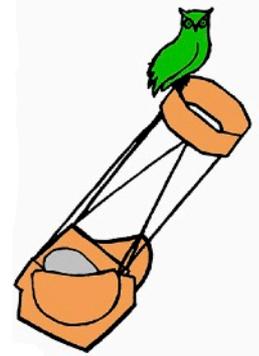


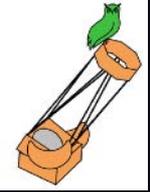
ALBEDO58

Astronomie au Pays Voironnais



Les mouvements de la terre dans l'univers

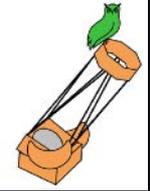
Rotation, révolution, saisons, précession, etc



webliographie

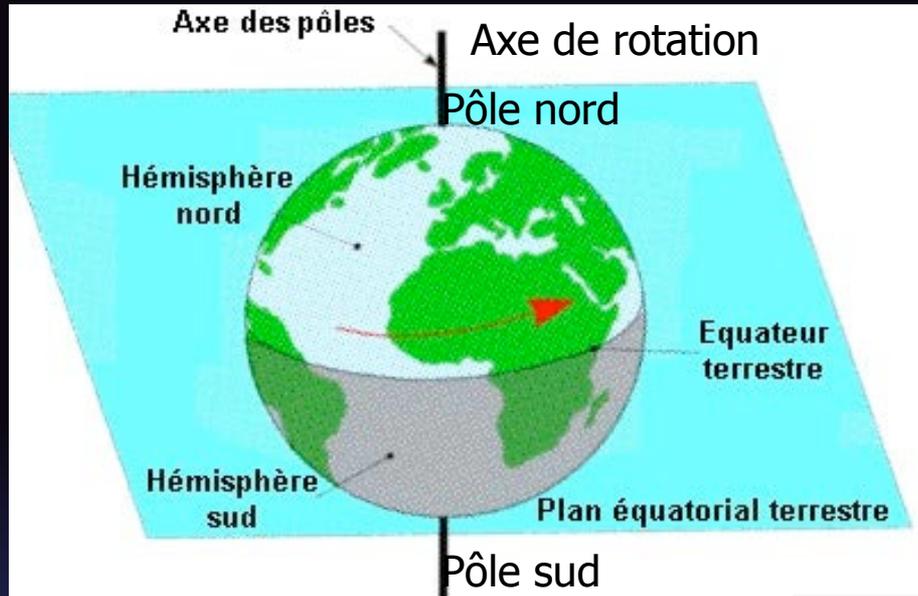
- https://media4.obspm.fr/public/ressources_lu/pages_mesure-temps/mctc-mouvements-terre.html
- https://media4.obspm.fr/public/ressources_lu/pages_stlp/introduction-stlp.html
- <https://promenade.imcce.fr/fr/pages3/325.html>
- <http://acces.ens-lyon.fr/acces/thematiques/paleo/variations/paleoclimats/syntheses/variations-du-climats/astro/milanko4.htm>
- <http://planet-terre.ens-lyon.fr/article/milankovitch-2005.xml>
- <http://serge.bertorello.free.fr/astrophy/mouvements/mvmts14.html>
- <http://icalendrier.fr/calendriers-saga/etudes-thematiques/saisons>

Aucune des figures de l'exposé n'est à l'échelle !!!



Rotation de la terre sur elle-même

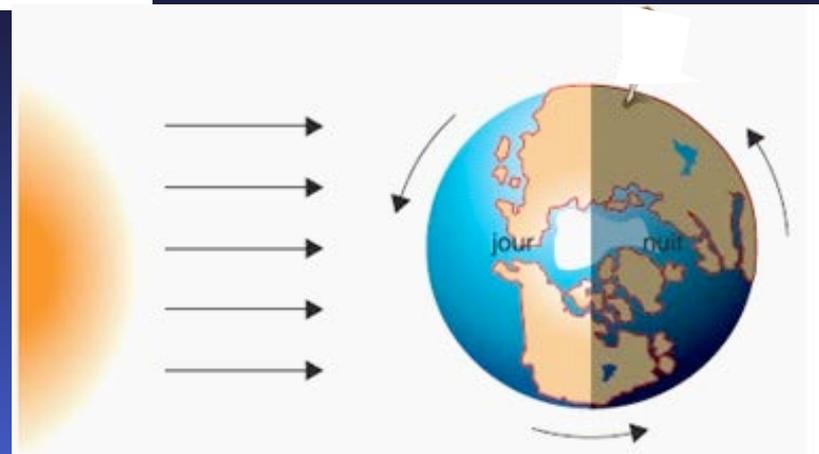
Autour d'un axe passant par les pôles

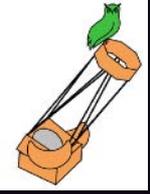


Sens d'ouest en est (direct)
Tour complet (360°) en 23h
56mn 4s

Vitesse de 1700 km/h
(465 m/s) à l'équateur

A l'origine de
l'alternance
jour/nuit

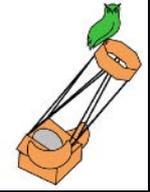




Rotation de la terre sur elle-même

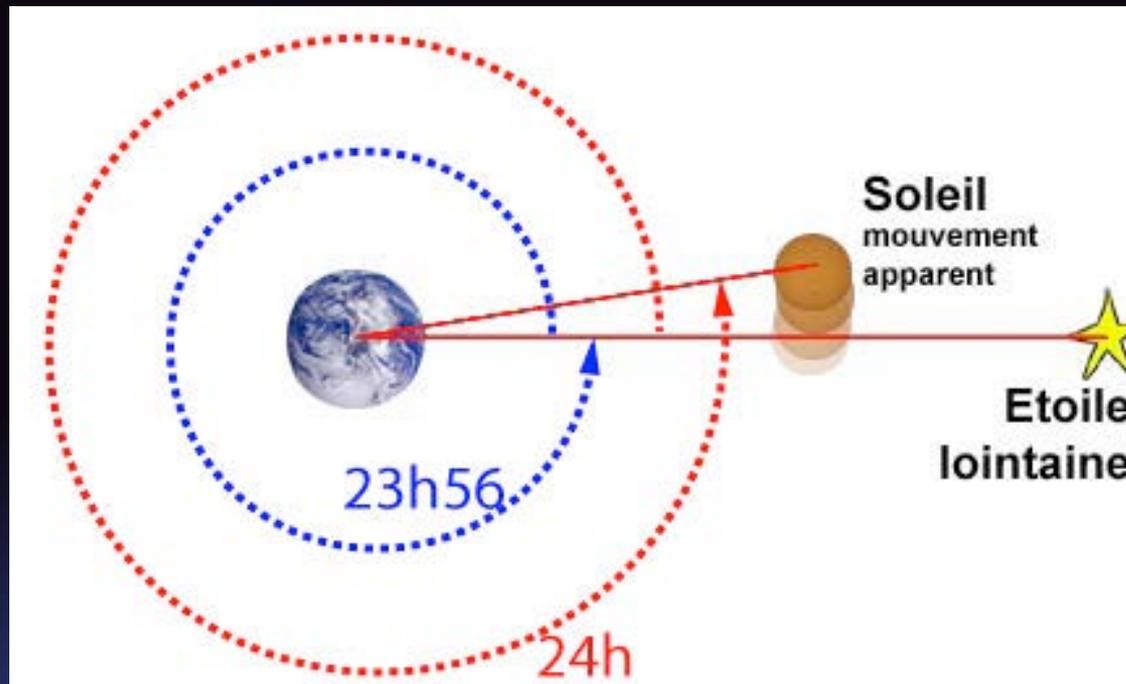
Rotation apparente des étoiles autour des pôles



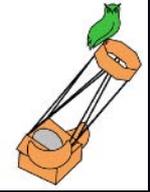


Rotation de la terre sur elle-même

Définition du jour

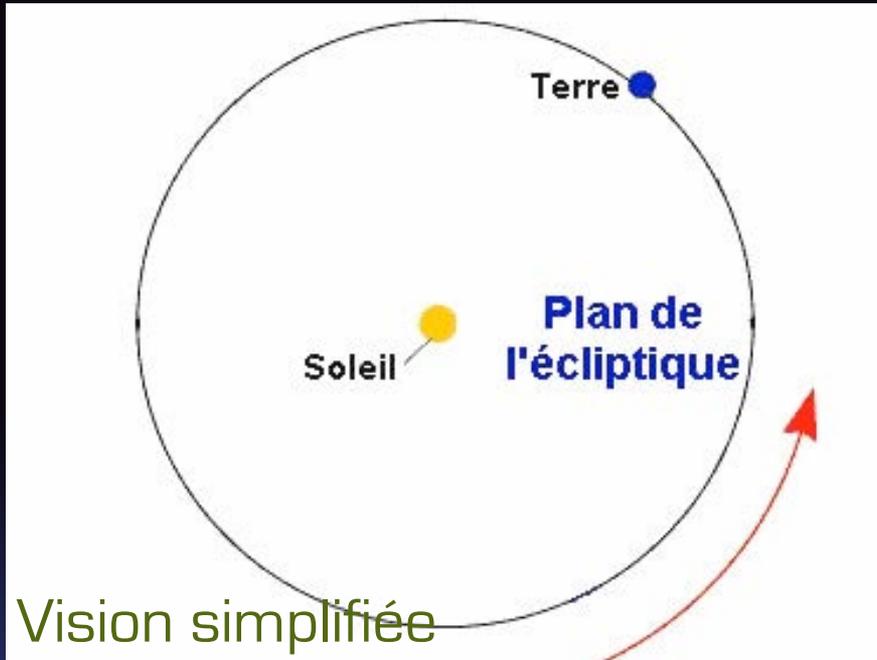


- retour du Soleil dans la même direction : définit le jour, durée moyenne de 24 heures
- À la même heure, à J+1 une étoile sera à une position différente d'environ 1°



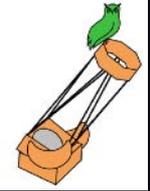
Révolution de la terre autour du soleil

Sur un plan, dans le sens direct, en une année



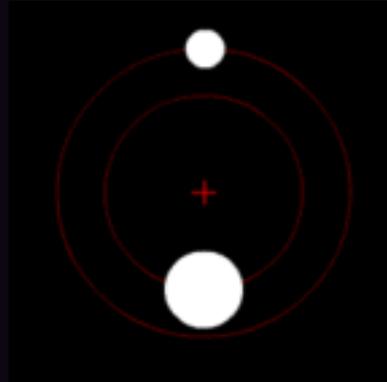
voyage
circumstellaire
à 29,8 km/s
(moyenne)

- Ce n'est pas la Terre prise en son centre qui se déplace sur le plan de l'écliptique mais le barycentre du système Terre-Lune.
- La révolution de la Terre autour du Soleil ne se fait pas selon un cercle mais selon une ellipse



Révolution de la terre autour du soleil

Barycentre

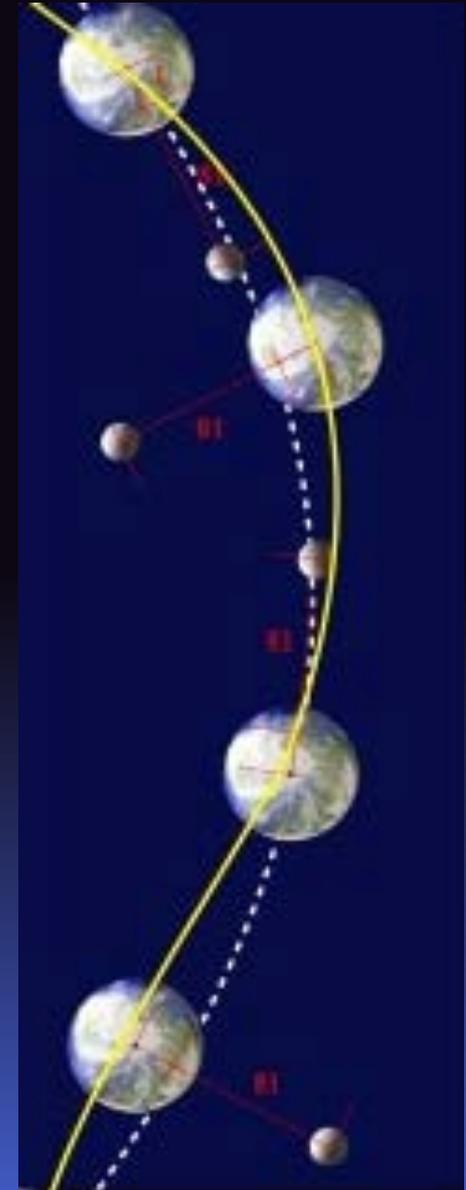


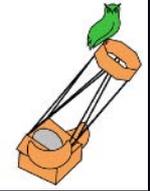
Barycentre terre-lune

Le rapport de masse du système Terre-Lune est de 81 : 1.



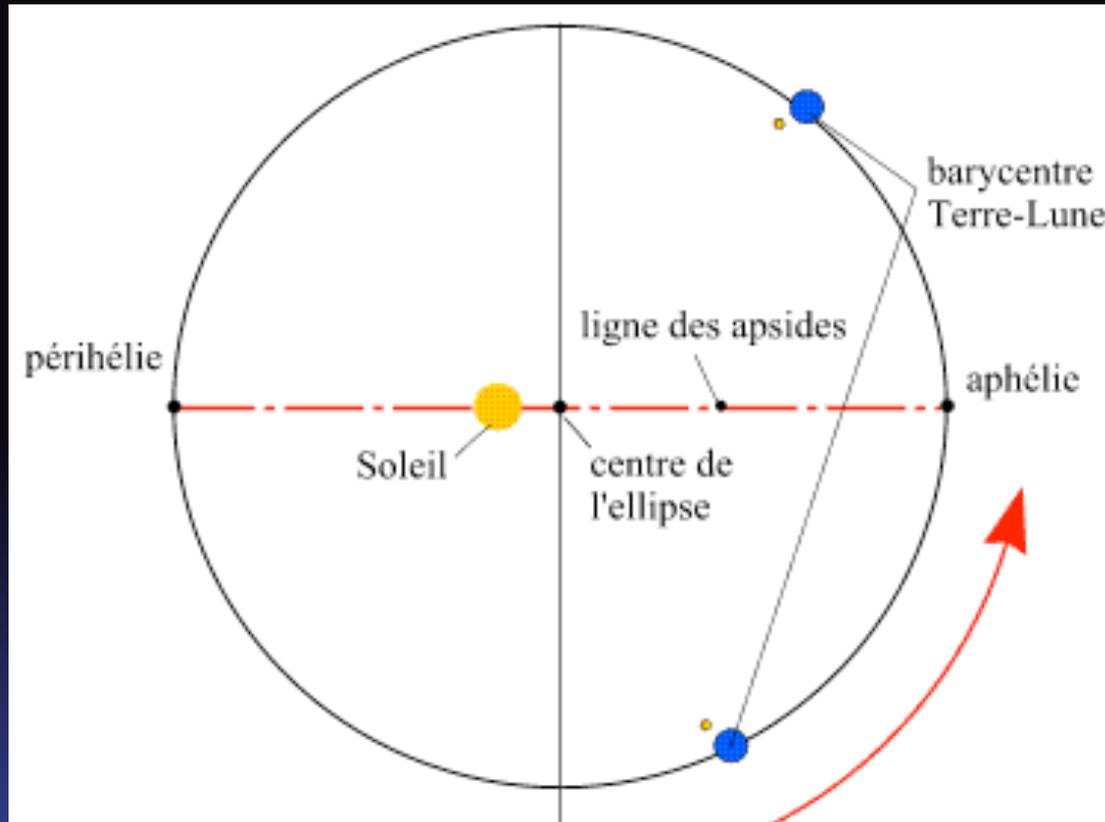
Le centre de gravité du système Terre-Lune est donc 81 fois plus éloigné du centre de la Lune que du centre de la Terre.





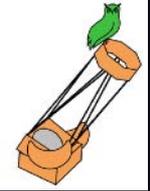
Révolution de la terre autour du soleil

Orbite elliptique



Orbite elliptique du barycentre Terre-Lune dans le plan de l'écliptique

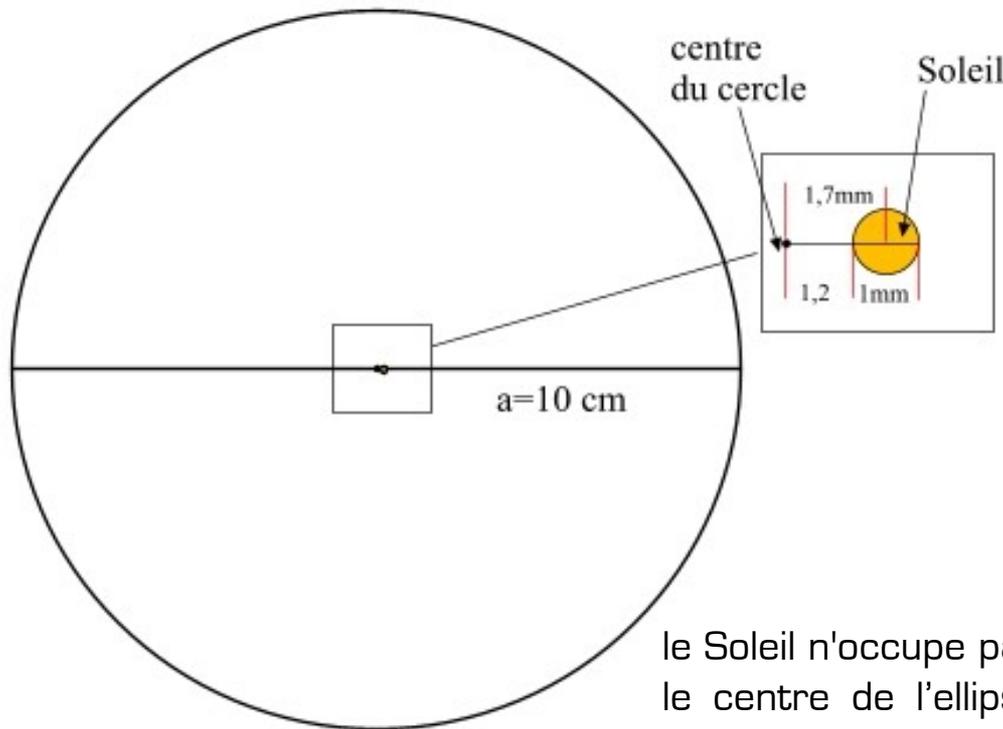
Crédit : IMCCE/Patrick Rocher



Révolution de la terre autour du soleil

Orbite elliptique... quasi circulaire !

a : demi grand axe, c : distance foyer-centre
Excentricité $e = c/a = 0,0167$



Orbite de la Terre

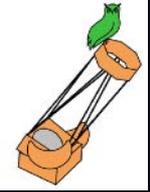
le Soleil n'occupe pas le centre de l'ellipse mais est excentré d'environ 1,7 mm

Si $a = 10\text{ cm}$,
différence entre le
demi-grand axe et le
demi-petit axe:
environ $14\text{ }\mu\text{m}$

La distance terre soleil
varie de $a-c$ à $a+c$

Variation de $2c$
En relatif : $2c/a = 2e$
→ 3%

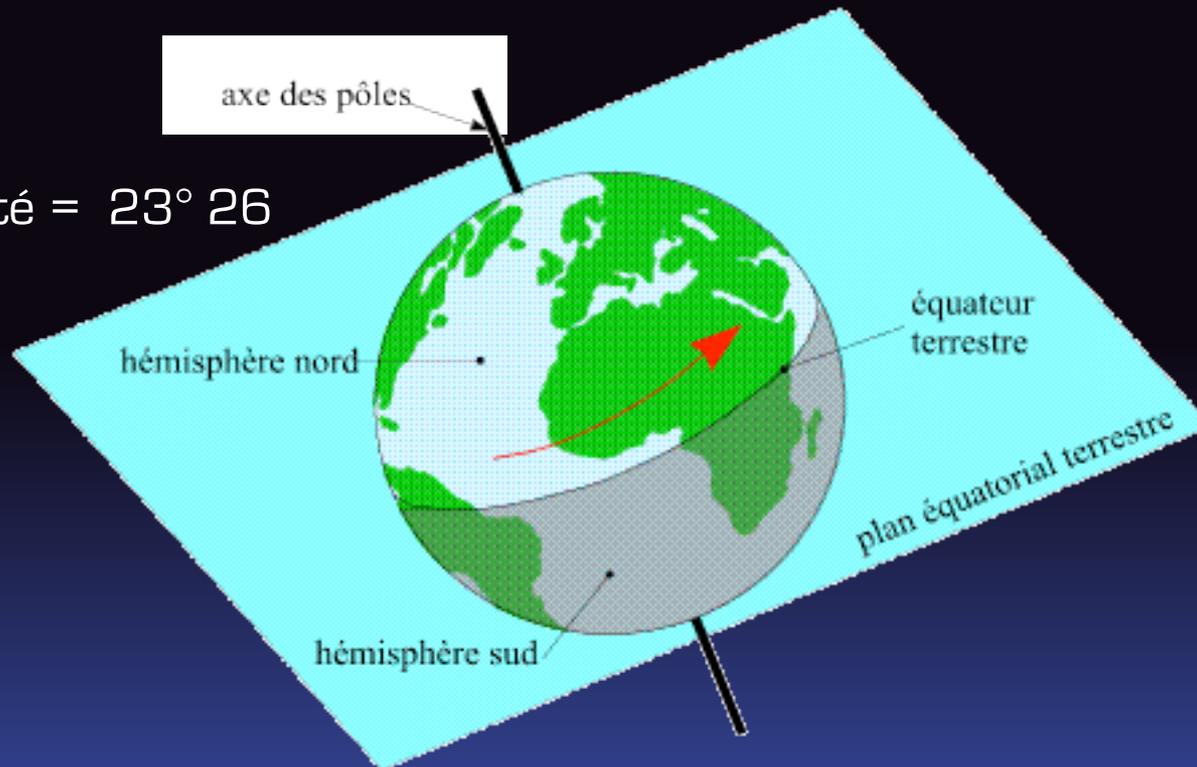
Crédit : IMCCE/Patrick Rocher



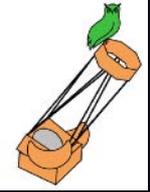
Inclinaison de l'axe de rotation de la terre

Par rapport au plan de l'orbite de la terre
(du barycentre terre lune)

- Obliquité = $23^{\circ} 26'$



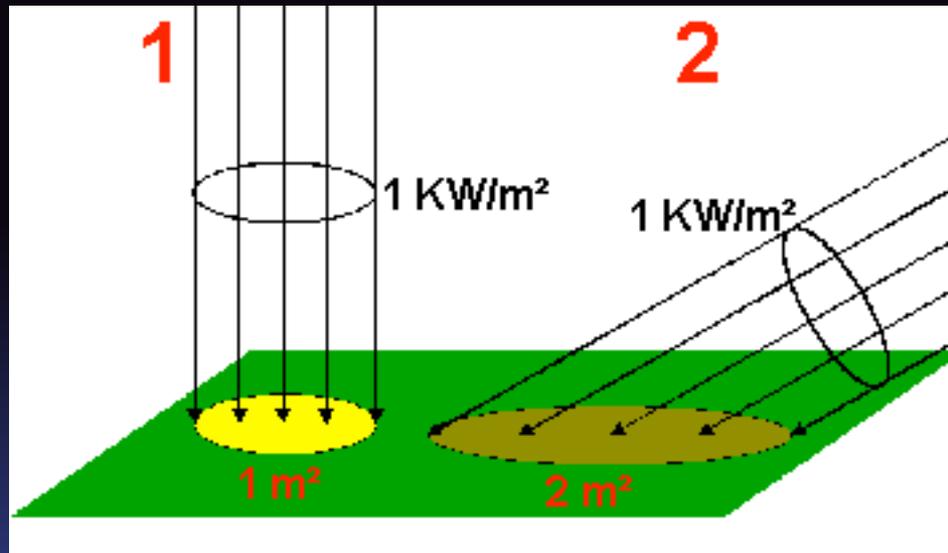
Durée jour/nuit
Origine des saisons



Inclinaison de l'axe de rotation et saisons

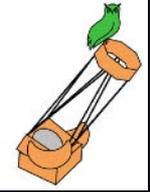
Intensité solaire

- l'incidence des rayons solaires a une importance
- plus le Soleil est haut dans le ciel, plus il nous tape sur la tête et plus il fait chaud !



$$E = E_0$$

$$E = E_0 \cos\theta$$



Inclinaison de l'axe de rotation et saisons

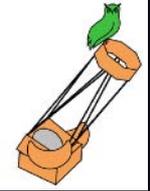
Comparaison ensoleillement

- Axe de rotation perpendiculaire au plan de l'écliptique



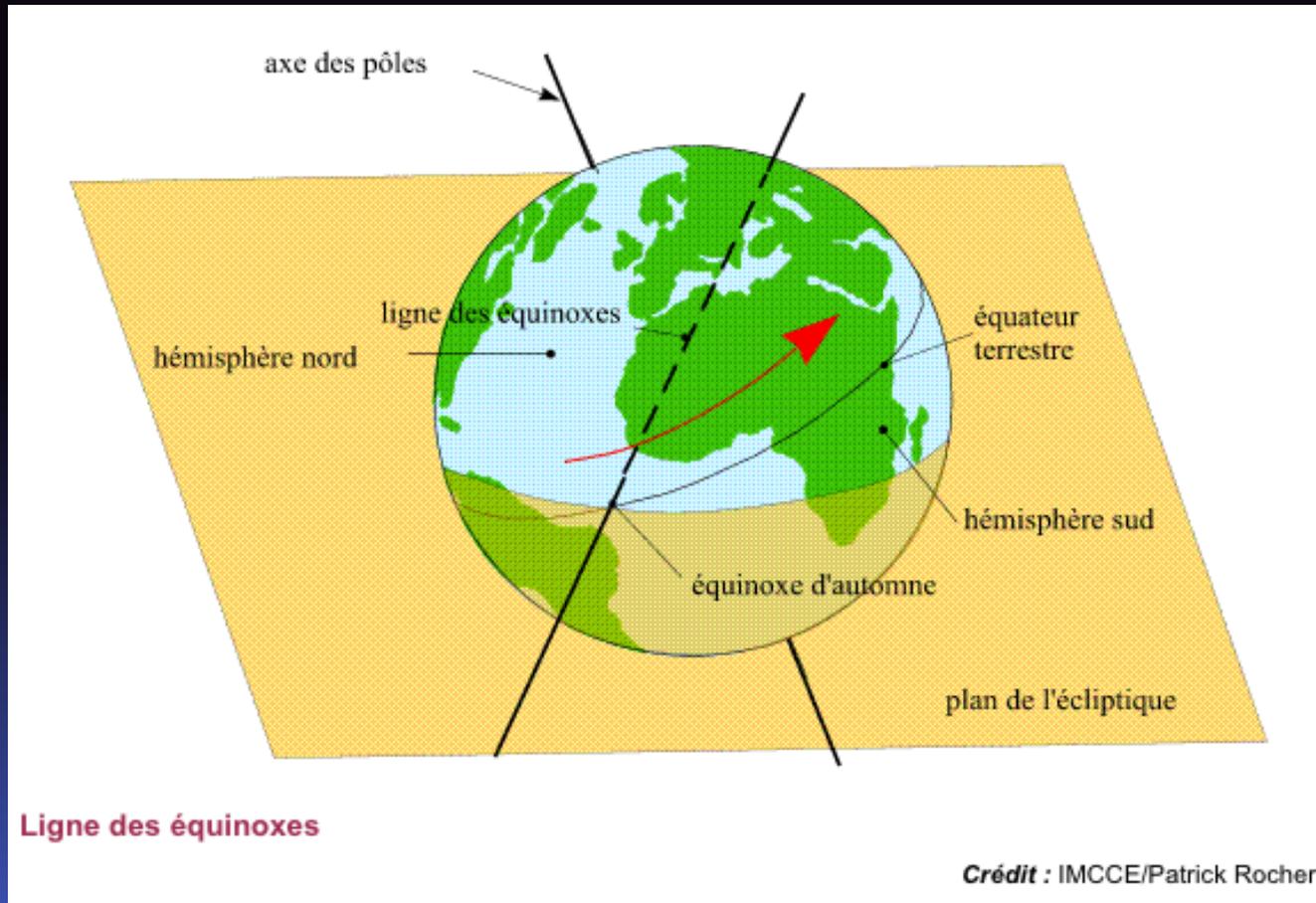
- Axe incliné par rapport au plan de l'écliptique

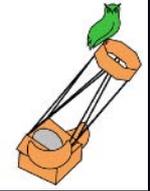




Lignes des équinoxes

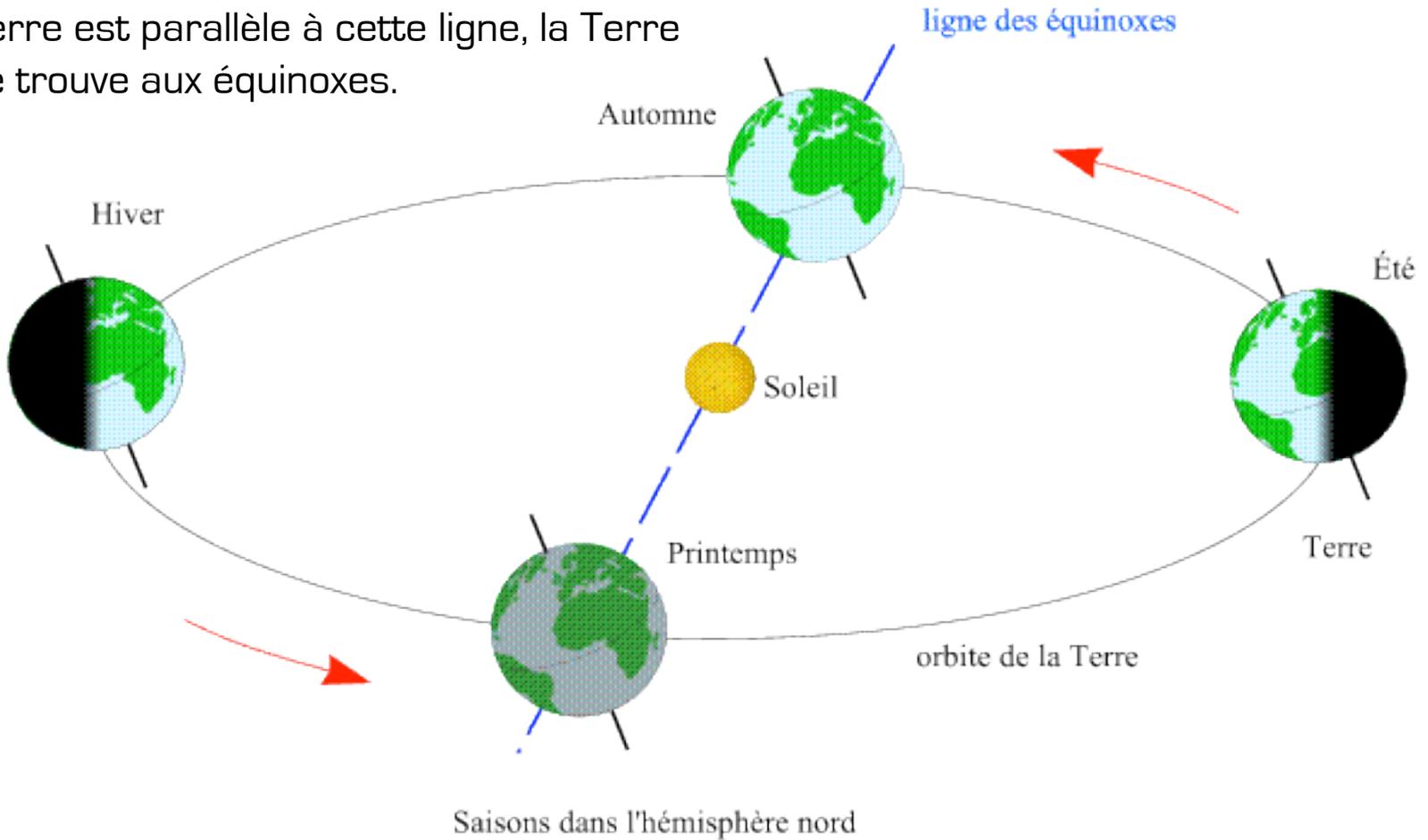
Intersection entre plan équatorial terrestre et plan de l'écliptique

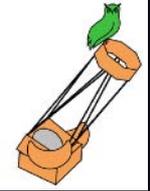




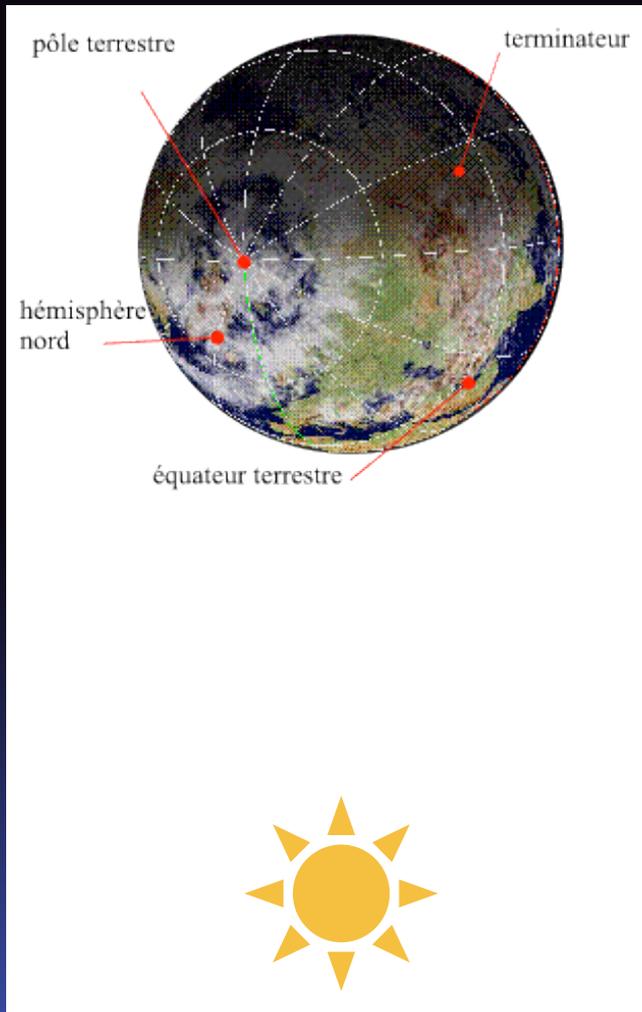
Ligne des équinoxes

Lorsque le segment joignant le Soleil à la Terre est parallèle à cette ligne, la Terre se trouve aux équinoxes.

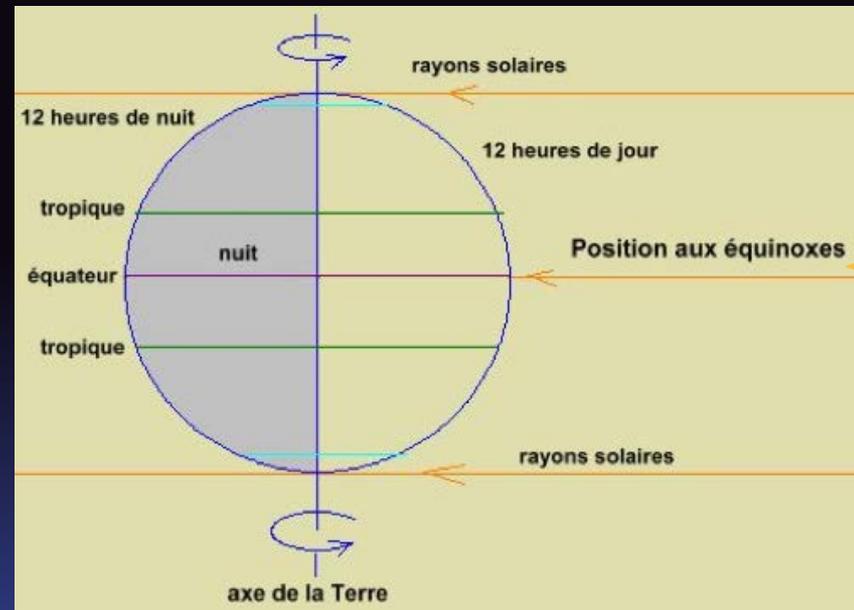




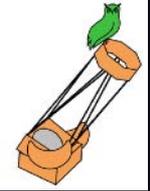
Equinoxes ...



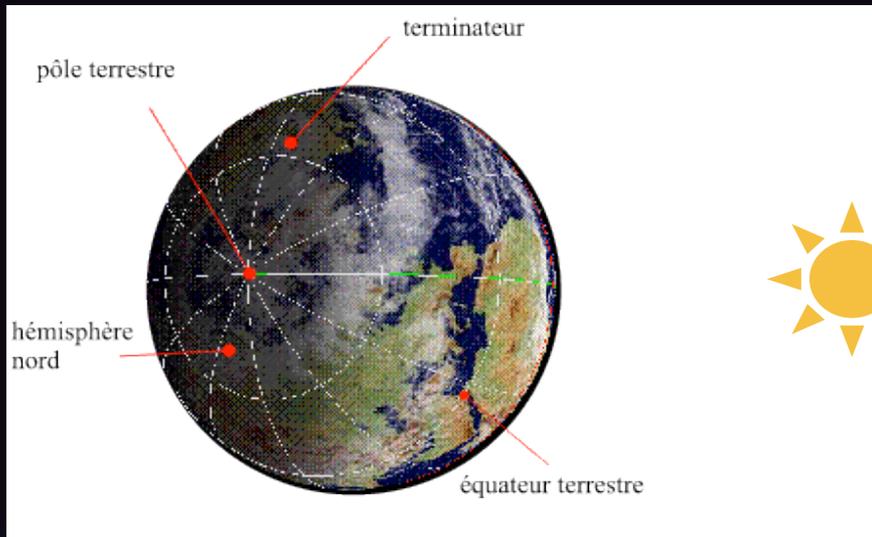
Le jour de l'équinoxe le terminateur de la zone de nuit sur la Terre passe par les deux pôles terrestres



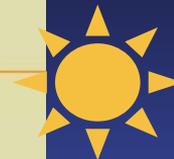
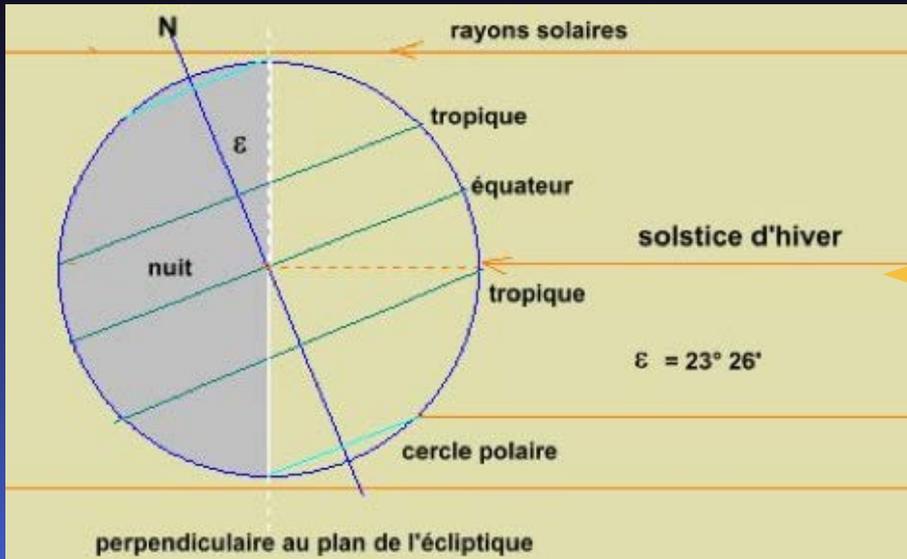
le Soleil se lève presque exactement à l'est et se couche presque exactement à l'ouest.



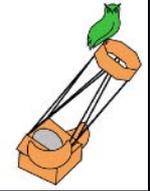
... et solstices



Le jour du solstice d'hiver, pour l'hémisphère nord, la demi-sphère définie par le terminateur de la zone de nuit recouvre la plus grande partie de la surface de l'hémisphère nord.

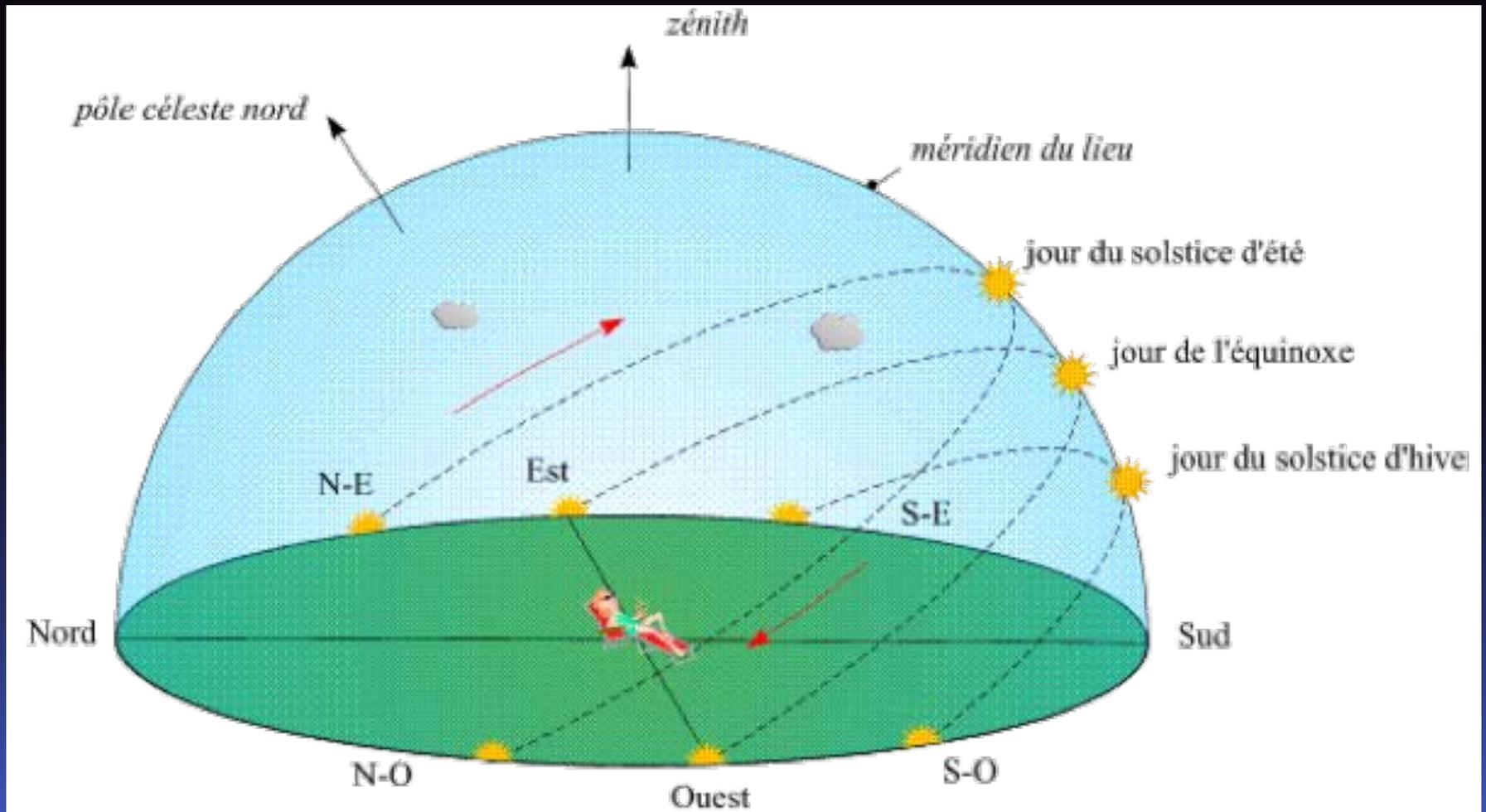


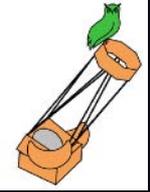
le Soleil se lève le plus au sud-est, passe au méridien avec une hauteur minimale et se couche le plus au sud-ouest



Solstices et équinoxes

Positions du soleil



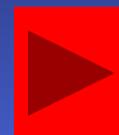
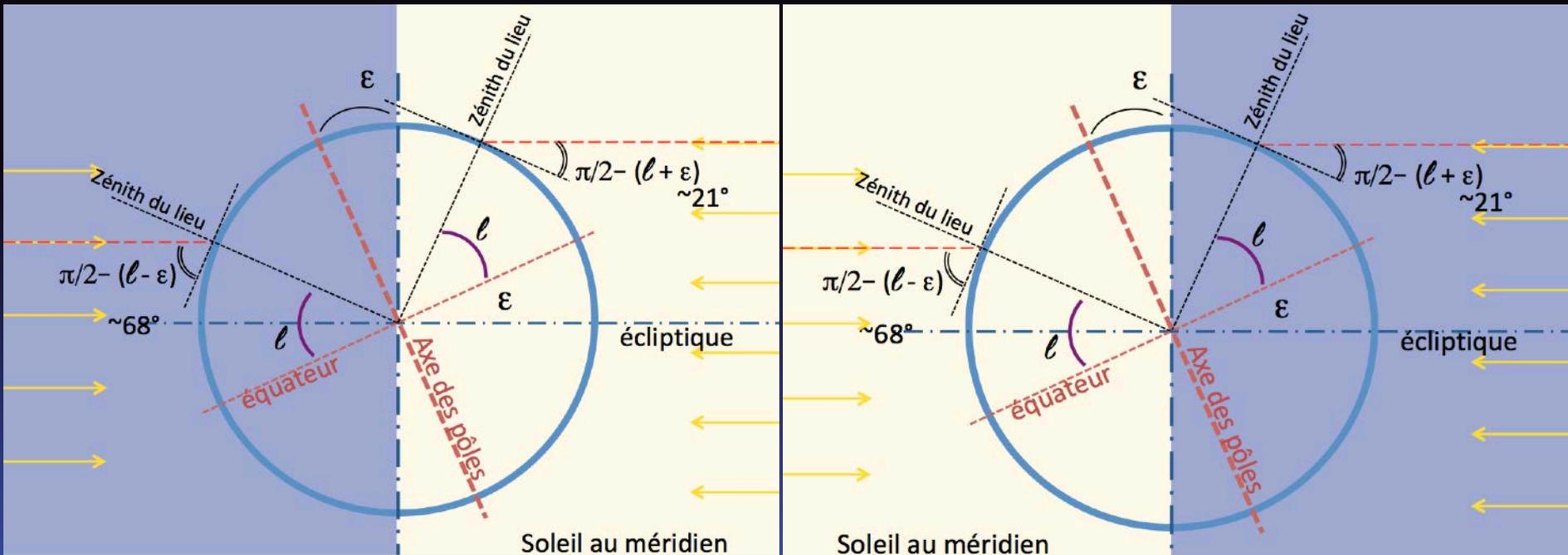


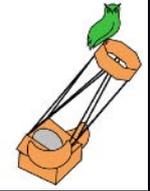
Altitude des planètes (la nuit)

A Voiron $\ell = 45^{\circ}21'$
($\varepsilon = 23^{\circ}26'$)

Solstice d'Hiver

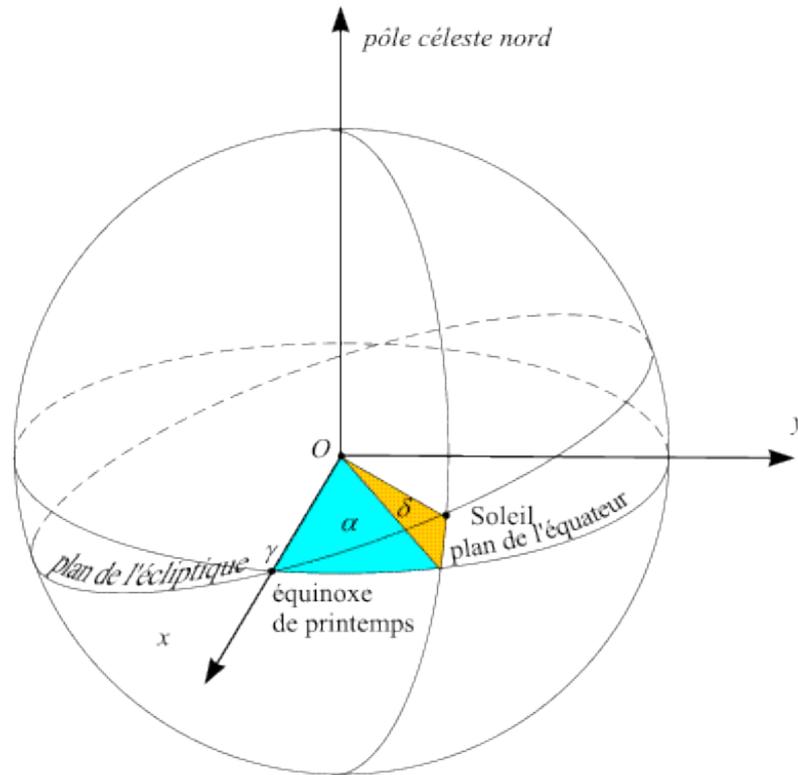
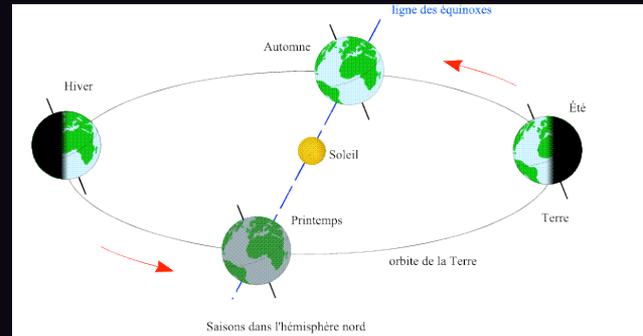
Solstice d'Eté





Point vernal

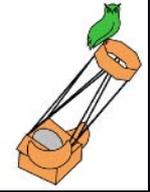
- Intersection de l'écliptique et de l'équateur céleste, côté printemps.



Repère géocentrique équatorial.

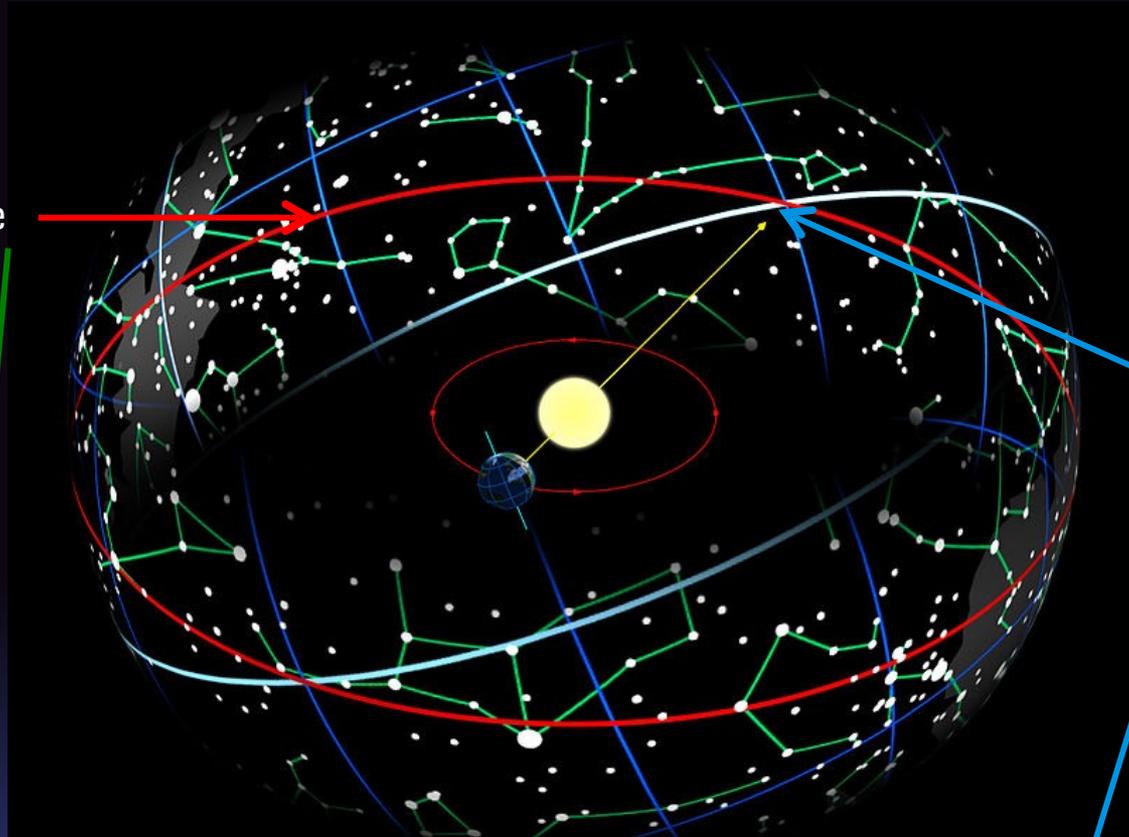
O : centre de la Terre, Oxy : plan de l'équateur, Oy : direction de l'équinoxe de printemps

α : ascension droite de l'astre, δ : déclinaison de l'astre

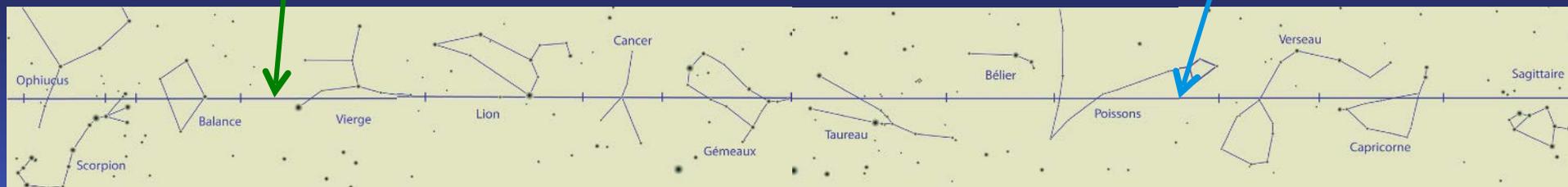


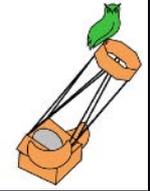
Equateur céleste, écliptique, point vernal

écliptique



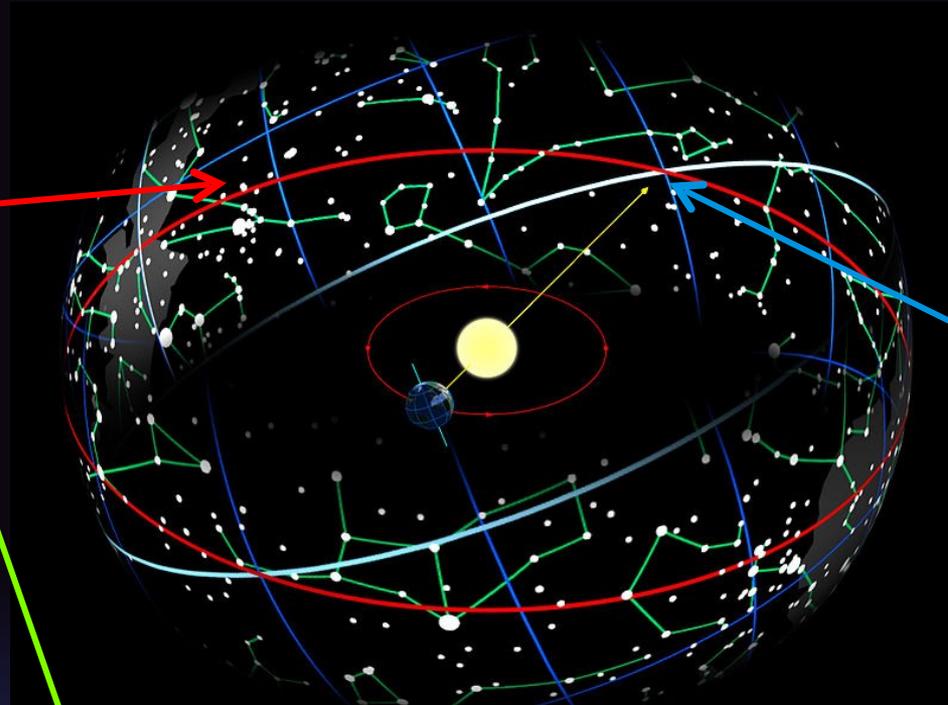
Point vernal



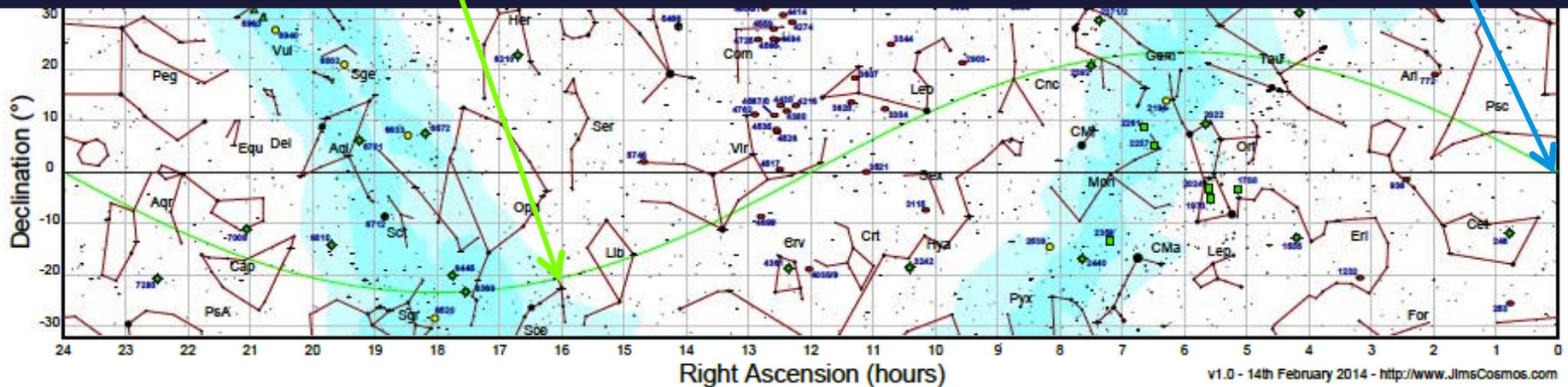


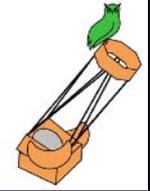
Equateur céleste, écliptique, point vernal

écliptique

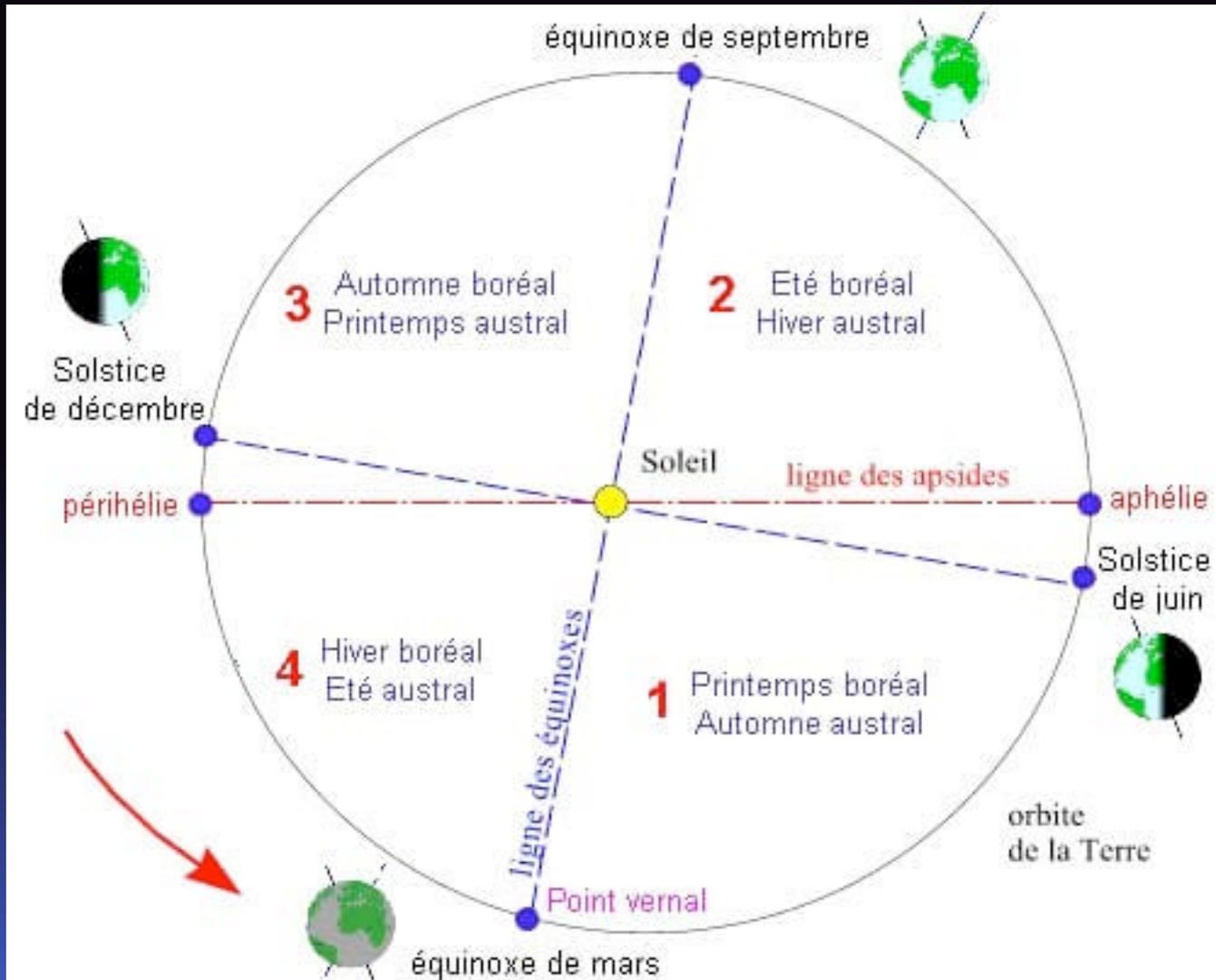


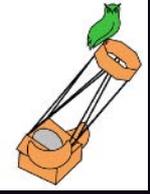
Point vernal





Saisons astronomiques





Saisons astronomiques

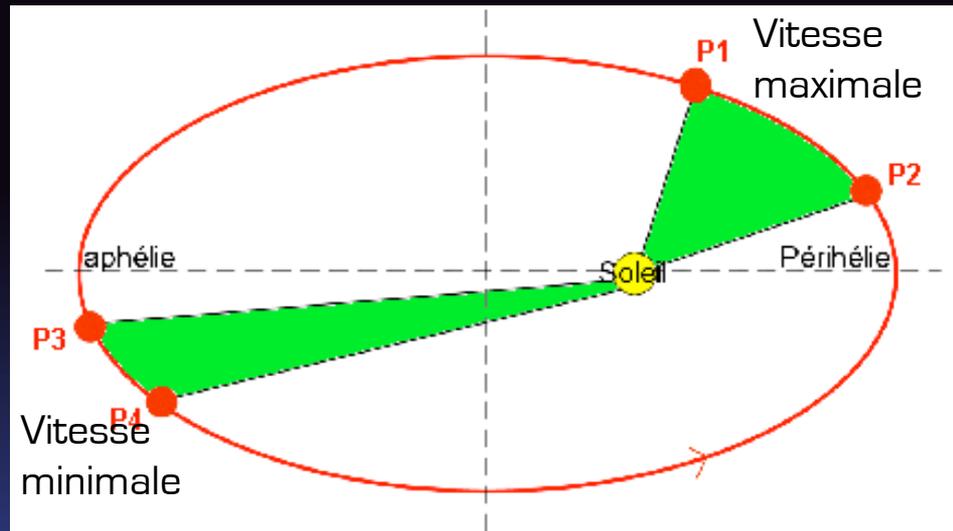
Durée des saisons

- 2eme loi de Kepler (ou loi des aires)

⇒ la vitesse de la terre varie sur son orbite

⇒ la terre se déplace plus rapidement sur son orbite lorsqu'elle est au périhélie

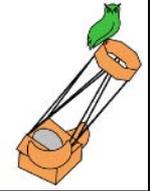
les aires décrites par le mobile dans des temps égaux sont égales



• actuellement le barycentre Terre-Lune

• au périhélie début janvier : terre plus rapide : hiver = saison la plus courte

• à l'aphélie début juillet : terre plus lente : été = saison la plus longue.



Saisons astronomiques

Dates et durée des saisons en 2019

(TU)

- Printemps 20 mars à 21:58:25

92 jours , 17 heures , 55 minutes et
49 secondes

- Été 21 juin à 15:54:14

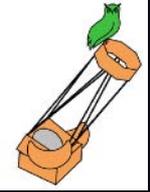
93 jours , 15 heures , 55 minutes et
56 secondes

- Automne 23 septembre à 07:50:10

89 jours , 20 heures , 29 minutes et
15 secondes

- Hiver 22 décembre à 04:19:25

88 jours , 23 heures , 30 minutes et
11 secondes



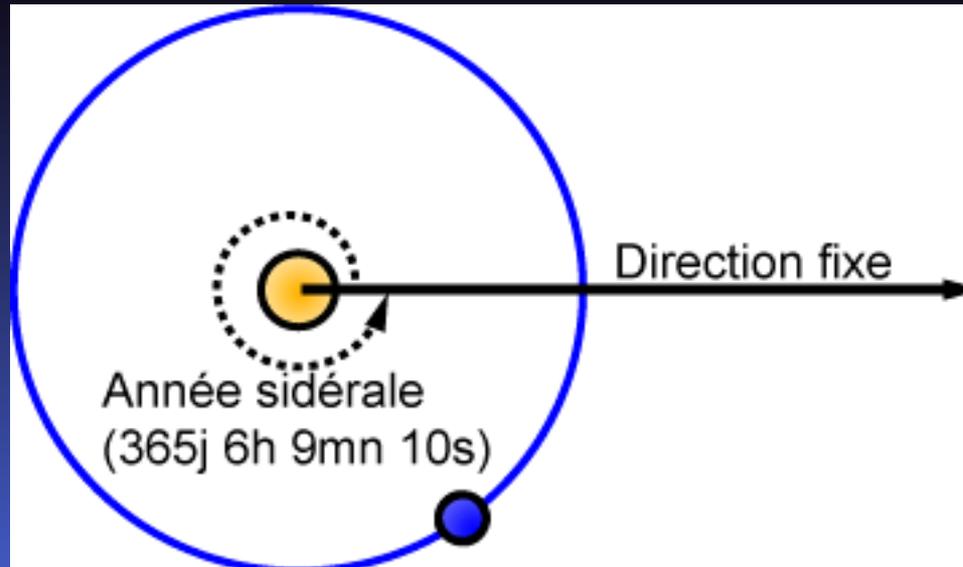
Définition de l'année

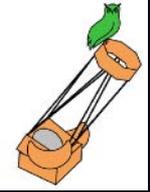
Facile à définir ? pas si simple !

- durée nécessaire à la Terre pour faire un tour complet autour du Soleil.
- L'année intervient dans notre calendrier et le fait que la Terre ait accompli un tour complet (360°) n'est pas un critère fondamental.

Année sidérale

- direction fixe dans l'espace => la Terre met **365 jours 6 h 9 mn 10 s** pour revenir dans cette même direction.

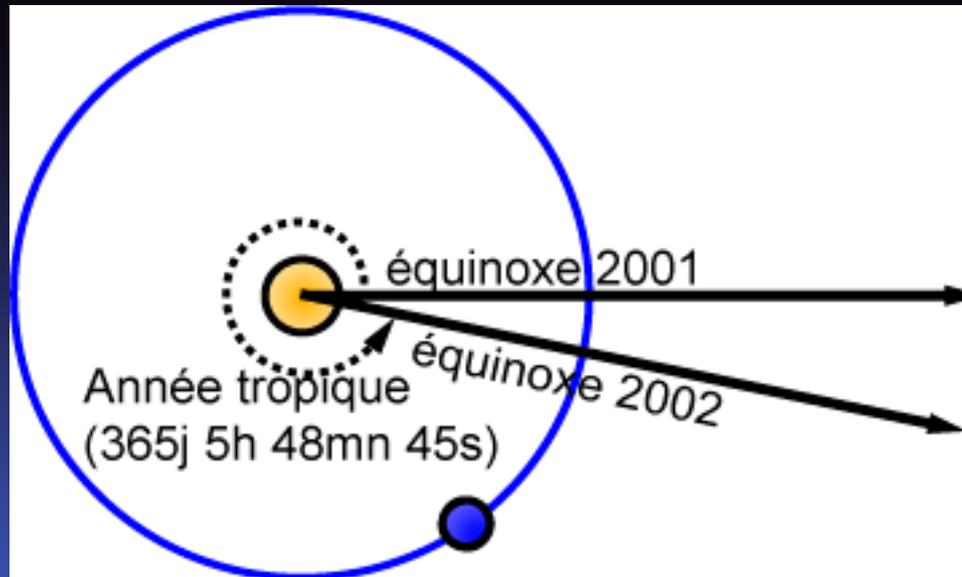




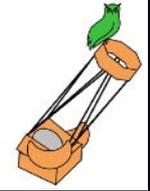
Définition de l'année

Année tropique

- la Terre met 365 jours 5h 48mn 45s pour revenir dans la direction du point vernal.
- on appelle cette durée l'année tropique.
- durée différente de l'année sidérale puisque **le point vernal a bougé pendant que la Terre tournait...**



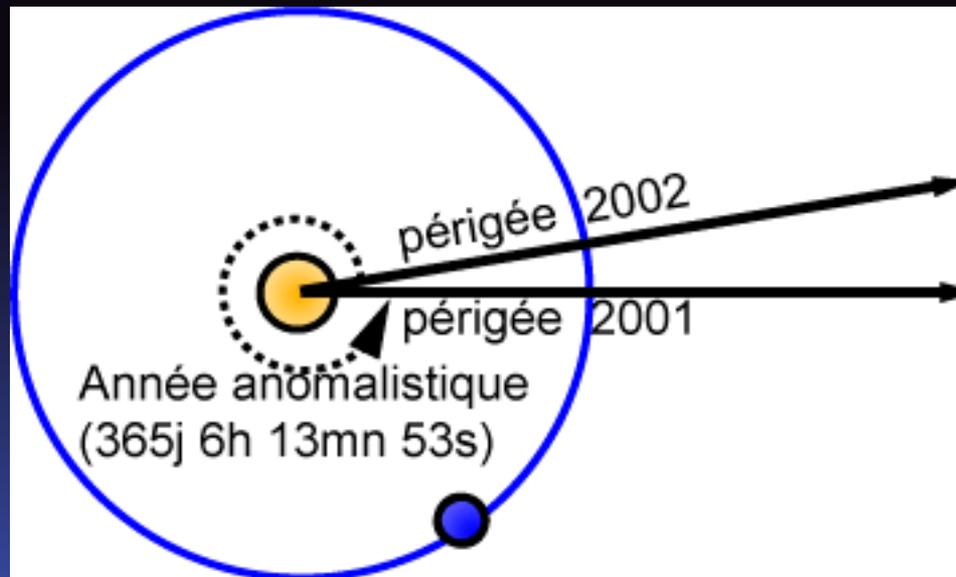
$\Delta T = 20\text{mn } 25\text{s}$
(1225s)
=> Angle de 50''



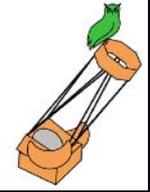
Définition de l'année

Année anomalistique

- la Terre met 365 jours 6h 13mn 53s pour revenir au périhélie.
- on appelle cette durée l'année anomalistique.
- durée différente de l'année sidérale puisque **le périhélie a bougé pendant que la Terre tournait...**



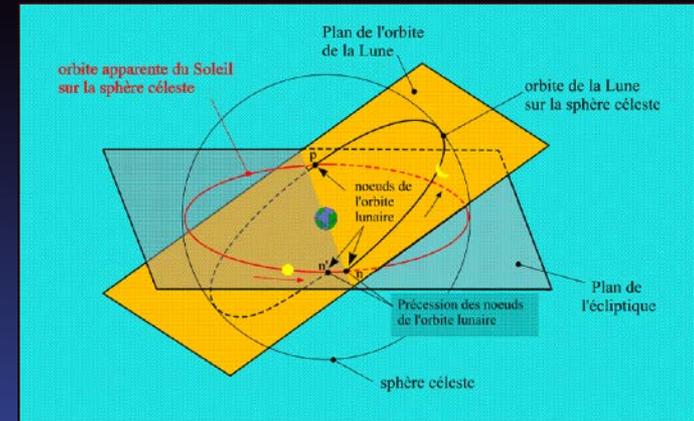
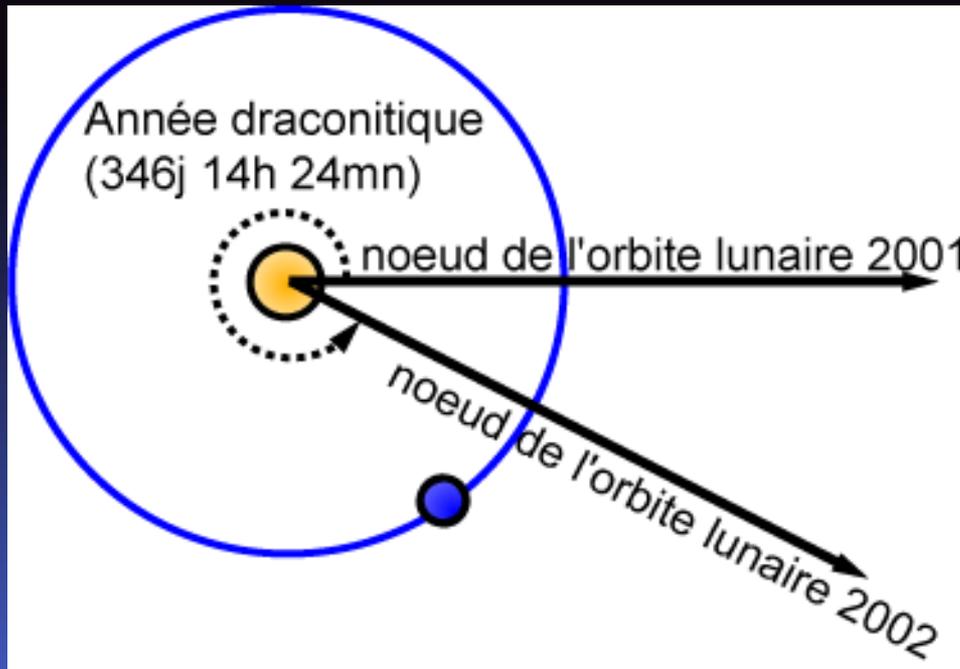
$$\Delta T \Rightarrow 12''$$

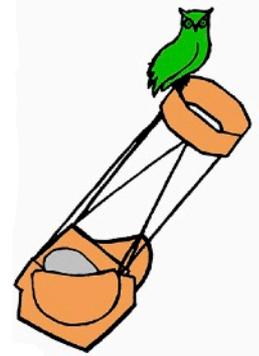


Définition de l'année

Année draconitique

- la Terre met 346 jours 14h 24mn pour revenir dans la direction du nœud de l'orbite lunaire.
- On appelle cette durée l'année draconitique
- durée différente de l'année sidérale puisque la position du nœud s'est déplacée





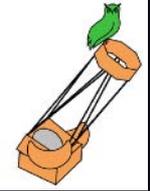
Variation des paramètres orbitaux

Variation de l'excentricité

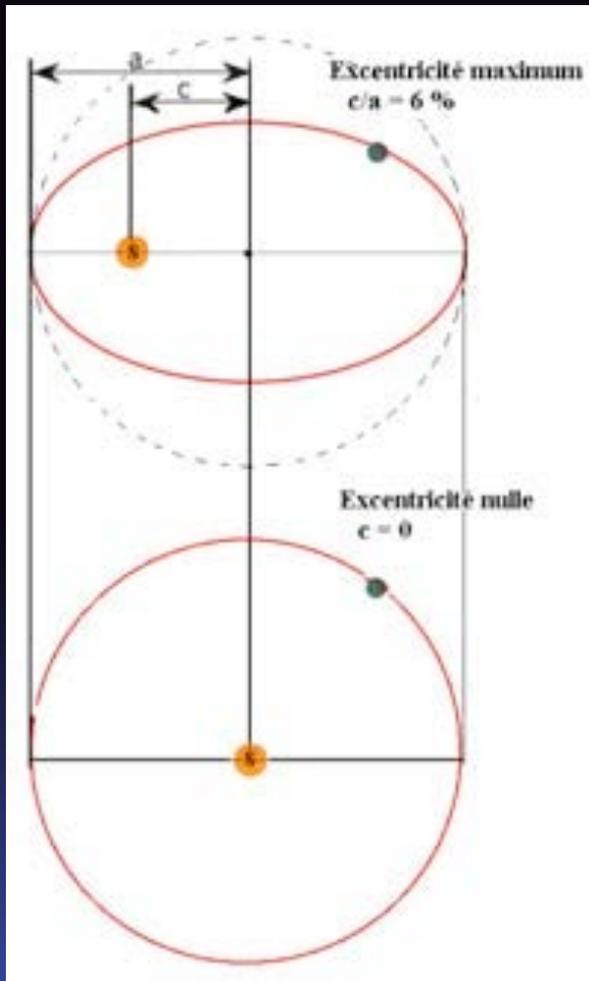
Variation de l'obliquité

Précession de l'axe de rotation de la terre

Rotation de l'axe des absides

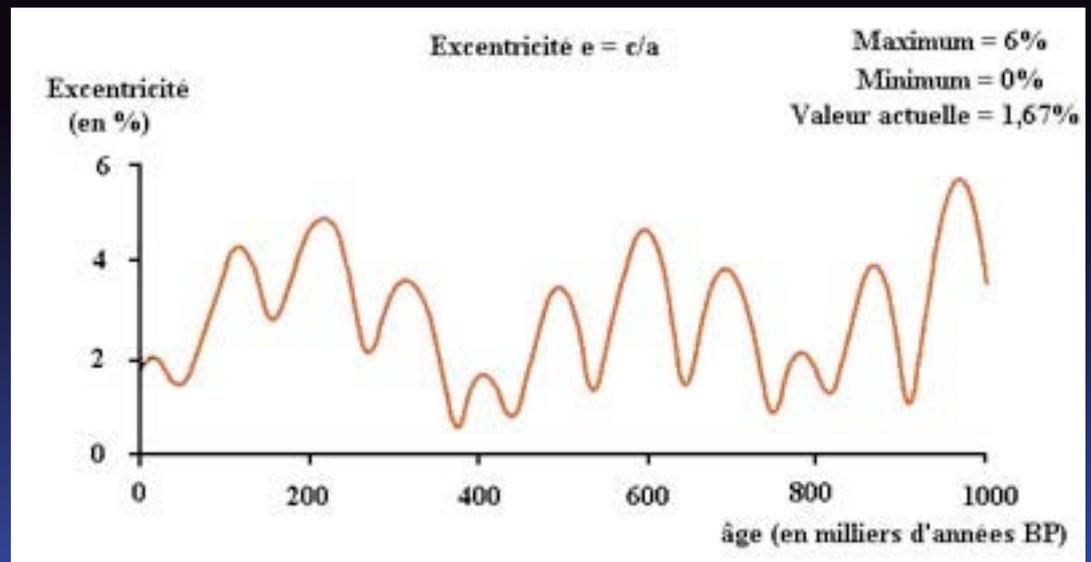


Variation d'excentricité de l'orbite terrestre

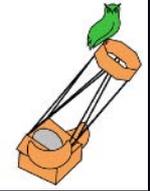


$$e = 0,0167 \quad [1,67\%]$$

entre zéro (cas du cercle presque parfait) à une valeur maximale de l'ordre de 0,06.

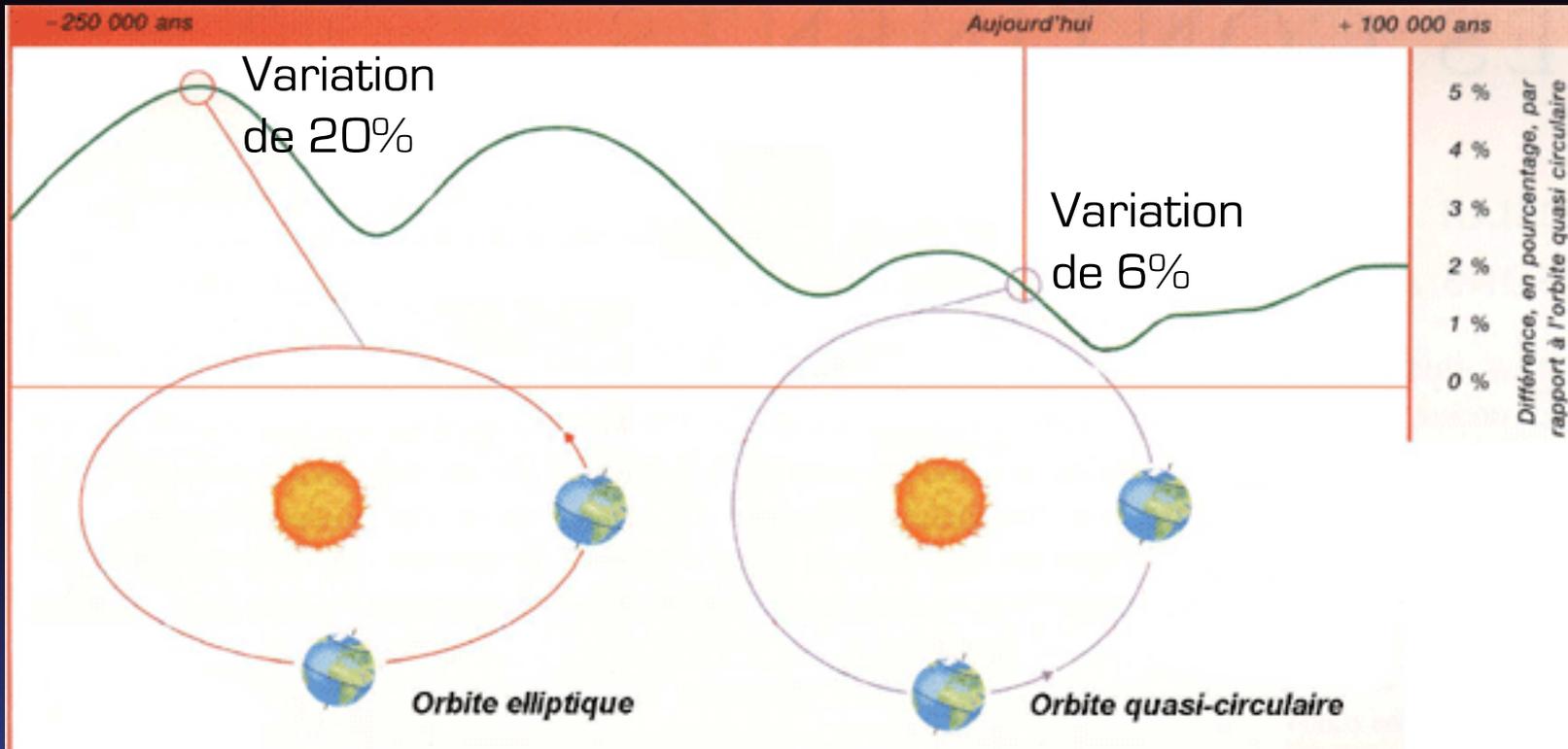


- impact sur l'insolation : très modeste



Variation d'excentricité de l'orbite terrestre

De - 250000 à +100000 ans

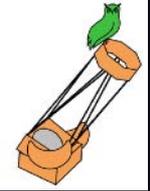


$$E_p \propto \frac{1}{(a - c)^2}$$

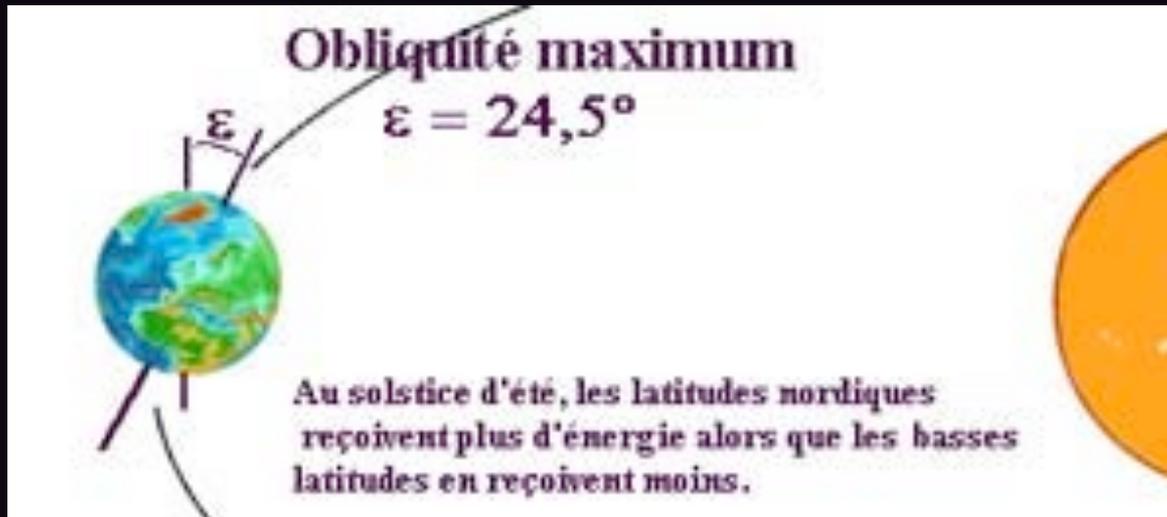
$$E_a \propto \frac{1}{(a + c)^2}$$

$$\frac{E_p}{E_a} \propto \frac{(1+e)^2}{(1-e)^2}$$

$$\propto 1+4e$$



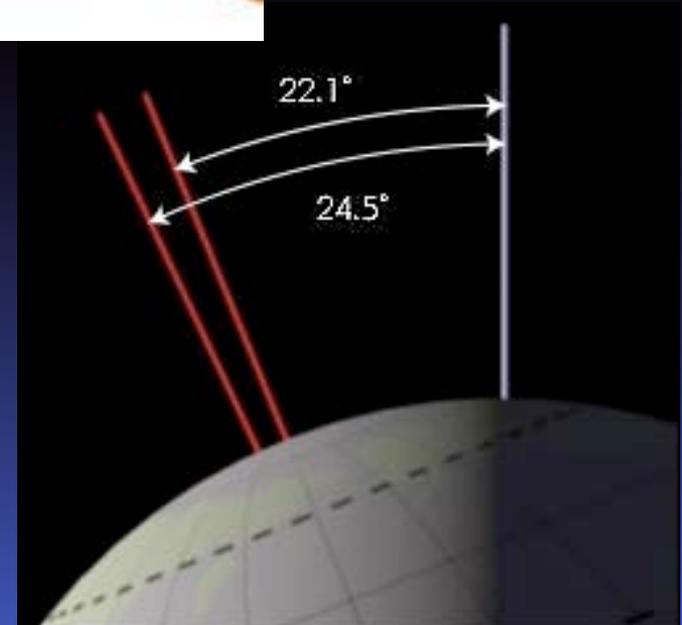
Variation de l'obliquité de la terre

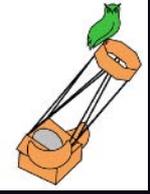


Oscillation de l'axe de rotation

- La position de cet axe oscille entre $22,1^\circ$ et $24,5^\circ$,
- période principale de 41 000 ans.

Influence sur l'ensoleillement

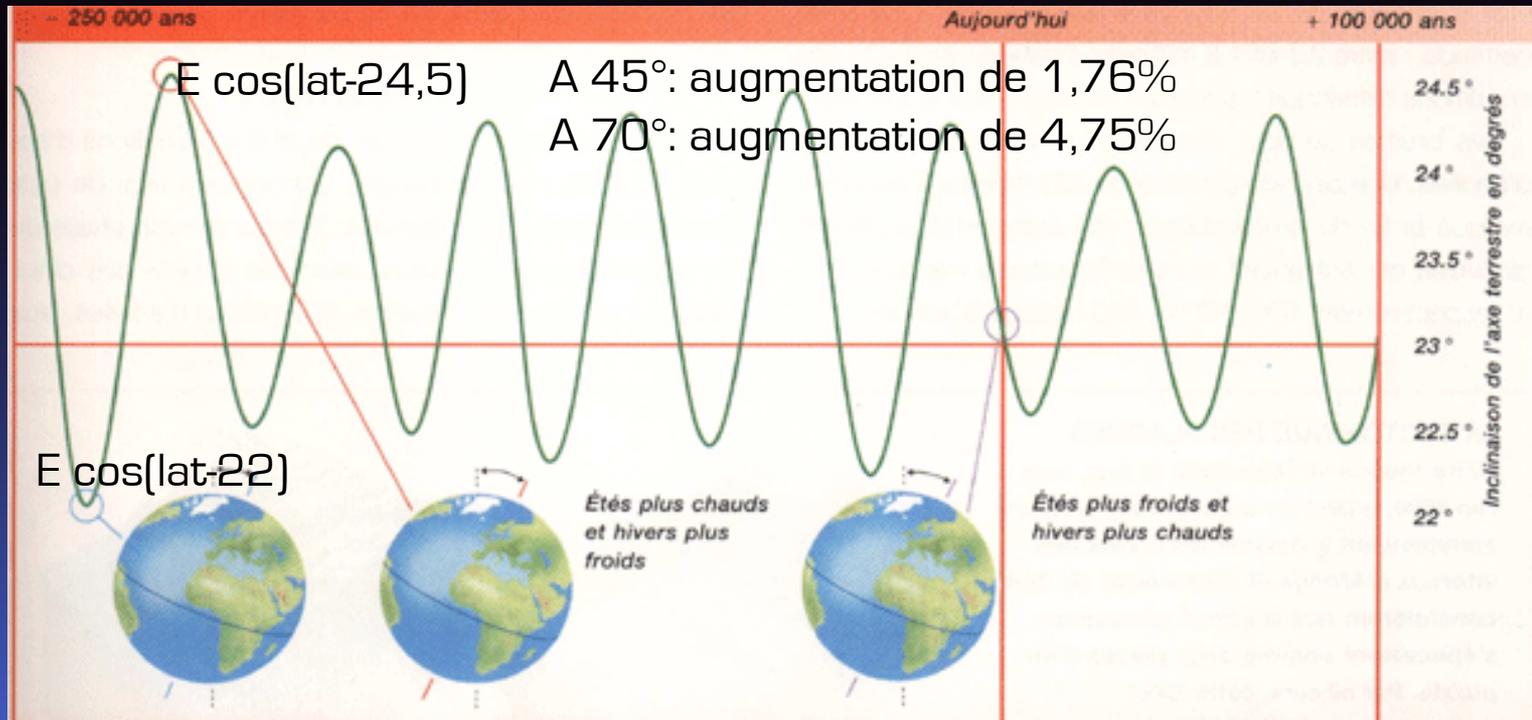


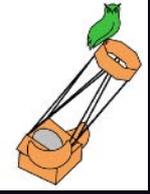


Variation de l'obliquité de la terre

Périodicité, climat

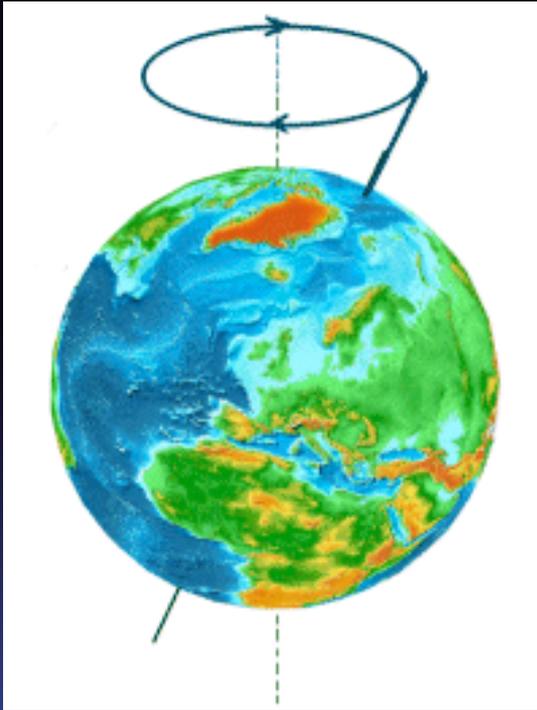
- Plus l'axe est incliné, plus l'écart est fort entre l'été et l'hiver.
 - Étés plus chauds, en particulier aux hautes latitudes où les jours sont longs.
- Moins de tilt : étés plus frais et hiver assez doux
 - Les glaces restent -> reflexion des rayons du soleil-> encore plus froids



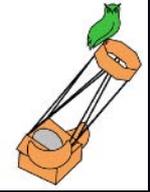


Précession de l'axe de rotation

- Forme ellipsoïdale de la Terre (aplatissement au pôle et « bourrelet » équatorial) => oscillation comme une toupie.

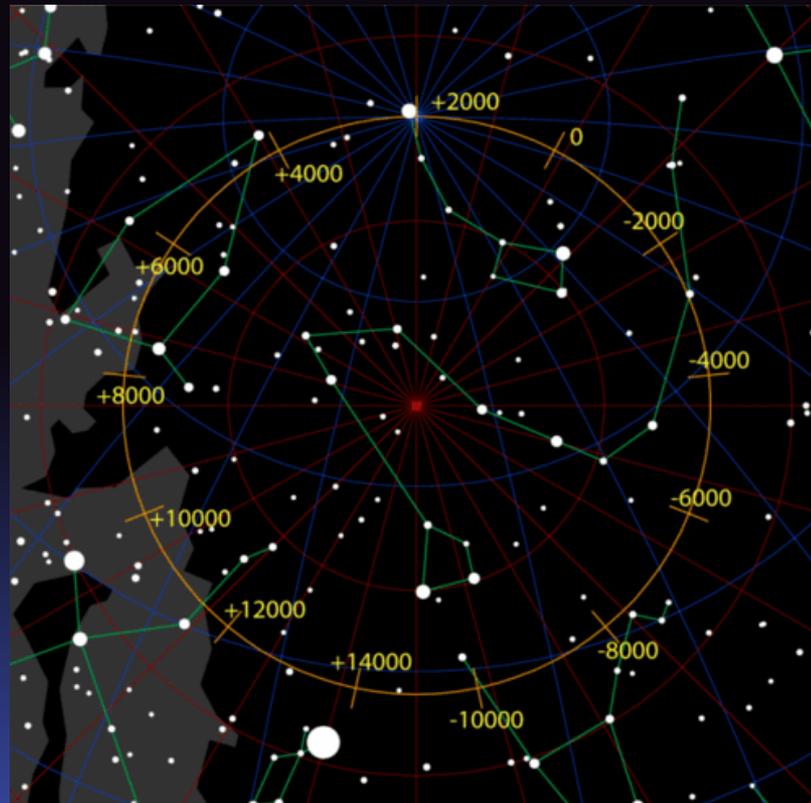


- mouvement de l'axe de rotation de la Terre qui décrit un cône dans le sens rétrograde en environ 26000 ans.

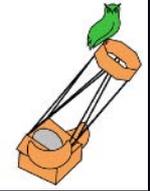


Précession de l'axe de rotation

- Axe de rotation pointe actuellement vers l'étoile polaire
- Décrit un cône autour de la direction perpendiculaire au plan de l'écliptique.

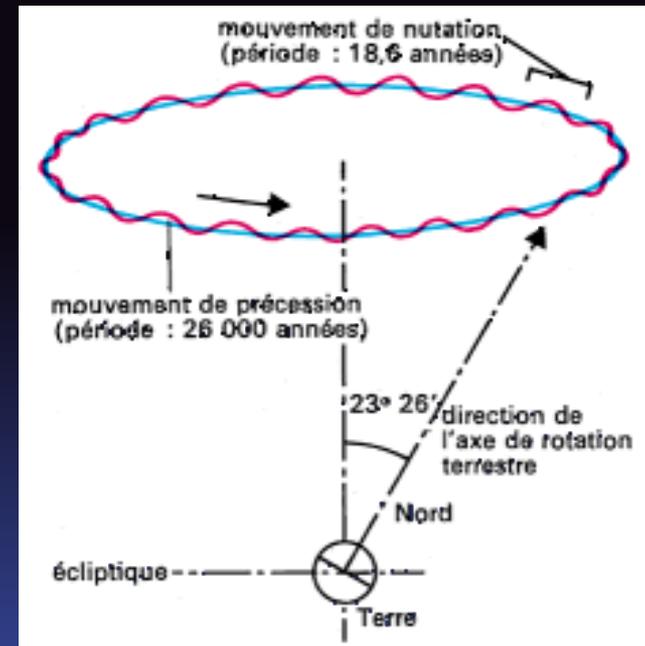
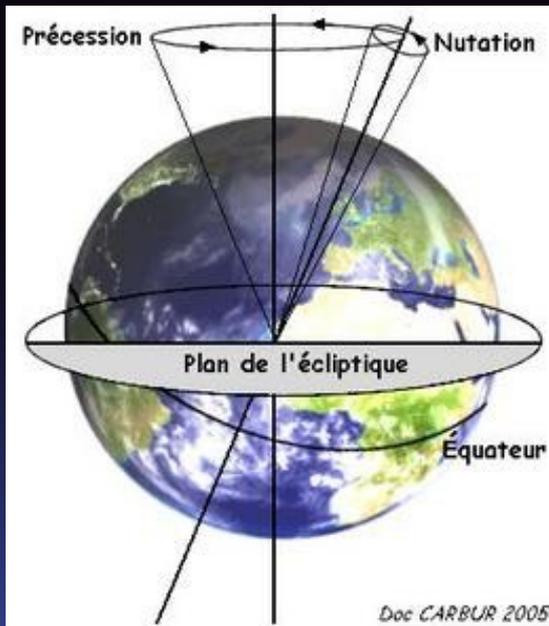


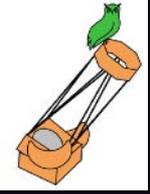
dans 13 000 ans, l'étoile polaire sera Véga
vers laquelle pointera l'axe de rotation de la Terre



Nutation de l'axe de rotation

- Mouvement elliptique de faible amplitude
- Superposé à la rotation de précession que décrit l'axe polaire
- Période de 18,7 ans

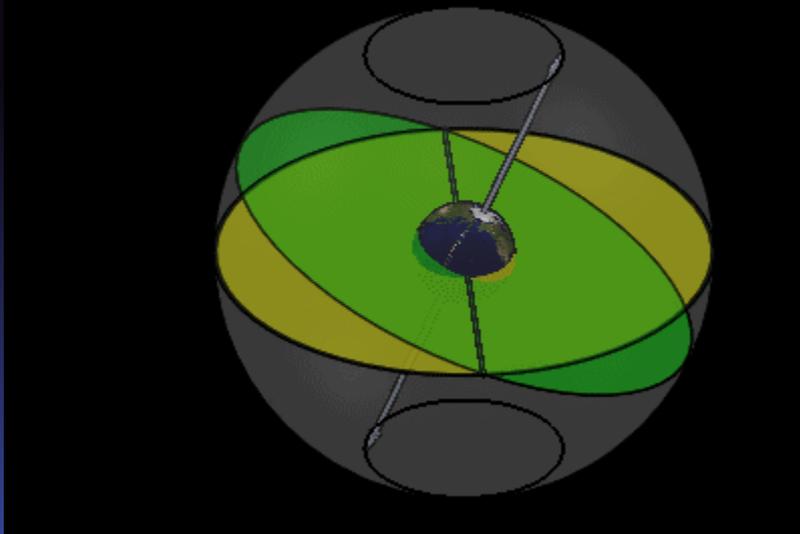




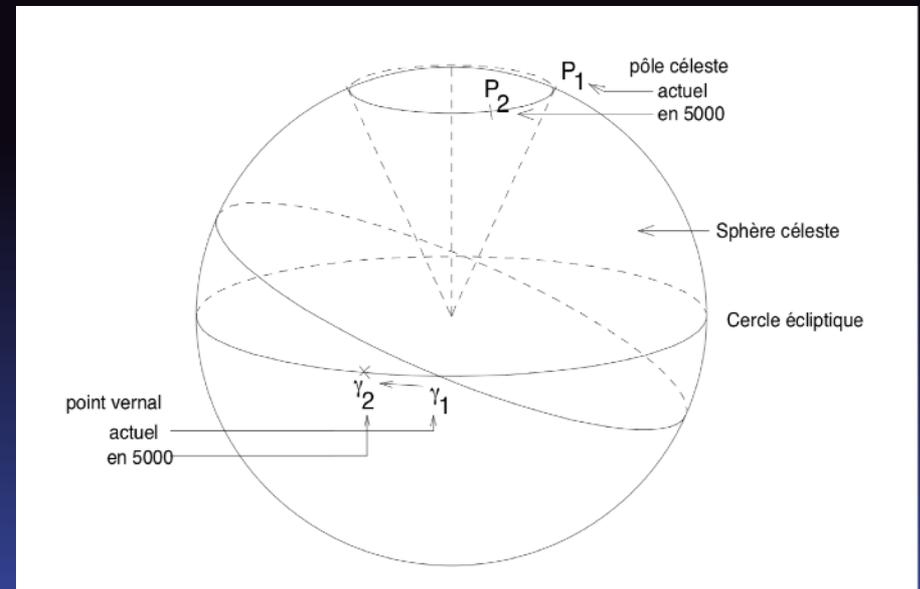
Précession des équinoxes

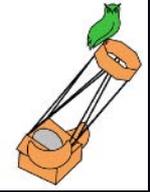
- Du fait de la précession de l'axe de rotation de la terre, la ligne des équinoxes n'est pas fixe.
- Elle est animée d'un mouvement de précession dans le sens rétrograde (50,288200" par an actuellement).

temps : 0



<https://www.astro-rennes.com/initiation/precession.php>

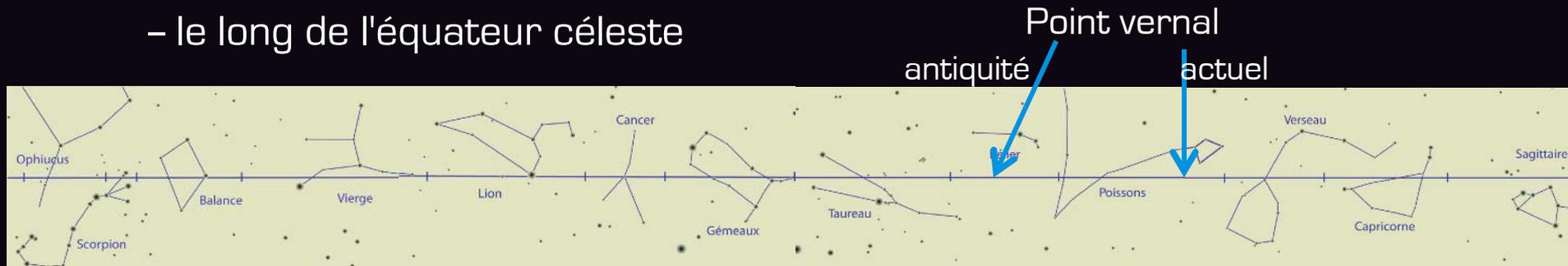




Précession des équinoxes

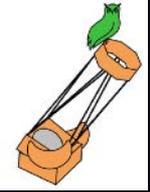
le déplacement rétrograde du point γ

– le long de l'équateur céleste



– obligation de retracer les cartes célestes pour qu'elles concordent avec la réalité.

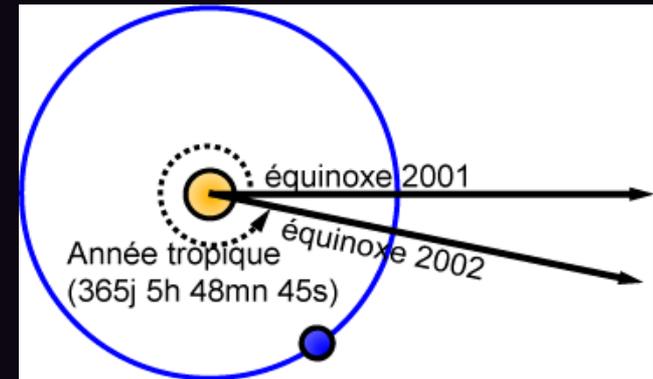
- les cartes de 1900 ne sont plus valables pour les années 2000 et plus
- Tracé des cartes pour 50 ans et on les nomme selon leur équinoxe respective : équinoxe 1950, équinoxe 2000...



Précessions des équinoxes et saisons

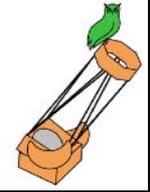
Révolution tropique (année tropique)

- temps que met la Terre pour faire une révolution autour du Soleil dans un **repère tournant lié à la ligne des équinoxes**
- pour l'époque J2000 : 365,24219052 jours (soit 365 jours 5h 48m 45,26s).



Les saisons tombent toujours aux mêmes dates (à peu près)

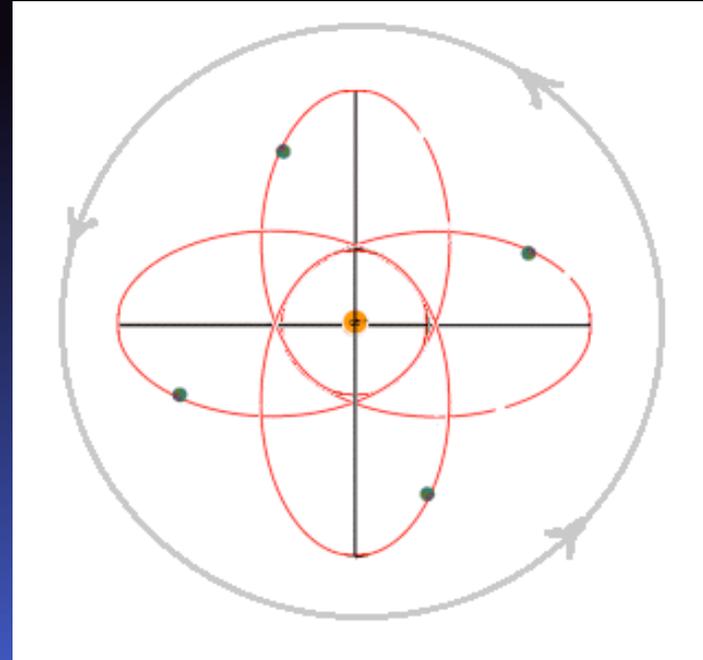
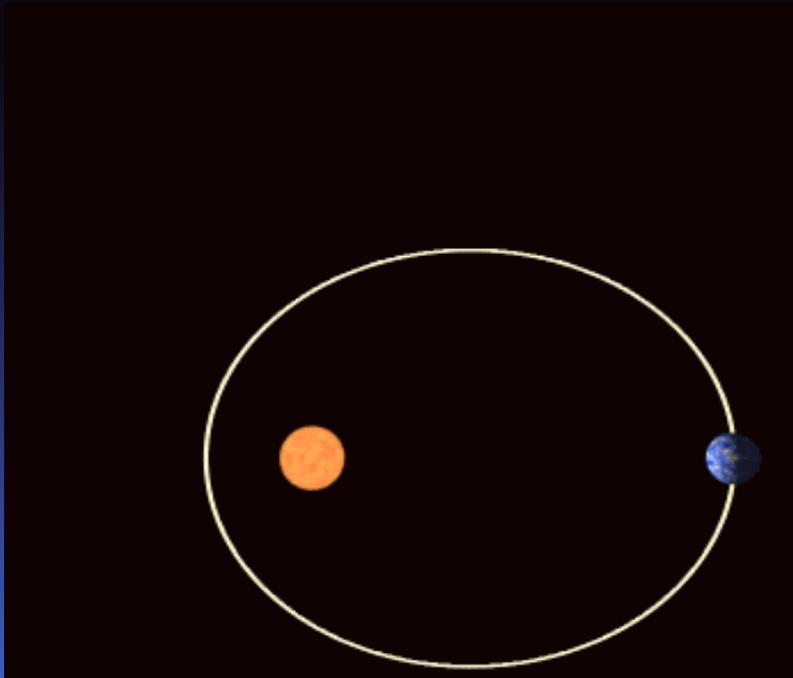
- notre calendrier = calendrier grégorien : année tropique **car elle fait revenir les saisons à la même date chaque année**
- construit de manière à avoir une longueur moyenne de l'année la plus proche possible de la révolution tropique de la Terre.
- Dates des saisons toujours au voisinage des mêmes dates dans le calendrier grégorien (utilisation des années bissextiles fait osciller l'instant des saisons sur trois et, exceptionnellement, quatre jours)

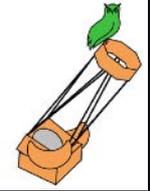


Rotation de l'axe des apsides

Rotation de l'orbite du barycentre terre-lune

- Perturbations générées par les autres planètes
- Par rapport aux étoiles, l'axe des apsides effectue une rotation (sens direct)
 - ~100000 ans , 124000 ans, 135 000 ans (sources)
 - Evolution durée des saisons, date du passage par le périhélie





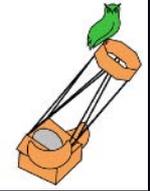
Rotation de l'axe des apsides

Durée des saisons, date passage périhélie

- Si les positions du périhélie et de l'aphélie du barycentre Terre-Lune étaient constantes dans le temps, la durée des différentes saisons serait, elle aussi, constante.

Durée des saisons

Année	Durée de l'hiver	Durée du printemps	Durée de l'été	Durée de l'automne	Date du passage au périhélie	Date du passage à l'aphélie
130 avant J.-C.	90 jours 5h 39m 58s	94 jours 0h 21m 33s	92 jours 8h 24m 42s	88 jours 15h 25m 7s	1 décembre à 5h 43m 23s	2 juin à 21h 11m 54s
2004	88 jours 23h 44m 49s	92 jours 18h 8m 14s	93 jours 15h 32m 57s	89 jours 20h 11m 46s	4 janvier à 17h 41m 59s	5 juillet à 10h 53m 28s



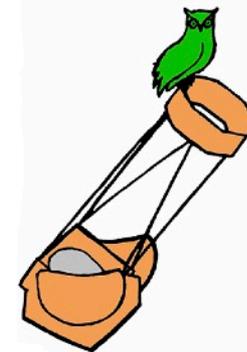
Précession climatique

conséquences sur le climat

- Même si la distance Terre-Soleil n'est pas le facteur prédominant dans la nature des saisons, la combinaison du passage de la Terre à l'aphélie en hiver donne des hivers plus rudes.



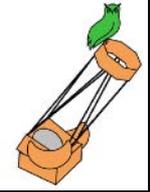
- De même la distance Terre-Soleil dépend également de la variation de l'excentricité de l'orbite terrestre. Ainsi les périodes glacières sont corrélées avec les minima de l'excentricité de l'orbite terrestre.



Le voyage du système solaire

Dans la galaxie

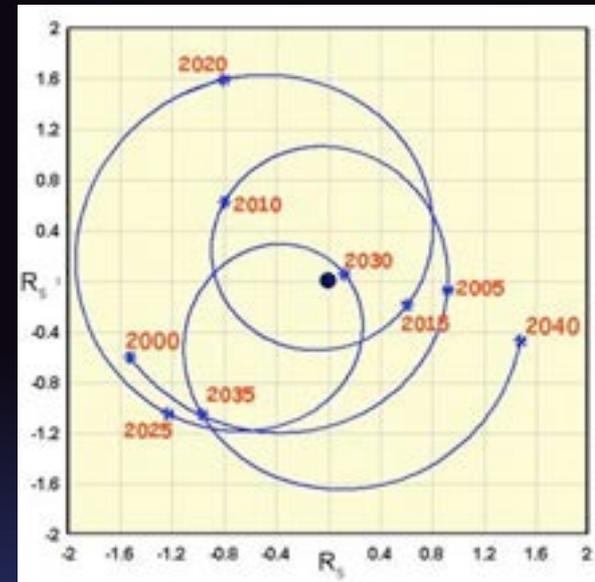
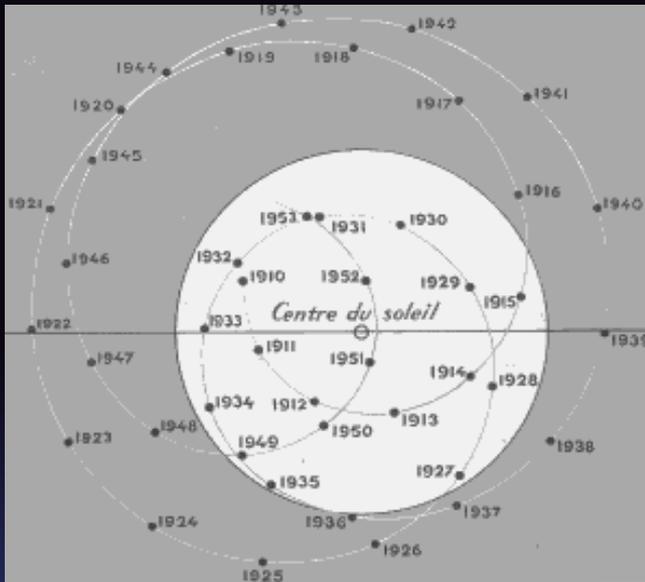
Avec la galaxie



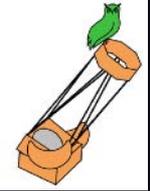
Déplacement du système solaire

Déplacement du centre de gravité du système solaire

– le Soleil n'est pas le centre de ce système



- Il se déplace dans l'espace au gré des différentes positions planétaires,
- Ce mouvement peut dépasser la mesure de son propre diamètre (un centième de sa distance avec la Terre)

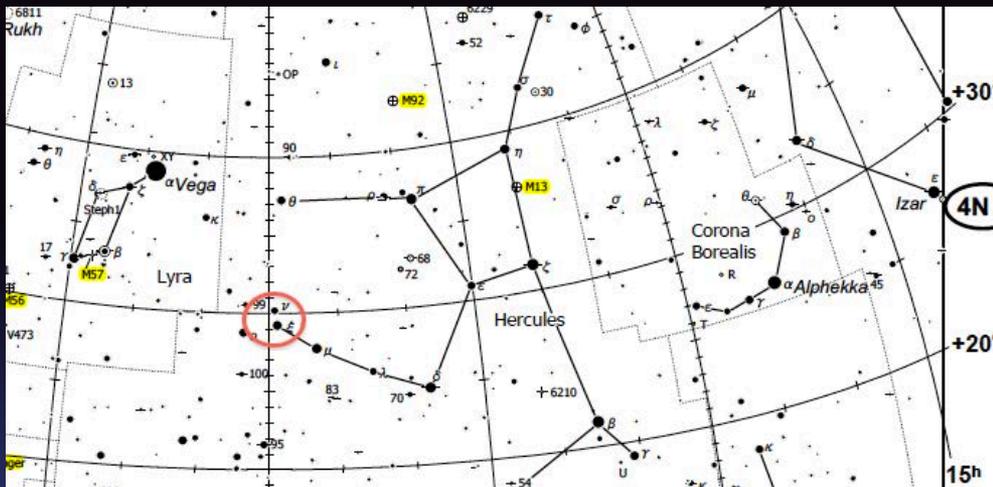


Déplacement du système solaire

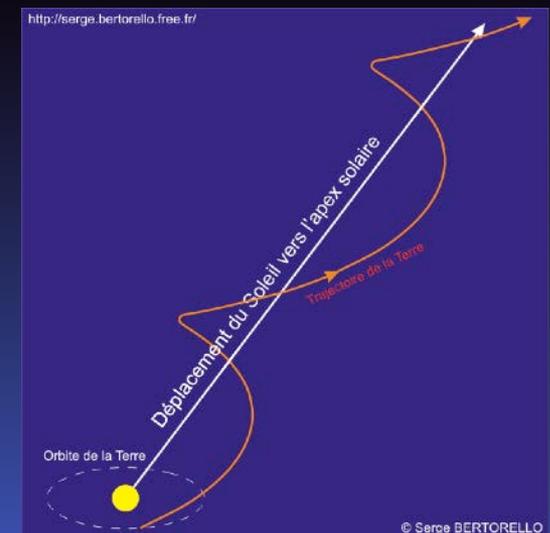
Périple à travers l'espace interstellaire

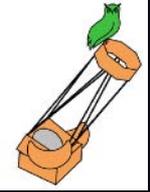
– à la vitesse de 20 km/s vers un point de la constellation d'Hercule : l'apex solaire.

- coordonnées équatoriales de l'apex : $\alpha = 18^h$, $\delta = +30^\circ$,



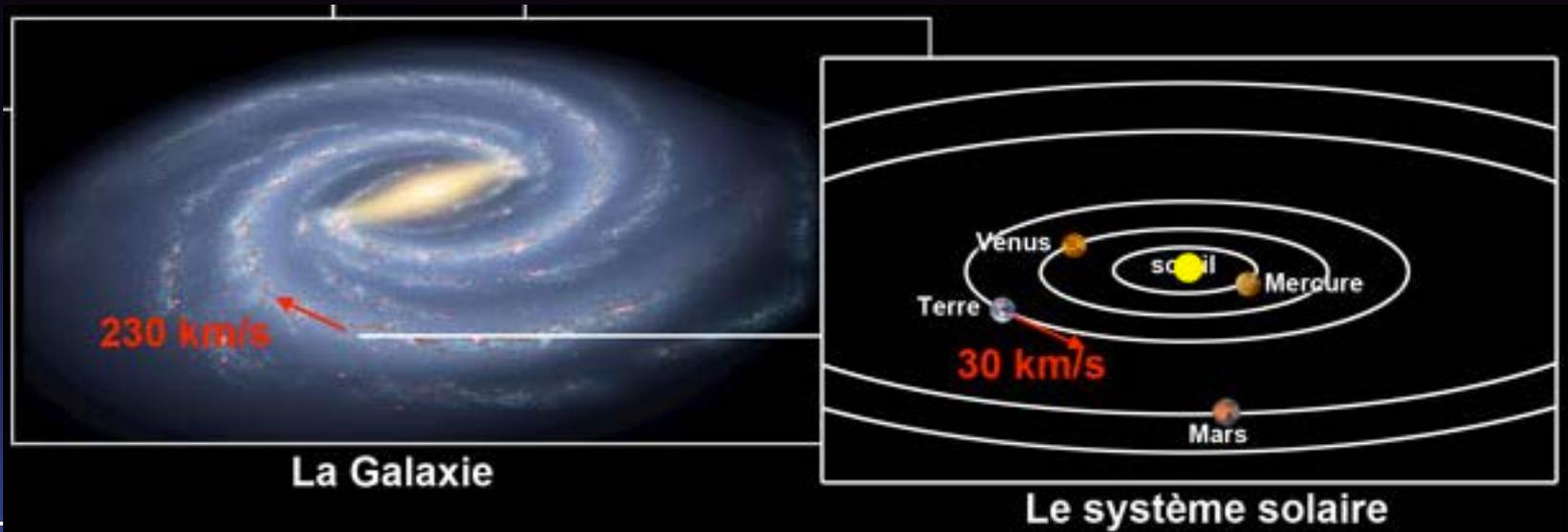
– mouvement du soleil par rapport aux étoiles les plus proches + mouvement orbital de la terre => trajectoire de la terre en forme d'hélice.



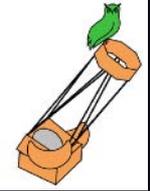


Rotation de la galaxie

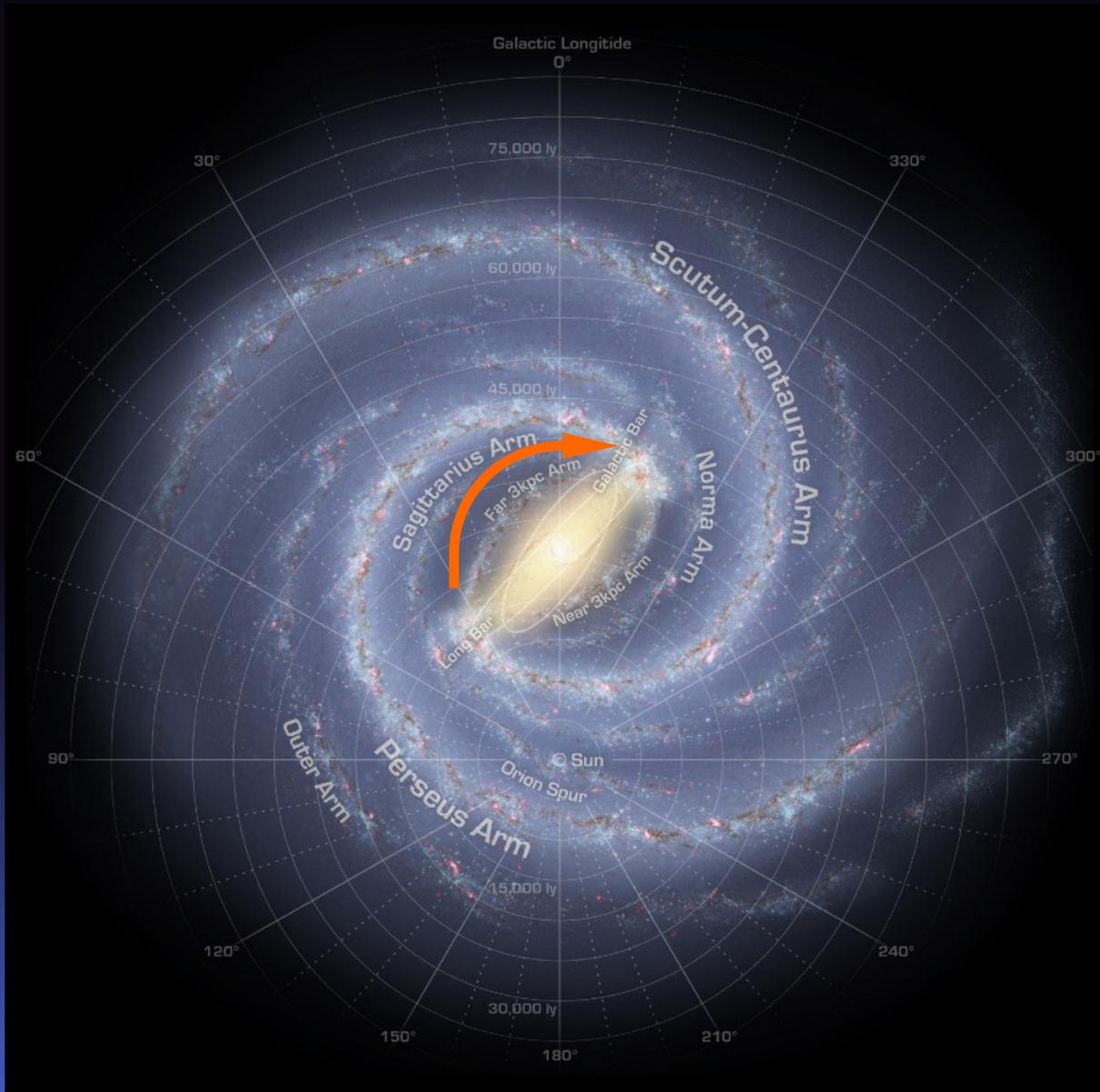
- Système solaire en périphérie de la Voie Lactée à $2/3$ de rayon du centre (bras d'Orion)
- Rotation à 230 km/s
 - tour de la Galaxie en environ 230 Millions d'années.
 - entre 20 et 21 révolutions galactiques depuis sa formation voici 4,55 milliards d'années

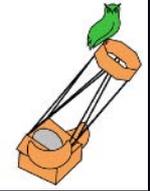


d'années.

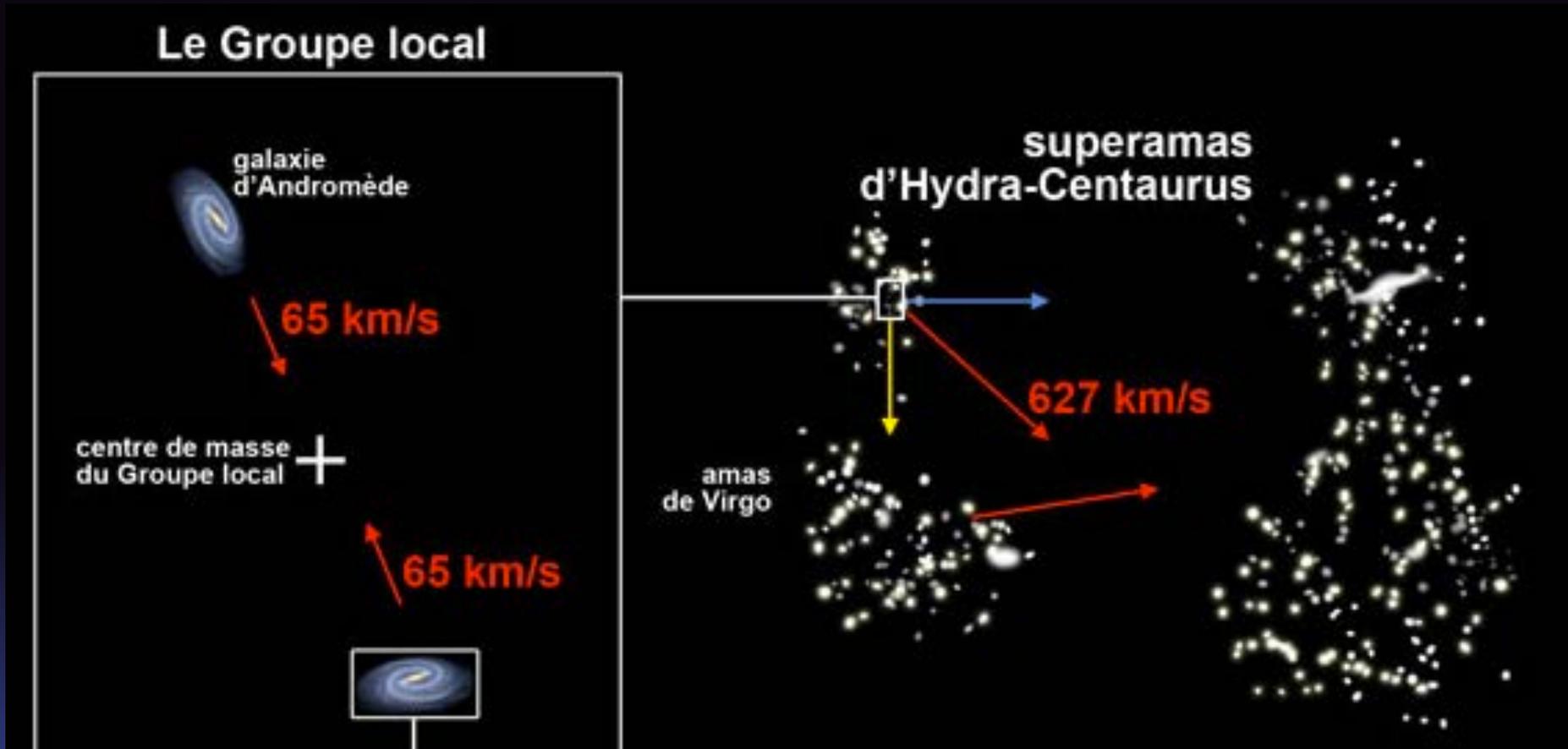


Rotation de la galaxie

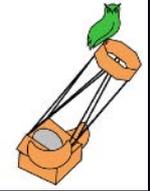




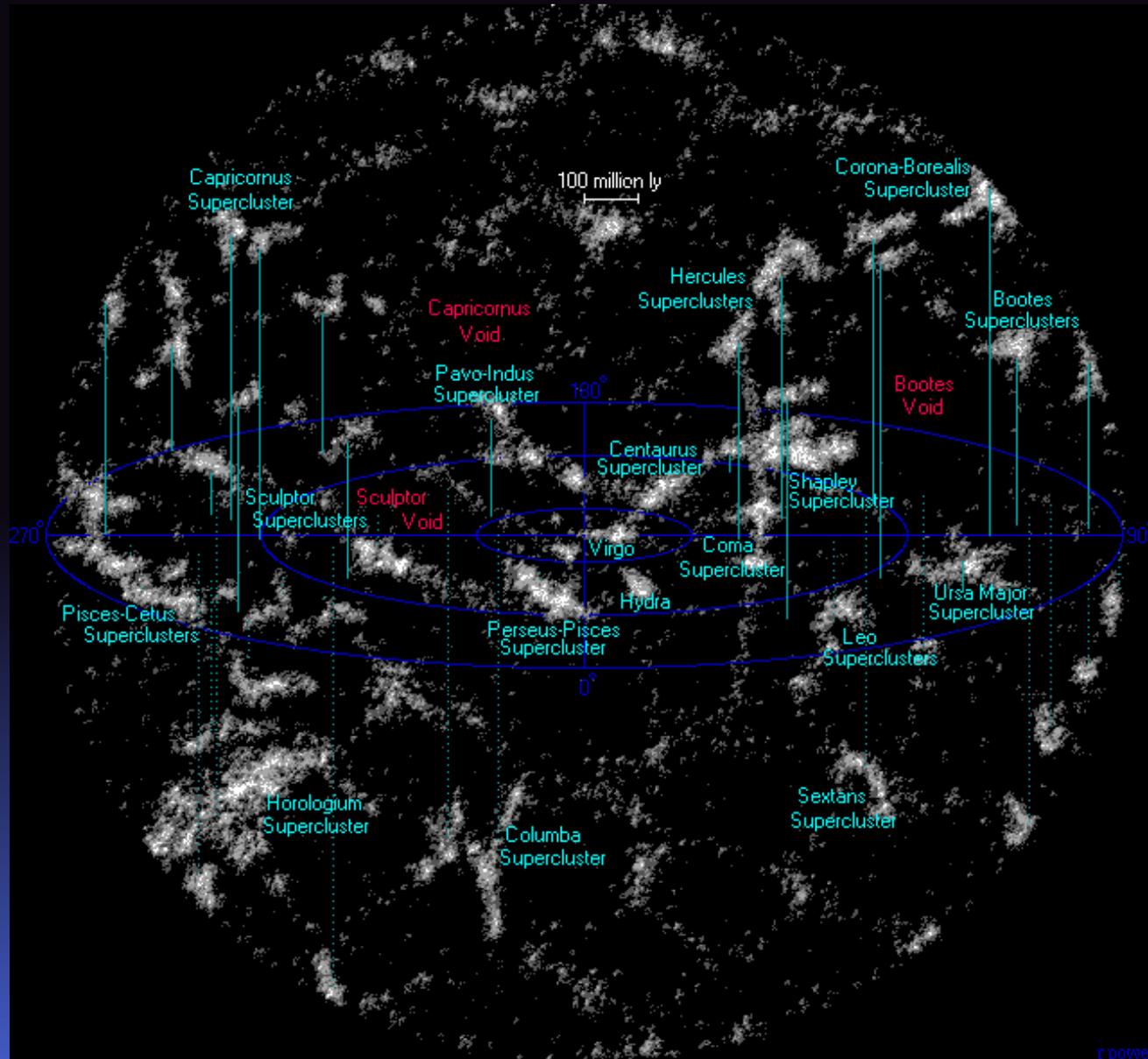
Voyage de la Voie Lactée



- "Grand Attracteur" : masse responsable du mouvement d'ensemble du Groupe Local en direction des superamas de Centaurus et de Shapley.

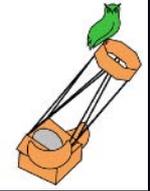


Voyage de la Voie Lactée



La terre
est notre vaisseau spatial !

Merci de votre attention



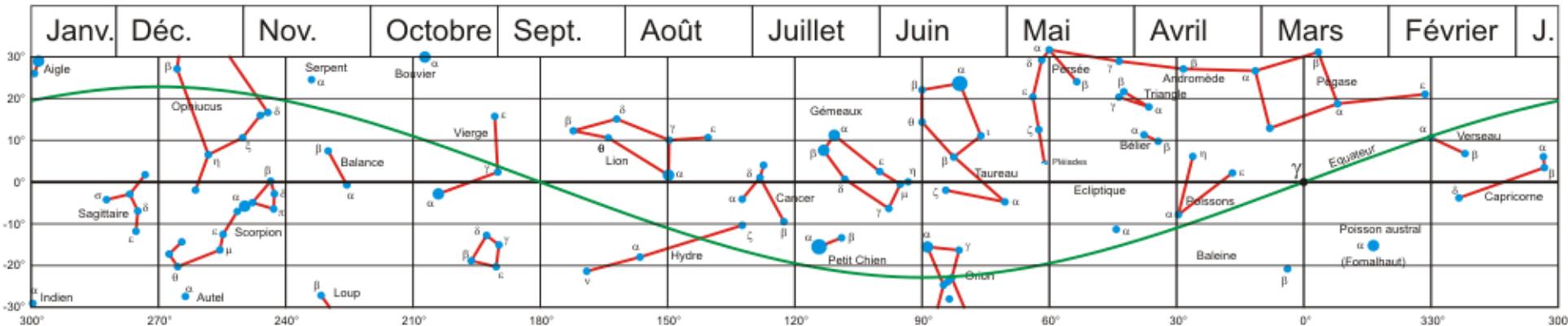
Précession des équinoxes

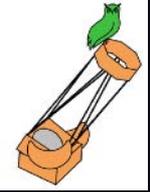
Disposition de l'écliptique et de l'équateur céleste en l'an -2000

© Serge BERTORELLO
<http://serge.bertorello.free.fr/>

Disposition actuelle de l'écliptique et de l'équateur céleste

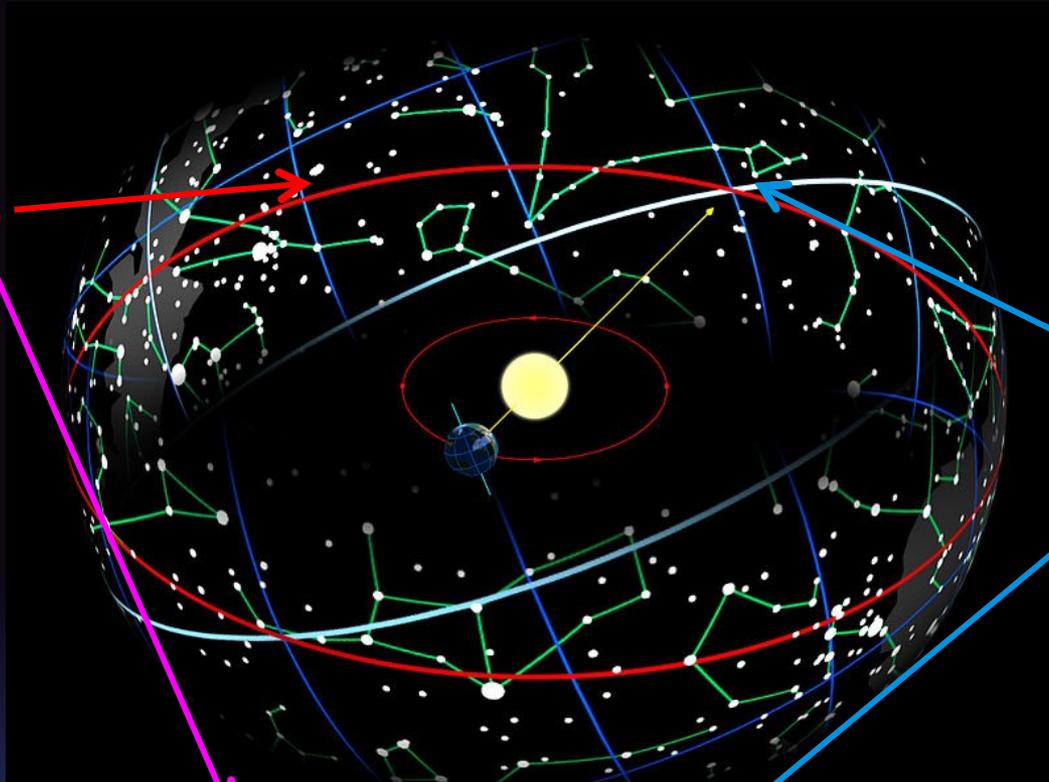
© Serge BERTORELLO
<http://serge.bertorello.free.fr/>



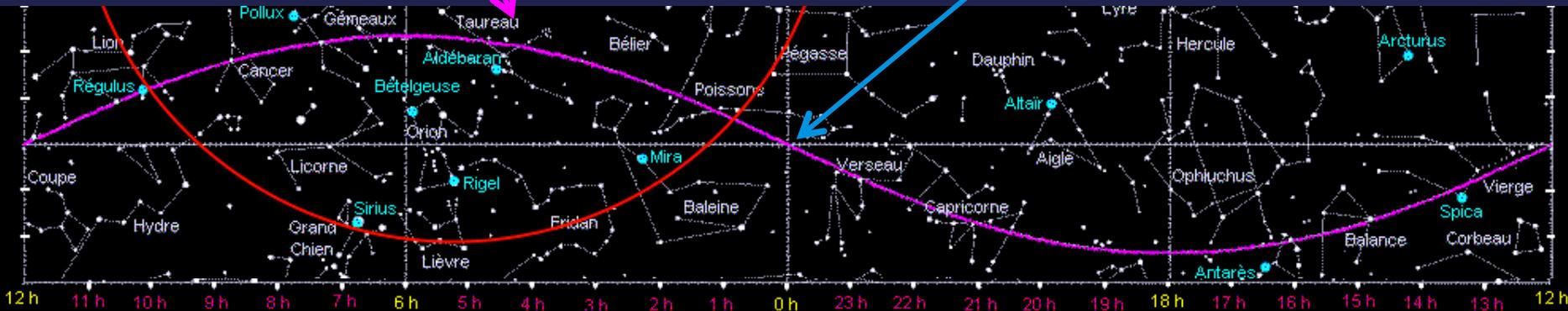


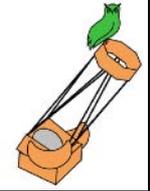
Equateur céleste, écliptique, point vernal

écliptique



Point vernal





Mouvement apparent annuel de la sphère céleste



Terre, +45°27'25", +5°38'03" FOV 135° 19.1 FPS 2018-10-01 02:00:00 UTC+02:00