

N° 39

LA PRÉCESSION DES ÉQUINOXES

Louis CAMPION



Les Cahiers de la SAN

LA PRÉCESSION DES ÉQUINOXES

Louis CAMPION

Capitaine au Long Cours

Édition 2011

Les « **Cahiers de la SAN** » sont édités par la Société d'Astronomie de Nantes,
Société Scientifique d'Éducation Populaire agréée Jeunesse et Sports.

35, boulevard Louis-Millet

44300 NANTES

Tél. 02 40 68 91 20 - Fax 02 40 93 81 23 - E-mail : san@san-fr.com

© Toute reproduction intégrale ou partielle faite par quelque procédé que ce soit,
sans l'autorisation de la Société d'Astronomie de Nantes, est interdite.

LA PRÉCESSION DES ÉQUINOXES

Équinoxe = *Æquus*, égal et *Nox*, nuit.

L'équateur est le grand cercle perpendiculaire à l'axe de rotation de la Terre. Si l'on prolonge son plan dans l'espace, son intersection avec la sphère céleste sera l'*équateur céleste*, de même d'ailleurs que si l'on prolonge l'axe de rotation de la Terre dans l'espace, il percera la voûte céleste aux *pôles célestes* Nord et Sud et deviendra alors *l'axe du monde*.

En plus de la rotation sur elle-même qu'elle accomplit en un jour, nous savons que la Terre tourne autour du Soleil. Elle accomplit ce périple en un an, selon une orbite presque circulaire.

Le plan de cette orbite n'est ni confondu ni parallèle à celui de l'équateur.

L'axe de la Terre est donc incliné en permanence par rapport à sa trajectoire autour du Soleil.

Si l'on prolonge dans l'espace le plan de l'orbite terrestre, son intersection avec la sphère céleste sera l'*écliptique*.

Ces deux grands cercles de la sphère céleste : *équateur* et *écliptique*, n'étant pas confondus comme on vient de le dire, se coupent en deux points que l'on nomme : *équinoxes*.

L'équinoxe de printemps, encore appelé point vernal, ou point γ (gamma) est celui qu'occupe la Terre le jour du printemps ; à l'opposé, sur la ligne des équinoxes, se trouve le point γ' où nous trouvons le premier jour de l'automne.

Le point vernal a, depuis les temps les plus anciens, été choisi comme point d'origine dans les mesures de positions des étoiles dans le ciel. Il fallait bien une origine, et le point d'intersection de l'équateur céleste et de l'écliptique, à la fois sur ces deux cercles et liés pour le premier à la rotation propre de la Terre sur elle-même et pour le second à sa translation autour du Soleil, avait été judicieusement choisi.

Dans les observatoires de l'époque il était possible, par l'observation du Soleil, de déterminer la position de ce point dans le ciel afin de s'y référer pour effectuer des mesures sur les étoiles.

Ce point origine, basé sur des éléments astronomiques solides, avait pour ses créateurs un caractère fixe et immuable, et c'est pour cela qu'il avait été choisi.

Par une belle nuit de l'an 134 avant notre ère, le savant astronome et mathématicien grec Hipparque, qui avait déjà calculé avec une précision quasi parfaite la durée du mois lunaire (0,3 seconde d'erreur sur la valeur adoptée actuellement) et celle de l'année sidérale (moins d'une minute d'erreur sur un an !), examinait le firmament.

Il fut stupéfait de voir une étoile briller, là où la veille il n'y avait rien.

Nous savons de nos jours qu'il avait aperçu une nova, dont l'apparition n'est pas une rareté, mais qui avait de quoi surprendre un astronome de l'antiquité.

Hipparque réfléchissant à cette apparition d'étoile éphémère pensa qu'il serait bien utile de confectionner un répertoire d'étoiles pour voir si de temps en temps il n'y en aurait pas une qui surgirait comme celle qu'il venait d'observer.

Un catalogue d'étoiles ne se construit pas aussi facilement que cela !

Recherchant dans les travaux de ses prédécesseurs il mit à jour une œuvre ébauchée un siècle et demi auparavant par deux astronomes d'Alexandrie : Aristylle et Timocharsis.

Hipparque reprit leurs travaux qu'il précisa et qu'il augmenta. Il considéra l'une après l'autre les principales étoiles et tout comme on situe un point à la surface du globe par sa latitude et sa longitude, il repéra la position de ces étoiles par leur latitude et leur longitude célestes (la latitude céleste se mesure à partir de l'écliptique vers le nord ou le sud, et la longitude céleste se mesure sur l'écliptique à partir du point vernal).

Le catalogue comprenait 800 étoiles distribuées en six grandeurs, presque comme on le fait encore aujourd'hui.

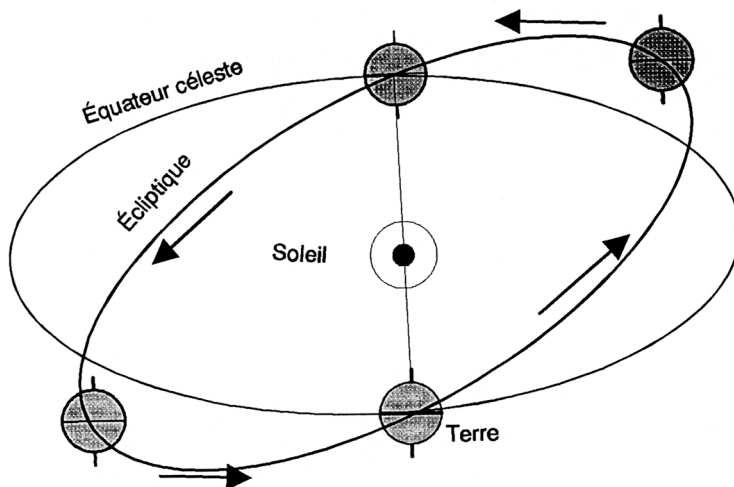
En effectuant les observations nécessitées par l'établissement de ce catalogue, Hipparque éprouva une autre surprise : comparant ses observations de l'étoile *Épi de la Vierge* avec celles d'Aristylle et de Timocharsis, il constata une différence de longitude de deux degrés.

– *Tiens, se dit-il, une erreur.*

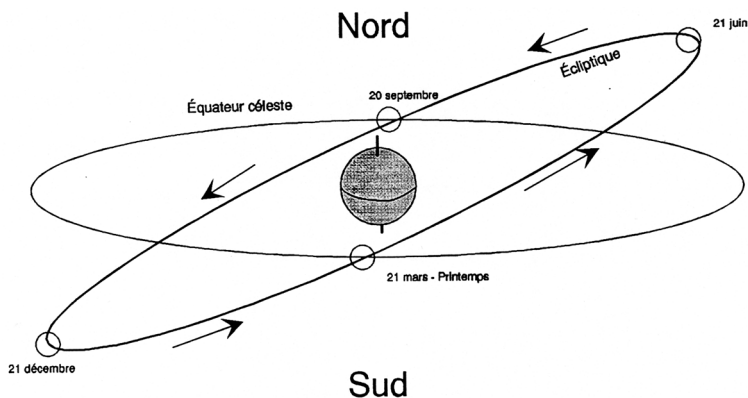
Mais, passant aux autres étoiles, il s'aperçut que toutes

celles qu'avaient passées en revue ses prédécesseurs offraient la même différence de longitude.

– *Cela ne peut pas être une erreur, réfléchit-il. Il s'agit sûrement d'une véritable variation des longitudes célestes, au cours de ces 150 ans (144 ans exactement, entre – 273 et – 129).*



Mouvement réel de la Terre autour du Soleil



*Mouvement apparent du Soleil autour de la Terre
(sur lequel il faut raisonner)*

Hipparque se pencha sur ce problème et réussit à l'élucider.

Il pensa, à juste titre, que cette variation séculaire des longitudes célestes était due à un léger balancement de l'axe de rotation de la Terre : c'était la *précession des équinoxes*, qui oblige l'extrémité de cet axe à décrire, en 26 000 ans, un petit cercle parmi les étoiles. La découverte était grandiose et suffirait à elle seule à immortaliser le nom de son auteur.

Le balancement de l'axe de la Terre entraîne celui du plan de l'équateur. Il n'est que de penser à une poêle à frire dans laquelle on veut étaler une louchée de pâte à crêpe et l'on comprendra aisément le mouvement de précession. Du fait de ce mouvement de l'équateur, les points d'intersection avec l'écliptique fixe, se déplacent lentement. Le point vernal rétrograde sur l'écliptique de 50,3" par an. Il va donc à la rencontre du Soleil qui parcourt cet écliptique dans le sens direct en un an.

Mais du fait de la rétrogradation du point vernal, le Soleil n'aura pas 360° à parcourir pour revenir en ce point, mais $360 - 50'',3$. Il passera donc à l'équinoxe un peu plus tôt tous les ans, c'est la raison du terme : *précession*.

La période de la précession des équinoxes est en fait de 25 790 ans.

Pendant fort longtemps donc ce mouvement du point vernal fut connu.

L'axe de la Terre décrit un cône dans le nord, et un autre cône dans le sud, dont le sommet commun se trouve au centre de la planète.

La base du cône est le cercle décrit par l'extrémité de l'axe.

Le centre de ce cercle de précession est le pôle de l'écliptique.

Comme le plan de l'équateur est incliné de $23^{\circ}27'$ sur celui de l'écliptique, le pôle de l'équateur est distant, angulairement, de $23^{\circ}27'$ de celui de l'écliptique, et le cercle de précession fait $23^{\circ}27'$ de rayon.

C'est le pôle de l'équateur, donc notre pôle qui tourne autour de celui de l'écliptique, et par conséquent, l'équateur qui se déplace par rapport à l'écliptique. Ceci est d'ailleurs confirmé par le fait que les latitudes célestes des étoiles restent inchangées, et seules leurs longitudes varient de $50'',3$ par an.

POSITION DES ÉTOILES DANS LE CIEL IL Y A 3000 ANS						
ÉTOILE		CONSTELLATION	AR (2000)	Décl. (2000)	AR (-1000)	Décl. (-1000)
Polaire	α	Petite Ourse	2 h 32 m	89°16' Nord	22h 49 m	72°49' Nord
Achernar	α	Éridan	1 h 38 m	57°15' Sud	23 h 24 m	73°37' Sud
Acrux	α	Croix	12 h 26 m	63°06' Sud	10 h 17 m	46°52' Sud
Aldébaran	α	Taureau	4 h 36 m	16°30' Nord	2 h 28 m	5°32' Nord
Alkaïd	η	Grande Ourse	13 h 47 m	49°20' Nord	11 h 32 m	65°36' Nord
Alphard	α	Hydre Femelle	9 h 27 m	8°39' Sud	8 h 08 m	1°31' Nord
Alphecca	α	Couronne Boréale	15 h 35 m	26°43' Nord	13 h 54 m	39°48' Nord
Alphéraz	α	Andromède	0 h 08 m	29°05' Nord	21 h 55 m	13°15' Nord
Altaïr	α	Aigle	19 h 51 m	8°52' Nord	18 h 41 m	6°07' Nord
Antarès	α	Scorpion	16 h 29 m	26°26' Sud	14 h 06 m	14°52' Sud
Arcturus	α	Bouvier	14 h 15 m	19°11' Nord	11 h 53 m	35°05' Nord
Atria	α	Triangle Austral	16 h 48 m	69°00' Sud	13 h 00 m	56°28' Sud
Bételgeuse	α	Orion	5 h 55 m	7°24' Nord	4 h 21 m	1°25' Nord
Canopus	α	Carène	6 h 24 m	52°42' Sud	6 h 34 m	53°21' Sud
Capella	α	Cocher	5 h 17 m	46°00' Nord	2 h 33 m	36°14' Nord
Dénébola	β	Lion	11 h 49 m	14°34' Nord	9 h 26 m	29°44' Nord
Deneb	α	Cygne	20 h 41 m	45°17' Nord	19 h 55 m	37°35' Nord
Diphna	β	Baleine	0 h 43 m	17°59' Sud	22 h 13 m	34°16' Sud
Dubhé	α	Grande Ourse	11 h 03 m	61°45' Nord	7 h 31 m	73°04' Nord
Enif	ε	Pégase	21 h 44 m	9°52' Nord	20 h 07 m	0°10' Sud
l'Épi	α	Vierge	13 h 25 m	11°10' Sud	10 h 53 m	5°19' Sud
Fomalhaut	α	Poisson Austral	22 h 57 m	29°37' Sud	20 h 34 m	42°32' Sud
Hamal	α	Bélier	2 h 07 m	23°28' Nord	23 h 37 m	16°05' Nord
Kochab	β	Petite Ourse	14 h 51 m	74°09' Nord	7 h 01 m	83°28' Nord
Menkent	θ	Centaure	14 h 06 m	36°22' Sud	11 h 26 m	20°11' Sud
Mirfak	α	Persée	3 h 24 m	49°52' Nord	0 h 28 m	35°16' Nord
Nunki	σ	Sagittaire	18 h 55 m	26°18' Sud	17 h 03 m	23°36' Sud
Peacock	α	Paon	20 h 25 m	56°44' Sud	17 h 22 m	57°54' Sud
Pollux	β	Gémeaux	7 h 45 m	28°00' Nord	6 h 08 m	28°43' Nord
Procyon	α	Petit Chien	7 h 39 m	5°13' Nord	6 h 15 m	6°33' Nord
Rasalague	α	Ophiucus	17 h 35 m	12°34' Nord	16 h 24 m	19°09' Nord
Régulus	α	Lion	10 h 08 m	11°58' Nord	8 h 10 m	22°47' Nord
Rigel	β	Orion	5 h 14 m	8°12' Sud	3h 50 m	16°17' Sud
Sirius	α	Grand Chien	6 h 45 m	16°43' Sud	5 h 49 m	18°16' Sud
Vega	α	Lyre	18 h 37 m	38°47' Nord	18 h 14 m	39°44' Nord

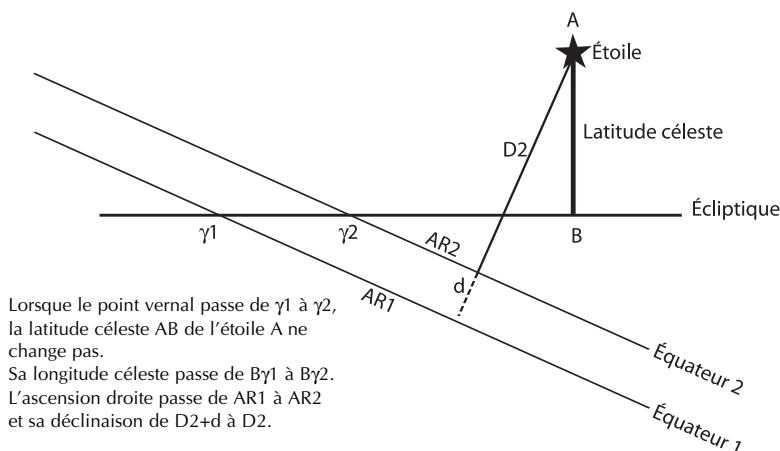
Dans les calculs astronomiques habituels, lorsque l'on se réfère à la Terre, sur laquelle, malgré tout nous sommes embarqués, on n'utilise pratiquement jamais les coordonnées écliptiques : latitude et longitude célestes.

On positionne les étoiles dans le ciel à l'aide des coordonnées *équatoriales*, qui sont l'*ascension droite* et la *déclinaison*.

L'ascension droite, comme la longitude céleste, est la distance qui sépare l'étoile du point vernal, mais mesurée non plus sur l'écliptique, mais sur l'équateur.

La déclinaison est la distance angulaire qui sépare l'étoile de l'équateur, comptée vers le Nord ou vers le Sud comme la latitude céleste.

Comme c'est l'équateur qui se déplace par rapport à l'écliptique, le problème n'est plus si simple pour situer les étoiles, car les deux coordonnées vont varier dans le temps, et d'une manière assez compliquée.



Variation dans le temps des coordonnées écliptiques et équatoriales

La figure ci-dessus est une représentation plane du voisinage du point vernal ; mais en fait, il s'agit de deux sphères dont l'une se déplace dans l'autre et de ce fait, selon la distance des étoiles au point vernal et au plan de l'équateur, les corrections à

apporter pour compenser la précession varient considérablement.

Pendant très longtemps les astronomes se sont bornés à noter avec précision les positions exactes de toutes les étoiles de leurs catalogues pour une date donnée. On suivait minutieusement tous les déplacements pour en tirer des règles ou des formules et pour cerner de plus en plus ce mouvement dont la période était quand même bien éloignée d'une vie humaine !

On déterminait les ascensions droites des étoiles à l'aide de la *lunette méridienne* accompagnée de la *pendule sidérale*.

La lunette méridienne, qui est une lunette astronomique de grandes dimensions, a son axe optique mobile autour d'un axe horizontal orienté rigoureusement suivant la ligne Est-Ouest. L'axe optique décrit donc le plan méridien.

La pendule sidérale, est une pendule d'une extrême précision, réglée sur le temps sidéral, c'est à dire sur le mouvement diurne du point vernal. Elle indique 00:00:00 heure à l'instant précis du passage du point vernal au méridien de l'observatoire.

Lorsqu'un astre passe au méridien, l'heure sidérale est égale à l'ascension droite ARA de l'astre.

On a ainsi, par simple lecture de la pendule au moment précis où il passe au méridien, la distance angulaire (exprimée en heures) qui sépare l'astre du point vernal. C'est une des coordonnées équatoriales, l'ascension droite, on l'a vu.

On détermine la deuxième des coordonnées équatoriales, la déclinaison, à l'aide du *cercle mural*.

Le cercle mural est un instrument qui permet une détermination précise des distances zénithales des astres au moment de leur passage méridien. La distance zénithale est la distance angulaire qui sépare l'astre du zénith du lieu. Par un calcul très simple, on obtient la déclinaison de l'astre si l'on connaît la latitude du lieu. (Ce qui pour un observatoire doit être connu avec une grande précision)

On fait : $D = L - N$, où D est la déclinaison cherchée, L la latitude de l'observatoire et N la distance zénithale obtenue à l'aide du *cercle mural*.

Le cercle mural se compose d'un cercle de grandes dimensions, gradué de 0° à 360° , pouvant tourner autour d'un axe horizontal implanté dans un mur (d'où *mural*) vertical ; ce mur est orienté suivant le plan méridien et par suite l'axe de rotation du cercle mural est orienté selon la ligne Est-Ouest. Le cercle mural porte une lunette astronomique qui lui est fixée d'une façon rigide suivant un diamètre. L'axe optique se déplace ainsi dans le plan méridien.

Ces deux instruments : lunette méridienne et cercle mural ont tous les deux un axe de rotation horizontal orienté Est-Ouest.

De nos jours, on les combine en adjoignant à la lunette méridienne un cercle gradué, et l'on a un nouvel instrument appelé : *cercle méridien*.

A l'aide donc de ces instruments, les astronomes ont tenu l'inventaire précis des positions de toutes les étoiles depuis les temps anciens, ce qui a permis aux astronomes modernes, d'étudier avec le maximum d'éléments le déplacement de l'axe de la Terre.

Vers le milieu du XVIII^e siècle, l'astronome anglais Bradley s'était aperçu que la position des points équinoxiaux, calculé dans l'hypothèse d'un mouvement uniforme, est sujette à des erreurs, *en plus* et *en moins*, qui repassent périodiquement par les mêmes valeurs tous les 18 ans 214 jours.

Il venait de découvrir une inégalité de la précession appelée *nutation*.

En réalité, le pôle céleste Nord ne décrit pas un cercle autour du pôle de l'écliptique comme on l'a dit, mais une courbe festonnée, combinaison du cercle de précession et d'une petite ellipse donc le grand axe dirigé vers le pôle de l'écliptique mesure 18"4 et le petit axe 13"7.

À la suite des accumulations de données récoltées depuis de très nombreux siècles, et devenant de plus en plus précises à mesure que les instruments se perfectionnaient, des astronomes mathématiciens ont pu étudier en détail le mouvement de précession et en tirer des conclusions qu'ils ont mises sous forme de relations mathématiques. On peut ainsi calculer à l'avance la position des étoiles pour les années à venir, comme on peut le faire pour les siècles et même les millénaires passés.

Voici une relation simple qui permet de calculer l'ascension droite AR et la déclinaison D d'une étoile quelconque pour une année déterminée, étoile dont on connaît les mêmes éléments pour une année donnée.

Nous prendrons comme année de référence l'année 2000, donc AR₂₀₀₀ et D₂₀₀₀, nous aurons alors :

$$\begin{aligned} AR &= AR_{2000} + [3,074 \text{ s} + 1,336 \text{ s} \times \sin(AR_{2000}) \times \tan(D_{2000})] \times N \\ D &= D_{2000} + 20,04'' \times \cos(AR_{2000}) \times N \end{aligned}$$

où N est le nombre d'année depuis ou jusqu'à l'an 2000 (N est négatif si avant 2000 et positif si après 2000).

La relation ci-dessus ne s'applique que lorsque N est faible, de l'ordre de quelques années ou au plus quelques dizaines d'années.

Si l'on veut faire un voyage dans les siècles passés ou futurs de quelques milliers d'années il faudra utiliser la méthode rigoureuse suivante.

On pose :

t = temps compté depuis 2000 en *milliers d'années* (– pour le passé, + pour l'avenir)

$$r = 23056''5 \times t + 30''26 \times t^2 + 18'' \times t^3 \approx$$

$$s = r + 79''34 \times t^2 + 0''32 \times t^3 \approx$$

$$j = 20038''3 \times t - 42''67 \times t^2 - 41''8 \times t^3 \approx$$

$$A = AR_{(2000)} + r$$

$$A' = AR_{(\text{cherché})} - s, \text{ d'où } AR = A' + s$$

$$P' = 90^\circ - D_{(\text{cherchée})}$$

$$P = 90^\circ - D_{(2000)}$$

On utilisera pour trouver A' puis AR , la relation :

$$\text{Tg } A' = \text{Sin } P \times \text{sin } A / (\text{sin } P \times \text{cos } j \times \text{cos } A - \text{cos } P \times \text{sin } j)$$

et pour trouver P' puis D :

$$\text{Cos } P' = \text{Cos } P \times \text{cos } j + \text{sin } P \times \text{sin } j \times \text{cos } A$$

Une conséquence de la précession des équinoxes est que le point vernal, tout comme son homologue le point automnal diamétralement opposé, se déplace dans les constellations situées le long de l'écliptique.

Il y a fort longtemps, au temps où les astronomes groupèrent les étoiles en constellations et attribuèrent à chaque constellation une région bien déterminée du ciel, le point vernal devait se trouver dans la constellation du Taureau, une des douze constellations situées sur l'écliptique et appelées constellations zodiacales.

C'était vers l'an 4000 avant notre ère, car dans tous les mythes religieux les plus anciens que l'on connaisse, le Taureau est associé à l'œuvre féconde du Soleil sur les saisons et les produits de la Terre, tandis que l'on ne trouve aucune trace d'une association analogue avec les Gémeaux où se trouvait le point vernal en des temps encore plus reculés (antérieurs à 4300 avant notre ère).

Les étoiles du Taureau, notamment les remarquables Pléiades, étaient pour les Égyptiens, pour les Chinois, et encore pour les premiers Grecs, les étoiles de l'équinoxe.

À l'époque d'Hipparque, l'équinoxe de printemps se trouvait dans le Bélier et celui d'automne dans la Balance.

C'est de cette époque que date le début de l'Astrologie, pseudo-science qui prétend expliquer les destinées terrestres par la position des astres dans le ciel.

De nombreux traités d'astrologie écrits à cette époque sont bâtis sur une influence du Soleil passant dans le Bélier lors de l'équinoxe de printemps.

Aujourd'hui, 2150 ans après Hipparque, qui découvrit la précession des équinoxes on l'a vu, les choses ne sont plus les mêmes car cette précession a fait *rétrograder* les deux points équinoxiaux et les a transportés, le premier dans la constellation des Poissons, le second dans celle de la Vierge.

Il aurait donc fallu changer les *signes* qui les représentent.

Mais cela n'a pas été fait; et les signes du Zodiaque sont devenus tout à fait distincts des constellations qu'ils sont censés

indiquer. Ces signes passeront d'ailleurs d'une **constellation** à l'autre, à mesure que les équinoxes se déplaceront ; mais d'un lent mouvement qui les font parcourir une constellation zodiacale en justement 2150 ans.

Le Soleil parcourt le zodiaque dans le **sens direct** (d'Ouest en Est) en un an :

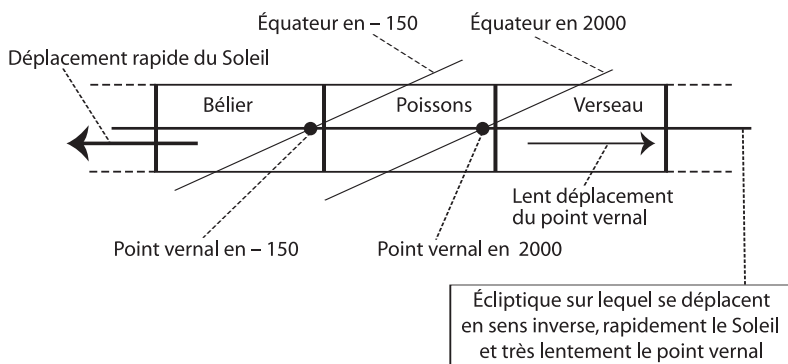
Bélier → Taureau → Gémeaux → Cancer → / → Capricorne → Verseau → Poissons, soit un signe par mois.

Le point vernal le parcourt dans le **sens rétrograde** (d'Est en Ouest), inverse du Soleil en 25 800 ans :

Taureau → Bélier → Poissons → Verseau, etc., soit un signe tous les 2150 ans.

Le point vernal est actuellement, on l'a vu, dans les Poissons, près d'en sortir pour entrer dans le Verseau.

Le Soleil, le jour du printemps, vers le 21 mars, se trouve par définition à ce point, il est donc dans les Poissons et ne rentrera dans le Bélier qu'environ un mois plus tard, soit le 20 avril.



Les causes de la précession

Pendant très longtemps les astronomes ne purent que constater les effets de la précession des équinoxes, sans pouvoir se l'expliquer.

Il fallut bien sûr, les Copernic, les Képler, les Galilée, les Newton avec leurs avalanches de découvertes concernant le système solaire, son organisation, ses lois des mouvements et des attractions réciproques pour que l'on commence à envisager la précession et sa petite irrégularité la nutation comme une conséquence des attractions exercées par le soleil et la lune sur la terre.

Que la nutation soit liée à un effet de la lune, cela Bradley l'avait déjà annoncé car la période de la nutation de la Terre est la même que celle de la précession de la lune; car le mouvement de la lune aussi est soumis à des perturbations et notre satellite est affecté comme la Terre d'un mouvement de précession et d'un mouvement de nutation.

Sa précession, que l'on n'appelle pas : des équinoxes ; mais que l'on désigne par la *rétrogradation de la ligne des nœuds*, fait parcourir à son pôle, un petit cercle de $5^{\circ}09'$ de rayon autour du pôle de l'écliptique en 18 ans $\frac{2}{3}$. Cette coïncidence avec la période de nutation de la Terre est trop évidente pour ne pas voir dans ce mouvement de la lune la cause de celui de la Terre. C'est ce que Bradley avait trouvé.

Pour mémoire, le mouvement de nutation de la lune fait parcourir à l'extrémité de son axe, autour d'une position moyenne située sur son cercle de précession, un petit cercle de $9'$ de rayon en 173 jours. Ces 173 jours représentent la période de retour du soleil par la ligne des nœuds.

O n savait bien au début du xix^{e} siècle déjà que le mouvement de précession des équinoxes avait pour cause l'attraction du soleil sur le renflement équatorial de la Terre, et que celui de nutation était dû à la lune pour la même raison.

D'Alembert avait d'ailleurs fait une brillante analyse sur ces phénomènes vers la fin du xviii^{e} siècle ; mais la façon dont s'exercent ces forces restait encore mystérieuse.

Léon Foucault naquit en 1819. Il a laissé son nom à différents systèmes et appareils scientifiques du 19^{ème} siècle. Entre autres au fameux pendule à l'aide duquel il mit en évidence la rotation de la Terre en 1851 par sa célèbre expérience du Panthéon

Cette expérience était basée sur le fait que le plan d'oscillation d'un pendule reste fixe dans l'espace. Si on le fait osciller en direction d'une étoile, et que les oscillations se prolongent un certain temps, on verra le pendule continuer à osciller vers l'étoile, alors que les repères terrestres se déplaceront par rapport à cette direction.

Poursuivant ses expériences sur des objets similaires capables de garder une direction constante dans l'espace, Foucault pensa à la toupie dont il étudia le comportement, et partant de là il inventa le gyroscope. Un appareil curieux qui fut appelé à un brillant avenir au cours du xx^e siècle.

En effet on a pu reprocher à l'expérience du pendule, de faire appel à un instrument qui nécessite pour fonctionner l'aide de l'attraction terrestre.

Car c'est la pesanteur qui ramène le pendule à son point bas deux fois par période. En apesanteur il est inutile de vouloir faire osciller un pendule, à moins de créer une force nouvelle, magnétique par exemple qui attirerait la masse pendulaire. Mais ceci est une autre histoire!

Donc malgré la preuve évidente et retentissante apportée par l'expérience du pendule au Panthéon, Foucault voulu se dégager de l'attraction terrestre.

Le gyroscope donc, lui en offrit le moyen .

Qu'est ce qu'un gyroscope ?

Nous en tenant à la définition du petit Larousse nous dirons qu'il s'agit d'un « *appareil fournissant une direction invariable de référence, grâce à la rotation rapide d'une lourde masse autour d'un axe qui possède un ou deux degrés de liberté par rapport au boîtier de l'instrument* ».

Il n'y a rien à ajouter à cette définition !

Que cherchait Foucault ? Il recherchait comme pour le pendule : *une direction invariable de référence*. Il la trouve dans le gyroscope.

Et comment est obtenue cette direction invariable ? *Grâce à la rotation rapide d'une lourde masse autour d'un axe, etc.*

On a vu que Foucault avait imaginé le gyroscope à la suite d'observations sur les toupies.

Ce jouet d'enfant, tout à fait anodin, si on le pose sur une table, va se coucher et au repos restera immobile sur sa tranche, attiré comme tout ce qui l'entoure par l'attraction terrestre.

Mais il suffit de lui imprimer une *rotation rapide* autour de son axe, pour voir la toupie se tenir debout sur sa pointe, l'axe vertical, et tourner droite, défiant ainsi les lois de la pesanteur auxquelles elle était soumise avant sa rotation.

Foucault tira profit de ce phénomène et construisit des appareils de plus en plus perfectionnés : augmentation de la masse de la toupie, qu'il emprisonna dans des cercles libres de

se mouvoir l'un par rapport à l'autre donnant ainsi au système plusieurs axes de liberté, entretien électrique du mouvement de rotation, amélioration des frottements etc. au point qu'il put étudier le comportement exact de ce qu'il appela le *gyroscope*.

Son idée première était de trouver un appareil capable de fournir une direction invariable, et cela il l'obtint, puisque lancé avec l'axe pointant vers une étoile, on pouvait voir le gyroscope tourner par rapport à la Terre, en conservant l'axe pointé sur l'étoile.

Il réalisait là une expérience en chambre bien moins spectaculaire que celle du Panthéon avec le pendule, mais néanmoins dans laquelle toutes les influences terrestres étaient éliminées.

Le but de Foucault était atteint !

Mais c'était sans compter les autres possibilités et particularités du gyroscope.

Après Foucault, tout le monde se mit à étudier son curieux appareil et l'on remarqua dans cet engin des comportements défiant l'entendement en contradiction apparente avec les lois physiques connues jusqu'alors.

Le gyroscope, on l'utilisait sans le savoir, et curieusement, comme la toupie, en jouet d'enfant. Il s'agit du cerceau, que les enfants faisaient (et font toujours peut-être) rouler devant eux en le poussant avec un bâton.

Pourquoi, lorsqu'il est immobile, le cerceau ne tient pas debout et tombe à terre, alors que si on le fait rouler il reste debout ?

Parce que lorsqu'il roule il se comporte en gyroscope et son axe de rotation conserve la position horizontale.

Et la bicyclette, heureusement qu'il y a des murs pour l'appuyer lorsqu'elle ne roule pas. Mais lorsqu'elle roule, même avec le centre de gravité commun cycliste-bicyclette situé bien haut, elle conserve une position verticale imposée par l'effet gyroscopique de ses roues en mouvement dont l'axe conserve la même direction horizontale en dépit de l'attraction terrestre.

Larousse nous a parlé de rotation rapide et de lourde masse.

L'effet gyroscopique c'est à dire la tendance de l'appareil à se dégager des influences terrestres : pesanteur et rotation de la Terre, est fonction du moment cynétique H .

$$H = I \times \omega$$

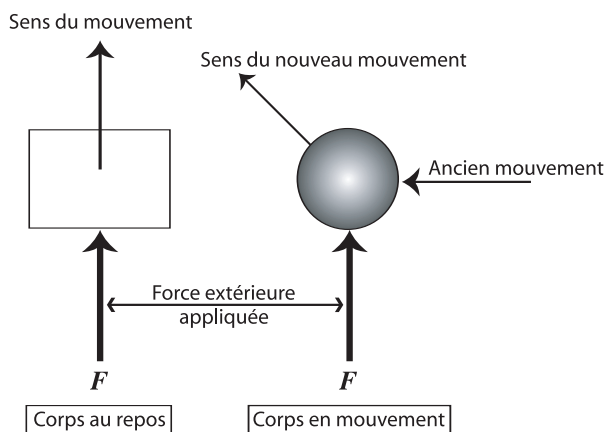
où I le moment d'inertie est égal à la somme des masses élémentaires m multipliée par le carré de leur distance r à l'axe, et ω est la vitesse de rotation du rotor autour de son axe.

On voit donc que l'effet gyroscopique est directement fonction de la masse totale $M (= \Sigma m)$ du corps en rotation, du carré du rayon r^2 de ce même corps en rotation, et de la vitesse ω de rotation.

Ceci n'est pas le plus curieux !

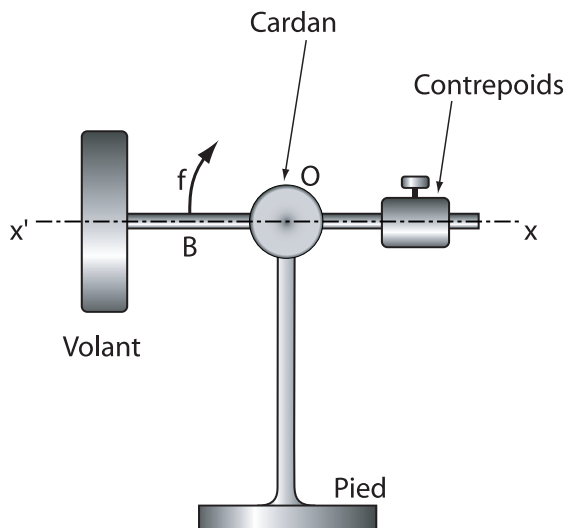
Le plus curieux en effet a été la découverte du comportement paradoxal du gyroscope lorsqu'on le soumet à des forces extérieures.

D'habitude, si l'on applique une force à un corps, au repos ou en mouvement, on lui imprime un déplacement *dans le sens de la force appliquée*. C'est évident !



En ce qui concerne le gyroscope, le déplacement attendu ne se fait pas dans le sens de la force appliquée, mais à 90° de celui-ci.

On dit que le *gyroscope se dérobe*.



La figure ci-dessus représente un gyroscope expérimental composé d'un lourd volant à l'extrémité d'un axe XX' .

Un contrepoids est placé de telle sorte que le centre de gravité du système mobile se trouve en O , sur une cardan.

On lance le volant, et l'axe XX' étant dans une direction quelconque, cet axe reste dans cette direction indéfiniment, même si l'on déplace ou si l'on fait tourner le pied de l'appareil.

Si l'on exerce sur l'axe XX' , en un point quelconque, autre que O , une force perpendiculaire à cet axe, il se déplacera non pas dans la direction de cette force, mais dans un **plan perpendiculaire à la force**.

C'est l'effet gyroscopique.

Ainsi, sur la figure, si l'on exerce une force en B , perpendiculaire au plan de figure, d'avant en arrière, le gyroscope va se soulever dans ce plan, dans la direction de la flèche.

Un mathématicien français du xix^e siècle nommé Résal avait ainsi énoncé ce phénomène pour donner le sens du déplacement de l'axe du gyroscope :

« La vitesse de l'extrémité du vecteur moment cinétique est équivalente au moment des forces appliquées ».

Encore faut-il savoir de quel côté de l'axe se trouve l'extrémité du vecteur moment cinétique !

Ceci est facile à trouver en utilisant le tire-bouchon de Maxwell comme en électricité.

On tourne le tire-bouchon dans le sens de rotation du gyroscope et il avance théoriquement dans le sens du vecteur moment cinétique.

Le moment des forces appliquées est également déterminé par la règle du tire-bouchon. En faisant tourner celui-ci sous l'effet de la force appliquée, sa vis progressera dans le sens du moment.

Donc, ci-contre, vu le sens de rotation du volant, le vecteur moment cinétique est dirigé vers la droite de la figure (côté de X) et vu le sens de la force exercée, son moment est vertical dirigé vers le bas. Le côté X de l'axe va s'abaisser (ce qui revient à dire que le volant va se soulever dans le sens de la flèche comme on l'a dit).

Quittons maintenant ces choses subtiles et relativement compliquées pour revenir à la toupie, le jouet d'enfant qui inspira le gyroscope à Foucault.

La toupie est un gyroscope dans sa forme la plus simple, c'est une masse qui tourne rapidement autour d'un axe.

Comme tel, elle est soumise aux mêmes lois que le gyroscope.

Si on la fait tourner rapidement avec son axe vertical, elle restera un bon moment dans une position verticale ; puis lorsque la vitesse de rotation va diminuer, elle va commencer à s'incliner, à se dandiner de plus en plus vite, pour finalement s'arrêter affaissée sur le côté.

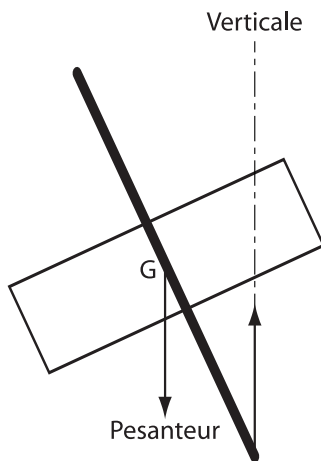
Nous retrouvons là toutes les réactions du gyroscope.

Rotation rapide, veut dire moment cinétique important et effet gyroscopique maximum. L'axe du jouet se maintient dans la position verticale dans laquelle il a été lancé.

La toupie est soumise à l'attraction de la Terre de par son propre poids. Mais cette force d'attraction est dirigée dans le sens de l'axe et passant par le centre de gravité de l'engin, n'a aucun effet sur le comportement du jouet.

Par contre, si l'axe n'était pas vertical, ce qui s'obtient lors du lancement ou lorsque la vitesse diminue, le centre de gravité G du jouet ne serait plus sur la verticale de la pointe sur laquelle il repose au sol, mais légèrement décalé sur le côté (cependant toujours sur l'axe matériel de la toupie par définition du centre de gravité).

La pesanteur appliquée en G tend à faire basculer l'axe de la toupie vers la gauche sur la figure ci-contre. D'après ce que l'on a vu



sur le gyroscope, cette force de la pesanteur produira un déplacement perpendiculaire à son sens d'application et l'axe de la toupie se déplacera vers l'avant ou vers l'arrière du plan de figure selon son sens de rotation (théorème de Résal).

Mais, et c'est ici que l'effet gyroscopique révèle toute sa subtilité, si l'axe de la toupie sous l'effet de la pesanteur telle qu'on le voit sur la figure ci-contre, si cet axe se déplace, vers l'arrière (par exemple), la toupie va pencher vers l'arrière et la pesanteur à ce moment aura tendance à la faire basculer sur l'arrière. Ceci aura pour effet de produire un déplacement de l'axe vers la droite. La toupie sollicitée vers la droite s'inclinera vers l'avant, ce qui aura pour effet de déplacer l'axe vers la gauche etc., etc.

Il en résulte un lent mouvement de rotation de l'axe de la toupie autour de la verticale, dans un sens qui dépendra du sens de rotation de la toupie.

Ce mouvement de l'axe de la toupie s'appelle *mouvement de précession*.

Dans le cas de la toupie soumise à la pesanteur, il s'effectue dans le même sens que son sens de rotation.

La Terre considérée comme un gyroscope.

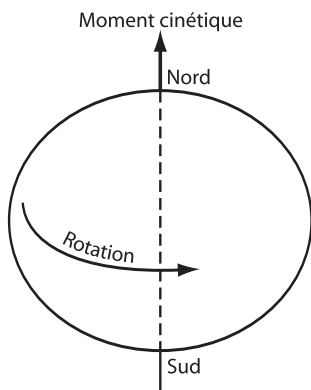
Notre planète bien isolée dans l'espace est libre de se mouvoir selon tous les degrés de liberté possibles. On ne peut rêver d'un meilleur gyroscope. Elle tourne libre de ses mouvements, d'une vitesse rapide, masse et rayon importants.

On pourrait calculer la valeur de son moment cinétique, mais ceci n'est pas notre propos. Contentons nous de chercher la direction du vecteur moment cinétique.

Vue du Nord, la Terre tourne dans le sens direct (de l'Ouest à l'Est) donc la loi du tire-bouchon qui ferait cet instrument sortir de Terre au pôle Nord, nous indique que le vecteur moment cinétique est dirigé du Sud au Nord sur l'axe de notre globe.

Voilà un gyroscope idéal, sans frottements, dont on va pouvoir étudier aisément le comportement.

La masse du gyroscope est constituée d'un ellipsoïde de rayon équatorial 6 378 388 m et de rayon polaire 6 356 912 m, soit un aplatissement de $1/297 = (6378,388 - 6356,912) / 6378,4$



Nous allons chercher à quelles forces extérieures est soumis ce gyroscope terrestre.

L'axe de la Terre est incliné sur sa trajectoire d'environ $23,5^\circ$

Contrairement à la toupie de tout-à-l'heure, la Terre est en apesanteur et les seules forces qui s'appliquent sur elle sont celles exercées par les astres qui l'entourent.

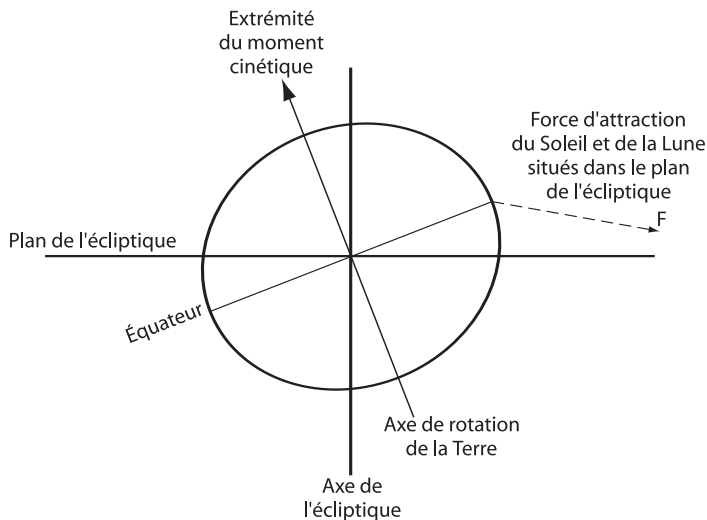
Si elle avait été parfaitement sphérique et homogène, toutes les forces d'attraction seraient passées par son centre. Dans ce cas aucun effet perturbateur ne se serait fait sentir. Mais au lieu de cela, comme elle est renflée à l'équateur et non homogène, l'attraction du Soleil et de la Lune s'exerce sur ce renflement et tend à déplacer son axe de rotation.

On sait que le plan de l'écliptique et celui de l'équateur forment un angle de $23,5^\circ$ et que le Soleil et la Lune sont dans l'écliptique. Les forces que ces deux astres exercent sur le renflement équatorial de la Terre tendent à ramener le plan de l'équateur dans celui de l'écliptique ou si l'on veut, à ramener l'axe de rotation du gyroscope-Terre parallèle à l'axe de l'écliptique.

De proche en proche comme dans le cas de la toupie, l'axe de la Terre va opérer un mouvement de précession, tendant à répondre à l'attraction conjuguée du Soleil et de la Lune qui cherchent à le ramener sur celui de l'écliptique.

L'angle au sommet du cône parcouru par l'axe de la Terre est égal à $23,5^\circ \times 2 = 47^\circ$.

La figure ci-après représente la position de la Terre en hiver. Si l'on suppose le Soleil en été, sur l'écliptique, mais à



Le soleil et la lune dans le plan de l'écliptique attirent le renflement équatorial de la Terre et tendent à ramener son axe de rotation sur celui de l'écliptique. Cette force dont le moment (règle du tire-bouchon) est perpendiculaire au plan de figure et dirigé vers l'amère va amener l'extrémité du vecteur moment cinétique à se déplacer vers l'amère du plan de figure.

gauche de la figure, on voit clairement que sa force d'attraction là aussi tend à amener l'axe de la Terre sur celui de l'écliptique en relevant le renflement équatorial au lieu de le rabaisser comme sur la figure.

La Terre tourne d'Ouest en Est, dans le sens direct et la précession s'effectue dans le sens rétrograde. Les deux mouvements sont à l'inverse l'un de l'autre.

Nous avons dit en parlant de la toupie que le mouvement de précession s'effectuait dans le même sens que celui de sa rotation. D'où vient cette apparente contradiction ? Du fait que la pesanteur tend à **écarter** l'axe de la toupie de la verticale alors que l'attraction luni-solaire tend à **ramener** l'axe de la Terre sur celui de l'écliptique.

Voilà expliqué par la mécanique le mouvement de précession des équinoxes.

La nutation s'explique par un léger tremblement de l'axe de rotation que l'on décèle aussi chez la toupie.

Mais ceci encore est une autre histoire, comme la variation de 48" par siècle de obliquité de l'écliptique due à l'attraction de Vénus (masse faible, proche de la Terre) et de Jupiter (éloignée mais masse imposante).

En guise de conclusion

Quelques chercheurs se sont posés la question de savoir si l'on ne pouvait pas utiliser le mouvement de précession des équinoxes pour recréer les ciels du passé.

Avec des étoiles placées là où elles étaient il y a plusieurs millénaires, il était facile de calculer leurs déplacements, leurs positions à leurs levers ou couchers et en associant ces résultats à l'archéologie il aurait été possible de comprendre certains éléments astronomiques cités par les anciens et même de dater certains phénomènes rapportés par la chronique ou encore certains monuments.

Il y a des faits indéniables tels que l'annonce chez les égyptiens des crues du Nil par le lever héliaque de l'étoile Sirius du Grand Chien.

Le lever héliaque d'une étoile se produit lorsque cette étoile se lève en même temps que le soleil (*hélîos* = *Soleil* en grec).

Au temps des anciens égyptiens ce phénomène astronomique se produisait au début du mois d'août peu avant les crues du Nil. Sirius servait donc d'indicateur de saison. Cette période de l'année était également la plus chaude et l'on a tiré de Sirius, étoile la plus brillante de la constellation du Grand Chien (*Canis* en latin) la *canicule*.

On a trouvé dans les Pyramides, des couloirs ou des cheminées orientées, donnant sur l'extérieur, qui de nos jours ne correspondent à rien. Si l'on applique aux étoiles la correction due à la précession, on a trouvé que certaines directions de ces monuments anciens correspondaient à des culminations ou des levers d'étoiles tels qu'ils avaient lieu à telle ou telle époque au moment où le monument fut construit.

Cela est peut-être valable si l'on connaît avec précision la date de construction du monument.

Mais on pourrait être tenté de faire le raisonnement inverse, et supposant que le monument servait à telle ou telle

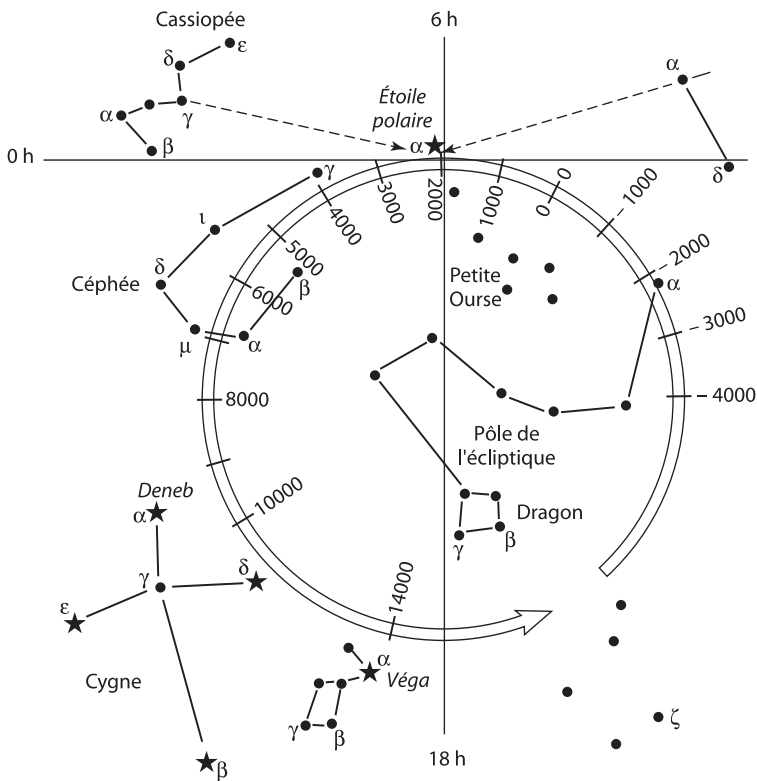
observation, on recherche à quelle date les étoiles se trouvaient en ce lieu dans telle direction à leurs levers, couchers ou passages méridiens.

Dans ce genre de raisonnement il faut être extrêmement prudent, car rien ne dit le plus souvent à quoi servait le monument (on cherche toujours à quoi pouvaient servir les alignements de menhirs ou les menhirs eux-mêmes) si même ils servaient à quelque-chose.

Donc cette précession découverte par Hipparque au deuxième siècle avant notre ère, et analysée puis comprise par les savants modernes, continue à déplacer lentement le pôle de la Terre parmi les étoiles, au point que notre étoile polaire se trouvera dans 13 000 ans (130 siècles) éloignée du pôle de 47° mais ne nous inquiétons pas car nos lointains descendants auront à cette époque une étoile bien plus brillante comme étoile polaire, il s'agira d'une des plus belles de notre ciel boréal : *Véga*

Sic transit gloria mundi : ainsi passe la gloire du monde.

Que sommes-nous pauvres humains devant une seule période de précession ?



La Société d'Astronomie de Nantes

Résolument tournée vers le grand public, la SAN vous propose de découvrir l'astronomie ou d'approfondir vos connaissances dans ce domaine de multiples façons :

- Assister aux exposés d'astronomie présentés lors des réunions du vendredi soir, ouvertes à tous les adhérents, au local de la Société à partir de 20h30.
- Consulter ou emprunter l'un des mille ouvrages que possède le fonds bibliothécaire.
- Participer aux observations de découverte ou de perfectionnement. Vous pouvez également emprunter un instrument.
- Assister aux conférences au cours desquelles des astronomes et astrophysiciens de renom viennent présenter les derniers acquis de leurs travaux.
- Solliciter la SAN pour animer des actions pédagogiques préparées à l'attention de public scolaire ou adulte.
- Visiter les expositions auxquelles la SAN participe régulièrement.
- Apporter votre contribution à la réalisation de travaux pratiques d'astronomie tels que la mesure de la masse de Jupiter ou l'évaluation des altitudes des reliefs lunaires.
- Réfléchir et débattre des grands thèmes de la physique, de l'astrophysique et de la science en général au sein d'un groupe de réflexion théorique.
- Enfin, l'astronomie nécessitant des connaissances et des compétences multiples (en optique, mécanique, électronique, etc.), offrir un peu de votre temps pour la conception ou à la réalisation de projets astronomiques.

Pour participer à ces activités, il vous suffit de devenir adhérent.

La Société d'Astronomie de Nantes est une association fondée en 1971 et régie par la loi de 1901.

LA PRÉCESSION DES ÉQUINOXES

Louis CAMPION

Ce fascicule aborde le phénomène de la précession des équinoxes, un lent déplacement des points équinoxiaux causé par l'inclinaison de l'axe terrestre et les forces gravitationnelles du Soleil et de la Lune. Hipparque en fit la découverte au II^{ème} siècle av. J.-C. en constatant des variations dans les longitudes célestes. L'axe terrestre décrit un cône de 47° en 25 790 ans, entraînant un déplacement des constellations du zodiaque observées aux équinoxes. La nutation, découverte plus tard, est une oscillation secondaire de cet axe. Le texte décrit également les instruments d'observation historiques comme la lunette méridienne, le cercle mural et le gyroscope, inventé par Foucault pour démontrer la rotation terrestre. Le gyroscope et la toupie illustrent le principe physique à l'origine de la précession. Ce phénomène permet de reconstituer les ciels anciens et d'éclairer certains alignements de monuments historiques. La précession affectera même l'étoile polaire au fil des millénaires.



**SOCIÉTÉ
d'ASTRONOMIE
de NANTES**

Société Scientifique d'Éducation Populaire agréée Jeunesse et Sports
35, boulevard Louis Millet - 44300 NANTES - Tél. 02 40 68 91 20 - Fax 02 40 93 81 23
Internet : www.san.asso.fr - E-mail : san@san-fr.com