

Mécanisme de quelques phénomènes célestes

Noël Robichon, Timothée Vaillant, Léo Bernus
avec des illustrations tirées du site web de l'IMCCE
« promenade dans le système solaire »

J.-E. Arlot - IMCCE – UFE

Février 2020

Plan

Introduction : observer le ciel

- I Dynamique du système solaire
- II Mouvement de la Terre dans le système solaire
- III Repérer les phénomènes célestes
- IV Le système Soleil-Terre-Lune

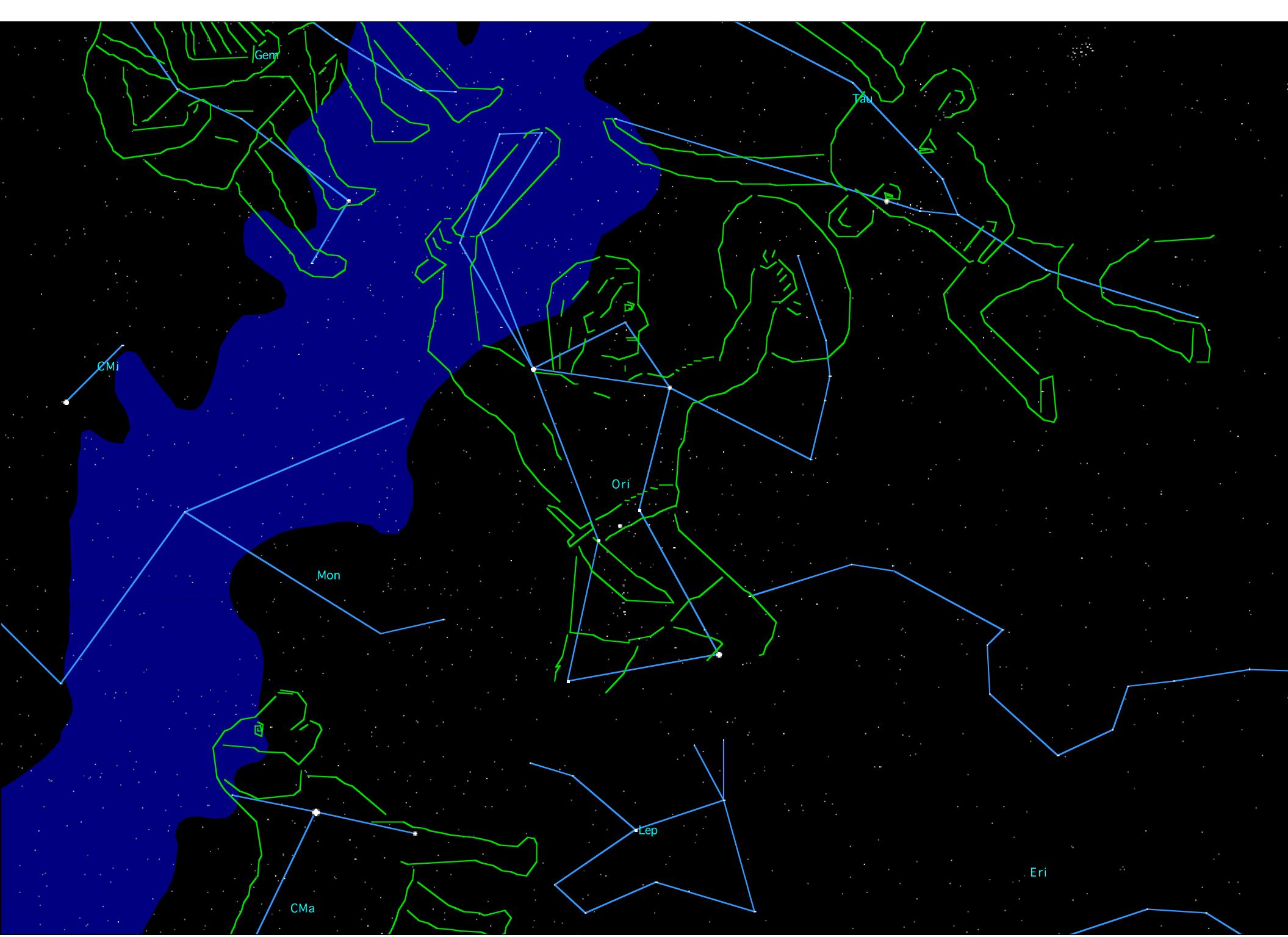
Introduction : observer le ciel

Le ciel à l'œil nu :

- deux objets visibles de jour : le Soleil et la Lune
- 5 planètes
- environ 6000 à 7000 étoiles
- des objets nébuleux
- des comètes...
- des étoiles filantes, météorites...

Constellations

- Les étoiles n'ont pas toutes la même intensité.
- Les étoiles les plus brillantes sont regroupées au sein de figures imaginaires appelées constellations.
- Les 88 constellations sont des regroupements fortuits d'étoiles imaginés pour repérer les objets dans le ciel.
- Les constellations du ciel boréal tirent leur noms de la mythologie grecque et romaine (48 constellations de Ptolémée) ou sont des rajouts postérieurs (Hévélius).
- Les constellations du ciel austral ont été définies à la fin du 16^{ème} siècle (Bayer dans l'Uranométrie 1603, Plancius) et au cours du 17^{ème} siècle (Lacaille).
- La liste définitive a été arrêtée en 1930 par l'Union Astronomique Internationale (d'après les travaux d'Eugène Delporte).



Ciel austral
extrait de
Harmonia
Macrocosmica
d'Andreas
Cellarius 1661



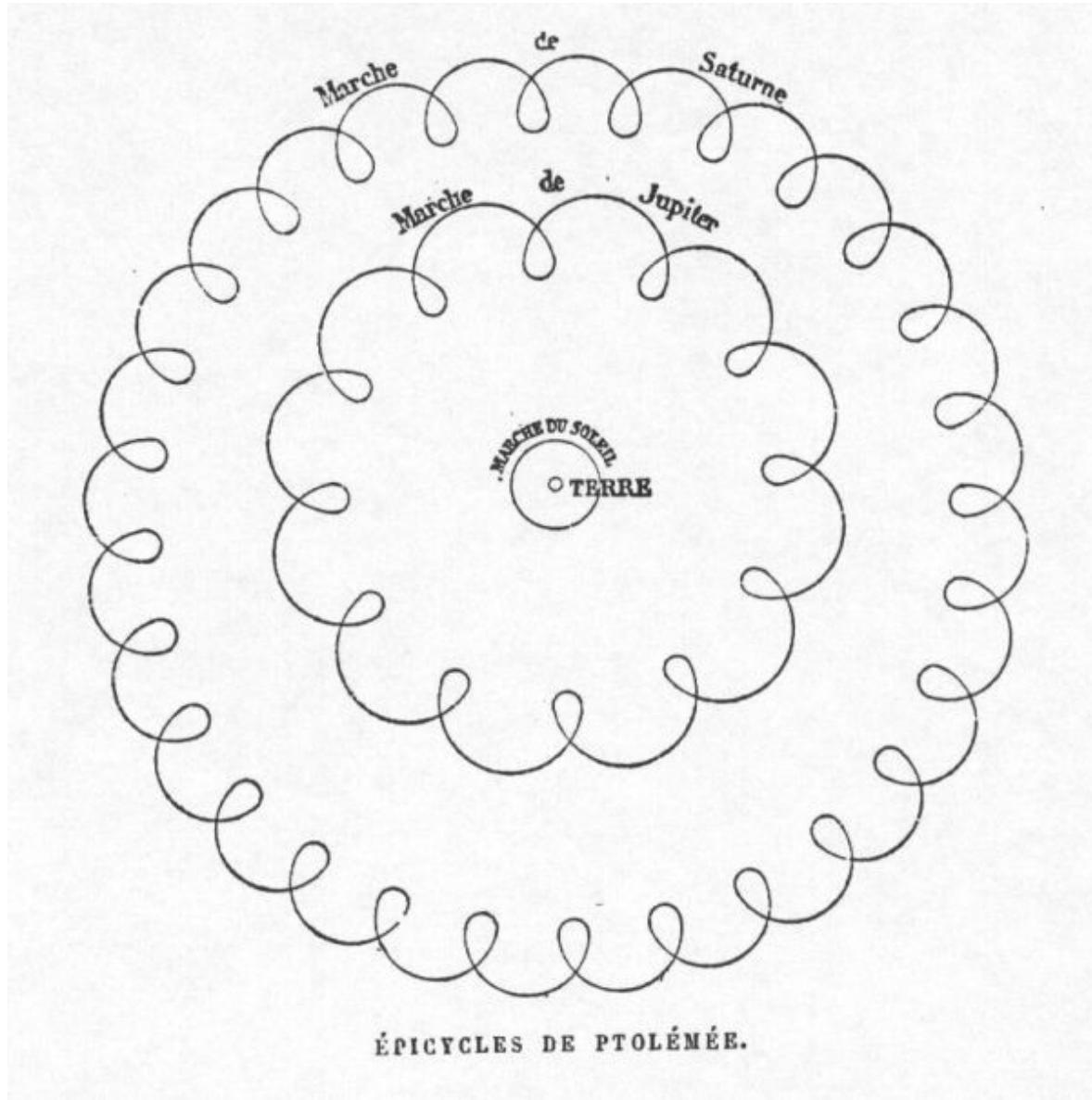
I Dynamique du système solaire

1. Historique des représentations du système solaire
2. Les lois de Kepler
3. Les perturbations planétaires

1. Historique des représentations du système solaire

La vision géocentrique de Ptolémée (II^{ème} après J.C.) :

- Les astronomes comme Hipparche (II^{ème} avant J.C.) et Ptolémée (II^{ème} après J.C.) disposent à l'antiquité des observations menées par les babyloniens depuis le VIII^{ème} avant J.C. A partir de ces données et de leurs propres observations, ils peuvent élaborer des modèles géométriques.
- Ptolémée développe dans *L'Almageste* une théorie géométrique pour décrire les mouvements de la Lune, des planètes et du Soleil vus depuis la Terre. Cette théorie géocentrique est efficace et suffisamment précise pour être utilisée par les astronomes et les navigateurs pendant mille trois cent ans.
- Cependant, pour décrire le mouvement non circulaires des planètes vus de la Terre, Ptolémée utilise un système complexe d'épicycles qui permettent de prendre en compte la non circularité des orbites autour du Soleil et le mouvement relatif de la Terre autour du Soleil.
- Un épicycle est la trajectoire d'un corps décrivant une succession de mouvement circulaires imbriqués.

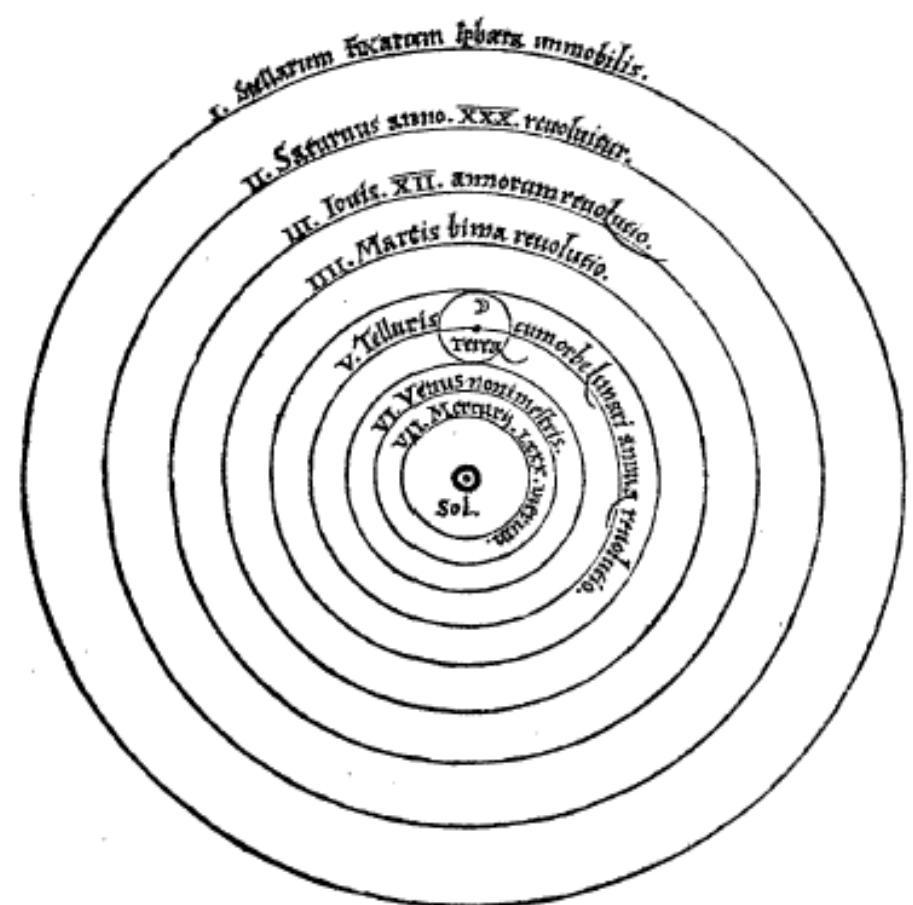


Epicycles de Ptolémée

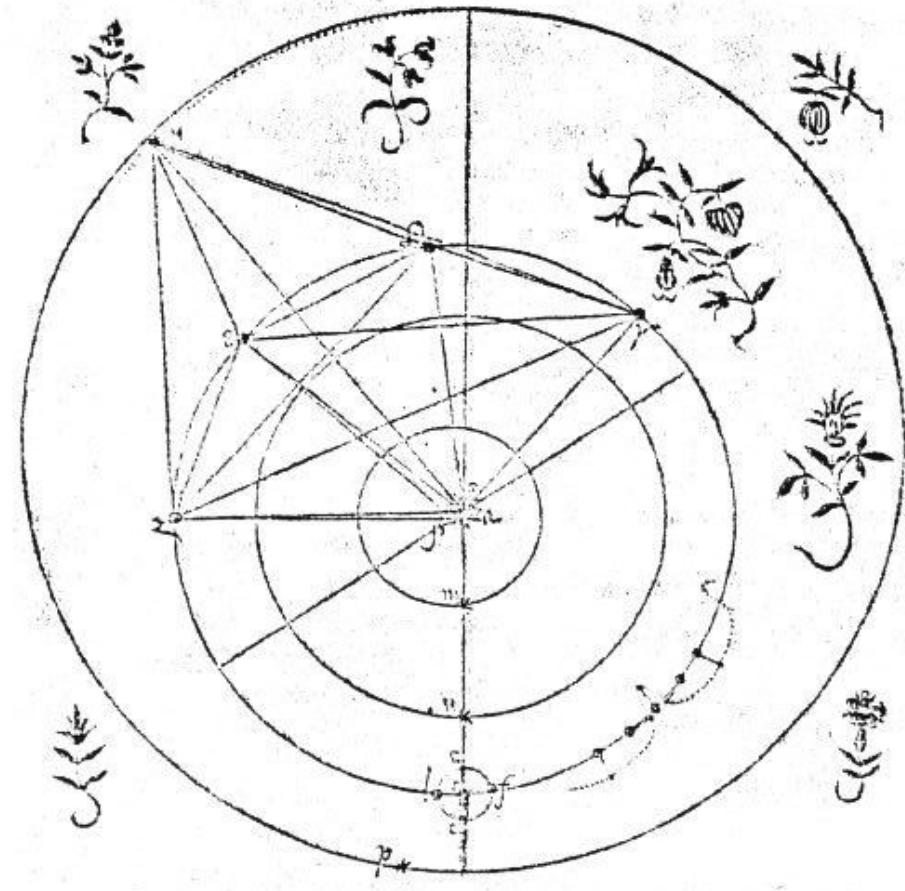
(Crédit : Bibliothèque de l'Observatoire de Paris)

La vision héliocentrique de Copernic :

- Cependant le système des épicycles de Ptolémée nécessite des corrections. Les trajectoires des planètes doivent se refermer en première approximation, ce qui n'est pas le cas car les orbites des planètes ne sont pas des multiples de l'année.
- En 1543, Copernic publie l'ouvrage *Des révolutions des sphères célestes*, où il décrit les orbites planétaires à l'aide d'un système héliocentrique. Les orbites des planètes sont alors circulaires, ce qui donne un modèle beaucoup plus simple.
- Cependant les planètes ne se déplacent pas à vitesse constante et Copernic introduit ainsi de nombreux épicycles pour faire varier leurs vitesses.



- En 1610, Galilée observe à l'aide de son invention, la lunette astronomique, le mouvement des satellites de Jupiter : il existe ainsi d'autres centres de force que la Terre ou le Soleil, ce qui conforte la vision héliocentrique.
- La vision héliocentrique permet à Kepler de mesurer précisément l'orbite de Mars et sa distance.
- A partir du système de Copernic et des observations très précises de l'astronome Tycho Brahe, Kepler énonce 3 lois qui permettent de décrire le mouvement juste des planètes du système solaire.

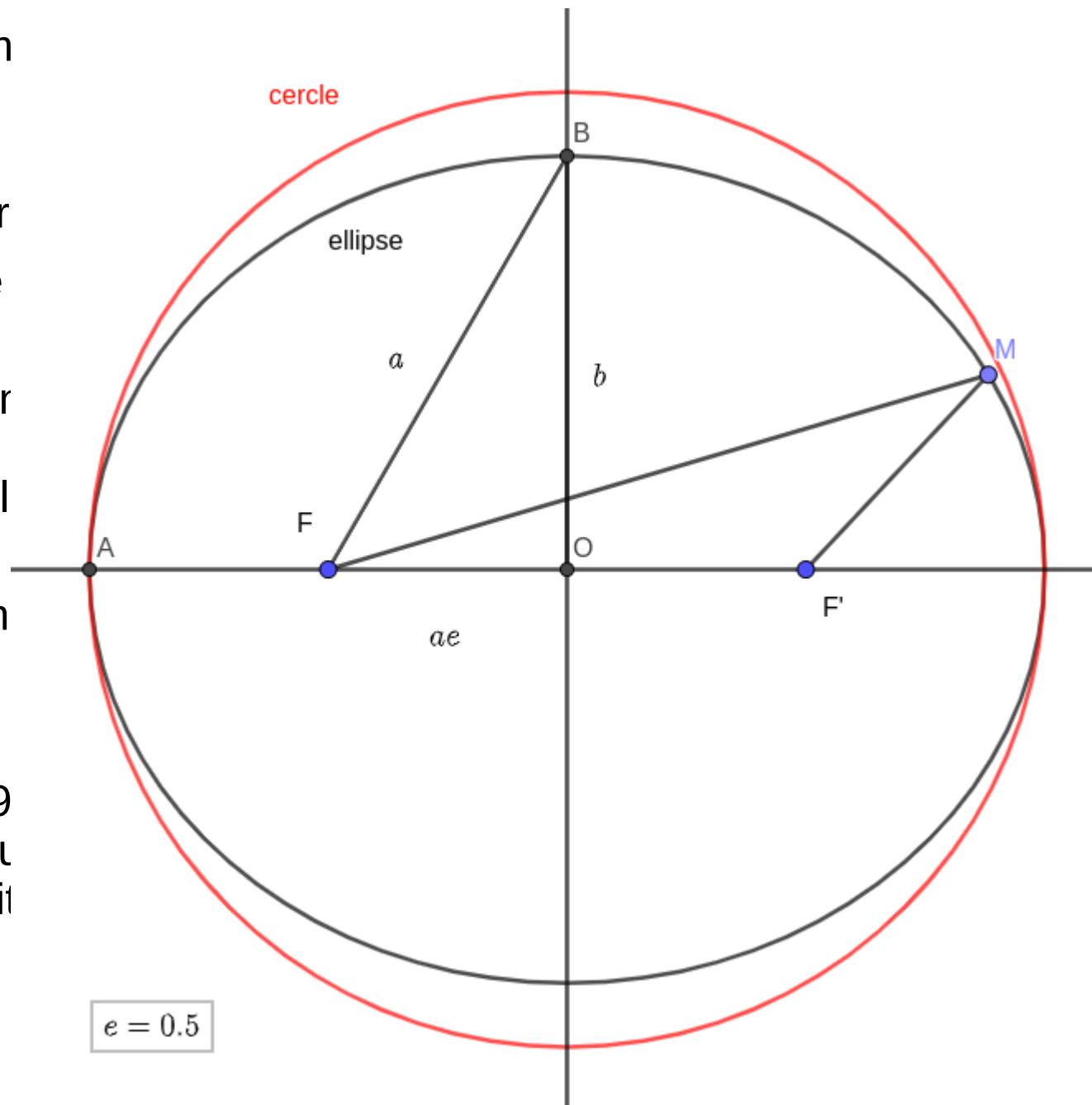


Détermination de l'orbite de Mars par Kepler
 (Crédit : Bibliothèque de l'Observatoire de Paris)

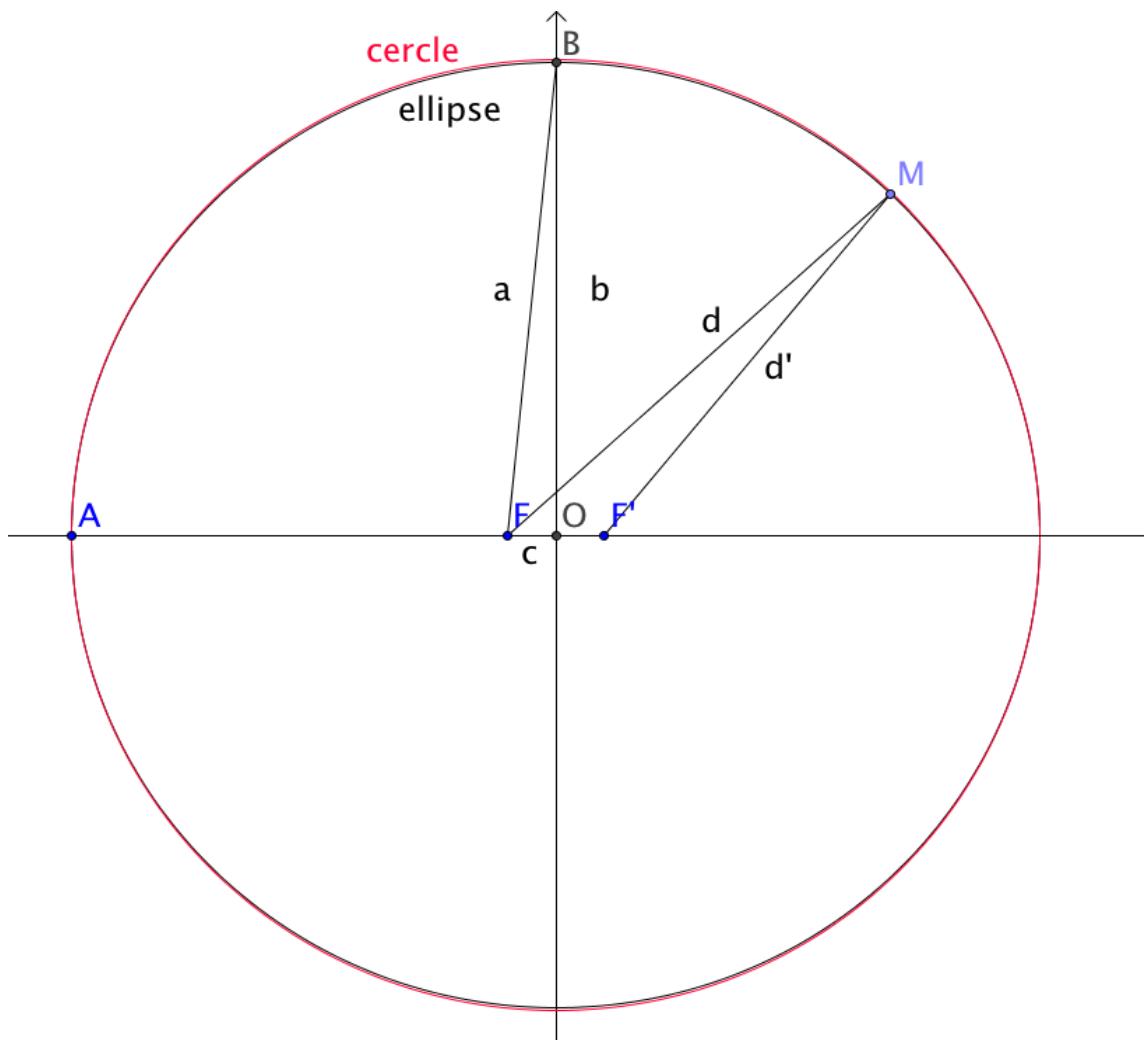
2. Les lois de Kepler

- Comment décrire le mouvement des planètes autour du Soleil ?
- Les trois lois de Kepler (de 1609 à 1618) décrivent le problème à 2 corps d'une planète autour du Soleil :
 - les planètes décrivent des ellipses dont le Soleil est à un des foyers.
 - le segment de droite reliant chaque planète au Soleil balaie des aires égales pendant des durées égales.
 - le rapport entre le cube du demi-grand axe de l'ellipse et le carré de la période est une constante indépendante de la planète :
$$\frac{a^3}{T^2} = \frac{Gm_S}{4\pi^2}$$
- Soient 2 corps de masse m_1 et m_{12} séparés de la distance r_{12} . D'après Newton (*Les Principes* 1687), la force exercée par le premier sur le second est :
$$\vec{F}_{1 \rightarrow 2} = -\frac{Gm_1 m_2}{r_{12}^2} \vec{u}_{12}$$
- L'interaction gravitationnelle régit ainsi les mouvements des planètes autour du Soleil.

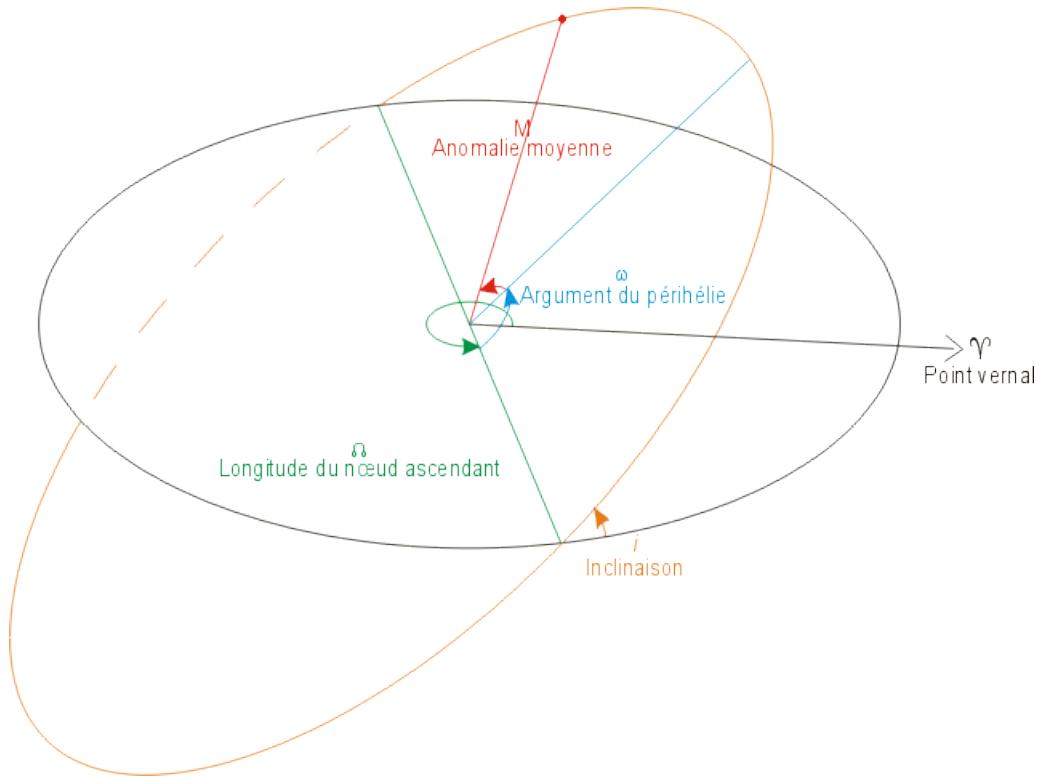
- Une ellipse est l'ensemble des points M vérifiant $FM+F'M=cste=2a$.
- a est appelé le demi-grand axe.
- On définit l'excentricité $e=OF/OA=c/a$.
- L'ellipse est entièrement déterminée par la donnée de son excentricité et de la valeur de son demi-grand axe.
- On définit aussi le demi-axe $b=OB$. b vérifie $b = a \cdot (1-e^2)^{1/2}$
- Pour $e=0.1$, on a $b=0.9$ ainsi les orbites sont quasi-circulaires pour de petits excentricités.



- Pour $e=0.1$, on a $b=0.995a$ et ainsi les orbites sont quasi-circulaires pour de petites excentricités.

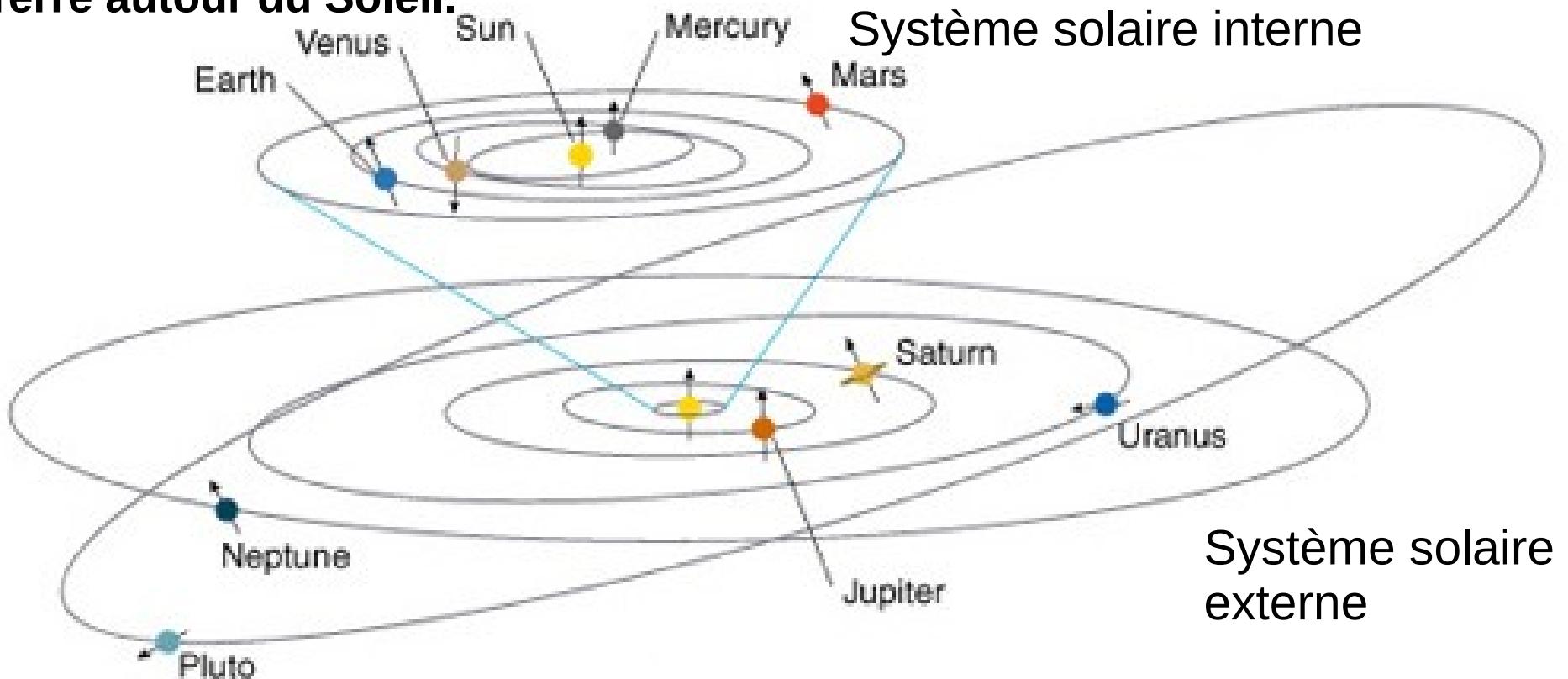


- On peut repérer la planète dans l'espace à l'aide de six paramètres :
 - le demi-grand axe a
 - l'excentricité e
 - l'inclinaison de l'orbite i par rapport à un plan de référence
 - la longitude du nœud Ω par rapport à la direction du point vernal
 - l'argument du périhélie ω
 - l'anomalie moyenne M



- Dans un problème à 2 corps, seul l'anomalie moyenne M varie de façon périodique. Les autres paramètres sont constants.
- **Point vernal** : position du Soleil vue de la Terre à l'équinoxe de printemps.

- Le système solaire compte 8 planètes. Leurs orbites sont à peu près dans un même plan et sont presque elliptiques, d'excentricités petites (sauf Mercure).
- Sauf exception, tout tourne dans le même sens appelé le sens prograde qui est le sens de révolution de la Terre autour du Soleil (révolution des planètes autour du Soleil, des satellites autour des planètes, rotations propres).
- Pour répétrer les orbites dans l'espace on doit utiliser un plan de référence. On prend généralement comme plan de référence le plan de l'écliptique.
- **L'écliptique est la projection sur la sphère céleste de la trajectoire annuelle apparente du Soleil vue de la Terre.**
- **Le plan de l'écliptique est ainsi le plan géométrique contenant l'orbite de la Terre autour du Soleil.**



- Les éléments orbitaux des 8 planètes du système solaire et Pluton sont les suivants (Crédit : IMCCE) :

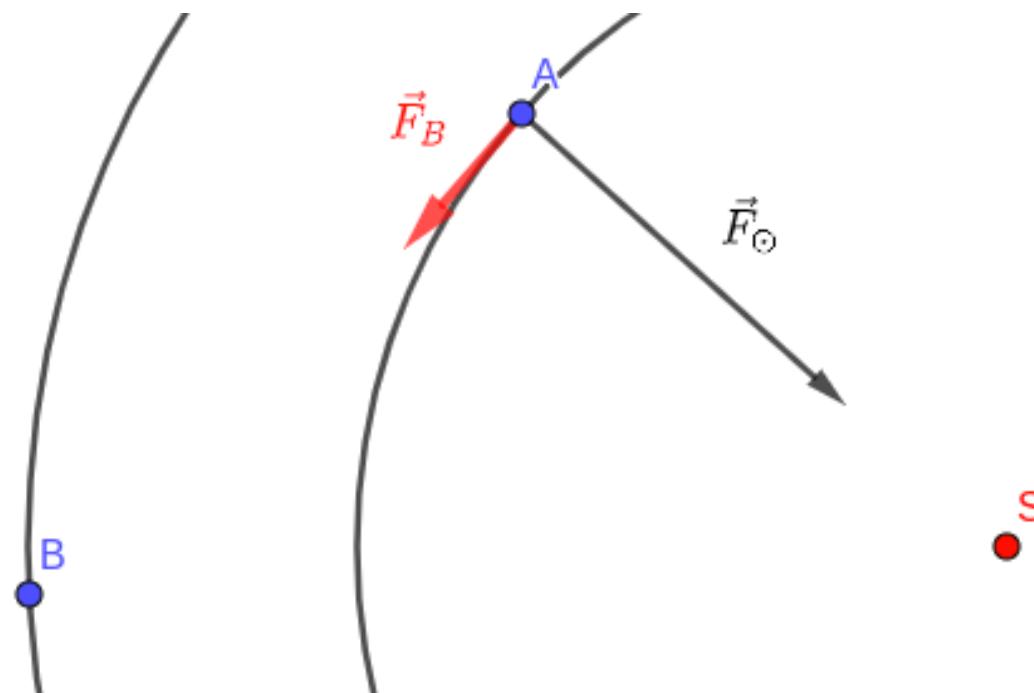
Nom de la planète	<u>Mercure</u>	<u>Vénus</u>	<u>Terre</u>	<u>Mars</u>	<u>Jupiter</u>	<u>Saturne</u>	<u>Uranus</u>	<u>Neptune</u>	<u>Pluton (*)</u>
Nombre de satellites	<u>0</u>	<u>0</u>	<u>1</u>	<u>2</u>	<u>65</u>	<u>62</u>	<u>27</u>	<u>13</u>	<u>5</u>
Demi-grand axe en unités astronomiques	0,3870983	0,7233298	1,0000010	1,5236793	5,202603	9,554909	19,21845	30,11039	39,54470
Demi-grand axe en millions de km	57,909083	108,2086	149,5980	227,9392	778,2983	1429,394	2875,039	4504,450	5915,803
Excentricité de l'orbite	0,20563	0,00677	0,01671	0,09340	0,04850	0,05555	0,04638	0,00946	0,2490
Inclinaison de l'orbite sur l'écliptique	7°,0050	3°,3947	0°	1°,8497	1°,3033	2°,4889	0,°7732	1°,7700	17°,1422
Inclinaison de l'équateur sur l'écliptique	0,01°	177,36°	23,44°	25,19°	3,13°	26,73°	97,86°	28,31°	122,52°



3. Les perturbations planétaires

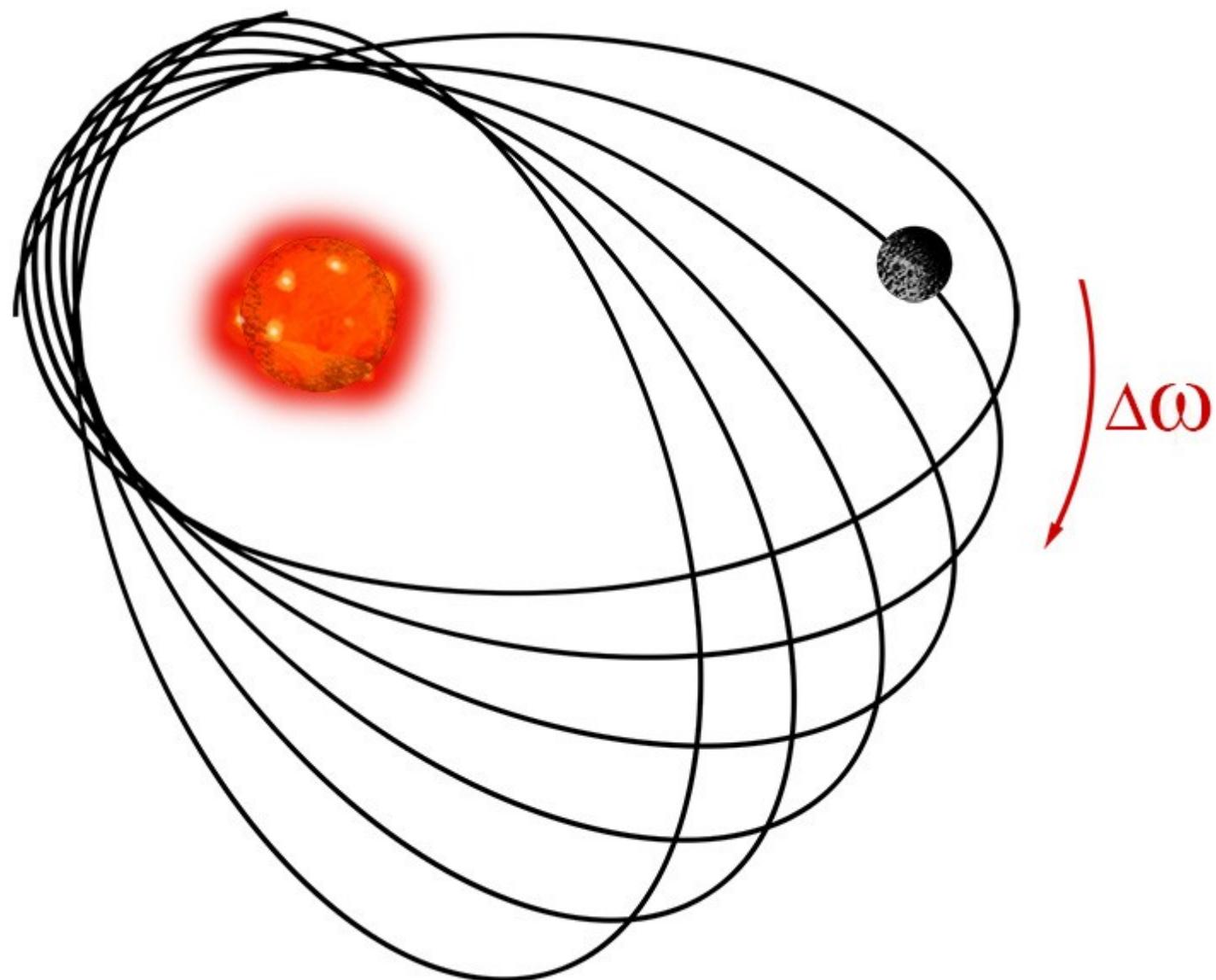
- Les lois de Kepler sont en fait une approximation car elles ne sont valables que pour un problème à 2 corps.
- Les planètes subissent aussi des perturbations par l'interaction gravitationnelle dues aux autres planètes du système solaire (problème à N corps) .

$$\vec{F} = GM_{\odot}M_A \frac{\overrightarrow{AS}}{AS^3} + \sum_{B \neq A} GM_AM_B \frac{\overrightarrow{AB}}{AB^3}$$

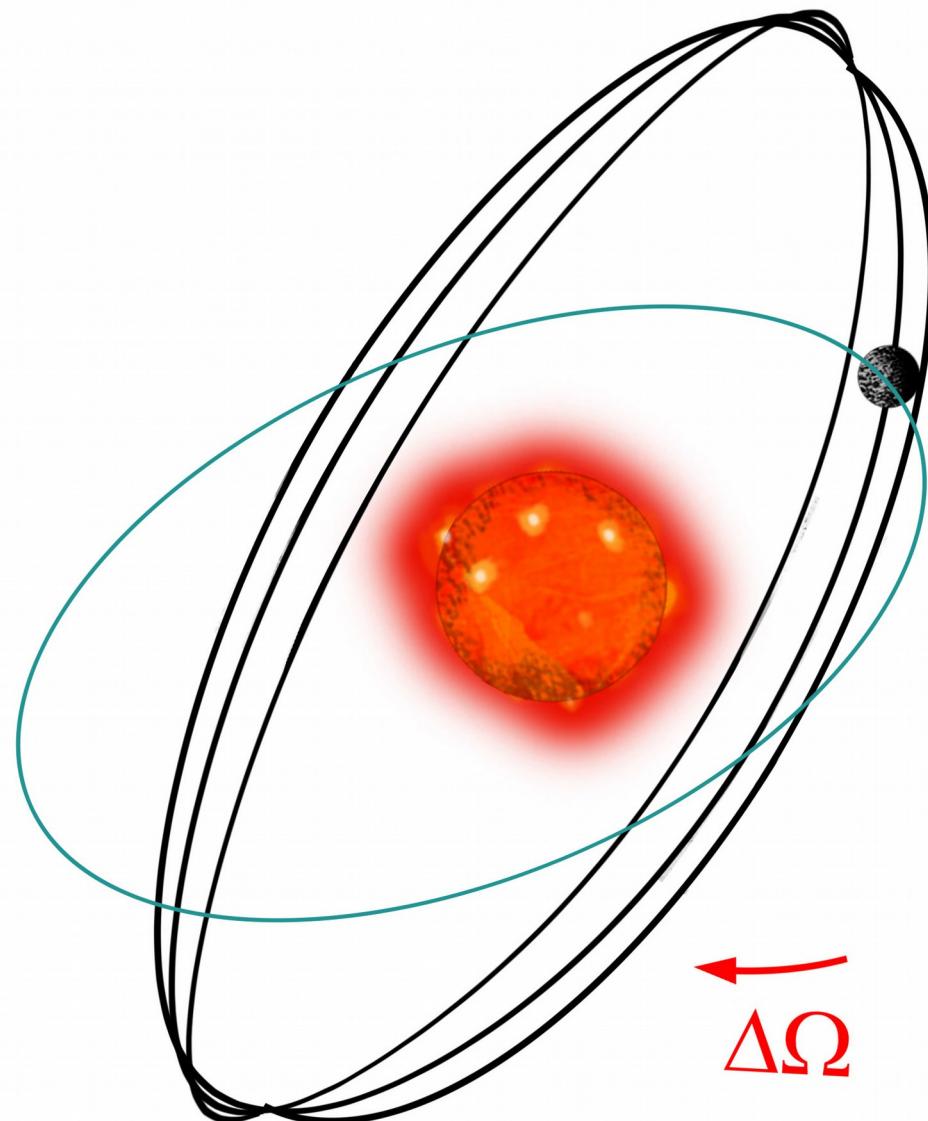


- Les perturbations planétaires peuvent être calculées à l'aide de développement en excentricité, inclinaison et masses planétaires. Les irrégularités de l'orbite d'Uranus ont permis ainsi la découverte de Neptune (Le Verrier 1846).
- Dans la théorie des perturbations, les paramètres orbitaux peuvent varier avec des périodes séculaires (de 1000 ans jusqu'à 1 million d'années):
 - précession du périhélie dans le sens prograde.
 - précession du nœud dans le sens rétrograde.
 - variations séculaires du demi-grand axe, de l'excentricité et de l'inclinaison.

Précession du périhélie



Précession du nœud ascendant



- Équation du mouvement séculaire des orbites :

$$z_j = e_j e^{i\varpi_j} \quad \zeta_j = \sin(i_j/2) e^{i\Omega_j} \quad Z = {}^t (z_j, \zeta_j)$$

$$\frac{dZ}{dt} = iAZ + i\Phi(Z, \bar{Z})$$

- Premier terme linéaire : équation de Lagrange-Laplace. En diagonalisant la matrice de Lagrange-Laplace on peut obtenir des solutions quasi-périodiques.

$$z_j = \sum_k E_{jk} \exp(ig_k t + \phi_j)$$

$$\zeta_j = \sum_k F_{jk} \exp(is_k t + \psi_j)$$

- Termes non linéaires : chaos !

- **Dans un système chaotique, deux trajectoires partant de conditions initiales infiniment voisines finissent par diverger.**
- A long terme, la question de la stabilité du système solaire se pose. Le problème est en premier évoqué par Newton. Poincaré montrera au début du XX^{ème} siècle qu'un système composé d'au moins trois corps en interaction gravitationnelle est chaotique mais estime cependant que le système solaire reste stable.
- En 1989, J.Laskar montre que le système solaire est bien chaotique et en 2011 que la limite de prédiction est d'environ 50 millions d'années.

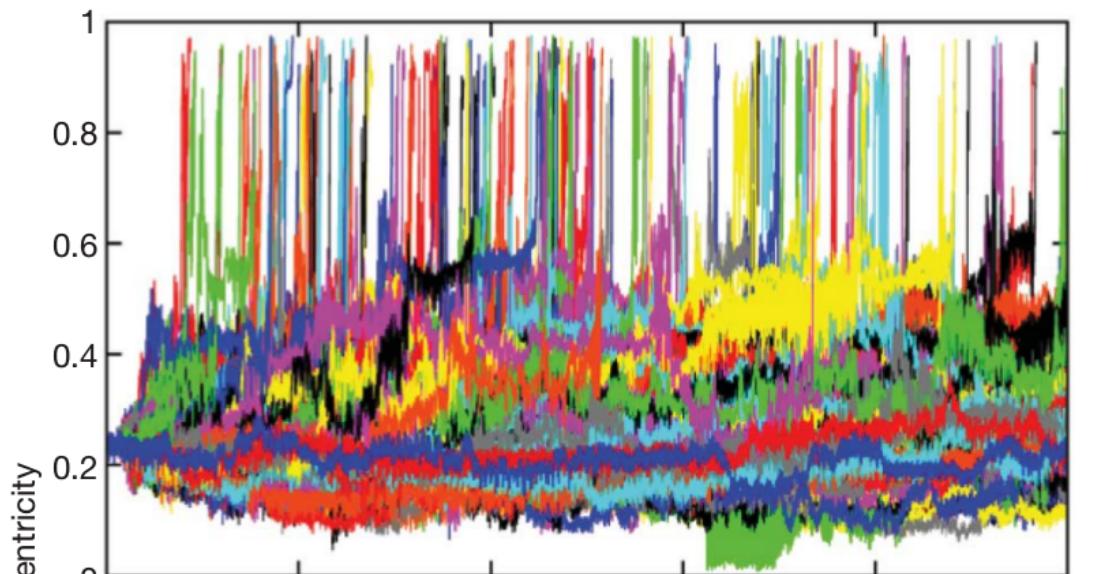
Divergence exponentielle des incertitudes : incertitude $\sim \exp(t/T)$
T = temps de Lyapunov.

Ref :

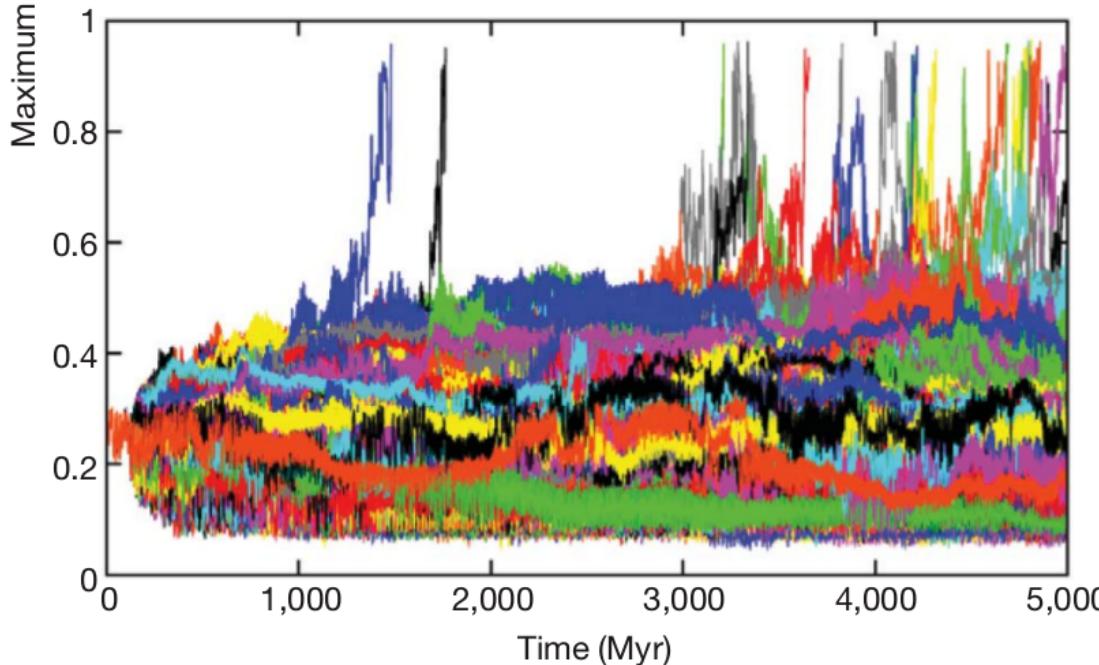
- J. Laskar : The chaotic motion of the solar system : A numerical estimate of the size of the chaotic zones. Icarus, page 291, 1990
- J. Laskar et al. : Strong chaos induced by close encounters with Ceres and Vesta. Astronomy & Astrophysics, Volume 532, L4, 2011

Possibilité de collisions dans le système solaire

a



b

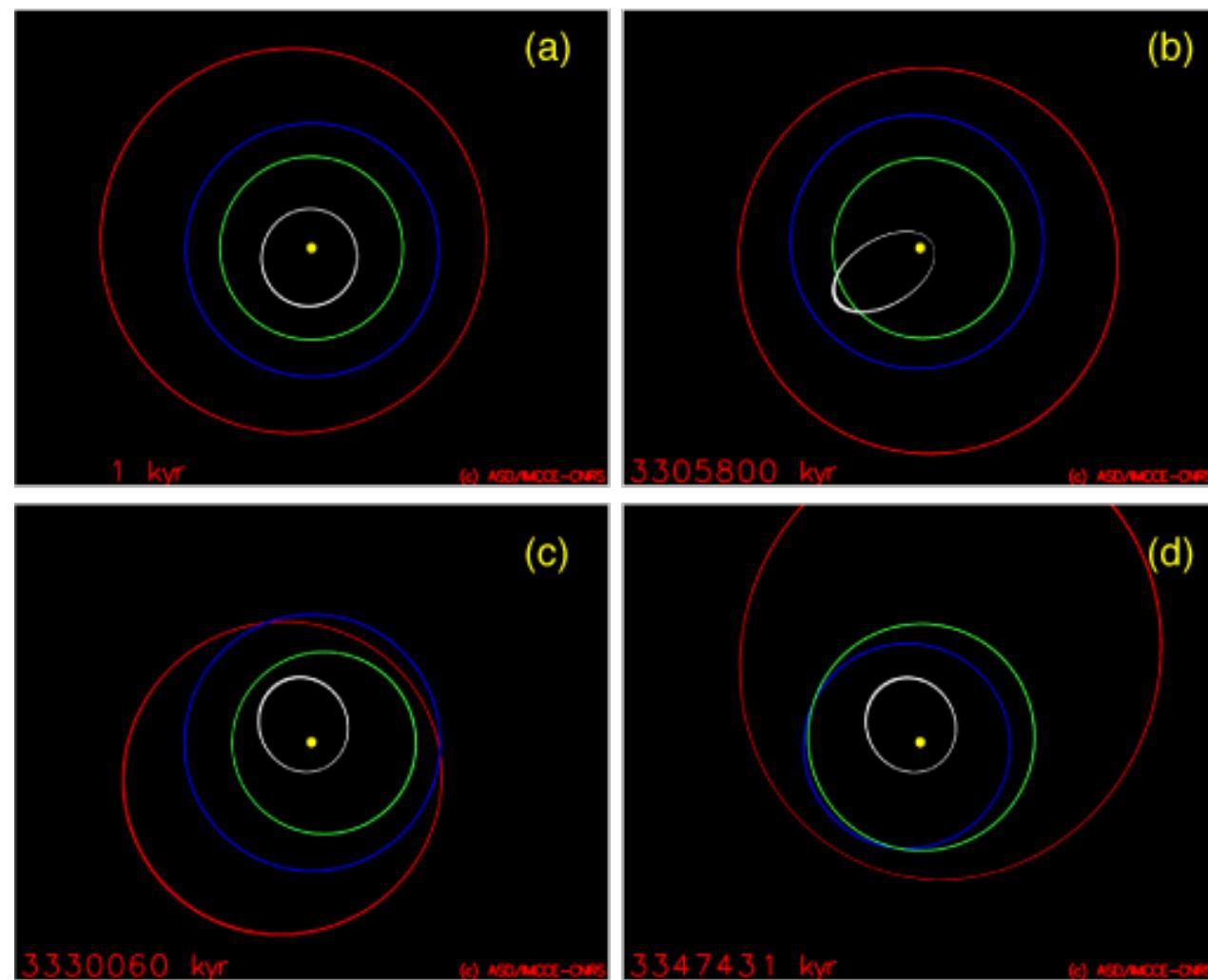


Environ mille simulations à très long terme du système solaire.

Sans relativité et sans Lune (en haut) : 60 % des trajectoires détruisent le système solaire interne !

Avec relativité (en bas) : seulement environ 1 % des trajectoires détruisent le système solaire interne.

Variation des paramètres orbitaux à long terme



Exemple d'évolution à long terme des orbites des planètes telluriques :

Mercure, Vénus, Terre , Mars.

La résonance séculaire entre les périhéliés de Mercure et Jupiter est majoritairement responsable de la potentielle destruction du système solaire interne.

En 2008, J. Laskar et al. estiment la probabilité de collisions dans le système solaire interne au pourcent en cinq milliards d'années.

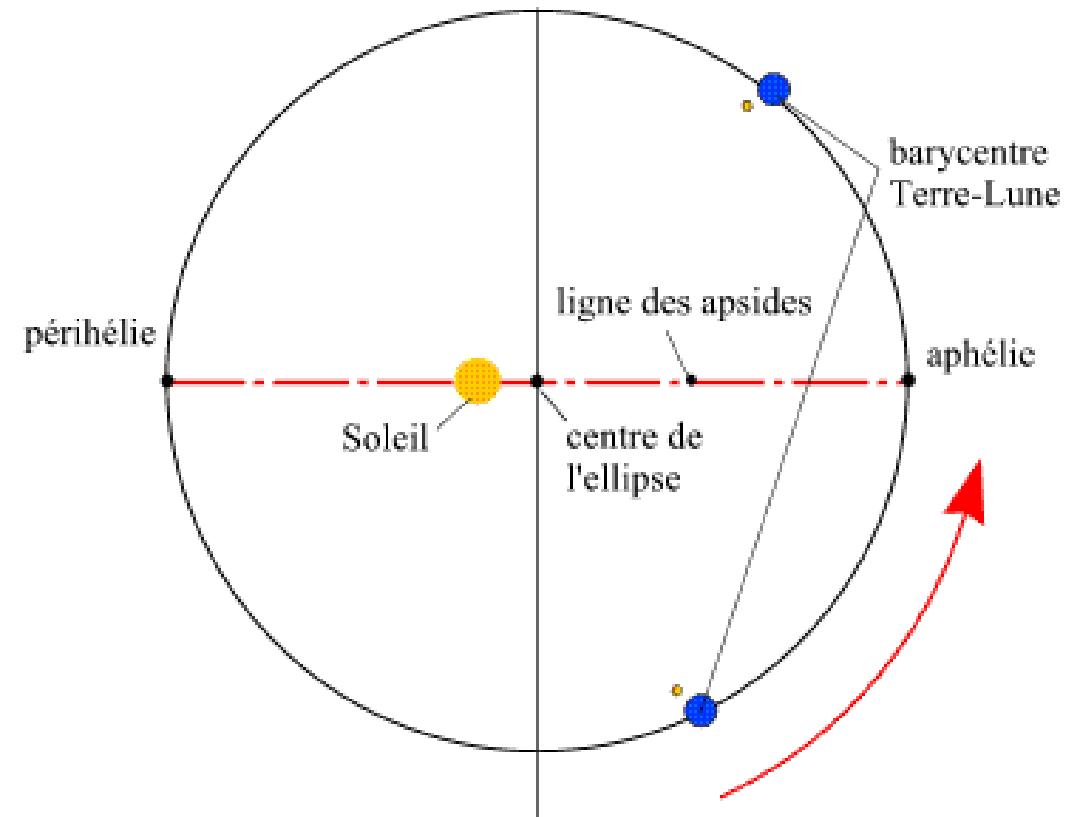
Animation : <https://youtu.be/Dts7up5B-Y0>

Ref : J Laskar & M Gastineau Nature 459, 817-819 (2009) doi:10.1038/nature08096

II Mouvement de la Terre dans le système solaire

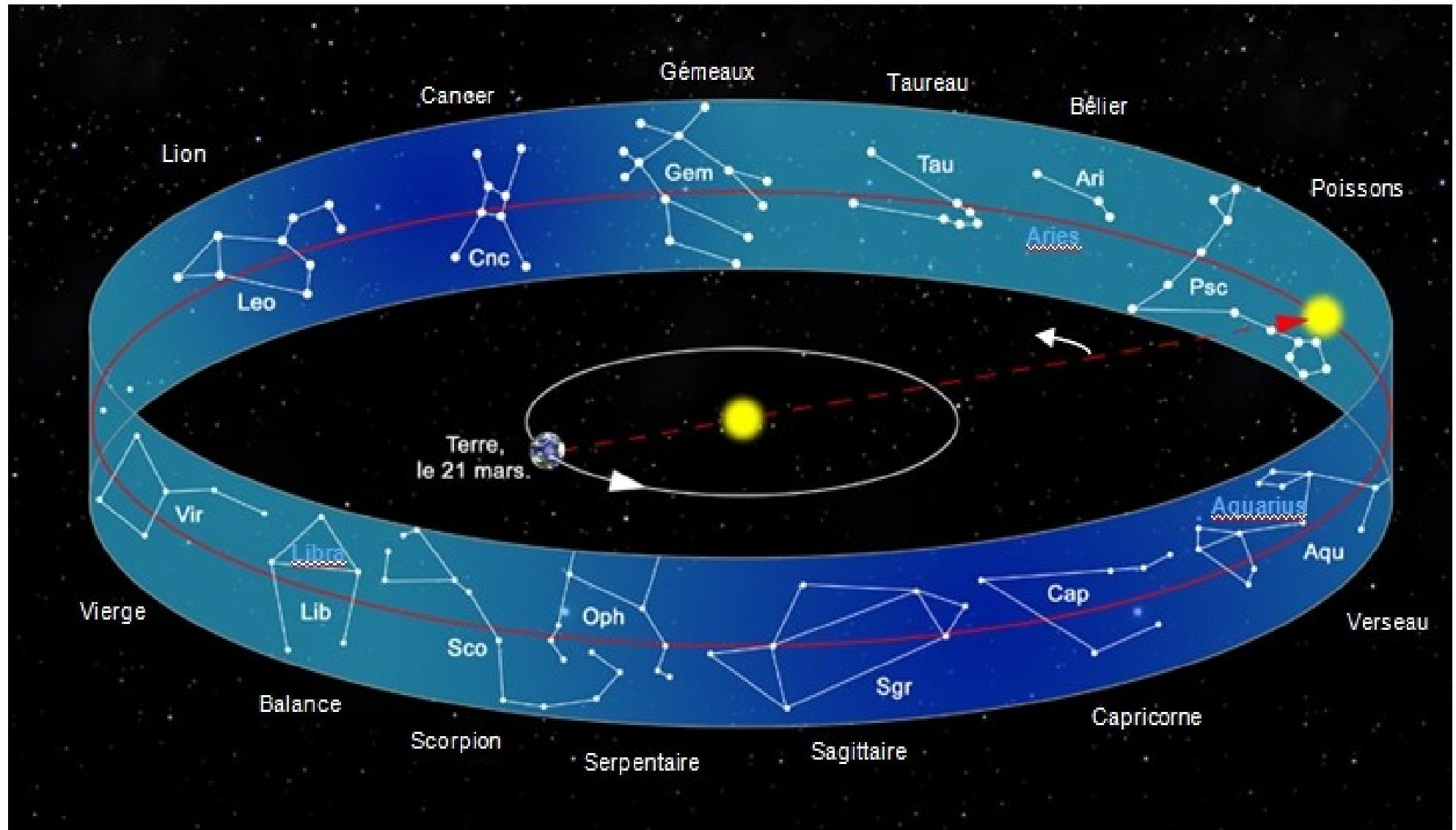
1. Révolution de la Terre autour du Soleil

- En première approximation, la Terre obéit à la 1ère loi de Kepler. Sa trajectoire est une ellipse parcourue dans le sens prograde dont l'un des foyers est occupé par le Soleil.
- Précession du périhélie : période d'environ 110 000 ans dans le sens prograde.
- Précession du nœud : période d'environ 70 000 ans dans le sens rétrograde.



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

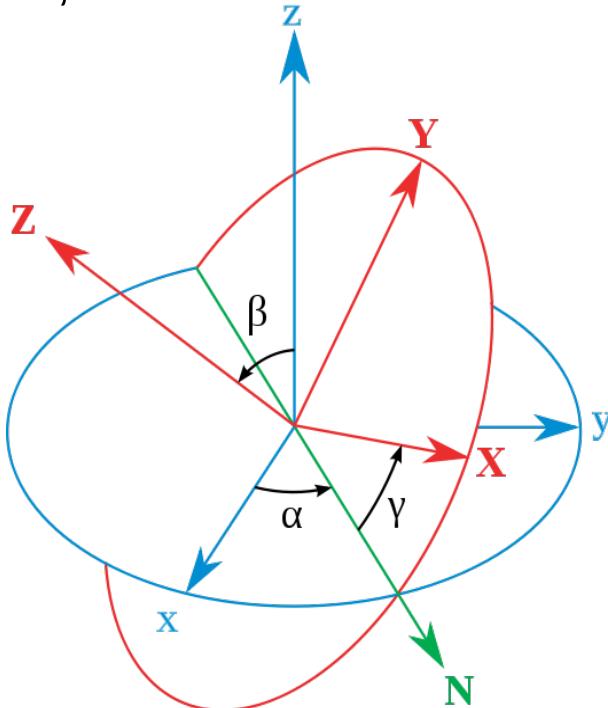
Mouvement annuel du Soleil



- Le soleil se déplace sur l'écliptique.
- L'écliptique coupe le ciel sur les 13 constellations du zodiaque.

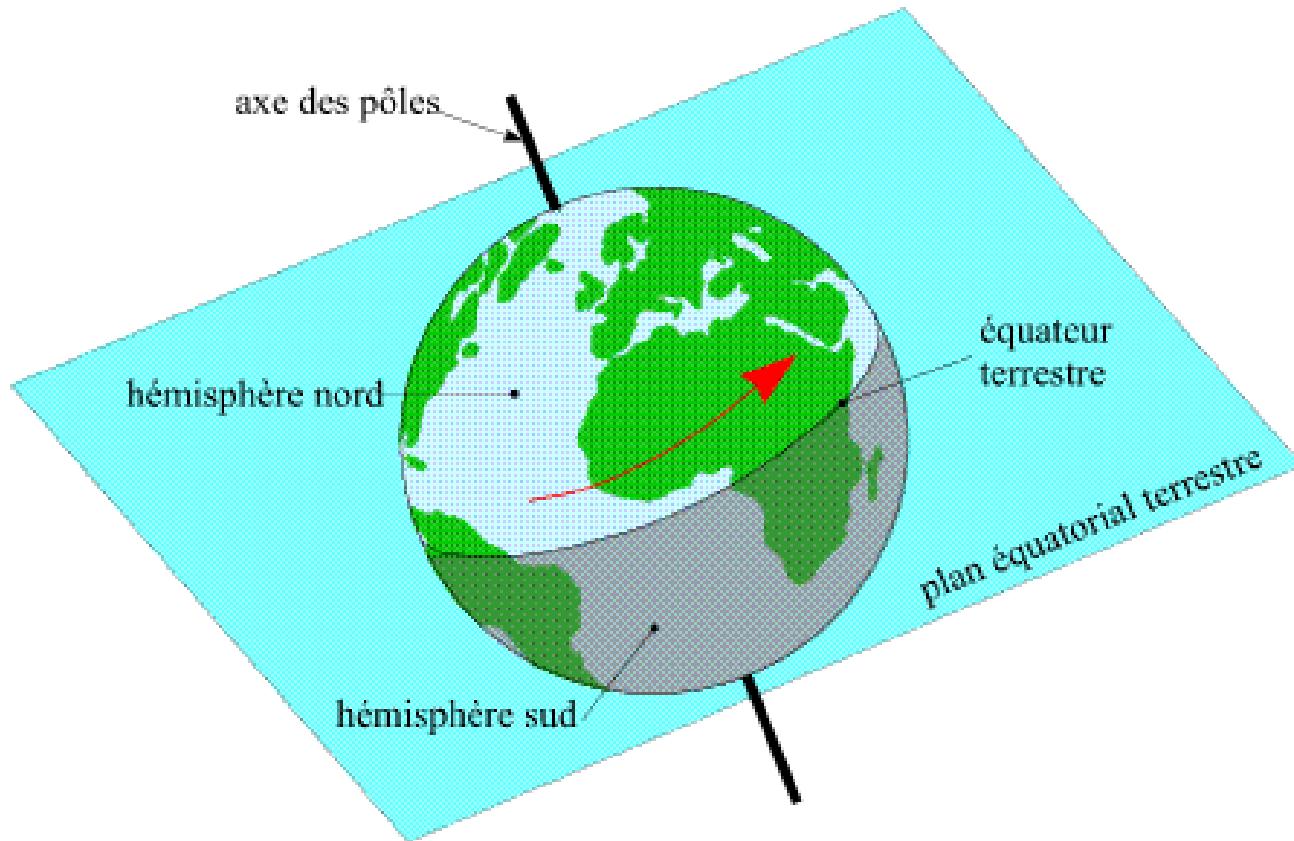
2) Rotation propre de la Terre

- La Terre n'est pas un point matériel mais un solide. Pour décrire son orientation dans l'espace, il suffit de connaître trois angles appelés angles d'Euler :

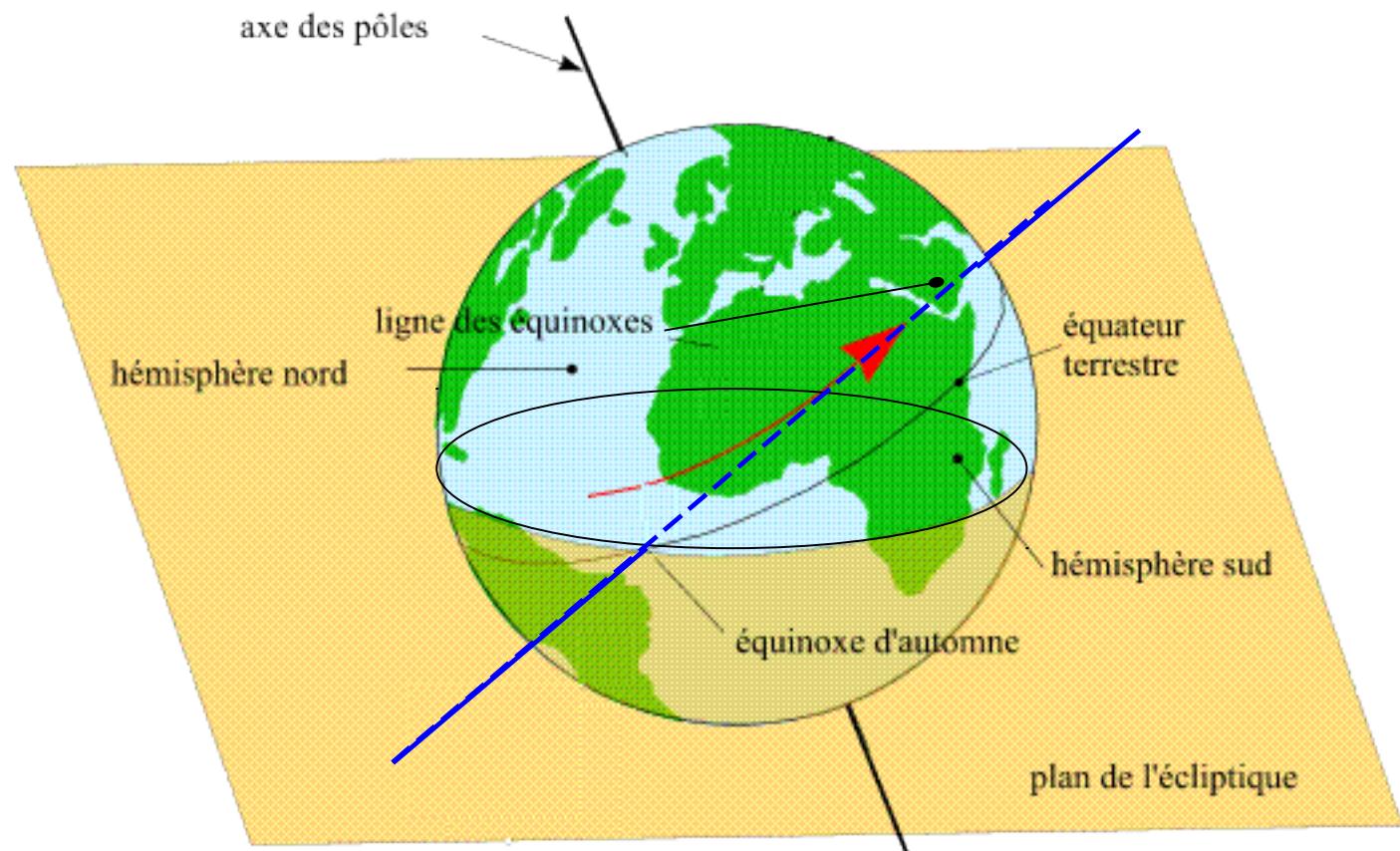


- Le repère bleu Oxyz est lié à l'écliptique Oxy fixe et le repère rouge OXYZ au solide mobile.
 - α est l'angle de précession.
 - β est l'angle de nutation.
 - γ est l'angle de rotation propre.

Rotation



- La Terre tourne régulièrement sur elle-même dans le sens prograde autour de l'axe des pôles avec une période de 23h56min.
- **Le plan perpendiculaire à cet axe et passant par le centre de la Terre définit l'équateur.**
- **L'équateur céleste est la projection de l'équateur terrestre sur la sphère céleste.**



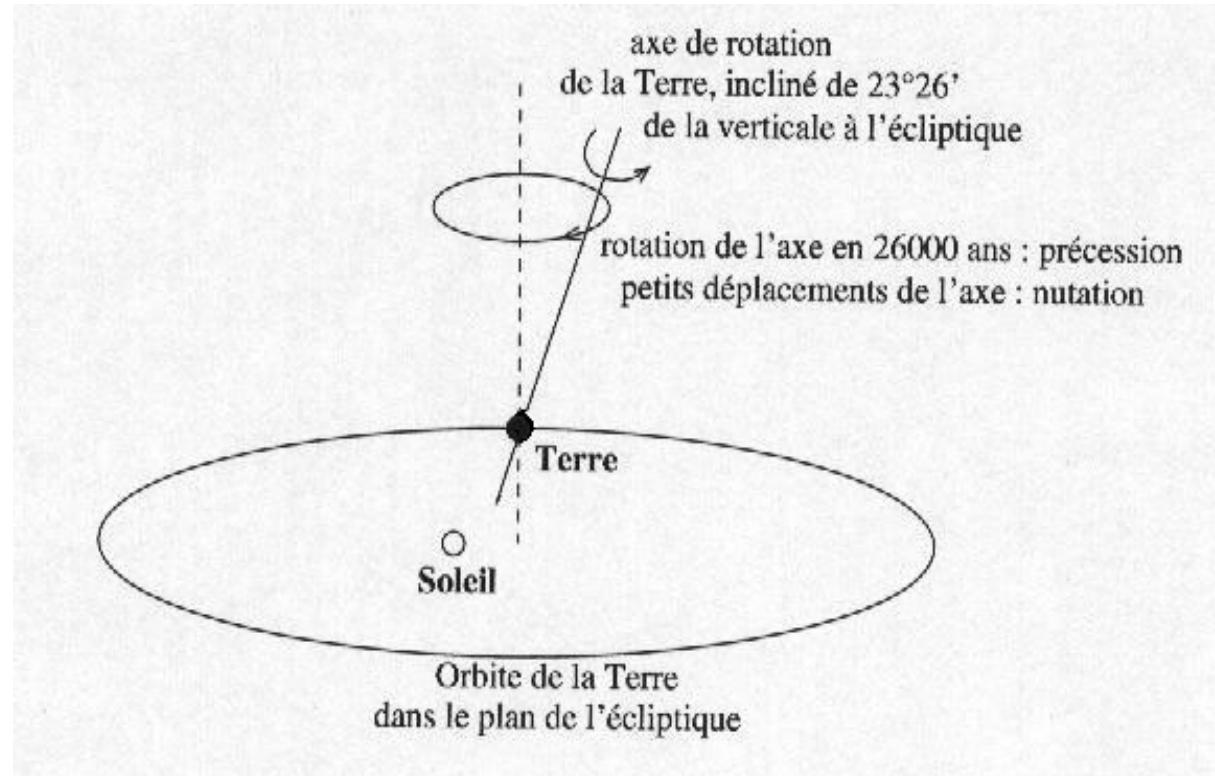
- Le plan équatorial terrestre et le plan de l'écliptique se croisent et leur intersection est appelée ligne des équinoxes. La ligne perpendiculaire à la ligne des équinoxes est appelée ligne des solstices.
- L'angle entre le plan équatorial terrestre et le plan de l'écliptique est l'obliquité. Elle a été mesuré par Eratosthène au III^{ème} siècle avant J.C., qui trouve $23^{\circ}51'$. La valeur était de $23^{\circ}26'14,89''$ le 1^{er} janvier 2014.

Mouvement annuel du Soleil



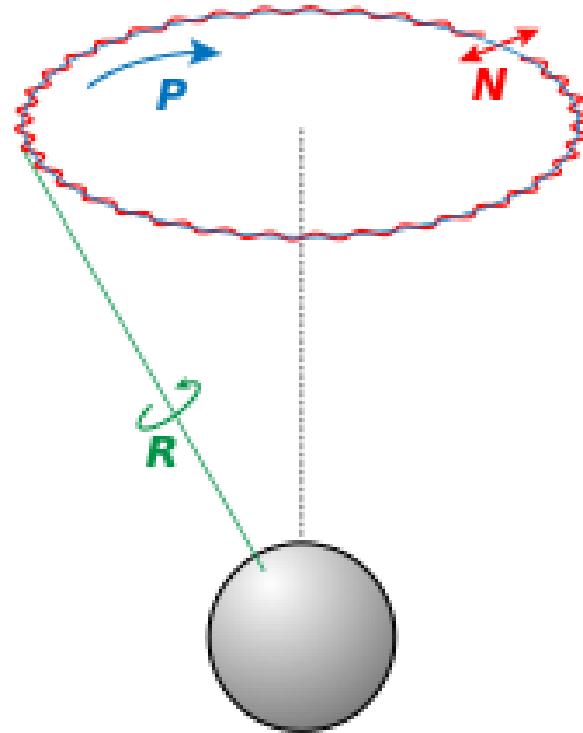
- Le Soleil se déplace sur l'écliptique.
 - Il passe par l'équateur aux équinoxes

Précession



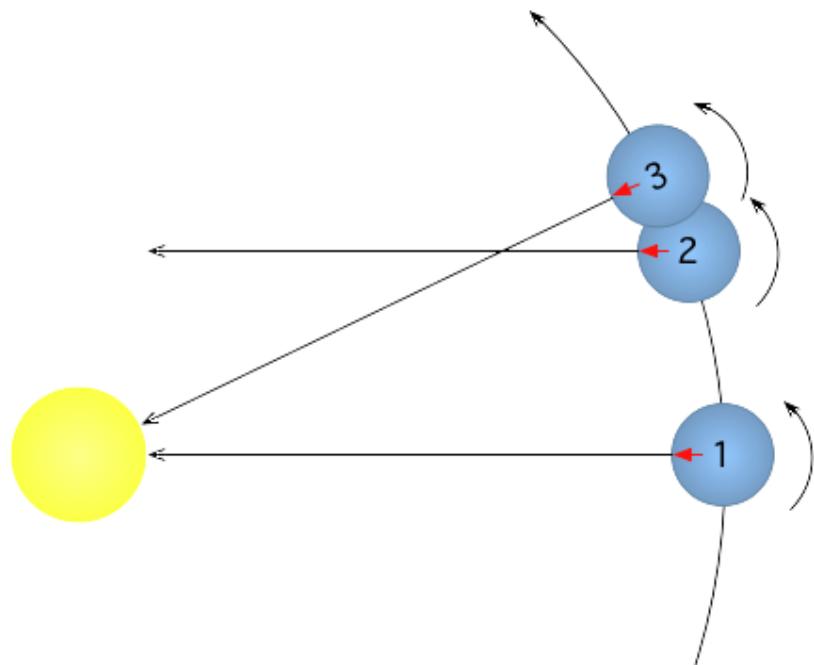
- A cause de la non-sphéricité de la Terre due à sa rotation propre, le Soleil et la Lune exercent un couple sur la Terre. Ce couple est responsable de la précession de l'axe de rotation de la Terre autour de l'axe perpendiculaire à l'écliptique et passant par la Terre.
- Cet effet est observé par Hipparque au II^{ème} siècle avant J.C. et estimé à au moins 1° par siècle soit 36"/an. Au XIII^{ème} siècle, on l'estime à 51"/an.
- Ce phénomène de période d'environ 26 000 ans (soit une fréquence actuelle de 50.290966"/an) est appelé précession des équinoxes et se déroule dans le sens rétrograde.

Nutation



- Le Soleil et la Lune sont aussi responsables d'une variation périodique de l'obliquité de la Terre découverte en 1748 par Bradley de période environ 18,6 ans et d'amplitude environ 8 ".
- A cause des perturbations planétaires, il existe aussi des variations séculaires de l'obliquité, qui varie entre 22.1° et 24.5° avec une période d'environ 41000 ans.

Différence jour sidéral-jour solaire



La rotation et la révolution de la Terre s'effectuent dans le même sens. Un méridien terrestre se retrouve dans la même direction absolue avant de se retrouver dans la direction du Soleil.

Méridien terrestre d'un lieu :
demi-grand cercle de la sphère céleste contenant les pôles terrestres et dont le demi-plan passe par le lieu considéré.

Position 1 -> position 2 : jour sidéral 23H 56min

Position 1 -> position 3 : jour solaire 24H

Quelques définitions

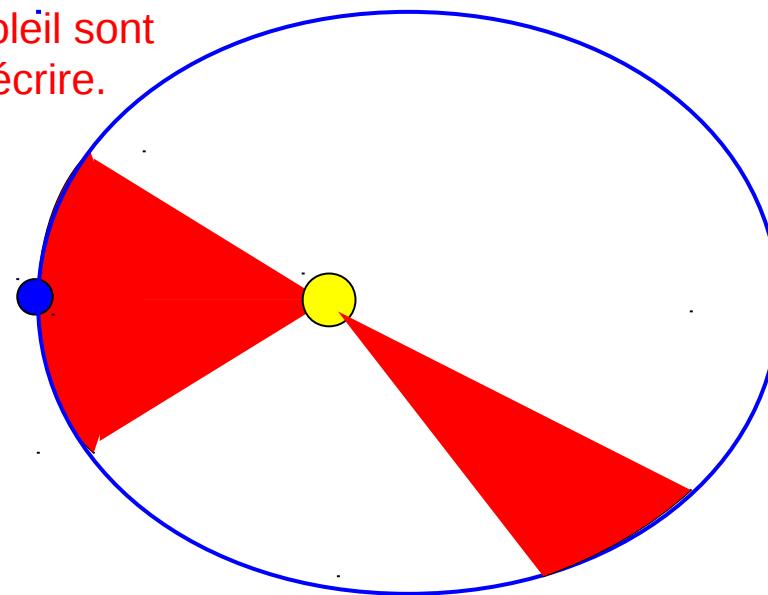
- **jour sidéral** : correspond à la durée séparant deux passages consécutifs du point vernal au méridien soit **23h 56min 4s**.
- **jour solaire** : durée séparant deux passage consécutifs du Soleil au méridien soit **24h** en moyenne.
- **Année sidérale** : Si on prend une direction fixe dans l'espace, la Terre mettra **365 jours 6 h 9 m 10 s** pour revenir dans cette même direction.
- **Année tropique** : Si on considère la direction du point vernal de la date (équinoxe de printemps), la Terre mettra **365 jours 5h 48m 45s** pour revenir dans la direction de ce point. C'est une durée différente de l'année sidérale puisque le point vernal a bougé pendant que la Terre tournait.
- Année anomalistique : Si on considère le point de l'orbite de la Terre le plus près du Soleil (le périhélie, actuellement le 4 janvier) puisque l'orbite de la Terre est une ellipse, la Terre mettra 365 jours 6h 13m 53s pour y revenir. Elle diffère de l'année sidérale à cause de la précession du périhélie.
- Année draconitique : Si on considère la direction du nœud de l'orbite lunaire, la Terre mettra 346 jours 14h 24m pour y revenir. Le plan d'orbite de la Lune a en effet un mouvement de précession de 18,6 ans.

Équation du temps

Durée du jour solaire

Deuxième loi de Kepler :

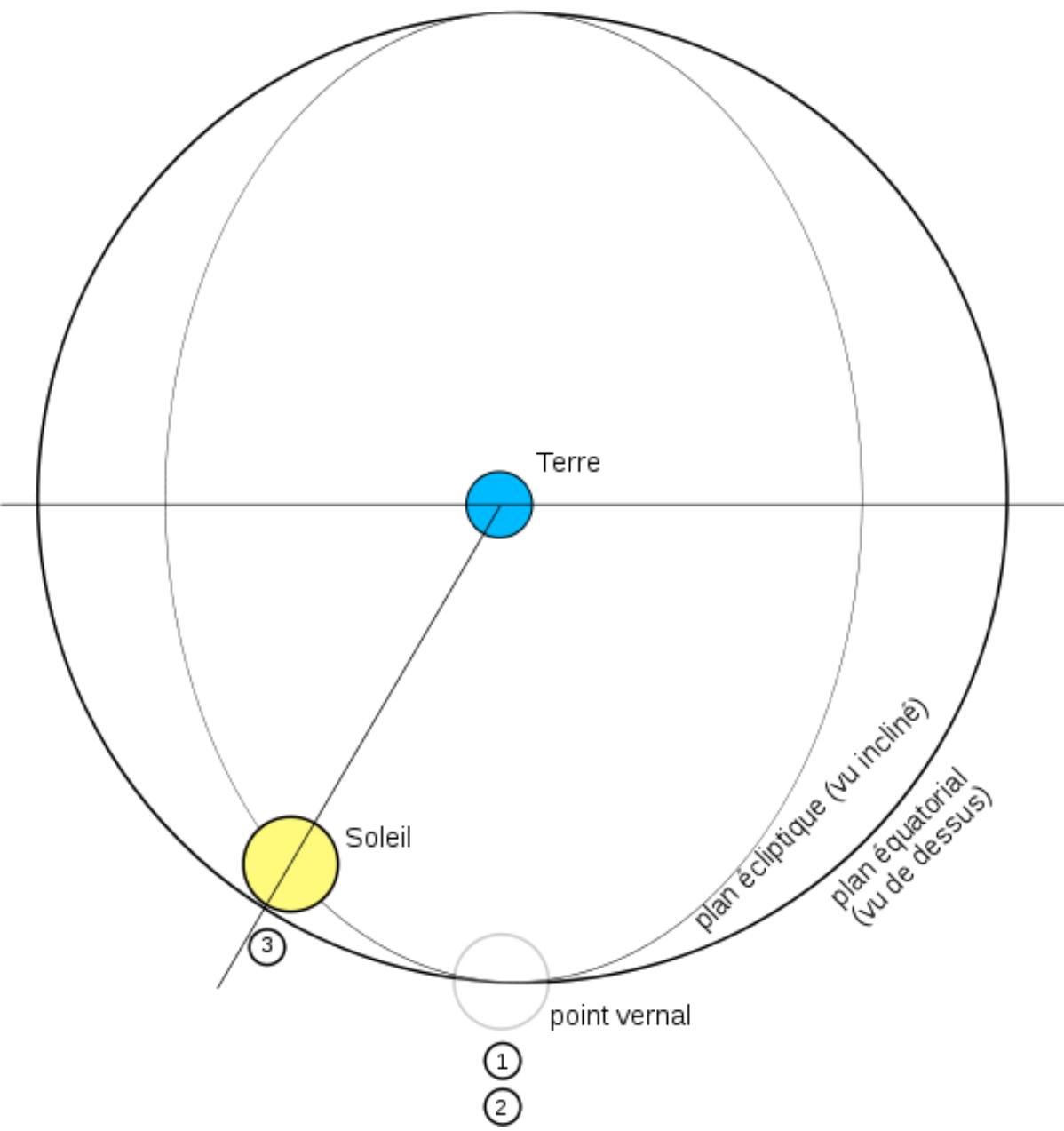
les aires décrites par le rayon vecteur planète-Soleil sont proportionnelles aux temps employés pour les décrire.



La vitesse de la Terre par rapport au Soleil est la même que la vitesse du Soleil par rapport à la Terre. La Terre se déplaçant plus vite au périhélie qu'à l'aphélie, il en sera de même du Soleil par rapport à la Terre. Le périhélie tombe actuellement autour du 4 janvier.
Cet effet a une période de 1 an.

L'équation du temps

réduction à l'équateur due à l'obliquité de l'écliptique



Sur le schéma :

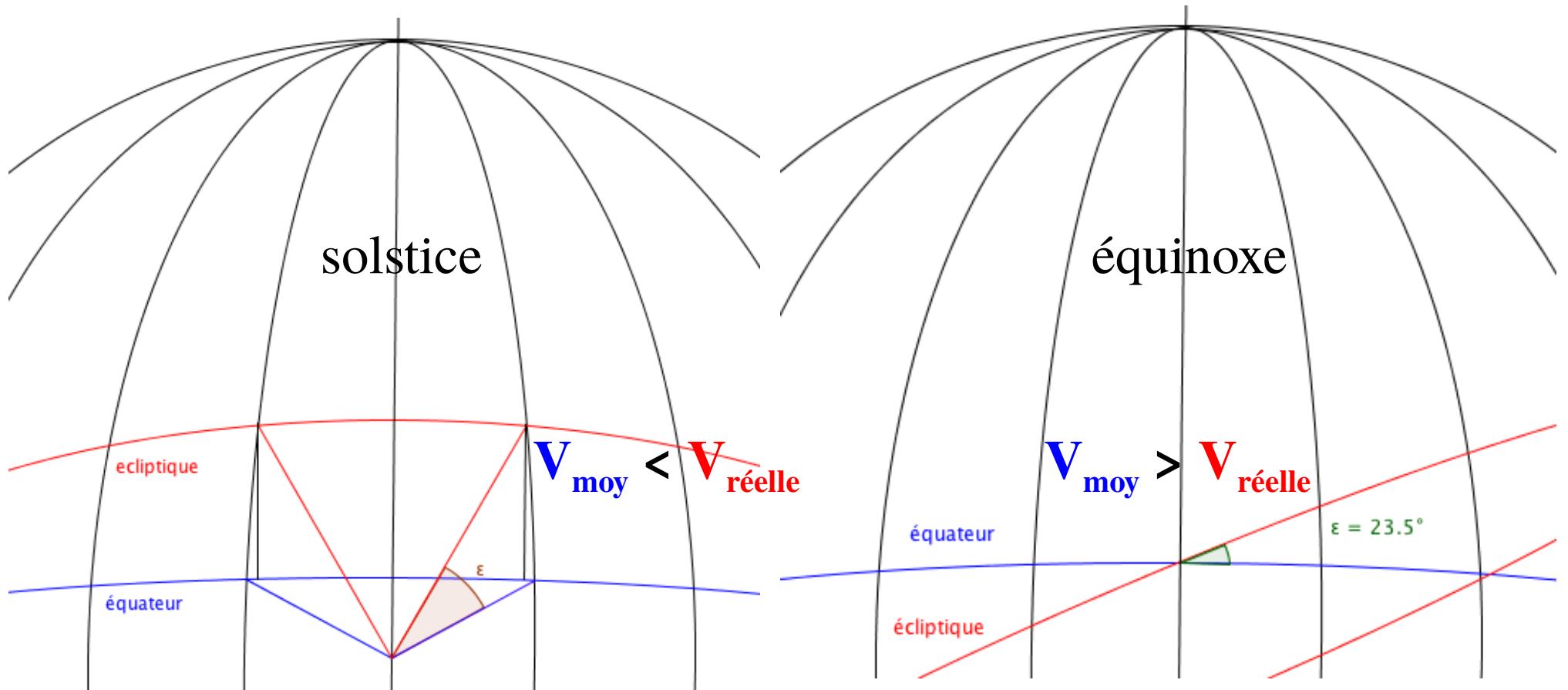
- 1) Midi solaire à un jour j.
- 2) La terre a fait un tour sur elle-même mais le Soleil a avancé.
- 3) La Terre rattrape son retard par rapport au Soleil et le midi vrai du jour j+1 arrive.

Comme le Soleil se déplace uniformément sur l'écliptique, la Terre met moins de temps à rattraper le Soleil à l'équinoxe qu'au solstice.

Par symétrie on voit que la période de cet effet est de six mois.

L'équation du temps

réduction à l'équateur due à l'obliquité de l'écliptique



Le Soleil réel se déplace sur le plan de l'écliptique. Le Soleil moyen se déplace sur l'équateur à vitesse constante.

Par effet de projection, le Soleil réel va plus vite que le Soleil moyen autour du solstice et va moins vite près de la ligne des équinoxes.

Cet effet a une période de 6 mois.

Équation du temps

Définitions

- **Le temps solaire moyen** est un temps rapporté au Soleil moyen, objet qui tournerait dans le ciel en 24h exactement.
- **Le temps solaire vrai** est un temps basé sur le Soleil vrai, l'heure que donnerait un cadran solaire.
- **L'équation du temps** désigne la différence entre le temps solaire moyen et le temps solaire vrai. À midi vrai, l'équation du temps désigne l'écart entre le midi vrai et le midi moyen. Ainsi, l'équation du temps a une valeur positive lorsque le Soleil vrai est en retard sur le Soleil moyen, c'est-à-dire lorsque le Soleil est plus à l'Est lorsqu'il est midi moyen.

Par exemple, lorsque l'équation du temps vaut + 8 minutes, cela signifie qu'il est 12 h 08 au temps solaire moyen lorsque le cadran solaire indique midi vrai.

- Autre définition (équivalente) : l'équation du temps est la différence entre l'ascension droite du Soleil moyen et du Soleil vrai.
- Remarque : le nom « équation » n'est qu'historique, car à proprement parler l'équation du temps n'est pas une équation avec des variables inconnues, mais c'est une grandeur physique mesurable et calculable à chaque instant.

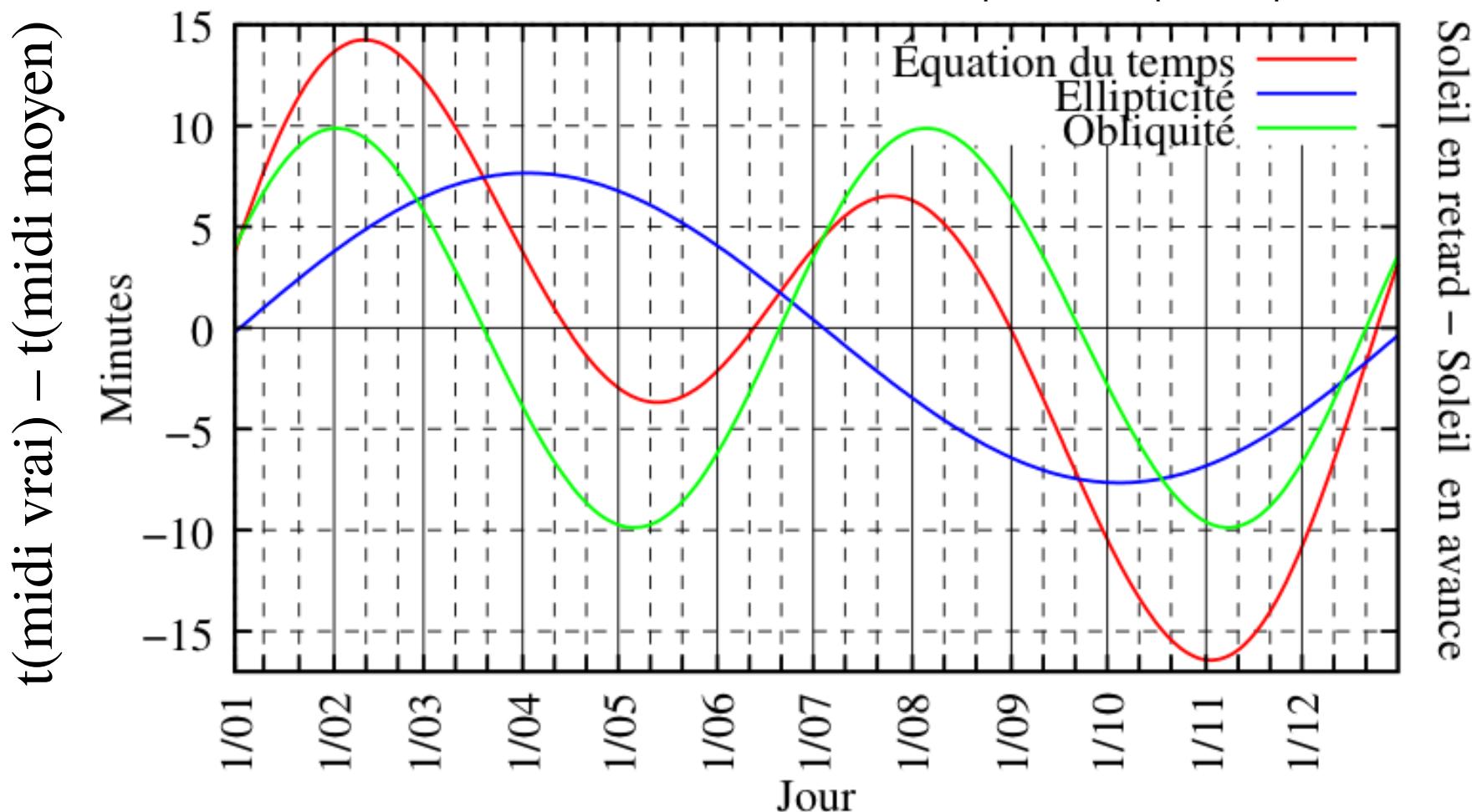
L'équation du temps

Résultat

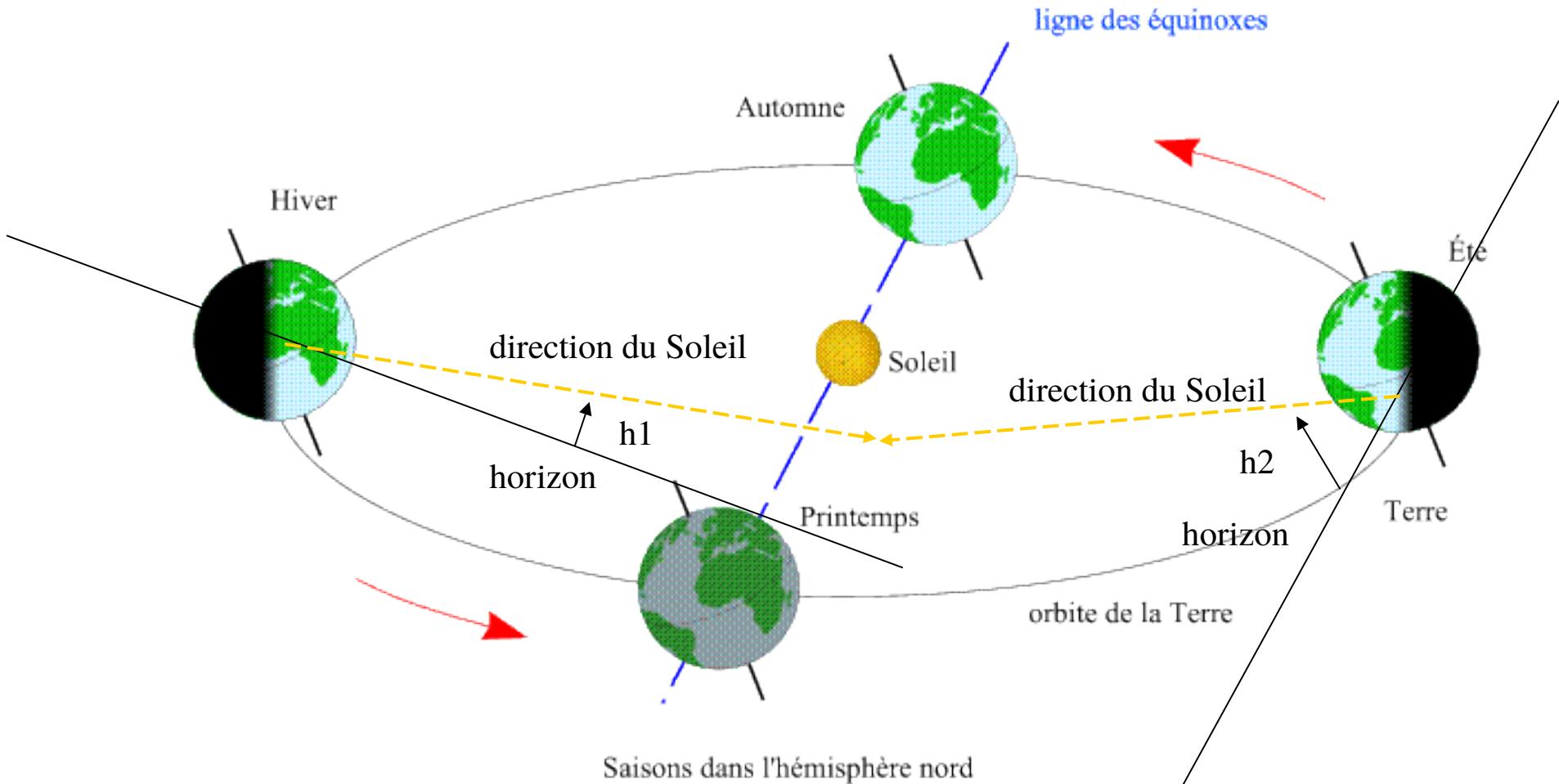
La combinaison de l'équation du centre et de la réduction à l'équateur donne les écarts suivants (en première approximation) entre le temps solaire vrai et le temps solaire moyen :

$$\Delta T(d) = 7.678 \sin(B + 1.374) - 9.87 \sin(2B) \quad \text{où} \quad B = \frac{2\pi(d - 81)}{365}$$

Avec $d = 1$ le 1^{er} janvier et 81 à l'équinoxe du printemps.

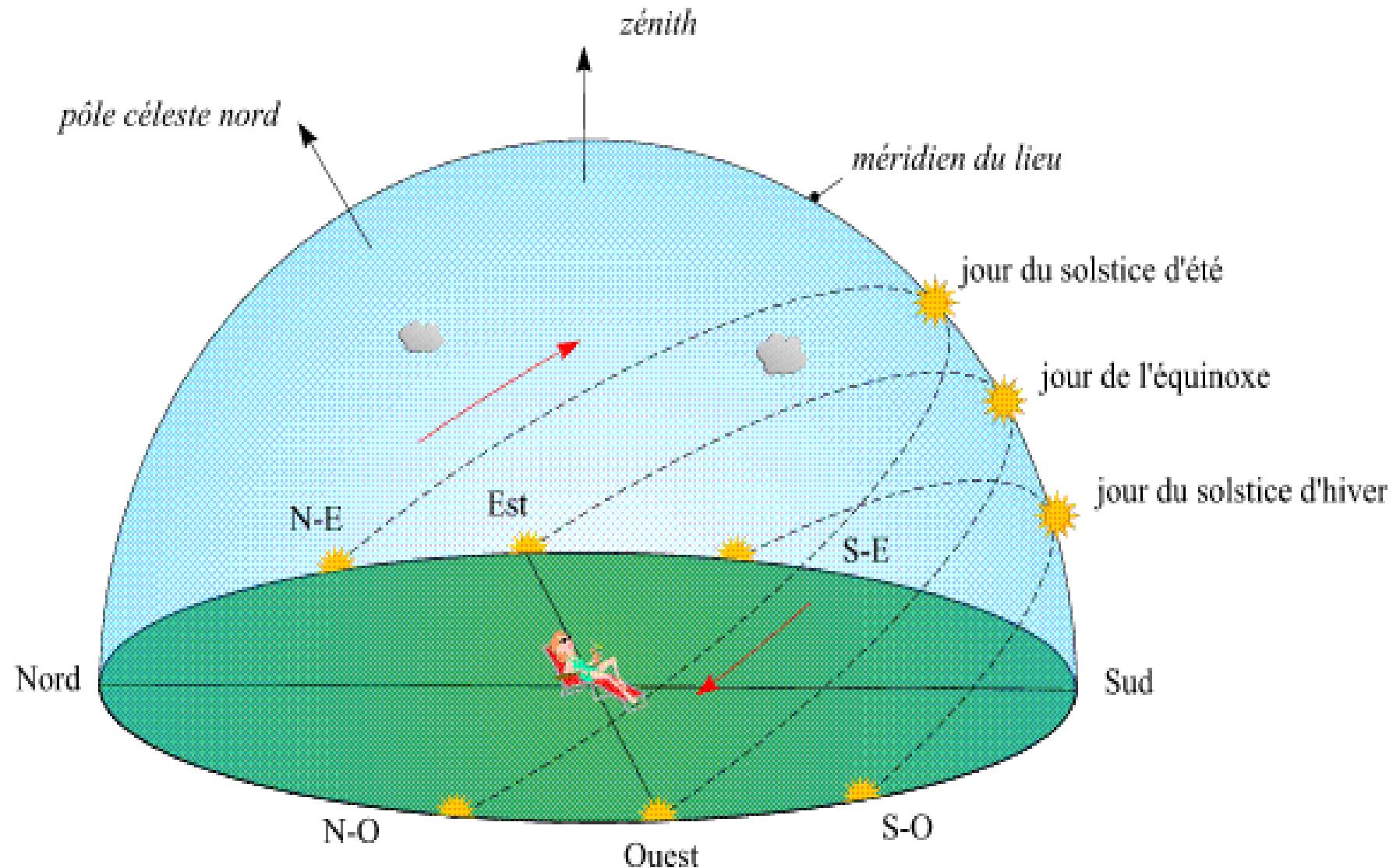


3) Les saisons

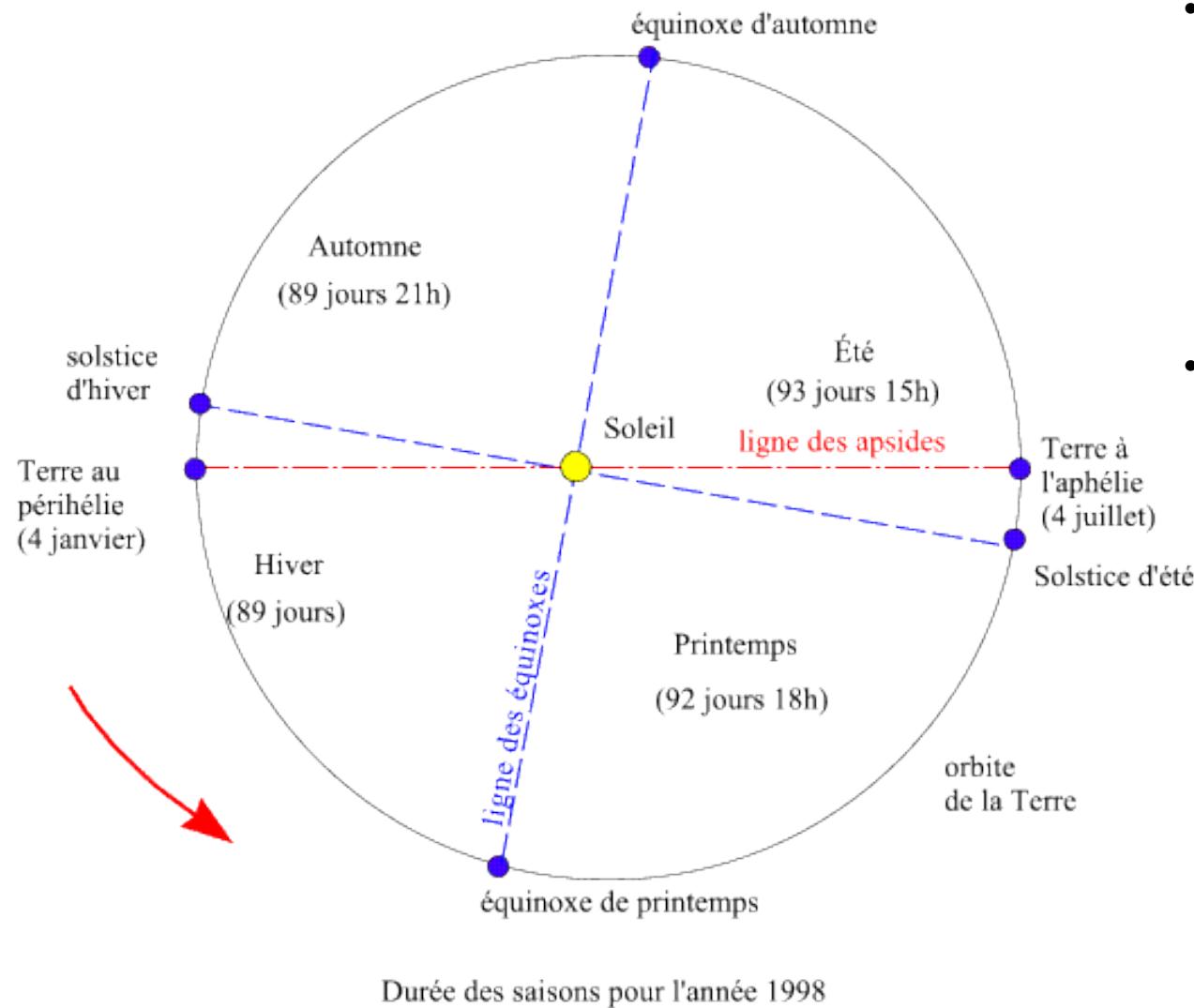


- L'axe de la rotation de la Terre a une période de précession de 26000 ans et varie ainsi très peu sur une année.
- L'obliquité non nulle de la Terre est responsable du phénomènes des saisons.
- En effet, la hauteur du Soleil en hiver (h_1) est alors plus petite que celle en été (h_2).
- Dans l'hémisphère Sud, les saisons sont inverses de celles de l'hémisphère Nord.

- Dans l'hémisphère nord, le mouvement apparent du Soleil au cours de l'année est le suivant :



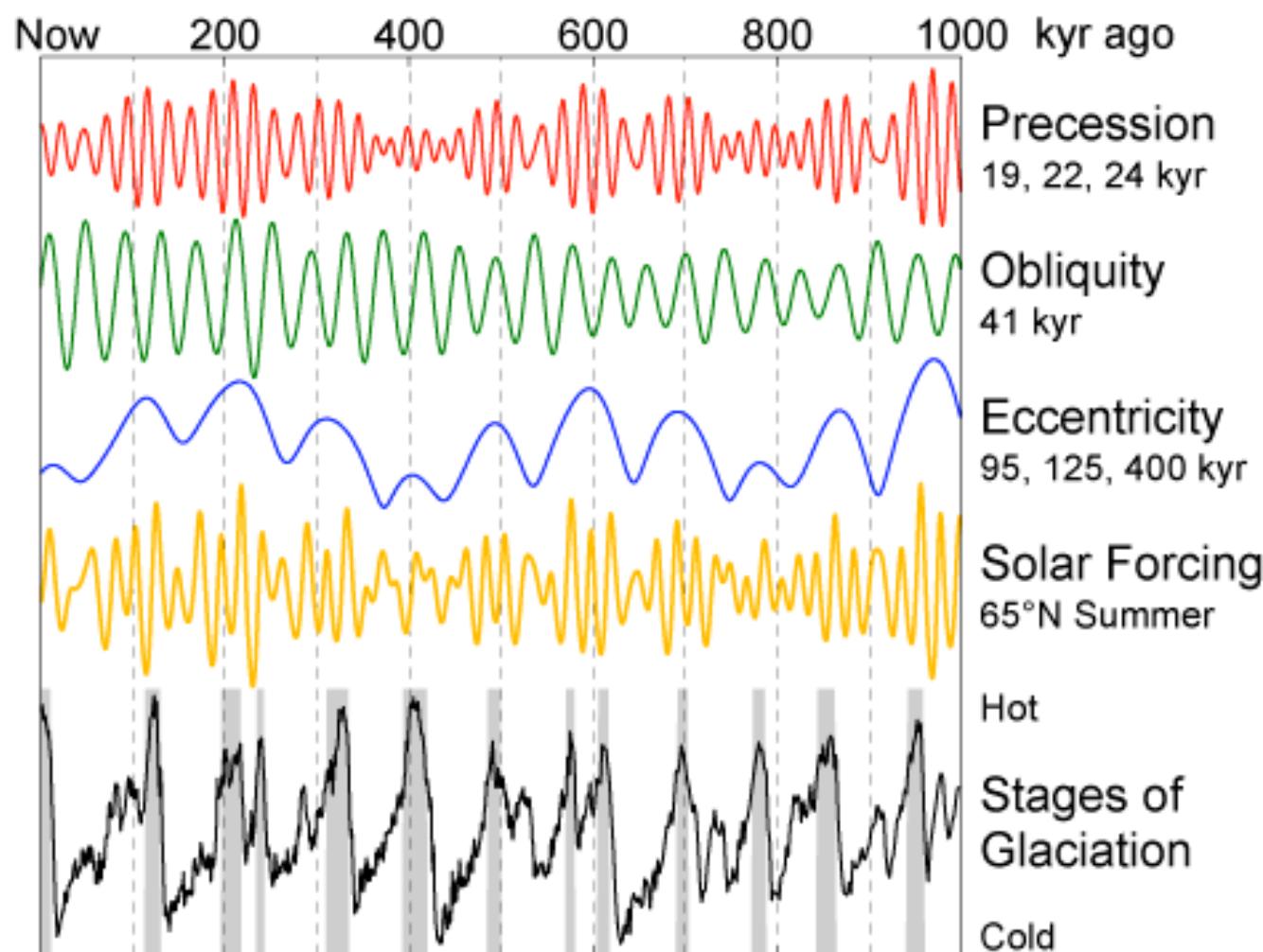
Durée des saisons



- À cause du caractère elliptique de l'orbite de la Terre, la durée des différentes saisons n'est pas identique. En vertu de la deuxième loi de Kepler, la Terre se déplace en effet plus vite au périhélie. En ce moment, l'été est plus long que l'hiver.
- À cause de la précession du périhélie, la durée des saisons au cours du temps varie. En effet, le périhélie tourne dans le sens direct avec une période d'environ 110 000 ans. Mais la précession des équinoxes s'effectue dans le sens contraire (sens rétrograde) avec une période de 26 000 ans. La combinaison de ces deux phénomènes, appelée précession climatique permet de calculer la période de passage du périhélie à l'équinoxe de printemps, qui est d'environ 21 000 ans. Tous les 10 500 ans, le périhélie passe de l'été à l'hiver.

- Bien que la distance Terre-Soleil n'est pas le facteur prédominant dans la nature des saisons (quelques degrés), la combinaison des deux phénomènes joue un rôle dans l'histoire climatique de la Terre. En effet, le passage de la Terre au périhélie en hiver donne des hivers plus doux alors que le passage à l'aphélie en hiver donne des hivers plus rudes.

Paléoclimatologie et mécanique céleste



Variation des paramètres orbitaux de la Terre sur 1 million d'année.

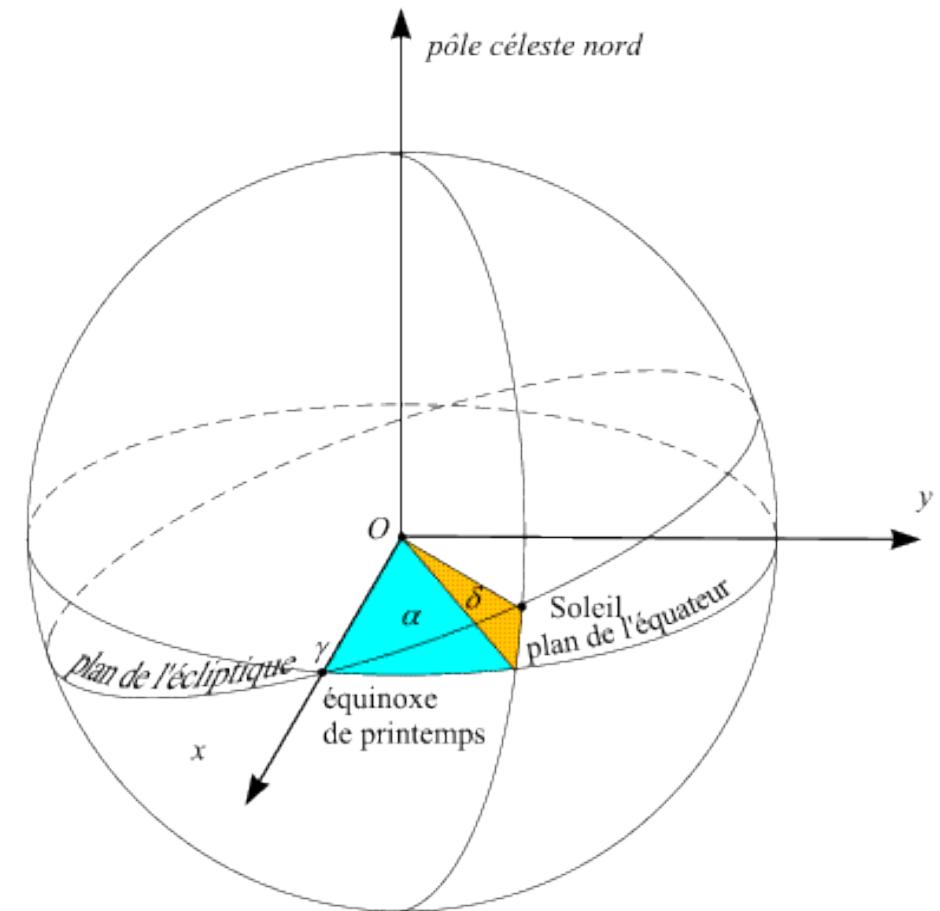
cycles de Milankovitch (1941)

III Repérer les phénomènes célestes

1) Systèmes de coordonnées

repère équatorial :

- A cause de la précession et de la nutation l'écliptique varie au cours du temps. Pour repérer les phénomènes célestes, on utilise une écliptique fixe. On utilise actuellement l'écliptique de l'époque J2000, définie par la position de l'écliptique au 1^{er} janvier 2000 à 12h.
- Pour repérer la position d'un astre sur la sphère céleste dans un repère équatorial, on a besoin de deux angles :
 - **l'ascension droite** : angle entre le projeté de l'astre sur l'équateur céleste et le point vernal.
 - **la déclinaison** d'un astre : angle entre la direction de l'astre et son projeté sur l'équateur céleste.

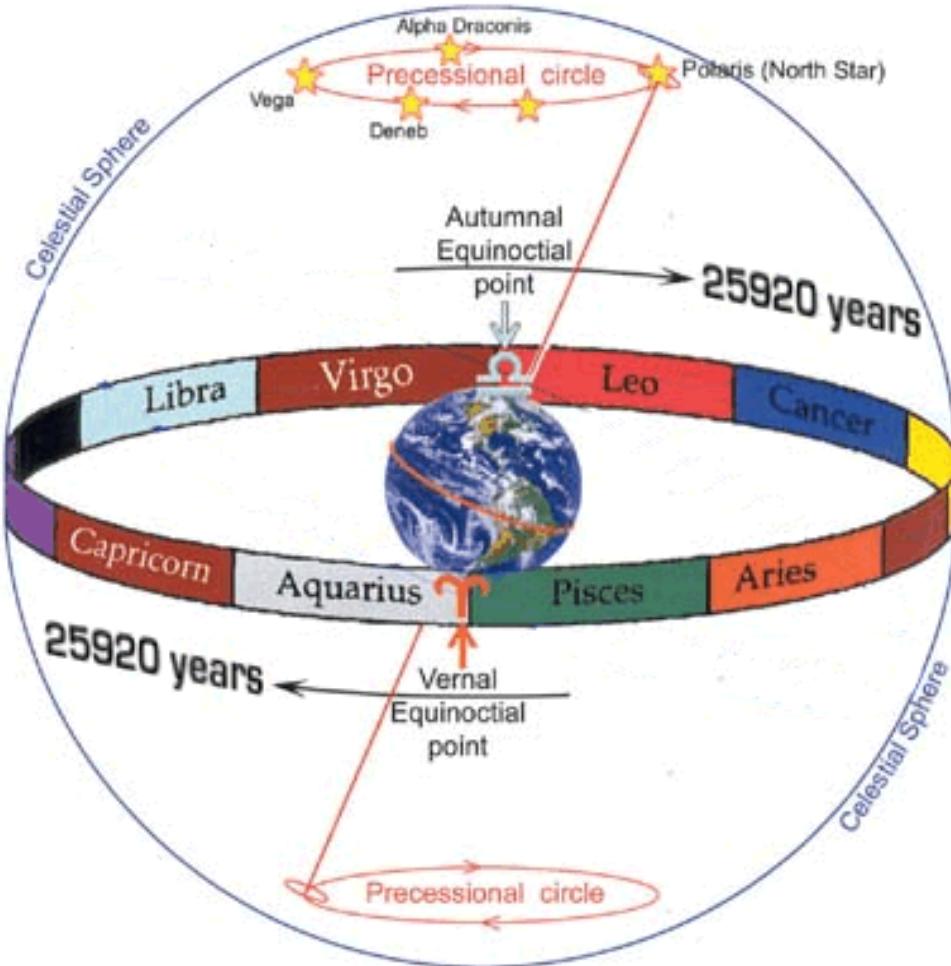


Repère géocentrique équatorial.

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

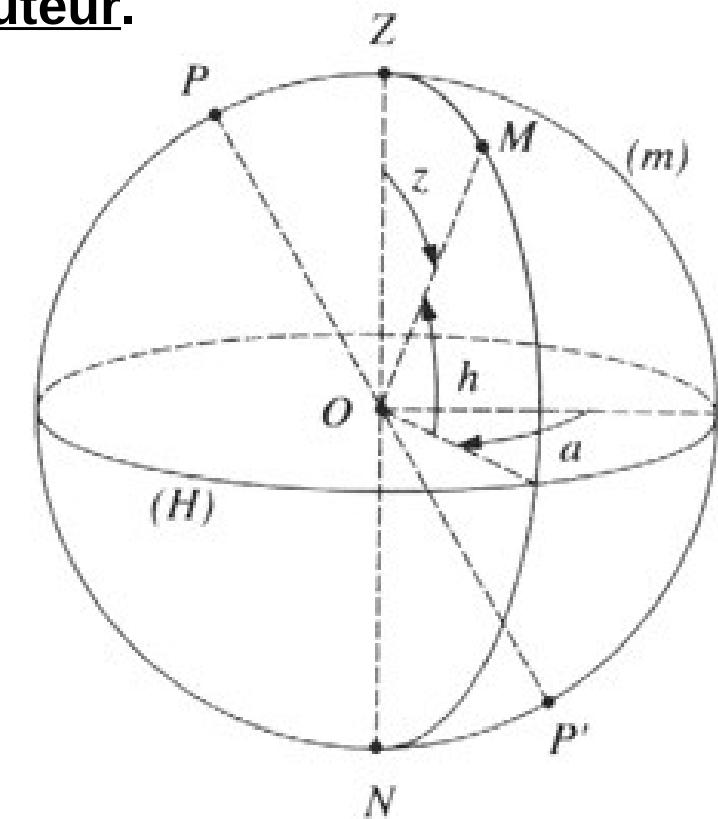
α : ascension droite de l'astre, δ : déclinaison de l'astre

- L'étoile polaire est proche de l'axe des pôles ($0,45^\circ$) et sa position varie peu dans le ciel lors de la journée.
- Cependant à cause de la précession des équinoxes, l'étoile située près de l'axe des pôles varie.



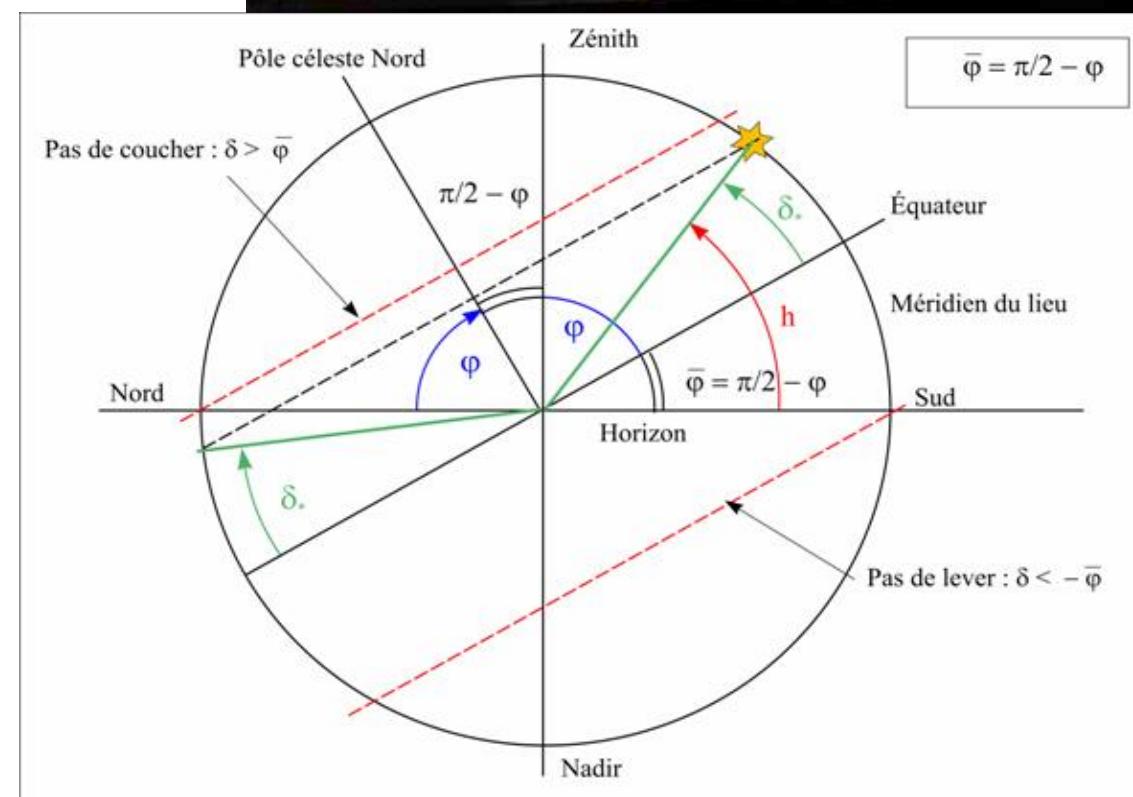
repère azimutal :

- On regarde le ciel depuis la surface de la Terre : comment définir un repère simple sur la sphère céleste, qui permet de repérer les objets qu'on observe ?
- On utilise comme équateur de référence le plan horizontal qui nous entoure appelé horizon et comme pôle la direction verticale qui passe au dessus de notre tête au zénith. Le méridien d'origine est pris dans la direction du sud où culmine les astres au cours de la journée.
- **La longitude d'un astre par rapport à ce méridien est l'azimut.**
- **La latitude par rapport à l'horizon est la hauteur.**



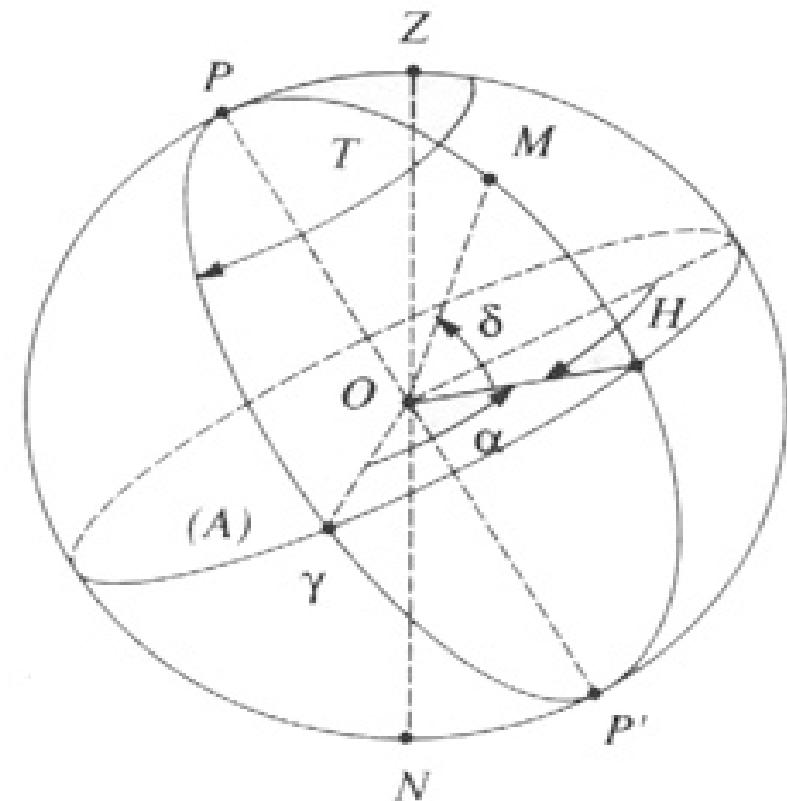
2) Mouvement diurne

- A cause de la rotation propre de la Terre, les astres décrivent dans le ciel des cercles autour du pôle nord céleste et leur position dans le ciel varie au cours de la journée : c'est le mouvement diurne.
- Les étoiles observables tout le long de la journée et qui ne se couchent jamais sont appelées circumpolaires.
- Ces étoiles dépendent de la latitude du lieu. Pour un lieu de latitude λ , les étoiles circumpolaires doivent avoir une déclinaison δ vérifiant $\delta > \pi/2 - \lambda$.

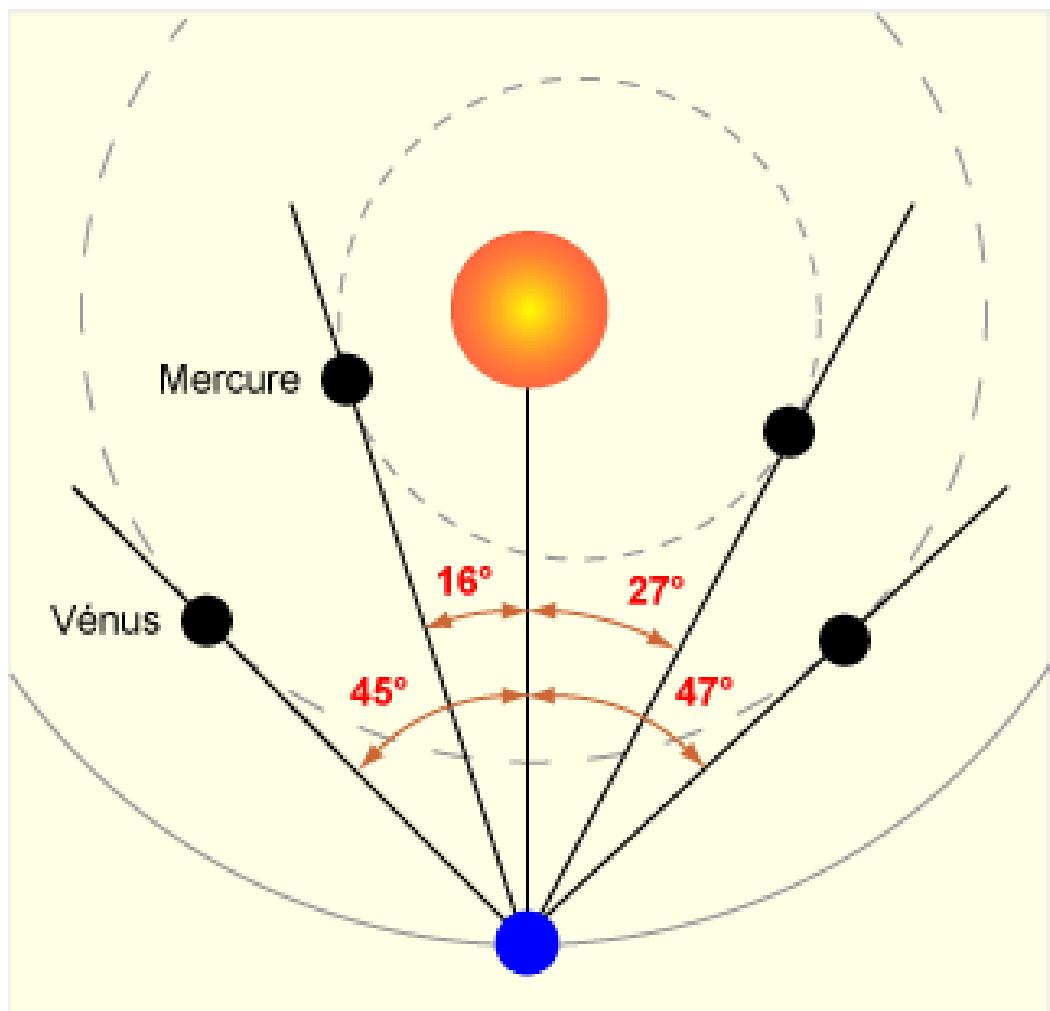


Comment trouver la position d'une étoile à une heure donnée ?

- L'angle horaire H d'une étoile est l'angle entre le méridien du lieu et le méridien passant par l'étoile.
- Le temps sidéral T est l'angle horaire de l'équinoxe (point vernal γ).
- Pour remonter à l'angle horaire H d'une étoile et donc à sa position dans le ciel, il suffit de connaître son ascension droite α et le temps sidéral T :
$$H = T - \alpha$$
- La déclinaison ne varie pas avec le mouvement diurne.



3) Mouvement apparent des planètes

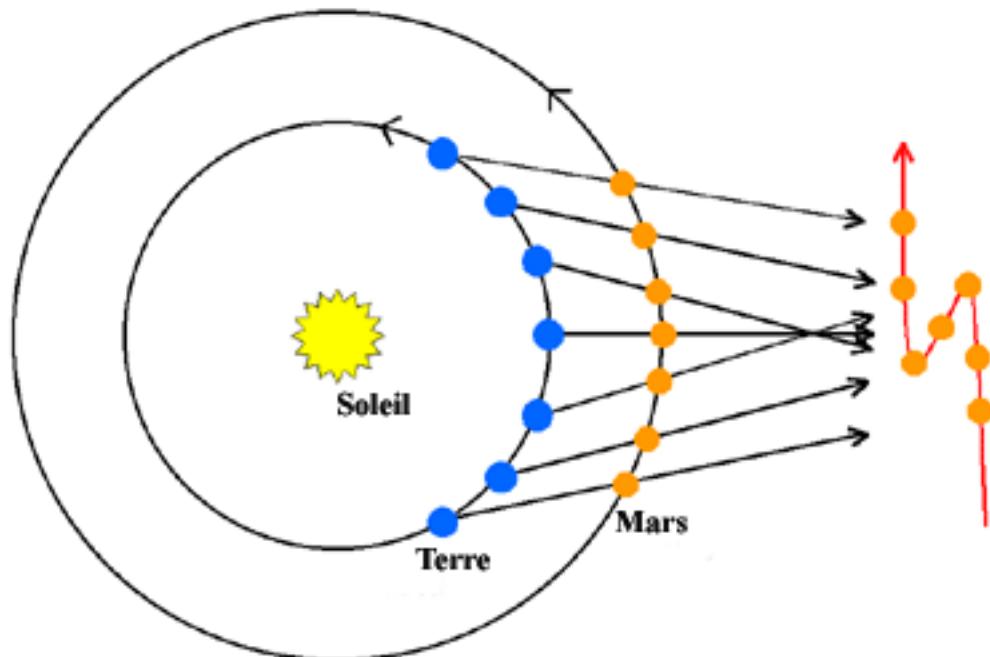


- Mouvement apparent des planètes intérieures : élongations maximales

L'angle entre Vénus (Mercure) et le Soleil ne peut dépasser une certaine valeur.

On ne les observera donc qu'autour des levers et couchers du Soleil.

Mouvement apparent des planètes extérieures : rétrogradation

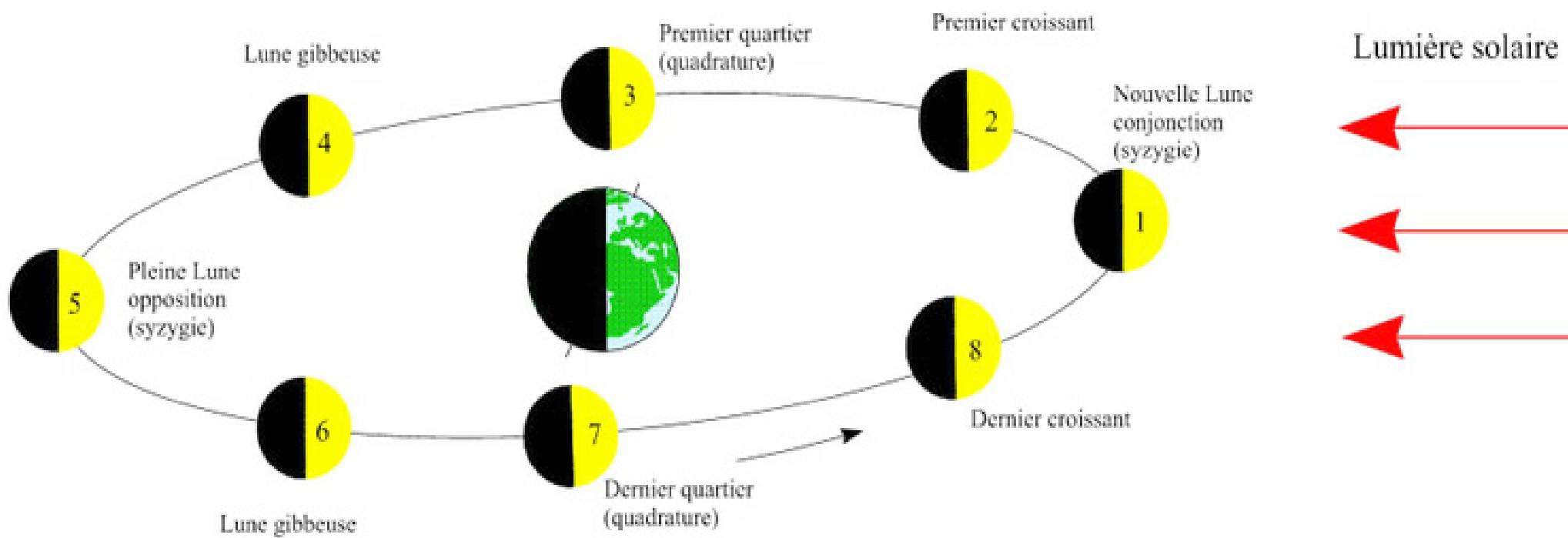


IV Le système Terre-Lune

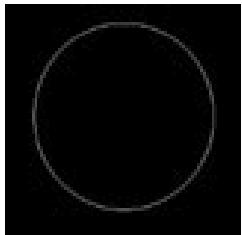
1) Caractéristiques de la Lune

- demi-grand axe en km 383 398 km
- excentricité de l'orbite 0,05555
- inclinaison de l'orbite sur l'écliptique $5^{\circ},1567$
- inclinaison de l'équateur sur l'écliptique $1^{\circ},5$
- période de révolution sidérale 27,3217 jours
- période de rotation 27,321662 jours
- période de précession du nœud 18,6 ans
- A cause de la forte attraction gravitationnelle de la Terre, la Lune est en résonance spin-orbite 1:1. Sa période de révolution étant identique à sa période de rotation, elle présente ainsi toujours la même face à la Terre.
- Cependant à cause du caractère elliptique de l'orbite de la Lune, il existe de petites oscillations autour de sa face visible : c'est la libration.
- L'attraction gravitationnelle de la Lune sur la Terre permet de stabiliser l'obliquité de la Terre, qui en l'absence de la Lune connaîtrait des variations séculaires importantes d'obliquité.

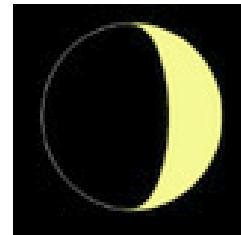
Les phases de la Lune



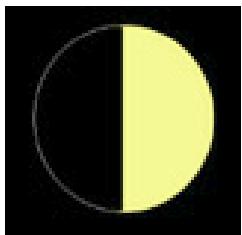
Les phases de la Lune dans l'hémisphère nord



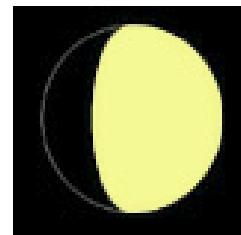
Nouvelle Lune
visible le jour



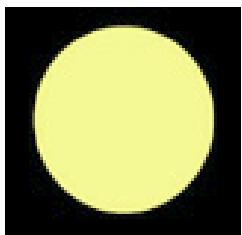
Croissant montant
visible le soir vers l'ouest



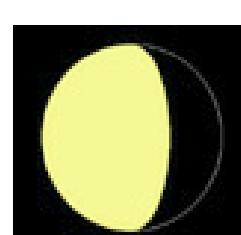
Premier quartier
visible le soir



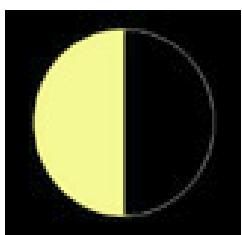
Lune gibbeuse montante
invisible le matin



Pleine Lune
visible toute la nuit



Lune gibbeuse descendante
invisible le soir



Dernier quartier
visible le matin



Croissant descendant
visible le matin vers l'est

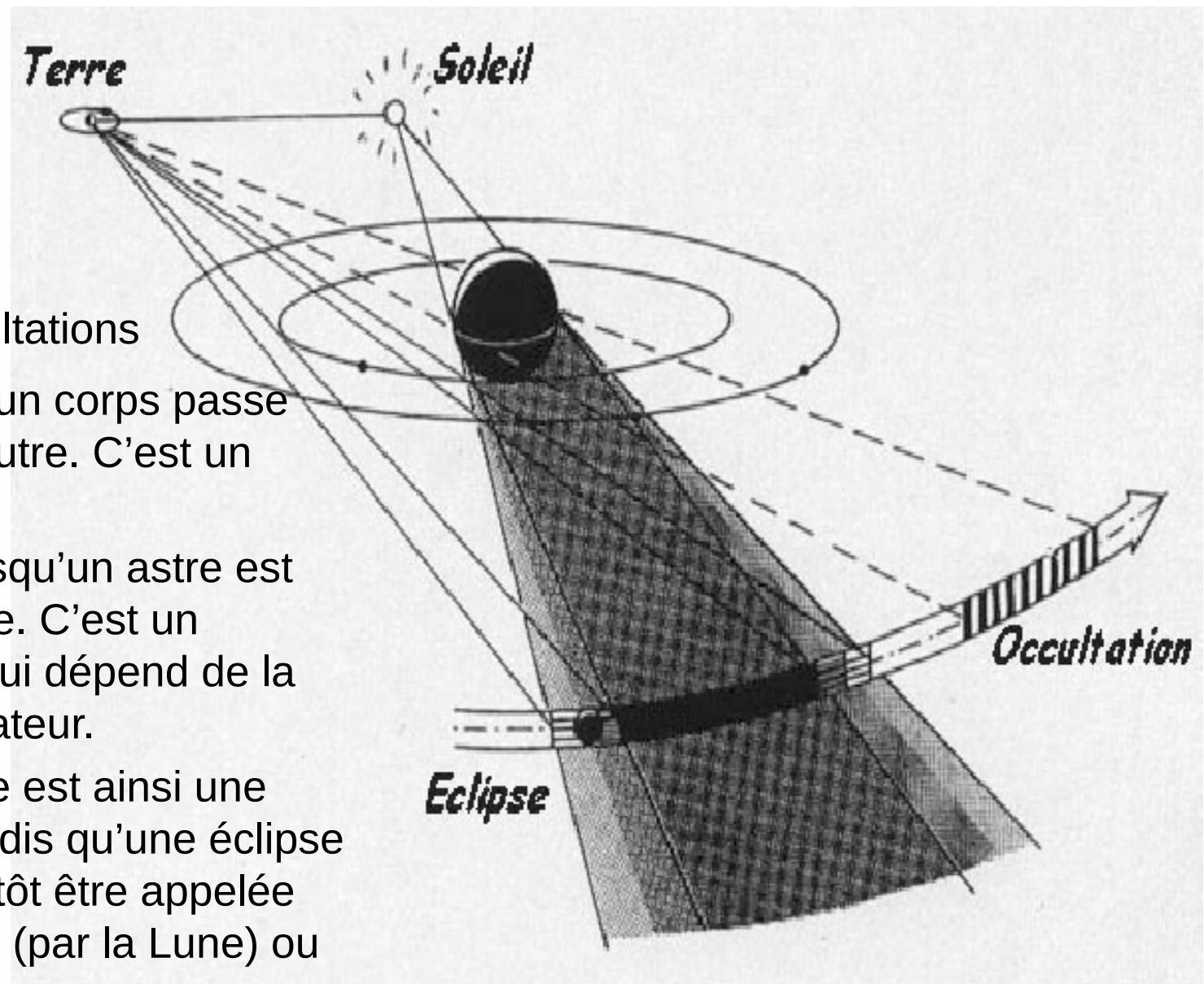
2) Les éclipses

- Éclipses et occultations

Il y a éclipse lorsqu'un corps passe dans l'ombre d'un autre. C'est un phénomène absolu.

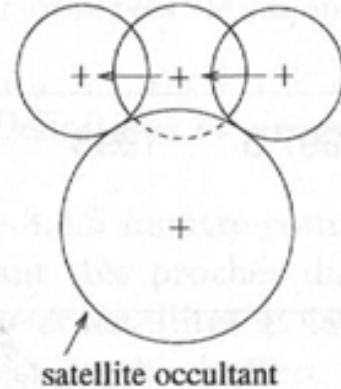
Il y a occultation lorsqu'un astre est masqué par un autre. C'est un phénomène relatif qui dépend de la position de l'observateur.

Une éclipse de Lune est ainsi une véritable éclipse tandis qu'une éclipse de Soleil devrait plutôt être appelée occultation de Soleil (par la Lune) ou éclipse de Terre.

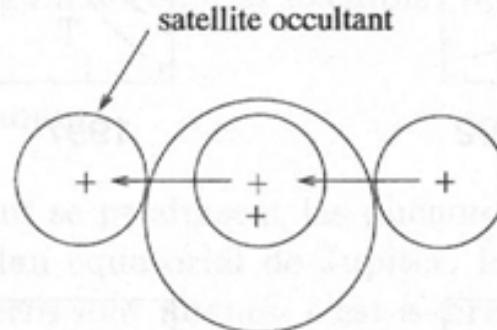


Éclipses et occultations

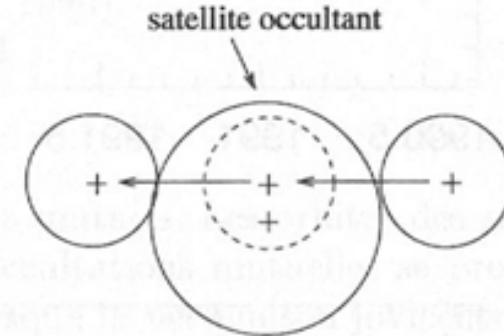
un peu de vocabulaire



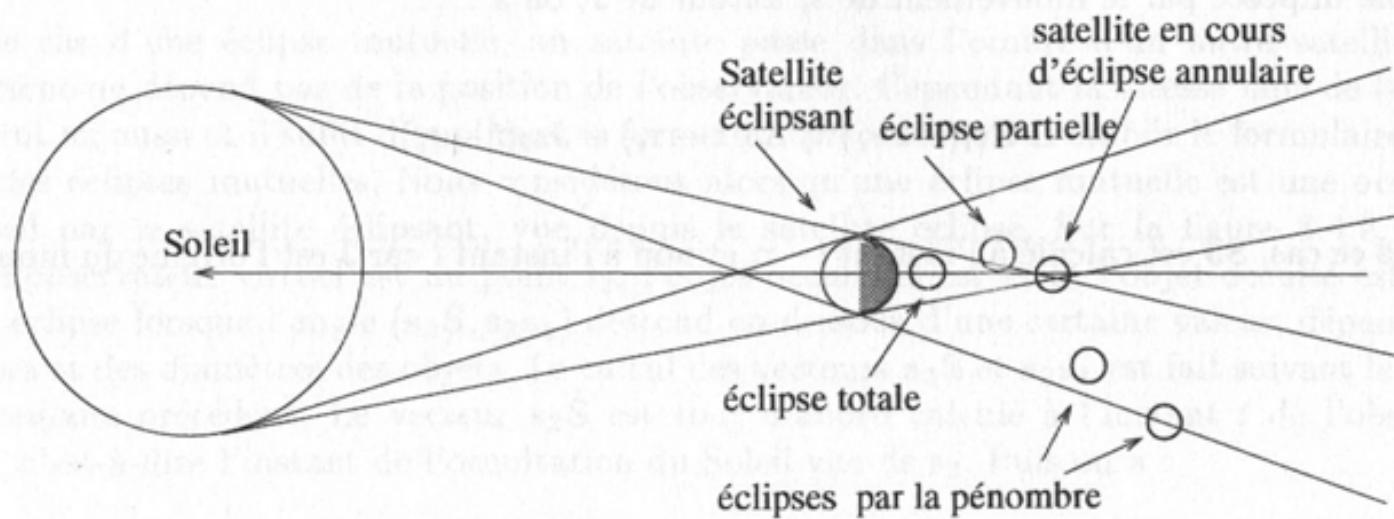
Occultation partielle



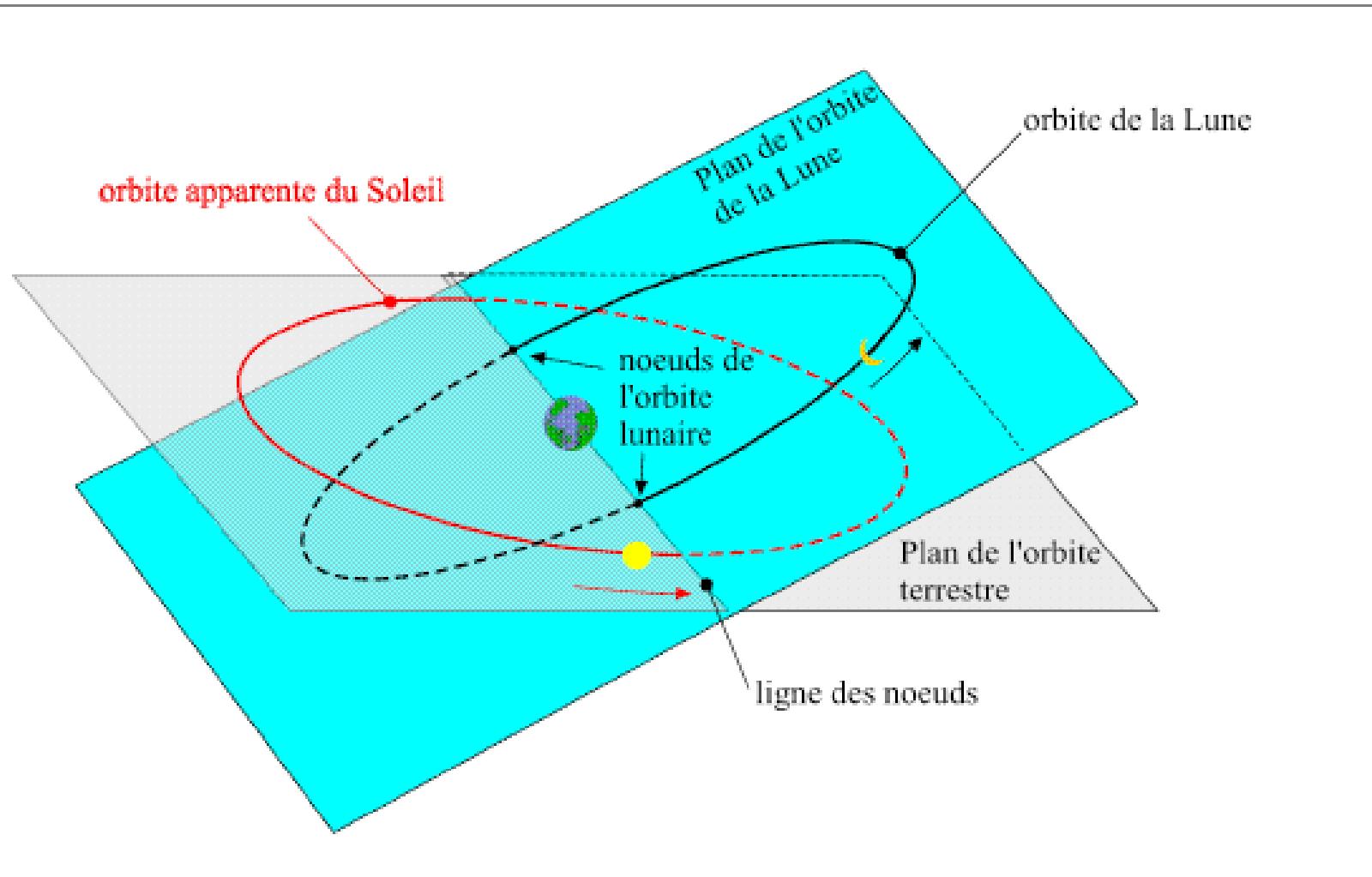
Occultation annulaire



Occultation totale



Éclipses de Lune et de Soleil



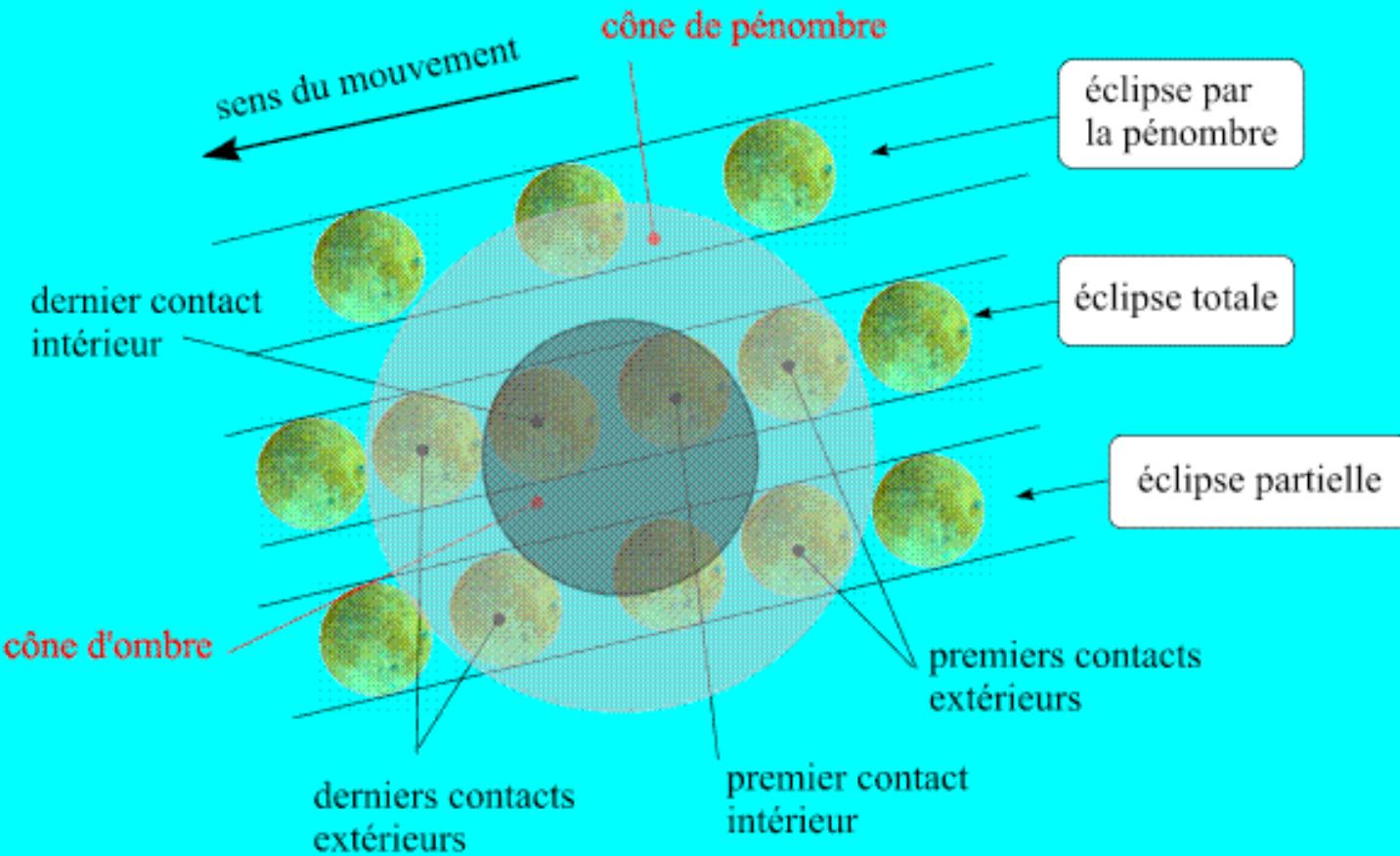
Il y a éclipse de Lune lorsque la Lune passe dans le cône d'ombre ou dans le cône de pénombre de la Terre.

Il y a éclipse de Soleil lorsque la Terre passe dans le cône d'ombre ou dans le cône de pénombre de la Lune.

Dans les deux cas, le Soleil, la Terre et la Lune sont alors presque alignés.

Pour qu'il y ait une éclipse, il faut que la Lune soit près de la ligne des nœuds au moment de la pleine Lune (éclipse de Soleil) ou de la nouvelle Lune (éclipse de Lune).

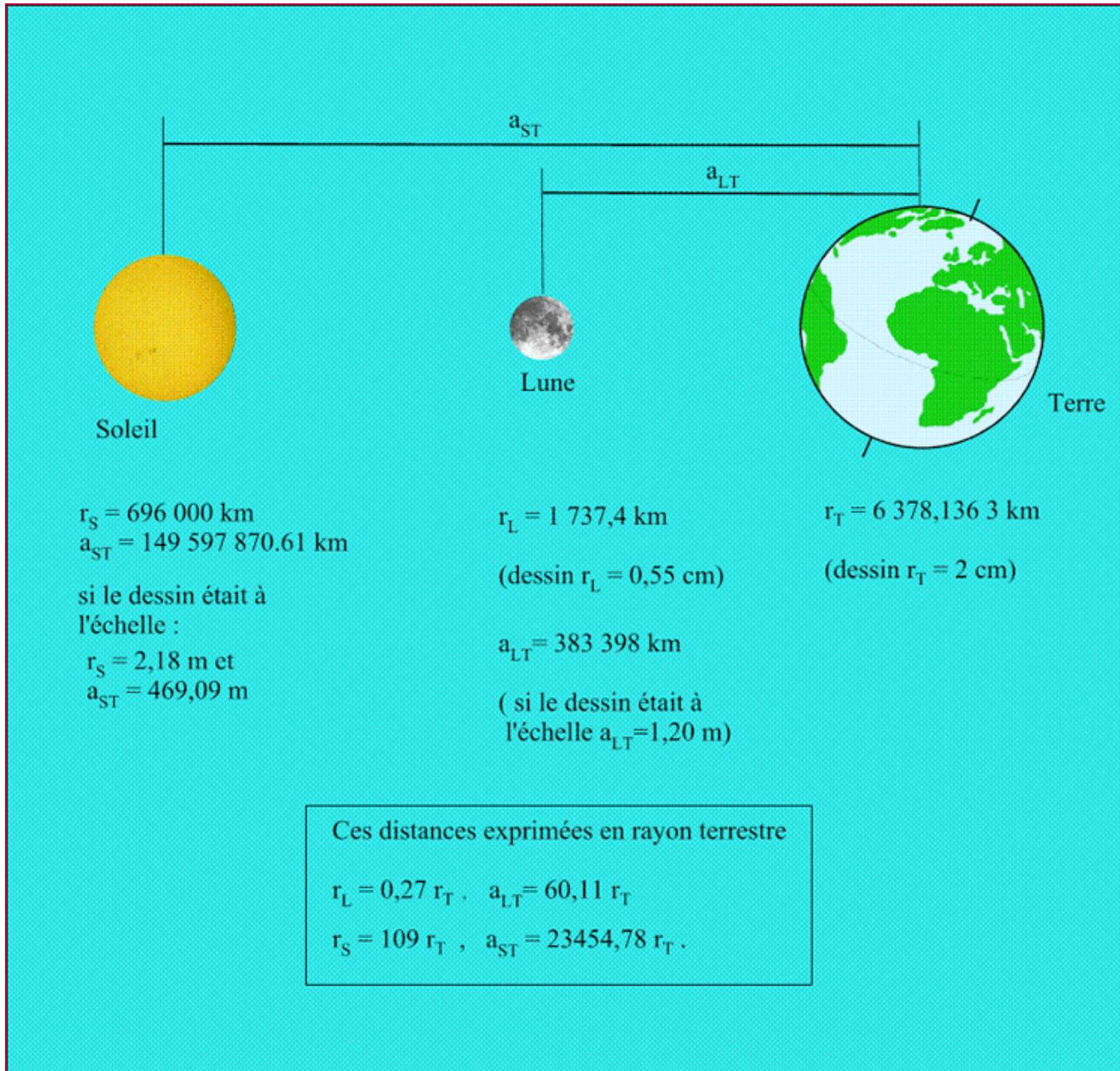
Les différents types d'éclipses de Lune



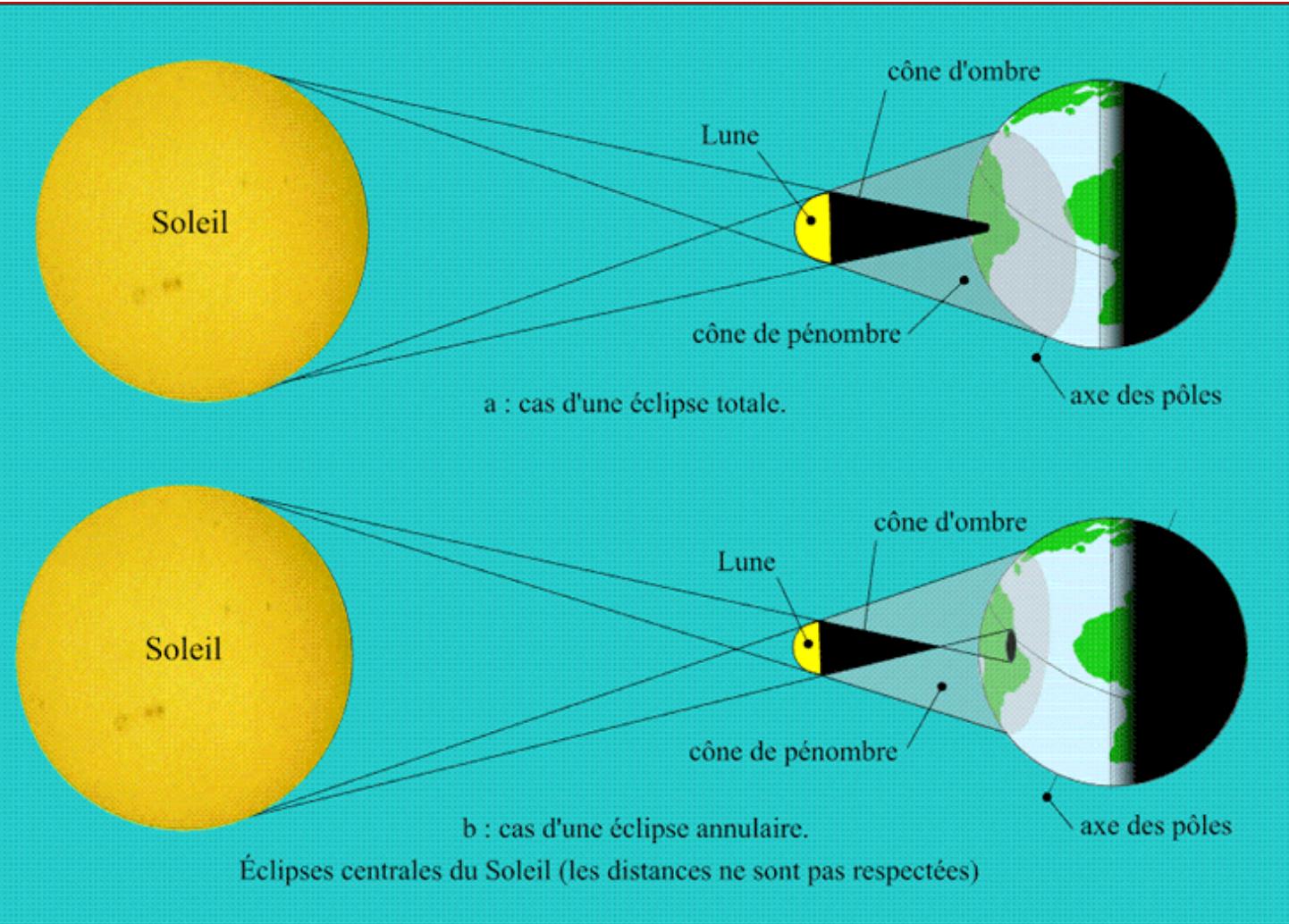
Les différents types d'éclipses de Lune

Une éclipse étant un phénomène absolu, elle est visible de tous les points de la Terre où la Lune est visible, c'est-à-dire, puisque la Lune est pleine, de tous les endroits de la Terre où il fait nuit.

Éclipses de Soleil : les acteurs



Les différents types d'éclipses centrales



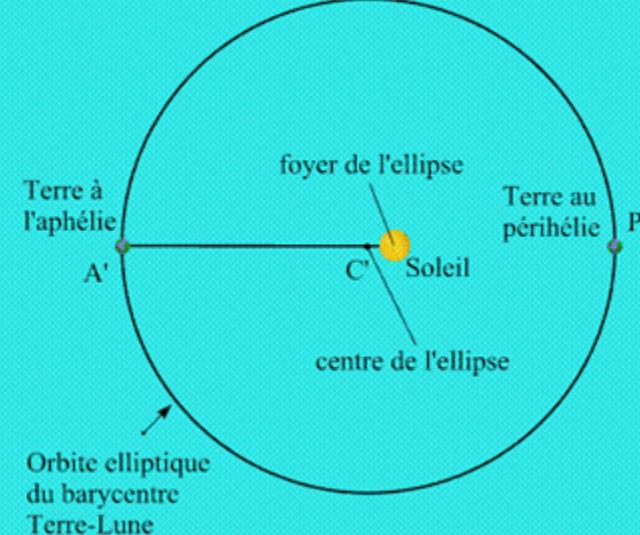
Les orbites de la Lune autour de la Terre et de la Terre autour du Soleil sont des ellipses. Les distances Terre-Lune et Terre-Soleil ne sont donc pas constantes.

Selon la valeur des diamètres apparents de la Lune et du Soleil, le sommet du cône d'ombre de la Lune est situé au-dessus ou au-dessous de la surface de la Terre. Dans un cas on aura une éclipse annulaire et dans l'autre une éclipse totale.

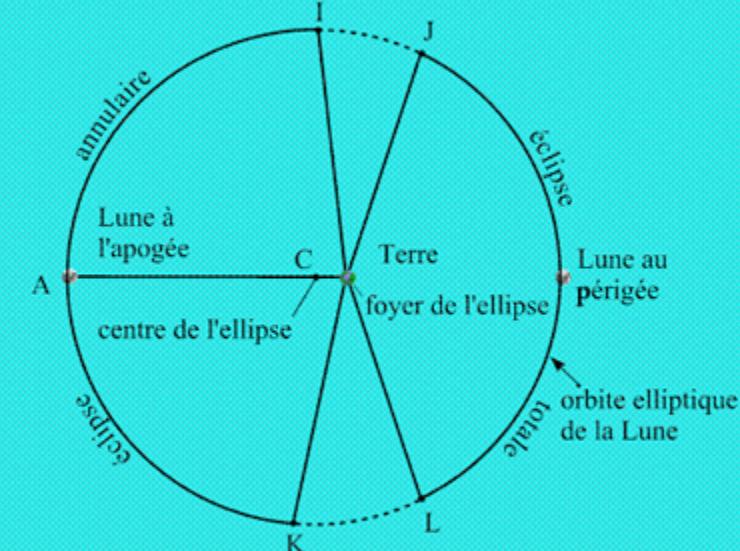
Le fait que la Lune et le Soleil aient presque le même diamètre apparent est une extraordinaire coïncidence. D'ailleurs, la Lune s'éloigne de la Terre de quelques cm par an. Dans un futur lointain, il n'y aura plus d'éclipses totales de Soleil mais seulement des éclipses annulaires.

Éclipses de Soleil

Orbite du barycentre Terre-Lune



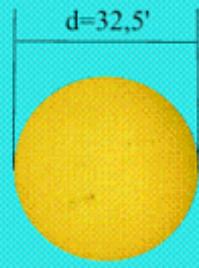
Orbite de la Lune



Sur KL et IJ, l'éclipse est annulaire ou totale en fonction du diamètre apparent du Soleil.



A'
diamètre apparent
du Soleil lorsque la
Terre est à l'aphélie



P'
diamètre apparent
du Soleil lorsque la
Terre est au périhélie

valeur moyenne $M'=32'$



A
diamètre apparent
de la Lune à l'apogée

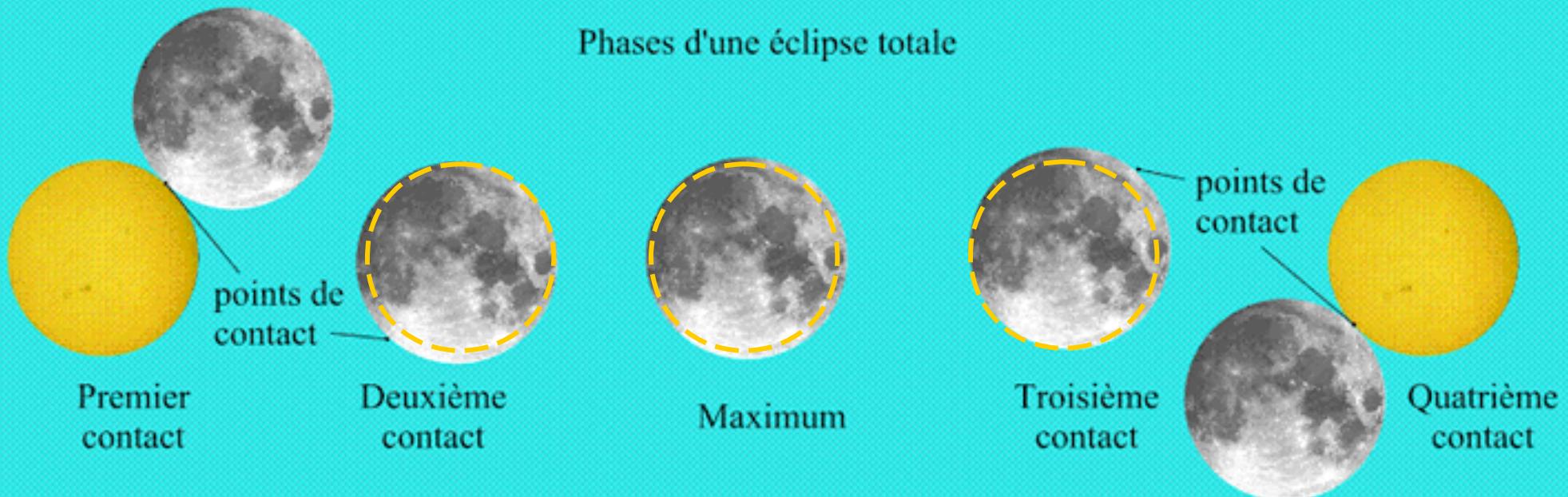


P
diamètre apparent
de la Lune au périhélie

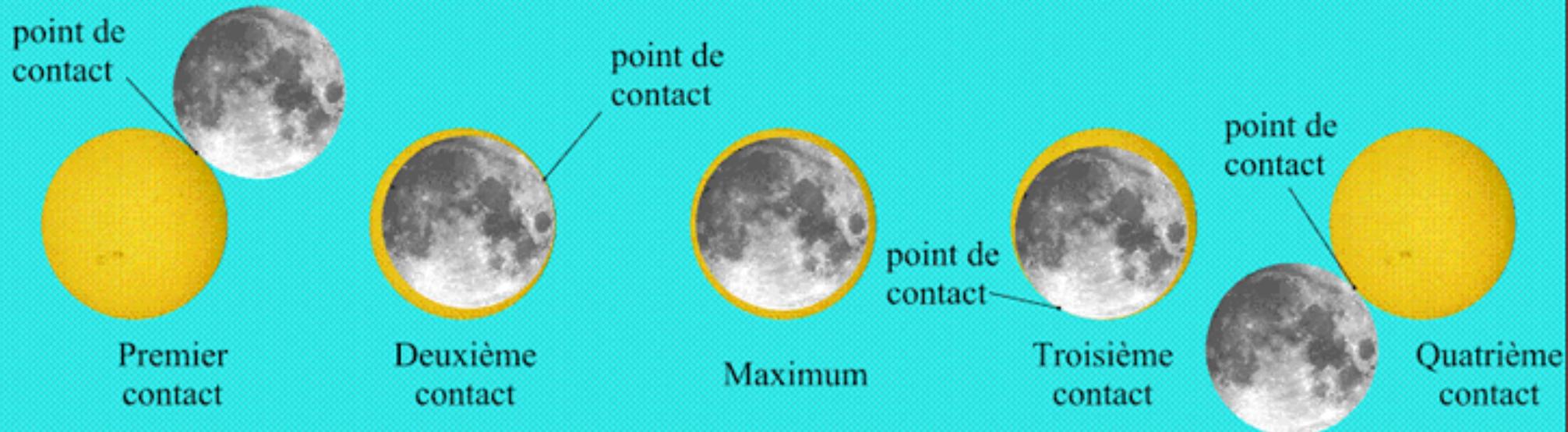
valeur moyenne $M=31,4'$

Valeurs extrêmes et moyennes des diamètres apparents du Soleil et de la Lune

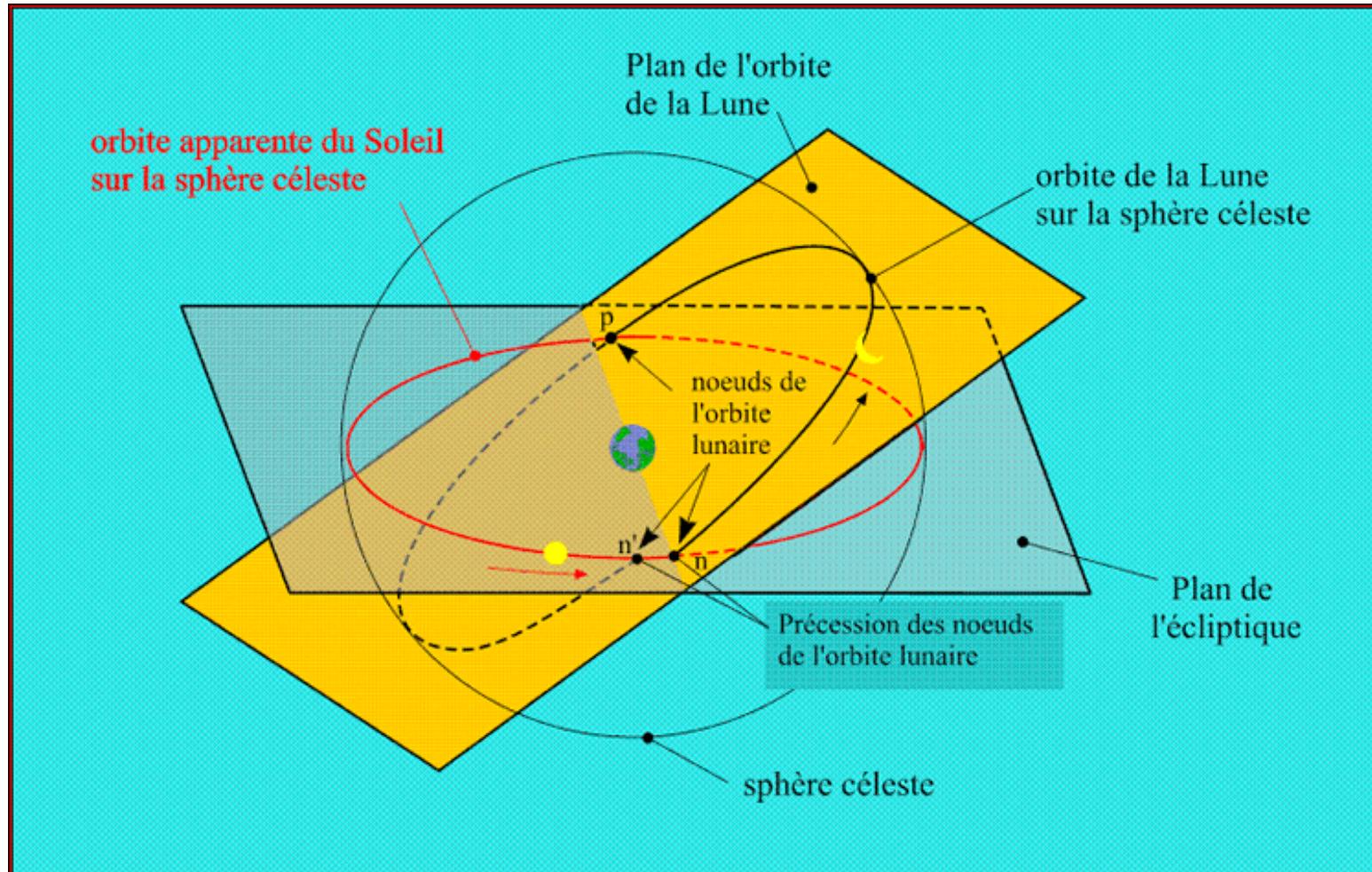
Phases d'une éclipse totale



Phases d'une éclipse annulaire



Éclipses de Soleil et de Lune



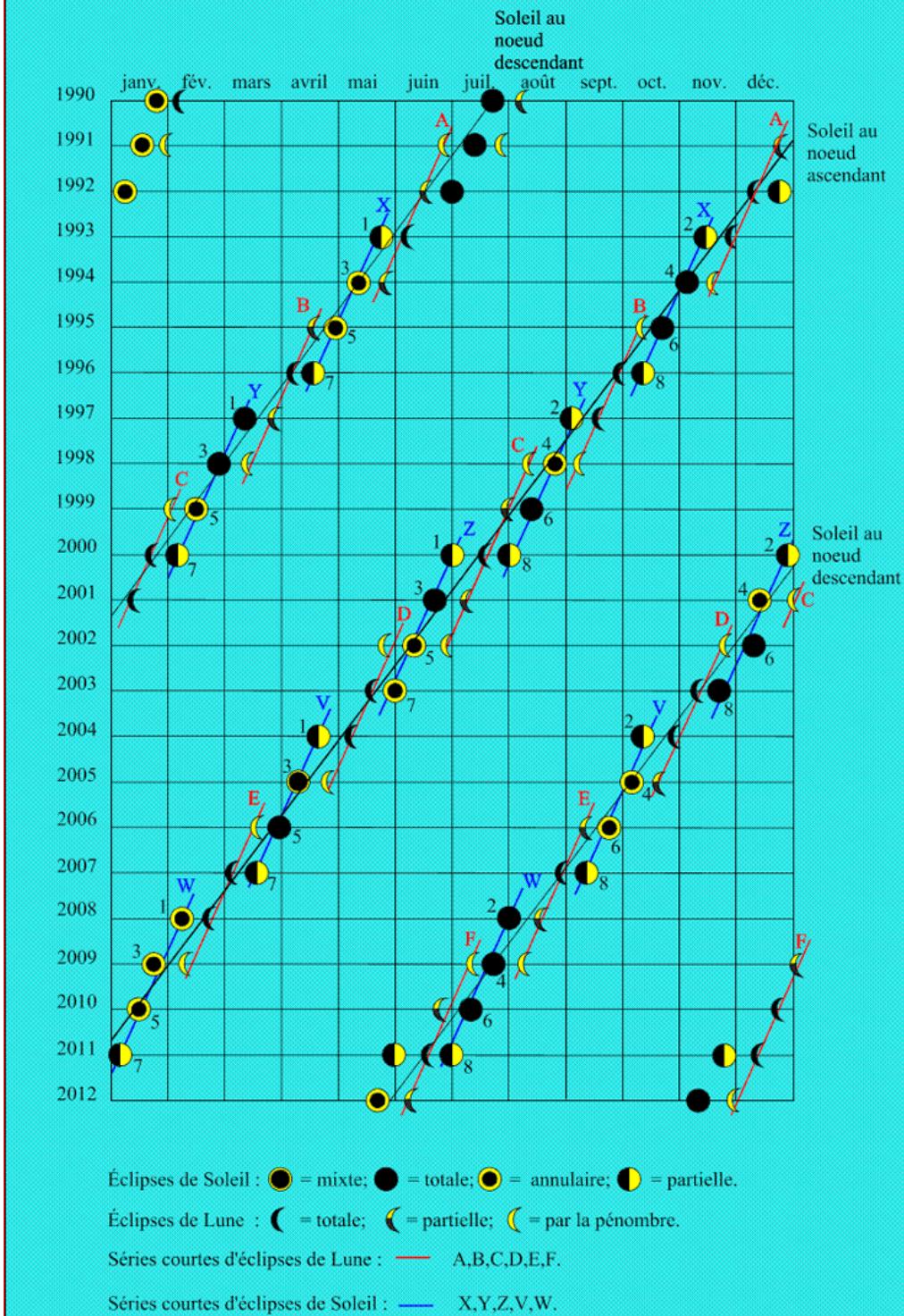
Le plan de l'orbite de la Lune n'est pas fixe mais est animé d'un mouvement de précession d'une période de 18,61 ans. La durée séparant deux passages consécutifs de la Lune par son nœud ascendant (révolution draconitique) vaut 27,212 2208 jours environ. D'autre part, la lunaison, ou révolution synodique, séparant deux phases identiques de la Lune (pleine Lune...) vaut 29,530 5882 jours environ.

Pour retrouver des séries d'éclipses identiques, il suffit de trouver une période égale à un nombre entier de lunaisons et de révolutions draconitiques. On a $29,530\ 5882 / 27,212\ 2208 \approx 1,085\ 196 \approx 242/223$. 223 lunaisons font donc environ 242 révolutions draconitiques. Après cette période de 6 585,321 17 jours appelée Saros, soit 18 ans environ, les éclipses de même type se répètent, aux irrégularités du mouvement de l'orbite lunaire près.

Périodicité des éclipses : le saros

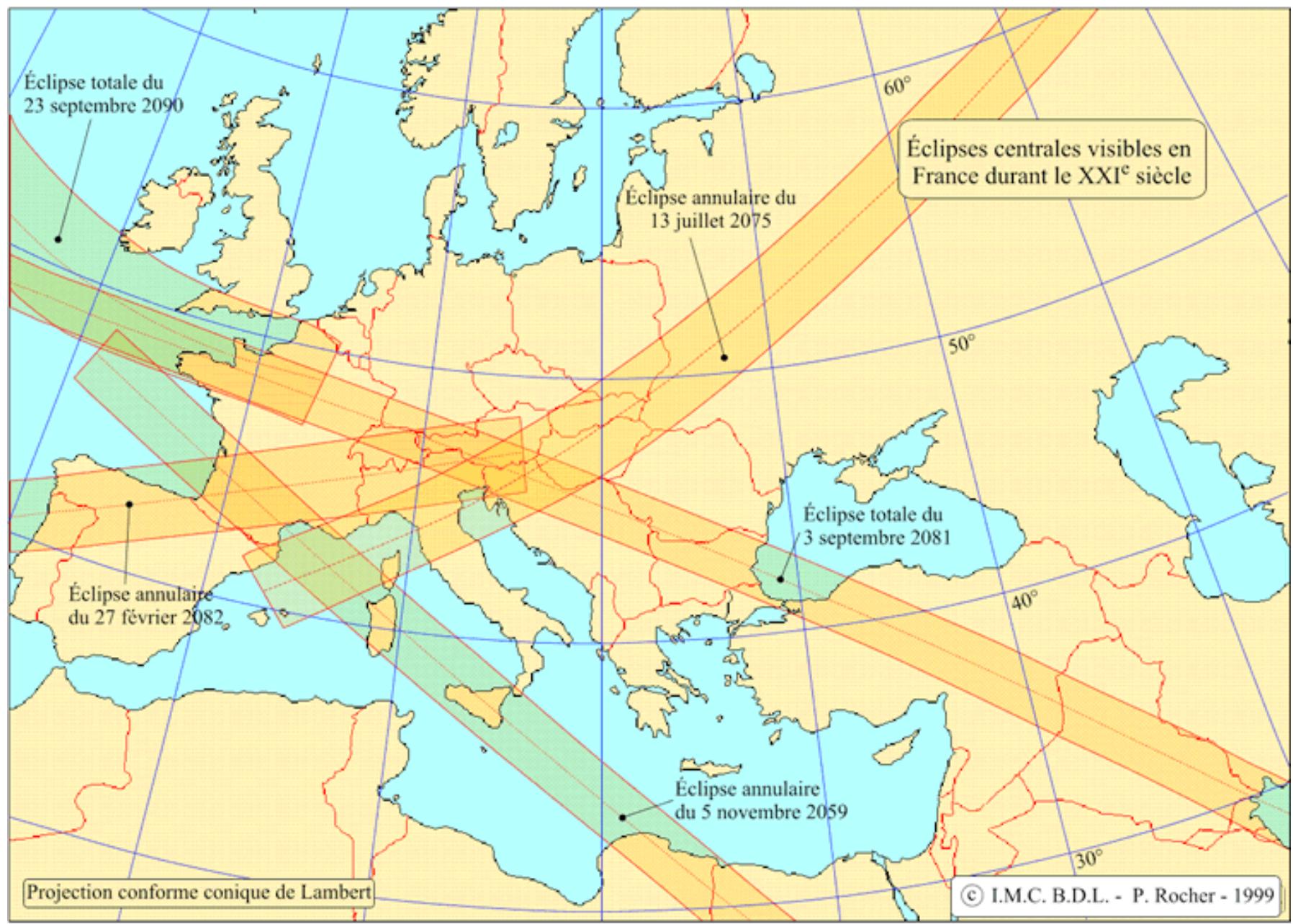
Succession des éclipses entre 1990 et 2012.

On peut noter que les séries d'éclipses se retrouvent à peu près à l'identique après un Saros (18 ans et quelques jours).



Éclipses de Soleil

Ouest 10° 0° 10° 20° 30° 40° 50° 60° Est



Ouest

0°

10°

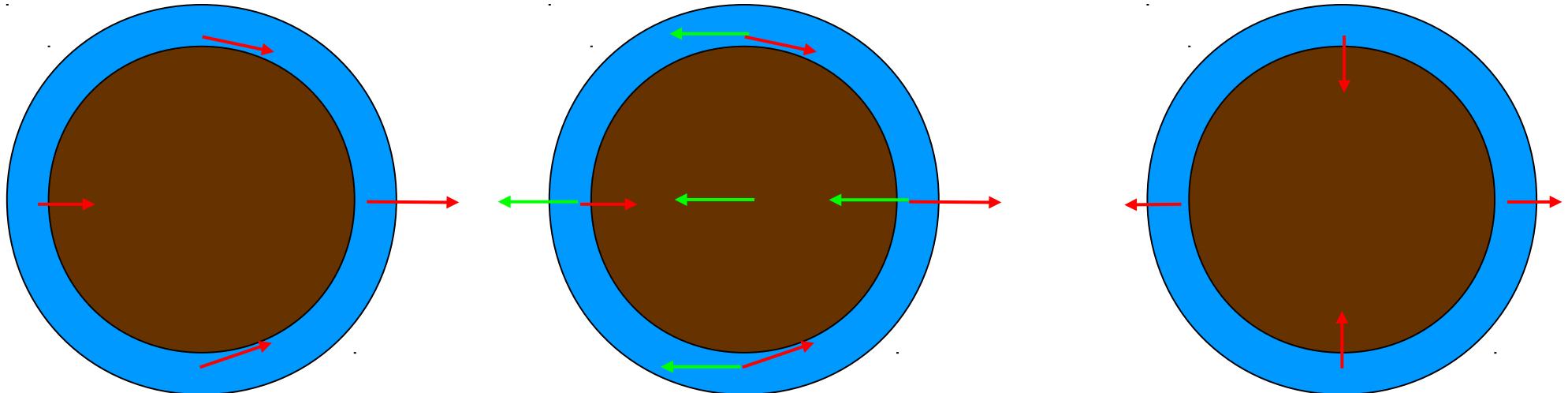
20°

30°

40°

Est

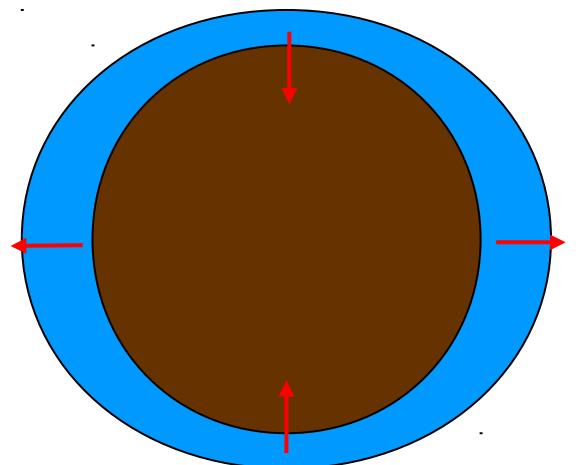
3) Les marées



L'océan est attiré par la Lune en tout point dans la direction du centre de masse de la Lune. Cette attraction est en absolue plus grande du côté de la Lune que du côté opposé.

Pour se ramener à un point de vue terrestre, on peut retrancher aux forces d'attraction en chaque point, la force d'attraction moyenne qu'exercerait la Lune sur l'Océan au barycentre d la Terre

On voit ainsi que la Lune exerce sur les océans des forces qui vont avoir tendance à le gonfler dans l'axe Terre-Lune et à l'aplatir dans le direction perpendiculaire.



Question : la Lune exerce-t-elle un effet de marée significatif sur l'humain ?

L'effet de marée de la Lune sur la Terre :

$$F_{\text{marée}} \sim \frac{m_L}{(r_{LT} - R_T)^2} - \frac{m_L}{(r_{LT})^2} \approx 2m_L \frac{R_T}{r_{LT}^3}.$$

où r_{LT} est la distance entre les centres de la Terre et de la Lune, R_T est le rayon de la Terre, m_L est la masse de la Lune.

L'effet de marée de la Lune sur un humain :

$$F_L \sim \frac{m_L}{r_{LH}^2} - \frac{m_L}{(r_{LH} + h_H)^2} \approx 2m_L \frac{h_H}{r_{LH}^3}.$$

où h_H est la taille caractéristique d'un humain, r_{LH} distance entre la Lune et un humain. Effet de marée d'une armoire sur un humain :

$$F_a \sim 2m_A \frac{h_H}{r_{AH}^3}$$

Où m_A est la masse caractéristique d'une armoire et r_{HA} la distance typique entre une armoire et un humain.

Comparaison de l'effet de marée de la Lune et de l'effet de marée d'une armoire sur un humain :

$$\frac{F_L}{F_A} \approx \frac{m_L}{m_A} \times \frac{r_{HA}^3}{r_{LH}^3}$$

Application numérique :

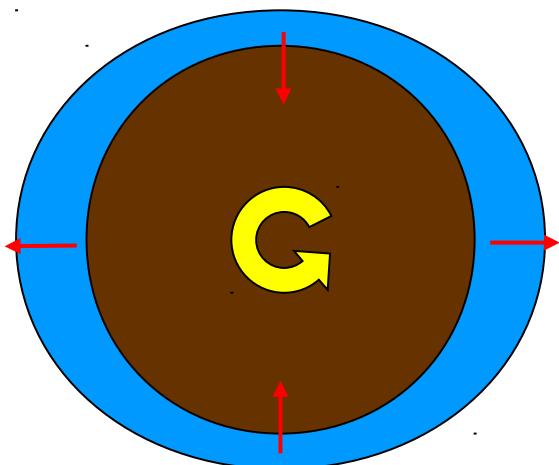
$$m_A \approx 30 \text{ kg} \quad m_L \approx 7 \cdot 10^{22} \text{ kg}$$

$$r_{LH} \approx 380 \cdot 10^6 \text{ m} \quad r_{HA} \approx 3 \text{ m}$$

$$\frac{F_L}{F_A} \approx \frac{m_L}{m_A} \times \frac{r_{HA}^3}{r_{LH}^3} \approx \frac{7 \cdot 10^{22}}{30} \times \frac{3^3}{(380 \cdot 10^6)^3} \approx 10^{-3}$$

Conclusion : l'effet de marée de la Lune sur les humains est ultra négligeable !!

Les marées

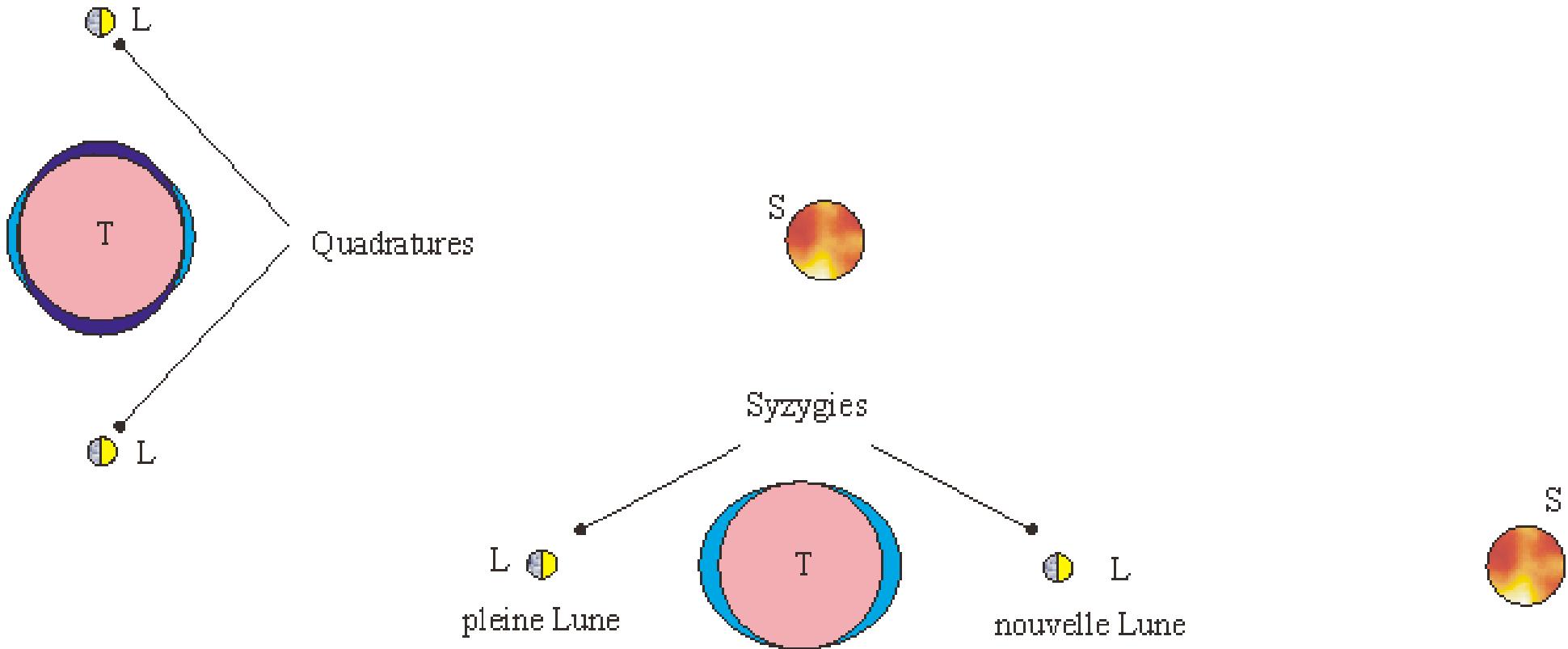


La Terre effectue une rotation sidérale en 23h56min



- La Lune effectue une révolution sidérale en 27,3217 jours dans le même sens que la rotation de la Terre. L'écart entre deux passages au méridien de la Lune est donc plus grand qu'un jour sidéral : il est de 24 h 50 min.
- Comme il y a 2 bourrelets, il y a aura 2 marées hautes et 2 marées basses par période de 24 h 50 min. Les marées se décaleront donc de 50 minutes tous les jours.

Les marées



Le Soleil exerce aussi des forces de marées sur le Terre d'intensité environ deux fois moindre que celle de la Lune.

Lorsque le Soleil et la Lune sont en quadrature, les effets du Soleil et de la Lune sont contraires et les marées sont de morte-eaux.

Lorsque le Soleil et la Lune sont en sygyses, les forces de marées s'additionnent et l'on parle de vives-eaux.

Les marées

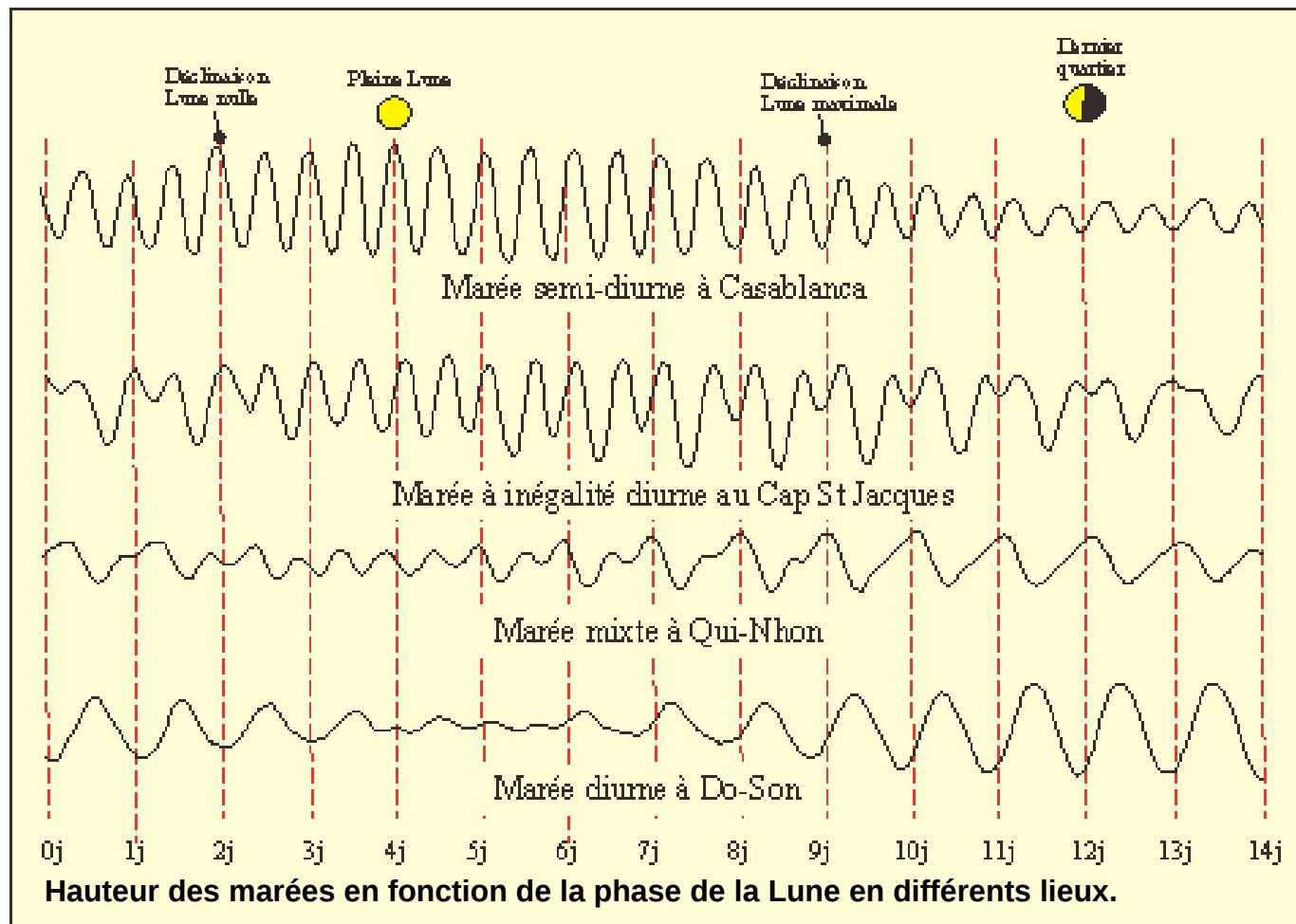
L'écliptique, l'équateur et le plan d'orbite de la Lune ne sont pas les mêmes. L'onde de marées résultant de l'ensemble des forces de marées se décompose donc en une série de termes périodiques avec des périodes semi-diurnes, diurnes mais également des périodes plus longues, bimensuelles, mensuelles... et d'autres plus courtes.

L'effet de cette onde de marée va être très différent selon la topographie du bassin (mer, océan, golfe...) sur lequel elle s'applique. En effet, de même que des cordes de piano de longueurs et de grosseur différentes ne vibrent pas à la même fréquence, chaque bassin aura ses fréquences propres d'oscillation qui dépendent de la longueur du bassin, de sa profondeur, du profil du fond... Certaines fréquences de l'onde proches des fréquences de résonance d'un bassin seront donc prédominantes dans ce bassin.

On distingue ainsi plusieurs types de marées :

- Les marées semi-diurnes : les harmoniques diurnes sont négligeables devant les harmoniques semi-diurnes. Il y a donc deux marées par jour, d'importance égale. Exemple : l'océan Atlantique.
- Les marées semi-diurnes à inégalité diurne : les harmoniques diurnes ne sont plus négligeables devant les harmoniques semi-diurnes. On a encore deux pleines mers et deux basses mers par jour, mais les hauteurs de ces marées peuvent être très différentes (Cap St Jacques, océan Indien et certaines parties du Pacifique).
- Les marées mixtes : les harmoniques diurnes prédominent, mais les harmoniques semi-diurnes apparaissent en fonction de la valeur de la déclinaison de la Lune. On a ainsi deux marées par jour lorsque la Lune est proche de l'équateur (déclinaison nulle) et une seule marée par jour lorsque la déclinaison de la Lune est proche de son maximum (Indonésie, Viêt-Nam, Antilles, côtes de Sibérie et Alaska).
- Les marées diurnes : les harmoniques semi-diurnes sont négligeables devant les harmoniques diurnes, on n'a alors qu'une marée par jour (océan Pacifique et côtes de Sibérie orientale, golfe du Tonkin).

Les marées

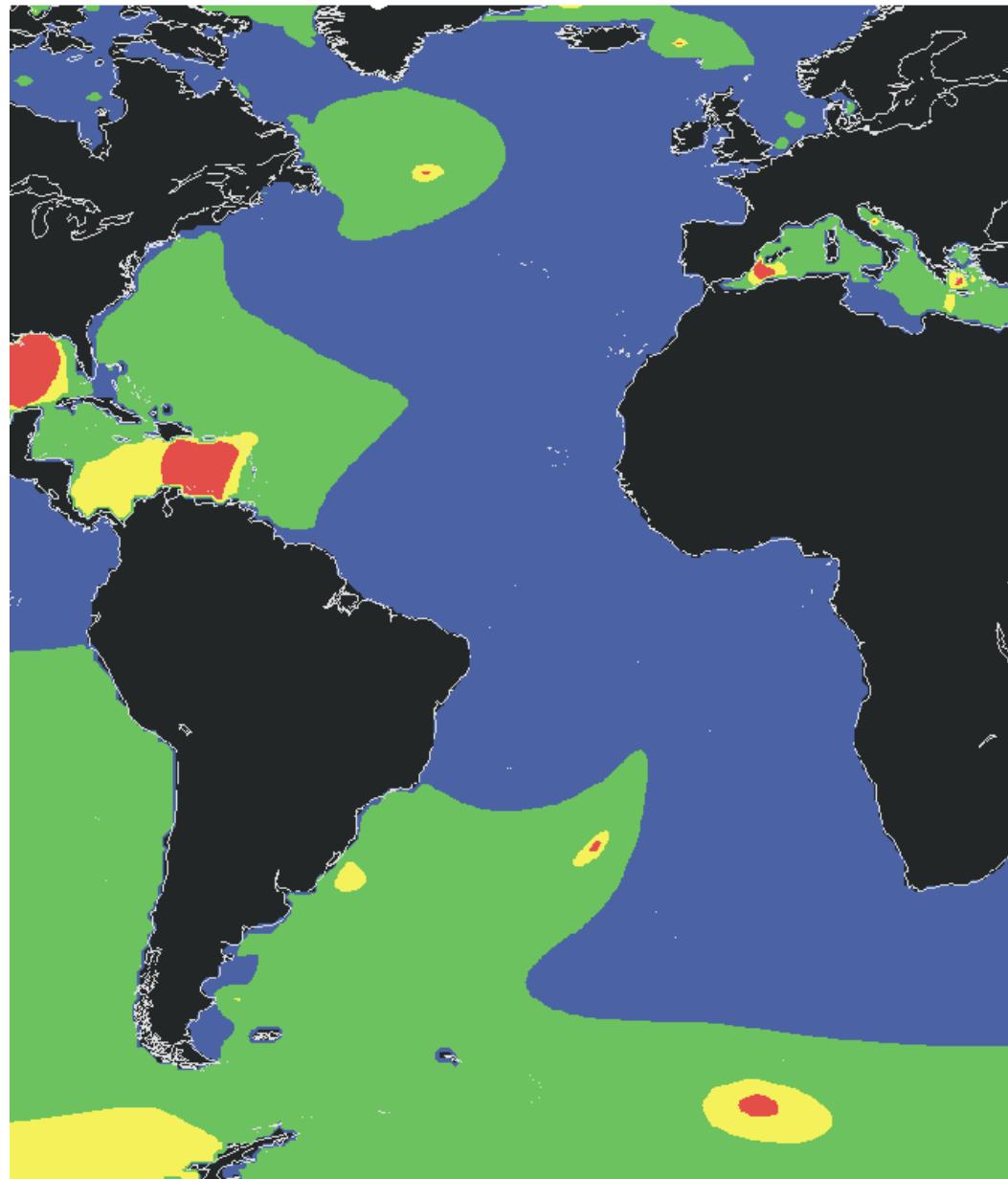


On définit le marnage comme la différence de hauteur de la marée entre une pleine mer et une basse mer successives. Le marnage est fort durant les périodes de vives-eaux et faible durant les périodes de mortes-eaux. Les marnages peuvent être très différents d'une région géographique à l'autre.

Le marnage maximal observé dans le monde est dans la baie de Fundy, au Canada entre la Nouvelle-Écosse et le Nouveau-Brunswick. Le marnage peut y atteindre jusqu'à 16m.

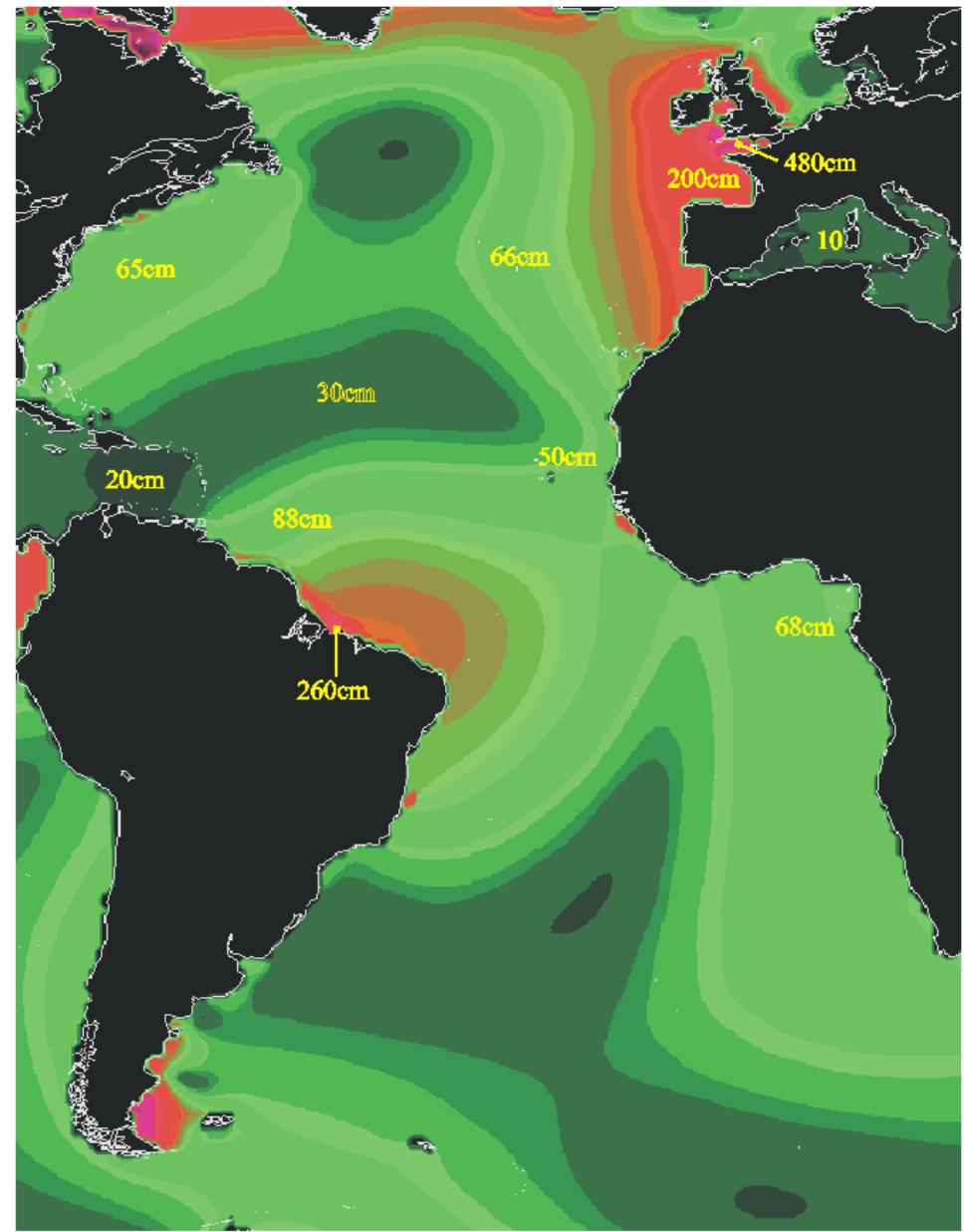
En France, dans la baie du Mont-Saint-Michel, le marnage peut atteindre jusqu'à 12 - 13m par forts coefficients.

DIFFÉRENTS TYPES DE MARÉE



Crédits : SHOM

MARNAGES DES MARÉES



Crédits : SHOM

Quelques liens pour aller plus loin

Site web de la formation des professeurs de l'Observatoire de Paris
formation-professeurs.obspm.fr

Site publique de la formation à distance pour les enseignants :
<http://media4.obspm.fr/public/AMC/>

Promenade dans le système solaire sur le site de l'IMCCE :
www.imcce.fr/langues/fr/grandpublic/systeme/promenade/