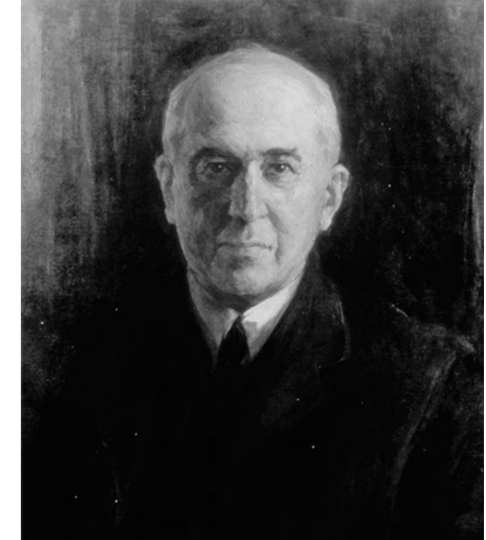


Petits mouvements de la Terre et théorie astronomique des climats

Théorie astronomique des paléoclimats

La *théorie du contrôle climatique par des mécanismes célestes* fut avancée par Joseph Adhémar en 1842, puis par James Croll en 1875. À la suite des travaux du physicien serbe *Milutin Milankovitch* entre les deux guerres mondiales, puis de ceux de l'astronome belge *André Berger* et du paléoclimatologue américain John Imbrie, il est devenu clair que les *variations de la position de la Terre sur son orbite sont susceptibles d'induire des changements à long terme du climat, sans la moindre variation du flux de chaleur émis par le Soleil.*



Les *trois paramètres* qui caractérisent l'orbite de notre planète sont tout d'abord l'*excentricité*, ensuite l'inclinaison de son axe par rapport à une perpendiculaire au plan de son orbite (*obliquité*) et enfin la *précession des équinoxes* ; *tous ces paramètres varient dans le temps* :

✓ La Terre décrit dans l'espace une ellipse dont le Soleil occupe un des foyers. Cette ellipse se déforme de deux façons : d'une part elle tourne très lentement par rapport à des étoiles fixes (*précession du périhélie*) ; d'autre part son *excentricité*, qui est une mesure du degré d'aplatissement de l'ellipse, varie d'une configuration presque circulaire à une valeur maximale de 6%. Cette variation présente une pseudo-périodicité de l'ordre de 100 000 ans. De nos jours, l'excentricité de l'orbite terrestre est voisine de 1,7% et la Terre se trouve plus près du Soleil en décembre qu'en juillet.

✓ *L'orientation de l'axe de la Terre reste fixe à l'échelle de l'année. Il en résulte les saisons : lorsque le pôle Nord pointe vers le Soleil, l'hémisphère Nord reçoit davantage de chaleur et c'est l'été boréal ; six mois plus tard, c'est le pôle Sud qui pointe vers le Soleil et c'est l'été austral ainsi, bien sûr, que l'hiver boréal. L'inclinaison de l'axe de la Terre (ou *obliquité*) est aujourd'hui de $23^{\circ}27'$ mais cette valeur varie de $\pm 1^{\circ}30'$ avec une périodicité de 41 000 ans. Lorsque l'inclinaison de l'axe de la Terre est maximale, les zones polaires interceptent davantage de rayonnement solaire lorsqu'elles pointent vers le Soleil. Cette configuration conduit donc à des étés chauds et des hivers rigoureux aux hautes latitudes et correspond aux climats interglaciaires avec peu de glaces aux hautes latitudes sur les continents. Inversement, une diminution d'inclinaison correspond à des étés moins chauds et à des hivers moins froids, configuration qui cependant permet le développement des calottes glaciaires continentales.*

✓ *La précession des équinoxes provient de ce que la Terre n'est pas parfaitement sphérique. L'action du Soleil, de la Lune et des planètes sur le renflement équatorial de la Terre provoque une rotation de son axe avec une périodicité de 26 000 ans. En conséquence, le moment où le pôle Nord pointe vers le Soleil ne correspond pas toujours à la même position de la Terre sur son orbite. Aujourd'hui la Terre est loin du Soleil en juillet et près en décembre. Il y a 11 000 ans la Terre était loin du Soleil en décembre (d'où des hivers plus froids) et près du Soleil en juillet (d'où des étés plus chauds). Pour déterminer les saisons pendant lesquelles la Terre est près du Soleil et celles pendant lesquelles elle en est loin, il est nécessaire de tenir compte du lent mouvement de rotation de l'orbite elliptique de notre planète (précession du périhélie). C'est pourquoi A. Berger a calculé que les variations d'insolation saisonnière qui résultent du mouvement de précession ne présentent pas la périodicité de 26 000 ans mais une double périodicité, avec un cycle principal de 23 000 ans et un cycle mineur de 19 000 ans.*

Ces trois facteurs combinés ont donc différentes conséquences :

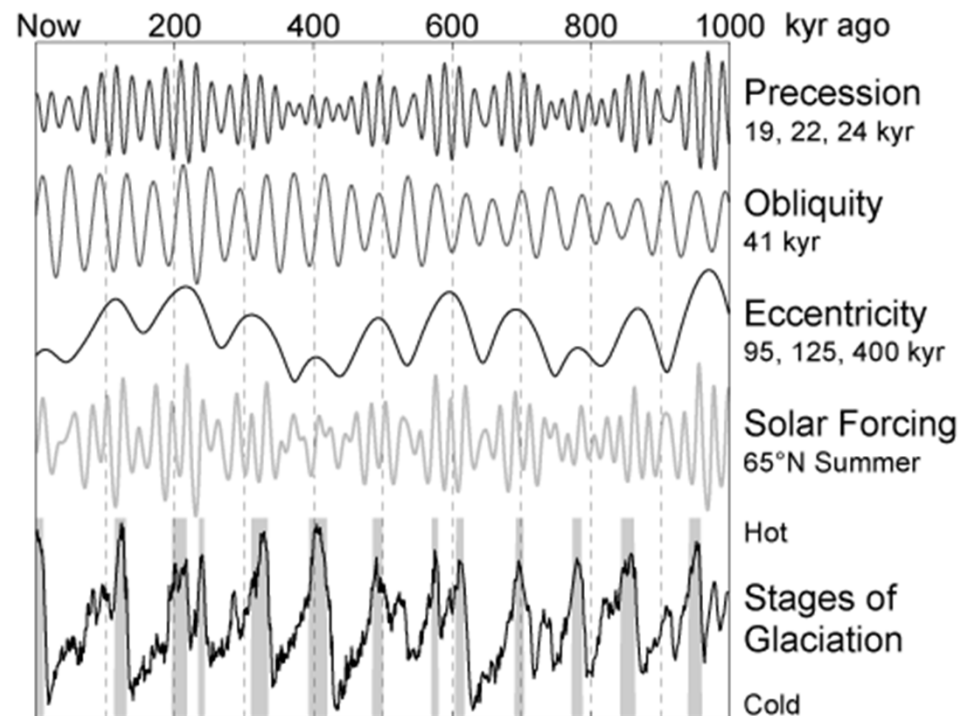
- ✓ La variation d'énergie solaire reçue sous les hautes latitudes au cours de l'année.*
- ✓ Les différences de température entre les continents et les océans à cause des différences d'albédo.*
- ✓ Les variations sur les changements de saisons (plus élevées aux hautes latitudes).*
- ✓ Les différences de température entre les hémisphères dues à l'inclinaison.*

Par contre, ces paramètres n'ont aucune influence sur la quantité totale annuelle d'énergie solaire reçue par la Terre.

Il s'agit ici bien sûr d'une théorie parmi d'autres, mais les scientifiques pensent qu'elle est *la plus probable pour expliquer les changements climatiques naturels*.

Suite au *forage de Vostok* (Antarctique), les chercheurs ont pu étudier le *rapport $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$* (qui est noté $\delta^{18}\text{O}$) dans la glace extraite.

Ils se sont aperçus que *la courbe représentant le rapport $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ avait des similitudes avec la courbe issue des cycles de Milanković*. Et étant donné que la *correspondance température / $\delta^{18}\text{O}$ est fermement établie*, on peut alors penser que *les paramètres de Milanković peuvent être la cause des changements climatiques naturels*.



La théorie astronomique a reçu récemment d'éclatantes *confirmations expérimentales*.

Inclinaison, excentricité et précession se sont combinées de façon particulièrement favorables pour conduire *il y a 128 000 - 125 000 ans à l'avant dernière grande déglaciation* (excentricité voisine de 4%, position de la Terre en été de l'H.N. proche du Soleil et forte inclinaison de l'axe de rotation, atteignant $24,2^\circ$). Cette configuration a conduit à distribuer une insolation d'été des hautes latitudes de l'hémisphère Nord 13% supérieure à celle d'aujourd'hui et à *instaurer la dernière période interglaciaire*, sensiblement plus chaude que la nôtre.

Il y a *115 000 ans*, l'excentricité était toujours forte, mais l'obliquité très faible ($22^\circ 24'$) et la Terre près du Soleil en hiver. Aux hautes latitudes de l'hémisphère Nord, l'insolation est inférieure de 9% à celle d'aujourd'hui. Il en résulte un *climat sensiblement plus froid* qui marque le *début d'une glaciation*.

Une conjonction semblable de l'inclinaison, de l'excentricité et de la précession, favorable à la déglaciation, a eu lieu *il y a 11 000 ans* avec la distance Terre-Soleil faible en été H.N. et une forte inclinaison ($24,2^\circ$), qui a conduit à l'établissement de *l'interglaciaire actuel*. Cependant, l'excentricité ayant été plus forte il y a 128 000 ans qu'il y a 11 000 ans, le précédent interglaciaire a connu des étés plus chauds que l'actuel, ce qui s'est traduit par une température moyenne plus élevée (une estimation d'environ 2 degrés semble plausible) ainsi qu'un niveau des mers plus haut de quelques mètres (une estimation d'environ 2 mètres semble également plausible).

Il y a 11 000 ans , dans l'HN, la Terre se trouvait le plus proche du soleil en été (configuration étés chauds, hivers froids). Actuellement au cours de l'année, c'est en été (de HN) que la Terre se trouve le plus éloigné du soleil (configuration étés frais, hivers doux). Ceci peut être mis en relation avec le fait qu'*au cours des dix mille dernières années, les hautes latitudes de l'hémisphère nord se sont progressivement refroidies* : le pergélisol initialement restreint aux très hautes latitudes a progressé vers le sud. *Une telle situation prépare l'établissement d'une couverture neigeuse permanente aux hautes latitudes de l'hémisphère nord, prémisse à la prochaine glaciation.* C'est ce qui limite en général la durée d'un interglaciaire à une dizaine de milliers d'années.

Petits mouvements de la Terre

Après avoir abordé les deux mouvements principaux, les plus caractéristiques de notre vie de terrien (*rotation quotidienne de la Terre sur elle-même* et *révolution annuelle de la Terre autour du Soleil*), nous allons voir que ceux-ci n'ont vraiment rien de tranquilles, si on les considère *sur des échelles de temps assez longues*.

Même s'ils semblent dérisoires à un être humain dont le voyage avec sa planète est certes intéressant mais court, les mouvements que nous allons décrire maintenant sont importants pour la compréhension de *tous les phénomènes astronomiques climatiques observables*.

Outre la révolution et la rotation déjà étudiées, notre planète présente *six mouvements secondaires* : trois affectent la rotation terrestre et trois autres la révolution :

✓ *mouvements affectant la rotation :*

- *la précession*
- *la nutation*
- *la variation de l'obliquité de l'écliptique*

✓ *mouvements affectant la révolution :*

- *l'inégalité mensuelle du Soleil*
- *la variation de l'excentricité terrestre*
- *la variation séculaire du périhélie terrestre*

Mouvement secondaire affectant la rotation : la précession.

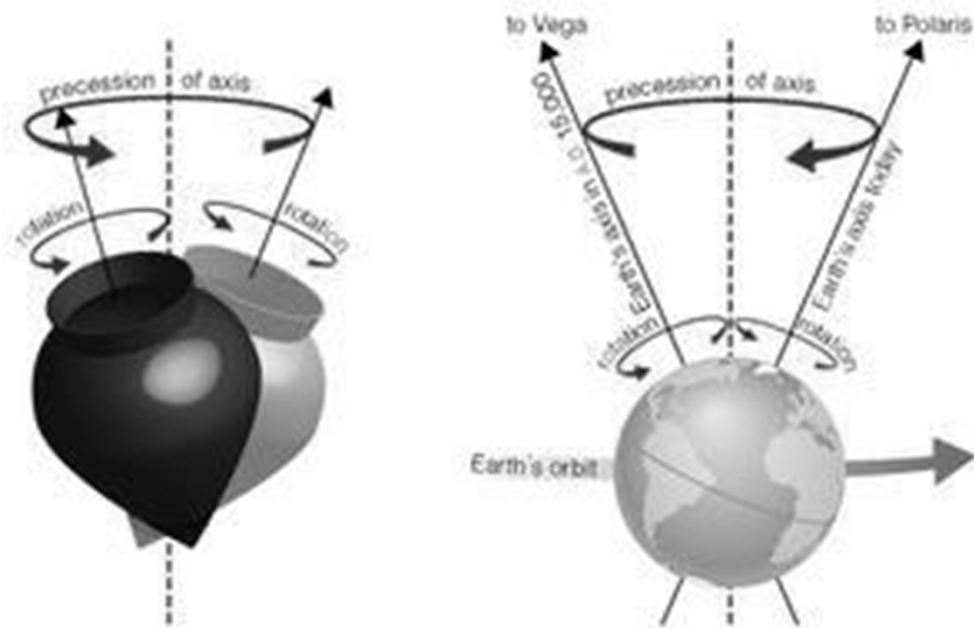
On parle très souvent de « *précession des équinoxes* », mais ce terme ne désigne qu'une conséquence du mouvement que nous nous attarderons à décrire ci-dessous.

On a vu que l'*inclinaison de l'axe de rotation de la Terre* (voisine actuellement de $23^{\circ}27'$) justifie l'*existence des différentes saisons*.

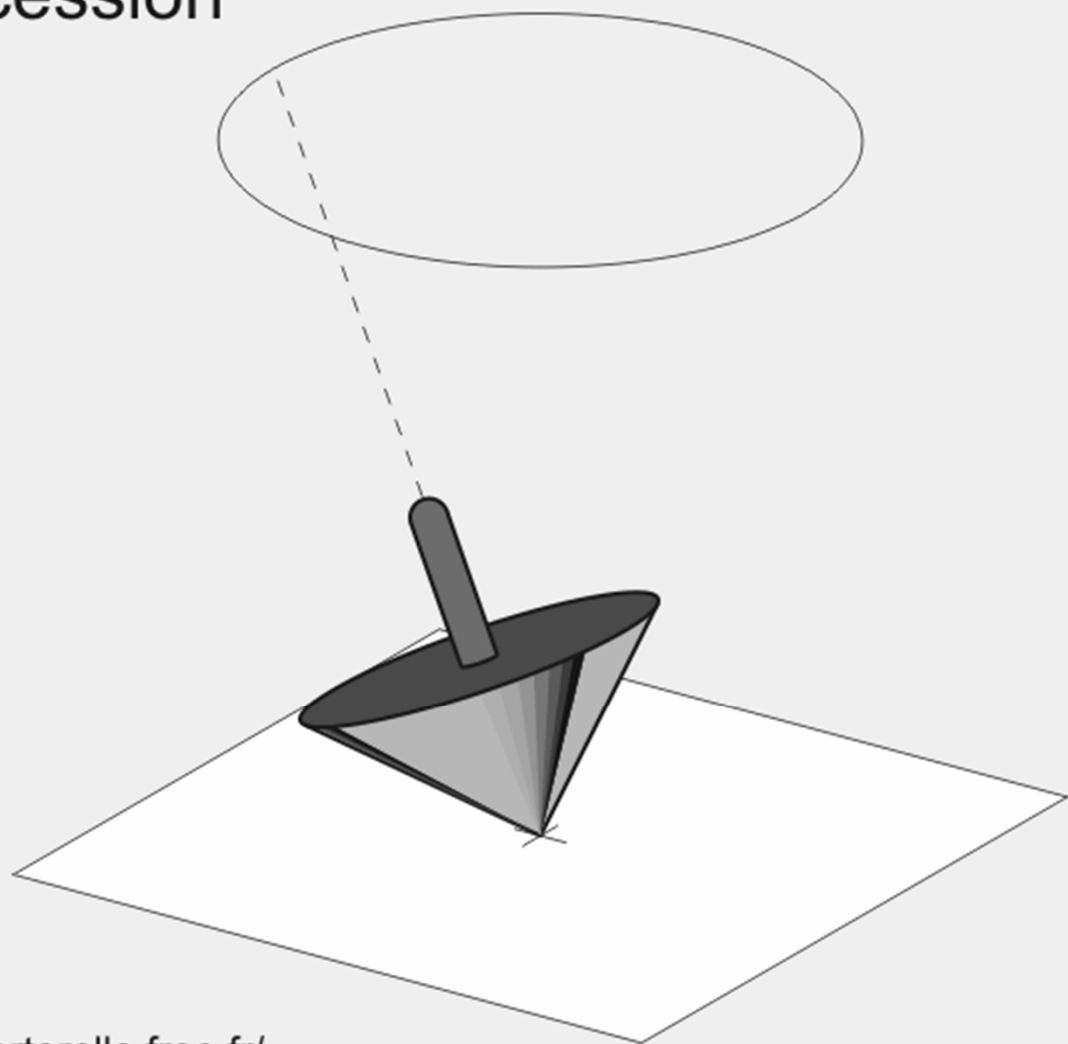
Le *mouvement de précession* consiste en un lent changement de direction de l'axe de rotation de la Terre (environ $50''$ par an, ou plus précisément $0,013670^{\circ}$ par an, ce qui correspond à une périodicité d'environ 26 000 ans), qui cause un *déplacement des saisons sur l'orbite terrestre*.

De même que l'axe d'une toupie qui tourne décrit un cône sous l'action de la pesanteur, l'axe de rotation de la Terre décrit, en 26 000 ans environ, sous l'action des forces d'attraction de la Lune et du Soleil, un cône dont le demi-angle au sommet est de $23^{\circ}26'$.

Ce mouvement est appelé *précession axiale*.



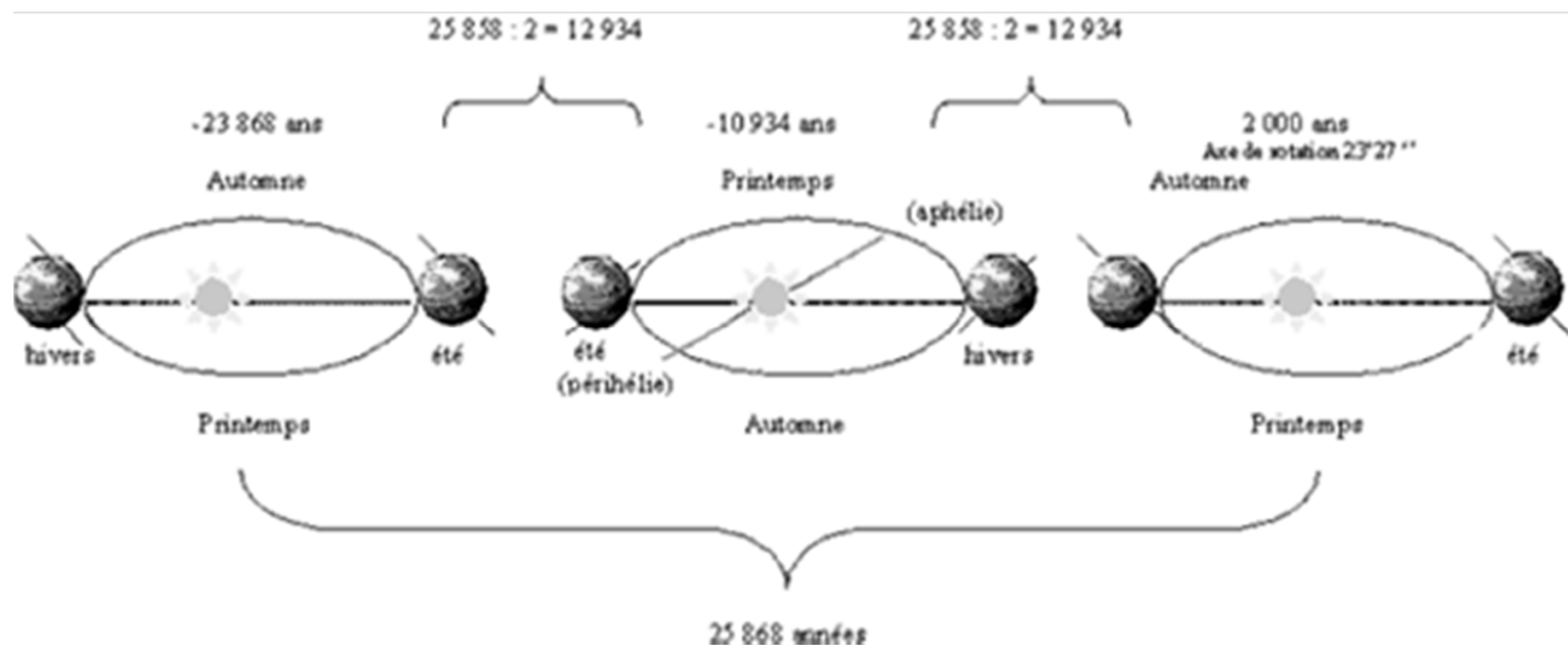
La précession



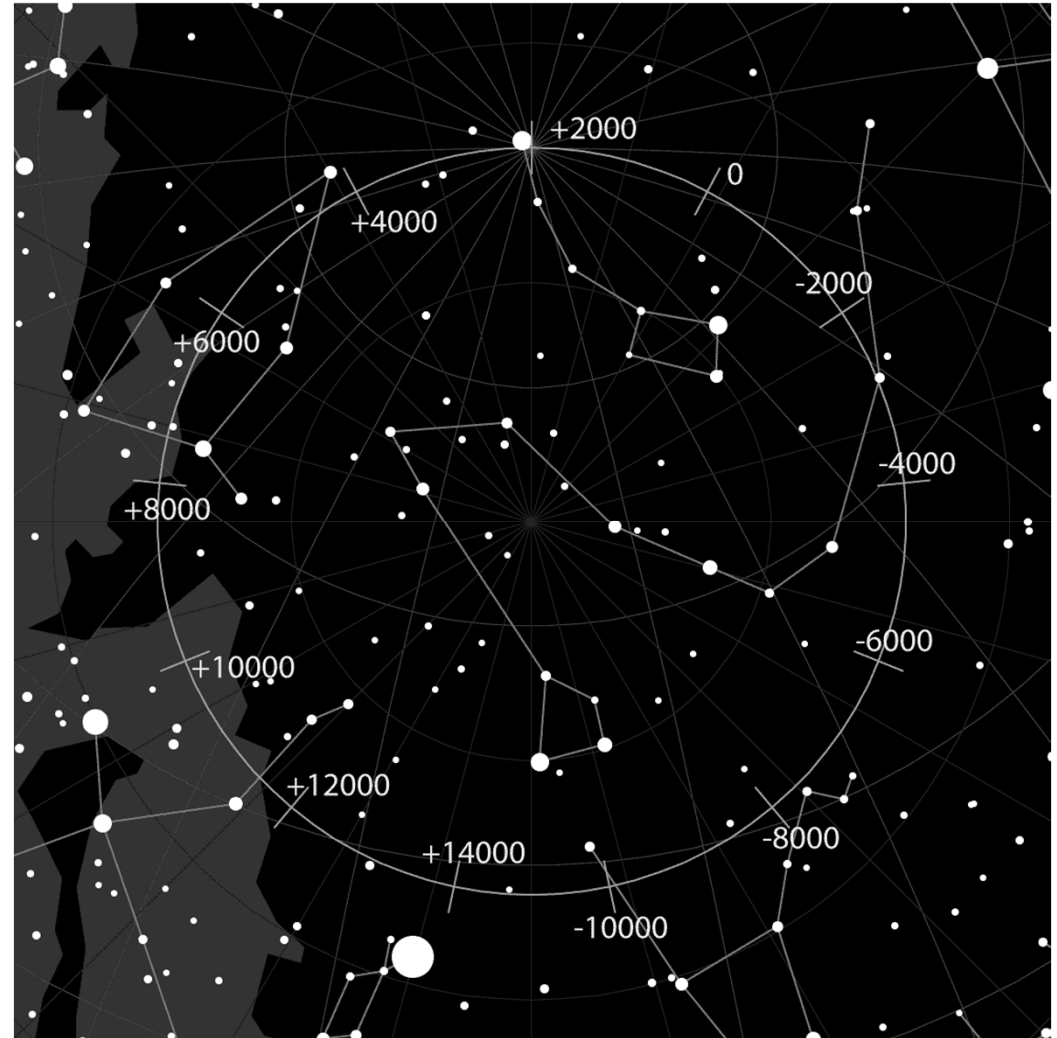
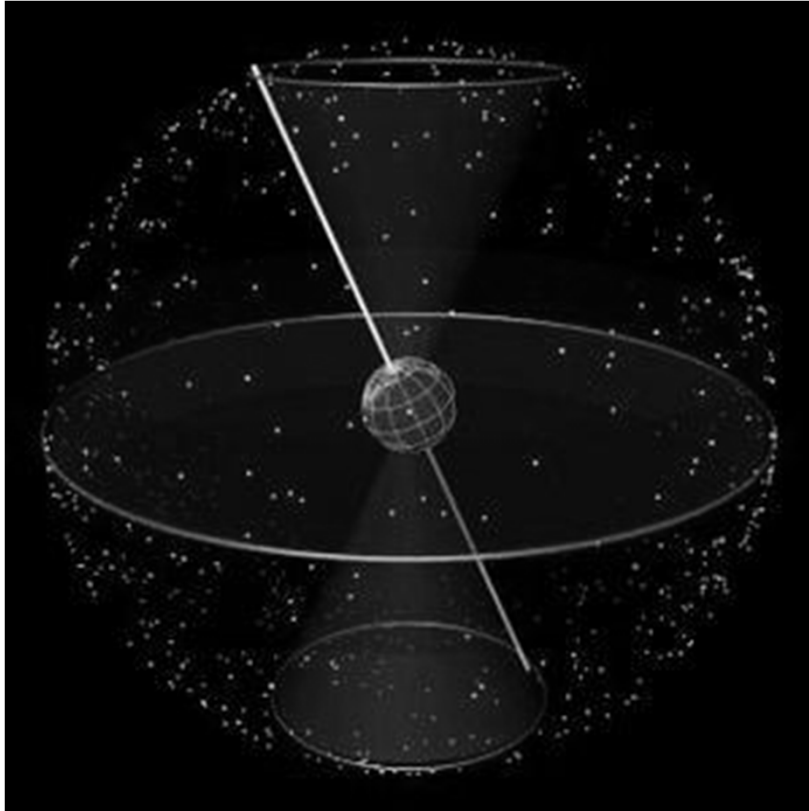
<http://serge.bertorello.free.fr/>

Remarque : grâce à la présence de notre satellite l'échéance de la variation de l'axe de rotation est plus lent et permet d'y avoir la vie sur notre planète.

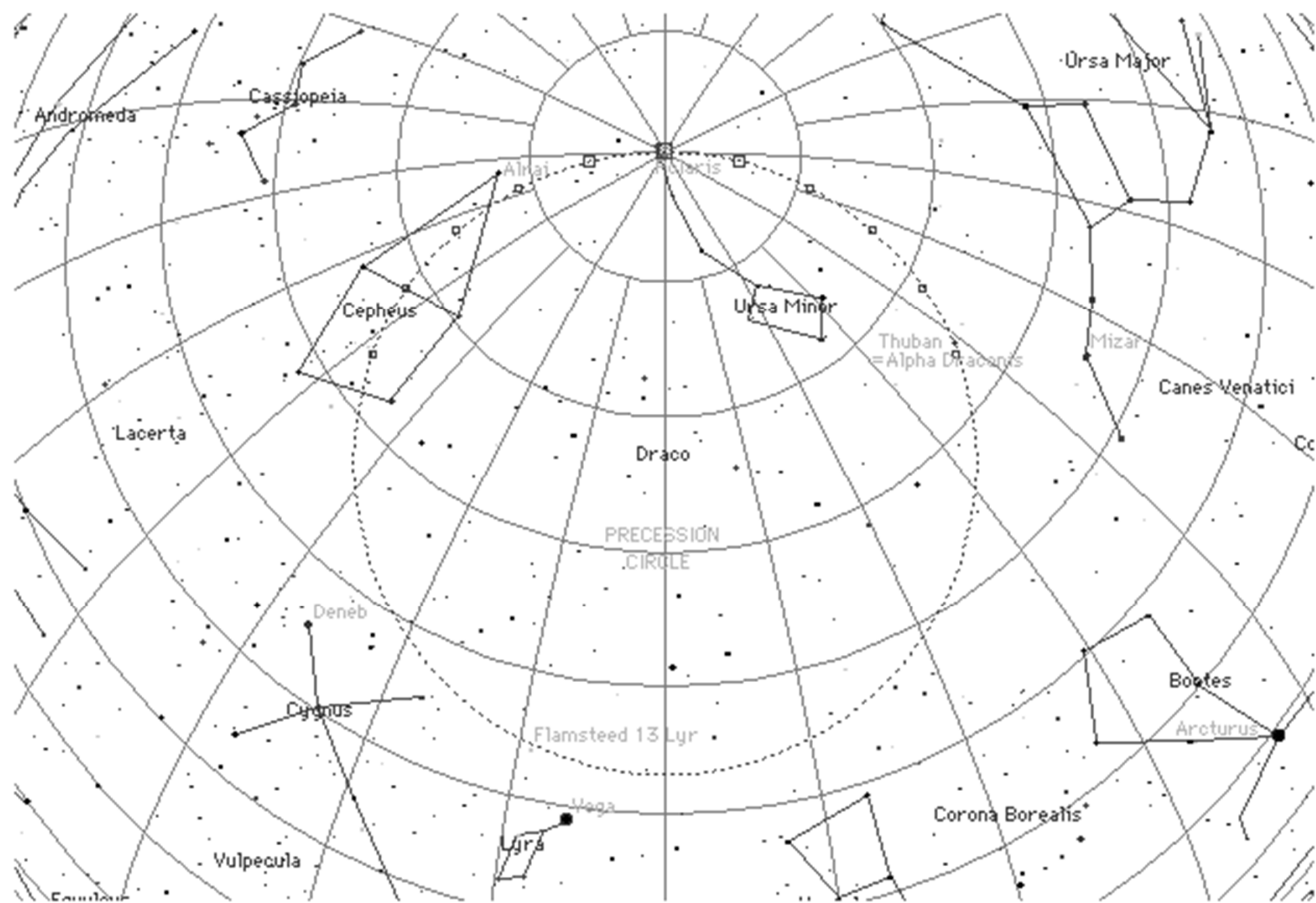
En effet, sans la Lune l'axe de la Terre décrirait un cône de précession en même pas 10 000 ans ce qui aurait des effets plus dévastateurs sur le climat.



Actuellement l'axe de rotation de la Terre est dirigé vers l'étoile *polaire* de la constellation de la *Petite Ourse* mais il y a environ 5 000 ans l'axe polaire terrestre pointait vers *Thuban* (α Dra) ; dans 12 000 ans il sera dirigé vers l'étoile *Véga* de la constellation de la Lyre et 14 000 ans plus tard l'axe de la Terre sera de nouveau pointée vers l'étoile *polaire*.



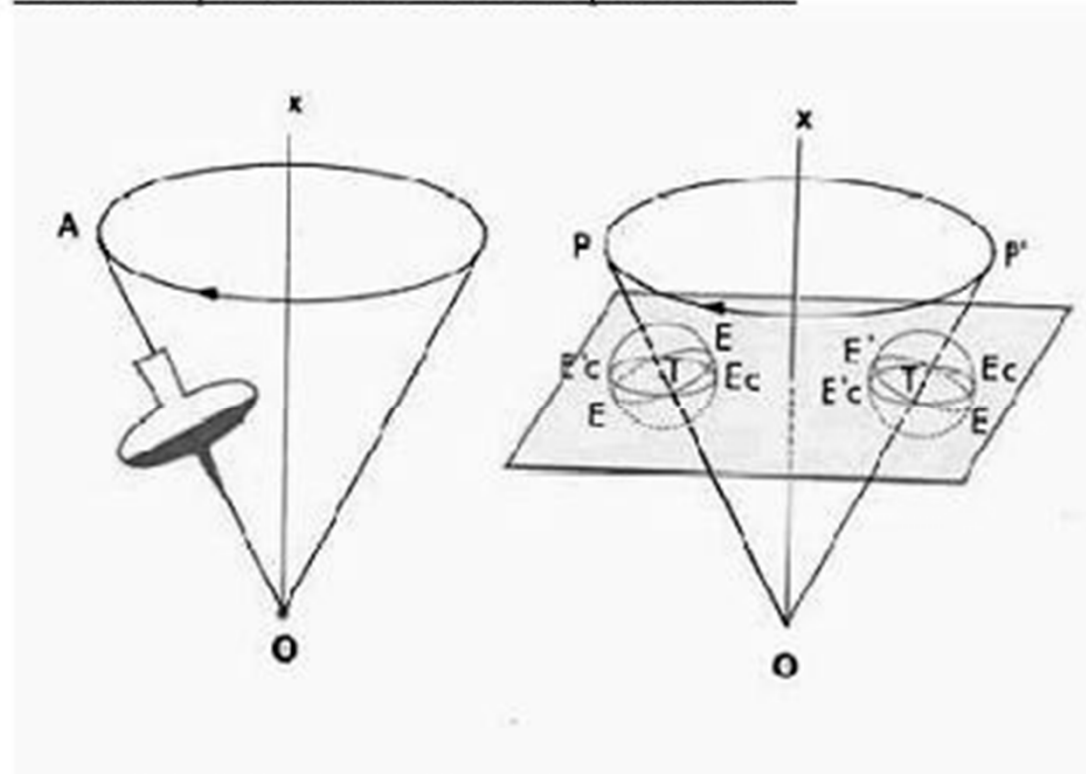
Trajet de l'axe du pôle Nord sur la voûte céleste, dû à la précession (en supposant une vitesse de précession et une obliquité constantes)



Le *plan de l'équateur céleste*, perpendiculaire à l'axe de rotation de la Terre, *tourne donc aussi*, de même que l'*équinoxe de printemps* (ou *point γ*), déterminé par l'une des intersections de ce plan avec l'*écliptique*.

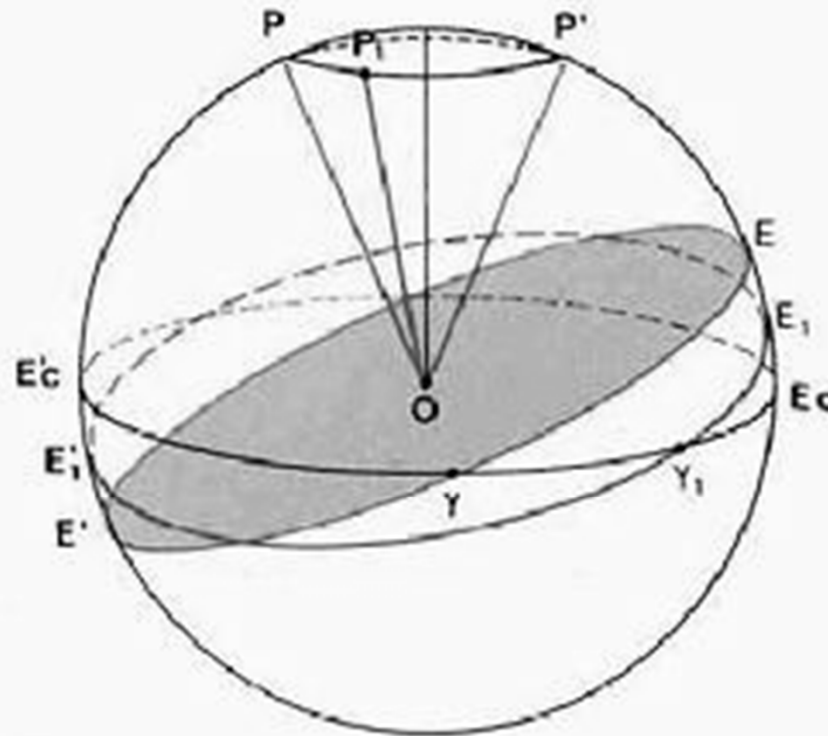
Cette direction servant d'origine aux systèmes de coordonnées stellaires, les *coordonnées équatoriales des astres fixes varient elles aussi avec le temps*. Ce phénomène a été mis en évidence par *Hipparque au II^{ème} siècle avant J.-C.*, découverte complétée par celles du *mouvement de l'écliptique (XVII^{ème} siècle)* et de la *nutations de Bradley (XVIII^{ème} siècle)*.

Schéma représentant le "cône de précession".



Ox = axe perpendiculaire à l'écliptique.
Oa = axe du monde.

Représentation du mouvement du point γ sur l'écliptique.



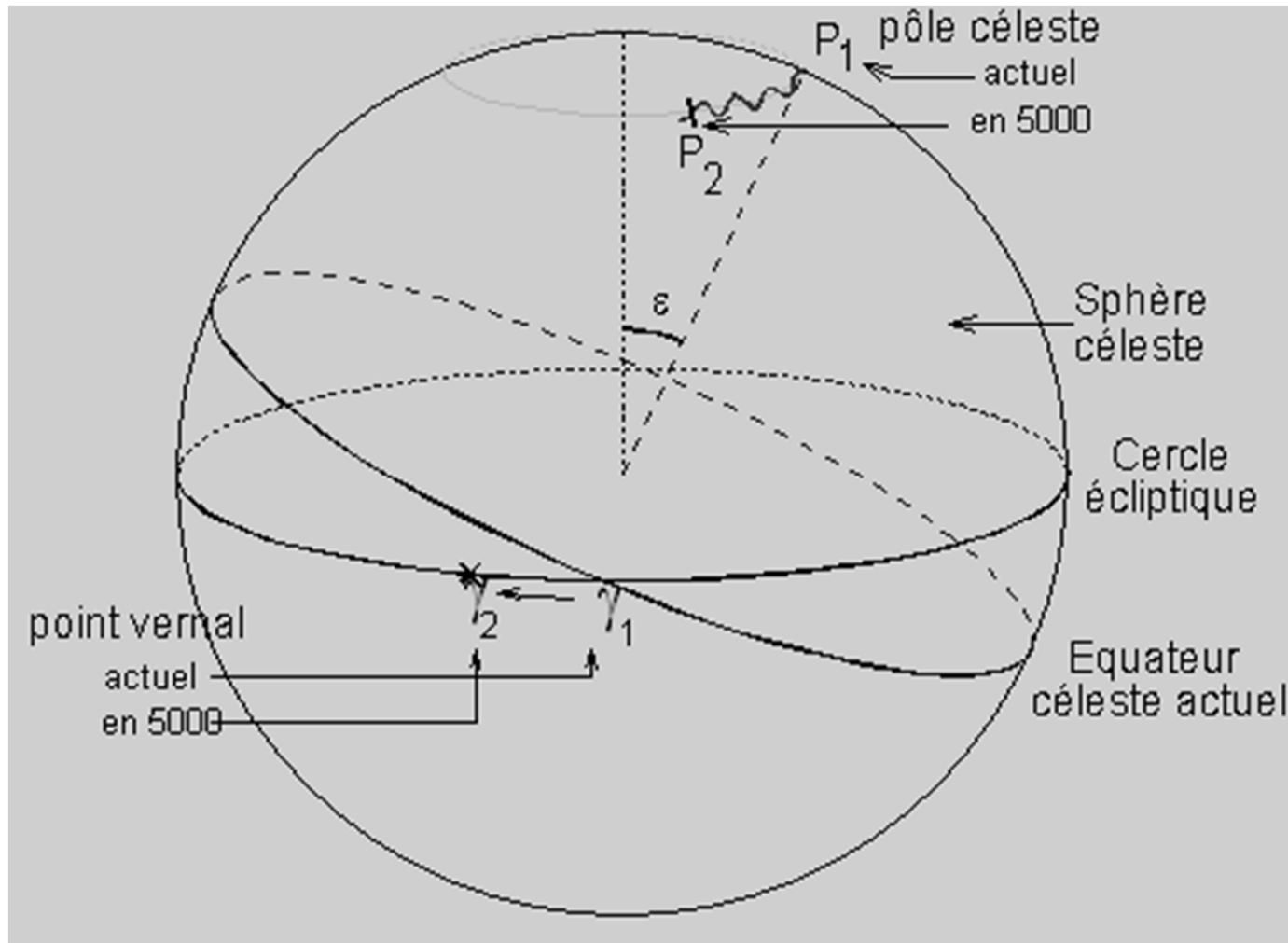
A deux positions OP et OP_1 de l'axe du monde correspondent deux positions de l'équateur, donc deux points : γ et γ_1 .

$Ec E'c$ = écliptique.

$E E'$ = position de l'écliptique quand l'axe du monde = OP .

$E_1 E'_1$ = position de l'écliptique quand l'axe du monde = OP_1 .

On remarque qu'à deux positions différentes P et P' sur la base du cône, la ligne des équinoxes possède une direction différente.



Le mouvement du point gamma dû à la précession est rétrograde (sens horlogique).

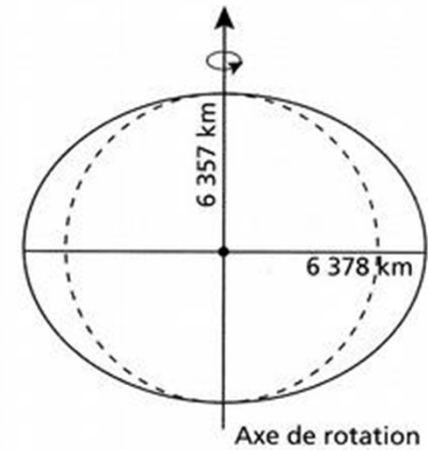
Les causes du phénomène de précession

La Terre n'est pas une sphère homogène, elle est légèrement aplatie aux pôles et présente un renflement au niveau de l'équateur.

Du fait de cette forme aplatie de la Terre, l'attraction du soleil ne passe pas par le centre de la Terre.

Cela crée un couple de force ayant tendance à ramener l'équateur dans le plan de l'écliptique, mais la force centrifuge due à la rotation de la Terre s'oppose à ce couple.

Il en résulte le mouvement de précession de l'axe de rotation de la Terre.



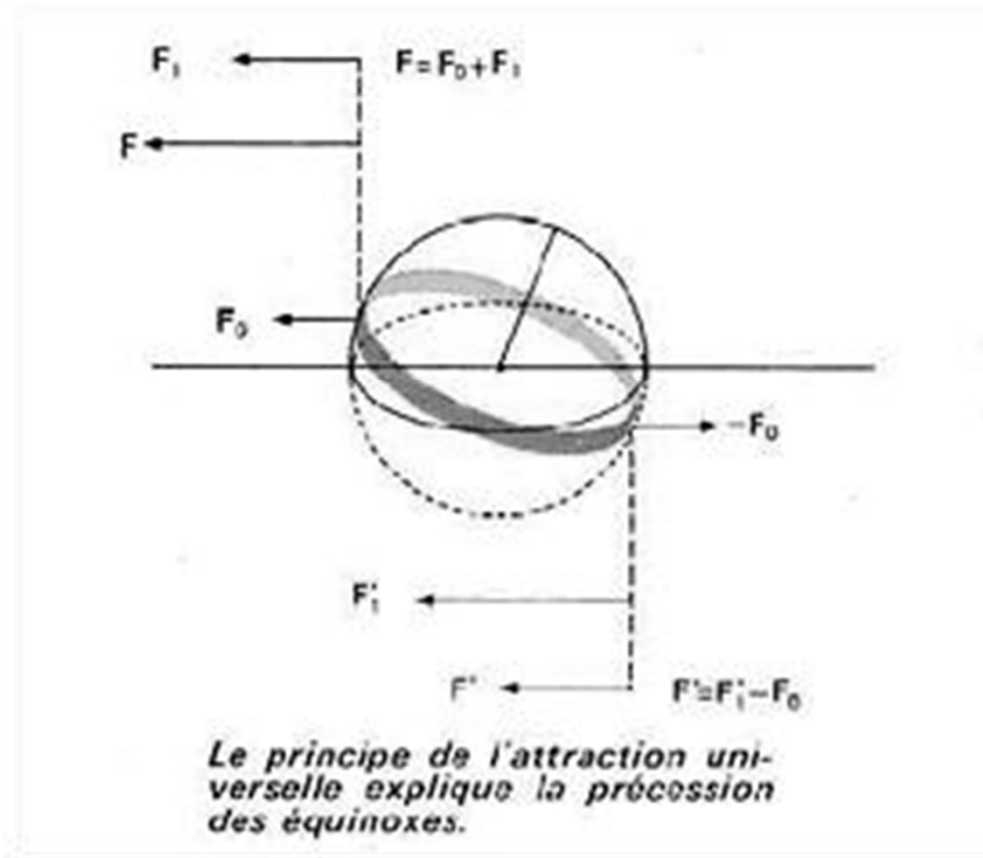
Les forces résultantes F et F' sont le résultat de l'*attraction solaire sur le bourrelet équatorial en rotation*, F' étant cependant de même moins importante que F en raison du principe de gravitation : la force est inversement proportionnelle au carré de la distance.

On a deux couples de forces :

✓ F_0 et $-F_0$: forces dues à la force centrifuge de la Terre.

✓ F_1 et F_1' : forces dues à la gravitation.

Schéma représentant les forces s'exerçant sur la Terre :



Mouvement secondaire affectant la rotation : la nutation

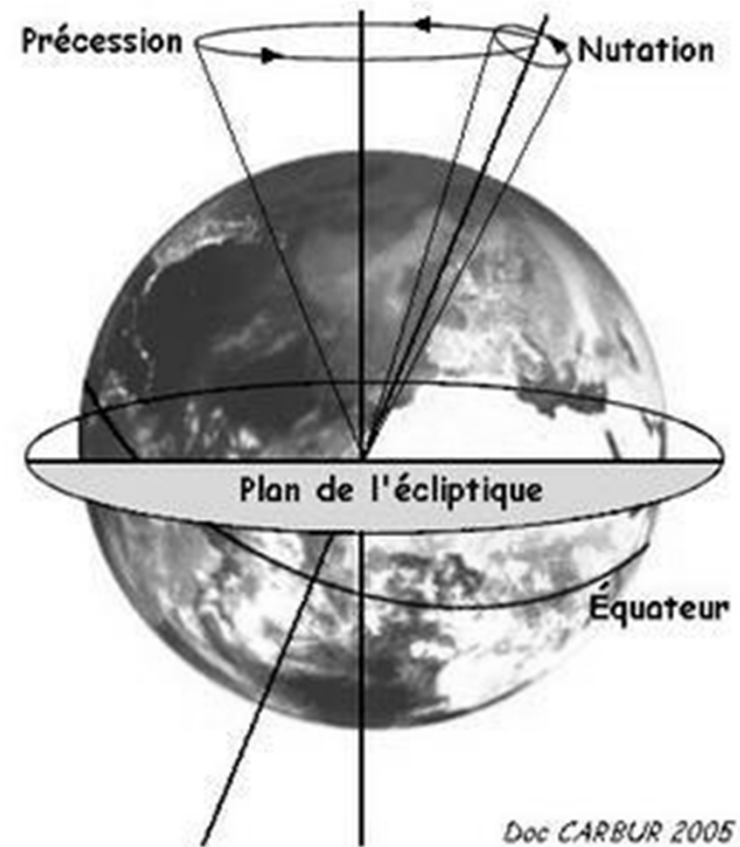
Le mouvement de précession étant déjà compliqué, il est pourtant encore affecté par celui de la *nutation*.

L'influence de la gravité lunaire fait osciller l'axe terrestre dans son déplacement de précession.

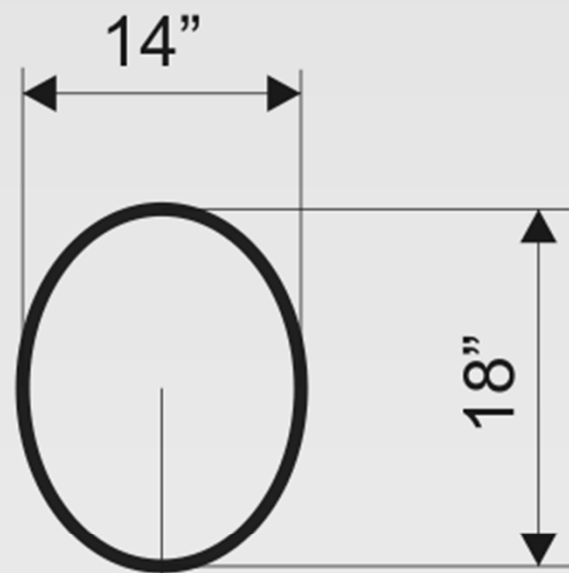
La *nutation* est un *mouvement giratoire de petite amplitude de l'axe de rotation terrestre* qui dessine sur la sphère céleste une *petite ellipse* qui est *parcourue en 18 ans et 7 mois environ*.

Le *demi-grand axe de cette ellipse* est de *9 secondes d'arc environ* ; ce qui représente la dimension angulaire d'un kiwi vu à 1 000 mètres de distance.

L'obliquité de la Terre varie donc de $23^{\circ}27' \pm 9''$, c'est-à-dire de $23,45^{\circ} \pm 0,0025^{\circ}$.



© Serge BERTORELLO

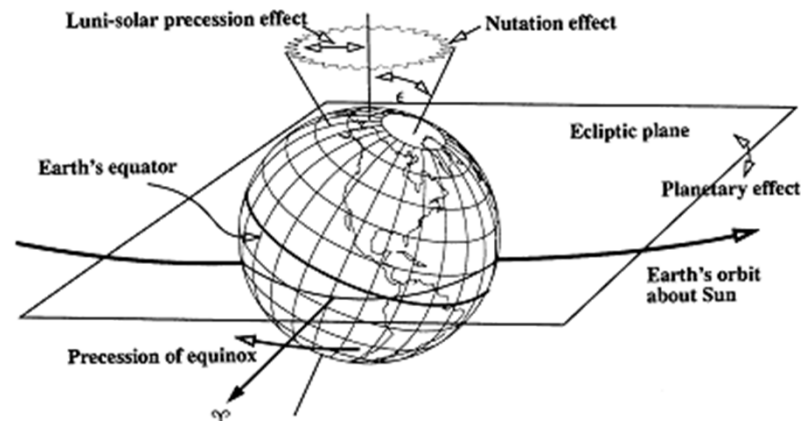
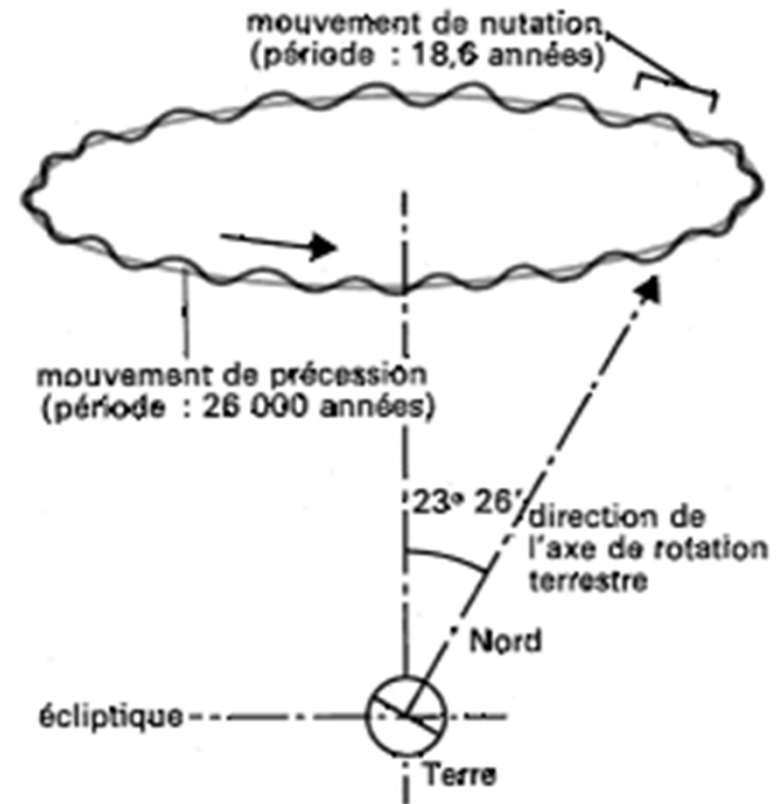


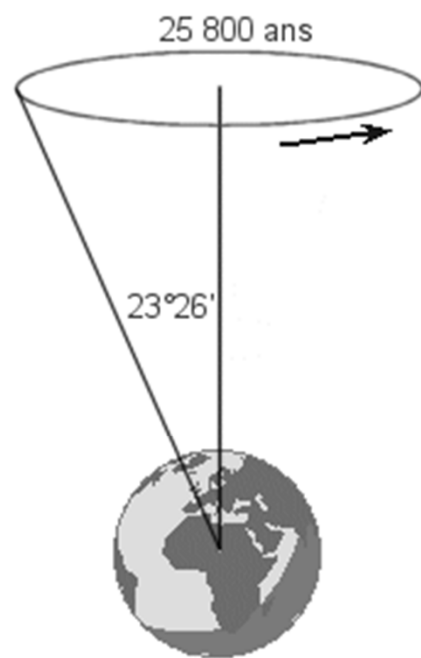
Vers le pôle
de l'écliptique

C'est l'astronome britannique *James Bradley* qui a découvert la nutation en 1748 par l'observation de l'étoile Gamma Draconis (Eltanin) en vue de déterminer sa parallaxe.

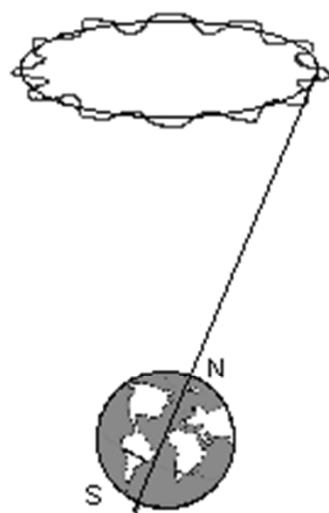
L'influence de la *nutation* sur le mouvement général de précession *amplifie l'écartement ou le resserrement du cercle décrit en raison de la précession* par l'axe de rotation de la Terre.

L'axe polaire oscille donc dans sa marche séculaire selon un lacet.

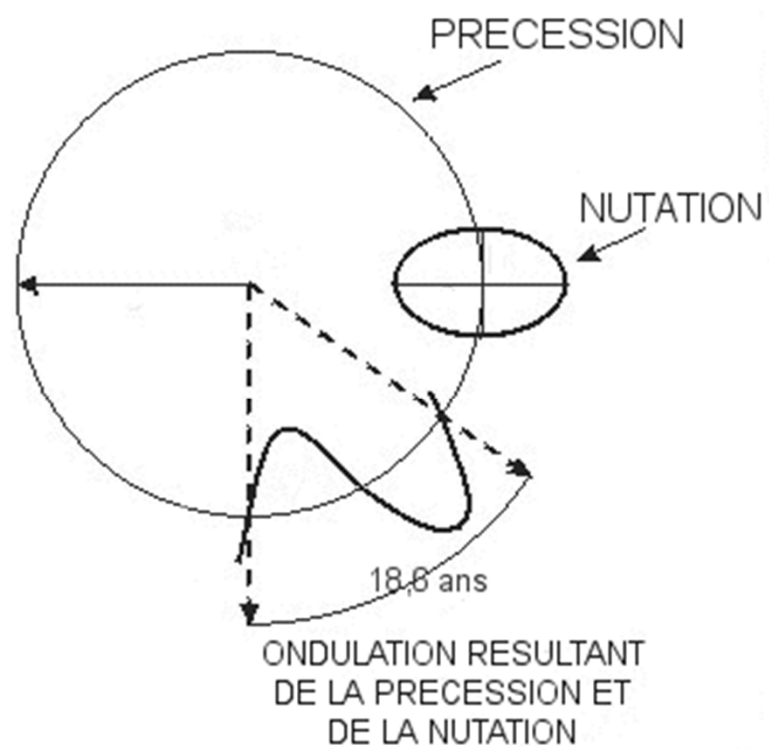




PRECESSION



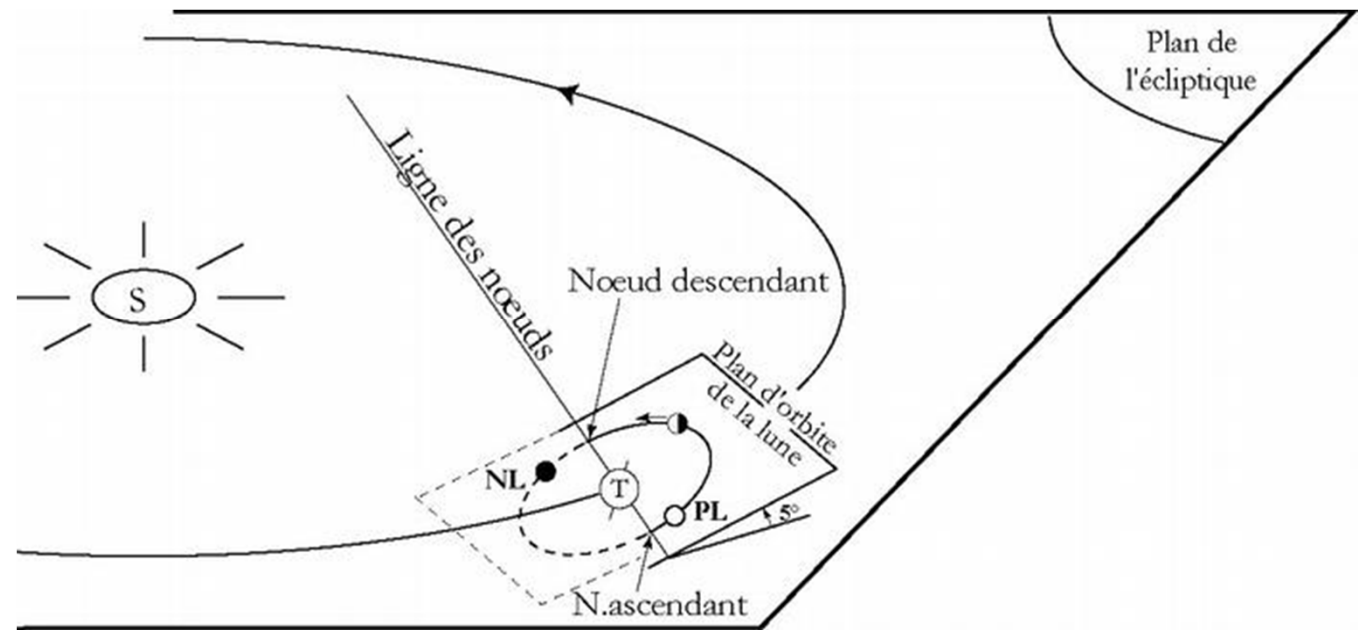
NUTATION



RESULTANTE

Origine du phénomène de nutation

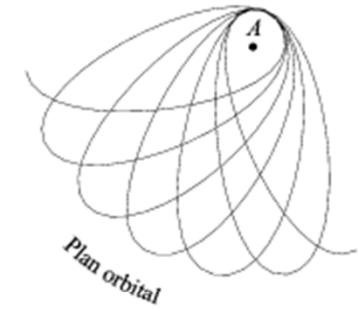
L'origine et la périodicité du phénomène de nutation résultent du mouvement irrégulier de la Lune sur son orbite.



Les points où l'orbite de la Lune croise l'écliptique (plan orbital de la terre) s'appellent les « *nœuds* » lunaires : le nœud ascendant est celui où la Lune passe vers le nord de l'écliptique et le nœud descendant est celui où elle passe vers le sud. Le *plan de l'orbite lunaire est incliné en moyenne de $5,145\ 396^\circ$ par rapport à l'écliptique.*

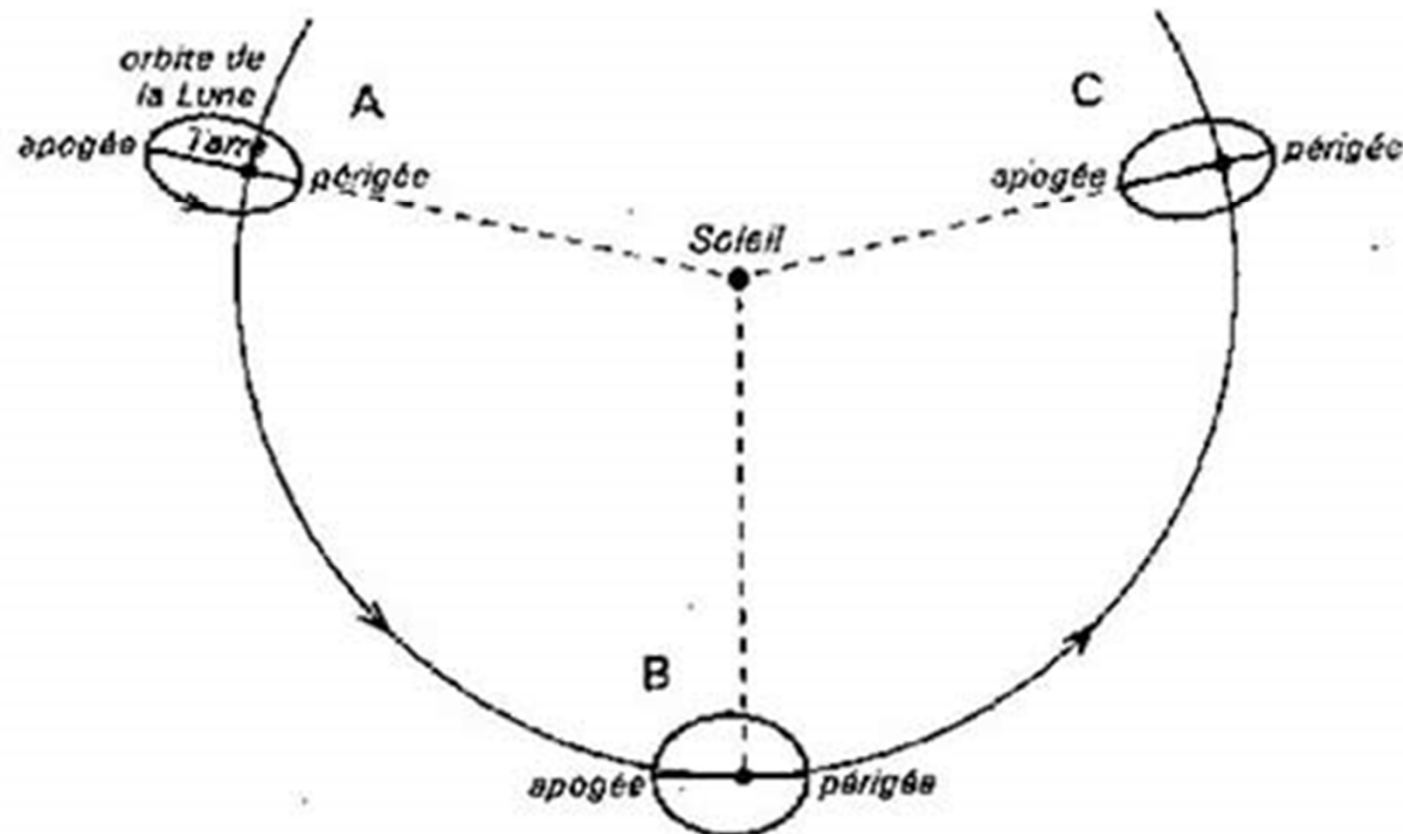
✓ Tout d'abord, cette inclinaison peut varier légèrement car la Lune est plus liée à la Terre qu'au Soleil (*l'inclinaison de l'orbite par rapport à l'écliptique varie entre 5° et $5^\circ 18'$, avec une période de 173 jours*).

Comme la Terre est elle-même inclinée de $23,45^\circ = 23^\circ 27'$ par rapport à l'écliptique, *l'inclinaison du plan orbital lunaire par rapport à l'équateur terrestre varie donc entre $28,60^\circ$ et $18,30^\circ$.*



✓ Ensuite, la droite joignant le périhélie à l'apogée de la Lune (appelée grand axe de l'orbite lunaire ou encore *ligne des apsides*) tourne dans le sens direct (sens contraire des aiguilles d'une montre), et effectue une rotation complète en 8,85 ans.

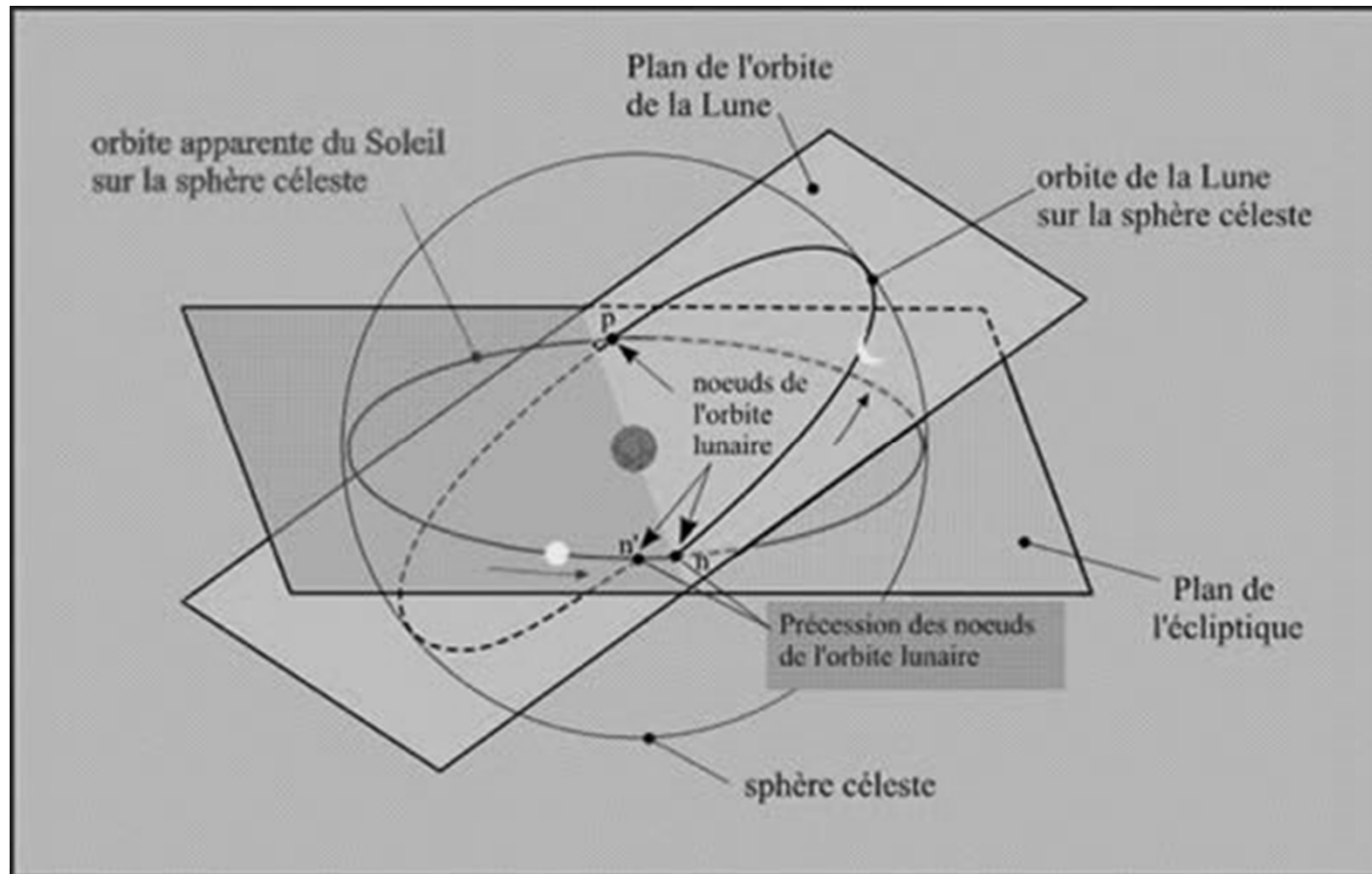
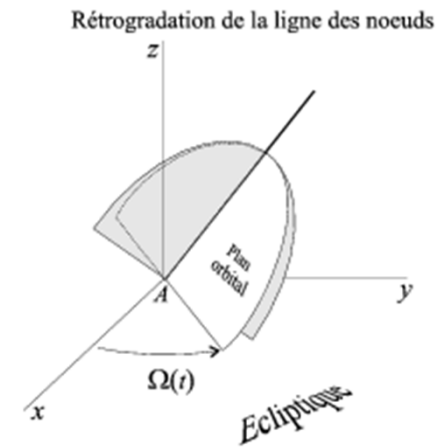
Cette lente rotation provoque une *avancée du périhélie de 3° à chaque révolution sidérale*.



✓ Enfin, *la ligne des nœuds* (intersection entre l'écliptique et le plan de l'orbite lunaire) *accomplit un mouvement de précession et parcourt une révolution dans un sens rétrograde en 18,61 ans.*

C'est en fait *le plan de révolution de la Lune autour de la Terre qui subit une précession d'une période de 6 793,5 jours (18,5996 années).*

Cette précession est provoquée par la gravitation du Soleil et, dans une moindre mesure, par le bourrelet équatorial de la Terre.



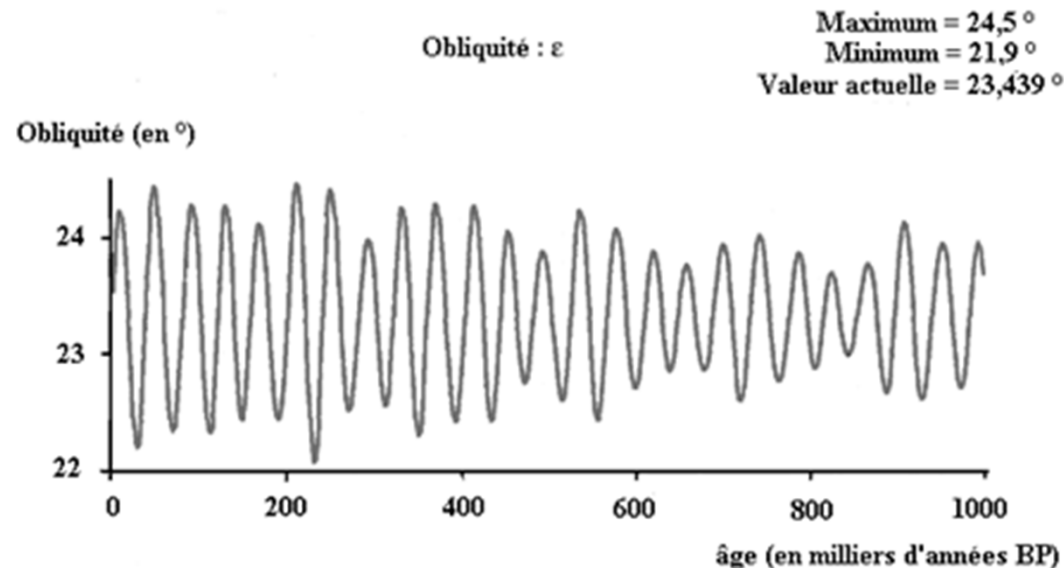
Mouvement secondaire affectant la rotation : la variation de l'obliquité de l'écliptique

Vraisemblablement *responsable, en majeure partie, des cycles de réchauffements et de glaciations terrestres*, la *variation de l'obliquité de l'écliptique* est un *mouvement secondaire lent et peu perceptible*.

L'obliquité est *actuellement de 23°27'* et *diminue depuis un maximum il y a environ 10 000 ans*.

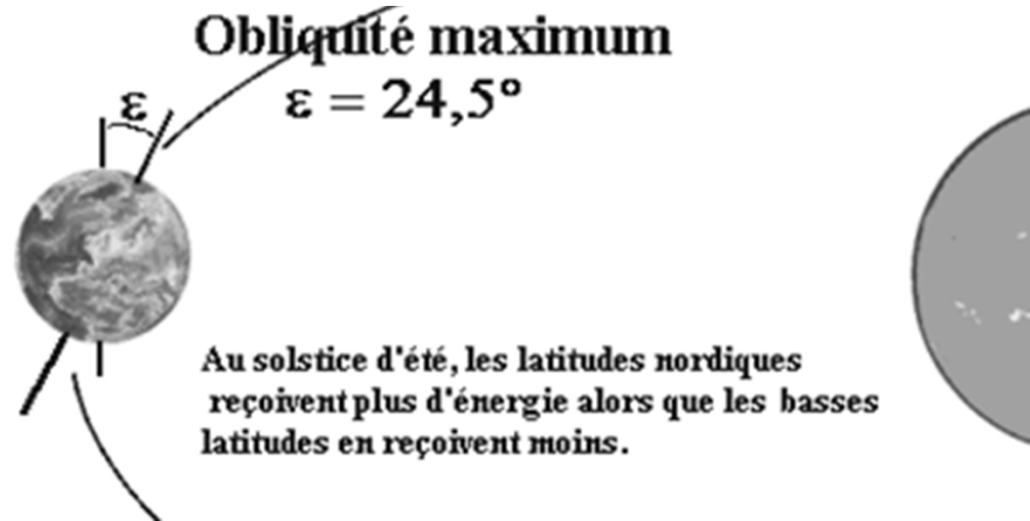
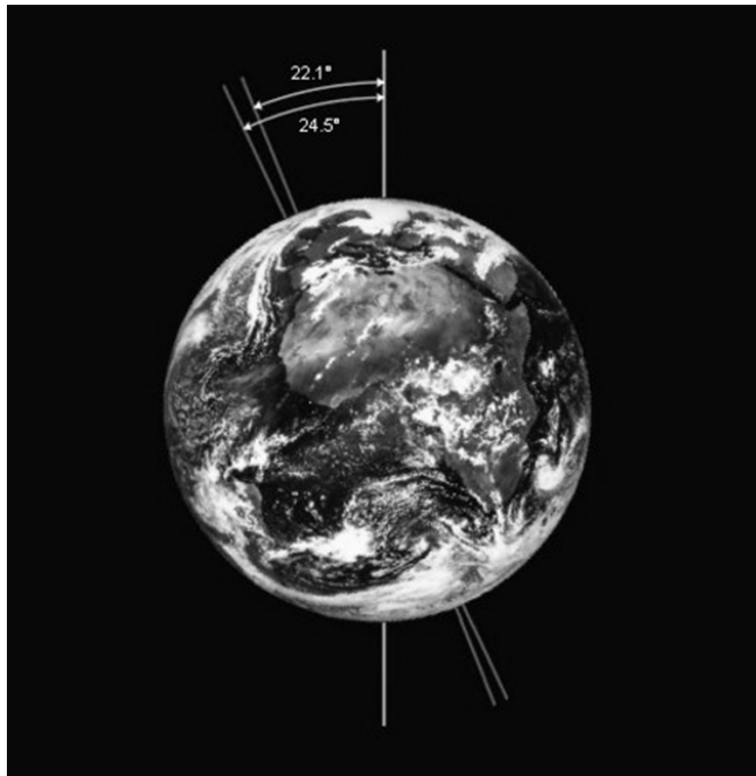
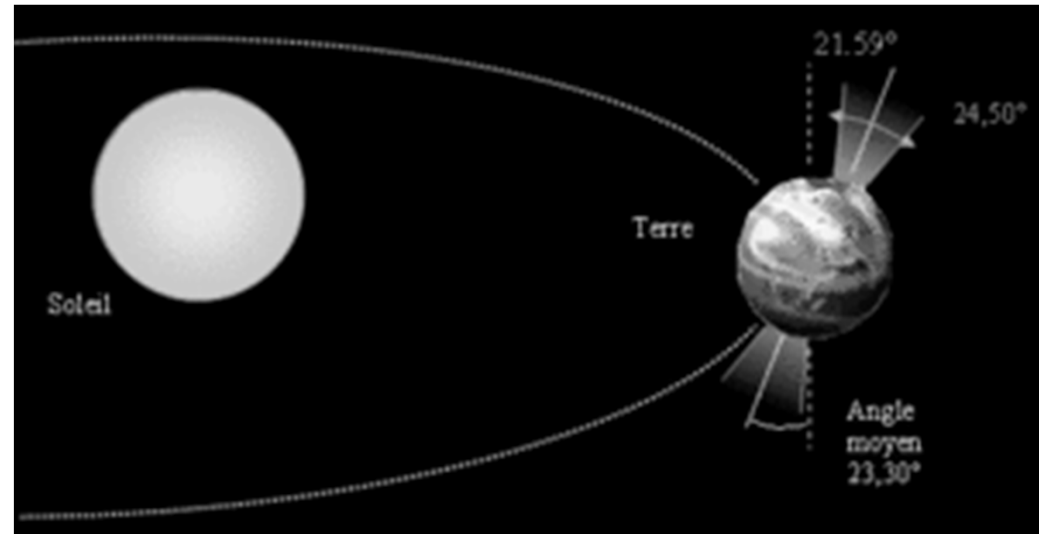
Cette *diminution, de 0,48'' par an*, est due à la *présence des planètes géantes en orbite autour du Soleil*. Jupiter principalement et, dans une moindre mesure, Saturne perturbent les positions des autres planètes de plus faibles masses et désorientent les axes de rotations.

L'écliptique oscille en fait entre deux valeurs angulaires proches et selon un cycle étalé dans le temps.

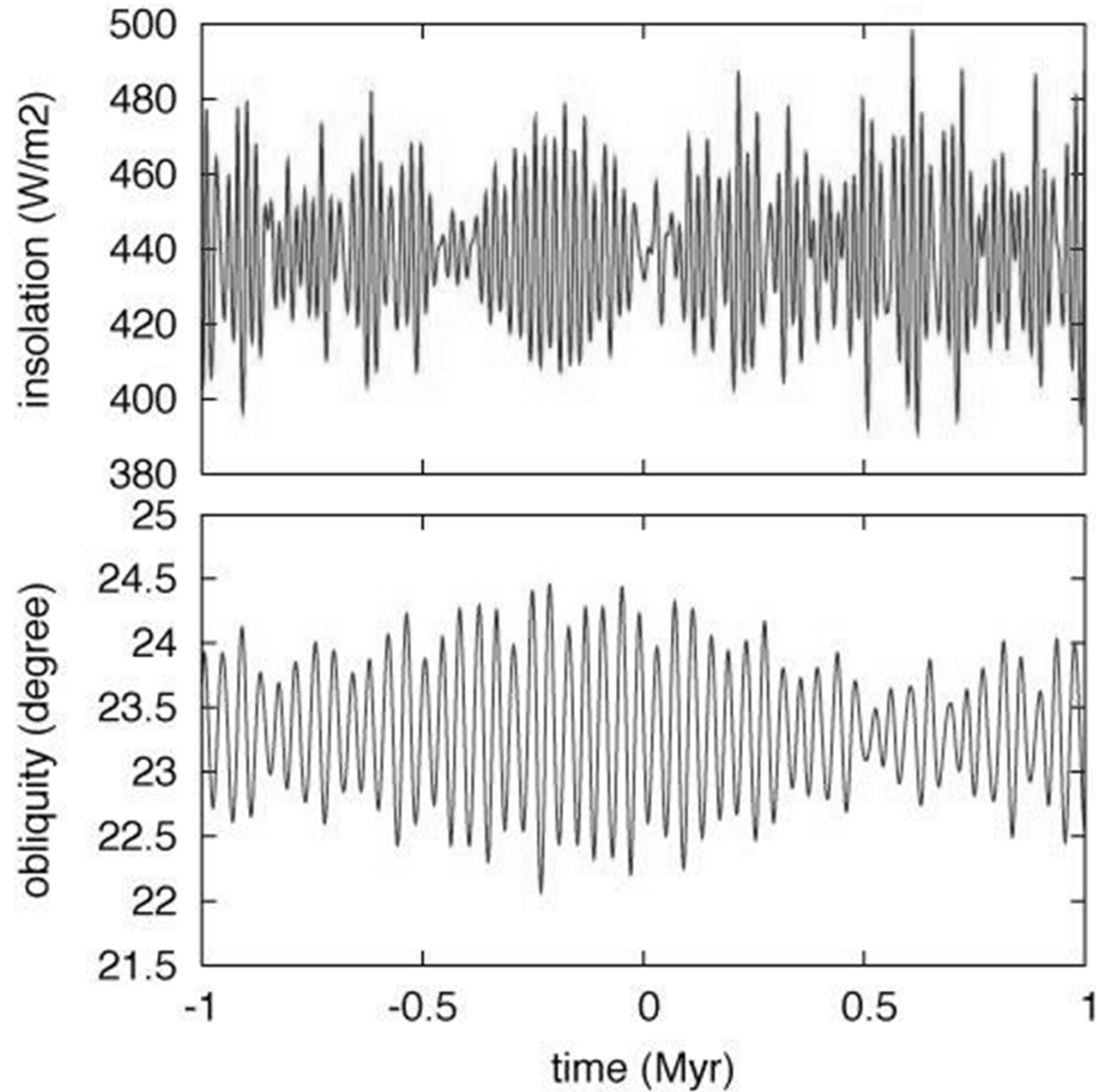


Par conséquent, il faut *environ 41 000 ans* à notre planète pour faire varier son angle entre $24,5^{\circ}=24^{\circ} 36'$ et $21,9^{\circ}=21^{\circ} 59'$.

La première valeur est en elle même une approximation puisqu'elle n'a jamais été observée.

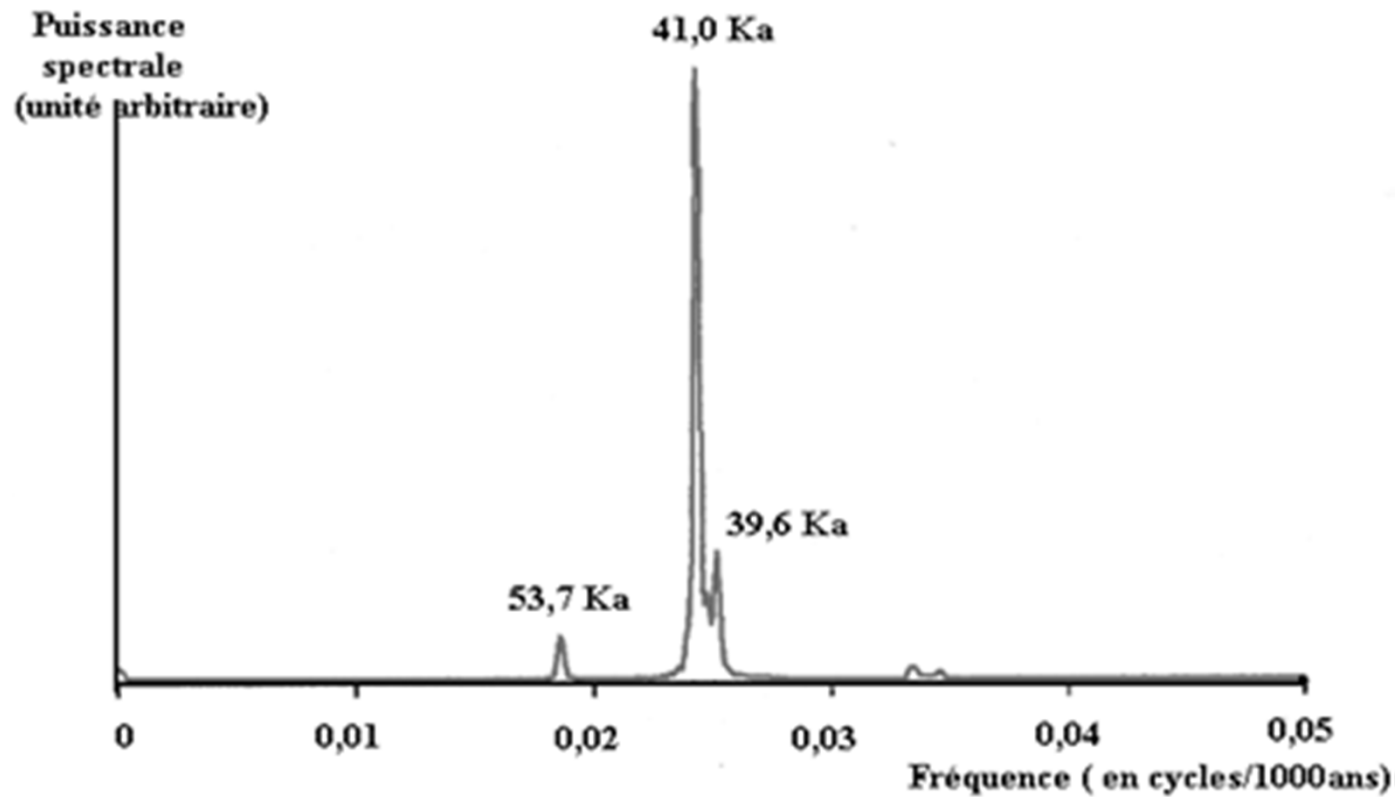


L'évolution de l'obliquité de la Terre en degrés, de -1 à +1 millions d'années (en-dessous), et de l'insolation en été sur la surface de la Terre à une latitude de 65 degrés Nord (au-dessus).



La communauté des paléoclimatologues a utilisé successivement les solutions planétaires calculées à l'Institut de Mécanique Céleste et à l'Observatoire de Paris par Bretagnon (1974) et Laskar et al. (1993). La durée de validité de cette dernière solution est d'environ 10 millions d'années mais le progrès dans la collecte des données géologiques exigeait une nouvelle solution.

A cause du comportement chaotique des orbites des planètes (Laskar, 1989), l'incertitude des calculs est multipliée par 10 tous les 10 millions d'années. Il est ainsi illusoire de rechercher une solution précise de l'évolution passée de la Terre au-delà de 100 millions d'années. En revanche, il est possible d'obtenir une solution précise sur quelques dizaines de millions d'années. La nouvelle solution publiée dans "Astronomy and Astrophysics" peut être utilisée pour le calibrage des données paléoclimatiques pour les dernières 40-50 millions d'années.



Analyse spectrale de la variation temporelle d'obliquité : une composante principale de période 41 000 ans apparaît très clairement.

Remarque : influence de la Lune sur les changements d'obliquité

Les variations d'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre est liée à l'attraction gravitationnelle de la Lune et des autres planètes.

La Lune tend cependant à stabiliser les variations de l'obliquité.

En effet, sans notre satellite, celles-ci seraient beaucoup plus importantes, et la Terre serait hostile à la vie, comme le montre la figure ci-contre, où la Lune est « supprimée » à l'instant 0.

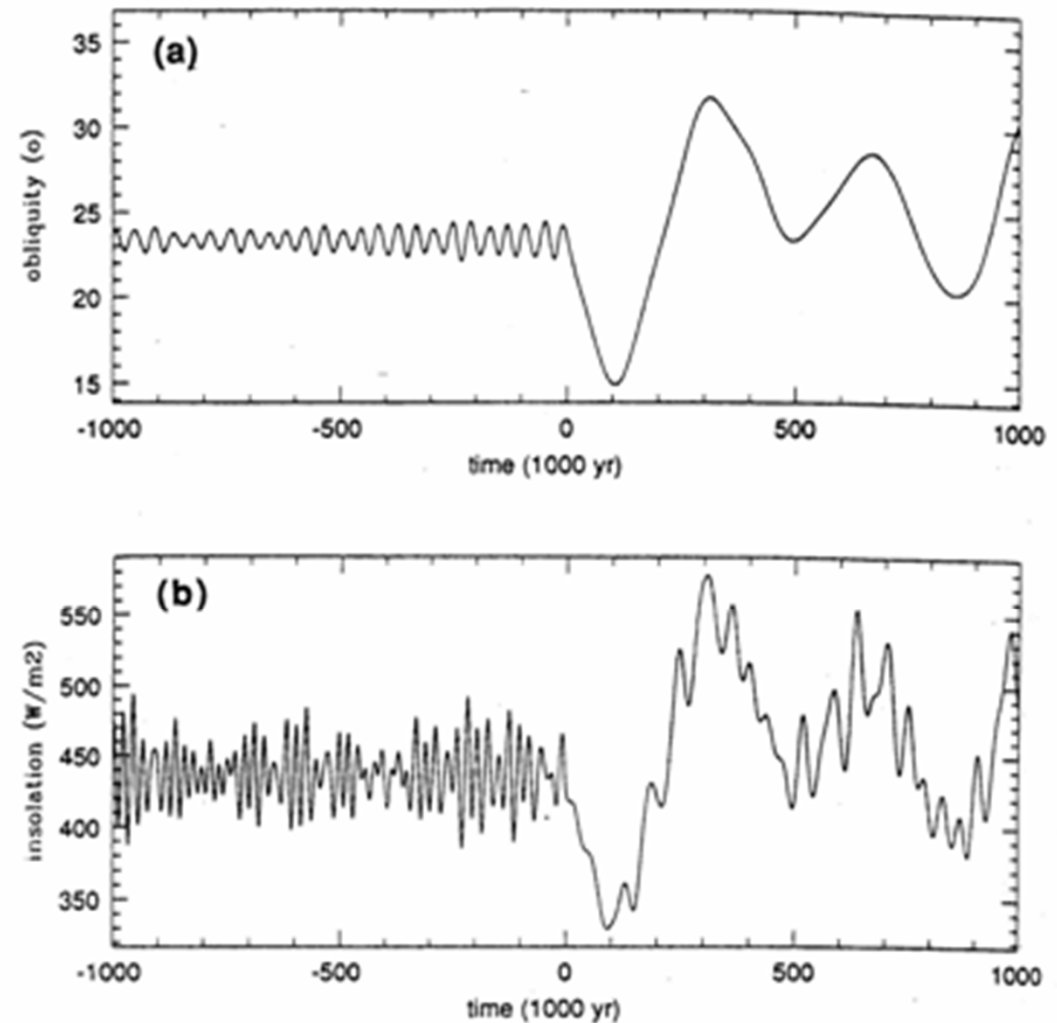
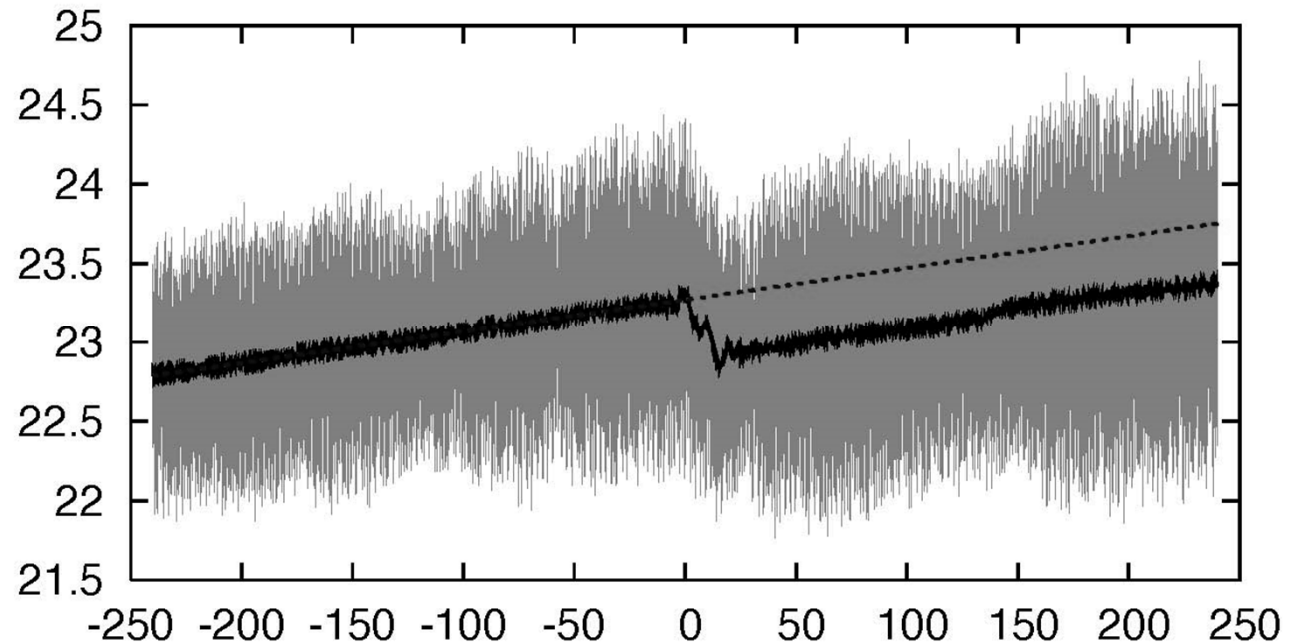


Fig. 11. Changes in obliquity (a) and insolation at 65N ($\lambda_d = 120$ deg) (b) resulting from the suppression at $t = 0$ of the Moon. The Moon is present from -1Myr to 0, and absent from 0 to +1Myr

Evolution de l'obliquité de la Terre en degrés, de -250 à +250 millions d'années.

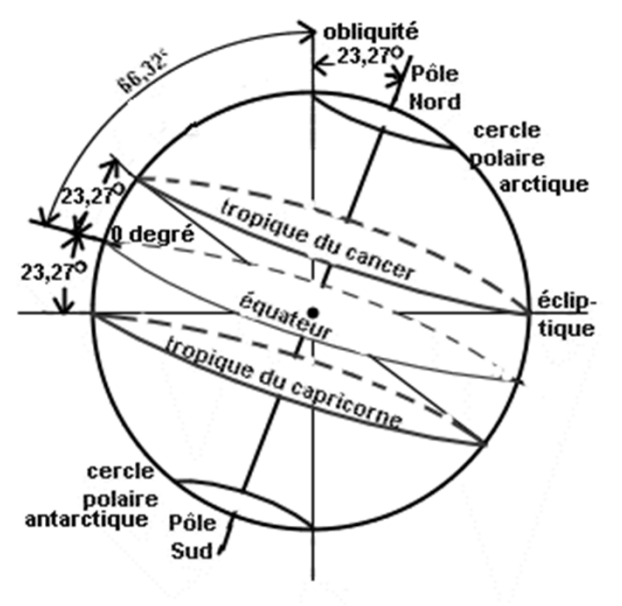
La zone grise représente l'obliquité réelle, alors que la courbe noire représente la valeur moyenne de l'obliquité pour un intervalle-temps de 0,5 millions d'années.



A cause de la dissipation de marée dans le système Terre-Lune, la rotation de la Terre ralentit et la Lune s'éloigne d'environ 3,82 cm/an. Ceci implique une variation lente de l'obliquité (l'angle entre l'équateur et le plan de l'orbite de la Terre). Cet effet provoque une légère augmentation de l'obliquité d'environ 2 degrés par milliard d'années. Toutefois, J. Laskar et ses collègues montrent que *dans un avenir proche, une résonance avec un effet gravitationnel perturbateur de Jupiter et de Saturne fera baisser l'obliquité d'environ 0,4 degrés en quelques millions d'années, avec une possible conséquence sur le climat.* Lorsqu'on regarde l'évolution de l'obliquité de la Terre, il est surprenant de constater (cf : figure) que la traversée de cette résonance est la seule singularité significative, entre -250 millions d'années et +250 millions d'années. Cependant, étant donné que ce changement se produira dans l'avenir, les auteurs constatent qu'à moins que de nouveaux résultats sur l'évolution passée des moments d'inertie de la Terre démontrent que ce passage en résonance aurait pu exister aussi dans le passé, nous devons considérer la proximité de cette résonance comme étant une pure coïncidence.

Effet sur le climat des variations d'obliquité

L'*obliquité* sur le plan de l'écliptique étant égale à la *latitude des tropiques* (= latitude maximale atteinte par le soleil au niveau des solstices) et son *complémentaire* est égale à la *latitude des cercles polaires* (actuellement $90^{\circ}-23^{\circ}27'=66^{\circ}33'$). Autrement dit *une augmentation de l'obliquité entraîne une expansion de la zone tropicale et des zones polaires*, définies astronomiquement.



Selon la valeur de l'obliquité, la limite des zones qui sont éclairées en continu pendant 6 mois puis plongées dans l'obscurité pendant 6 autres mois oscille de $\pm 250\text{kms}$ autour de la limite actuelle (cercles polaires).

Lorsque *l'obliquité diminue*, les saisons deviennent de moins en moins marquées et les conséquences météorologiques s'atténuent.

En général il s'ensuit un *réchauffement planétaire* qui entraîne la *diminution des glaces polaires* (surtout en Arctique) et des glaciers. La banquise peut même, selon les dernières recherches, disparaître totalement et augmenter significativement le niveau des mers du globe.

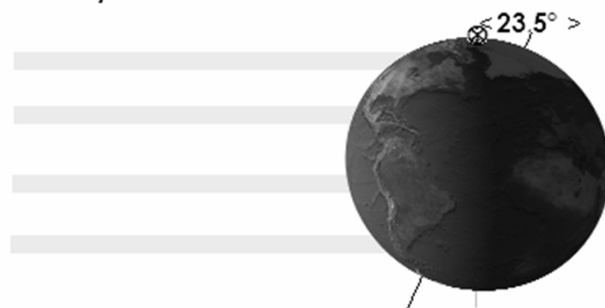
Nous sommes *actuellement dans une période de diminution de l'obliquité* et elle sera de *nouveau minimale dans 12 000 ans*. S'il est indéniable que le *réchauffement* se fait ressentir, même s'il est accentué par l'activité humaine, celui-ci est *irréfutablement dû aussi à cette diminution de notre inclinaison sur l'écliptique*.

LES VARIATIONS DE L'OBLIQUITE DE L'AXE DE ROTATION DE LA TERRE

Le point indiqué par le symbole \otimes est fixe en latitude pour montrer les variations de l'angle d'incidence des rayons solaires.



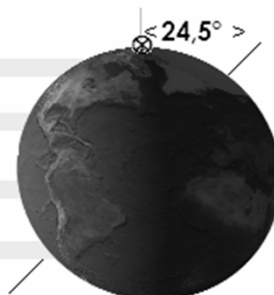
AUJOURD'HUI



IL Y A 11000 ANS

Rayons du Soleil plus rasants en hiver

Angle d'incidence plus fort en été



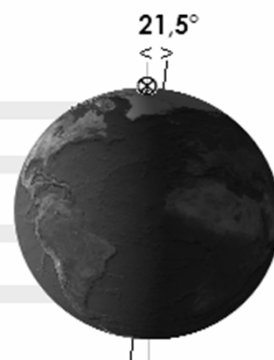
Une plus grande partie du globe est éclairée en permanence en été et plongée dans l'obscurité en hiver.



IL Y A 31000 ANS /
DANS 12000 ANS

Angle d'incidence plus fort en hiver

Rayons du Soleil plus rasants en été

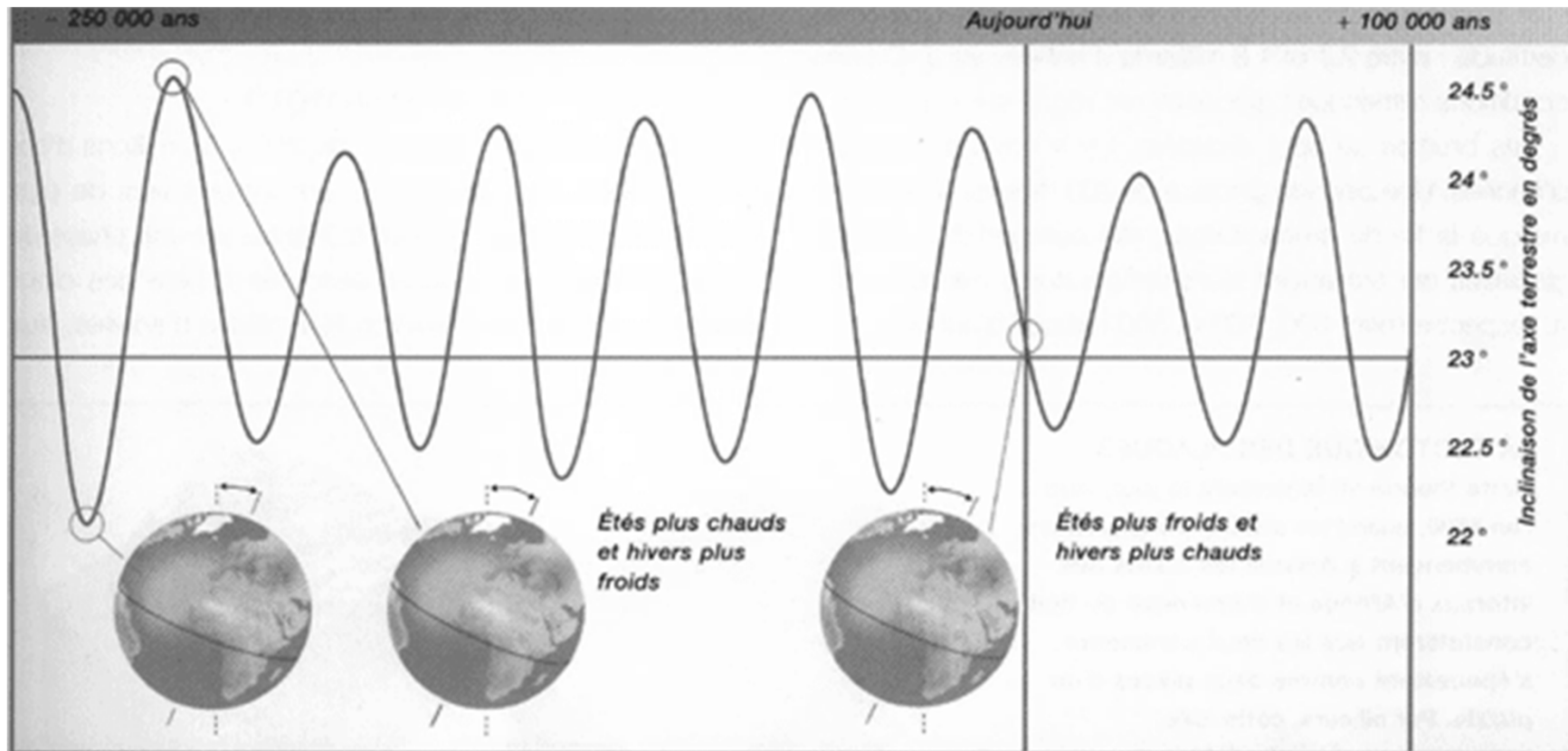


Le contraste entre l'été et l'hiver est atténué si l'inclinaison diminue, et renforcé si l'inclinaison augmente.

N.B. Une inclinaison nulle (axe de rotation vertical) entraînerait une absence de saisons

Plus l'axe est incliné, plus les étés sont chauds, en particulier aux hautes latitudes où les jours sont longs. Inversement, moins il est incliné, plus les étés sont frais.

De la même manière, plus l'axe est incliné, plus les hivers sont froids.



Les saisons sont donc plus différenciées lorsque l'obliquité est maximale.

Par exemple, passer d'une inclinaison de 21 à 24,5° entraîne en été à la latitude de 70° une augmentation de l'insolation reçue ; elle passe de :

$$E.\cos (70-21)=E .0,6561,$$

à :

$$E.\cos (70-24,5)=E.0,7010$$

E étant l'énergie solaire incidente, soit le flux d'énergie reçu par une surface frappée perpendiculairement par les rayons solaires).

Le *flux d'énergie solaire reçu* augmente ainsi de la quantité *E.0,0449*, c'est-à-dire une *augmentation relative* de $(E.0,0449/E.0,6561)$, soit 6,8%.

La périodicité des variations observée conduit, environ *tous les 20 000 ans*, soit à une situation favorable à la fusion de calottes glaciaires aux hautes latitudes de l'hémisphère nord (inclinaison forte, étés chauds) soit à une situation favorable à la croissance des calottes (inclinaison faible, été frais).

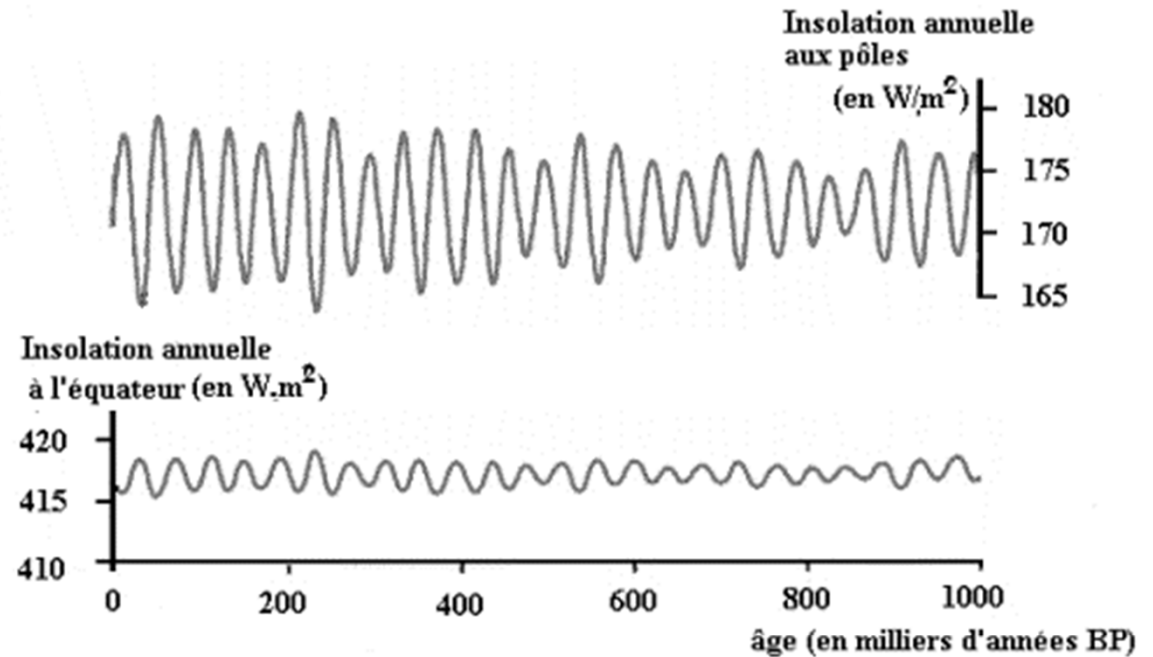
Mais *ce paramètre n'est pas le seul à influencer sur l'établissement des époques glaciaires / interglaciaires* : l'influence de la précession est au moins aussi importante.

En moyenne annuelle, les *variations de l'insolation* sont :

- aux *hautes latitudes*, l'impact est de *quelques pour cent* ;
- aux *basses latitudes*, cet impact est plus faible (*quelques pour mille*).
- aux *pôles en phase avec les variations d'obliquité* ;
- à *l'équateur en opposition de phase*.

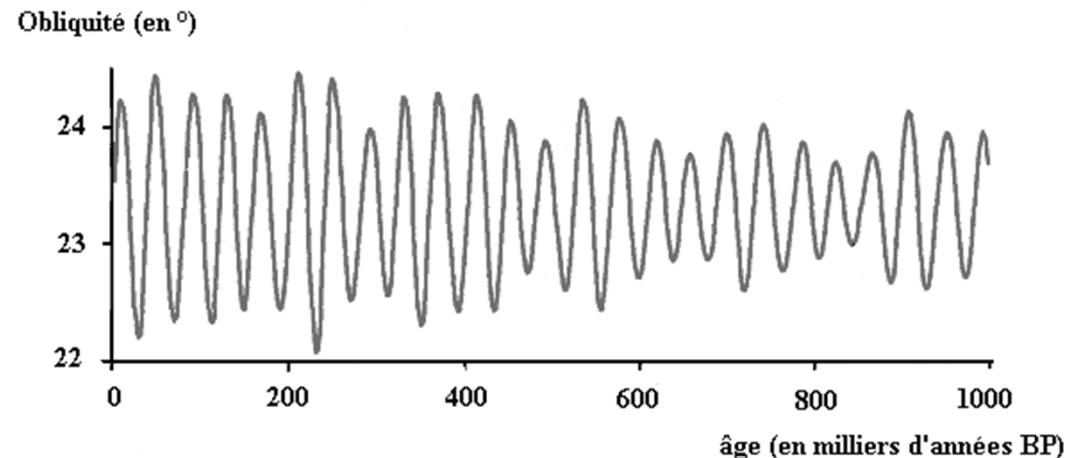
Aux *latitudes non tropicales*, quand l'obliquité est plus forte, les étés sont plus chauds et les hivers plus froids (*saisons plus différenciées*).

Au voisinage du pôle les variations d'obliquité se traduisent par une fluctuation de 14% de l'énergie interceptée au solstice d'été.



Obliquité : ϵ

Maximum = $24,5^\circ$
 Minimum = $21,9^\circ$
 Valeur actuelle = $23,439^\circ$

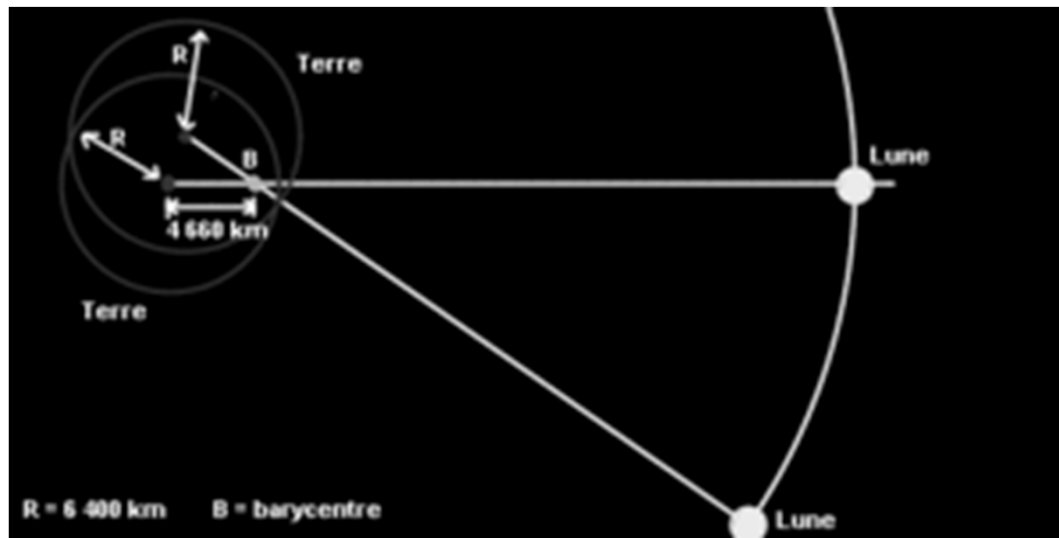


Une *augmentation de l'obliquité de 22° à 25°* :

- ✓ ne change pas la quantité de rayonnement incident reçu par la Terre en moyenne annuelle ;
- ✓ augmente le rayonnement solaire reçu annuellement au nord de 42°N et au sud de 42°S et le diminue entre ces latitudes ;
- ✓ augmente les contrastes saisonniers à une latitude donnée (diminution du rayonnement solaire reçu en hiver et augmentation en été). Cette augmentation du contraste saisonnier se renforce aux moyennes et aux hautes latitudes ;
- ✓ augmente les contrastes inter-hémisphériques puisqu'il y a plus de rayonnement solaire reçu dans l'hémisphère d'été et moins dans l'hémisphère d'hiver ;
- ✓ diminue les contrastes méridiens dans l'hémisphère d'été puisque l'augmentation estivale de rayonnement solaire reçu croît avec la latitude.

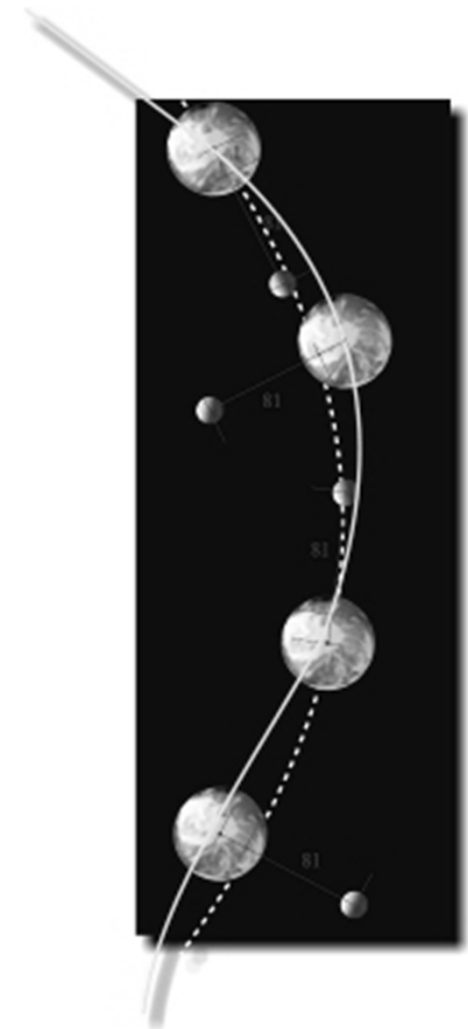
Mouvement secondaire affectant la révolution : l'inégalité mensuelle du Soleil

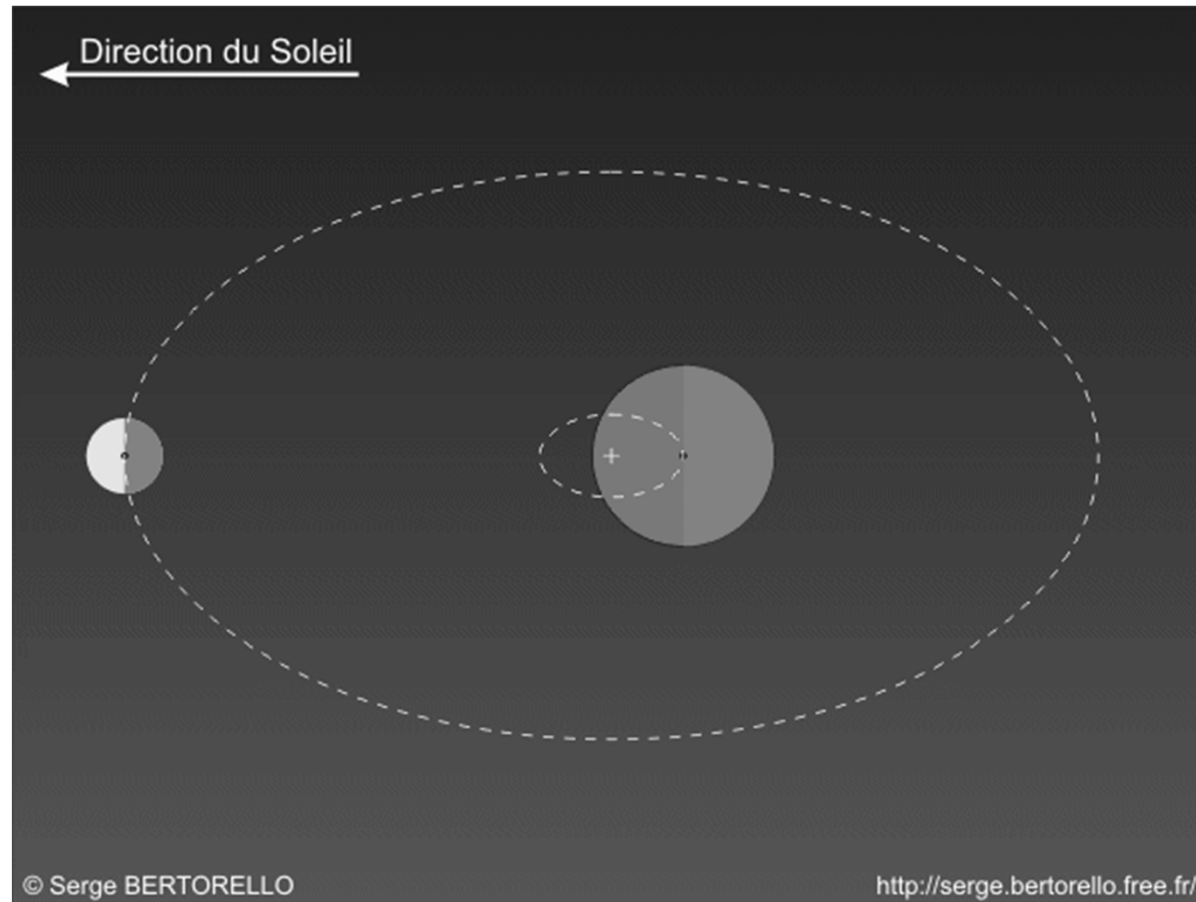
La Terre est un véritable yo-yo sur son orbite. La Lune, par sa présence, crée avec la Terre ce que l'on appelle un *système barycentrique* ; c'est-à-dire que ce n'est pas le centre de la Terre qui tourne autour du Soleil selon une ellipse, mais bien le centre de gravité du système.



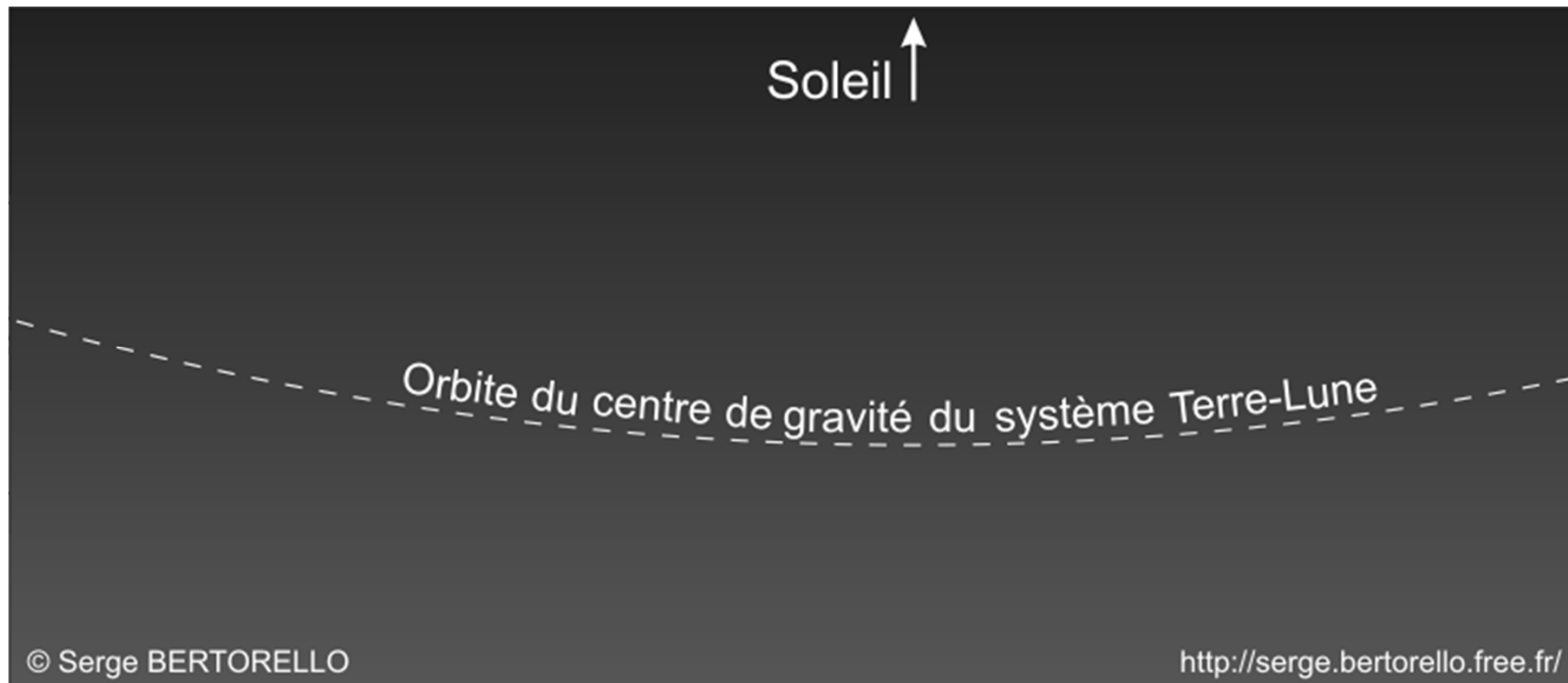
En fait, ce n'est pas la Terre prise en son centre qui se déplace sur le plan de l'écliptique (ligne blanche pointillée) mais bien le *centre de gravité du système Terre-Lune* ; il parcourt une orbite elliptique autour du Soleil, dont ce dernier occupe l'un des foyers.

Cela crée un *balancement du mouvement terrestre, de l'avant à l'arrière, durant chaque cycle lunaire* (ligne jaune continue dans le diagramme ci-contre).

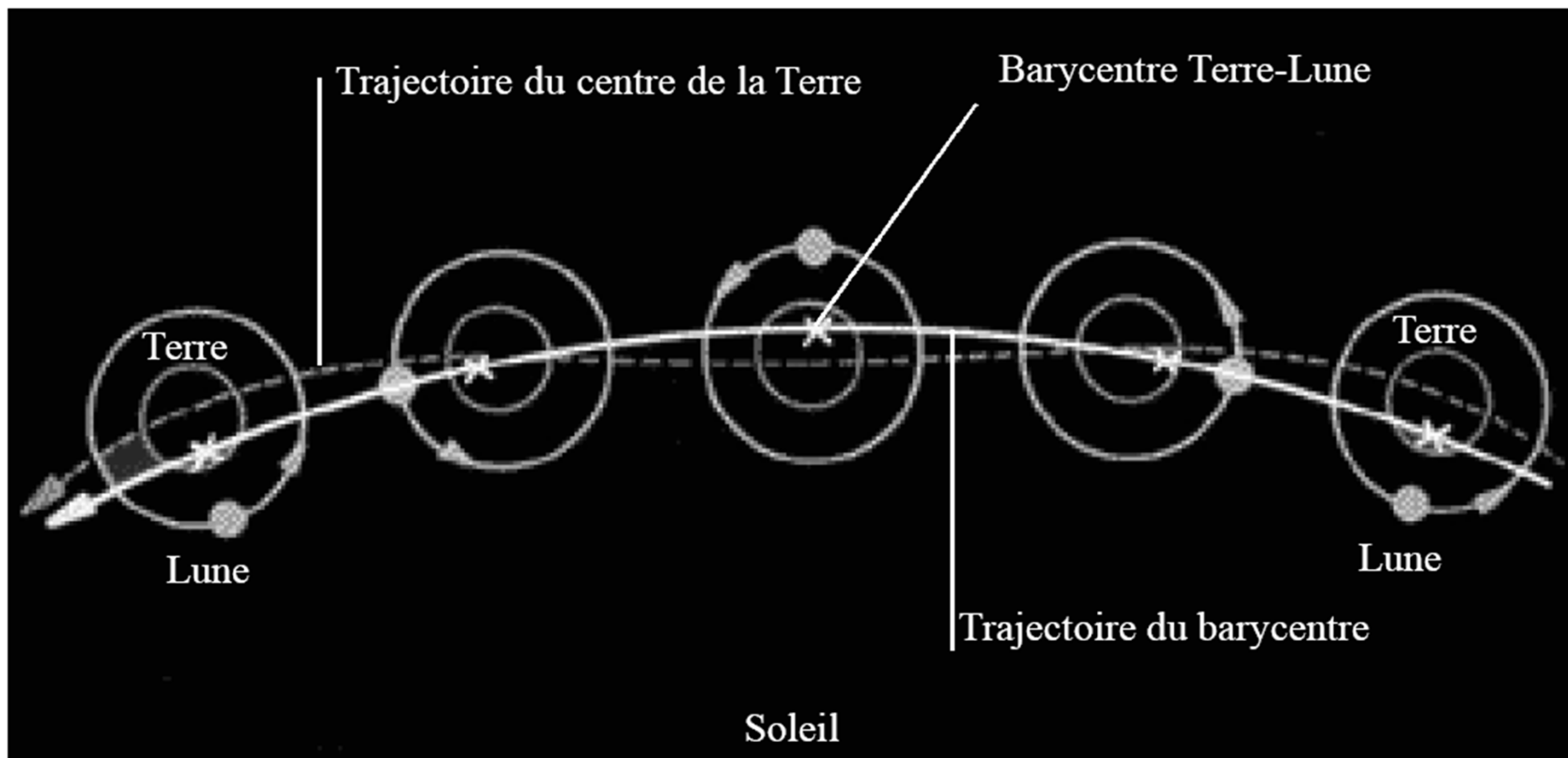




La Terre et la Lune tournent toutes deux autour du centre de gravité de leur système.

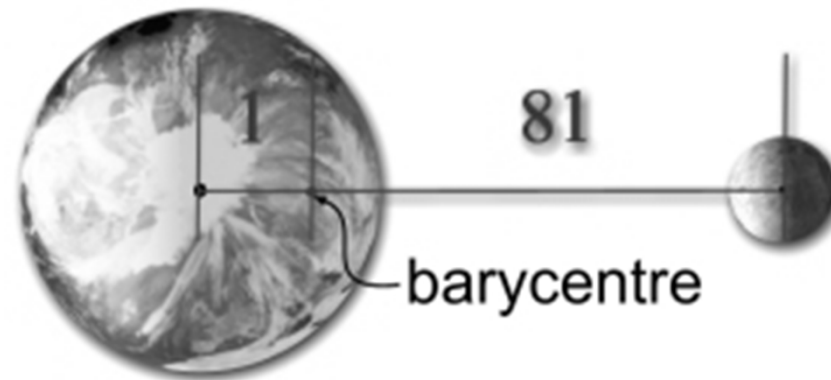


La Terre et la Lune tournent toutes deux autour du centre de gravité de leur système. Par conséquent, la Terre parcourt une trajectoire sinueuse autour du Soleil.



Le mouvement mensuel de la Lune autour de la Terre déplace dans son entier le globe terrestre. 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.*

En fait celui-ci est situé à 4 660 kilomètres du centre de notre planète sur une *ligne* imaginaire joignant le centre de la Terre et le centre de la Lune, et nous tournons donc mensuellement autour de ce point situé à l'intérieur de notre globe au trois quarts de son rayon.



Il faut également garder à l'esprit que *la Lune elle-même n'a pas une orbite fixe et équidistante avec la Terre* et engendre également un mouvement apogée/périgée de sa position par rapport à la Terre.

La distance Terre-Lune influe sur la position du barycentre du système et *ce dernier se déplace plus ou moins profondément sous la croûte terrestre.*

Mouvement faible, mais fortement visible lors des *éclipses* de Soleil : elles sont *totales ou annulaires* selon la distance Terre-Lune au moment de l'éclipse.

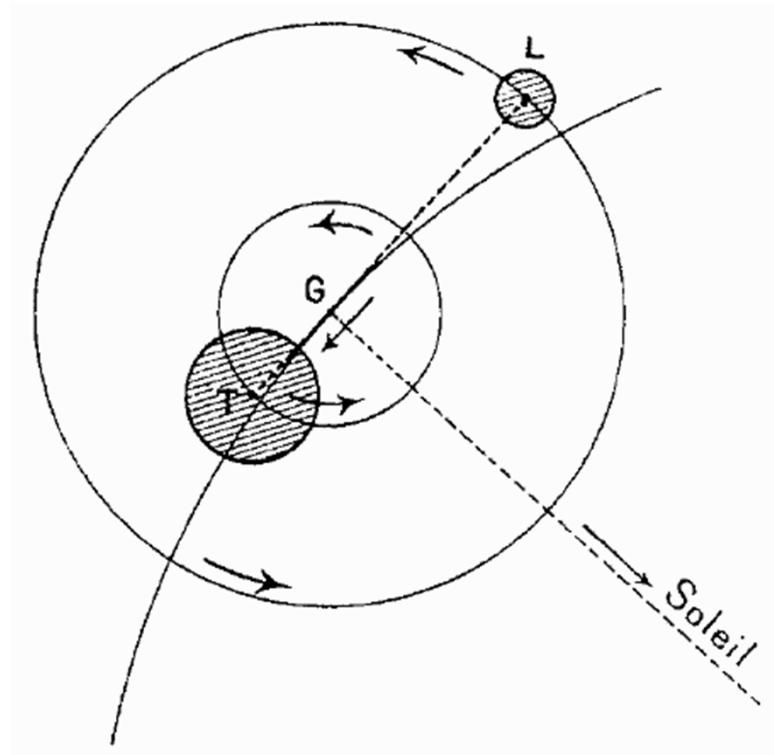
L'inégalité mensuelle du Soleil permet de peser la Lune

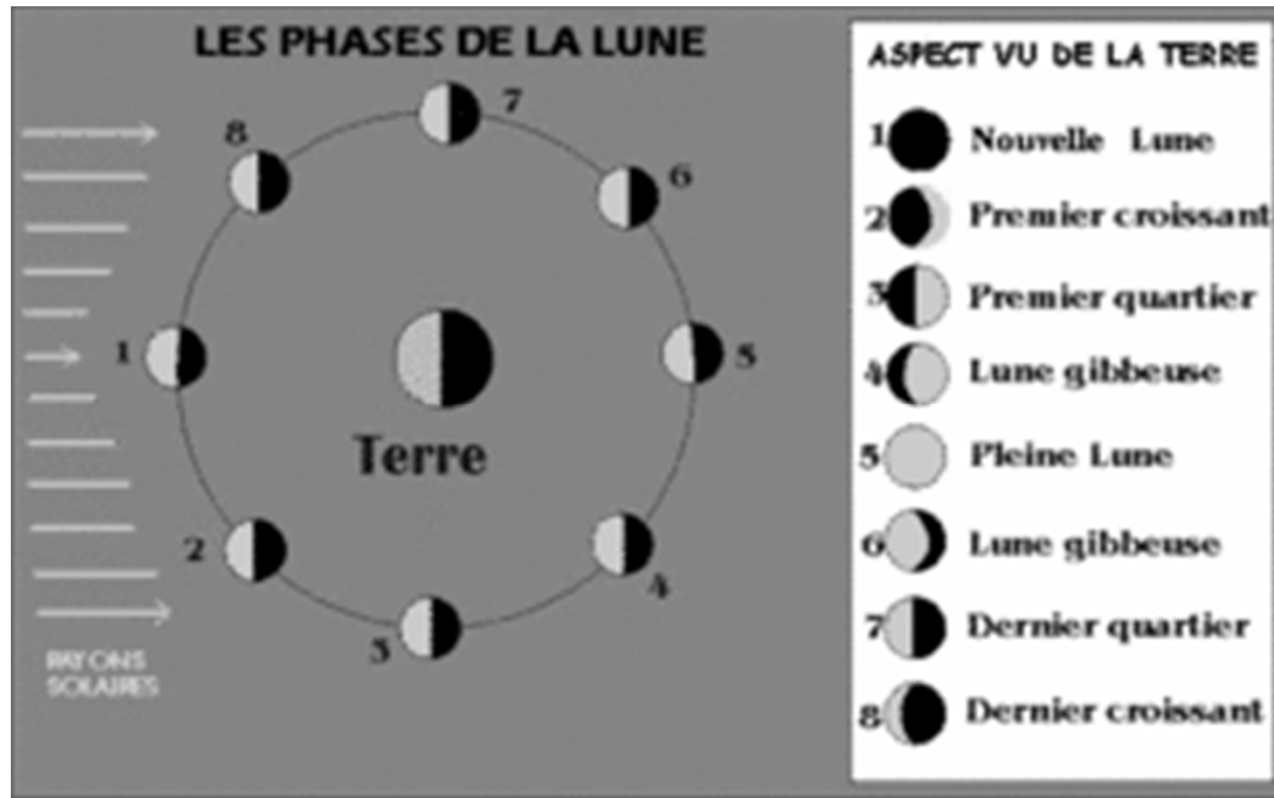
Soit m la masse de la terre, m' celle de la Lune. Le centre des masses G du système (Terre-Lune) se trouve placé entre les centres T et L des deux astres, à une distance de la Terre égale à :

$$TG = D m' / (m + m')$$

D étant la distance Terre-Lune.

La Terre et la Lune se meuvent autour de G , en décrivant deux orbites dont le rapport d'homothétie est $- m / m'$.





A la Nouvelle Lune (Lune invisible depuis la Terre, position 1), notre satellite se trouvant entre le Soleil et nous, nous sommes donc un peu plus loin du Soleil que si la Lune n'existait pas.

Lors de la Pleine Lune (Lune entièrement visible depuis la Terre, position 5), c'est le contraire qui se passe , et nous sommes donc plus proche du Soleil que si la Lune n'était pas là.

Tous les mois le Soleil paraît donc plus petit à la Nouvelle Lune et plus grand à la Pleine Lune. Les variations de diamètre sont bien sûr journalières : tous les jours le Soleil n'a pas exactement la même dimension que la veille. De plus, sa position apparente se déplace quotidiennement un peu par rapport à sa position théorique, qu'il occuperait sans la présence de la Lune (il paraît se déplacer chaque jour de la cent cinquantième partie de son diamètre).

Lors du premier quartier (la Terre et la Lune forment un angle de 90°, position 3) la Terre est en avance sur la révolution du point G, dans son mouvement par rapport au Soleil ; l'inverse a lieu au dernier quartier.

Le mouvement propre de la Terre (et donc le mouvement apparent du Soleil) comporte donc une *inégalité ayant pour* période la révolution synodique de la Lune.

Ceci se traduit, pour nous, par une inégalité de la longitude du Soleil, accessible à l'observation et qu'on appelle *l'inégalité mensuelle*.

Sa demi-amplitude, égale à l'angle sous-tendu, du centre du Soleil, par le segment TG, peut être mesurée grâce aux observations de la longitude du Soleil et vaut 6,43''.

Mais on sait que le rayon R de la Terre est vu, du même point, sous un angle de 8,80'' (parallaxe du Soleil). On a donc :

$$TG = R \cdot 6,43'' / 8,80'' = 0,73 R.$$

Le centre de gravité du système Terre-Lune est donc situé à l'intérieur du globe terrestre, aux trois quarts environ du rayon.

On déduit de là :

$$m' / (m + m') = TG / D = 0,73 R / D$$

Or la distance moyenne de la Lune à la Terre D vaut 60,3 fois le rayon équatorial terrestre, d'où :

$$D/R = 60,3$$

Et :

$$m' / (m + m') = 0,73 / 60,3 = 1 / 82,5$$

$$m' = m / 81,5.$$

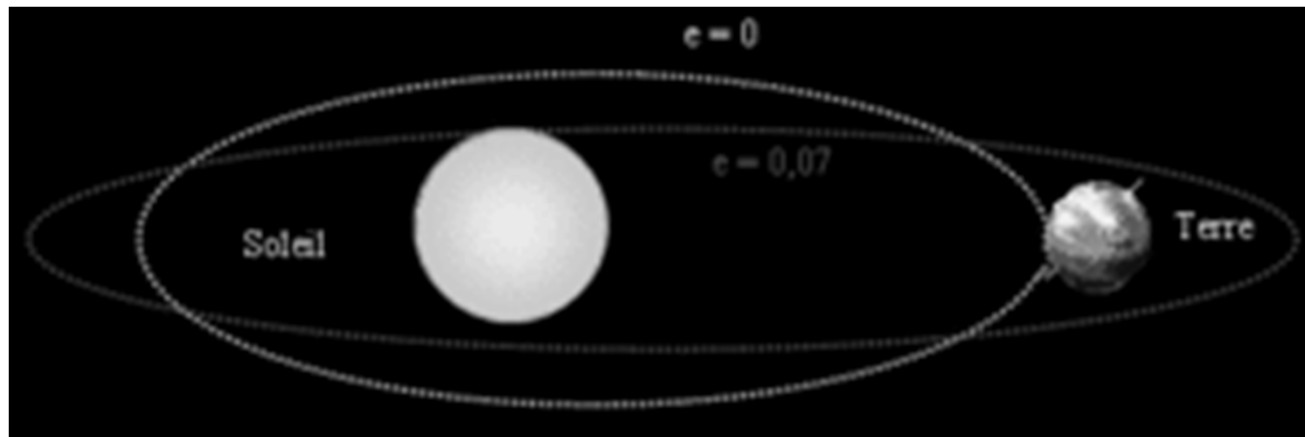
La masse de la Lune vaut 1/81ème de celle de la Terre.

Mouvement secondaire affectant la révolution : la variation de l'excentricité de l'orbite terrestre

Comme nous l'avons vu, la Terre décrit, comme tout corps soumis à la gravité du Soleil, une ellipse autour du Soleil (première loi de Kepler).

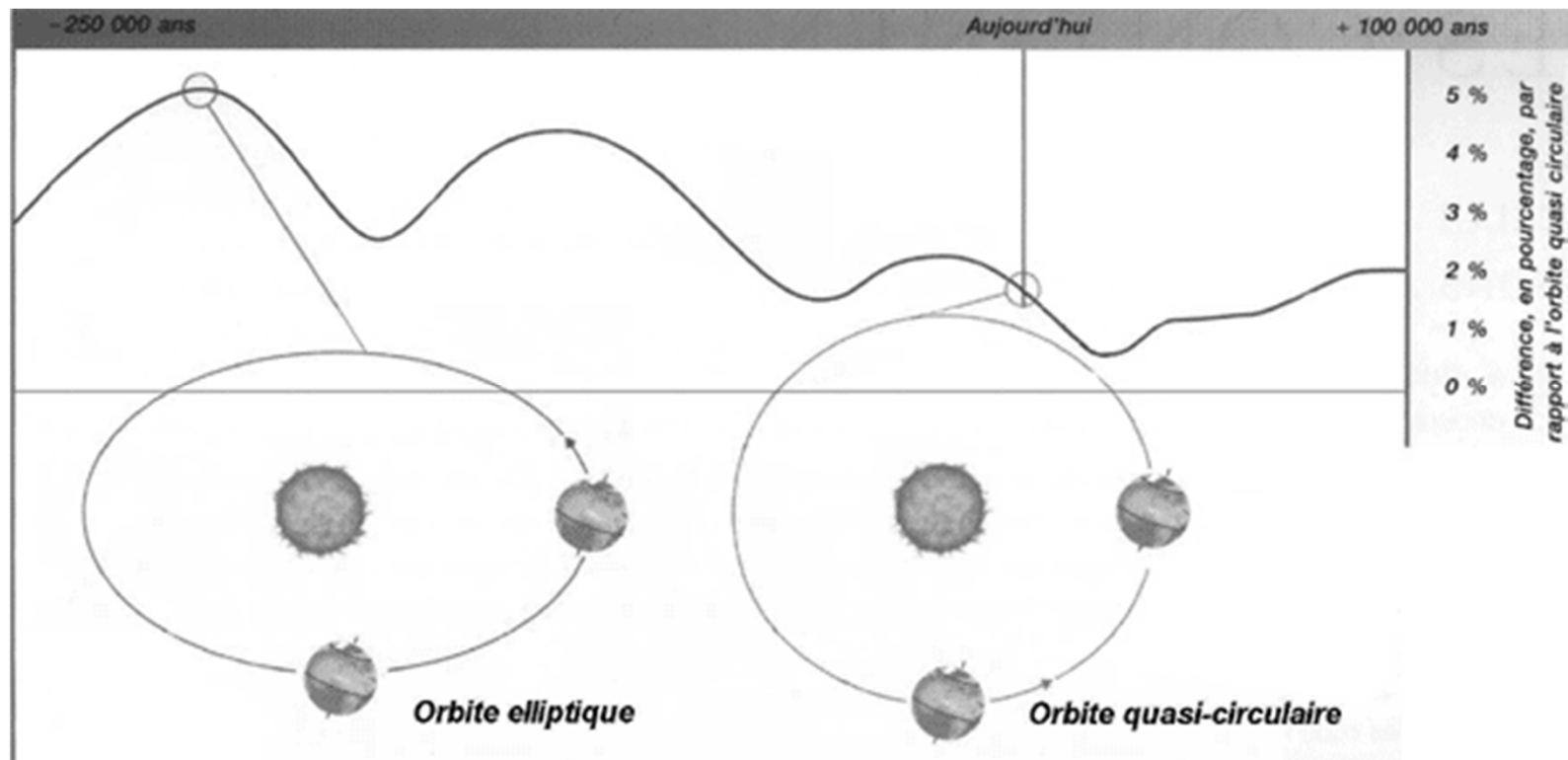
Cette ellipse est très proche actuellement du cercle parfait (ellipse d'excentricité nulle), mais néanmoins l'excentricité n'est pas nulle, et est voisine de $0,0167$, ce qui entraîne une *variation de la distance Terre-Soleil au cours de l'année*.

L'écart entre les distances maximale et minimale est fixé par l'excentricité. Si l'excentricité est nulle, l'ellipse devient un cercle et la distance Terre-Soleil reste constante ; si l'excentricité est de $0,015$ (valeur proche de la valeur actuelle) *la distance Terre-Soleil varie de 3% (2 fois l'excentricité)* entre la position la plus proche et la position la plus éloignée (de $147\,100\,000$ km au périhélie le 3 janvier à $152\,100\,000$ km à l'aphélie le 6 juillet). *L'énergie solaire qui parvient à la Terre* (1367 w/m² en moyenne au cours de l'année) *varie actuellement de 6% (4 fois l'excentricité)* passant de $1\,408$ W/m² au point le plus proche à $1\,326$ W/m² au point le plus éloigné.

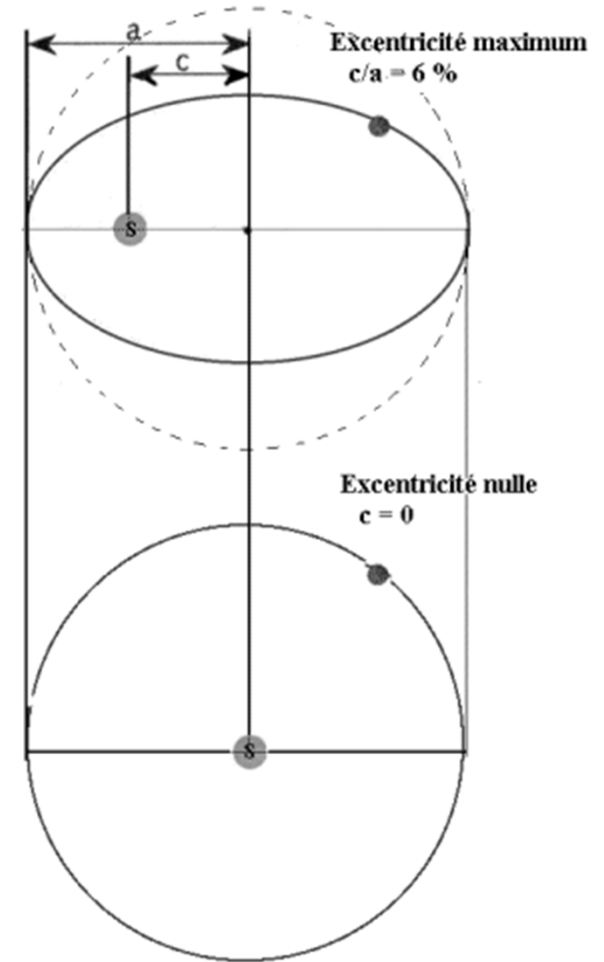
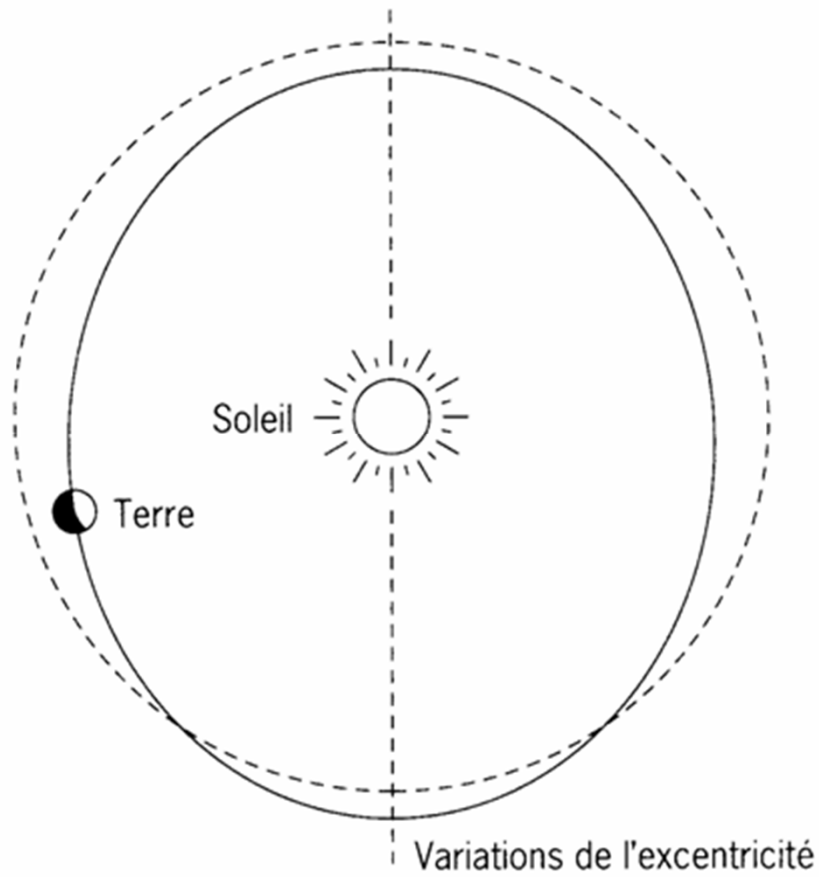


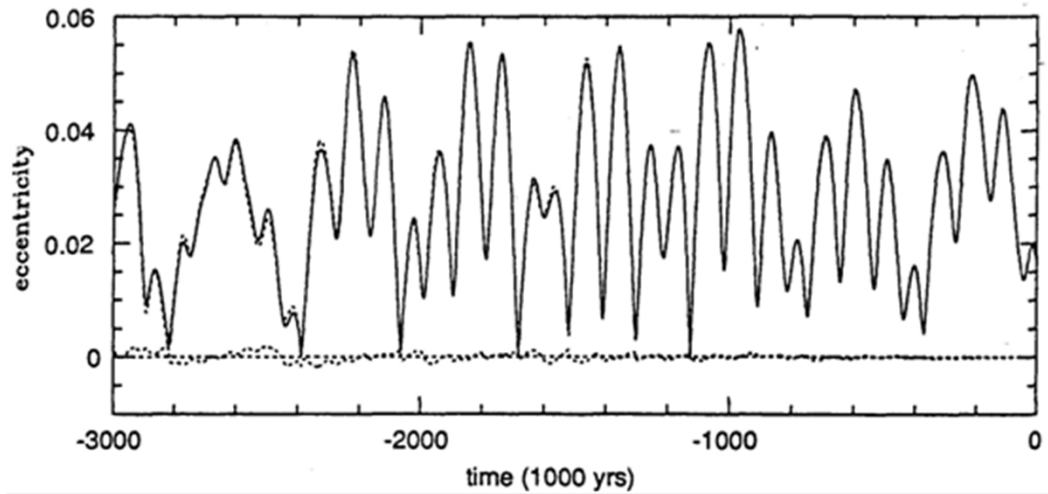
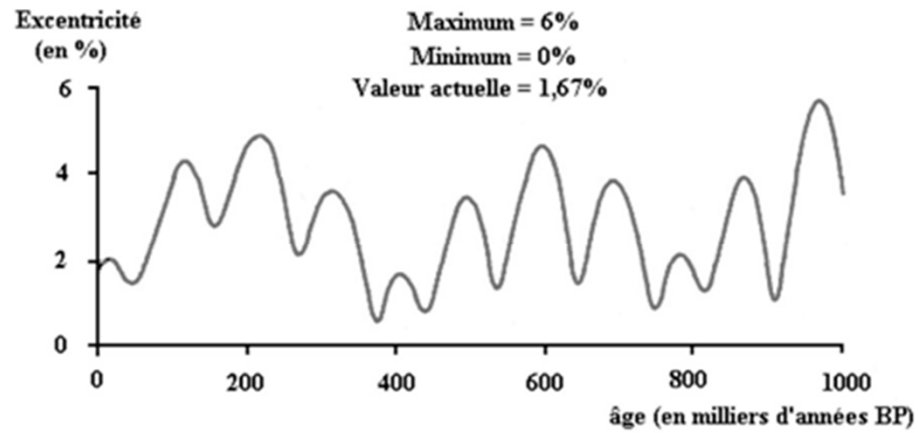
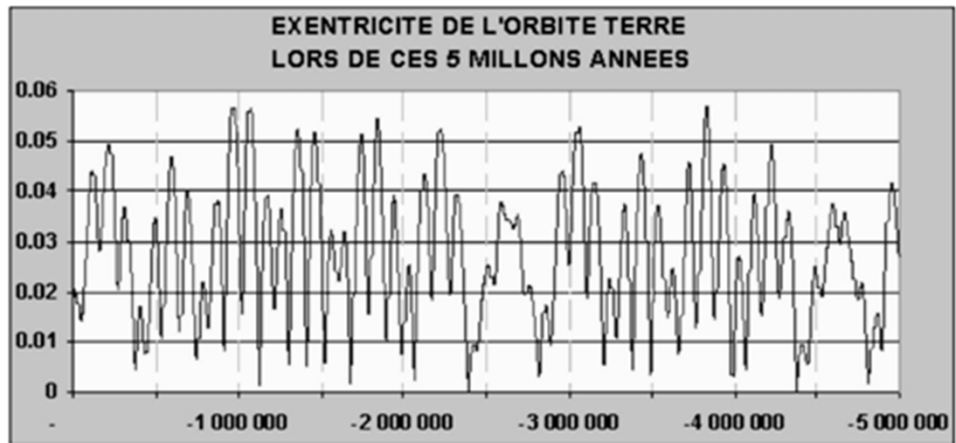
En fait, cette excentricité est *variable lentement dans le temps*. Cette variation est due à la *conformation du Système solaire* et l'équilibre important qui existe avec les planètes géantes.

Les positions planétaires toutes réunies, les masses en jeu, les différents systèmes internes (satellites), influent globalement sur l'équilibre du Système Solaire et on comprend aisément que les ellipses respectives des orbites ne sont pas fixes mais en équilibres les unes par rapport aux autres.



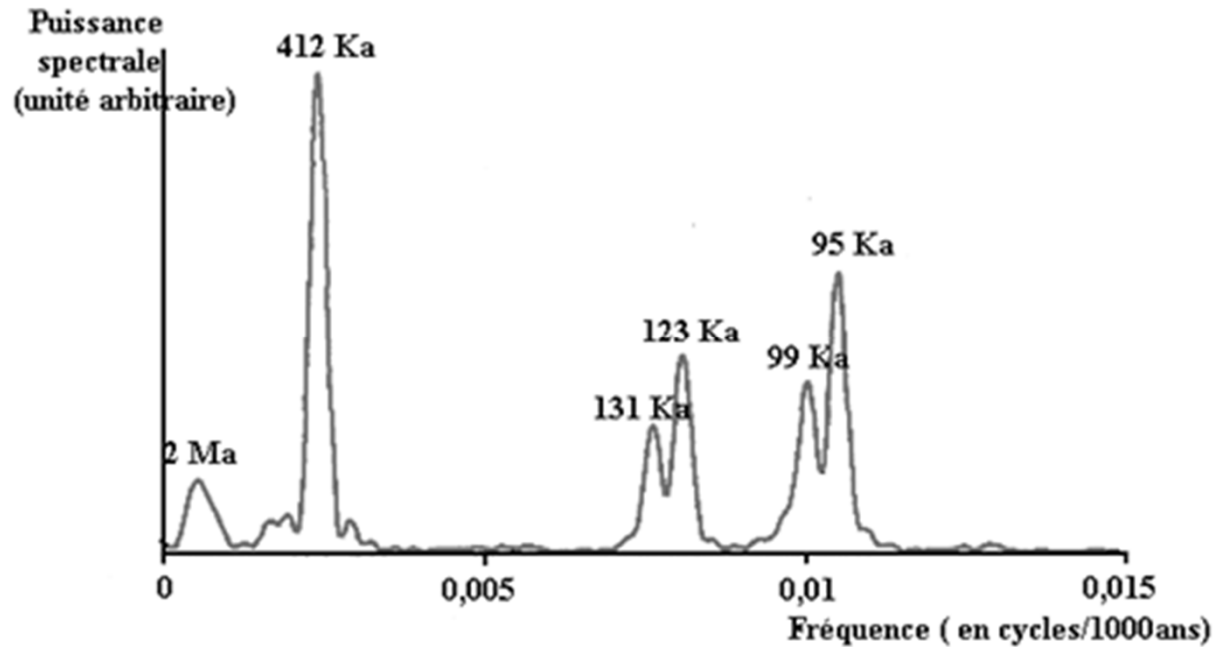
L'excentricité de l'ellipse terrestre varie entre une *valeur maximale de 0,06* et une *valeur minimale* qui est bien sûr de 0.





Cette variation, cyclique, a lieu en une période ahurissante pour l'humanité de quelques 90 000 ans environ à 124 000 ans pour les amplitudes maximales et minimales.

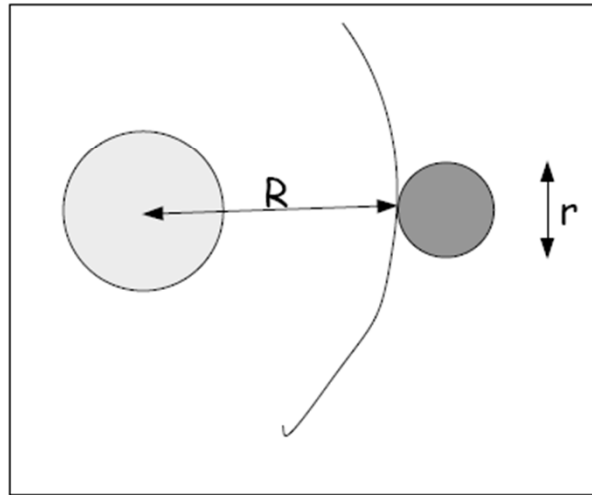
Elles sont elles aussi soumises à des cycles plus courts.



Analyse spectrale		
Période	Amplitude	Phase
2000	0,15	?
412	1,00	?
131	0,26	?
123	0,41	?
99	0,35	?
95	0,58	?

Effet d'une variation de l'excentricité sur l'insolation au périhélie, à l'aphélie et en moyenne

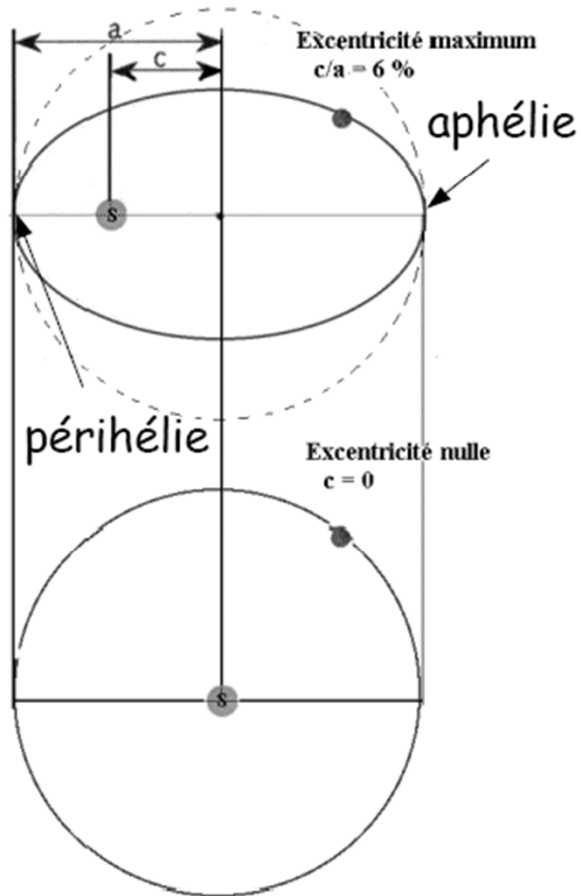
L'insolation



$$P = P_s \frac{\pi r^2}{4\pi R^2}$$

$$P = \frac{k}{R^2}$$

Excentricité et insolation



Exercice :

- Calculer l'insolation au périhélie
- Calculer l'insolation à l'aphélie
- En déduire le rapport des deux en fonction de l'excentricité
- Calculer ce rapport pour $e=0.06$

Insolation moyenne :

$$P = \frac{P_m}{\sqrt{1-e^2}}$$

P_m : énergie reçue
à la distance a .

- Dépend peu de l'excentricité.
- ex : variations de 0,18% pour $e=6\%$.

Variation de l'insolation au périhélie et à l'aphélie

Il est important de noter que, par exemple, *de fortes excentricités entraînent conjointement une diminution de la distance la plus faible entre la Terre et le Soleil (périhélie) et une augmentation de la distance maximale entre les deux astres (aphélie), mais que la distance « directe » entre périhélie et aphélie ne varie pas car le grand axe ne change pas. C'est ce qu'a démontré Laplace en 1772.*

De plus, selon la deuxième loi de Kepler, *plus l'orbite est excentrée, plus la Terre ralentit et s'éloigne plus que d'habitude du Soleil pendant qu'elle passe la partie « allongée » de cette orbite en ellipse décentrée, et plus elle se rapproche du Soleil pendant moins longtemps dans la partie « raccourcie ».*

Cela veut dire que, *lorsque l'excentricité augmente, on récolte moins de Soleil pendant une plus grosse moitié de l'année, et plus de Soleil pendant une moins grosse moitié de l'année.*

Le rôle de l'excentricité seule est donc assez faible car, à cause de la loi des aires de Kepler, la terre parcourt moins vite la partie de son orbite où elle est éloignée du soleil (autour de l'aphélie) que lorsqu'elle est proche de lui (autour du périhélie). Cette *différence de vitesse compense en quelque sorte la différence de distance terre-soleil entre aphélie et périhélie.*

Le tableau suivant montre que cela fait *environ 6,8% de différence d'ensoleillement entre la partie courte et la partie allongée de l'orbite excentrée à l'heure actuelle, avec une excentricité de 0,017... et cela peut atteindre 23% de différence au maximum d'excentricité.*

Variations de l'énergie reçue avec l'excentricité

Excentricité	périhélie		aphélie	
	différence distance (%)	différence énergie reçue (%)	différence distance (%)	différence énergie reçue (%)
0,0167	-1,67	+3,4	+1,67	-3,3
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,065	+6,5	+13,4	-6,5	-12,6

L'excentricité variable implique la Terre au périhélie peut recevoir de 20 à 30% d'énergie (émise par le Soleil) de plus qu'à l'aphélie (lorsque l'excentricité est à sa valeur maximale).

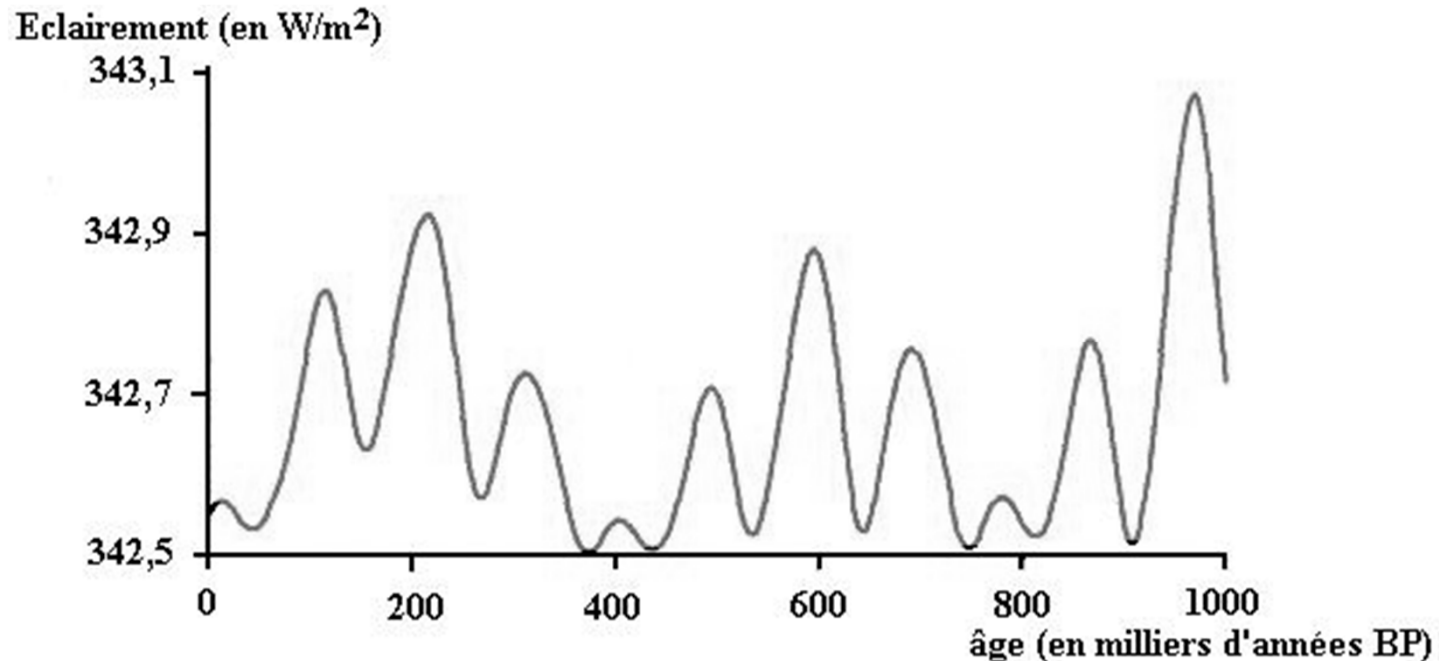
L'effet de différenciation est donc accentué lorsque l'excentricité augmente.

Variation de l'insolation moyenne

L'excentricité a tout d'abord un rôle important dans le *calcul de l'insolation moyenne globale annuelle* reçue sur Terre qui est *inversement proportionnelle à la racine carré de $(1-e^2)$* .

L'insolation moyenne augmente donc très légèrement quand l'excentricité augmente mais pour la Terre, ses variations restent très limitées.

Effet de la variation d'excentricité sur l'insolation (globale sur un an)



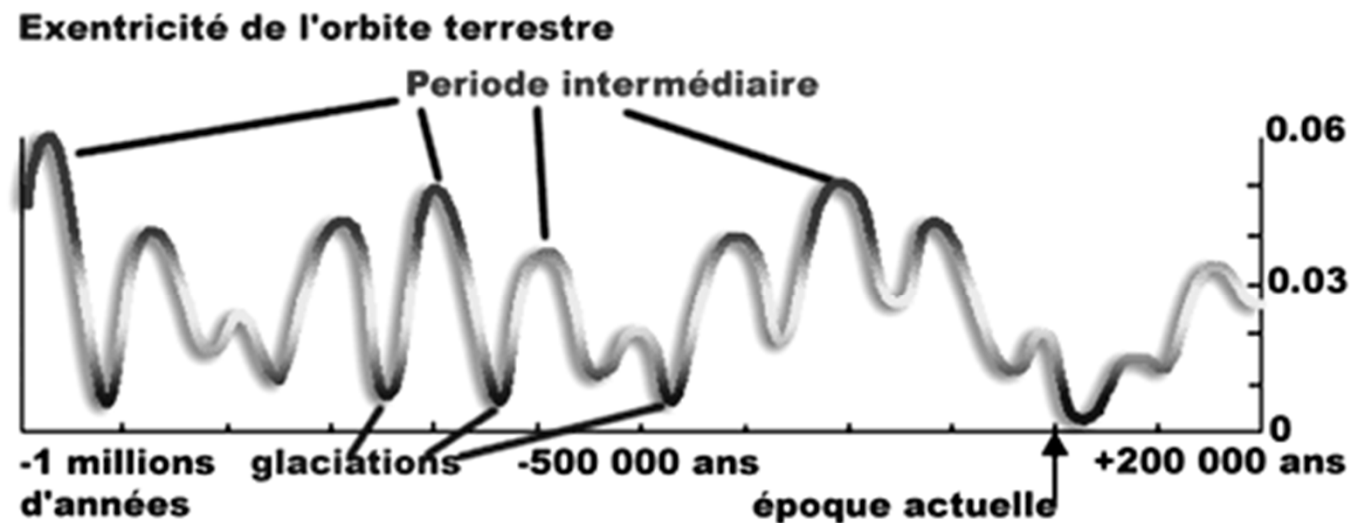
L'impact sur l'insolation en moyenne annuelle reste cependant très modeste.

Les variations de l'énergie moyenne reçue sont de l'ordre de 0,1% ce qui entraîne une variation de la température moyenne du globe de quelques dixièmes de degrés.

Tendance actuelle

Actuellement cette excentricité diminue ; dans 24 000 ans elle sera nulle et la Terre sera à égale distance du Soleil lors de toutes les saisons.

La conséquence en est donc un *refroidissement de la planète en moyenne*. Celui-ci restera faible, mais agira pendant des millénaires avec des résultats que l'on ne connaît pas.



Excentricité et saisons

Lorsqu'une saison est longue, la quantité d'énergie qui lui correspond est répartie sur un plus grand nombre de jours dont chacun en recevra une part plus réduite. Cette saison sera donc relativement froide. Si cette saison est courte, chaque jour recevra davantage d'énergie et cette saison sera relativement chaude.

La *valeur de l'excentricité* n'est pas liée aux changements de saisons, mais, en combinant excentricité et précession :

- ✓ *Si l'été correspond au périhélie et l'hiver à l'aphélie* (c'est-à-dire si le solstice d'été a lieu lorsque la terre est près du périhélie), la Terre reçoit beaucoup d'énergie en été (et moins en hiver) la durée de la saison chaude sera minimale et *la saison d'été sera donc relativement chaude et brève* car l'insolation par unité de temps sera très importante, alors que *l'hiver sera long et rigoureux* (= situation actuelle de l'hémisphère sud) : donc il y a des *étés « chauds »* et des *hivers « froids »*.
- ✓ *Si par contre l'été correspond à l'aphélie et l'hiver au périhélie* (c'est-à-dire si le solstice d'été a lieu lorsque la terre est à l'aphélie comme « plus ou moins » actuellement), la durée de la saison chaude sera maximale et donc chaque jour ne recevant qu'une insolation réduite sera relativement frais alors que la saison froide sera courte et tiède (= situation actuelle pour l'hémisphère nord) : la Terre reçoit peu d'énergie en été mais plus en hiver, donc les *étés sont « frais »* et les *hivers sont « doux »*.

Mouvement secondaire affectant la révolution : la variation séculaire du périhélie terrestre

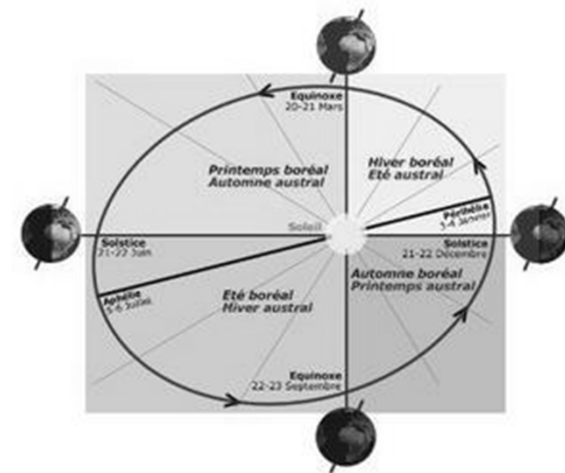
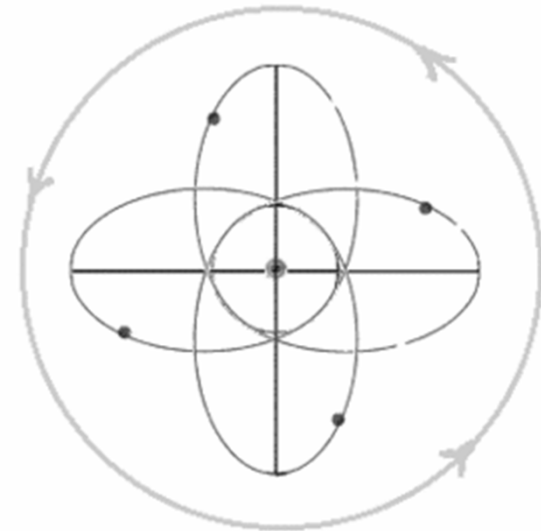
Par rapport aux étoiles fixes, l'*orbite terrestre elliptique effectue une rotation lente (la précession du périhélie)*.

Ce mouvement modifie le mois de l'année à laquelle la Terre est au périhélie c'est à dire quand la Terre est au plus proche du Soleil. Il résulte aussi de l'attraction combinée des planètes, du Soleil et de la Lune.

Ce mouvement agit en particulier sur la position du grand axe de l'ellipse de révolution terrestre, c'est-à-dire la *ligne des apsides* ; le périhélie et l'aphélie se meuvent le long de cette orbite de sorte que *le grand axe ne conserve pas deux années de suite exactement la même direction*.

Ce décalage se fait immuablement et une fois de plus c'est *un mouvement qui influence les saisons et les périodes chaudes et froides*.

Le périhélie est, de nos jours, atteint vers le 3 janvier ; *le périhélie se déplace dans le sens direct d'environ 12'' (plus précisément 0,003279°) par an*, ce qui correspond donc à une *périodicité de 110 000 ans*.



Changement de la durée des saisons au cours du temps (précession climatique)

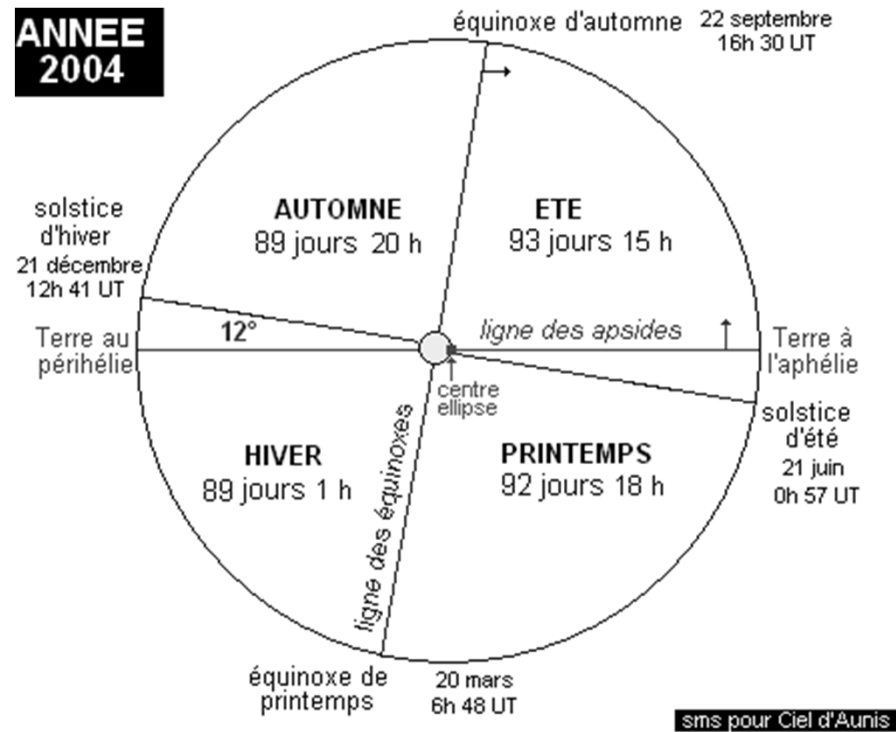
Nous avons supposé dans la détermination des saisons que la *trajectoire apparente du Soleil est fixe sur le plan de l'écliptique*.

Sur de longues périodes de temps, ce n'est pas le cas, en raison des petits mouvements de la Terre évoqués précédemment.

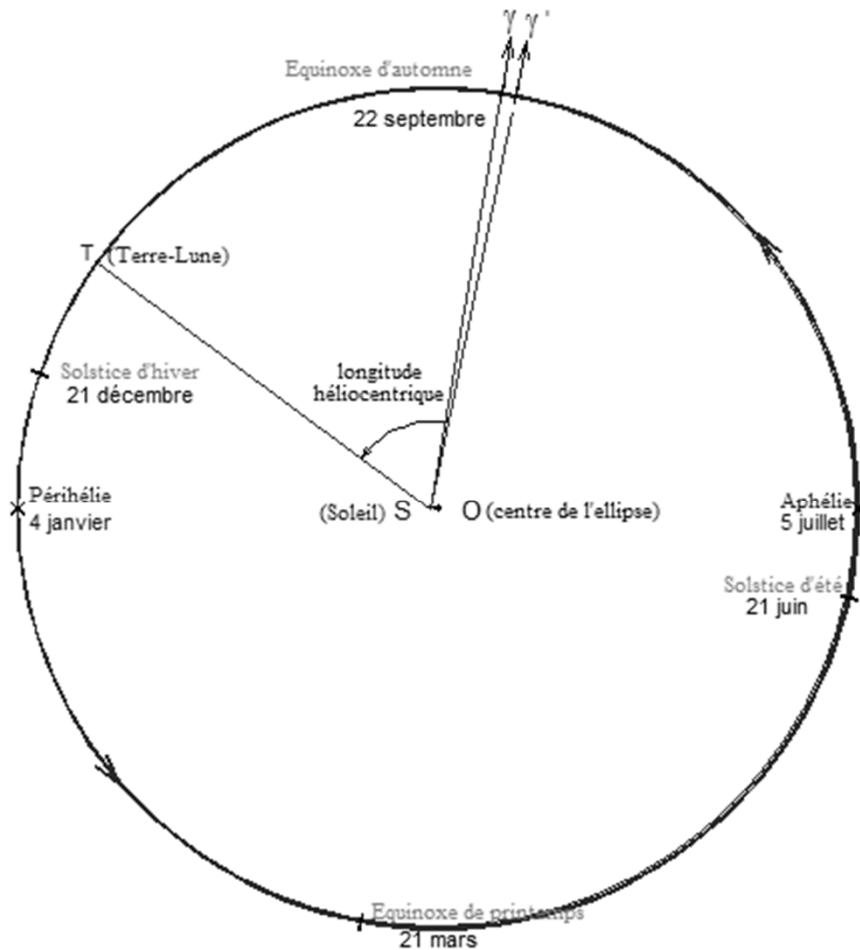
Pour la détermination des saisons, deux mouvements principaux doivent être pris en compte : la précession des équinoxes et l'avance du périhélie terrestre.

Situation actuelle

Actuellement le grand axe de l'ellipse (en rouge, joignant la position le périhélie à l'aphélie) est en avance de 12° par rapport à la ligne de pente de l'écliptique (ligne des solstices, en bleu, joignant le solstice d'hiver et le solstice d'été).



Périodes des révolutions de la Terre



Repère : étoiles fixes

Année sidérale : durée de la révolution de la Terre / aux étoiles

$$T_s = 365\text{j } 6\text{h } 9\text{min } 9,7\text{s} = 365,256363 \text{ j}$$

Repère : point vernal

Année tropique :

intervalle de temps entre 2 équinoxes

$$T_t = 365\text{j } 5\text{h } 48\text{min } 45\text{s} = 365,242193 \text{ j}$$

Repère : périhélie de l'orbite

Année anomalistique :

durée pour retourner au périhélie

$$T_a = 365\text{j } 6\text{h } 13\text{min } 53\text{s} = 365,259638 \text{ j}$$

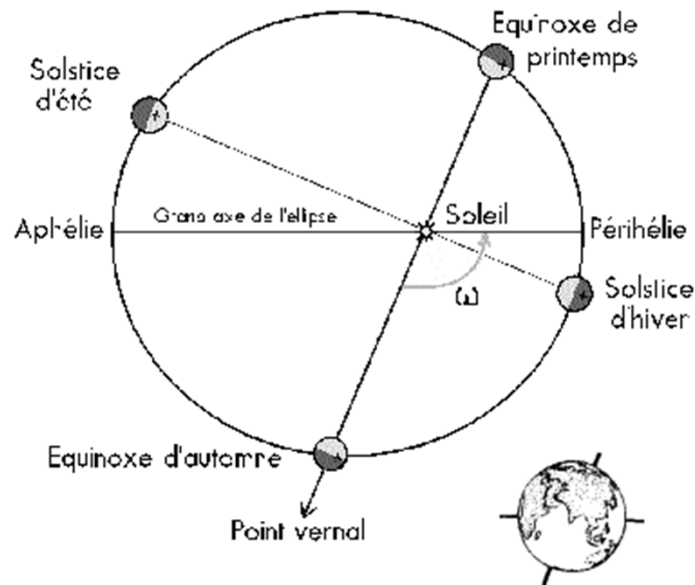
$T_t < T_s$ le point γ rétrograde.

$T_a > T_s$ le périhélie avance.

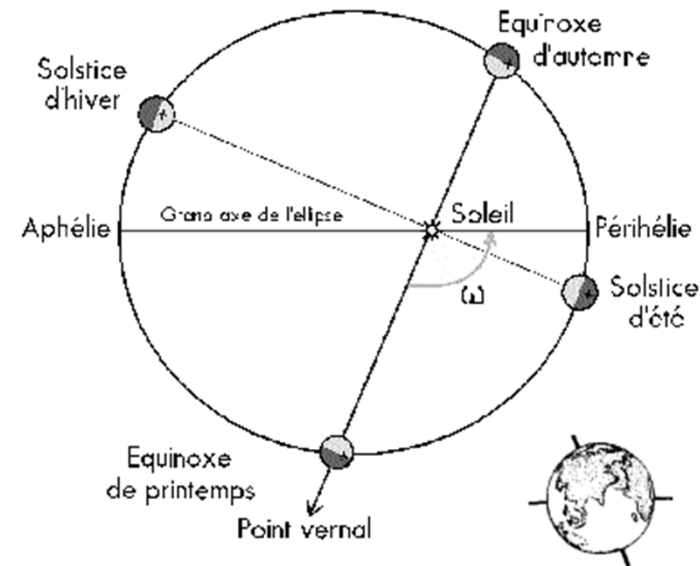
Rappel : précession et orbite de la Terre

La précession n'affecte pas la forme de l'orbite. Mais elle change la position des équinoxes et des solstices sur l'orbite. A la même époque de l'année civile, la distance Terre-Soleil change, et en application de la deuxième loi de Kepler, la vitesse de parcours change aussi. Par conséquent, la durée des saisons varie.

actuellement



*il y a 13 000 ans
et dans 13 000*



La précession déplace la ligne des équinoxes de $0,013670^\circ = 49'' \approx 50''$ par an, ce qui donne une périodicité de $360^\circ / 0,01367 \approx 26\ 000$ ans.

Rappel : rotation du périhélie terrestre

Comme d'une révolution à l'autre le périhélie a tendance à avancer, *l'année anomalistique est plus grande que l'année sidérale* :

Temps pour que le périhélie aille de P en P' ? $T_p - T_s = 365,259638 - 365,256363 = 0,003275$ j

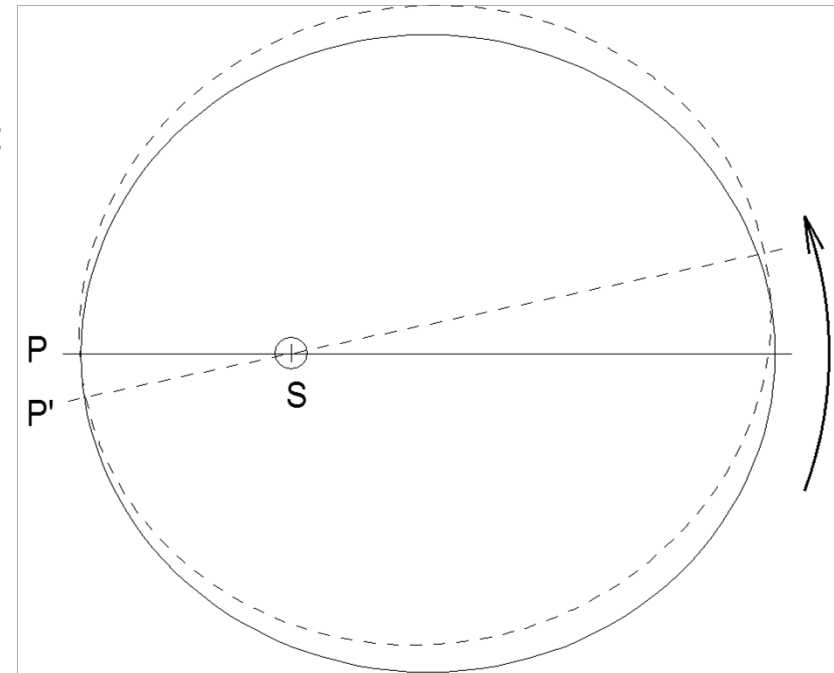
Période du cycle ?

Déplacement annuel du périhélie : angle PSP' :

$$360 \times \frac{T_p - T_s}{T_s} = 0,0032279^\circ = 11''603$$

$$P_{Péri} = \frac{360}{0,0032279} = 111530 \text{ ans}$$

Effet ?



L'avance du périhélie change la distance Terre Soleil à une même époque de l'année civile.

Cet effet se combine à la précession.

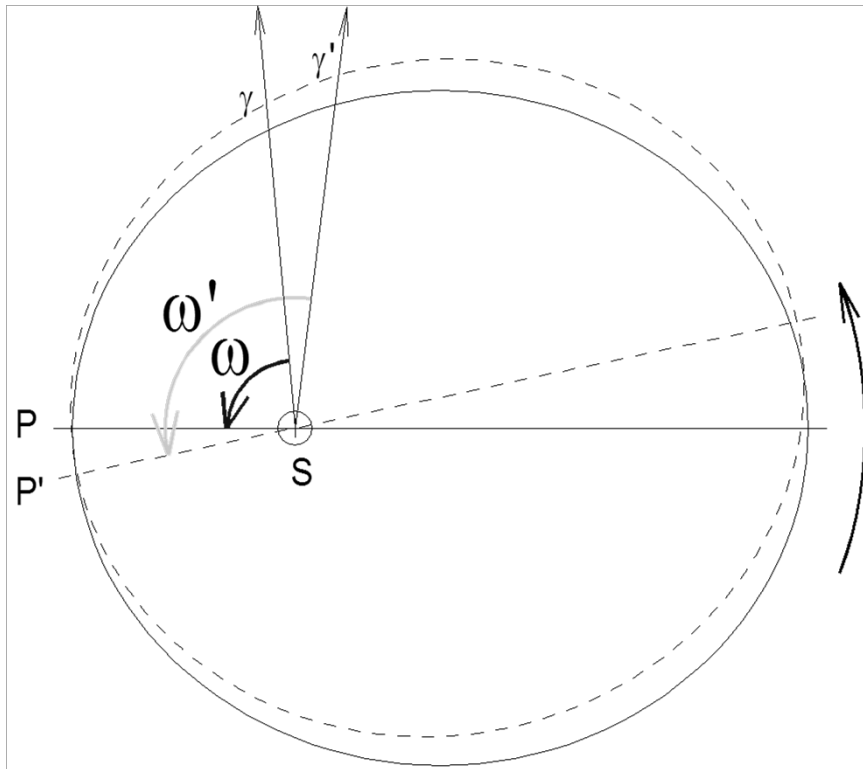
Combinaison de la précession et de la rotation du périhélie

Les saisons se définissent par rapport au point vernal (γ). *Le décalage de l'orbite par rapport à ce point résulte de la précession et de l'avance du périhélie : c'est la précession climatique.*

Période de déplacement du périhélie par rapport au γ ?

Déplacement annuel du *périhélie* par rapport au *point γ* :

précession	périgée	résultante
$0,013670^\circ$	$+ 0,003279^\circ$	$= 0,016949^\circ / \text{an}$

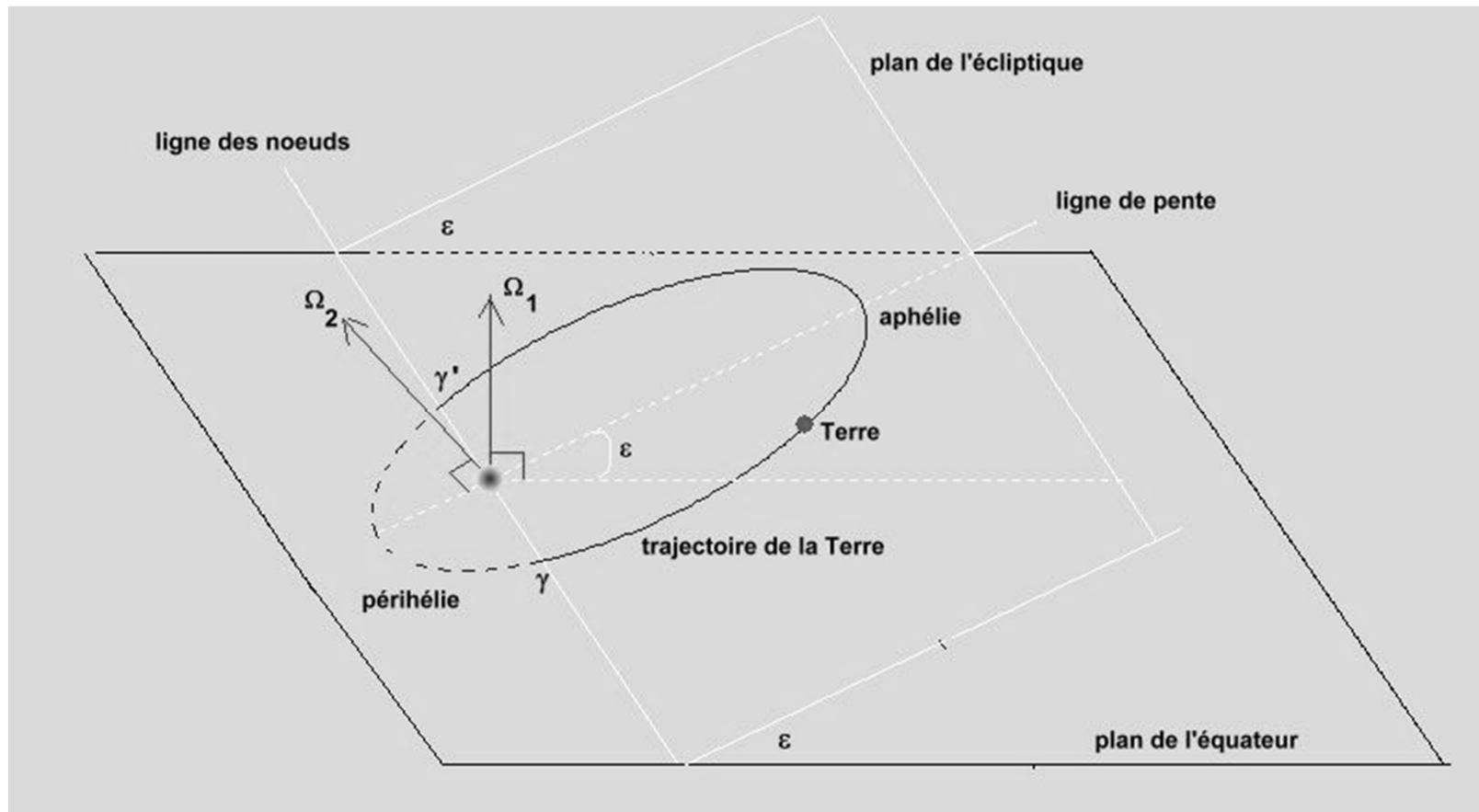


$$P_{\text{climat}} = \frac{360}{0,016949} = 20937 \text{ ans}$$

La dissymétrie des saisons a donc une période d'environ 21 000 ans.

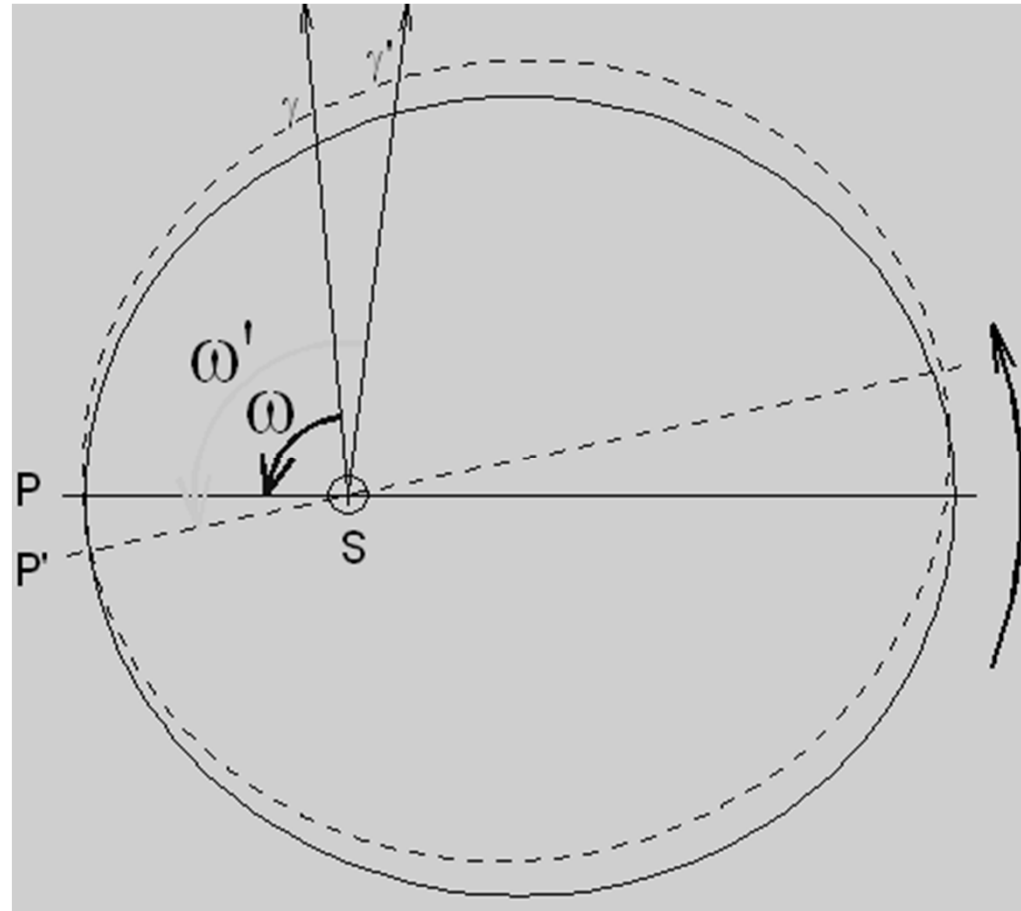
Explication plus élaborée de la précession climatique

Le mouvement d'avance du périhélie (mouvement de rotation du périhélie dans le sens direct, caractérisé par un vecteur de rotation Ω_1 perpendiculaire à l'écliptique) *se compose vectoriellement avec la précession des équinoxes* (mouvement rétrograde de la ligne des nœuds, caractérisé par un vecteur de rotation Ω_2 perpendiculaire au plan de l'équateur) les deux vecteurs rotation font entre eux un angle égal à l'inclinaison de l'écliptique sur l'équateur céleste, c'est à dire $23^\circ 26'$ comme l'indique la figure suivante.



Le phénomène est donc périodique. Ce phénomène s'appelle la *précession climatique*.

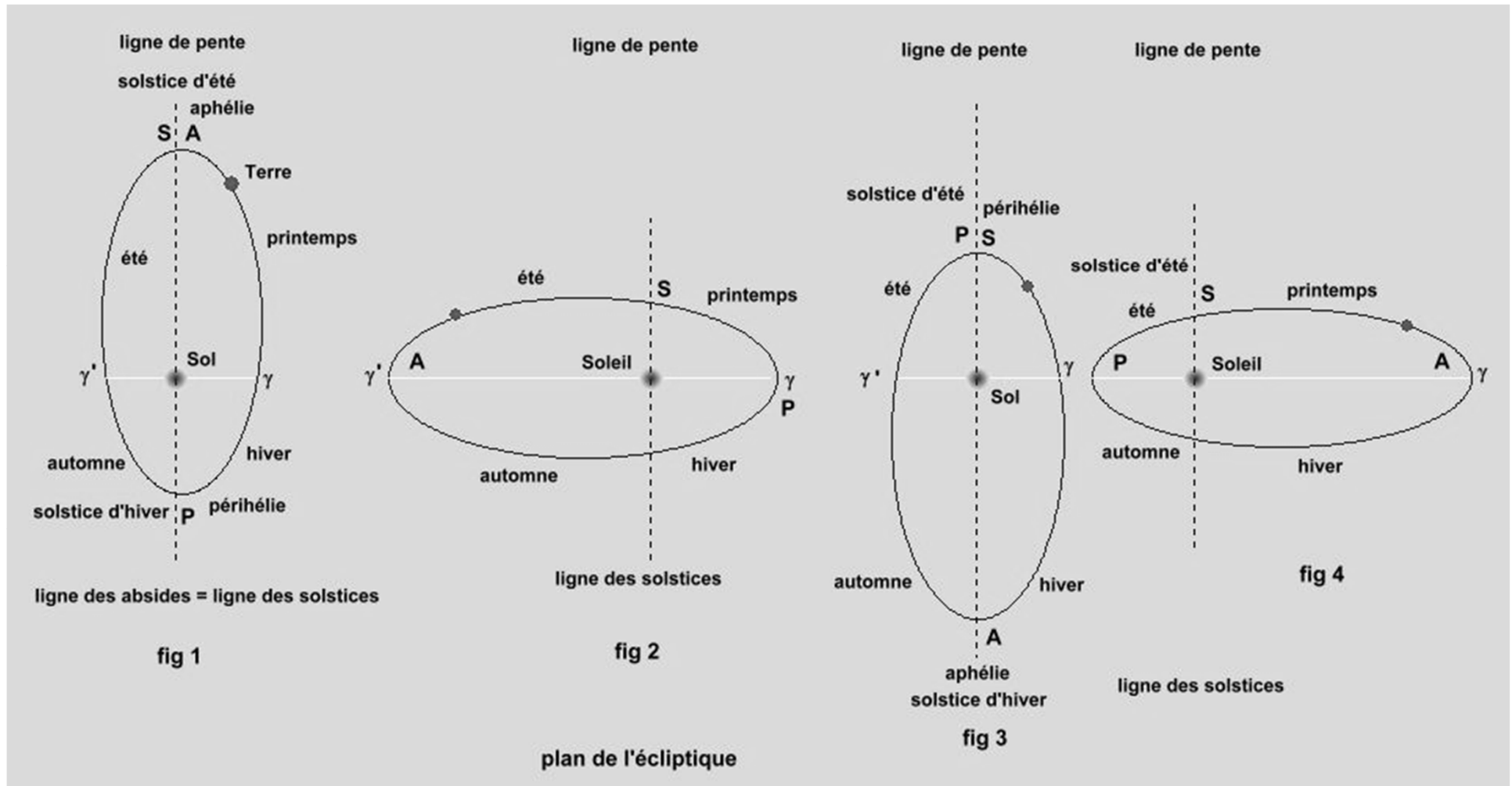
Pour repérer les saisons, la rotation du périhélie (12'' dans le sens direct) se combine avec l'effet de précession des équinoxes (50'' par an dans le sens rétrograde) et le périhélie et le point Gamma s'éloignent donc de $50''+12''=6''$ par an, ce qui fait qu'ils se retrouvent en coïncidence au bout d'une *période d'environ 21 000 ans*, et raccourcit donc la période d'évolution des saisons à 21 000 ans environ au lieu de 26 000 : cet effet combiné porte le nom de *précession climatique*.



Tous les 21 000 ans l'aphélie coïncide avec le solstice d'été. Tous les 10 500 ans la ligne des apsides coïncide avec la ligne des nœuds.

On obtient alors les *cas limites suivants* (pour une meilleure compréhension l'aplatissement de l'ellipse est très exagéré) :

Les dessins sont faits dans le *système héliocentrique*.



Rappelons que d'après la loi des aires *la durée de chaque saison est proportionnelle à la surface du secteur de l'ellipse correspondant.*

Dans le cas de la figure 1 *la ligne des solstices est axe de symétrie pour l'ellipse.* Il en résulte que *la durée du printemps est égale à la durée de l'été et que la durée de l'automne est égale à la durée de l'hiver.* De plus *la durée du printemps est plus grande que la durée de l'hiver* (idem l'été est plus long que l'automne). *Les étés dans cette configuration sont les moins chauds possibles et les hivers les moins froids possibles.*

Dans le cas de la figure 2 *la ligne des nœuds est axe de symétrie pour l'ellipse.* Il en résulte que *la durée du printemps est égale à la durée de l'hiver et que la durée de l'automne est égale à la durée de l'été.* De plus *la durée de l'été est plus grande que la durée du printemps* (idem l'automne est plus long que l'hiver).

Dans le cas de la figure 3 *la ligne des solstices est encore axe de symétrie pour l'ellipse.* Il en résulte que *la durée du printemps est égale à la durée de l'été et que la durée de l'automne est égale à la durée de l'hiver.* Mais *la durée du printemps est plus petite que la durée de l'hiver* (idem l'été est plus court que l'automne). *Les étés dans cette configuration sont les plus chauds possibles et les hivers les plus froids possibles.*

Dans le cas de la figure 4 *la ligne des nœuds est axe de symétrie pour l'ellipse.* Il en résulte que *la durée du printemps est égale à la durée de l'hiver et que la durée de l'automne est égale à la durée de l'été.* Mais *la durée du printemps est plus grande que la durée de l'été* (idem l'hiver est plus long que l'automne).

Dans tous les autres cas aucune saison n'a la même durée que les autres.

Quelques dates

Puisque l'avance de l'aphélie par rapport au solstice est actuellement de 12° il est facile de trouver *la date de coïncidence qui correspond à la figure 1.*

Le décalage en temps est $21\ 000\ \text{ans} \times 12^\circ / 360^\circ = 700\ \text{ans environ.}$

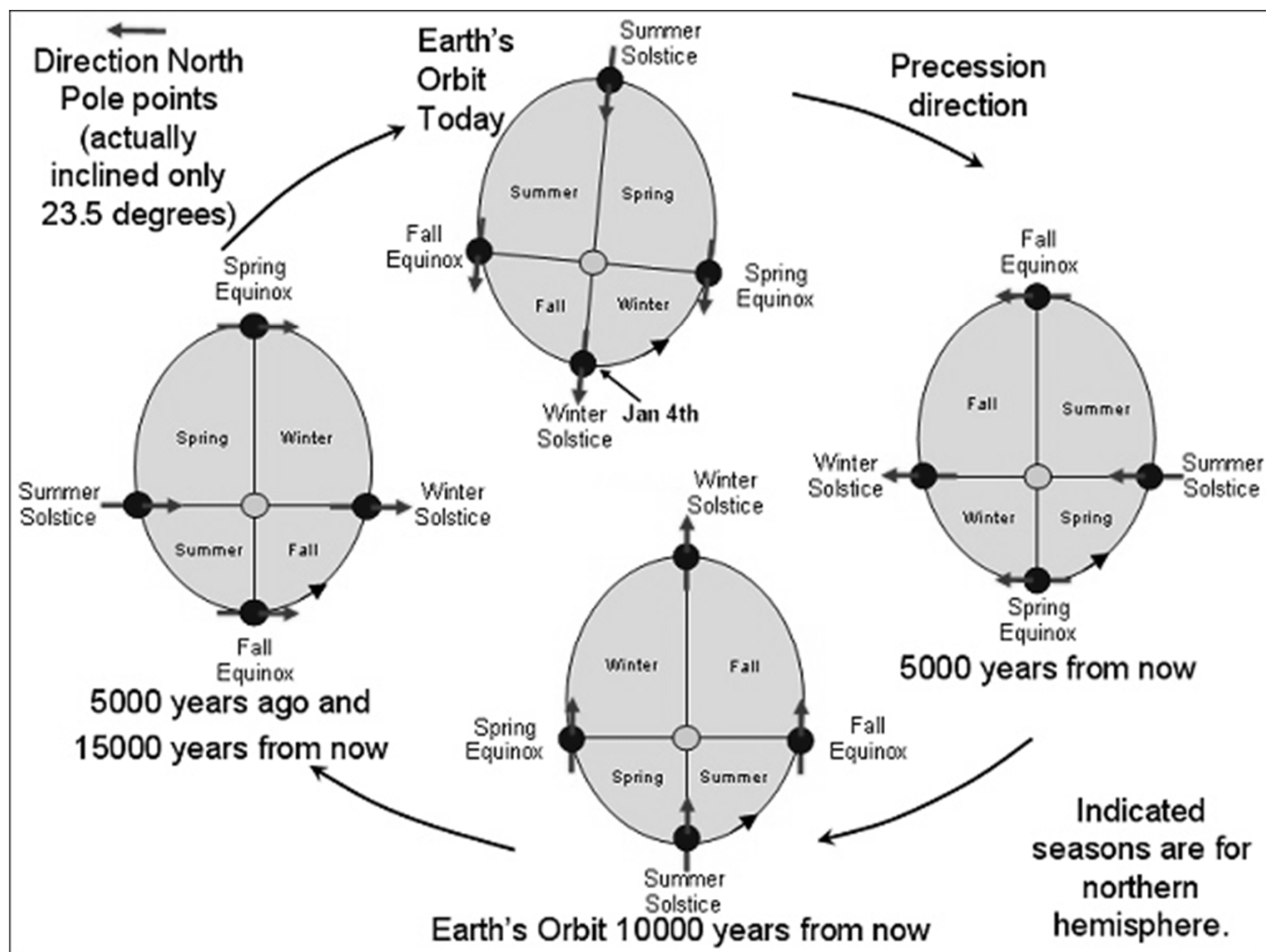
La figure 1 correspond à l'année 1246.

La figure 2 correspondra aux environs de l'année 6500.

La figure 3 correspondra aux environs de l'année 11 750 .

La figure 4 correspondra aux environs de l'année 17 000.

La figure 4 correspondait aussi un peu avant l'année – 4 000



Le changement de précession de 270° à 90° (soit depuis un périhélie correspondant au solstice d'été de l'hémisphère nord jusqu'à un périhélie situé lors du solstice d'hiver avec une excentricité forte de 4%) :

- ✓ ne modifie pas la quantité de rayonnement solaire reçue au cours de l'année à une latitude donnée ;
- ✓ affecte donc uniquement la répartition saisonnière du rayonnement solaire reçu à une latitude donnée ;
- ✓ augmente le rayonnement sur toute la terre surtout aux hautes latitudes au moment du périhélie.

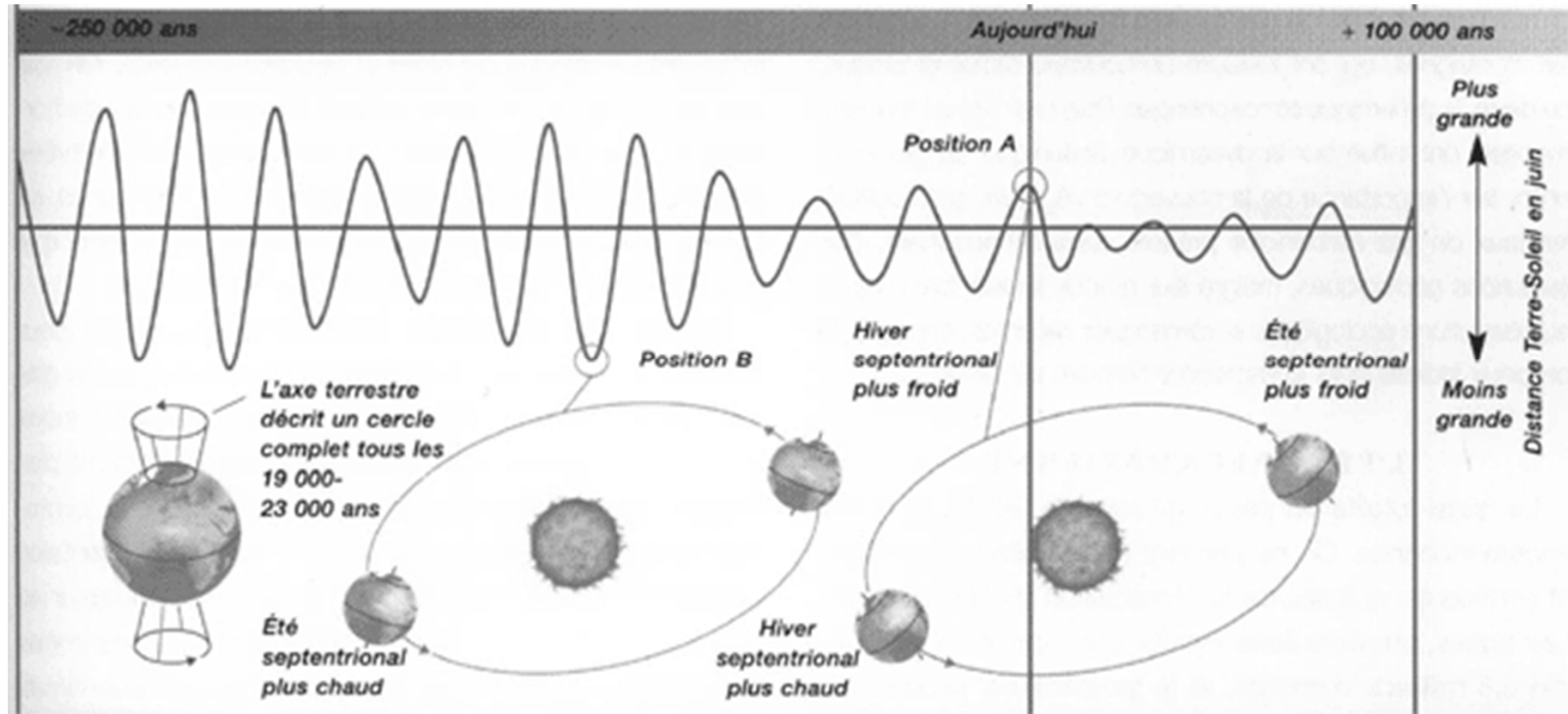
Conséquence sur le climat de la précession climatique

La conséquence de cette précession climatique est que *le solstice d'été dans un hémisphère donné (moment où l'hémisphère reçoit le maximum de chaleur), aura lieu alternativement tous les 11 000 ans soit au périhélie (c'est-à-dire près du Soleil), soit à l'aphélie (loin du soleil).*

Donc, dans cet hémisphère, *les étés seront tous les 11 000 ans soit plus chauds soit plus frais, l'écart d'énergie reçue étant fixé par l'excentricité de l'ellipse : si la Terre décrivait un cercle autour du Soleil ($e = 0$), la distance Terre-Soleil étant alors constante, la précession n'aurait alors aucune influence sur l'intensité des saisons.*

Ceci conduit tous les 11 000 ans, soit à une situation favorable à la fusion de calottes glaciaires aux hautes latitudes de l'H.N. (étés chauds) soit à une situation favorable à la croissance de ces calottes (été frais).

On caractérise l'évolution de cette situation par la *distance Terre-Soleil au 21 juin* (solstice d'été de l'hémisphère nord), représenté sur la figure suivante :

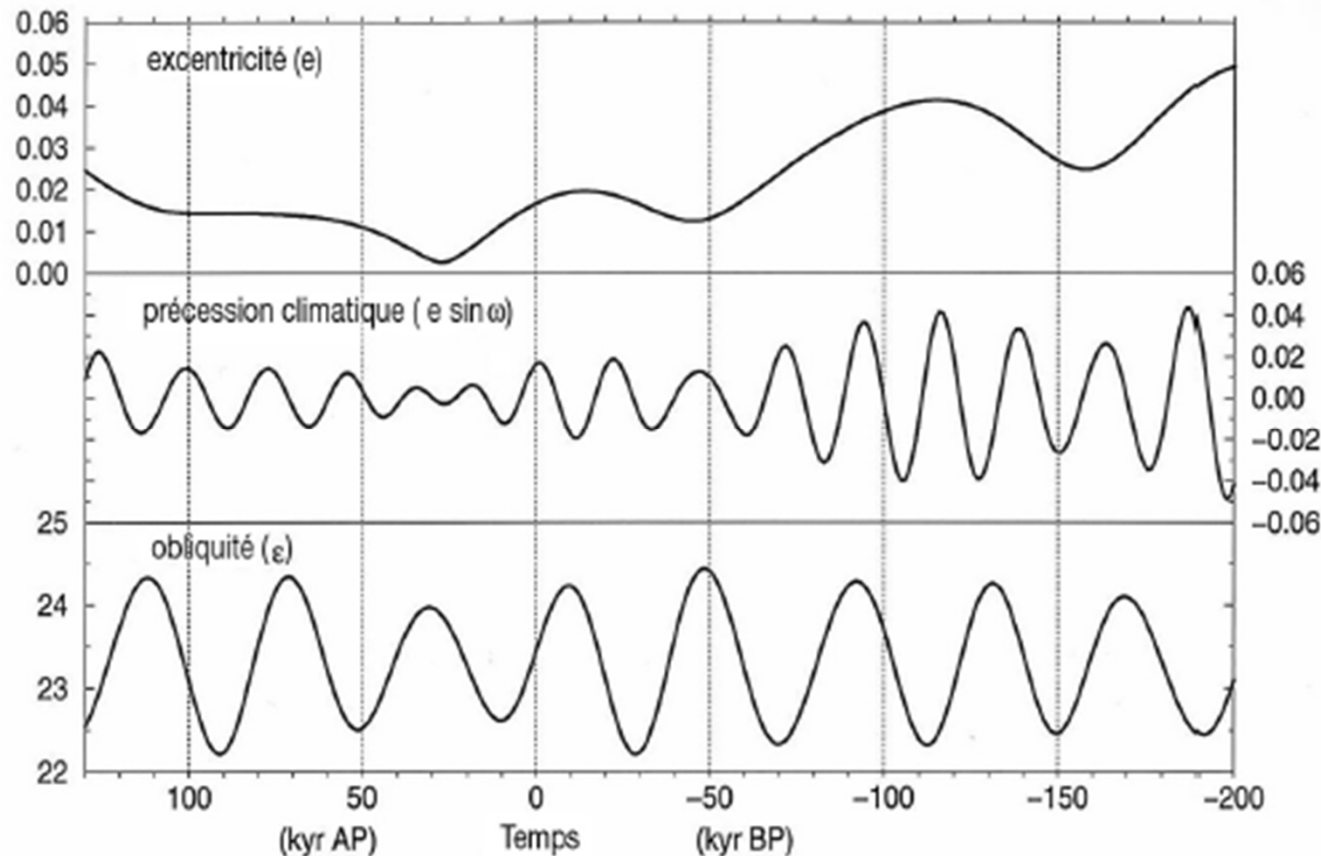


Ainsi, il y a 11 000 ans dans l'hémisphère nord (position analogue à la position B), nous recevons en été 6% de plus d'énergie solaire qu'à l'heure actuelle.

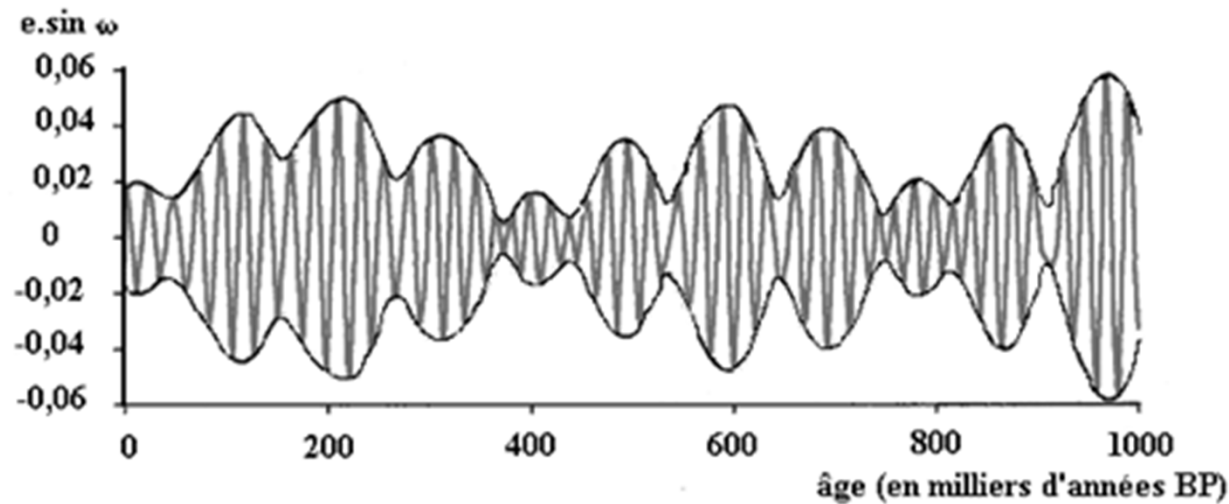
Inversement, en hiver il y a 11 000 ans, nous recevons 6% de moins d'énergie solaire qu'à l'heure actuelle.

Ces 6% de variation résultent des variations de l'insolation entre la situation à l'aphélie et au périhélie dues à l'excentricité de l'ellipse, où l'on a conservé la valeur actuelle de l'excentricité.

Effet de la variation d'excentricité sur la précession climatique

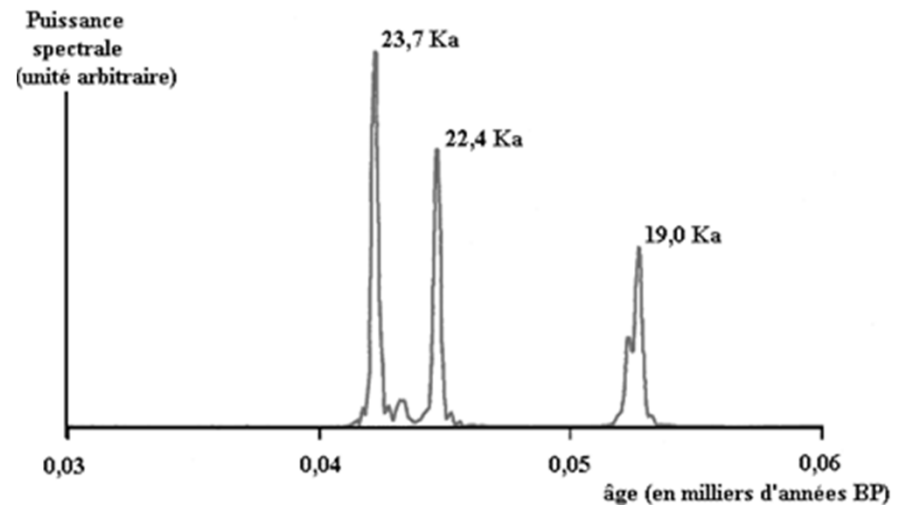


Cette figure illustre les variations à long terme de l'excentricité (e) avec ses périodes de 100 000 et 400 000 ans, de l'obliquité (ϵ) avec sa période principale de 41 000 ans et la précession climatique ($e \sin \omega$) avec sa période moyenne de 21 000 ans. On notera que le paramètre de précession, $e \sin \omega$, montre que l'excentricité module l'amplitude de la variation du sinus de l'angle ω . Sur cette figure, on voit aussi que l'orbite de la Terre est en train de devenir circulaire, et atteignant une valeur très proche de zéro, d'ici 25 000 ans environ. Les variations reproduites vont de 200 000 ans dans le passé à 130 000 ans dans l'avenir (Berger, 1978).



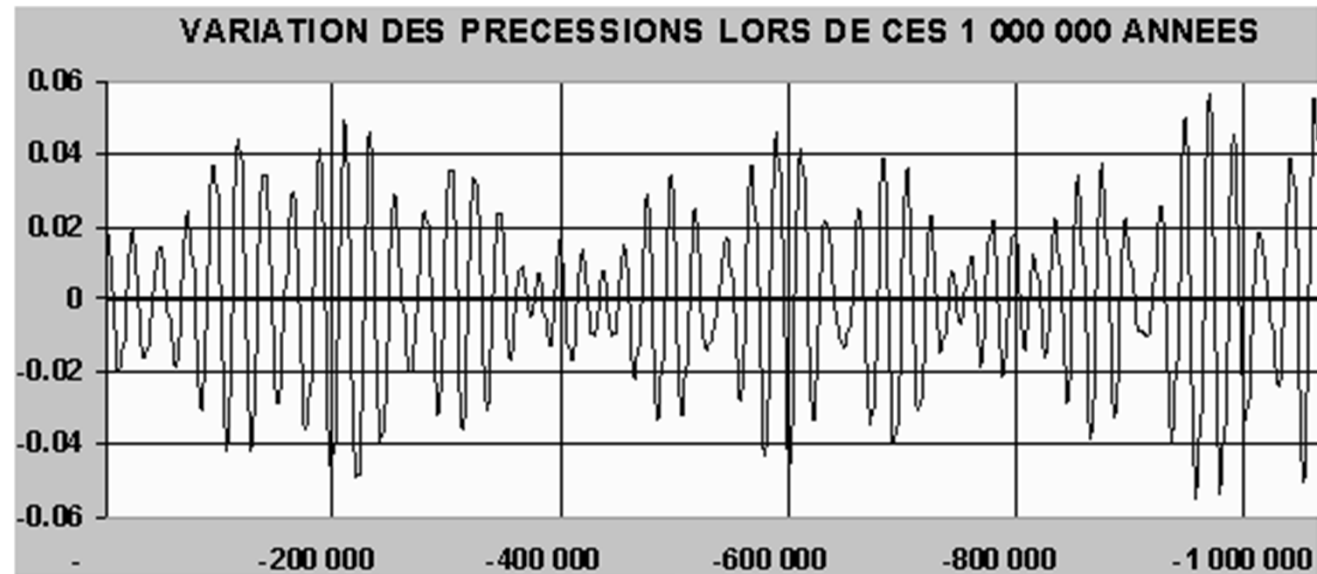
Variation de l'angle entre le périhélie et le point gamma modulée par l'excentricité variable

Du fait de la variation de l'excentricité, une perturbation de 400 000 ans de période se superpose à la précession climatique ; *la période de 21 000 ans est décomposée par la modulation des variations à long terme de l'excentricité.*



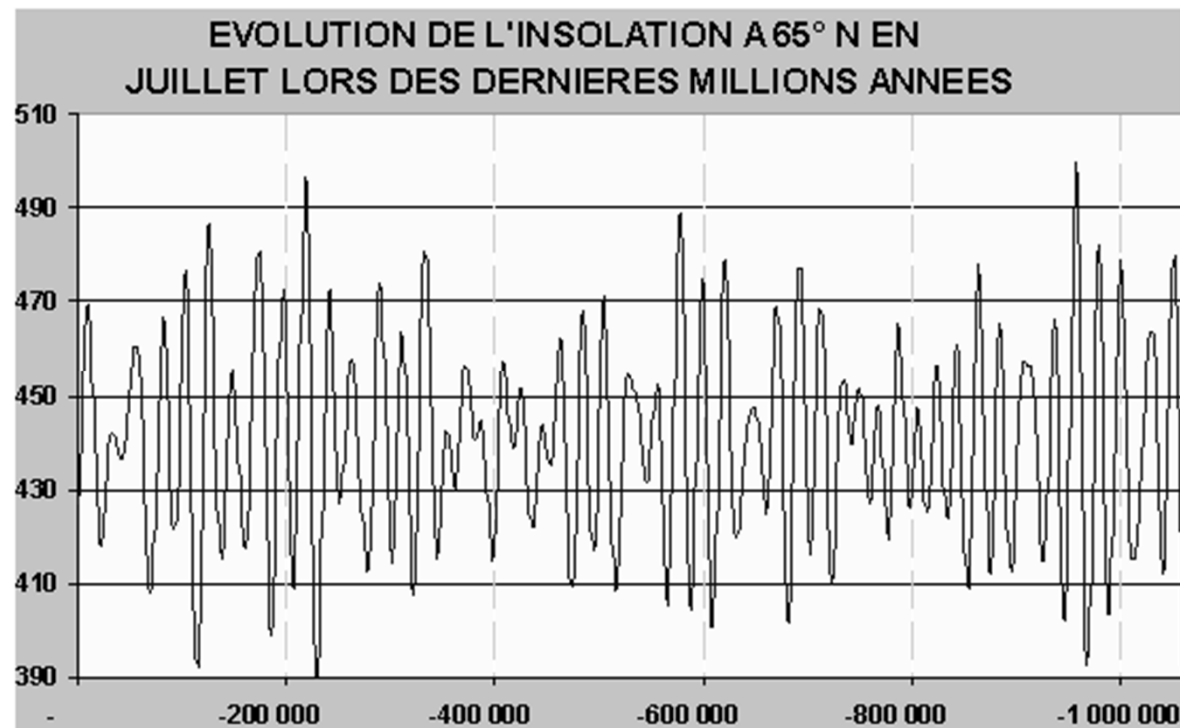
On observe alors dans le signal décrivant la précession climatique *deux périodes de 19 000 et 23 000 ans.*

Impact climatique du phénomène de précession

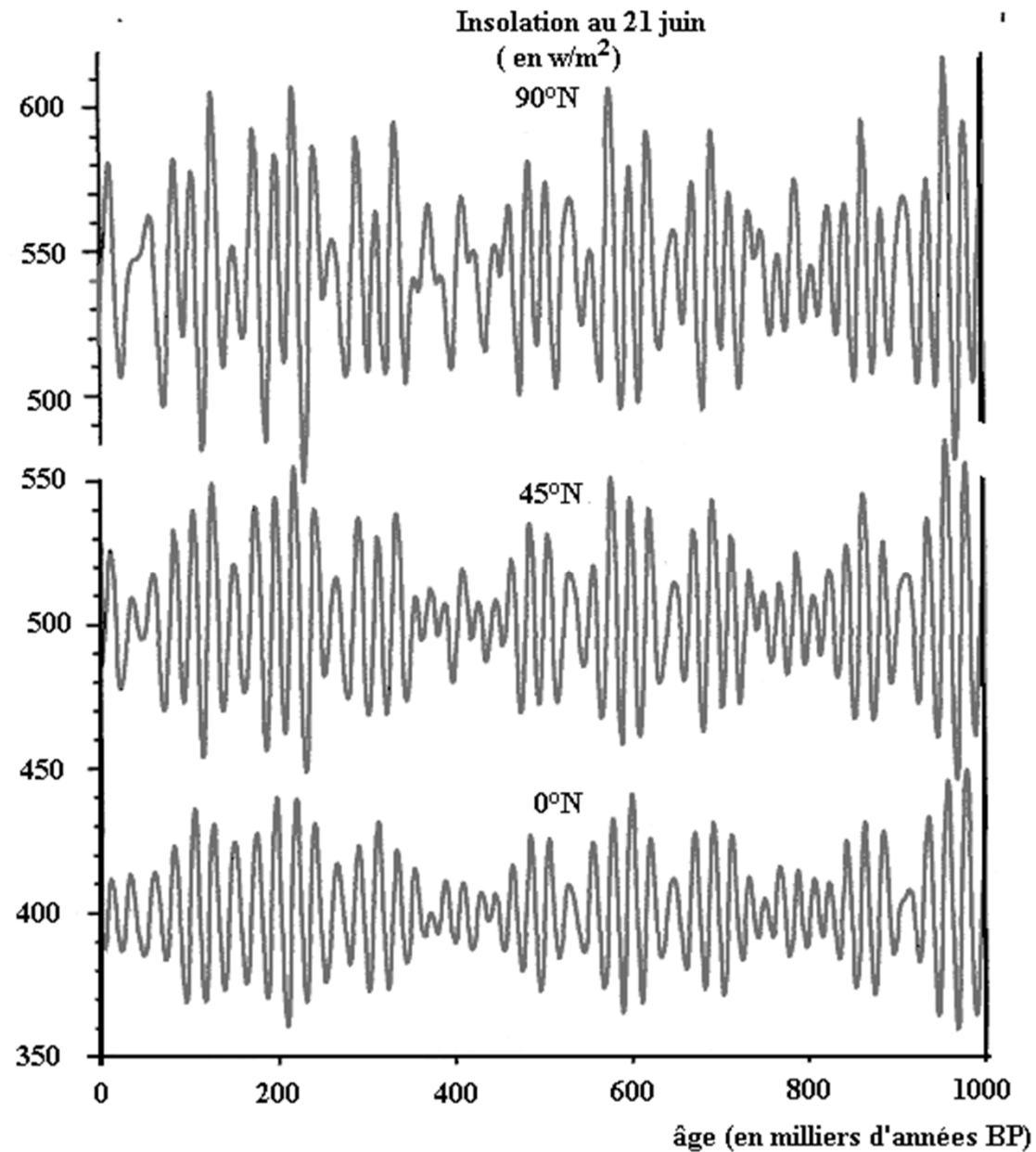


Les variations saisonnières d'insolation associées au cycle de précession dépassent souvent 10%.

Il s'agit vraisemblablement du principal forçage climatique à l'échelle des milliers d'années.



Les variations d'insolation dues à la précession climatique ne se font pas ressentir partout de la même manière, les *plus hautes latitudes sont plus soumises aux variations*.



Résumé et conclusions : les paramètres de la théorie de Milankovitch des paléoclimats

LES CYCLES DE MILANKOVITCH ET LE CYCLE DE PRECESSION CLIMATIQUE

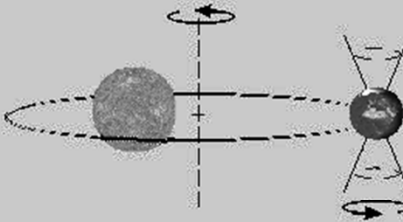
Variations de l'excentricité de l'orbite terrestre (cycles de 413000 et 100000 ans)



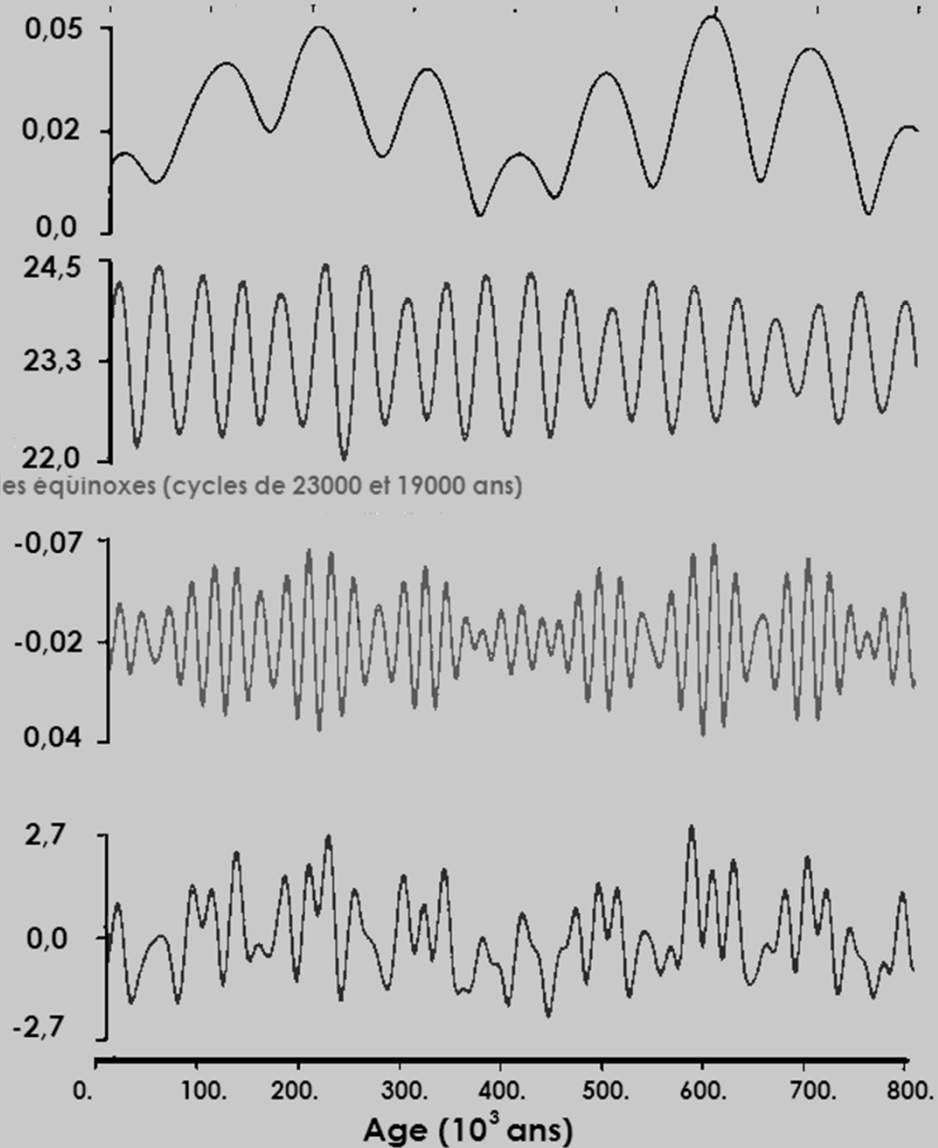
Variations de l'obliquité de l'axe de rotation de la Terre (Cycle de 41000 ans)



Précession de l'axe de rotation de la Terre et des équinoxes (cycles de 23000 et 19000 ans)



La courbe violette montre la résultante des trois cycles de Milankovitch, qui induit un cycle climatique de 21000 ans.



Voici, pour finir, un tableau, adapté d'un site internet américain, qui récapitule les périodes de 5 harmoniques principales pour chacun des 3 cycles de Milankovitch.

	Precession		Obliquité		Excentricité	
Rang	Periode (ans)	Amplitude relative	Periode (ans)	Amplitude relative	Periode (ans)	Amplitude relative
1	23716	1,0	41000	1,0	412885	1,0
2	22428	0,871	39730	0,3481	94945	0,7909
3	18976	0,6989	53615	0,2555	123297	0,6818
4	19155	0,5269	40521	0,1682	99590	0,6091
5	19261	0,1828	28910	0,1267	131248	0,5273
Moyenne pondérée	21383		41615		110375	

Les graphiques insérés précédemment montrent les variations d'insolation entraînées par les trois cycles de Milankovitch.

La variation de l'excentricité de l'orbite terrestre entraîne des variations assez faibles de l'insolation ($\pm 2 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ au maximum).

La variation de l'obliquité de l'axe de rotation entraîne des variations d'insolations moins négligeables ($\pm 15 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ au maximum).

La précession des équinoxes est le cycle qui influence le plus le climat: elle entraîne des variations d'insolations de $\pm 50 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ au maximum, ce qui suffit à provoquer des glaciations.

En effet, le cycle suivi par les glaciations a une période proche de celle de la précession climatique (19 000 ans).

La combinaison de l'ensemble des cycles donne un cycle de glaciation d'environ 100 000 ans.

Actuellement, nous sommes en période interglaciaire, et ce depuis 10 000 ans. La précédente glaciation a duré pendant 100 000 ans, et ce devrait être le cas pour la prochaine.