: -23 \leq 0 \leq h_{\odot} \leq +23 \quad 2.6 \leq S/S_0 \leq \infty$$

$$\varphi = 50: 17 \leq h_{\odot} \leq +63 \quad 1.1 \leq S/S_0 \leq 3.4$$

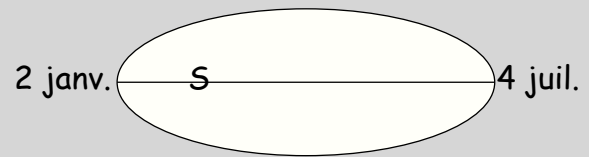
$$\varphi = 0: 67 \leq h_{\odot} \leq 90 \leq 113 \quad 1.0 \leq S/S_0 \leq 1.1$$



## Amplitude des saisons (0.3)



$$S = S_0 / \sin h$$

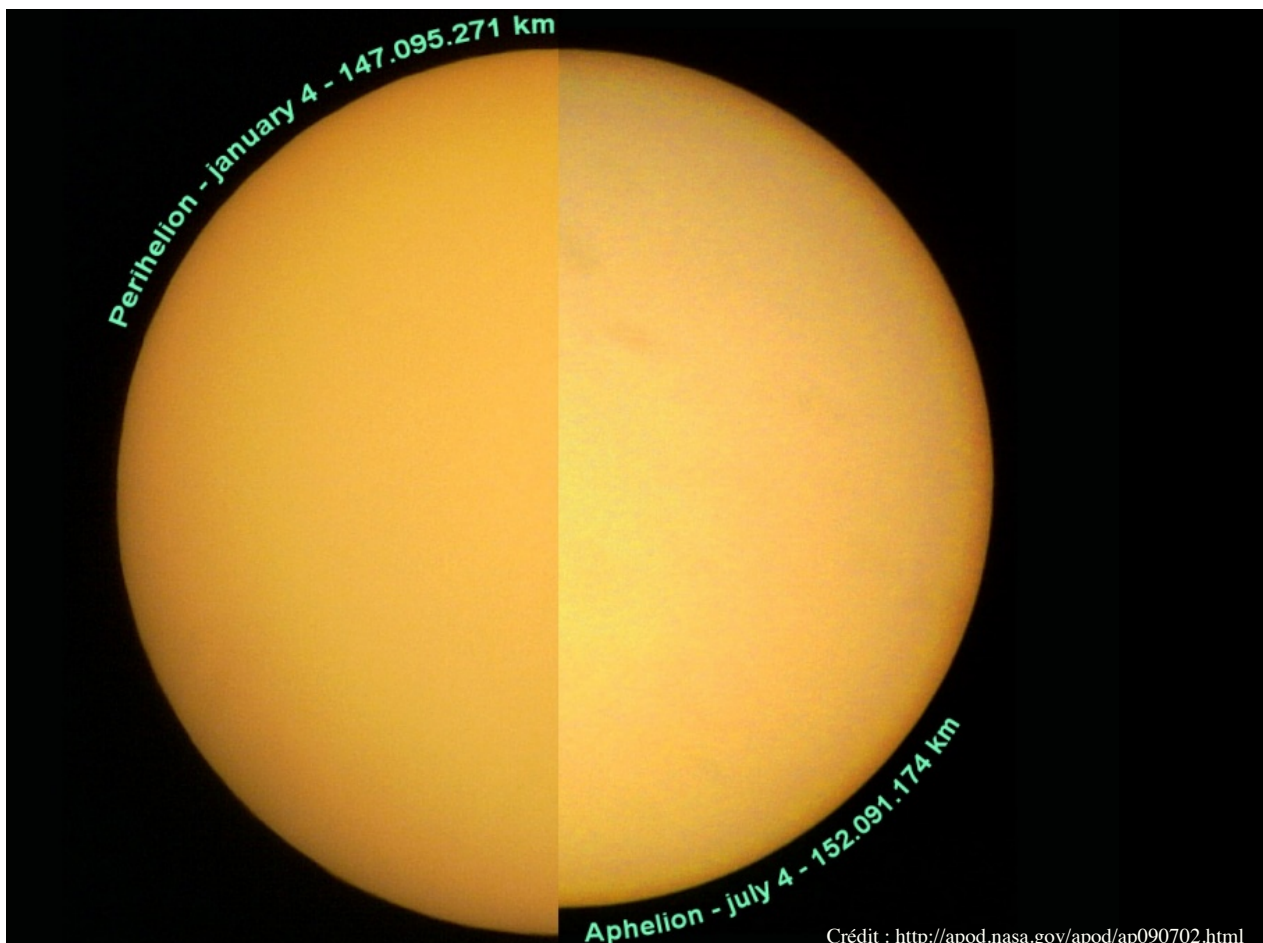


Attention : La variation de la distance Terre - Soleil (orbite elliptique) entraîne une variation de l'énergie reçue par la surface unitaire  $S_0$  mais cette variation est beaucoup plus petite que celle causée par les variations de  $h$

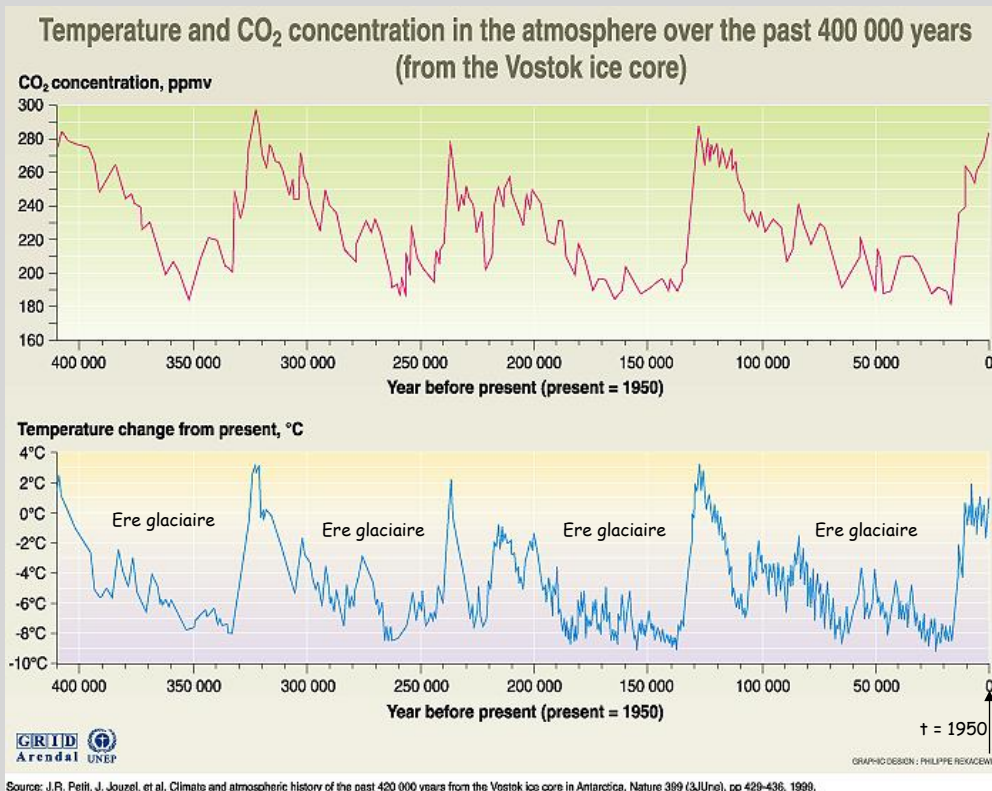
Cependant, la combinaison de ces 2 effets (variables, car l'orbite de la Terre tourne dans son plan et l'aplatissement de l'orbite -- « excentricité » -- augmente et diminue périodiquement) donne lieu à la **théorie astronomique des paléoclimats**.

Aujourd'hui, dans l'hémisphère nord, l'effet de la distance Terre-Soleil s'oppose à l'effet dû à  $h$ .

Lorsqu'ils s'additionnent, des glaciations surviennent...



## Amplitude des saisons et paléoclimats



Source: J.R. Peill, J. Jouzel, et al. Climate and atmospheric history of the past 420 000 years from the Vostok ice core in Antarctica, Nature 399 (3/June), pp 429-436, 1999.



Vue de la Terre, à la verticale de Bruxelles, le 21 juin à 22h

Crédit: <http://www.fourmilab.ch/cgi-bin/uncgi/Earth>

## Mouvement apparent des planètes (Sect. 1.1)

A l'origine était l'astrologie...

Influence du Soleil et de la Lune sur les phénomènes naturels  
Évidente: saisons marées

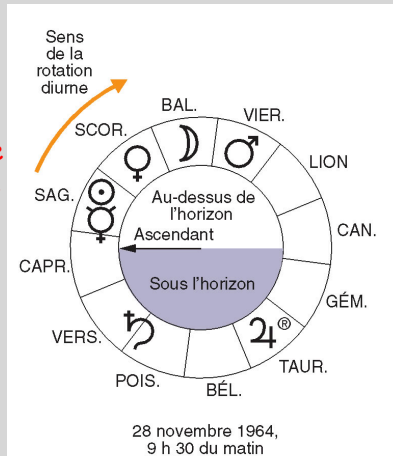
- Idem pour les 5 planètes:  
non seulement influencent les phénomènes naturels  
mais aussi les événements humains !

### Raisonnement analogique

#### Horoscope:

Positions des planètes dans les constellations du zodiaque à l'instant de la naissance

(Sujet connexe p.69: Pourquoi l'astrologie n'est pas une science?)



Soleil		Œuf de la création
Lune		Croissant
Mercure		Serpents entrelacés
Vénus		Miroir
Mars		Bouclier et lance
Jupiter		Foudre
Saturne		Faucille

Figure 1.1

## Mouvement apparent des planètes (Sect. 1.1)

A l'origine était l'astrologie...

Influence du Soleil et de la Lune sur les phénomènes naturels  
Évidente: saisons marées

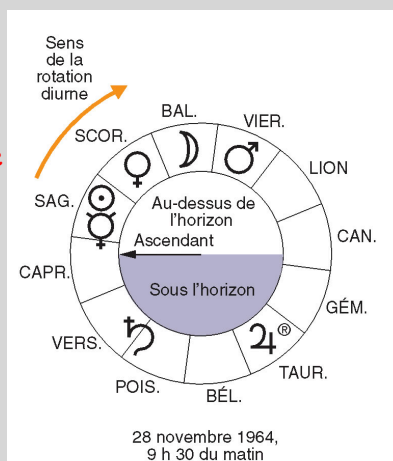
- Idem pour les 5 planètes:  
non seulement influencent les phénomènes naturels  
mais aussi les événements humains !

### Raisonnement analogique

#### Horoscope:

Positions des planètes dans les constellations du zodiaque à l'instant de la naissance

- Importance de la prédiction à rebours
- théories du mouvement planétaire sont requises



Soleil		Œuf de la création
Lune		Croissant
Mercure		Serpents entrelacés
Vénus		Miroir
Mars		Bouclier et lance
Jupiter		Foudre
Saturne		Faucille

Figure 1.1

## Mouvement apparent des planètes (Sect. 1.2)

Observations mésopotamiennes (IIe millénaire av. J.C.) des **astres errants**:  
Soleil, Lune, 5 planètes

Configurations particulières Terre - astres errants - Soleil

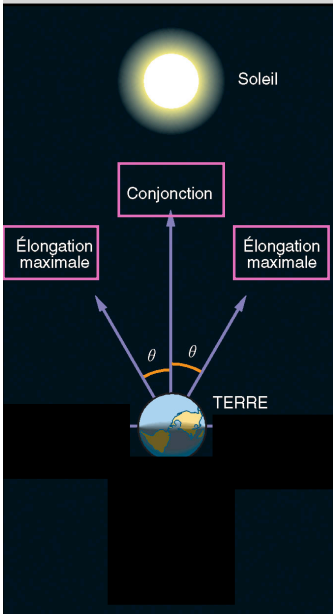


Figure 1.3

Planètes intérieures: Mercure, Vénus

## Mouvement apparent des planètes (Sect. 1.2)

Observations mésopotamiennes (IIe millénaire av. J.C.) des **astres errants**:  
Soleil, Lune, 5 planètes

Configurations particulières Terre - astres errants - Soleil

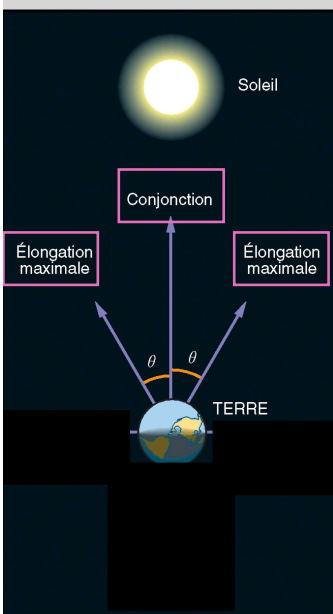
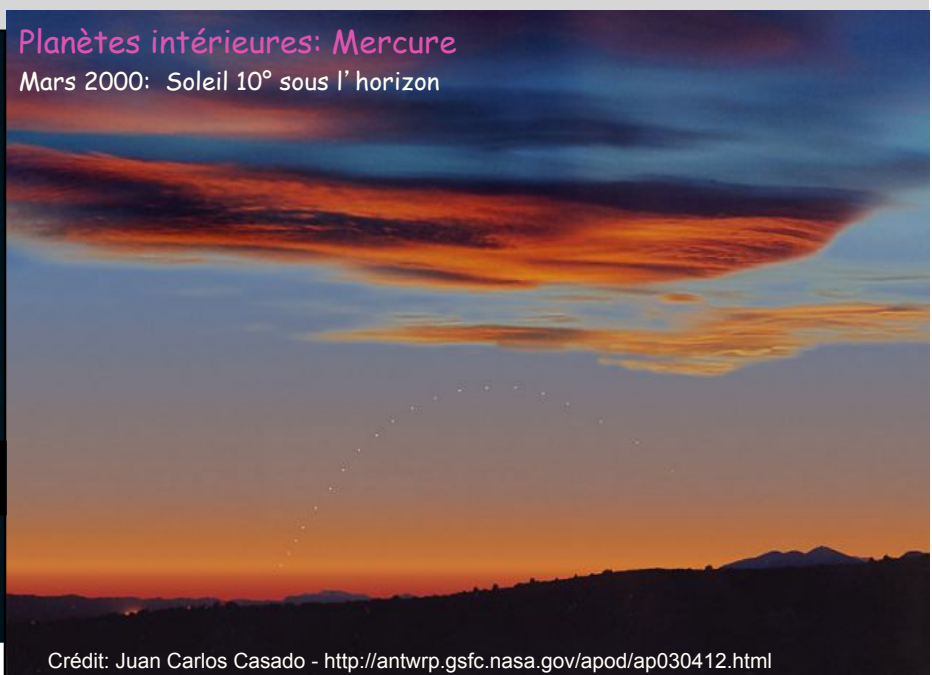


Figure 1.3

Planètes intérieures: Mercure

Mars 2000: Soleil 10° sous l'horizon

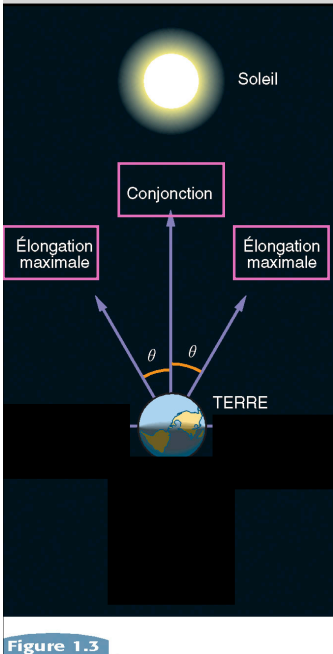


Crédit: Juan Carlos Casado - <http://antwrp.gsfc.nasa.gov/apod/ap030412.html>

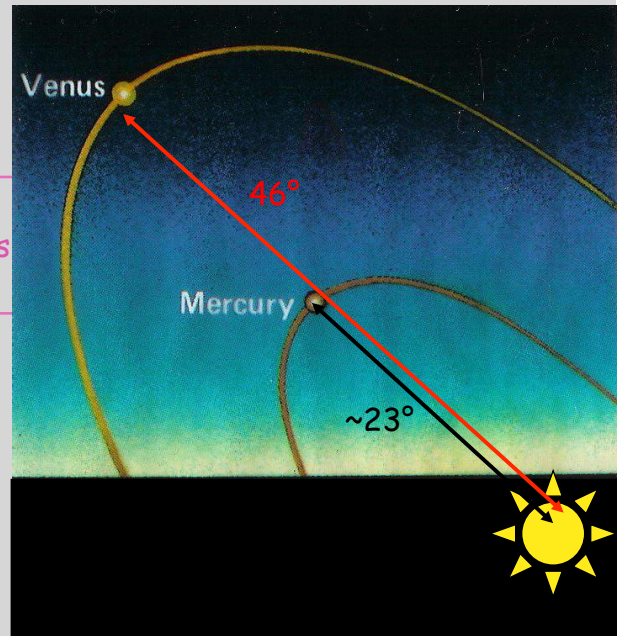
## Mouvement apparent des planètes (Sect. 1.2)

Observations mésopotamiennes (IIe millénaire av. J.C.) des **astres errants**:  
Soleil, Lune, 5 planètes

### Configurations particulières Terre - astres errants - Soleil



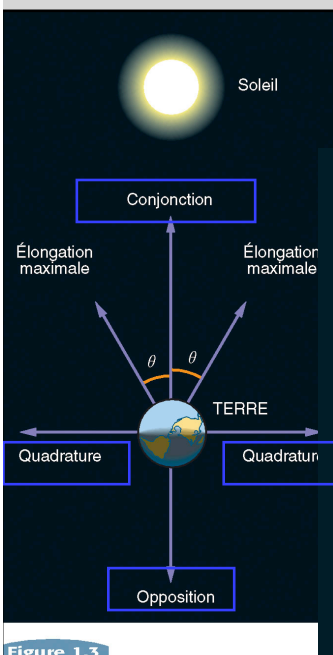
Planètes intérieures



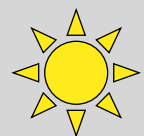
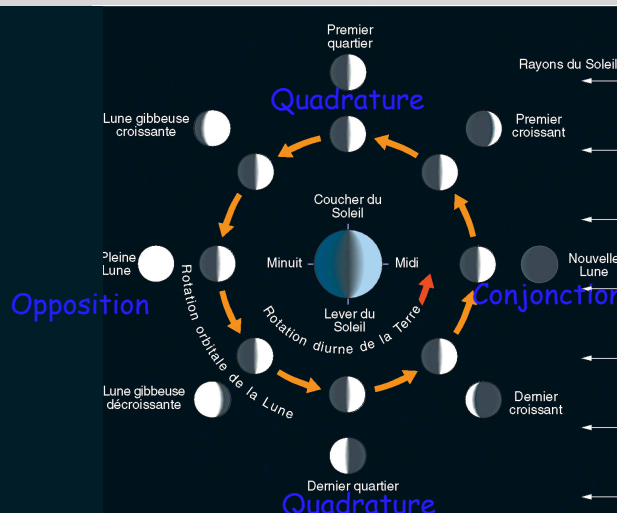
## Mouvement apparent des planètes (Sect. 1.2)

Observations mésopotamiennes (IIe millénaire av. J.C.) des **astres errants**:  
Soleil, Lune, 5 planètes

### Configurations particulières Terre - astres errants - Soleil



Planètes extérieures: Mars, Jupiter, Saturne  
Lune (phases!)

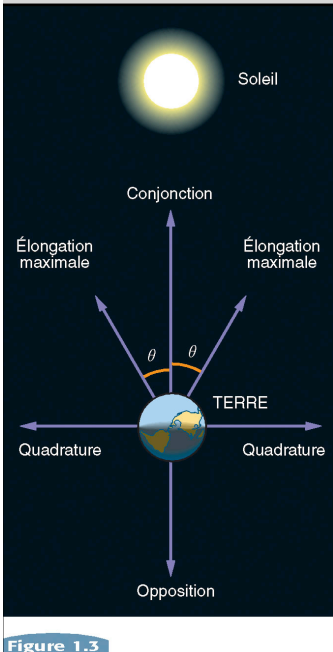




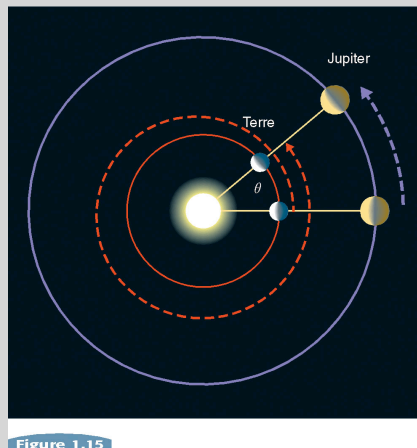
## Mouvement apparent des planètes (Sect. 1.2)

Observations mésopotamiennes (IIe millénaire av. J.C.) des **astres errants**:  
Soleil, Lune, 5 planètes

### Configurations particulières Terre - astres errants - Soleil



Périodicité → période synodique  
(synode = 'rencontre')  
→ retour de la même configuration  
Terre - Soleil - planète

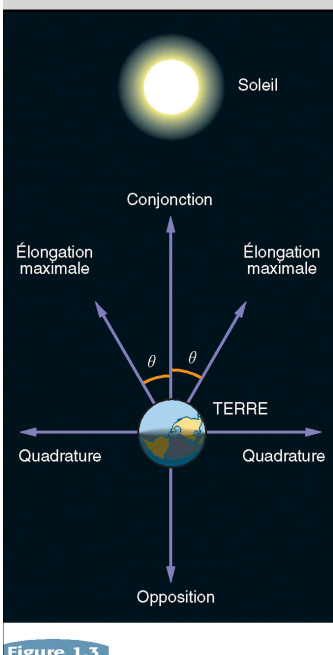


Ex: opposition de Jupiter

## Mouvement apparent des planètes (Sect. 1.2)

Observations mésopotamiennes (IIe millénaire av. J.C.) des **astres errants**:  
Soleil, Lune, 5 planètes

### Configurations particulières Terre - astres errants - Soleil

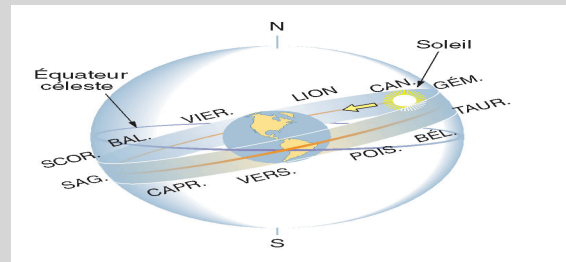


Périodicité → période synodique  
(synode = 'rencontre')  
→ retour de la même configuration  
Terre - Soleil - planète

Lune	29,5 j (= lunaison = retour des mêmes phases lunaires = retour de la même configuration Terre - Soleil - Lune)
Mercure	115,9 j
Saturne	378,1 j
Jupiter	398,9 j
Vénus	583,9 j
Mars	780,0 j

## Mouvement apparent des planètes (Sect. 1.2)

- Périodes synodiques
- Périodes sidérales: retour au même endroit d'une constellation du zodiaque

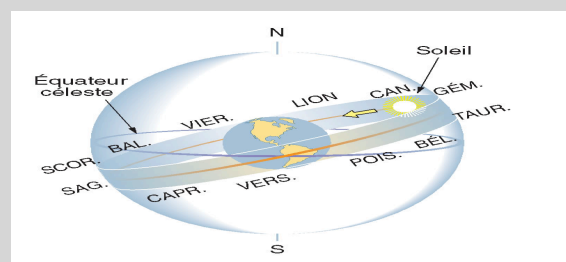


Lune	27,3 j
Mercure	1 an <sup>❖</sup>
Vénus	1 an <sup>❖</sup>
Soleil	1 an <sup>❖</sup>
Mars	1,88 an
Jupiter	11,86 ans
Saturne	29,46 ans

❖ Moyenne sur plusieurs années

## Mouvement apparent des planètes (Sect. 1.2)

- Périodes synodiques
- Périodes sidérales\*: retour au même endroit d'une constellation du zodiaque



Périodes orbitales\*:  
parcours complet de l'orbite

inconnues des anciens !  
car difficiles à mesurer  
(Terre en mouvement)

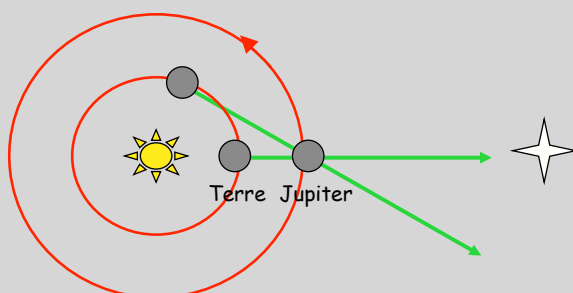


Fig. 1.15

\*Attention: terminologie  
différente de celle du livre!

## Mouvement apparent des planètes (Sect. 1.2)

- Périodes synodiques
- Périodes sidérales\*:  
retour au même endroit d'une constellation du zodiaque

**Périodes orbitales\*:**  
parcours complet de l'orbite

$$\frac{1}{P_{orbP}} = \frac{1}{P_{orbT}} + \frac{1}{P_{synP}} \quad (\text{planète intérieure})$$

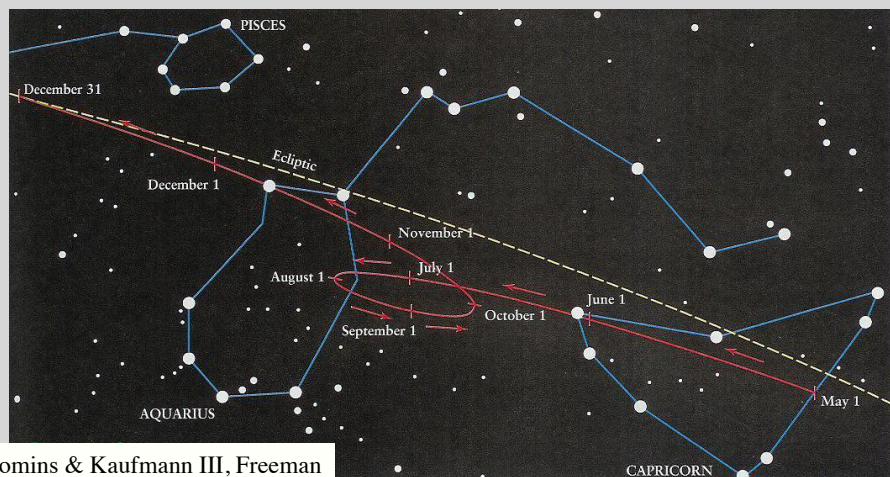
$$\frac{1}{P_{orbP}} = \frac{1}{P_{orbT}} - \frac{1}{P_{synP}} \quad (\text{planète extérieure})$$

**inconnues des anciens !**  
car difficiles à mesurer  
(Terre en mouvement)

\*Attention: terminologie  
différente de celle du livre!

## Mouvement apparent des planètes (Sect. 1.2)

- Périodes synodiques
- Périodes sidérales :  
retour au même endroit d'une constellation du zodiaque
- **Boucles rétrogrades:**  
mouvement en sens opposé du mouvement Ouest - Est habituel



Crédit: Discovering the Universe, Comins & Kaufmann III, Freeman

Position de Mars sur le ciel, de 5 en 5 jours, entre août 2007 et mai 2008

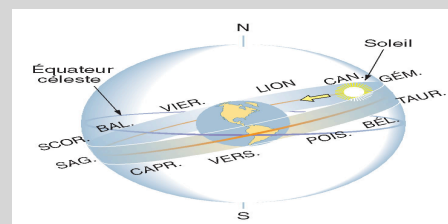


Crédit: Astronomy Picture of the Day / Tunc Tezel : <http://antwrp.gsfc.nasa.gov/apod/ap080511.html>

(C)2007-8 Tunc Tezel

## Mouvement apparent des planètes (Sect. 1.2)

- Périodes synodiques
- Périodes sidérales:  
retour au même endroit d'une constellation du zodiaque
- Boucles rétrogrades:  
mouvement en sens opposé du mouvement Ouest - Est habituel
- Préférence zodiacale:



A chaque planète peut être associée une constellation du zodiaque dans laquelle la planète passe plus de temps. La même planète se déplace plus rapidement qu'en moyenne dans la constellation diamétralement opposée.

## Théorie géocentrique du système planétaire (Sect. 1.3)

L'approche **théorique** (physique, géométrie, philosophie) de la Grèce antique enrichit

l'approche **empirique** (observations) de la Mésopotamie

La physique aristotélicienne (Aristote 350 av J.C., disciple de Platon) est basée sur trois idées maîtresses:

- La **sphéricité de la Terre** (3 preuves expérimentales):
  - apparition du mât d'un navire avant sa coque

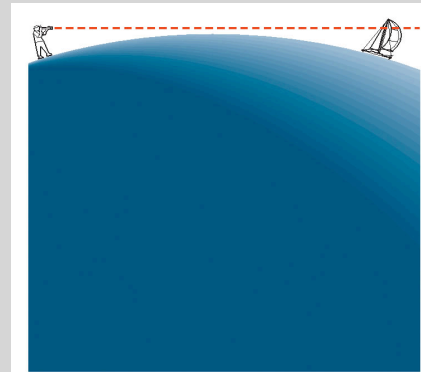


Figure 1.5

## Théorie géocentrique du système planétaire (Sect. 1.3)

L'approche **théorique** (physique, géométrie, philosophie) de la Grèce antique enrichit

l'approche **empirique** (observations) de la Mésopotamie

La physique aristotélicienne (Aristote 350 av J.C., disciple de Platon) est basée sur trois idées maîtresses:

- La **sphéricité de la Terre** (3 preuves expérimentales):
  - apparition du mât d'un navire avant sa coque
  - L'ombre de la Terre projetée sur la Lune est circulaire lors d'une éclipse totale de Lune



Crédit: [http://www.ne.jp/asahi/stellar/scenes/eclipse\\_e/le2k\\_04.htm](http://www.ne.jp/asahi/stellar/scenes/eclipse_e/le2k_04.htm)  
Eclipse du 16 juillet 2000 (Naoyuki Kurita)

Fig. 2.4



Lune à 22h30

Image composite

Lune à 20h05

Crédit: <http://w1.195.telia.com/~u19508145/Lunar%20Eclipse%202001.htm>  
Eclipse du 9 janvier 2001 (Owe Dahren)



Crédit: Astronomy Picture of the Day / <http://antwrp.gsfc.nasa.gov/apod/ap080820.html>

# Théorie géocentrique du système planétaire (Sect. 1.3)

L'approche **théorique** (physique, géométrie, philosophie) de la Grèce antique enrichit

l'approche **empirique** (observations) de la Mésopotamie

La physique aristotélicienne (Aristote 350 av J.C., disciple de Platon) est basée sur trois idées maîtresses:

- La **sphéricité de la Terre** (3 preuves expérimentales):
  - apparition du mât d'un navire avant sa coque
  - ombre de la Terre projetée sur la Lune est circulaire lors d'une éclipse totale de Lune
  - **variation de la hauteur de l'étoile Polaire à différentes latitudes**

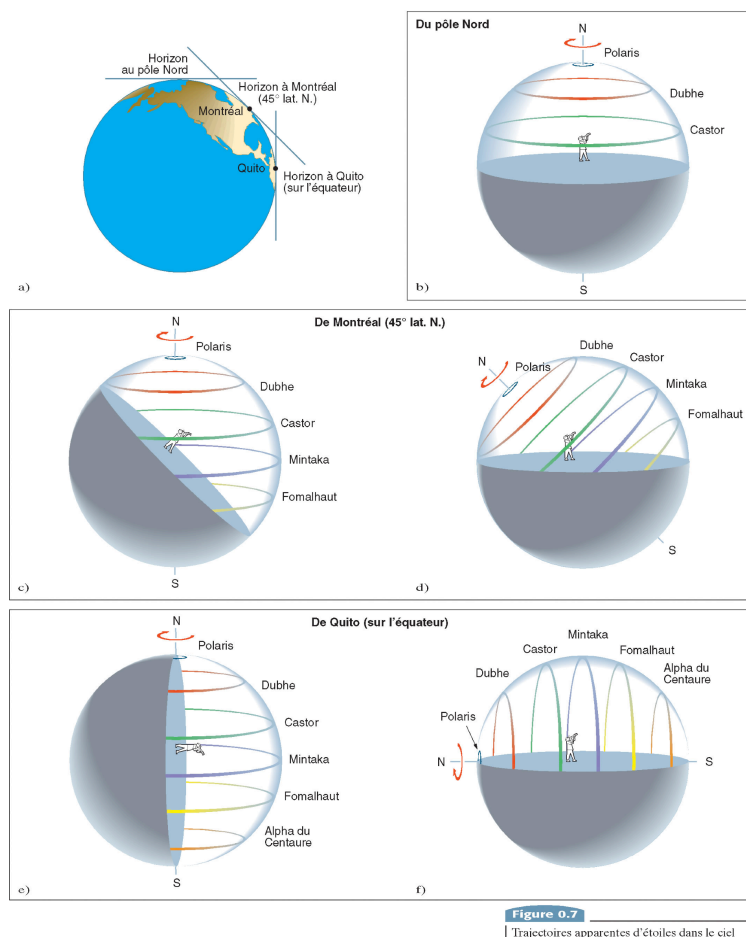


Fig. 0.7

Figure 0.7  
Trajectoires apparentes d'étoiles dans le ciel

## Théorie géocentrique du système planétaire (Sect. 1.3)

L'approche **théorique** (physique, géométrie, philosophie) de la Grèce antique enrichit

l'approche **empirique** (observations) de la Mésopotamie

La physique aristotélicienne (Aristote 350 av J.C., disciple de Platon) est basée sur trois idées maîtresses:

- La sphéricité de la Terre (3 preuves expérimentales)
- L'univers est constitué de 4 éléments (Terre, Eau, Air, Feu)  
Chacun possède un **mouvement naturel** qui l'entraîne vers son **lieu naturel**

### • La perfection du cercle:

Les étoiles, qui semblent tourner autour de la Terre, doivent être constituées d'un **cinquième élément**:

la **quintessence** ou **éther**,

dont le **mouvement naturel** est la **rotation** (mouvement 'parfait')

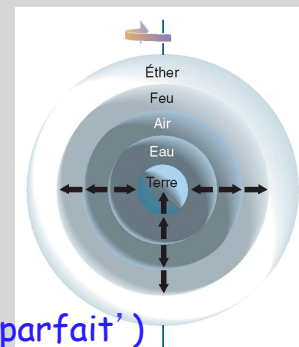


Figure 1.6

## Théorie géocentrique du système planétaire:

(Sect. 1.3)

d' Aristote (350 av. J.C.) à Ptolémée (~100 - ~170 ap. J.C.)

Enormes progrès accomplis pour « **sauver les apparences** » :

Comment expliquer **boucles rétrogrades** et **préférence zodiacale**

à l'aide de **mouvements circulaires uniformes**?

Le génie de Ptolémée (et de ses prédécesseurs Apollonius de Perge et Hipparque)!

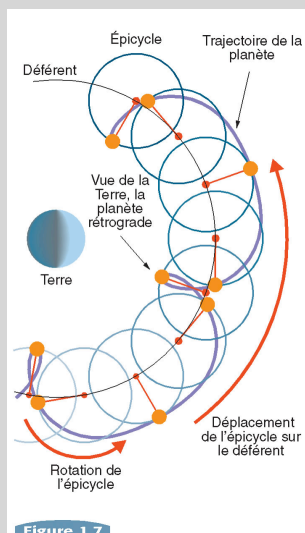


Figure 1.7

Boucle rétrograde

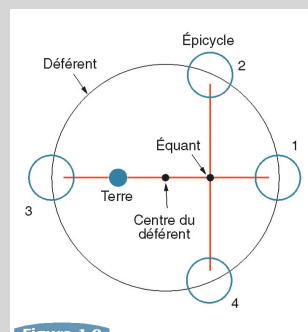


Figure 1.8

Préférence zodiacale

Cette solution préfigure la 1<sup>ère</sup> loi de Kepler (1609):  
orbites elliptiques.

Elle rend compte également de l'**inégalité des saisons**



## Théorie géocentrique du système planétaire:

(Sect. 1.4)

d' Aristote (350 av. J.C.) à Ptolémée (~100 - ~170 ap. J.C.)

D' énormes progrès accomplis pour « sauver les apparences »

De Coelo - Physica

Almageste [Al-majisti = « La plus grande » (compilation)]

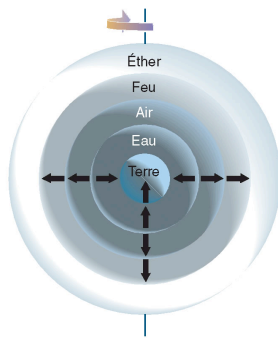


Figure 1.6

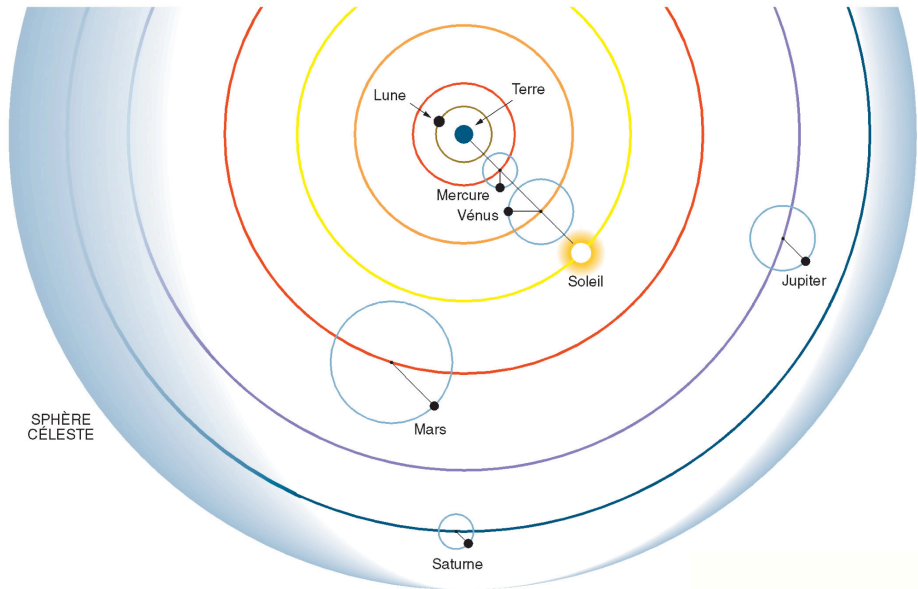


Figure 1.9

## Théorie géocentrique du système planétaire:

(Sect. 1.4)

Ptolémée (~100 - ~170 ap. J.C.)

### De curieuses coïncidences !

- Positions des centres des épicycles de Mercure, Vénus sont alignés sur le Soleil
- Positions de Mars, Jupiter et Saturne sur leurs épicycles sont identiques

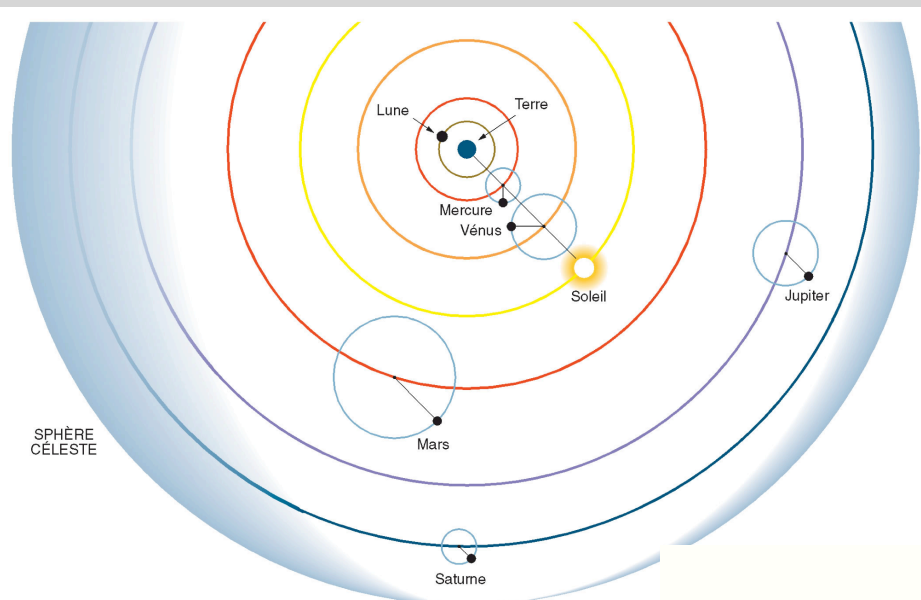


Figure 1.9

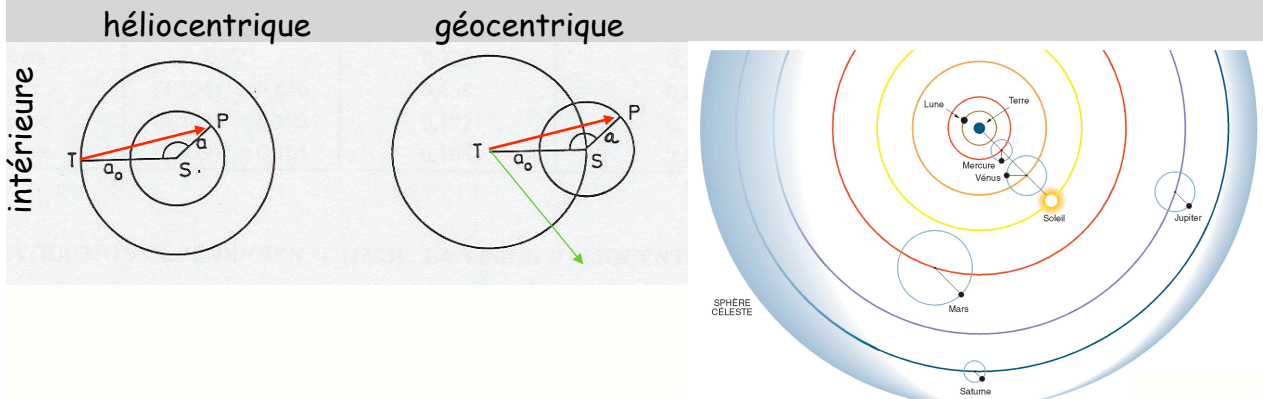
Théorie géocentrique du système planétaire:

(Sect. 1.4)

Ptolémée (~100 - ~170 ap. J.C.)

De curieuses coïncidences !

qui s'expliquent naturellement dans le cadre d'un modèle héliocentrique...



Planètes **intérieures** (Mercure - Vénus):

- Déférent parcouru en 1 an
- Epicycle parcourue en une **période synodique**  
(en adoptant la droite TS comme référence)  
en une **période orbitale**  
(en adoptant une direction fixe comme référence)

Théorie géocentrique du système planétaire:

(Sect. 1.4)

Ptolémée (~100 - ~170 ap. J.C.)

De curieuses coïncidences !

qui s'expliquent naturellement dans le cadre d'un modèle héliocentrique...

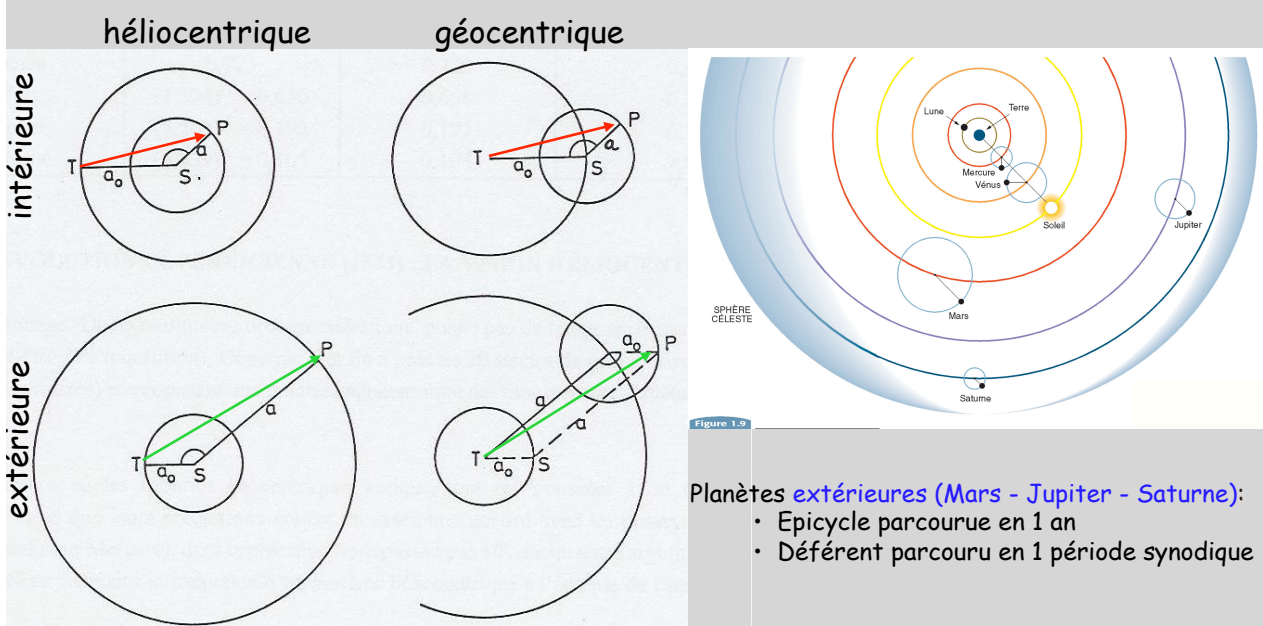


Figure 1.9

Planètes **extérieures** (Mars - Jupiter - Saturne):

- Epicycle parcourue en 1 an
- Déférent parcouru en 1 période synodique

## Théorie héliocentrique du système planétaire:

(Sect. 1.5)

Nicolas Copernic (1473 - 1543)

- Arguments de nature philosophique \*  
et esthétique (simplicité, élégance)
- Précision moins bonne que celle atteinte par Ptolémée!
- Pas de preuve observationnelle directe!

\* Nicolas de Cuse (~1450):  
Terre en mouvement sans que l'on  
s'en rende compte:  
Analogie avec passagers dans la cale  
sans hublots d'un bateau en M.R.U.

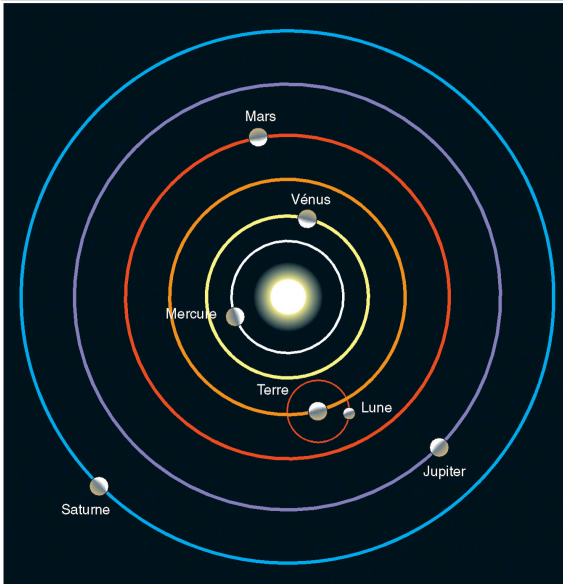
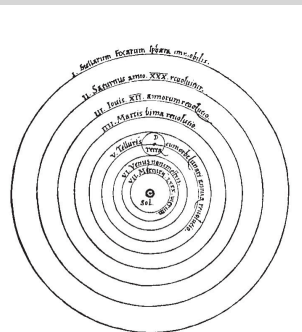
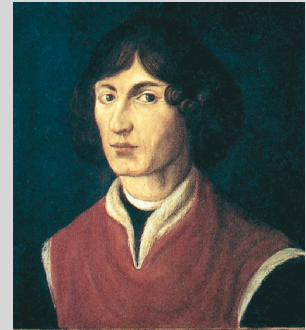


Fig. 1.10



Le système héliocentrique de Copernic.



CLARISSIMUS ET DOCTISSIMUS DOCTOR NICOLAUS COPERNICUS TORUNENSIS CANONICUS WARMIENSIS ASTRONOMUS INCOMPARABILIS

Nicolas Copernic (1473-1543).

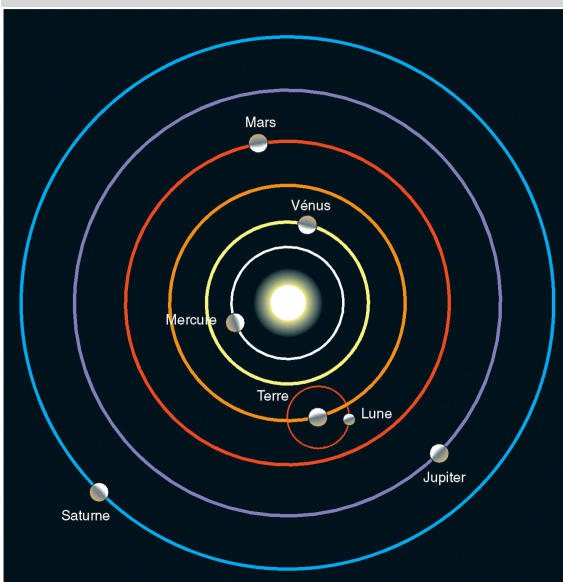
De Revolutionibus  
Orbium Coelestium,  
1543

## Théorie héliocentrique du système planétaire:

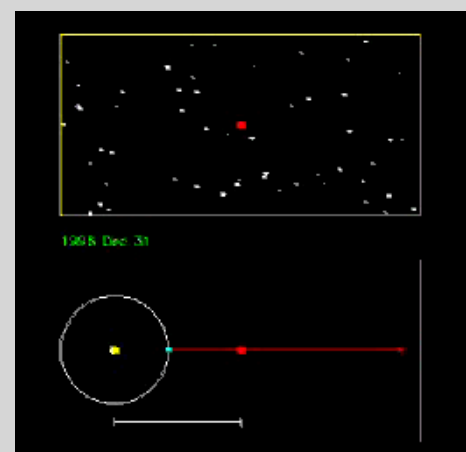
(Sect. 1.5)

Nicolas Copernic (1473 - 1543)

- Arguments de nature philosophique  
et esthétique (simplicité, élégance)
- Précision moins bonne que celle atteinte par Ptolémée!
- Pas de preuve observationnelle directe à l'époque de Copernic !



Parallaxe des étoiles: Bessel 1838 !



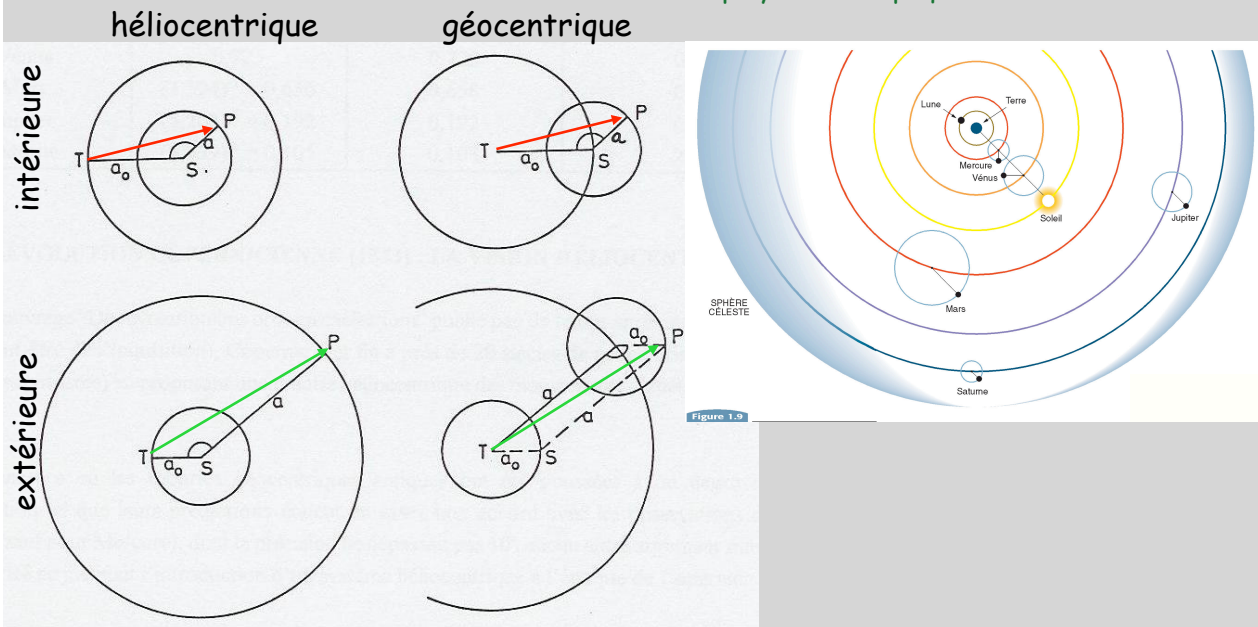
## Théorie héliocentrique du système planétaire:

(Sect. 1.5)

Nicolas Copernic (1473 - 1543)

- Arguments de nature philosophique et esthétique (simplicité, élégance)

Les corrélations entre positions des épicycles et sur les épicycles s'expliquent naturellement.



## Théorie héliocentrique du système planétaire:

(Sect. 1.5)

Nicolas Copernic (1473 - 1543)

- Arguments de nature philosophique et esthétique (simplicité, élégance)

L'ordre de succession des planètes dans le modèle géocentrique ne peut se déduire de l'évolution des périodes sidérales  $P_{sid}$ .

Lune - Mercure - Vénus - Soleil - Mars...  
 $P_{sid}$  27,3j - 1 an - 1 an - 1 an - 1,88 an

[car ces périodes sidérales correspondent à la durée de parcours du déférent - par rapport à une direction fixe]

⇒ l'ordre de succession (géocentrique) de Mercure/Vénus est arbitraire...!

## Théorie héliocentrique du système planétaire:

(Sect. 1.5)

Nicolas Copernic (1473 - 1543)

- Arguments de nature philosophique et esthétique (simplicité, élégance)

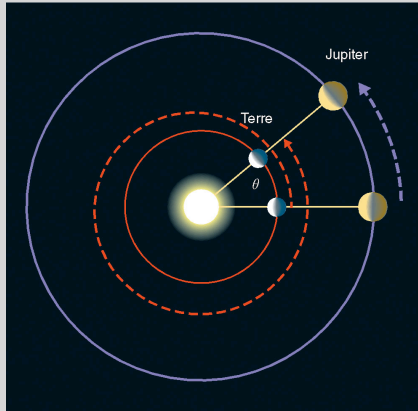


Figure 1.15

L'ordre de succession de Mercure/Vénus dans le modèle géocentrique est arbitraire...!

Copernic calcule

- les périodes orbitales  $P_{orb,P}$  à partir des périodes synodiques  $P_{syn,P}$  et de la période orbitale de la Terre  $P_{orb,T}$
- (Compl. 1.1: math & phys.)

$$\frac{1}{P_{orbP}} = \frac{1}{P_{orbT}} + \frac{1}{P_{synP}} \quad (\text{planète intérieure})$$

$$\frac{1}{P_{orbP}} = \frac{1}{P_{orbT}} - \frac{1}{P_{synP}} \quad (\text{planète extérieure})$$

## Théorie héliocentrique du système planétaire:

(Sect. 1.5)

Nicolas Copernic (1473 - 1543)

- Arguments de nature philosophique et esthétique (simplicité, élégance)

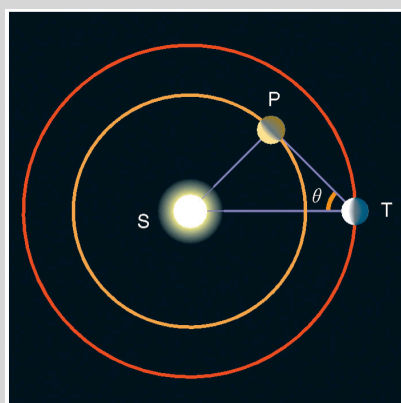


Figure 2.7

L'ordre de succession de Mercure/Vénus dans le modèle géocentrique est arbitraire...!

Copernic calcule

- les périodes orbitales  $P_{orb,P}$  à partir des périodes synodiques  $P_{syn,P}$  et de la période orbitale de la Terre  $P_{orb,T}$
- (Compl. 1.1: math & phys.)

- les distances au Soleil (Sect.2.5)

$$PS = TS \sin\theta$$

## Théorie héliocentrique du système planétaire:

(Sect. 1.5)

Nicolas Copernic (1473 - 1543)

- Arguments de nature philosophique et esthétique (simplicité, élégance)

L'ordre de succession de Mercure/Vénus dans le modèle géocentrique est arbitraire...!

Copernic calcule

- les périodes orbitales  $P_{orb,P}$  à partir des périodes synodiques  $P_{syn,P}$  et de la période orbitale de la Terre  $P_{orb,T}$

(Compl. 1.1: math & phys.)

	$P_{orb}$ (an)	$a$ (UA)	$a^3 / P^2$
Lune	0.075	0.00257	$3.0 \cdot 10^{-6}$
Mercure	0.24	0.387	1.0
Vénus	0.62	0.723	1.0
Soleil	1	1	1.0
Mars	1.88	1.524	1.0
Jupiter	11.86	5.203	1.0
Saturne	29.46	9.54	1.0

- les distances au Soleil (Sect.2.5)

L'ordre de succession selon  $P_{orb}$  est identique à l'ordre de succession selon  $a$  (=PS) dans le cadre du modèle héliocentrique!

Troisième loi de Kepler (1618) (Sect.3.2)

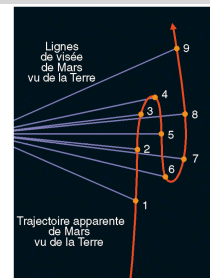
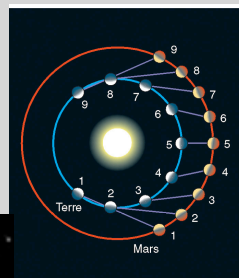
## Théorie héliocentrique du système planétaire:

(Sect. 1.5)

Nicolas Copernic (1473 - 1543)

- Arguments de nature philosophique et esthétique (simplicité, élégance)

Boucles de rétrogradation: explication naturelle



## Théorie héliocentrique du système planétaire:

(Sect. 1.5)

Nicolas Copernic (1473 - 1543)

- Arguments de nature philosophique et esthétique (simplicité, élégance)

Boucles de rétrogradation: explication naturelle

Au contraire: préférence zodiacale pas reproduite...

...à moins de compliquer le modèle, par l'introduction d'épicycles d'excentricité

(à ne pas confondre avec les épicycles de Ptolémée destinées à reproduire les boucles de rétrogradation)

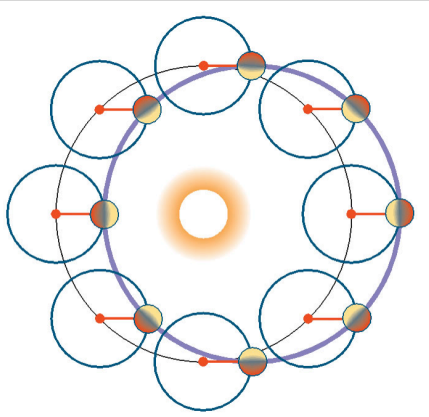


Figure 1.12

→ Le modèle complet de Copernic est (presqu') aussi compliqué que celui de Ptolémée, ...quoique

- il rend compte de certaines concordances
- les complications disparaissent avec le remplacement d'orbites circulaires par des orbites elliptiques (J. Kepler 1571 - 1630)

## Théorie héliocentrique du système planétaire:

(Sect. 3.1)

nouvelles observations Tycho Brahe (1546 - 1601)

les lois des mouvements planétaires Johannes Kepler (1571 - 1630)

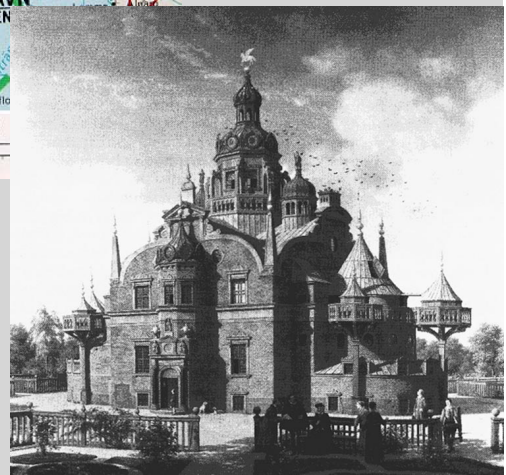


Tycho Brahe: le dernier astronome pré-télescopique



Ile de Hven

Uraniborg



## Théorie héliocentrique du système planétaire:

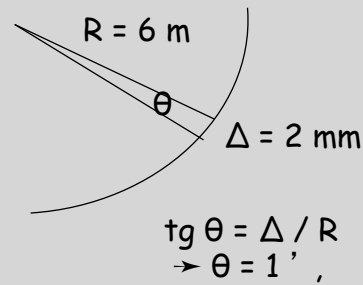
(Sect. 3.1)

nouvelles observations Tycho Brahe

(1546 - 1601)



Construction du château-observatoire Uraniborg, doté des meilleurs instruments de visée à l'œil nu, comme un **grand quadrant mural**, de 6 m de rayon.



soit 1/30 du diamètre de la Pleine Lune, une précision jamais atteinte jusque là!

Tycho Brahe: le dernier astronome pré-télescopique

## Théorie héliocentrique du système planétaire:

(Sect. 3.2)

nouvelles observations Tycho Brahe

(1546 - 1601)

les lois des mouvements planétaires Johannes Kepler (1571 - 1630)

Tycho lègue ses observations à J. Kepler qui parvient à en extraire **3 lois du mouvement planétaire** (« Lois de Kepler »)

1<sup>ere</sup> loi (1609): **les orbites planétaires sont des courbes planes, fermées de type elliptique dont le Soleil occupe un des foyers**

**Ellipse** = lieu des points dont la somme des distances à deux points fixes (« foyers »  $F, F'$ ) est une constante (soit  $2a = PA$ , la longueur du « grand-axe »)

L'ellipse est entièrement définie par 2 nombres:

Le **demi grand-axe**  $a$

L'**excentricité**  $e$

= écart au cercle:  $e = CF / PC$

Deux points particuliers:  $P$  = périhélie  
 $A$  = aphélie



Johannes Kepler (1571-1630).

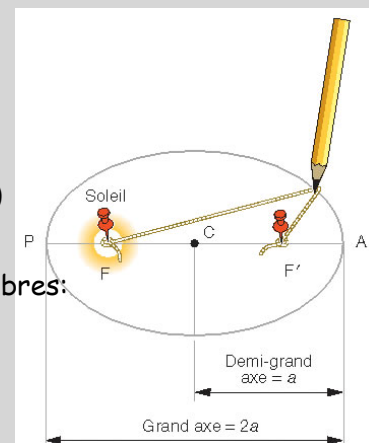


Figure 3.2



Théorie héliocentrique du système planétaire: (Sect. 3.2)  
 nouvelles observations Tycho Brahe (1546 - 1601)  
 les lois des mouvements planétaires Johannes Kepler (1571 - 1630)

Tycho lègue ses observations à J. Kepler qui parvient à en extraire  
 3 lois du mouvement planétaire (« Lois de Kepler »)

2eme loi (1609): le rayon-vecteur balaie des aires égales en des durées égales



Johannes Kepler (1571-1630).

- La préférence zodiacale
- L' inégalité des saisons,

Ex: 21 mars - 23 sept: 186 j  
 23 sept - 20 mars: 179 j

enfin expliquées !

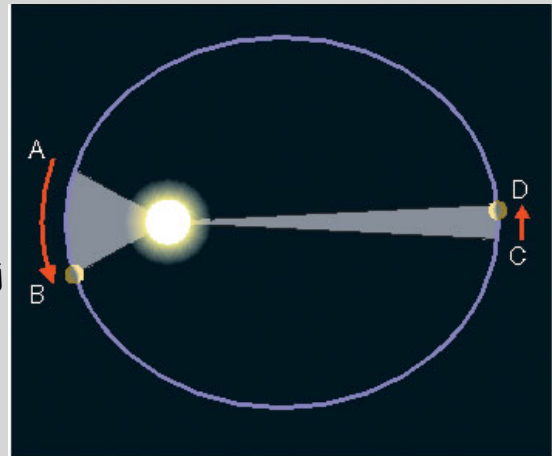


Figure 3.4

Théorie héliocentrique du système planétaire: (Sect. 3.2)  
 nouvelles observations Tycho Brahe (1546 - 1601)  
 les lois des mouvements planétaires Johannes Kepler (1571 - 1630)

Tycho lègue ses observations à J. Kepler qui parvient à en extraire  
 3 lois du mouvement planétaire (« Lois de Kepler »)

3eme loi (1618): le rapport  $a^3 / P_{orb}^2$  est identique pour toutes les planètes  
 (tournant autour du Soleil)



Johannes Kepler (1571-1630).

	$P_{orb}$ (an)	$a$ (UA)	$a^3 / P^2$
Lune	0.075	0.00257	$3.0 \cdot 10^{-6}$
Mercure	0.24	0.387	1.0
Vénus	0.62	0.723	1.0
Soleil	1	1	1.0
Mars	1.88	1.524	1.0
Jupiter	11.86	5.203	1.0
Saturne	29.46	9.54	1.0

Théorie héliocentrique du système planétaire: (Sect. 3.4)

nouvelles observations	Tycho Brahe	(1546 - 1601)
les lois des mouvements planétaires	Johannes Kepler	(1571 - 1630)
la loi de la gravitation universelle	Isaac Newton	(1642 - 1727)

Des trois lois de Kepler, Newton déduit (Principia 1687)  
la forme analytique de la force de la gravitation: (Phys. & Math: Compl. 3.2 et 3.4)

force centrale en  $1 / r^2$

où  $r$  est la distance séparant les 2 corps massifs  $M_S, m_p$

$$F_{\text{Newton}} = G M_S m_p / r^2$$

$G$  = constante de la gravitation universelle  
 $= 6.67 \cdot 10^{-11} \text{ N m}^2 / \text{kg}^2$



Isaac Newton (1642-1727).

Exemple: accélération centripète dans une orbite circulaire

$$g_{\text{centripète}} = v_{\text{orb}}^2 / r = (2\pi r/P)^2 / r = 4\pi^2 r / P^2$$

doit être égale à l'accélération associée à la force de gravité:

$$g_{\text{gravité}} = G (M + m) / r^2$$

3<sup>e</sup> loi de Kepler!

$$\rightarrow r^3 / P^2 = a^3 / P^2 = G (M+m) / 4\pi^2$$

Théorie héliocentrique du système planétaire: (Sect. 3.4)

nouvelles observations	Tycho Brahe	(1546 - 1601)
les lois des mouvements planétaires	Johannes Kepler	(1571 - 1630)
la loi de la gravitation universelle	Isaac Newton	(1642 - 1727)

Des trois lois de Kepler, Newton déduit (Principia 1687)  
la forme analytique de la force de la gravitation: (Phys. & Math: Compl. 3.2 et 3.4)

force centrale en  $1 / r^2$

où  $r$  est la distance séparant les 2 corps massifs  $M_S, m_p$

$$F_{\text{Newton}} = G M_S m_p / r^2$$

$G$  = constante de la gravitation **universelle**  
 $= 6.67 \cdot 10^{-11} \text{ N m}^2 / \text{kg}^2$



Isaac Newton (1642-1727).

Universelle??

Peut-être bien que non !!

Depuis 1982, suggestion que  $F = m_p [a_0 G M_S / r^2]^{1/2}$

lorsque  $F_{\text{newton}}/m_p < a_0 = 1.2 \cdot 10^{-8} \text{ cm s}^{-2}$  Rem:  $g = 9.81 \text{ m s}^{-2}$

Très sérieusement considérée ces derniers mois,

à la place de la **matière sombre** des galaxies!

(Phys. & Math: Compl. 8.2)

## Théorie héliocentrique du système planétaire:

(Sect. 1.6)

Galileo Galilei (1564 - 1642)

- Faits d'observations: arguments analogiques non concluants !!!

Galilée: première lunette astronomique (1609)

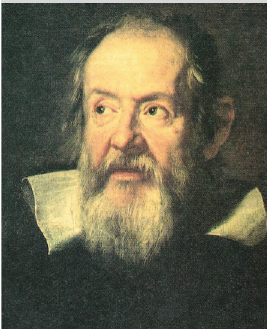


Figure 5.18

p. 192

## Théorie héliocentrique du système planétaire:

(Sect. 1.6)

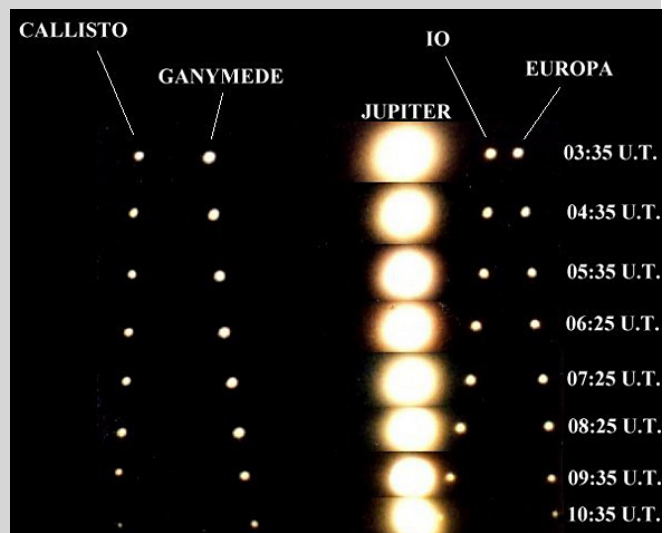
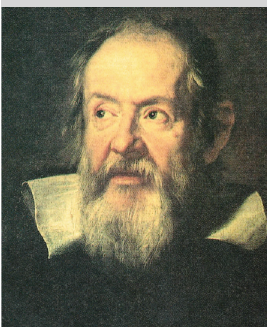
Galileo Galilei (1564 - 1642)

- Faits d'observations: arguments analogiques non concluants !!!

Galilée: première lunette astronomique (1609)

- satellites (« galiléens ») de Jupiter

(tous les corps ne tournent pas autour de la Terre!)



Crédit: Mike Earl <http://ottawa.rasc.ca/pictures/mearl/film/planets/>

## Théorie héliocentrique du système planétaire:

(Sect. 1.6)

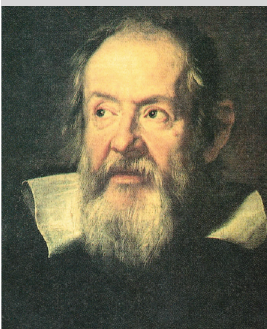
Galileo Galilei (1564 - 1642)

- **Faits d'observations: arguments analogiques non concluants !!!**

Galilée: première lunette astronomique (1609)

- satellites (« galiléens ») de Jupiter  
(tous les corps ne tournent pas autour de la Terre!)
- **taches solaires**  
(Univers n'est ni parfait ni immuable!)

Aussi supernova de Tycho Brahe  
en 1572 (voir chapitre 3!)



## Théorie héliocentrique du système planétaire:

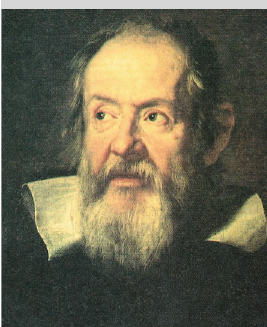
(Sect. 1.6)

Galileo Galilei (1564 - 1642)

- **Faits d'observations: arguments analogiques non concluants !!!**

Galilée: première lunette astronomique (1609)

- satellites (« galiléens ») de Jupiter  
(tous les corps ne tournent pas autour de la Terre!)
- taches solaires  
(Univers n'est ni parfait ni immuable!)
- **montagnes lunaires**  
(la Lune est un corps fondamentalement de même nature que la Terre)



## Théorie héliocentrique du système planétaire:

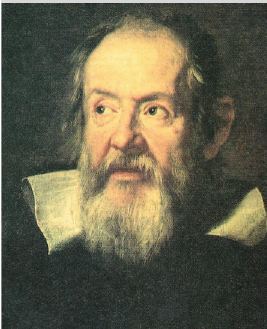
(Sect. 1.6)

Galileo Galilei (1564 - 1642)

- Faits d'observations: arguments analogiques non concluants !!!

Galilée: première lunette astronomique (1609)

- satellites (« galiléens ») de Jupiter  
(tous les corps ne tournent pas autour de la Terre!)
- taches solaires  
(Univers n'est ni parfait ni immuable!)
- montagnes lunaires  
(la Lune est un corps fondamentalement de même nature que la Terre)



-> Plus de séparation nette entre  
le monde terrestre, unique mais corrompu  
et en perpétuel changement,  
et le monde céleste parfait et immuable

Cette séparation représentait le fondement de la  
physique d'Aristote

## Théorie héliocentrique du système planétaire:

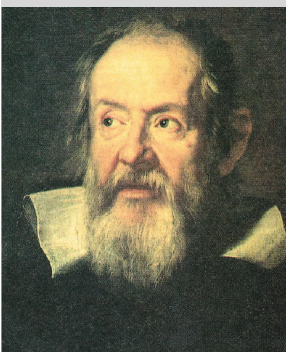
(Sect. 1.6)

Galileo Galilei (1564 - 1642)

- Faits d'observations: arguments analogiques non concluants !!!

Galilée: première lunette astronomique (1609)

- phases de Vénus



630 mm | f/8.0 | 1/500 sec | 100 ISO

Montag, 18. Juni 2007 16:15 Uhr MESZ

## Théorie héliocentrique du système planétaire:

(Sect. 1.6)

Galileo Galilei (1564 - 1642)

- Faits d'observations: arguments analogiques non concluants !!!

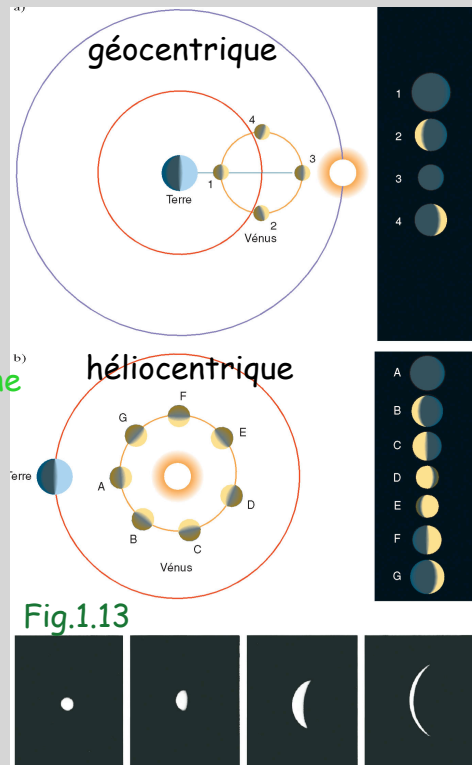
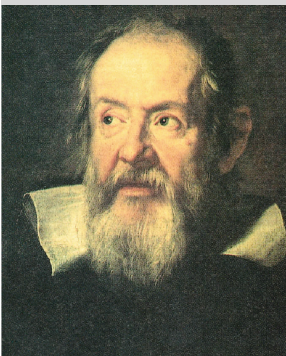
Galilée: première lunette astronomique (1609)

- phases de Vénus

discriminent entre les modèles géocentriques et héliocentriques?

Pas vraiment!

C' est une preuve que Vénus tourne autour du Soleil, mais pas que la Terre tourne autour du Soleil



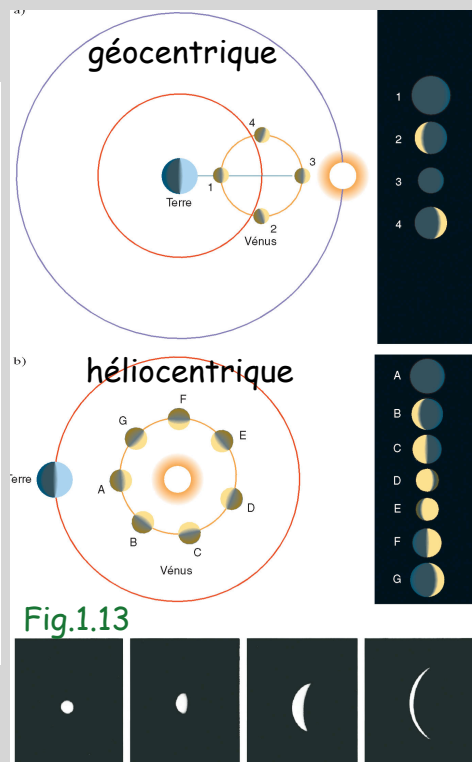
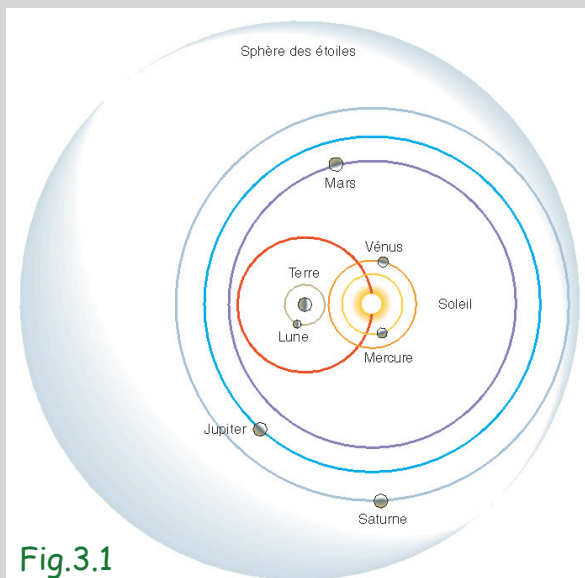
## Théorie hélio-géocentrique du système planétaire:

(Sect. 1.6)

Tycho Brahé (1546 - 1601)

Modèle hybride de Tycho Brahé !

- ➔ argument des phases de Vénus non concluant !



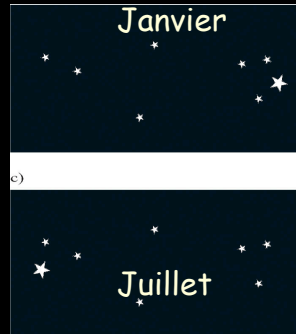
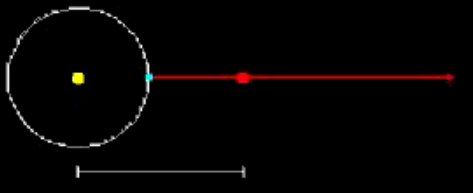
## Effet parallactique: Bessel 1838

Sect. 2.7

La preuve définitive  
du mouvement de la Terre autour du Soleil



1838 Dec 31



c)

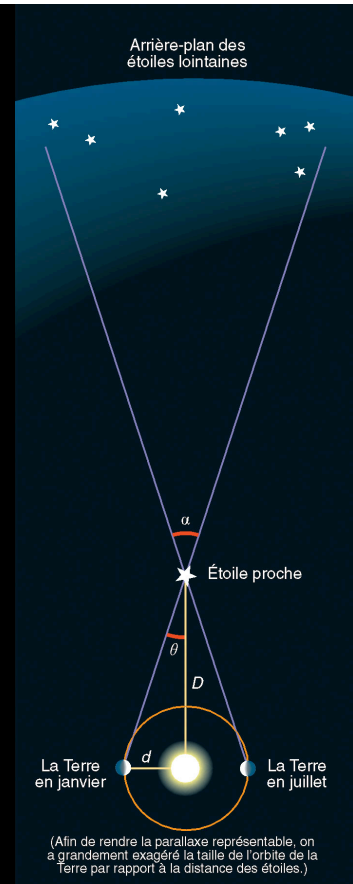


Figure 2.12

## Effet parallactique: Bessel 1838

Sect. 2.7

La preuve définitive  
du mouvement de la Terre autour du Soleil

Mesure de la distance des étoiles:

$$d_{T-S} / D = \text{tg } \varpi$$

$\varpi$  = angle parallactique est toujours très petit:

Au maximum (Proxima Centauri):  $\varpi = 0'' .7$

$1''$  = angle sous-tendu par une pièce de 1 € ( $d = 2 \text{ cm}$ )  
à une distance  $D = 4 \text{ km}$

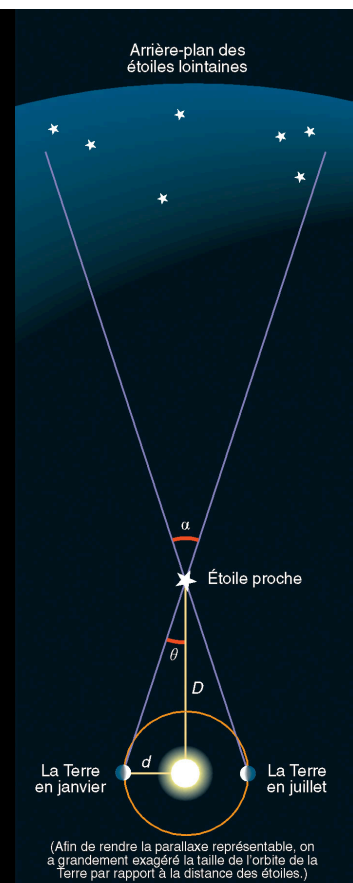


Figure 2.12

## Effet parallactique: Bessel 1838

Sect. 2.7

La preuve définitive  
du mouvement de la Terre autour du Soleil

Mesure de la distance des étoiles:

$$d_{T-S} / D = \text{tg } \varpi$$

$\varpi$  = angle parallactique est toujours très petit:

$$\begin{aligned} \rightarrow d_{T-S} / D &= \text{tg } \varpi \\ &\sim \varpi \text{ (rad)} \\ &= \varpi ('' ) \pi / 180^\circ 3600'' \\ &= \varpi ('' ) / 206265 \end{aligned}$$

$$\rightarrow 206265 d_{T-S} / \varpi ('' ) = D$$

Si on adopte comme unité de distance  $d_{T-S}$   
= unité astronomique de distance (UA), alors

$$D \text{ (UA)} = 206265 \text{ UA} / \varpi ('' )$$

Si on adopte comme unité de distance 206265 UA

= 1 parsec (pc), alors

$$D \text{ (pc)} = 1 / \varpi ('' )$$

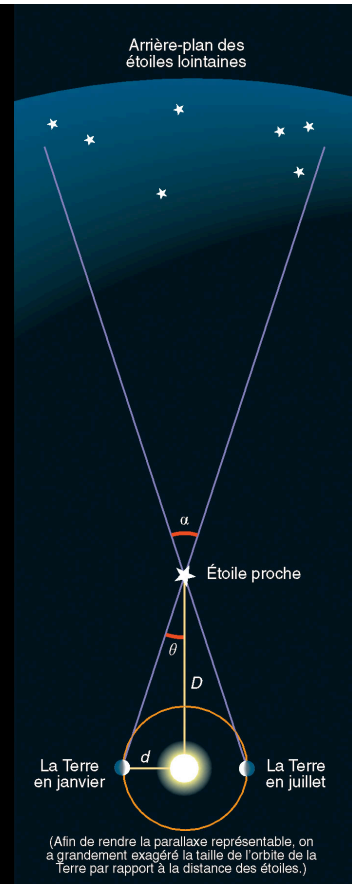


Figure 2.12

## Effet parallactique: Bessel 1838

Sect. 2.7

La preuve définitive  
du mouvement de la Terre autour du Soleil

Mesure de la distance des étoiles:

Si on adopte comme unité de distance 206265 UA  
= 1 parsec (pc), alors

$$D \text{ (pc)} = 1 / \varpi ('' )$$

$\varpi$  = angle parallactique est toujours très petit

1 parsec (pc) = distance D à laquelle l'unité astronomique  
est vue sous un angle de  $\varpi = 1''$

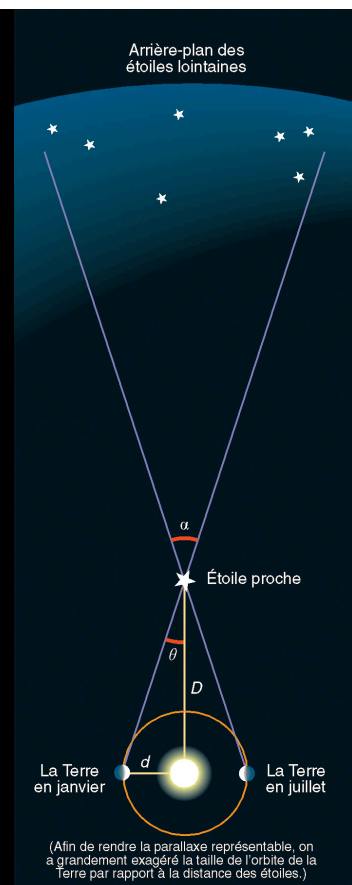


Figure 2.12



Effet parallactique: Bessel 1838

Sect. 2.7

La preuve définitive  
du mouvement de la Terre autour du Soleil

Un changement de paradigme: La sphère des étoiles éclate !



Crédit: Camille Flammarion, Dans l'atmosphère: Météorologie Populaire, Paris 1888

Effet parallactique: Bessel 1838

Sect. 2.7

La preuve définitive  
du mouvement de la Terre autour du Soleil

Un changement de paradigme: La sphère des étoiles éclate !

Les étoiles sont très lointaines,  
donc elles doivent être très lumineuses !

Seraient-elles analogues à notre Soleil...?