NOTIONS ELEMENTAIRES SUR LES MOUVEMENTS DES CORPS CELESTES ET LE TEMPS

Depuis l'origine de l'humanité, les mouvements des corps célestes ont fortement marqué les structures mentales, le rythme biologique et la vie sociale de l'être humain.

Les phénomènes célestes, confondus au départ avec les phénomènes purement terrestres, par leur ampleur, leur beauté et leur régularité ont donné à l'homme primitif profondément mystique l'idée d'un ordre surnaturel peuplé de dieux, demi-dieux et héros dans les mains desquels il n'était qu'un simple jouet. L'idée de scruter les cieux pour prévoir sa destinée est donc venue naturellement à un homme angoissé, assoiffé de sécurité au sein d'un monde hostile. Les exigences métaphysiques de l'esprit humain ont créé l'astrologie dont l'astronomie est née, comme simple auxiliaire.

En plus de la mentalité, les phénomènes célestes ont également façonné la biologie humaine. Les principaux à ce titre sont évidemment la rotation diurne en 24 h et le mouvement apparent du Soleil au cours de l'année fixant l'alternance et la rigueur des saisons (les astrologues bon teint y ajouteront au moins le cycle lunaire, les mouvements planétaires et la précession des équinoxes).

Indissociable en pratique des activités mentale et biologique, l'activité économique et sociale ne pouvait que subir l'influence du mouvement diurne (activité et sommeil) et du mouvement solaire annuel (implication des saisons dans les semailles, les récoltes, la chasse et la pêche, l'hivernage...). A mesure que la vie sociale devenait plus complexe, un code devenait nécessaire qui incluât la division et la mesure du temps dans la vie sociale. Les phénomènes célestes fournirent

les premières horloges : nuit et journée, lunaison, saisons, levers et couchers des étoiles, etc... ; puis d'autres phénomènes physiques furent progressivement introduits, applicables à des durées plus courtes (hauteur et direction de l'ombre, écoulement de l'eau, du sable, etc...).
La notion du temps, intimement liée aux déformations de l'espace est indissociable du mouvement des corps célestes, principalement du Soleil. L'étude préalable de ces mouvements est indispensable à la compréhension de la mesure du temps et de son évolution, des différentes notions de temps, de l'histoire du calendrier.

1ère PARTIE : LES MOUVEMENTS DES CORPS CELESTES

Dans l'optique ancienne, la Terre était immobile au centre du monde et les mouvements apparents ne pouvaient être que les mouvements réels. La simplicité du dogme géocentrique entraînait parfois des mécanismes très compliqués pour interpréter les mouvements prétendus réels (cf. les mouvements des planètes). La réalité ne s'est séparée de l'apparence qu'au prix d'une évolution lente, parfois douloureuse. En particulier, le mouvement réel de la Terre et ses implications surles mouvements apparents des corps célestes ne sont bien connus que depuis 400 ans environ. L'homme est sur terre depuis plus d'un million d'années.

I.- Les systèmes de coordonnées spatiales

I.1.- Notion de voûte céleste :

On a coutûme de représenter les directions de l'espace au moyen des points d'une sphère de centre et de rayon quelconques, appelée sphère céleste. En pratique cette sphère ou voûte céleste est centrée sur l'observateur et peut être matérialisée par des astres très lointains (sphère des fixes) de sorte qu'elle présente le même aspect pour tout observateur terrestre (la direction d'un objet à l'infini reste la même).

Cette sphère tourne en 24 heures autour d'un axe (parallèle à l'axe de rotation terrestre) qui perce la sphère céleste en 2 pôles (Fig. 1).

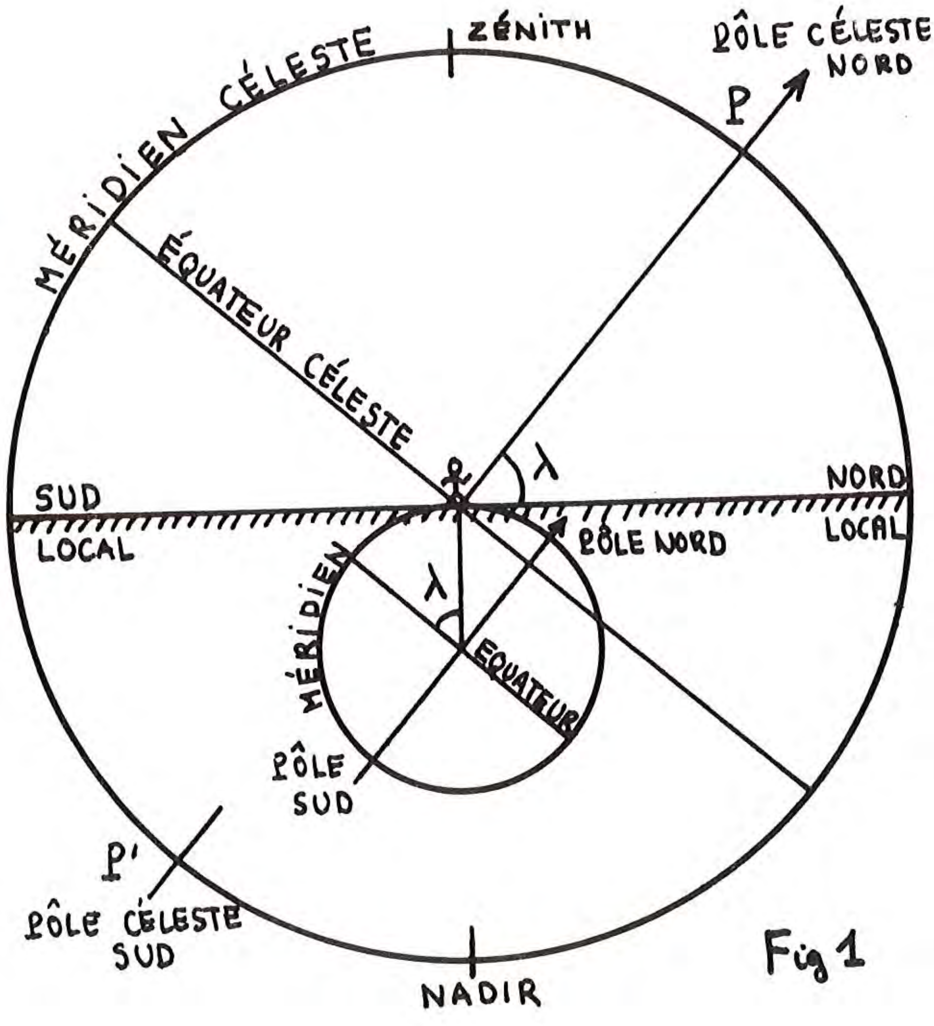
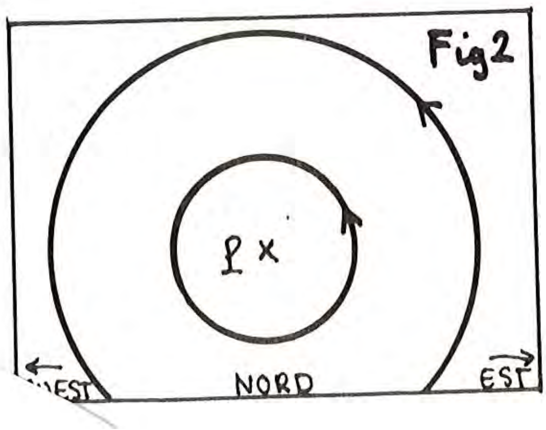


Fig 1

Le pôle céleste Nord P (visible de Paris) situé près de l'étoile α Polaris ; le pôle céleste Sud P', situé près de la Croix du Sud. L'axe est orienté de P' vers P.

La sphère céleste (et les cercles passant par les pôles) tourne autour de P'P d'Est en Ouest.

Cela veut dire par définition qu'un observateur allongé dans le sens P'P voit chaque astre tourner de sa gauche vers sa droite (Fig. 2).

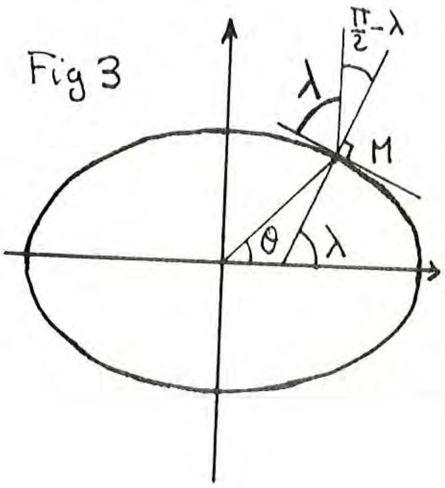


(la Terre, inversement, tourne d'Ouest en Est).

Le grand cercle de la sphère céleste perpendiculaire à l'axe du monde est l'équateur céleste (il est parallèle à l'équateur terrestre). La position des pôles et de l'équateur est bien sûr indépendante de la position de l'observateur terrestre. En fait, ce sont les pôles et l'équateur qui servent à déterminer la position des astres.

Par contre, l'inclinaison de l'axe sur l'horizon dépend de la situation de l'observateur terrestre. Elle est égale à la latitude du lieu. Le plan horizontal est défini d'après la direction du fil à plomb qui marque la verticale. Cette verticale coupe la sphère céleste visible au zénith Z (le Nadir est le point opposé). Le demi-grand cercle de la sphère céleste passant par P, Z et P' est le méridien céleste de Z ; c'est aussi, par définition, le méridien du lieu. Ce $\frac{1}{2}$ cercle serait le même pour tous les lieux de même longitude terrestre si la Terre était une sphère parfaite. Cela n'est pas tout à fait exact. La rotation terrestre aplatit la Terre aux pôles ce qui lui donne plutôt l'apparence d'un ellipsoïde. Ce n'est pas non plus un ellipsoïde car il faudrait que le matériau terrestre soit parfaitement fluide. On donne donc à la surface terrestre le nom de "géoïde". En tout état de cause, la verticale n'est plus la direction du centre terrestre.

Fig 3

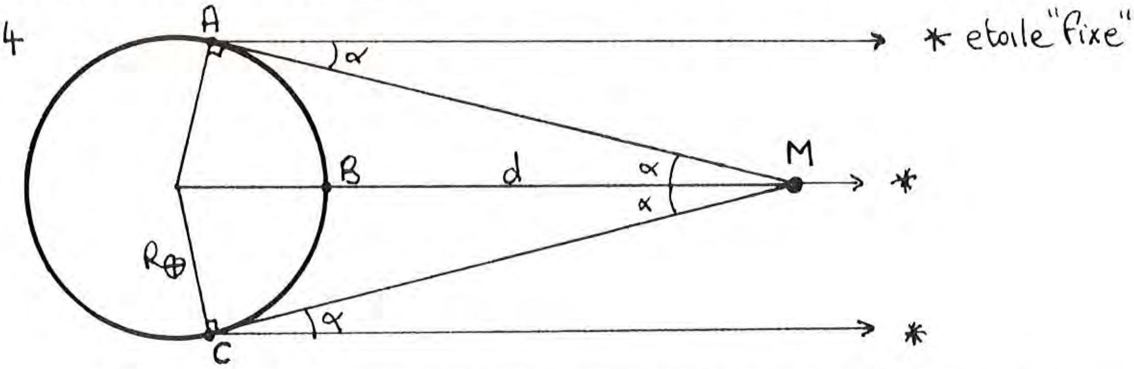


Dans ce cas, pour avoir une définition de la position de l'observateur qui ne dépende pas de la forme du géoïde, on définit simplement cette position par son zénith sur la sphère des fixes.

La latitude λ reste donc l'angle entre la direction du pôle céleste Nord et l'horizontale. (Elle est différente de la latitude géocentrique θ comme l'indique la figure 3. L'écart peut atteindre une dizaine de minutes soit 20 km sur le terrain). De même la longitude d'un lieu est l'angle du plan méridien du zénith de ce point avec celui d'un zénith arbitraire (celui de Greenwich). Les lignes d'égale latitude et d'égale longitude sur la terre ne sont pas tout à fait des cercles. Ce ne sont même pas des courbes planes. Elles s'appellent donc improprement parallèles (parallèles à l'équateur céleste) et méridiens (comme méridiens célestes).

Il est d'ailleurs également impropre d'appeler la voûte céleste "la sphère des fixes". Les objets célestes sont en fait à distance finie et animés de mouvements relatifs. Ne semblent fixes que les objets très lointains. Les objets proches (planètes, astéroïdes, Soleil, ...) présentent l'effet de parallaxe : leur ligne de visée varie selon l'observateur.

Fig 4

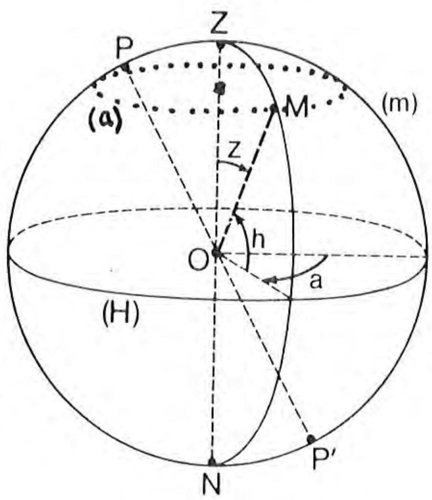


L'écart angulaire maximal entre la direction du corps proche M et une direction fixe matérialisée par une étoile lointaine est $\alpha \simeq R_\oplus/d$. C'est la parallaxe de l'objet M. C'est également l'angle sous lequel, de M, on voit le rayon terrestre (de même la parallaxe stellaire est l'angle sous lequel d'une étoile on voit le rayon de l'orbite terrestre). Ainsi la Lune a une parallaxe de 1°, le Soleil 8,6" ... Les corps proches sont donc entraînés dans le mouvement diurne de la sphère des fixes mais se particularisent par l'addition de leur mouvement propre. A cause de ces corps proches, la voûte céleste est légèrement différente selon les observateurs.

I.2.- Coordonnées locales (ou horizontales) :

Ces coordonnées sont liées à la conception traditionnelle d'un monde centré sur l'observateur. Les axes sont donc fixes et repérés d'après la verticale du lieu et le sud local.

Fig 5



L'observateur est en O. OM indique la direction de l'objet M. Le grand cercle (H) ayant pour axe ZN (Zénith-Nadir) est l'horizon du lieu. Le demi-grand cercle ZMN est le vertical de M. Le petit cercle (a) d'axe ZN et passant par M est le cercle de hauteur (ou almucantara) de la direction OM. Le vertical du pôle céleste P est bien sûr dans le même plan vertical que le méridien (m) du lieu.

Les coordonnées locales sont :

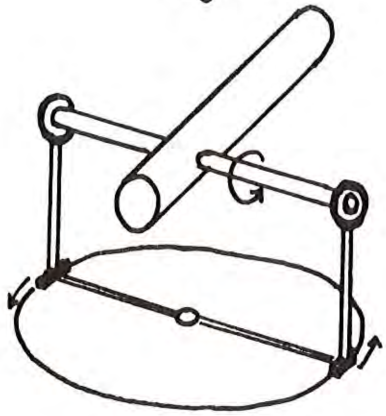
- a : azimut, angle entre le vertical de P' (donc compté à partir du sud) et le vertical de M, compté en degrés dans le sens rétrograde de 0 à 360° (ou de -180° à 180°) ;

- h : hauteur, angle entre la direction OM et le plan de l'horizon compté en degrés, de - 90° à + 90°.

On utilise parfois la distance zénithale z,

$$z = 90° - h.$$

Fig 6



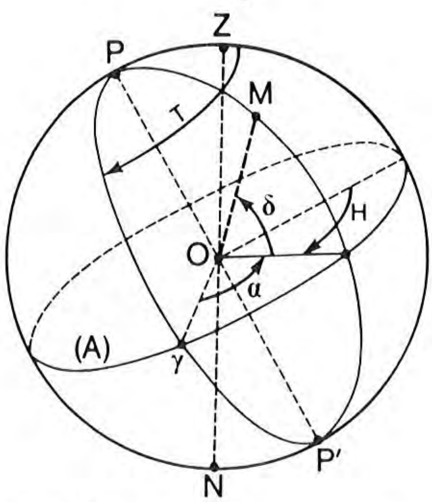
Le principe des montures azimutales, combinaison d'un mouvement de rotation vertical et d'un mouvement de rotation horizontal, repose sur la définition des coordonnées locales.

Ces coordonnées posent un problème évident. Elles sont variables avec le temps pour un observateur donné (à cause de la rotation diurne), elles varient selon l'observateur à un instant déterminé. Il était donc indispensable d'utiliser des coordonnées "universelles", traductibles, le cas échéant, en coordonnées locales pour l'observateur concerné.

I.3.- Coordonnées universelles (ou équatoriales) :

Les coordonnées universelles sont analogues aux coordonnées terrestres (latitude, longitude) qui fixent de façon permanente et internationale la position des observateurs.

Fig 7



Ce sont :

- δ, la déclinaison, angle entre la direction OM et le plan de l'équateur céleste (A) comptée en degrés de -90° à +90°
- α, l'ascension droite, angle entre le plan méridien de la direction OM et celui d'un point γ de l'équateur céleste, appelé point vernal. (Ce point est une des intersections de l'écliptique avec l'équateur céleste. Le Soleil se trouve

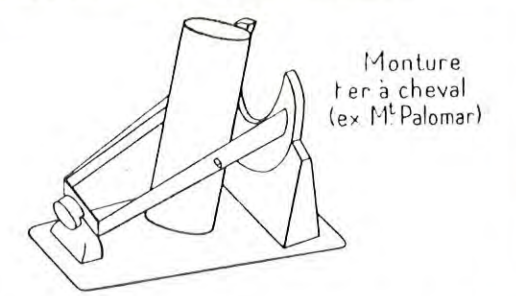
dans la direction de ce point le 21 mars, lors de l'équinoxe de printemps) α est comptée dans le sens direct, le plus souvent en heures, minutes et secondes.

On a 360° = 24h et donc : 1h = 15°

1m = 15'

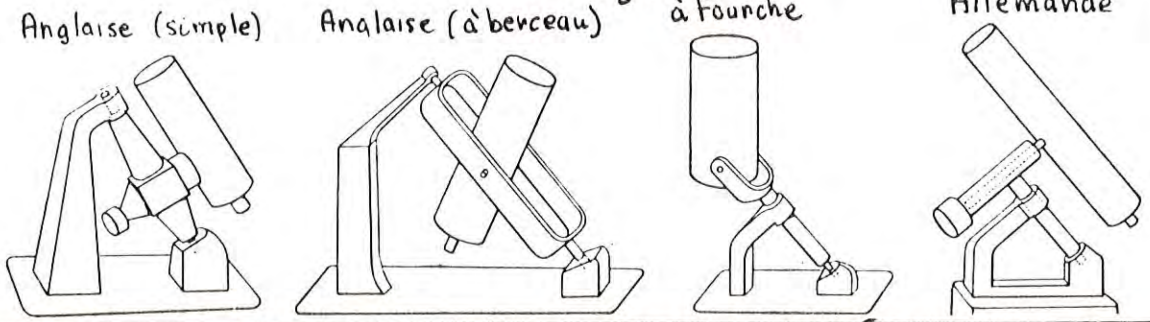
1s = 15"

Le grand cercle de la voûte céleste passant par P, M et P' est appelé cercle horaire (il contient le méridien de M).



Le principe de la monture équatoriale (fig. 8) repose sur la définition des coordonnées universelles.

Fig 8



Les cercles de coordonnées α = cste et δ = cste sont fixes sur la sphère céleste. A priori les objets très lointains ont donc des coordonnées équatoriales constantes.

<u>Coordonnées horaires</u> : c'est un sytème de coordonnées local, constituant un intermédiaire entre les 2 systèmes précédents. Il est défini par :

- δ, la déclinaison ;

- H, l'angle horaire, angle du méridien de la direction OM avec celui du lieu. Il est compté dans le sens rétrograde, le plus souvent en heures, de 0 à 24h ou de -12h à + 12h.

Le passage du système de coordonnées horaires au système (δ,α) se fait facilement dès que l'on connaît l'angle horaire du point vernal γ. Cet angle T porte le nom de temps sidéral. Il est à la fois local et variable avec le temps. L'angle horaire et l'ascension droite de toute direction sont liés par la relation : $T = H + \alpha$

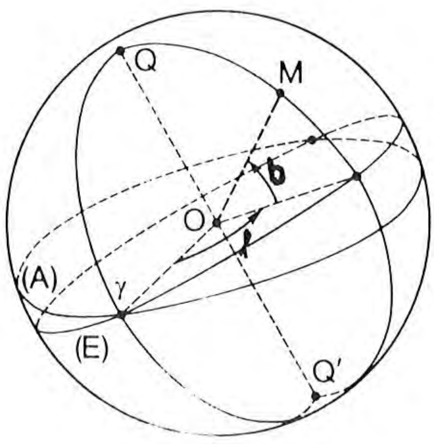
On voit que T définit les positions relatives des repères local et universel. Donner la formule de transformation entre (a,h) et (T,δ).

I.4.- Coordonnées écliptiques :

L'écliptique est le plan du mouvement de la Terre autour du Soleil. Ce plan définit sur la sphère céleste un grand cercle (E) dit écliptique (même nom que le plan). Le sens de rotation de la terre autour Soleil (Ouest en Est) définit le pôle Nord Q de l'écliptique ainsi que le pôle Sud Q'.

On définit ainsi :

Fig 9



- la longitude céleste ℓ, angle entre le plan (QMQ') et le plan ($Q\gamma Q'$) compté dans le sens direct de 0 à 360°
- la latitude céleste b, angle entre la direction OM et l'écliptique, comptée de - 90° à + 90°.

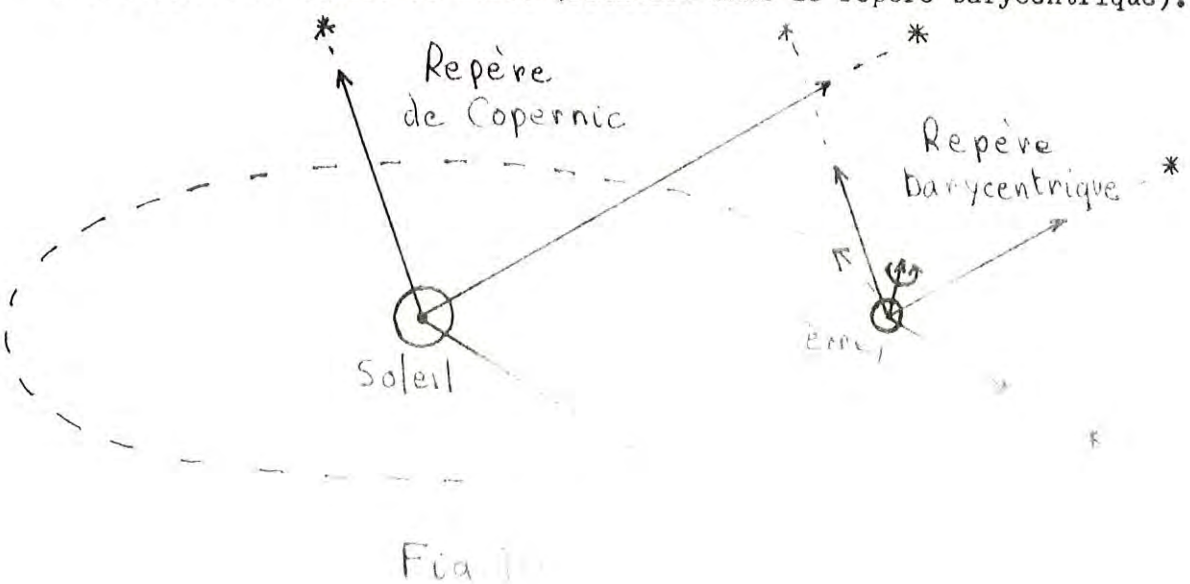
Le point O peut être la position de l'observateur terrestre. On parle alors de longitude et latitude géocentriques. Mais ce peut être aussi le Soleil. On a alors la longitude et la latitude héliocentriques. Ce dernier système est particulièrement bien adapté à la description du système solaire puisque les trajectoires des planètes sont voisines de l'écliptique.

On passe des coordonnées (α, δ) aux coordonnées (ℓ, b) (géocentriques ou héliocentriques ?) par une rotation d'axe $O\gamma$, d'angle $\mathcal{E}$ (obliquité de l'écliptique, c'est-à-dire angle de l'écliptique avec l'équateur céleste).

II.- Mouvement de la Terre et mouvements apparents des corps célestes

Pour décrire le mouvement de la Terre, on utilise en physique classique (les effets relativistes sont négligeables) un repère galiléen qui est généralement le système de Copernic : l'origine au centre d'inertie du système solaire (pratiquement le centre du Soleil) et les 3 axes pointés vers 3 étoiles lointaines, fixes pratiquement.

Le mouvement de la Terre peut être décomposé en un mouvement du centre d'inertie terrestre autour du Soleil (translation) et un mouvement par rapport au centre de masse (rotation dans le repère barycentrique).



Fig

II.1.- Mouvement du centre de gravité terrestre :

II.1.1.- Orbite terrestre :

D'après les lois de Képler, la Terre décrit une orbite elliptique dont le Soleil est un foyer. Ou plutôt le centre de gravité du système Terre-Lune. Ce point étant situé à l'intérieur du volume terrestre, la correction est négligeable. La Terre parcourt son orbite d'Ouest en Est (même"sens"que la rotation diurne). La période (dans le système de Copernic) porte le nom d'année sidérale $T_{\oplus}$ = 365,25636 j (365j 6h 9m 10s).

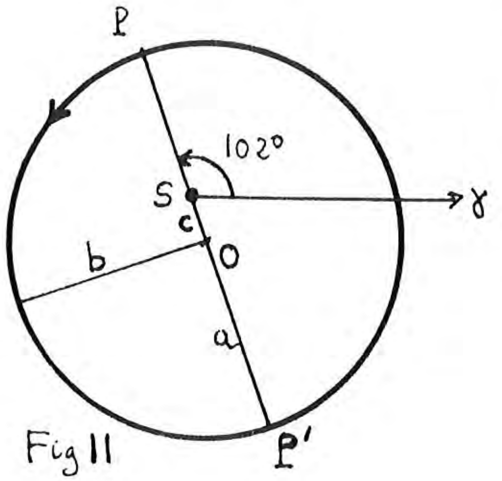


Fig 11

L'ellipse a pour demi-grand axe a = 1 u.a. = 149.600.000 km. L'excentricité est très faible. e = 0,01673. L'écart maximum du cercle est $\frac{a-b}{a} = \frac{a-\sqrt{a^2-c^2}}{a} = 1-\sqrt{1-e^2}$

$$\simeq \frac{e^2}{2} \approx 10^{-4}$$

ce qui est très faible et indécelable sur un dessin habituel. La Terre passe au périhélie vers le 2 janvier. La longitude héliocentrique du périhélie est de 102°.

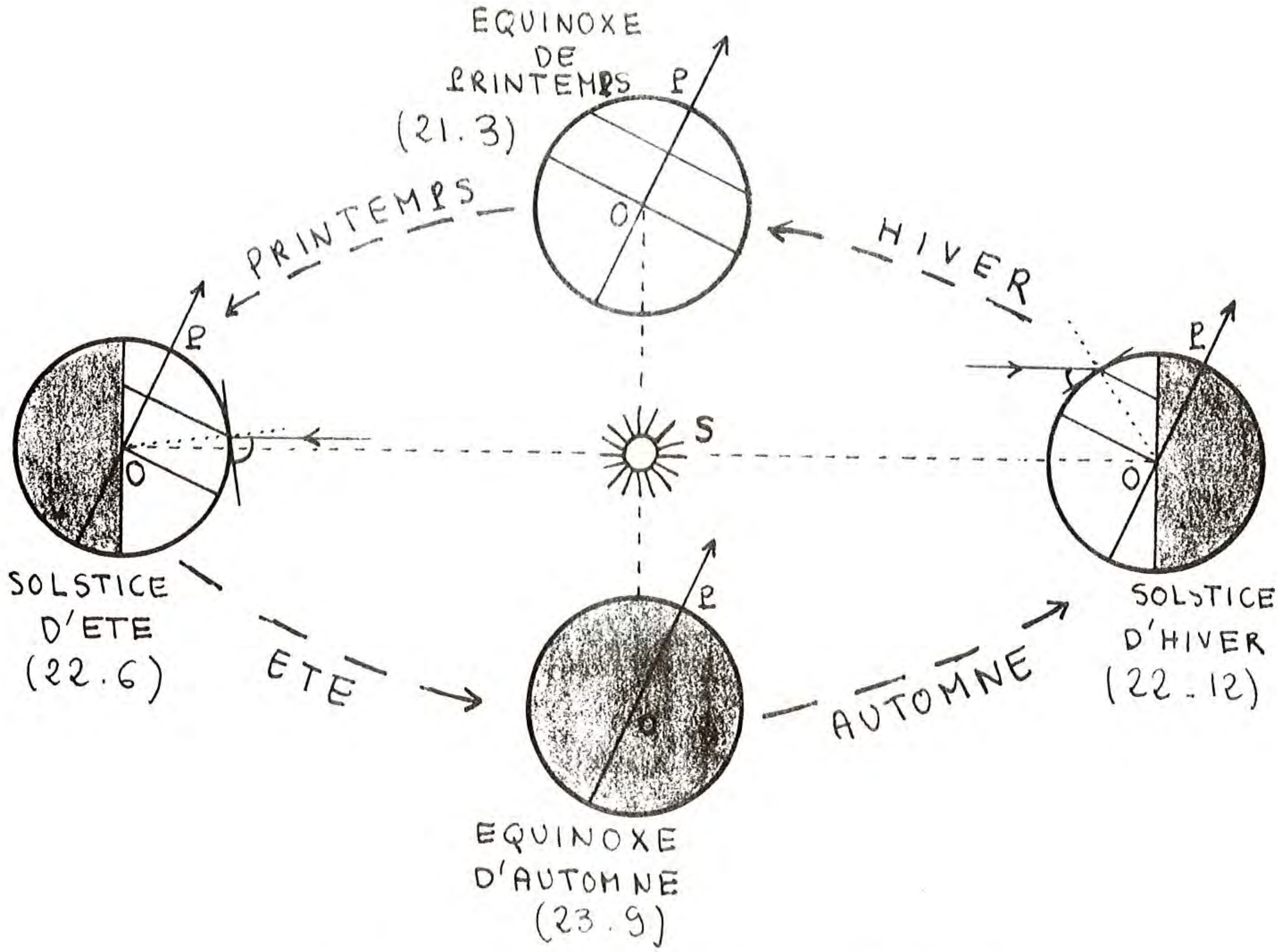
L'obliquité de l'écliptique sur le plan de l'équateur céleste (ou angle de l'axe de rotation terrestre avec l'axe de l'écliptique) est $\varepsilon \simeq 23°27'$. En fait l'orbite terrestre n'est pas immuable car le système Terre-Soleil n'est pas isolé. Les planètes perturbent l'orbite terrestre L'obliquité varie très lentement avec le temps (On imagine le plaisir des mécaniciens lorsqu'on sait que $\varepsilon = 23°27'8'',26 - 468'',44t - 0'',60t^2 + 1'',83t^3$ où t exprime le nombre de milliers d'années écoulées à partir de 1900).

De même la Terre ne revient pas à son périhélie au bout d'une année sidérale. On appelle "année anomalistique" la durée qui sépare deux passages consécutifs de la Terre au périhélie. Elle vaut 365,25953 j (365j 6h 13mn 53s).

On dit qu'il y a une précession du périhélie qui le fait se déplacer d'Ouest en Est. (l'année anomalistique est plus longue que l'année sidérale).

Le phénomène des saisons s'explique par l'inclinaison de l'axe de rotation terrestre (figure 12).

Fig 12

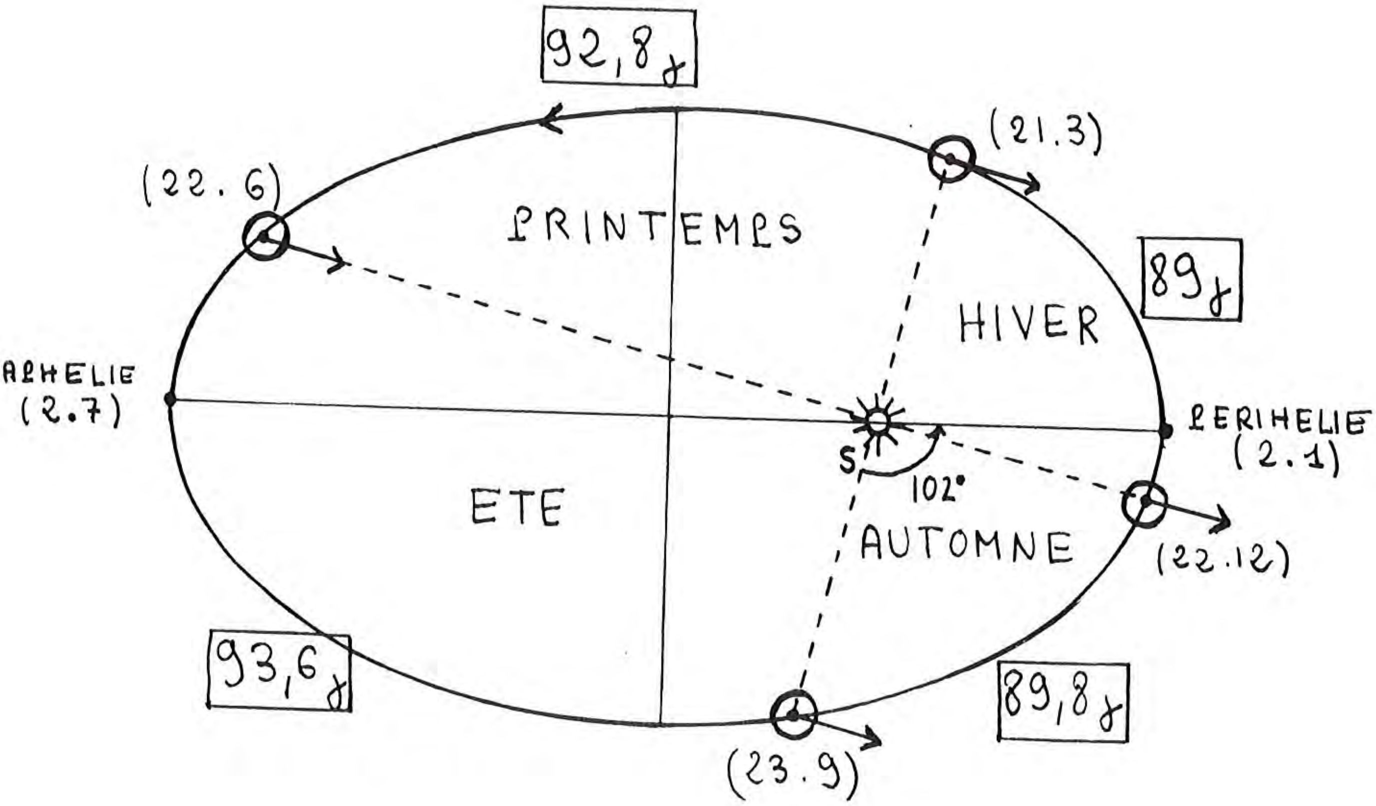


Les saisons sont séparées par les équinoxes et les solstices. Lors des équinoxes, l'axe de rotation terrestre OP est perpendiculaire à SO, rayon vecteur Soleil-Terre. Lors des solstices, le plan $(\overrightarrow{SO},\overrightarrow{OP})$ est perpendiculaire au plan de l'écliptique. La figure montre de façon évidente la variation de la durée du jour et de la hauteur du Soleil selon les saisons.

La figure 13 explique l'inégalité des saisons. Le périhélie se situe au 2 janvier, à une longitude héliocentrique de 102° (l'axe origine a pour direction celle du point γ, c'est-à-dire du Soleil lors de l'équinoxe de printemps). L'ellipse terrestre a été considérablement aplatie pour la clarté de l'explication.

D'après la 2e loi de Képler, le temps de parcours est proportionnel à l'aire balayée par le rayon vecteur, ce qui explique les longueurs différentes des saisons.

Fig 13



Connaissant la date du périhélie, comparer la vigueur des saisons des 2 hémisphères.

II.1.2.- Mouvement apparent du Soleil

En raison du mouvement réel de la Terre, le Soleil décrit un mouvement identique sur la sphère céleste (ellipse décrite d'Ouest en Est le long de l'écliptique). La figure 14 montre ce déplacement. A chaque date correspond une position du Soleil sur l'écliptique. La sphère céleste entraîne le Soleil dans sa rotation diurne et on peut prévoir la hauteur du Soleil au-dessus de l'horizon, la longueur du jour (ou de la nuit) selon cette position. La figure 14 montre les courses du Soleil au 22 juin et au 22 décembre.

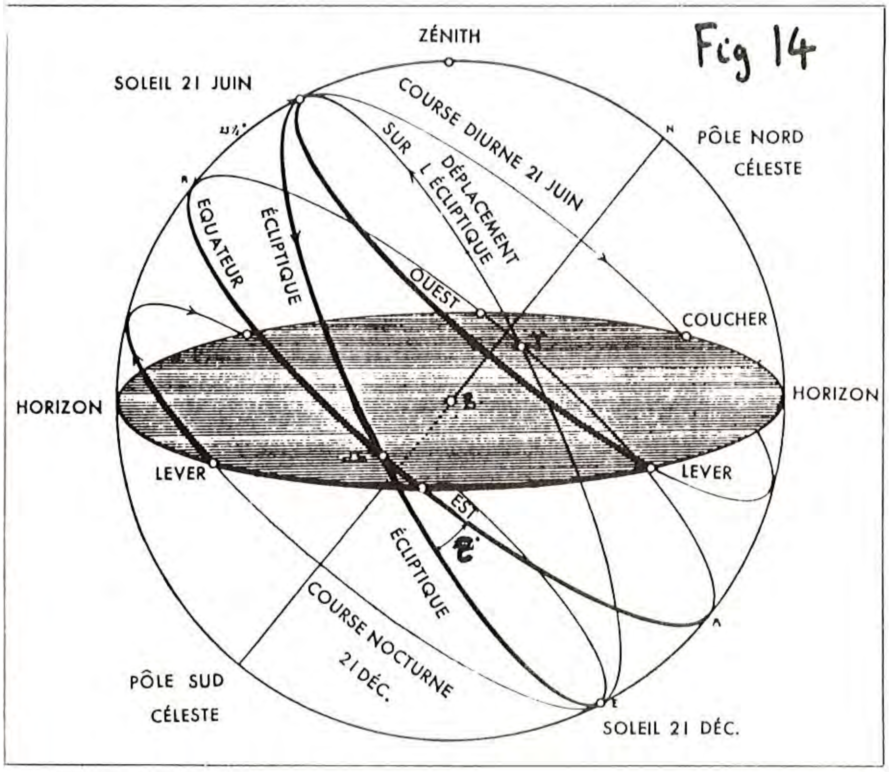
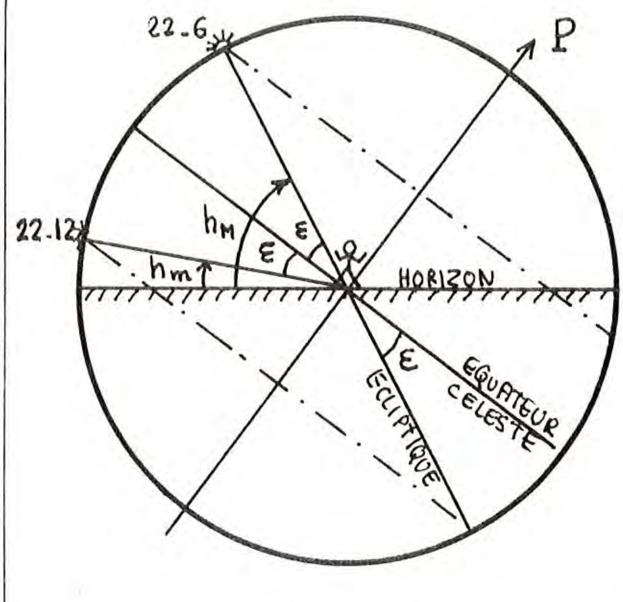


Fig 14

Fig 15



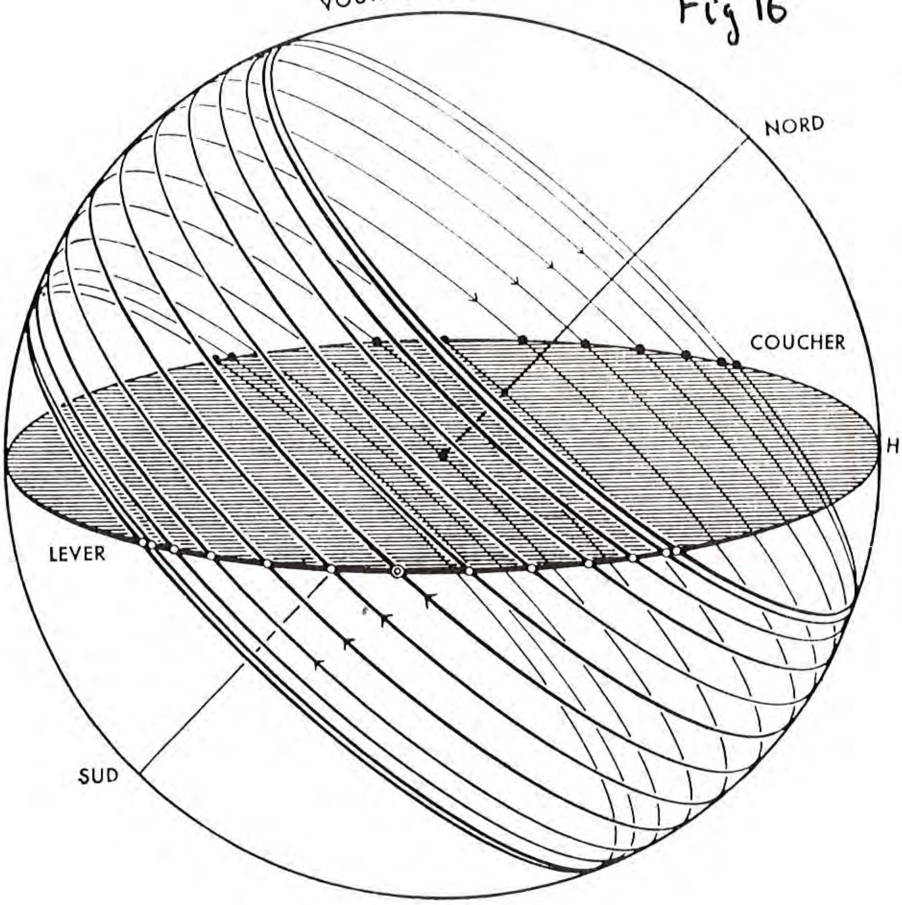
Lors du solstice de juin, la hauteur du Soleil au méridien, hauteur maximale (fig. 15) est $h_M = \pi/2 - \lambda + \varepsilon$

La hauteur minimale au méridien est celle du solstice d'hiver, $h_m = \pi/2 - \lambda - \varepsilon$

On voit que l'on dispose d'une méthode simple de mesure de l'obliquité, utilisée très tôt par les anciens : $\varepsilon = (h_M - h_m)/2$

La figure 16 montre la composition des 2 mouvements apparents du Soleil : annuel et diurne.

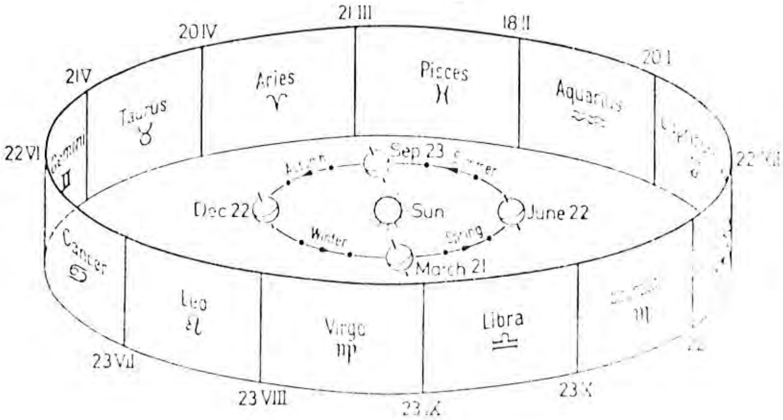
Fig 16



Pour des raisons évidentes on n'a pas pu représenter toutes les spires.
Ici une spire représente environ 30 jours. Noter les variations des positions de lever et de coucher, de hauteur au-dessus de l'horizon.

Dans son mouvement annuel sur l'écliptique (E) le soleil traverse une région de la **voûte céleste** centrée sur (E) : le zodiaque, divisé en 12 constellations (figure 17).

Fig 17



De tout temps le zodiaque a eu les faveurs des astrologues car il est également parcouru par les planètes (dont les trajectoires sont peu inclinées sur l'écliptique).

Le mouvement du Soleil explique que la voûte céleste présente, la nuit, un aspect différent selon la période de l'année (il y a des constellations "d'hiver" et des constellations "d'été"). Dans un mouvement diurne apparent (d'Est en Ouest) le Soleil progresse dans le sens inverse de son mouvement annuel apparent (Ouest en Est). Au cours de l'année, les constellations du zodiaque rattrapent le Soleil et le dépassent.

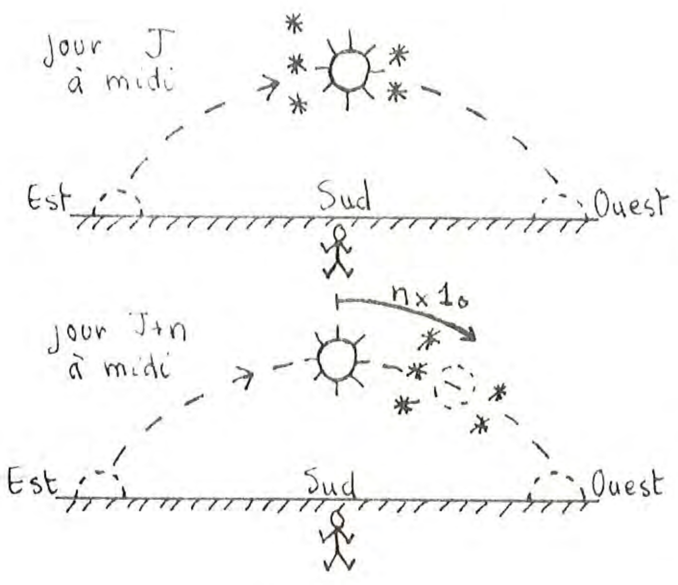


Fig 18

La figure 18 montre ce fait. Si on pouvait voir les étoiles de la constellation contenant le Soleil, on les verrait, jour après jour, distancer le Soleil dans le sens de la rotation diurne.

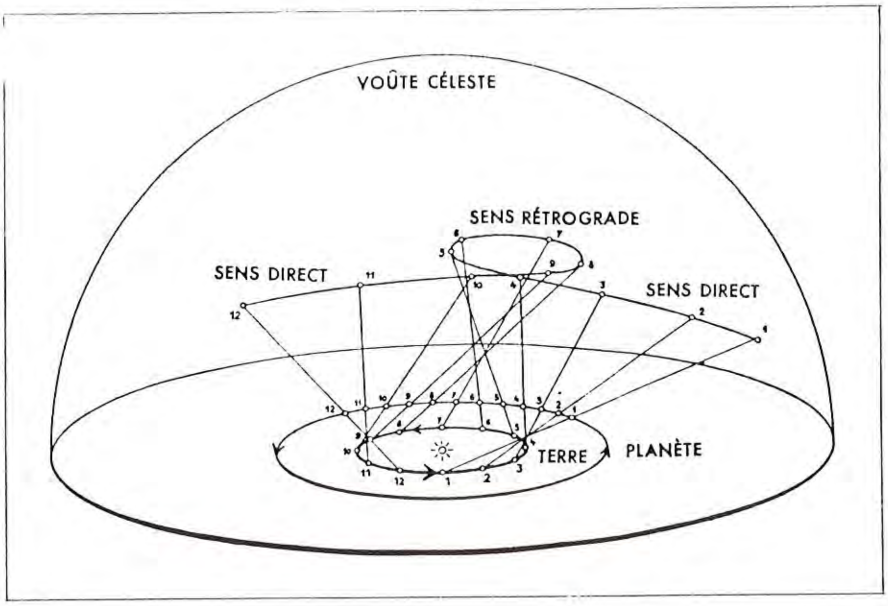
Le soleil se déplaçant dans le sens inverse de 360° en 365,25 jours environ, le décalage entre les étoiles et le Soleil s'accroît de 1° par jour grossièrement. De même, au cours de l'année une étoile donnée se lève régulièrement (si elle se lève) de plus en plus tôt et se couche de même de plus en plus tôt.

A une date donnée elle se lève et se couche en même temps que le Soleil : Il s'agit du lever et du coucher "héliaques". A une autre date, elle se lève quand le Soleil se couche et se couche quand le Soleil se lève on a le lever et le coucher "achroniques". Ces événements se passent une une fois par an. Les Anciens s'en servaient souvent pour jalonner leur calendrier annuel.

II.1.3.- Mouvements apparents des planètes

Les mouvements apparents des planètes pour l'observateur terrestre sont dus à la combinaison des mouvements réels des planètes et du mouvement réel de la Terre. Les mouvements des planètes obéissent, comme la Terre, aux lois de Képler, compte non tenu des perturbations qu'elles se créent mutuellement. Les plans des orbites sont peu inclinées sur l'écliptique.

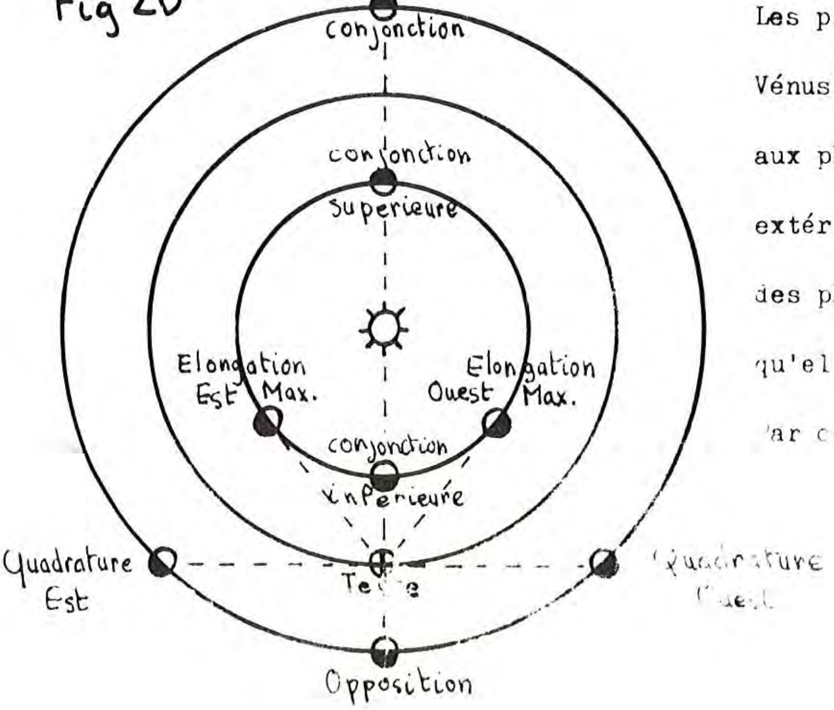
Fig 19



La figure 19 explique l'apparition de boucles parcourues en sens rétrograde. On comprend les problèmes des Anciens qui essayaient d'expliquer ces mouvements en supposant la Terre immobile. Ce ne sont pas toujours des boucles fermées. Ce peut être des boucles ouvertes :

Comme la Lune, les planètes présentent des phases (fig. 20).

Fig 20



Les planètes intérieures (Mercure, Vénus) présentent des phases analogues aux phases lunaires. Les planètes extérieures présentent théoriquement des phases mais leurs distances font qu'elles ne peuvent être discernées. Par contre, les variations de luminosité sont décelables et les Anciens les connaissaient. Ils connaissaient donc la période séparant deux phases identiques, c'est-à-dire deux positions relatives identiques de la planète et de la Terre par rapport au Soleil. Cette période porte le nom de "période synodique".

Si T et S sont les périodes sidérale et synodique de la planète, montrer que :

$$1/S = 1/T_{\oplus} - 1/T \qquad \text{pour une planète supérieure}$$

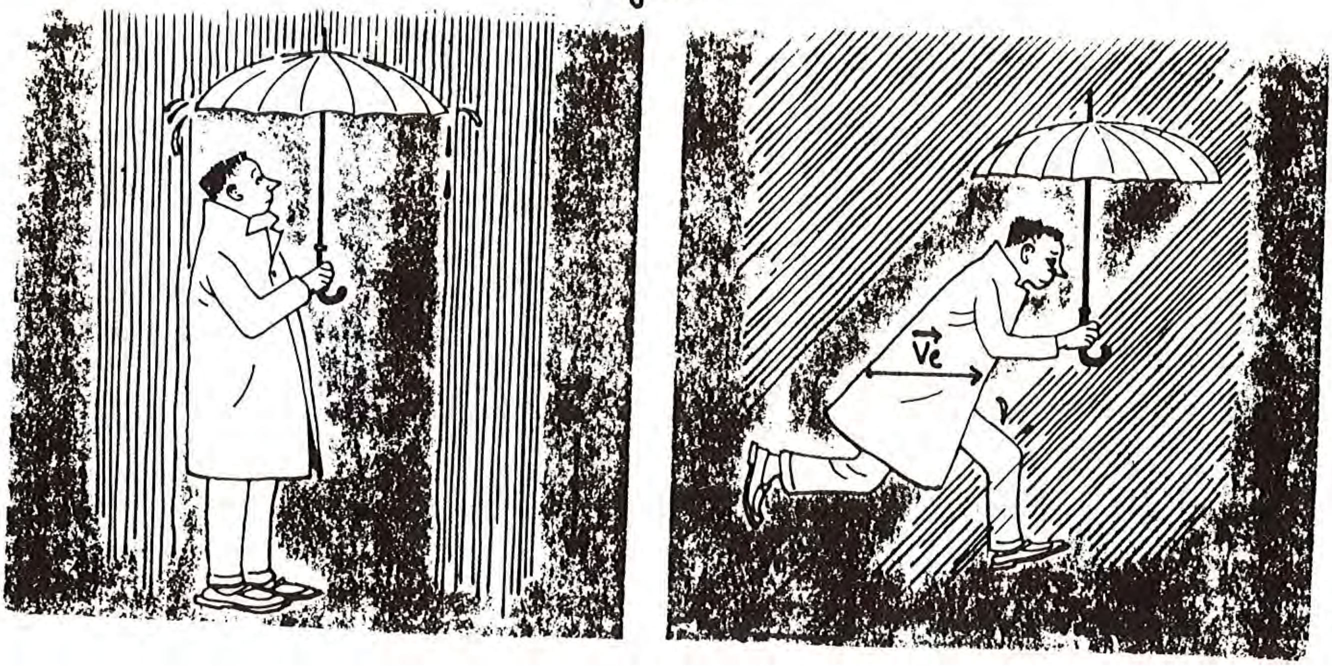
$$1/S = 1/T - 1/T_{\oplus} \qquad \text{pour une planète inférieure}$$

II.1.4.- Mouvements apparents des étoiles

Compte non tenu de leur mouvemnt réel propre, le mouvement de la Terre entraîne des mouvements apparents périodiques pour les étoiles. Ces mouvements sont dus aux phénomènes d'aberration de la lumière et à l'effet de parallaxe stellaire.

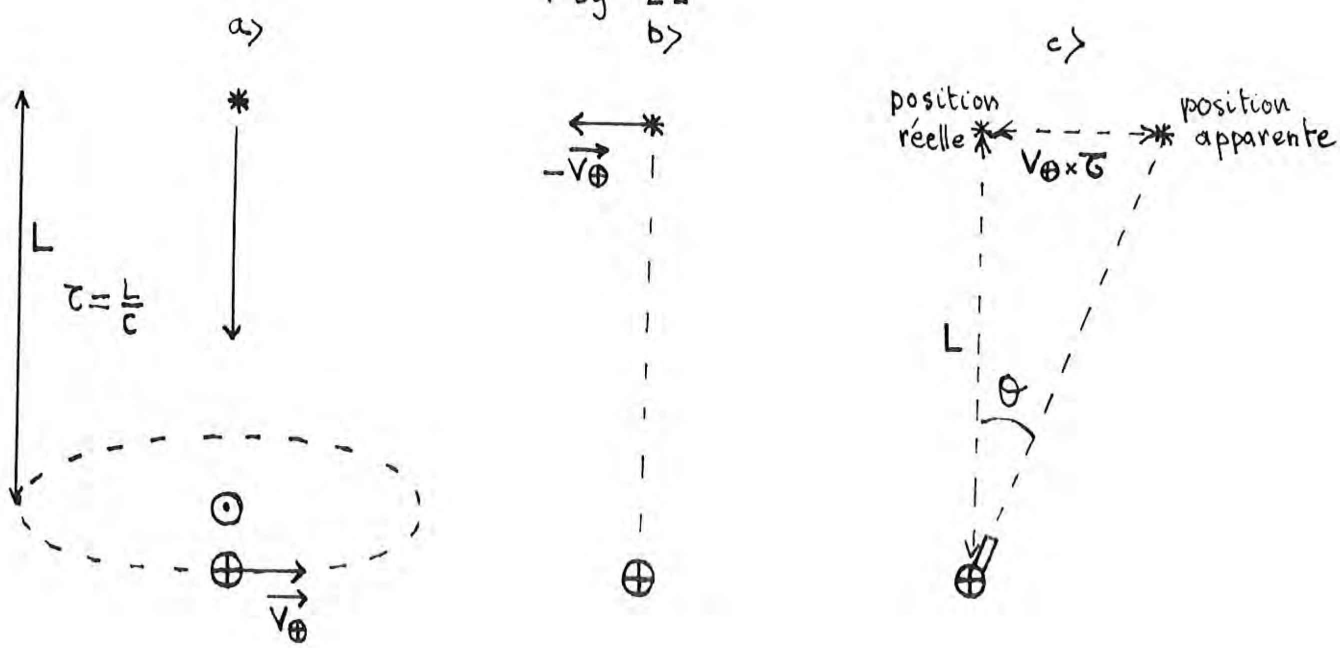
Aberration de la lumière : Elle a été découverte par Bradley en 1729 qui avait constaté une variation périodique annuelle dans la position de plusieurs étoiles. Elle constitue la première preuve expérimentale du mouvement de la Terre autour du Soleil, communément admis (sauf par l'Eglise) à l'époque mais sans preuve scientifique tangible. L'aberration est due simplement à la composition des vitesses.

Fig 21



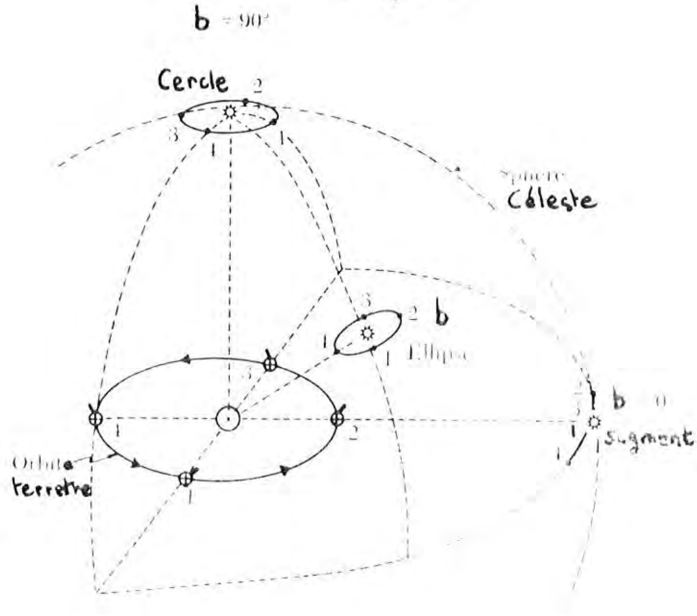
La figure 21 montre un exemple classique : celui de la direction de la pluie dans un repère lié au bonhomme, lorsqu'il est immobile et lorsqu'il court. La figure 22 montre le cas analogue pour l'aberration stellaire.

Fig 22



Supposons une étoile située dans la direction du pôle nord de l'écliptique. La lumière arrive perpendiculairement à la vitesse $\vec{v}_\oplus$ de la Terre et après un temps de parcours $\tau = L/c$ où L est la distance de l'étoile (22,a). Le problème est dynamiquement équivalent à celui de la Terre fixe et de l'étoile mobile avec une vitesse $-\vec{v}_\oplus$ (22,b). A cause de la vitesse finie de la lumière, un télescope ne sera pas braqué exactement sur la position réelle de l'étoile mais en arrière, (le télescope sera incliné dans le sens du mouvement terrestre) vers une position apparente située à une distance $d \simeq v_\oplus \times \tau$, d'où est partie la lumière (à l'instant $t - \tau$) qui est reçue par le télescope à l'instant t d'observation. L'angle d'inclinaison est $\theta \simeq v_\oplus / c$. Un traitement relativiste est plus correct mais redonne la même valeur au premier ordre. Sur toute l'année, la position apparente de cette étoile décrit un cercle de rayon angulaire θ. La mesure de Bradley était de 20,5" (10^{-4} radian). La vitesse de la lumière avait été mesurée pour la première fois par Römer, en 1676, qui avait trouvé 310^5 km/sec. On pouvait déjà en déduire $v_\oplus = 30$ km/s. Inversement, $v_\oplus$ peut être connue d'après les lois de Képler et la mesure de l'aberration fournit une mesure de c.

Fig 23



Pour une direction quelconque, la trajectoire apparente est une ellipse dont le demi-grand axe angulaire est parallèle à l'écliptique et toujours égal à 20,5".

<u>Parallaxe stellaire</u> : On a déjà vu la parallaxe terrestre. La parallaxe stellaire est due au même effet de perspective, mais la base est cette fois l'orbite terrestre. La base étant beaucoup plus grande, la distance accessible l'est aussi.

En 1838, Bessel put pour la première fois isoler le petit mouvement parallactique annuel de l'étoile 61 Cygni.

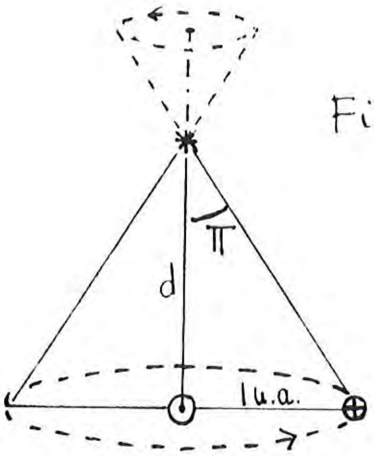


Fig 24

Si l'on prend l'étoile précédente, la trajectoire apparente du l'étoile est un cercle (compte non tenu de l'aberration).

Le rayon angulaire de ce cercle est

$$\pi = 1 \text{ u.a.}/d$$

π est très petit. Par définition, le parsec est la distance d telle que π = 1", d'où :

$$\boxed{\pi^{('')} = 1/d(pc)}$$

* Sachant que 1 rad = 206 264",81

1 u.a = 149.600.000 km

donner la valeur en cm du parsec.

L'étoile la plus proche, α Centauri, a une parallaxe de 0,8". Les Anciens objectaient au mouvement de la Terre l'absence de parallaxe (entre autres). Ces parallaxes existaient bien mais étaient beaucoup trop petites pour qu'ils puissent les déceler.

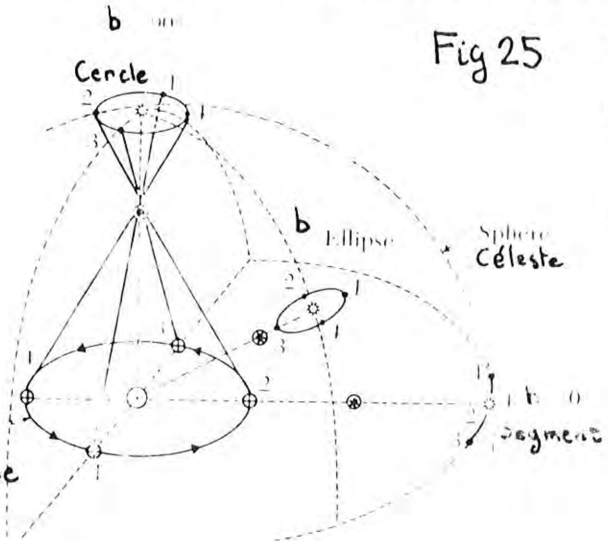


Fig 25

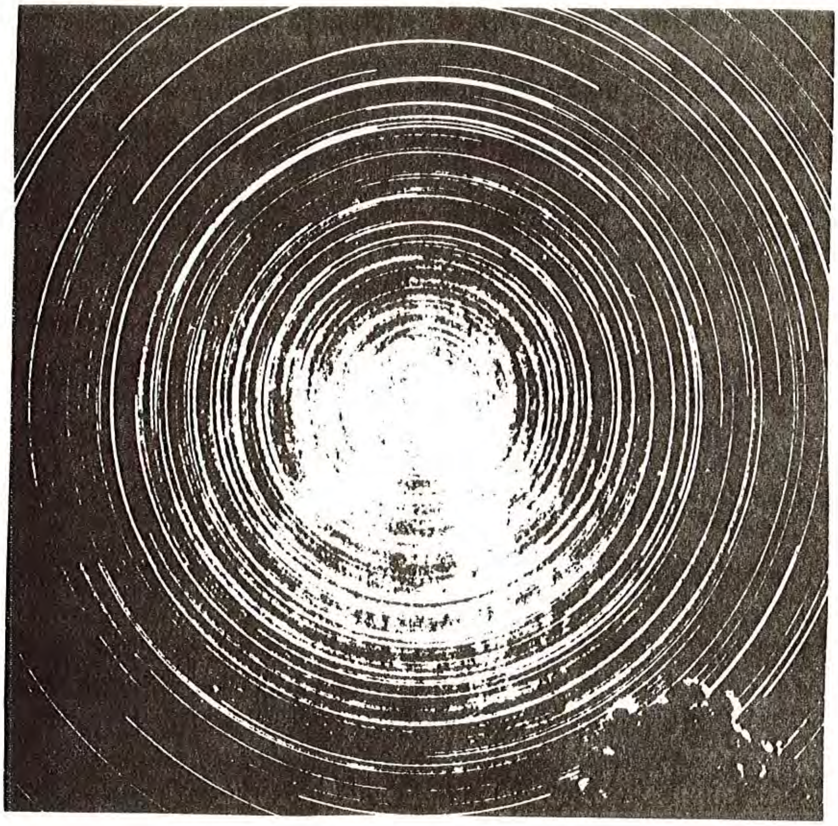
La figure 25 montre qu'à une latitude héliocentrique b quelconque, on obtient une ellipse (Noter les différences de position avec l'aberration).

II.2.- Mouvement de la Terre dans le repère barycentrique

Ce mouvement est la rotation diurne en 24 h autour de l'axe des pôles mais la direction de l'axe varie de même que varie la position des pôles sur la surface Terrestre.

II.2.1.- Rotation diurne

Fig 26



La figure 26 représente la photo classique du ciel nocturne, dans la direction des pôles, au bout d'un certain temps de pose. Estimer le temps de pose. Cette rotation est le reflet de la rotation terrestre en sens inverse. Les Anciens considéraient naturellement que c'était la sphère des étoiles qui tournait Comme les preuves expéri mentales du mouvement de translation, celles de la rotation sont récentes.

Newton a pu prédire un aplatissement aux pôles voisin de la valeur mesurée ultérieurement sur le terrain(1/298). Les preuves les plus facilement vérifiables de la rotation terrestre sont imputables à la force de Coriolis : dans un repère lié à la Terre, un mobile de masse m subit, en plus de la force d'inertie centrifuge, une force d'inertie $- 2m \vec{\omega} \wedge \vec{v}$ appelée force de Coriolis (du nom de Gaspard Gustave de Coriolis, qui l'a découverte en 1835) où $\vec{\omega}$ est le vecteur rotation terrestre et $\vec{v}$ la vitesse du mobile dans le repère terrestre. Cette force explique des phénomènes aussi divers que la déviation vers l'Est de la chute des corps, la rotation du pendule de Foucault, les mouvements des vents, des courants, etc...

Pour les Anciens, la Terre ne pouvait tourner car les oiseaux, les nuages seraient restés en arrière, le sol se serait dérobé sous leurs pieds et les objets auraient même sauté en l'air. Qu'en pensez-vous ?

On peut définir de façons différentes la période de rotation : <u>le jour</u> est le laps de temps séparant 2 passages consécutifs au méridien d'un lieu. Le jour dépend de l'astre choisi.

Si c'est le Soleil, on parle de <u>jour solaire vrai</u>. Le principal inconvénient du jour solaire vrai est qu'il n'est pas constant, pour 2 raisons.

1° Le mouvement du Soleil (sic le mouvement de la Terre sur son ellipse) n'est pas uniforme sur l'écliptique ;

2° le mouvement annuel du Soleil a lieu sur un plan incliné par rapport à l'équateur. Même si le mouvement était uniforme le long de l'écliptique, le mouvement en ascension droite sur l'équateur céleste ne le serait pas, ce qui entraîne des irrégularités dans la période de rotation solaire.

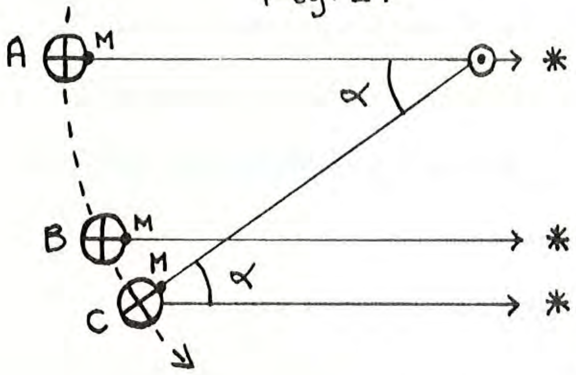
On définit donc <u>le jour solaire moyen</u>, durée moyenne du jour solaire déterminée sur un grand intervalle de temps (c'est aussi le laps de temps séparant 2 passage au méridien d'un Soleil fictif, le Soleil moyen, dont l'ascension droite varie uniformément).

Ce jour solaire moyen est aussi <u>le jour civil</u>, de 24h de 3.600 s par définition, sur lequel sont réglés nos montres et horloges usuelles.

Lorsqu'on écrit 1 année sidérale = 365,25636 j, c'est du jour solaire moyen qu'il s'agit.

Si l'astre solaire choisi est une étoile lointaine, on parle de <u>jour stellaire</u> : c'est la période de rotation dans le système de Copernic. L'étoile étant fixe et le Soleil mobile, le jour stellaire est différent du jour solaire. La figure 27 explique cette différence.

Fig. 27



En A, on a choisi un instant où Soleil et étoile se trouvent simultanément au méridien du lieu M.

1 jour stellaire plus tard (position B), l'étoile se retrouve au méridien de M mais la Terre doit encore tourner d'un angle α pour que le Soleil soit à son tour au méridien (position C). Le jour solaire est donc plus long que le jour stellaire. Sachant que la Terre (ou le Soleil apparent) parcourt 360° en 365,25636 j.s.m.,

$\alpha = \frac{360°}{365,25636}$ Le temps que met la Terre à tourner d'un angle α est

1 jour stellaire $\times \frac{\alpha}{360°}$

d'où : $1 \text{ jsm} = 1 \text{ jst} + 1 \text{ jst} \times \frac{1}{365,25636}$

soit : $1 \text{ jsm} = 1 \text{ jst} \frac{366,25636}{365,25636}$

On peut également dire que pendant une année sidérale, l'étoile sera passée une fois de plus au méridien que le Soleil et donc

$$365,25636 \text{jsm} = 366,25636 \text{ jst}$$

On en déduit :

1 jour stellaire = 23h 56mn 4,0939s.

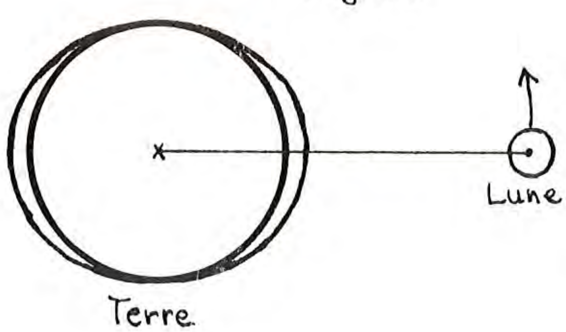
Beaucoup plus utilisé que le jour stellaire est <u>le jour sidéral</u>, correspondant au choix du point γ, ce point étant d'importance fondamentale dans l'obtention des coordonnées universelles. Le jour sidéral diffère très légèrement du jour stellaire car le point γ se déplace sur l'écliptique (cf. la précession des équinoxes). L'écart est inférieur à 10^{-2} s. On appelle montre ou horloge sidérale, un instrument réglé sur l'heure sidérale et non sur l'heure civile.

EXERCICE : Donner la conversion entre heure, minute, seconde sidérales et civiles.

L'heure sidérale est adaptée à l'observation astronomique puisqu'elle mesure la rotation de la voûte céleste. L'écart entre heure civile et heure sidérale explique qu'une même étoile (lointaine) est vue au même point dans le ciel (méridien par exemple) 3mn 56s (civiles) plus tôt d'un jour sur l'autre (on a vu que les étoiles rattrapent le Soleil).

<u>Variation de la période de rotation</u> : L'invariabilité est une abstraction qui ne correpond pas à la complexité des phénomènes physiques. Képler, vers 1600, a le premier émis des doutes sur la constance de la vitesse de rotation terrestre. Kant et Laplace, au XVIIIe, soupçonnèrent un ralentissement séculaire de la rotation, dû à la perte d'énergie par effet de marée.

Fig 28



La croûte solide répond beaucoup moins à l'attraction gravitationnelle (de Lune, du Soleil...) que la nappe liquide ce qui produit les marées dues aux renflements de cette nappe. (pourquoi y-a-t-il deux renflements ?). A cause de la rotation de la Terre, le bourrelet liquide se déplace sur sa surface. Il en résulte des frottements sur le fond des mers peu profondes ou sur les côtes continentales qui gaspillent de l'énergie et freinent la rotation terrestre. La Mer de Behring serait responsable de plus de la moitié de cet effet. Cet allongement séculaire du jour, qui n'est calculable qu'après coup, atteint $\Delta t = 1,6\ 10^{-3}$ par siècle. L'effet est cumulatif.

Après n siècles, l'écart entre le temps solaire et un temps rigoureusement uniforme atteint $\Delta T = \Delta t + 2\Delta t + 3\Delta t + \ldots + n\Delta t = \frac{n(n+1)}{2}\Delta t$ (on a une loi en n^2). En fait Δt varie également, si bien que cet écart, à partir du 1e janvier 1900, se met sous la forme $\Delta T = 72,318\ n + 29,95\ n^2$ où n est le nombre de siècles depuis cette date et ΔT est exprimé en secondes. Si on essaie de prévoir les phénomènes observés par les Grecs (il y a plus de 20 siècles), on s'aperçoit qu'ils ont lieu avec plus de 3h d'avance sur les calculs faits aujourd'hui en supposant un jour solaire invariable.!

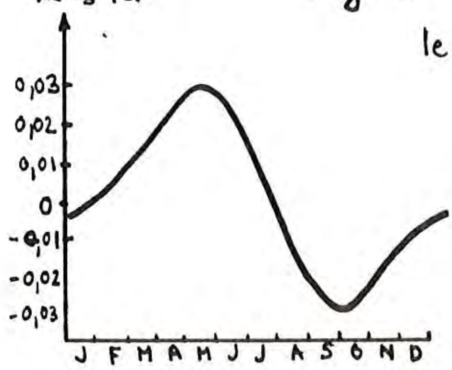
Des observations géologiques ont montré qu'il y a 100.000 millions d'années, l'année comprenait 400 jours.

Par ailleurs, le couple moyen exercé sur le système Terre-Lune par le Soleil et les autres planètes est pratiquement négligeable si bien que le mouvement cinétique de ce système est sensiblement constant. La Terre tournant moins vite, la distance Terre-Lune augmente et la 3e loi de Képler montre que la période de rotation de la Lune autour de la Terre (le mois lunaire) augmente. Le gaspillage d'énergie durera tant que la Terre ne présentera pas la même face à la Lune. On prévoit que ce sera le cas dans quelques millions d'années. On aura alors une "rotation synchrone". Le jour terrestre sera alors égal au mois lunaire, c'est-à-dire 50 jours actuels environ. Remarquons que le jour lunaire est déjà égal au mois lunaire (la Lune nous présente la même face). Les marées d'origine terrestre sur la Lune sont en effet 20 fois plus fortes (pourquoi ?) que les marées d'origine lunaire. Les effets de friction sur la Lune ont donc eté énormes et ont rapidement amené la Lune à présenter la même face vers la Terre. Le bourrelet ne bouge plus sur la surface lunaire et il n'y a donc plus de frictions.

La Lune était plus proche de la Terre dans le passé (les marées étaient plus fortes comme l'ont montré les géologues) ce qui a incité certains à penser qu'au départ Lune et Terre ne faisaient qu'une planète.

En plus du ralentissement séculaire, on constate des irrégularités saisonnières dans la rotation terrestre. Au cours de l'année, les moments d'inertie de la Terre varient. Des millions de tonnes d'eau s'évaporent et retombent en pluie ou en neige de façon plus ou moins irrégulière. Au printemps, les calottes polaires fondent. Sur les continents, la végétation s'accumule ou disparaît selon les saisons. En 1937, Stoyko, de l'Observatoire de Paris, montra que les horloges (à quartz) avaient tendance à avancer au Printemps et à retarder à l'automne. D'un jour sur l'autre, l'écart est de l'ordre de 1ms.

ΔT_s (s) Fig 29



Par rapport au temps uniforme des horloges le retard cumulé ΔT_s atteint $3\ 10^{-2}$ s vers la fin de mai et atteint $-2,9\ 10^{-2}$ s au début de novembre. (ces écarts varient légèrement d'une année sur l'autre)

Enfin, en plus du ralentissement séculaire et de la variation saisonnière, il existe des variations irrégulières totalement imprévisibles. Certaines sont séculaires et tendent à masquer le ralentissement. Ainsi de 1900 à 1918, le jour a diminué de $2\ 10^{-3}$ s. De 1918 à 1936, il a augmenté de $2,3\ 10^{-3}$ s, etc... Ces variations sont très probablement dues à des réarrangements de la structure interne de la Terre. Certaines variations sont par contre très brusques. Le 20 septembre 1945, le jour s'est accru subitement de $3\ 10^{-3}$ s sans qu'on puisse en fournir une explication plausible. Entre le 20 et le 25 février 1956, on a constaté une variation de 10^{-3} s. On ne voit rien d'autre comme explication que la forte éruption solaire du 23 février.

Citer une variation de 10^{-3} s sur la durée du jour indique à quelle précision on peut arriver dans la mesure des phénomènes. Ce n'est pas un luxe. Les impératifs de la science moderne l'exigent. Les différentes variations de la durée du jour n'ont pu être découvertes que par les irrégularités qu'elles entraînent dans le mouvement apparent des corps célestes (Lune, Soleil, Planètes, étoiles...). Ces irrégularités n'ont pu être mises à jour que par des appareils de plus en plus précis : lunettes méridiennes, lunettes photographiques zénithales, astrolabes (qui observent les étoiles à leur passage par une hauteur constante, dans tous les azimuts). Des irrégularités observées dans les mouvements, on déduit, a posteriori, les irrégularités terrestres. Séparer les différents effets n'est pas une des moindres difficultés.

Par ailleurs, la rotation terrestre est responsable de "l'aberration diurne". L'observateur est animé d'une certaine vitesse maximale à l'équateur (465m/s). Le décalage qui en résulte est très faible ($\simeq 0,3''$).

II.2.2.- Variation de la direction de l'axe de rotation

La direction de l'axe de rotation n'est pas fixe dans le repère de Copernic. Le mouvement essentiel (et très important) est la précession des équinoxes, découverte par Hipparque, vers 100 av. J.C. Ptolémée raconte que Hipparque fit sa découverte en comparant une éclipse de Lune, observée par lui-même et une éclipse de Lune observée par Timocharis, 169 ans plus tôt. Au milieu d'une éclipse de Lune, la Lune se tient exactement dans la direction opposée à celle du Soleil. La trajectoire du Soleil étant bien connue, on peut connaître sa longitude géocentrique d'après sa déclinaison, déclinaison qui est obtenue d'après la mesure de la hauteur du Soleil au méridien effectué le même jour. La longitude de la LUne est obtenue en ajoutant 180° à celle du Soleil. On connaît alors sa distance à l'équinoxe. Spica est une étoile brillante, située près de l'écliptique. En mesurant sa longitude d'après sa distance à la Lune éclipsée, Hipparque constata que Spica précédait l'équinoxe d'automne de 6° alors que Timocharis avait mesuré 8°. Hipparque trouva le même résultat avec d'autres étoiles : l'équinoxe avait donc bougé le long de l'écliptique (d'environ $\frac{2 \times 3600}{169} \simeq 45''$ par an).

Le mouvement des points d'intersection de l'écliptique avec l'équateur céleste traduit un mouvement de ce dernier (le mouvement de l'écliptique est beaucoup plus lent) dû lui-même à un changement de direction de l'axe de rotation. Le mouvement de cet axe est comparable à celui d'une toupie qui tourne selon une direction [illegible] où elle est posée (figure [illegible]).

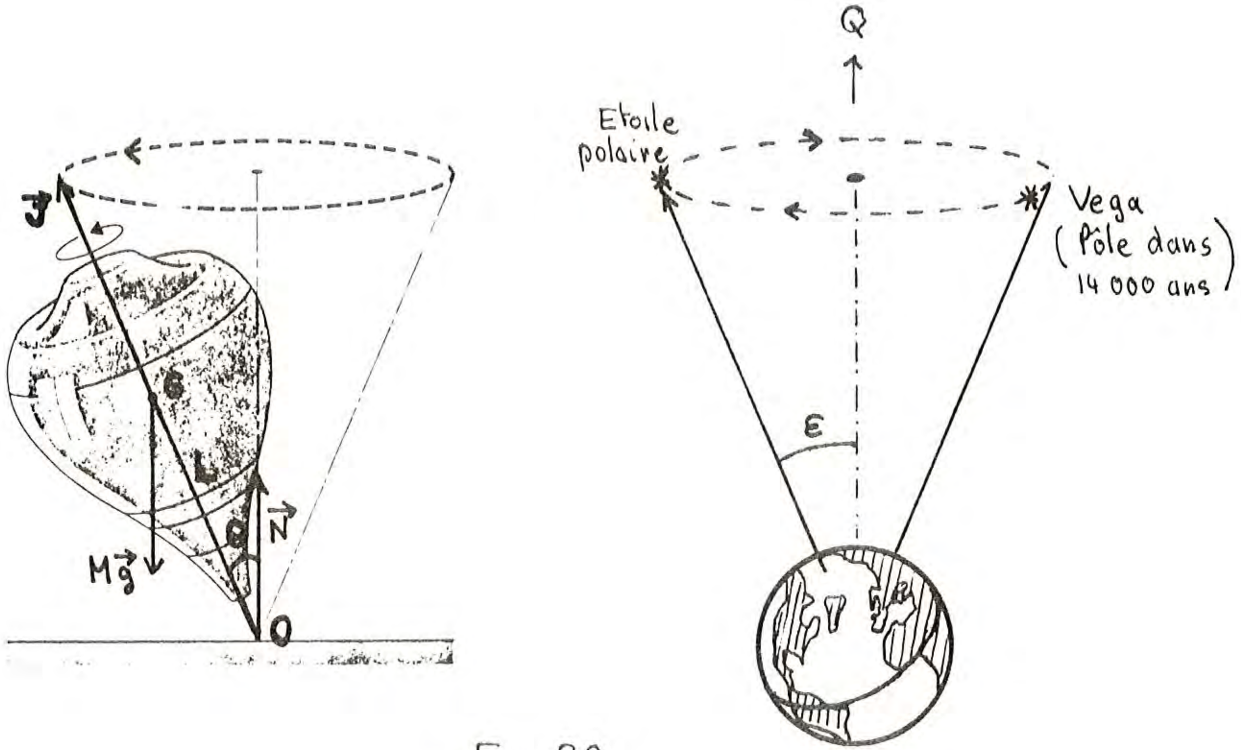


Fig 30

La toupie est soumise à un couple $\vec{\Gamma} = \vec{GO} \wedge \vec{N}$

$\vec{N} + M\vec{g} = 0$

d'où

$\Gamma = MgL \sin\theta$

Si $\vec{J}$ est le moment cinétique de la toupie $\frac{d\vec{J}}{dt} = \vec{\Gamma}$. $\vec{J} // \vec{OG}$.

$\frac{d\vec{J}}{dt}$ est donc constamment perpendiculaire à $\vec{J}$. Il est facile de montrer que $\vec{J}$ (c'est-à-dire l'axe de rotation) décrit un cône d'axe perpendiculaire au plan horizontal, d'angle θ , dans le sens donné par $\vec{\Gamma}$, de période $\frac{MgL}{J}$.
De même, l'axe de rotation de la Terre décrit un cône d'angle ε, d'axe l'axe de l'écliptique, dans le sens Est-Ouest (sens rétrograde), avec une période de 26.000 ans. Le pôle Nord céleste décrit donc un cercle sur la voûte céleste, centré sur le pôle Nord de l'écliptique. Ce pôle se trouve actuellement près de l'étoile α Polaris. Dans 14.000 ans il se trouvera près de l'étoile Véga.

Le couple responsable de cette précession est essentiellement dû à l'action de la Lune sur le renflement équatorial de la Terre.

La trajectoire de la Lune est peu inclinée sur l'écliptique.

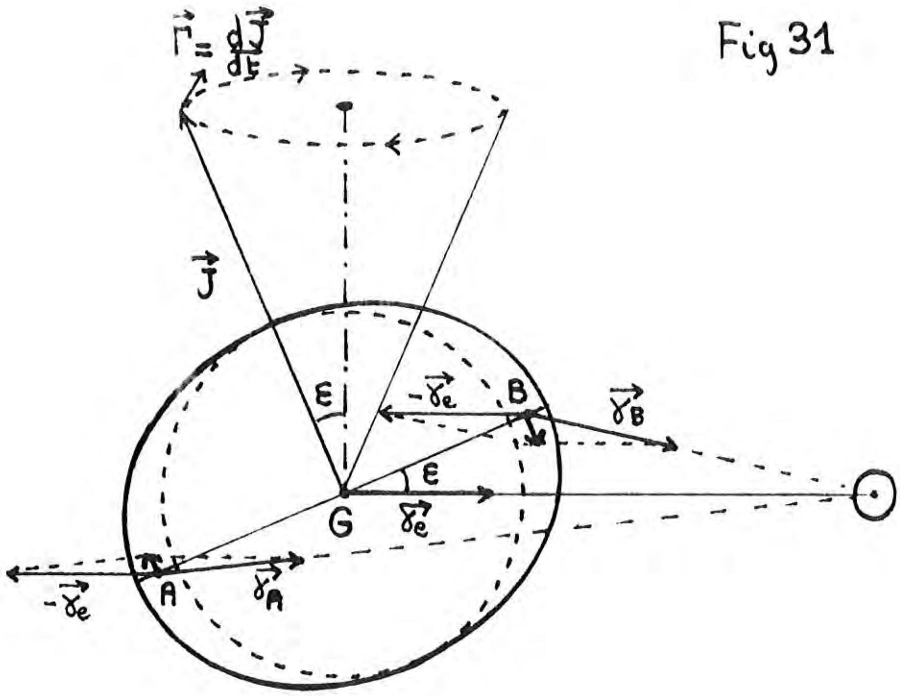


Fig 31

Dans le repère héliocentrique, il faut comparer les accélérations absolues $\vec{\gamma}_A$ et $\vec{\gamma}_B$ avec l'accélération d'inertie d'entraînement $-\vec{\gamma}_e$ $(= -\vec{\gamma_G})$ (figure 31).

Les forces exercées dans ce repère sur les renflements équatoriaux A et B créent un couple $\vec{\Gamma}$, normal au moment cinétique terrestre $\vec{J}$, qui fait tourner $\vec{J}$ dans le sens rétrograde (sens inverse de la toupie de la figure 30 car les couples sont opposés). En conséquence, le point vernal se meut le long de l'écliptique, dans le sens rétrograde, à raison de 50" par an (pour la petite histoire, 50"25641 + 0"22229t + 0"00026t^2, où t est exprimé en milliers d'années depuis 1900). Sur ces 50", la Lune est responsable de 40, le Soleil de 10, les planètes apportant une contribution très petite (1/40 du total). Ce mouvement du point γ entraîne une variation continuelle des coordonnées (δ, α) des étoiles et autres corps célestes.

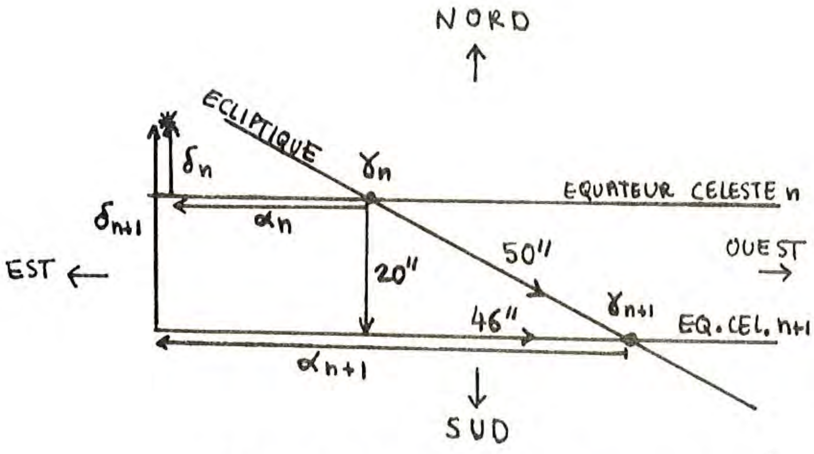


Fig 32 (Vue par l'observateur)

La figure 32 montre que, tout mouvement exclu, l'ascension droite des corps célestes augmente de 50" × cos ε = 46" par an et la déclinaison de 50" × sin ε = 20" par an. Les coordonnées (δ,α) doivent être corrigées de façon permanente à l'aide de l'équation de précession et des tables.

Une autre conséquence très importante est que la durée séparant 2 passages du Soleil au point vernal est différente de l'année sidérale. On l'appelle année tropique. Comme le point vernal se meut dans le sens inverse du mouvement solaire apparent, l'année tropique est légèrement plus courte que l'année sidérale.

$$1 \text{ année tropique} = T_{\oplus}\left(1 - \frac{50{,}256 \cos \varepsilon}{360 \times 3600}\right)$$

On trouve :

$$1 \text{ a.t.} = 365{,}2422 \text{ j} \quad \text{(jour solaire moyen)}$$

EXERCICE : Calculer l'écart entre jour sidéral et jour stellaire.

Le Soleil est au point γ lors de l'équinoxe de printemps. L'année tropique est l'année des saisons. C'est pourquoi l'année tropique est l'année civile qui régit la vie sociale. L'écart entre année sidérale et année tropique entraîne un décalage faible mais croissant dans la configuration de la voûte céleste à une époque donnée de l'année.

On a actuellement une division donnée de l'année en douze constellations associées chacune à un signe zodiacal. Dans 26.000/12 $\simeq$ 2.170 ans, la voûte céleste aura tourné d'un signe par rapport au zodiaque. Les étoiles qui se trouvent actuellement correspondre aux Gémeaux (entre le 21 mai et le 22 juin) se retrouveront dans le Cancer (entre le 22 juin et le 23 juillet). Il n'y a guère qu'aux astrologues que cela apportera des complications. De façon générale, la précession affecte la date des phénomènes liés aux étoiles fixes. Ainsi les levers héliaques. On imagine les avatars des calendriers reposant sur ces phénomènes, en particulier le calendrier égyptien qui utilisait le lever héliaque de Sirius.

En plus de la précession, l'axe de rotation subit un mouvement de <u>nutation</u> dû à la variabilité du couple exercé sur le renflement équatorial.

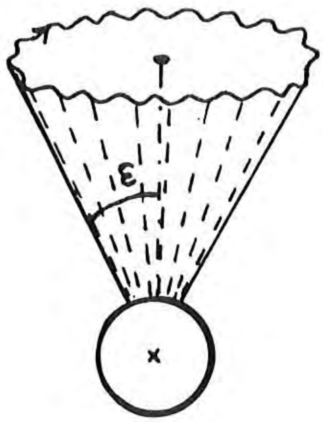
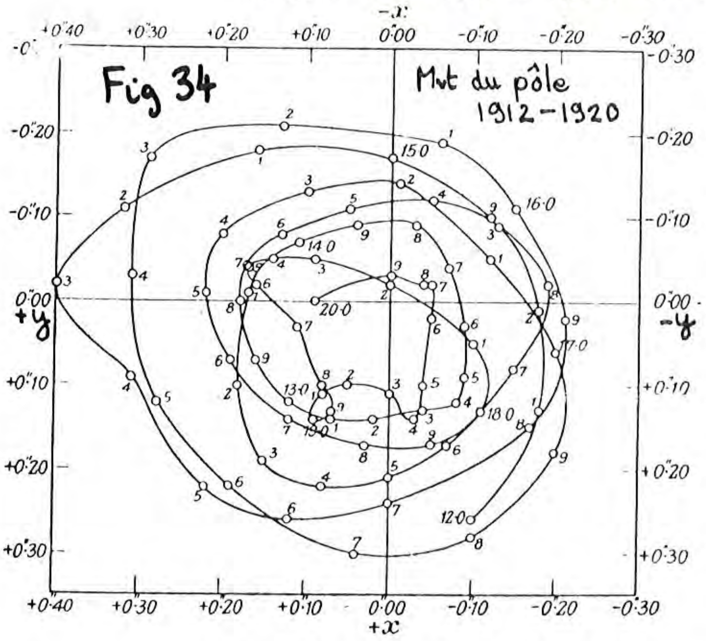


Fig 33

En raison de leurs mouvements, le Soleil et la Lune se trouvent parfois au-dessus, parfois au-dessous du plan de l'équateur terrestre. Il y a donc des variations périodiques dans le couple exercé sur le renflement. Ces variations amènent l'axe de rotation à décrire un mouvement elliptique, de demi grand-axe 9"2, dirigé vers le pôle de l'écliptique, de demi petit axe 6"8, de période 18,6 ans. Le mouvement final de l'axe de rotation est donc la superposition de la précession et de la nutation. Le pôle décrit un cercle dentelé (fig. 33) où les dentelures sont extrêmement petites par rapport au rayon du cercle (le rapport est de $\frac{9,2}{23,5 \times 3600} \simeq 10^{-4}$)

II.2.3.- Mouvement du pôle :

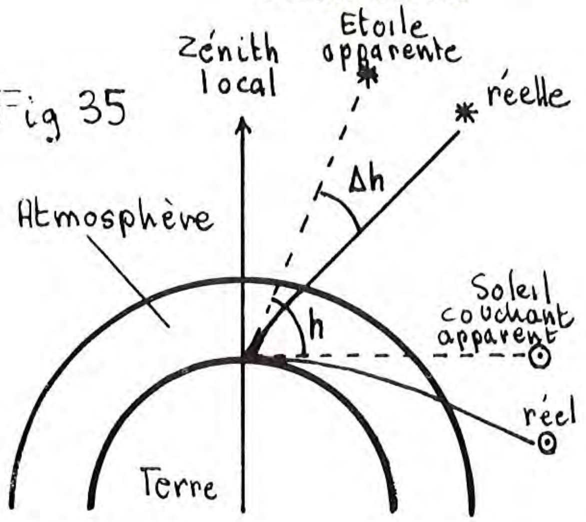
A la fin du 19e, on constata des aberrations dans le mouvement des corps célestes qui ne pouvaient s'expliquer que par des variations de latitude de l'observateur, variations dues au mouvement du pôle. Les changements de structure interne qui sont les causes des variations irrégulières du jour expliquent également ce mouvement. Le mouvement de l'axe de rotation



ne dépasse pas une dizaine de mètres autour de l'axe principal d'inertie (ou axe d'inertie maximale qui bouge lui-même un peu). Le mouvement du pôle entraîne une variation de latitude de l'ordre de 0,5" dans l'année et aussi une variation du jour de l'ordre de 10^{-3}s. Le mouvement est actuellement suivi avec une précision de 30cm sur le terrain (soit 0,05"). Euler avait calculé qu'un corps rigide dont l'axe de rotation est légèrement différent de l'axe principal d'inertie subit une précession de période 305j. En fait, la Terre n'est pas rigide et on constate dans le mouvement du pôle un mouvement de période 430 jours dite période de Chandler. Le mouvement du pôle est en réalité assez erratique (fig. 34). En plus du mouvement de Chandler, existe une variation annuelle due aux phénomènes saisonniers et un déplacement séculaire de 0,1m par an vers le Groënland. Depuis qu'il est suivi, le mouvement du pôle n'a pas dépassé en tout une trentaine de mètres, mais cela suffit à perturber les résultats d'une astronomie de précision.

II.3.- Les mouvements vus à travers l'atmosphère ; la réfraction atmosphérique.

Fig 35



L'atmosphère est un milieu d'indice optique variable. Un rayon stellaire qui traverse l'atmosphère s'incurve et l'étoile apparente est plus haute que l'étoile réelle de même que le Soleil soi-disant couchant est au-dessous de l'horizon.

Walther, en 1488, mit en évidence la réfraction en constatant que le Soleil était de plus en plus haut au-dessus de sa trajectoire normale à mesure qu'il se rapprochait de l'horizon. Il avait fallu attendre d'avoir une précision de l'ordre de 1' dans les observations. Les premières tables de réfraction selon les altitudes sont dues à Tycho Brahé. La table ci-dessous donne la valeur de la réfraction Δh en fonction de l'altitude apparente h, dans les conditions normales de température et de pression.

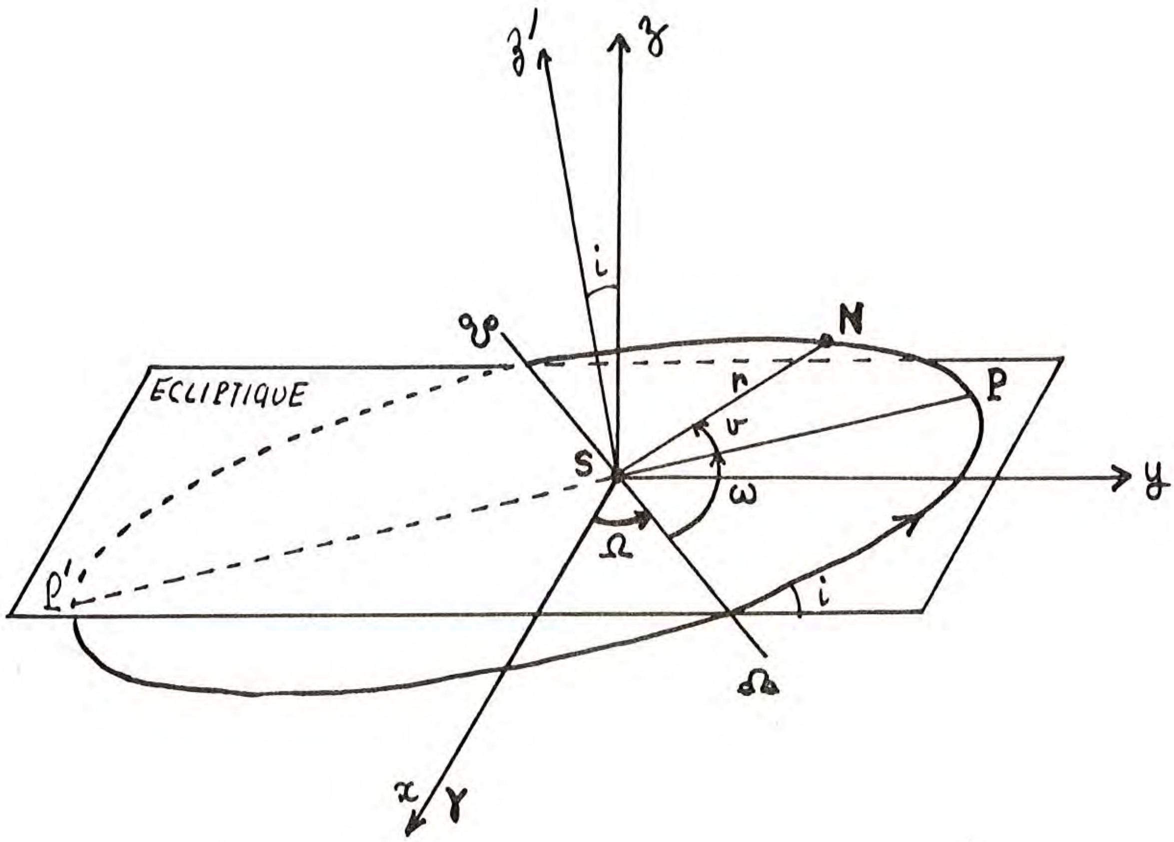
h°	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80
Δh	36',6	10',2	5',5	3',7	2',7	2',1	1',7	1',4	1',2	1'	50"	42"	35"	28"	22"	16"	11"

<u>EXERCICE</u> : On peut considérer l'atmosphère comme une succession de couches planes minces. On mesure la distance zénithale d'une étoile z = 60°. Trouver la distance zénithale réelle z_o, sachant qu'au sol l'indice de l'air est n_o = 1,0003

III.- LE MOUVEMENT REEL DES PLANETES

Comme la Terre, les planètes du système solaire tournent sur elles-mêmes et autour du Soleil. La trajectoire autour du Soleil obéit aux trois lois de Képler, elle est peu inclinée sur l'écliptique. Les éléments de l'orbite s'altèrent lentement au cours du temps, comme pour la Terre, en raison de multiples perturbations.

Fig 36



6 éléments caractérisent la trajectoire :

i : inclinaison du plan de la trajectoire sur l'écliptique = $(\widehat{Sz, Sz'})$

$0 \leqslant i \leqslant 90°$ si l'orbite est directe

$90° < i < 180°$ si l'orbite est rétrograde.

a : demi grand axe

e : excentricité

Ω : longitude héliocentrique du noeud ascendant (descendant)

ω : $(\overrightarrow{S☊}, \overrightarrow{SP})$ argument de latitude du périhélie P.

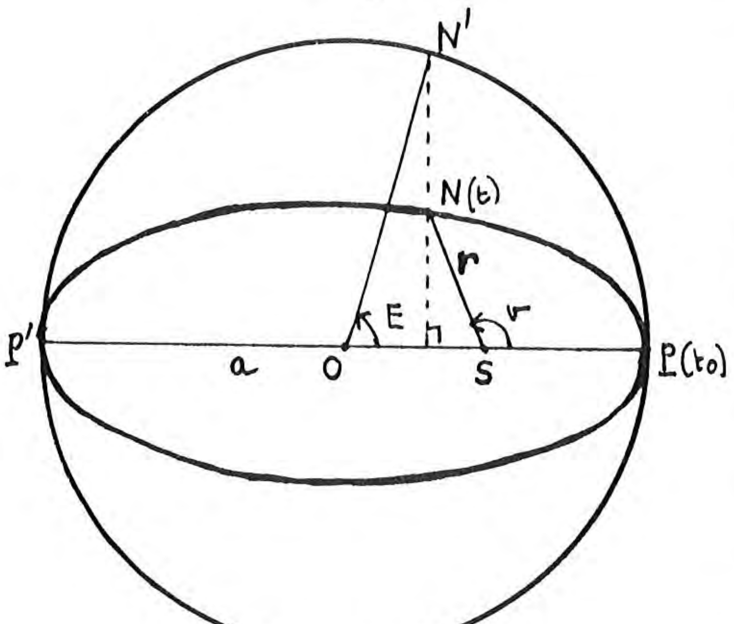
t_0 : instant de passage au périhélie.

☊☋ est la ligne des noeuds

P'P (P' l'aphélie) est la ligne des apsides. On utilise parfois $\varpi = \Omega + \omega$ "longitude" du périhélie.

Quelques définitions simples s'imposent à propos des orbites elliptiques : Considérons une trajectoire elliptique de centre O, de foyer S (Soleil), de périhélie P, de demi grand axe a (fig. 37). Si N marque la position de la planète à l'instant t, v = $(\overrightarrow{SP}, \overrightarrow{SN})$ est <u>l'anomalie vraie</u>.

Fig 37



Si N' est le point correspondant sur le cercle principal de l'ellipse E = $(\overrightarrow{OP}, \overrightarrow{ON'})$ est <u>l'anomalie excentrique</u>.

Soit n = $2\pi/T$ le "moyen mouvement" (T la période sidérale). M = $n(t - t_0)$ est <u>l'anomalie moyenne</u>. Les 3 angles seraient égaux dans le cas du mouvement circulaire uniforme.

On montre (voir T.P. sur le calcul des orbites réelles) que $v - M = 2e \sin M$ au premier ordre en e. $v - M$ représente l'écart angulaire entre la position réelle et la position de la planète si elle décrivait une trajectoire circulaire de façon uniforme.

La table ci-dessous donne les principaux éléments des orbites planétaires.

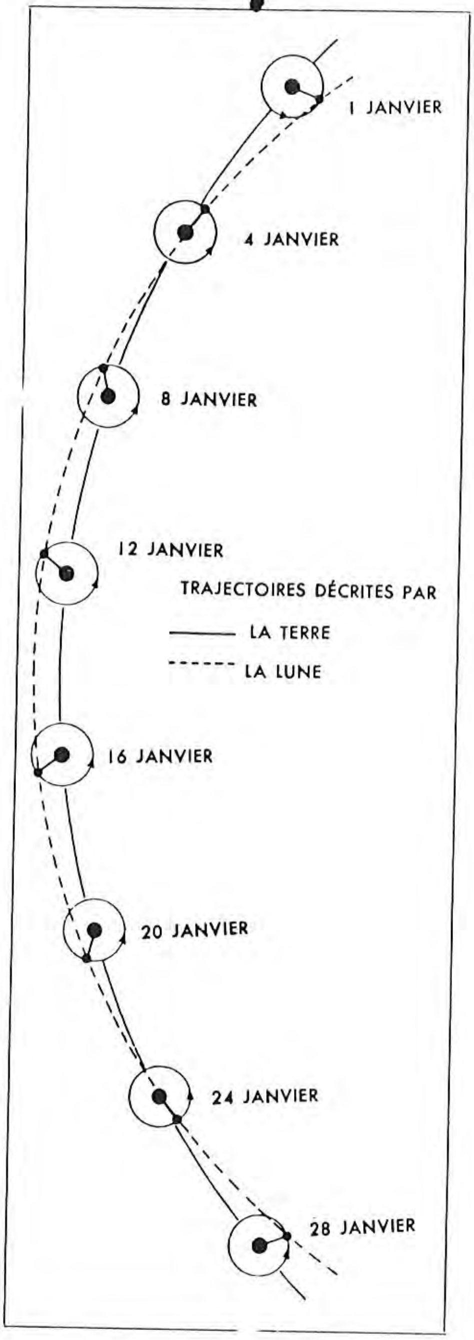
	jour sidéral	période sidérale	période synodique	a u.a.	e	i°
☿	59 j	88 j	115,9 j	0,387	0,206	7
♀	244,3 j	224,7 j	584 j	0,723	0,007	3,39
⊕	23h 56m 4s	356,26 j	—	1	0,017	0
♂	24h 37m 23s	686,95 j	779,9 j	1,524	0,093	1,85
♃	9h50 à 9h55m	11,86 a	389,9 j	5,203	0,048	1,31
♄	10h14 à 10h38m	29,46 a	378,1 j	9,539	0,056	2,49
⛢	12h	84,07 a	369,7 j	19,19	0,046	0,77
♆	15h48	164,8 a	367,5 j	30,06	0,010	1,78
P	6,4 j	248,5 a	366,7 j	39,53	0,248	17,17

Les planètes tournent toutes dans le sens direct (Ouest en Est). Leurs axes de rotation propre ont des directionsdifférentes. Pour l'une d'elles (Uranus) l'inclinaison sur l'orbite est supérieure à 90°. Dans le cas de Jupiter et de Saturne, les observations montrent que la période de rotation varie selon la latitude planétaire : il y a rotation différentielle.

Cas particulier : La Lune.

La proximité de la Lune nous permet de très bien connaître son orbite mais aussi ses irrégularités. En particulier, l'action perturbatrice du Soleil est très importante. La Lune tourne autour de la Terre en lui montrant la même face : son jour sidéral est donc égal à sa période de rotation autour de la Terre (mois sidéral) : 27,32 j. De même que le jour

Fig 38



solaire est plus long que le jour sidéral, le mois synodique (ou période des phases lunaires, ou lunaison) est plus long que le mois sidéral. On en déduit 1 lunaison = 29,53 j.

La trajectoire lunaire, autour du Soleil, présente la particularité d'avoir la même concavité vers le Soleil (figure (38).

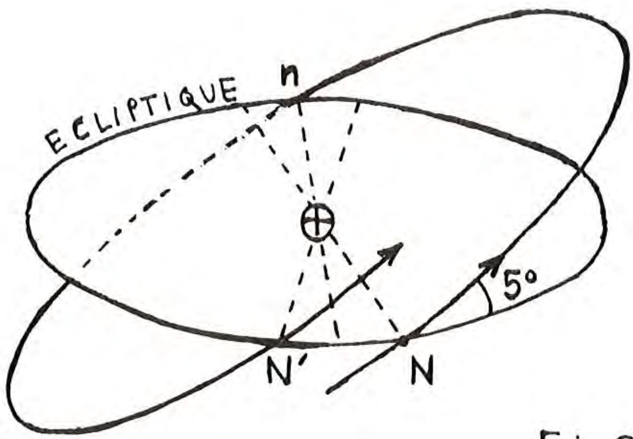


Fig 39

En première approximation, la trajectoire de la Lune autour de la Terre est une ellipse parcourue dans le sens direct, de demi grand axe 384.400 km, d'excentricité 0,055, d'inclinaison 5°9'. En fait, l'excentricité varie de 0,045 à 0,069 avec une période de 206 j, l'inclinaison de 5° à 5°18' avec une période de 173 j (analogue de la nutation terrestre).

De plus, la ligne des noeuds (N noeud ascendant, n noeud descendant) tourne dans le plan de l'écliptique dans le sens rétrograde (fig. 39). Ce mouvement équivaut, en beaucoup plus violent, à la précession terrestre : sa période est de 18,6 ans (quelle est la période de la nutation terrestre ?) La ligne des apsides tourne dans le sens direct (analogue du mouvement du périhélie terrestre) avec une période de 8,85 ans.

On comprend facilement la complexité des théories du mouvement de la Lune.

Quant aux astéroïdes et aux comètes, leurs trajectoires obéissent également aux lois de Képler mais l'influence des planètes, particulièrement Jupiter, peut les altérer sensiblement (planètes troyennes).

On a raisonné ici de façon newtonienne, mais pour certains phénomènes on doit faire appel à la relativité générale, comme l'avance au périhélie de Mercure.

IV.- LES MOUVEMENTS REELS DES ETOILES

Le Soleil appartient à la Voie Lactée, galaxie composée d'étoiles, de poussières, de gaz. La Galaxie est très aplatie et le Soleil se trouve pratiquement dans le plan de symétrie, à une distance de 10 kpc du centre galactique. Le rayon de la Galaxie est sensiblement de 15 kpc (fig. 40).

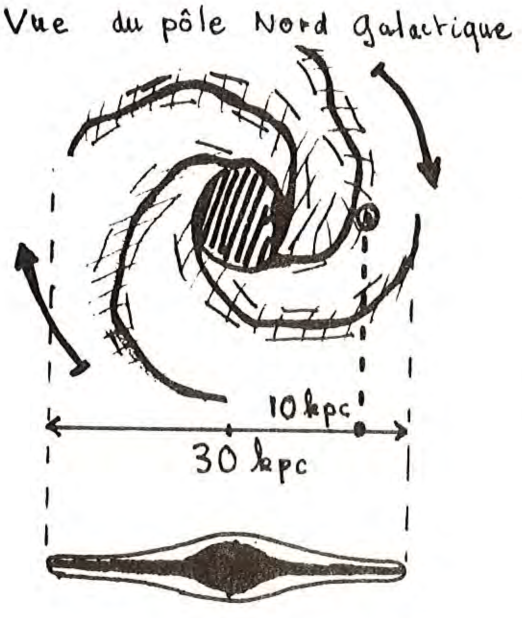


Fig 40

Pour décrire notre galaxie, on utilise un système de coordonnées appropriées, les coordonnées galactiques

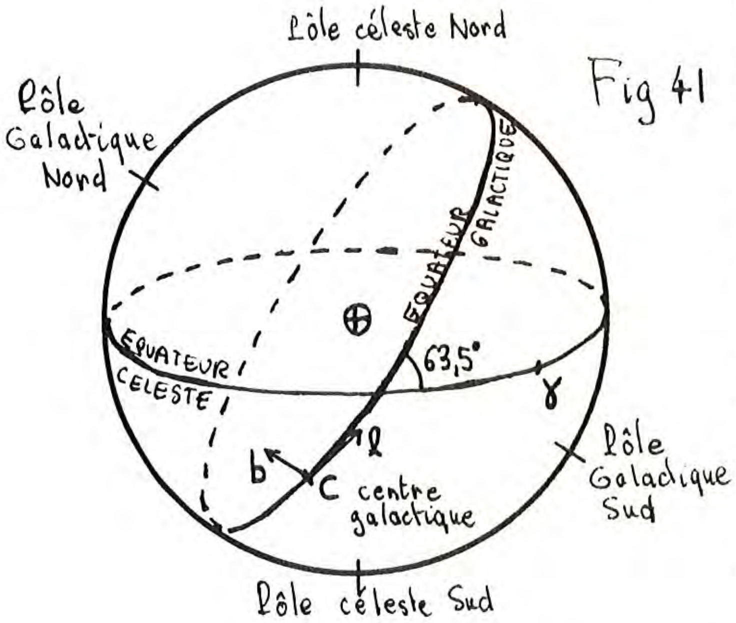


Fig 41

La trace du plan de symétrie galactique dessine sur la sphère céleste un grand cercle appelé plan galactique. Ce cercle incliné de 63°5 sur l'équateur céleste et de pratiquement 90° sur l'écliptique A partir du plan galactique, on peut définir le pôle nord galactique. Par convention, les coordonnées équatoriales du pôle galactique Nord sont (pour 1950,0) α = 12h49mn δ = 27°24'. On peut donc utiliser un système de coordonnées galactiques latitude b, longitude l. L'origine des longitudes est choisie la plus proche possible du centre galactique. Les coordonnées de ce point pour 1950 sont α = 17h42mn, δ = − 28°55'.

Dans un référentiel type Copernic (l'origine au centre galactique, les 3 axes dirigés vers 3 galaxies lointaines) les étoiles ont un mouvement moyen qui est celui de la rotation galactique différentielle. Pour un observateur situé dans la direction du Nord galactique, la galaxie tourne dans le sens rétrograde. La fréquence angulaire ω dépend de la distance au centre galactique(cf. T.P. sur la rotation galactique). Le mouvement moyen de rotation du Soleil et des étoiles voisines est défini par le "référentiel standard local" (R.S.L.). Ce référentiel a son origine (à un instant donné on peut la prendre au Soleil) à une distance R_o = 10 kpc du centre galactique, et est animé d'une vitesse qui est la vitesse moyenne des étoiles voisines du Soleil. Les mesures donnent pour fréquence angulaire du RSL $\omega_o \simeq$ 25 km/sec/kpc.

On peut alors calculer la période de rotation du R.S.L. : 240 millions d'années, qu'on appelle encore "année cosmique".

En plus de ce mouvement moyen, chaque étoile a un mouvement propre. Le Soleil lui-même a un mouvement propre, défini dans le R.S.L. Le Soleil se dirige vers un point appelé apex (α = 18h4mn $\pm$ 7mn, δ = + 30° $\pm$ 1°) situé dans la constellation d'Hercule (près de l'étoile Véga) avec une vitesse de 20 $\pm$ 1 km/s. Ce mouvement est responsable de "l'aberration séculaire" des étoiles du R.S.L. Celles-ci ont une vitesse radiale moyenne par rapport au Soleil égale à 20 km/s mais dirigée vers le point opposé à l'apex, appelé l'antapex. William Herschel a découvert ce mouvement en 1788, par des méthodes statistiques. Dans le R.S.L., la trajectoire de

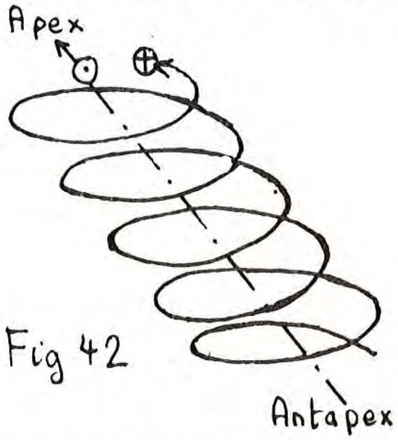
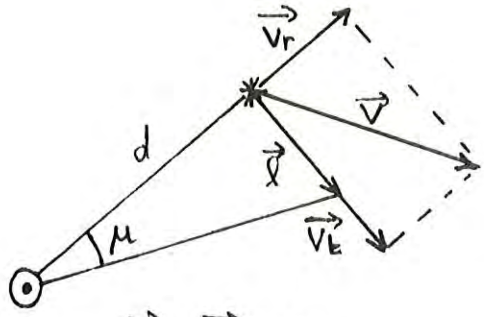


Fig 42

la Terre n'est donc pas une courbe fermée mais une sorte de spirale (fig. 42) Et si on tient compte de la rotation galactique...

Les mouvements propres des étoiles proches sont décelables. Ces étoiles bougent par rapport à l'arrière plan d'étoiles fixes. Ce déplacement est appelé mouvement propre μ et est exprimé en "/an. Le mouvement propre est en effet très petit et ne dépasse pas 10"/an (étoile de Barnard) mais ce mouvement est cumulatif : les effets de perturbation gravitaionnelle entre étoiles isolées sont très faibles. Le mouvement propre est donc rectiligne (dans le R.S.L. de l'étoile considérée). La précision peut alors atteindre $2\,10^{-3}$"/an (pour mesurer μ il faut avoir séparé tous les mouvements apparents des étoiles que l'on a décrits auparavant, d'où un certain travail...)

Le mouvement propre que l'on détermine est un mouvement <u>relatif au Soleil</u> ou si l'on veut héliocentrique, c'est-à-dire dans un référentiel où le Soleil serait au repos.



$\vec{l} = \vec{V_t} \times 1\,an$

Fig 43

Montrer que :

$V_t(km/s) = 4{;}74\ \mu(''/an) \times d(pc)$

La vitesse radiale v_r est déterminée par effet Doppler, $V_r = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} c$

Si V est la vitesse de l'étoile par rapport au Soleil :

$$V^2 = V_r^2 + V_t^2$$

On a considéré jusqu'à présent des étoiles isolées. Mais près de la moitié des étoiles appartiennent à des systèmes doubles et il y a même des systèmes triples. Le centre d'inertie du système a un mouvement propre rectiligne et les étoiles du système ont un mouvement oscillatoire autour du mouvement du centre d'inertie. Ce mouvement oscillatoire peut être observé dans les spectres où les raies oscillent avec la même période. Il peut se traduire par des éclipses ou des variations régulières de la luminosité (voir la leçon sur la mesure des masses).

Enfin, les étoiles tournent sur elles-mêmes. Ainsi le Soleil a un mouvement de rotation différentielle, bien mis en évidence par le mouvement des tâches solaires. La période de rotation est la plus courte à l'équateur : 25 jours.

Dans les systèmes binaires serrés, les effets de marée sont tels que les étoiles se présentent la même face. Les mouvements sont totalement synchrones. La période de rotation propre de chaque étoile est égale à leur période de révolution mutuelle.

V.- LES MOUVEMENTS REELS DES GALAXIES

Seuls nous sont accessibles les mouvements radiaux des Galaxies, par effet Doppler. Les mouvements propres, qui sont tangentiels, nous sont inaccessibles. Ou alors, il faut avoir de la patience... pour plusieurs milliers d'années. Les mouvements des galaxies, surtout les galaxies éloignées, nous sont donc mal connus.

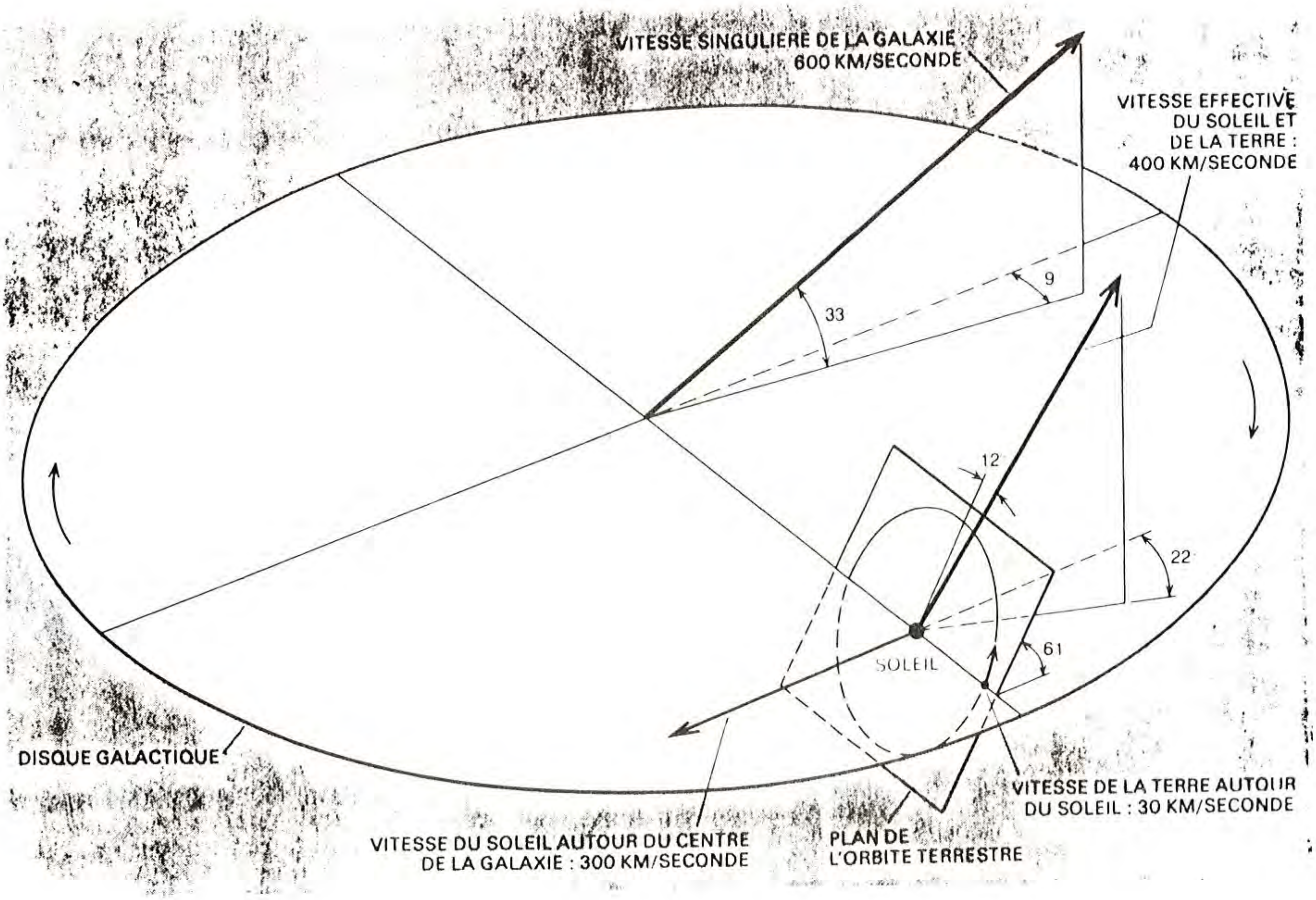
D'une façon générale, le mouvement des galaxies résulte de la superposition d'un mouvement local (c'est-à-dire dans l'espace eudidien local) et d'un mouvement généralisé de récession dû à l'expansion de l'Univers.

A "faible distance", le mouvement local l'emporte sur le mouvement relativiste d'expansion. Ainsi la galaxie d'Andromède s'approche de la nôtre. Toutes les galaxies semblent tourner sur elles-mêmes. Savoir si l'axe de rotation varie est en dehors de nos possibilités. Au sein de l'amas local auquel elles appartiennent, les galaxies sont soumises à un certain mouvement d"agitation" propre. On peut définir un centre d'inertie pour l'amas et mettre en évidence une rotation de l'amas dans un repère dont les axes seraient définis par 3 amas lointains. De même qu'en considérant l'ensemble des amas voisins de l'amas local, on peut définir une vitesse de l'amas local au sein de cet ensemble d'amas. Et ainsi de suite, en théorie...
La relativité nie l'existence d'un référentiel absolu. On est donc conduit à construire, pour l'objet étudié, un référentiel jouant le rôle de référentiel galiléen, défini par des objets de même nature situés à grande distance. Puis on passe au mouvement du référentiel lui-même grâce aux objets supérieurs dans la hiérarchie de structure de l'Univers. On a raisonné ainsi de la Terre aux Galaxies. Mais au-delà de l'amas de galaxies, nos connaissances sur la hiérarchie de l'Univers sont floues. On n'est pas sûr que

l'Univers soit constitué de groupements se hiérachisant à l'infini. Les notions de "Super-amas" et de "super-super-amas" ainsi que leurs mouvements éventuels (translation, rotation) sont sujets à caution.

Lorsque les distances considérées deviennent importantes, l'effet d'expansion de l'Univers noie les mouvements locaux. Toutefois, il semble qu'on puisse déceler des anisotropies dans l'expansion. L'interprétation est cependant peu évidente (mouvement d'un super-amas local ?). On a de même décelé une anisotropie dans le rayonnement thermique cosmologique à 3°K.

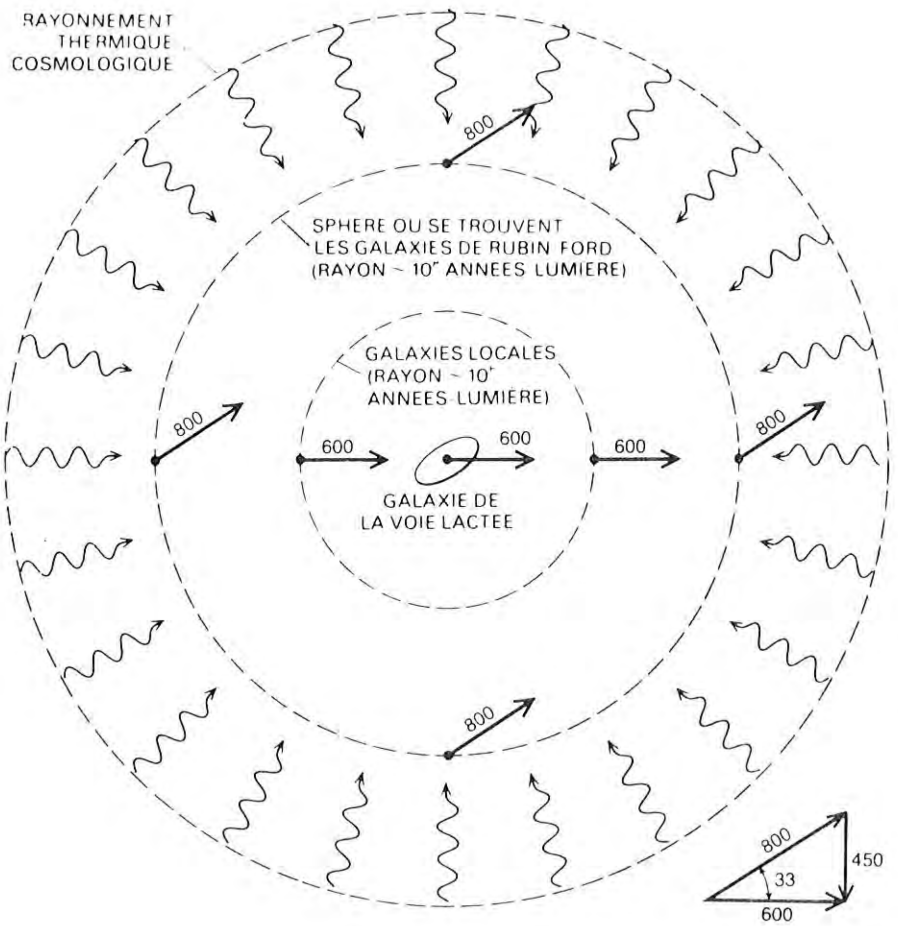
Fig 44



On atteint peut-être là la limite possible de notre connaissance sur le mouvement de notre galaxie dans l'Univers. La figure 44 donne le résultat d'une expérience récente faite en avion. L'anisotropie observée est explicable par un déplacement du Soleil par rapport au rayonnement cosmologique, avec une vitesse de 400 km/s dans une direction précise. Ce qui équivaut, compte tenu de la rotation galactique, à une vitesse de la galaxie de 600 km/s par rapport au rayonnement. L'amas local a une vitesse voisine. On sait que le mouvement de l'amas de la Vierge corrigé de l'expansion de l'Univers est très faible. Sa vitesse est donc voisine de 600 km/s par rapport au rayonnement thermique.

On peut donc considérer qu'un grand volume, d'un rayon de 10^7 a.l. se déplace avec cette vitesse.

Fig 45



Rubin et Ford ont montré que notre galaxie avait une vitesse de 450 km/s par rapport à un ensemble de galaxies situées à 10^8 a.l. On peut concilier les 2 faits en supposant que ces galaxies ont une vitesse de 800 km/s dans une direction inclinée de 33° par rapport à celle de notre galaxie. L'interprétation est loin d'être établie. On consultera avec bénéfice l'article de R.A. Muller dans le n° 9 de "Pour la Science" de 1978.

2ème PARTIE : LE TEMPS

I.- GENERALITES :

** Le temps est une notion intuitive que nous pouvons appréhender par nos sens ou notre intelligence. Mais, comme l'espace, c'est une notion première que l'on ne sait pas définir explicitement.

* Nos sens nous donnent une perception personnelle du temps par la sensation d'écoulement continu de notre vie, écoulement marqué par des actions et des impressions que l'on peut classer chronologiquement mais aussi comparer en durée : la chronologie et la durée sont les deux manifestations essentielles du temps dont nous avons l'intuition.

- La chronologie de notre vie est définie par la possibilité que nous avons de classer des événements repères en "avant" "pendant" ou "après" La chronologie est alors matérialisée par ces événements. A ces événements peuvent être associées des dates qui sont un moyen arbitraire mais commode de référence, une tentative d'universaliser notre propre expérience du temps qui passe et de la rendre accessible aux autres individus. Etablir une chronologie, c'est construire une échelle de temps que nous parcourons toujours dans le même sens.

- La durée est définie par la possibilité que nous avons de classer les événements ou les temps qui s'écoulent entre ces événements en "plus longs" "aussi longs" ou "plus courts". En fait, on évalue la "longueur" de la portion d'échelle de temps séparant le début de la fin d'un événement ou la fin d'un événement du début du suivant. Evaluer la durée, c'est mesurer un intervalle de temps séparant deux instants ou dates de l'échelle de temps. La faim, la fatigue, l'ennui, le sommeil (et la mort...) sont les réactions physiologiques naturelles à la durée. Nous sommes également très sensibles aux phénomènes répétitifs à intervalles de temps réguliers, c'est-à-dire aux rythmes (battement du coeur, respirations...). Ces phénomènes cycliques permettent de calibrer l'échelle de temps par la choix d'une période comme durée unité ou comme multiple de la durée unité. Les intervalles de temps mis bout à bout peuvent constituer la chronologie ou échèlle de temps.

* Nous pouvons avoir également une représentation arbitraire du temps, si nous cherchons à dépasser la notion physiologique, personnelle que nous en avons. D'un point de vue philosophique, on peut concevoir, comme Newton, un temps absolu ayant une définition propre indépendante de la matière et de l'espace. Mais, à la réflexion, on voit que la notion de temps perd son sens en l'absence de changement ou de modification. Le temps n'a pas de sens pour un monde immuable de même que l'éternité se situe en dehors du temps. La conception du temps est intimement liée à la modification de l'espace et donc à l'existence de la matière (également notion première). Si on admet, par exemple, la création de l'Univers par une explosion primordiale, poser la question du passé ou de l'ailleurs par rapport à cette explosion n'a pas de sens. Le temps démarre avec l'explosion, l'espace s'agrandit avec l'expansion de la matière. Le temps, comme l'espace, n'existe que dans un Univers matériel. Cette idée est entièrement contenue dans la relativité générale.

D'un point de vue scientifique, le temps est une variable continue et uniforme servant à décrire le mouvement ou l'évolution et qui s'introduit dans les équations comme toute autre variable. Mais le temps, est une variable particulière du fait de son irréversibilité. Si les équations de la mécanique classique sont formellement réversibles, le 2e principe de la thermodynamique affirme l'irréversibilité du temps : le sens du temps est celui de l'évolution des systèmes isolés vers un plus grand désordre.

D'un point de vue relativiste, le temps n'est pas un absolu, comme on l'a évoqué plus haut. On ne peut parler du temps sans préciser le système de référence spatial auquel on rapporte ses observations. Les effets relativistes ne seront pas considérés ici et ne le sont d'ailleurs pas officiellement dans la détermination des échelles et des unités de temps. Mais cette détermination est devenue si précise qu'on commence à les prendre en compte.

** Comment, en pratique, établit-on les échelles de temps et mesure-t-on les intervalles de temps ?

Il est clair que, si l'on s'en tient à notre perception individuelle, on obtient une échelle totalement subjective, propre à chaque individu donc incommunicable, entachée de graves défauts d'uniformité et de précision. Chaque individu perçoit en effet les événements de façon propre et au cours de sa vie ou de son temps d'activité. Le sommeil, l'activité, l'ennui, etc... influent sur l'appréciation de l'écoulement du temps. L'âge aussi : à mesure que les processus biologiques sont plus lents, le temps passe plus vite. De même, la représentation abstraite d'un temps uniforme et continu est inopérante par nature puisque purement formelle, sans prise sur le monde physique, et trahie par les aléas de nos perceptions.

La complexité et l'intensité de la vie moderne exigent au contraire une échelle de temps aussi parfaite que possible. En réalité, on ne peut construire une échelle de temps que sur un phénomène physique évolutif présentant certaines qualités. Les qualités que l'on exige d'une échelle de temps parfaite sont :

- l'universalité. Il importe que la même échelle soit utilisée par un nombre le plus grand possible d'individus. Grâce au développement des moyens de communication qui a permis d'établir un réseau international de diffusion des signaux horaires, les échelles de temps actuelles ont une vocation universelle (le temps d'origine solaire est T.U. qui veut dire temps universel).

- la pérennité. Les échelles de temps ne doivent pas subir d'interruptions. C'est heureusement le cas des mouvements astronomiques comme la rotation ou la translation de la Terre.

- l'accessibilité. Chaque individu doit pouvoir lire la date sur l'échelle adoptée. Les phénomènes célestes sont en principe accessibles à tous mais en pratique leur observation est délicate, très technique et nécessite une collaboration internationale. L'accessibilité n'est pas permanente. On doit donc "conserver" le temps et le diffuser.

- la précision. Les échelles de temps astronomiques reposent sur l'observation des astres. L'observation est en fait entachée d'erreurs, aussi faibles soient-elles qui limitent la précision de la lecture du temps. Ainsi la lecture du T.U. est d'une précision à peine inférieure à 10^{-2}s.

- l'uniformité. Soit T une échelle de temps où les dates d'événements sont désignées par t. Les événements A et B, début et fin d'une expérience de physique donnée, correspondent à t_A et t_B. Puis t'_A et t'_B lors d'un renouvellement de la même expérience dans les mêmes conditions. L'échelle de temps sera dite uniforme si $t'_B - t'_A \equiv t_B - t_A$, quels que soient t_A et t'_A. Dans ce cas on peut mesurer l'intervalle $t_B - t_A$ par différences des dates t_B et t_A, la même unité étant traditionnellement employée pour l'intervalle de temps et la désignation de la date? Dans la réalité, les échelles ne sont pas uniformes et on désigne le défaut d'uniformité par le rapport

$$d_u = \frac{(t'_B - t'_A) - (t_B - t_A)}{t_B - t_A}$$

Ainsi le temps universel est uniforme à $d_u = 10^{-7}$ près (ce qui correspond à un écart de 10^{-2} s par jour).

On réalise actuellement les échelles de temps de 2 façons.

* la première est de choisir un phénomène physique évolutif qui constitue lui-même l'échelle de temps. Les différentes phases de l'évolution servent de points de repères dans l'échelle de temps. Ce phénomène physique constitue une <u>horloge</u>. On distingue les horloges naturelles comme le mouvement de rotation de la Terre, son mouvement de translation, l'accumulation des couches sédimentaires, la croissance des arbres... et les horloges artificielles, pendules, chronomètres, montres, construites par l'homme. Les horloges naturelles sont aussi des horloges primaires : elles engendrent directement l'échelle de temps associée. Les horloges artificielles sont des horloges secondaires. Elles utilisent un autre phénomène physique (mécanisme à échappement, ressort, oscillations d'un quartz...) et ne servent que de représentation pratique de l'horloge primaire. Elles doivent être "remises à l'heure" de façon régulière.

Une fois l'horloge primaire (ou échelle de temps) déterminée, on peut choisir une origine et une unité de temps arbitraires. Le problème de l'unité de temps est lié au degré d'uniformité de l'échelle. Pour construire une échelle de temps uniforme, on considère un phénomène mécanique aussi pur que possible. Dans les échelles de temps astronomiques on choisit la rotation de la Terre (T.U.) ou sa translation (échelle de temps des éphémérides T.E.). On développe alors la théorie de façon la plus complète possible, au moyen de la mécanique classique (corrigée s'il le faut des effets relativistes) en fonction d'un paramètre t, supposé uniforme, le temps. Les différentes phases du phénomène correspondent de façon univoque à une valeur donnée de t, c'est-à-dire à une date. Ces phases permettent donc de connaître le temps et constituent l'échelle de temps. Si la théorie mécanique était complète, l'échelle de temps ainsi créée serait véritablement uniforme et l'unité de temps, choisie comme étant l'intervalle de temps séparant 2 phases identiques serait définie de façon rigoureuse et accessible à tout moment. Les théories humaines sont par définition incomplètes. L'échelle matérialisée par les phases de l'horloge n'est pas uniforme. Il n'y a donc qu'une seule façon correcte de définir l'unité de temps : on choisit une fois pour toutes 2 événements de l'échelle qu'on déclare être séparés par un nombre conventionnel d'unités de temps. Si l'on veut disposer ultérieurement de l'unité de temps, on la détermine en mesurant un intervalle de temps par la différence des dates de ces extrémités. Ce procédé n'est pas rigoureux car l'unité ainsi réalisée n'est correcte qu'à une erreur relative près qui est le défaut d'uniformité de l'échelle défini par d_u.

Ne serait-ce qu'à cause des phénomènes météorologiques, les mouvements des astres ne sont pas toujours accessibles. De même, il est exclu dans la vie courante d'avoir à observer la phase de ces mouvements pour en déduire le temps. L'homme a donc construit des "garde-temps", les horloges artificielles, réglées sur l'unité de temps de l'échelle considérée et permettant de connaître par interpolation la date de tout événement ne correspondant pas à une phase particulière de l'échelle. Ces garde-temps ont leurs propres défauts d'uniformité puisqu'ils sont construits sur des phénomènes physiques et ils sont a priori moins précis que l'échelle de temps qu'ils sont censés conserver. L'évolution des techniques et de la physique a permis à l'homme de construire des garde-temps plus précis et plus stables (horloges à quartz, horloges atomiques) que les phénomènes astronomiques définissant les échelles correspondantes. Les défauts d'uniformité de ces échelles ont ainsi été mis en évidence. Il était alors logique que les dispositifs physiques de base de ces garde-temps servent à leur tour à définir une nouvelle échelle de temps, plus uniforme. Cette situation a amené à concevoir une deuxième façon de définir une échelle de temps, en l'occurence l'échelle de temps atomique (T.A.).

* Cette dernière façon repose sur le choix d'un phénomène physique oscillatoire particulièrement stable et reproductible (transitions atomiques de fréquence très bien connue). L'unité de temps est alors définie par un nombre conventionnel d'oscillations pour la fréquence étalon. De nombreux laboratoires sont à même de produire et de compter ces oscillations, sans problème d'interruption (il faut des batteries de secours). L'accessibilité est donc permanente et la diffusion commode. (Les laboratoires ne sont pas ouverts à tous ce qui rend l'accessibilité moins générale. Ce n'est pas gênant puisque tout le monde n'a pas besoin de connaître le temps étalon).

L'échelle de temps résulte alors d'un décompte continu des dites oscillations à partir d'une origine arbitraire. A la différence des échelles de temps astronomiques, l'échelle de temps atomique s'obtient en l'absence de toute théorie, ce n'est qu'un comptage. Les échelles de temps astronomiques n'ont cependant pas disparu. Elles ont des champs d'application différents et restent indispensables.

II.- EVOLUTION DE LA MESURE DU TEMPS

On ne considère ici que la mesure du temps à court terme. Le calendrier, procédé de datation à long terme sera considéré dans un chapitre ultérieur. On retracera brièvement l'historique de l'échelle de temps constituée par la division du jour. L'objet des mesures ainsi précisé, on décrira l'évolution des instruments de mesure. De même que le temps se manifeste par la chronologie et la durée, ces instruments se classent en 2 catégories : les instruments astronomiques qui saisissent une date dans l'échelle de temps et les garde-temps qui mesurent des intervalles de temps et nous restituent le temps en dehors des observations astronomiques. La distinction est claire dans le principe, un peu moins en réalité. Les horloges sont également parfois des instruments d'observation. Ainsi, les horloges sidérales permettent de connaître l'ascension droite des étoiles d'après l'heure sidérale de leur passage au méridien.

II.1.- La division du jour

La précision de cette division (et sa reproductibilité) est inséparable de la qualité des instruments et de la connaissance des phénomènes astronomiques. La première évolue donc dans le même sens que les deux autres.

Aux origines de l'humanité, la division du jour est très frustre comme ont peut en juger par l'étude actuelle des tribus primitives. Jour et nuit sont évidemment perçus et la course du Soleil peut être suivie par le mouvement des ombres, mais ce mouvement est continu et le nombre de parties qu'on peut en déduire est arbitraire et vague.

L'Ancien Testament, comme les poèmes d'Hésiode, ne distingue que le matin et le soir. L'illiade et l'Odyssée ne parlent que de "l'aurore aux doigts de rose", le milieu du jour et le soir ; le début, le milieu et la fin de la nuit.

Les Mésopotamiens distinguent l'aurore (du milieu de la nuit au lever du Soleil), le temps du sacrifice (du lever du Soleil à midi), la pleine lumière (de midi au coucher du Soleil), le lever des astres (du coucher jusqu'à l'apparition des constellations), le temps des prières (de la tombée de la nuit au milieu de la nuit).

Avant l'utilisation des heures, les premiers Romains connaissaient diluculum (point du jour), mane (le matin), ad meridiem (vers midi), meridies (milieu du jour), de meridie (après-midi) suprema (coucher du Soleil), vespera (le soir), crepusculum (crépuscule), prima fax (première torche), concubium (nuit avancée), intempesta nox (nuit profonde), media nox (milieu de la nuit), gallicinium (chant du coq). Ce dernier donnait le signal des activités et dans la journée les Romains se guidaient sur la position du Soleil au-dessus des édifices publics.

La division en heures est, semble-t-il, apparue avec les Babyloniens (VIIIe siècle av. J.C.). Le jour civil commence alors au lever du Soleil. Il est divisé en douze "Kaspu", chaque Kaspu se divisant en 60 minutes. L'origine de cette division est incertaine. Une raison peut être trouvée dans le système sexagésimal des Babyloniens. 12 est divisible par 2, 3, 4. 60 par 2, 3, 4, 5, 6. Les unités de monnaie, poids, volumes, capacités suivent ce système qui a par ailleurs, une signification religieuse.

Mais ces divisions ne sont pas égales. La journée (jour naturel) est divisée en 6 kaspu et la nuit aussi. La durée des kaspu, inégale selon le jour naturel ou la nuit, varie également le long de l'année.

Les Hébreux apprirent ce système durant leur captivité. Leur jour commençant au coucher du Soleil fut divisé en 4 parties de 3 heures pour la journée et 4 veilles de 3 heures pour la nuit.

Les Grecs divisèrent leur jour civil (commençant au coucher du Soleil) en 24 heures de 60 minutes de 60 secondes. Cette division fut adoptée deux siècles plus tard par les Romains et devint peu à peu universelle. Ces heures (12 pour la nuit, 12 pour la journée) variables étaient appelées "heures temporaires" et le jour n'était divisé en 24 heures égales qu'aux équinoxes ; on parlait alors d'heures équinoxiales. Ces heures inconstantes étaient source de difficultés. Elles conditionnaient les mesures et la conversion devait être à chaque fois précisée. Elles étaient toujours connues de façon vague et empirique. Il était impossible à Rome de savoir l'heure exacte : "je ne peux te dire l'heure précise ; il est plus facile de concilier les philosophes que les horloges !" (Sénèque, Apokol. II, 3). La vie sociale connaissait une activité très élastique selon la saison.

Jusqu'au XVe siècle ap. J.C., le balancier des horloges devait être modifié pour diviser la journée, puis la nuit en 12 parties aussi égales que possible. On peut encore voir des horloges du XVIIIe comportant, en plus des heures égales, des cadrans gradués en heures temporaires.

Lorsque les heures égales furent généralisées, elles étaient en majeure partie calculées sur le jour solaire vrai et non le jour solaire moyen. Jusqu'au siècle dernier, les Italiens mettaient à zéro leurs horloges au coucher du Soleil et les réglaient de façon empirique pour qu'elles marquent 24 heures au coucher suivant. Ce n'était que rarement le cas ; il fallait faire "sauter l'heure" et tripoter le balancier pour suivre l'irrégularité des jours.

En raison de ce type d'inconvénient, la division du jour (Musulmans et Juifs la font toujours partir du coucher du Soleil) en 24 heures solaires moyennes s'est naturellement universalisée. Le temps correspondant (temps solaire moyen) porte le nom déjà vu de temps universel (T.U.). L'unité de temps, la seconde, a été très longtemps définie comme la 1/86400e partie du jour solaire moyen. Si depuis, pour des raisons de précision et de stabilité, cette unité a été changée deux fois, le temps universel n'en reste pas moins le temps légal, celui qui règle notre vie civile.

II.2.- Les instruments astronomiques

Les instruments astronomiques peuvent être classés en 2 catégories les instruments "gnomoniques" reconstituant le mouvement du Soleil par le mouvement de l'ombre projetée d'un gnomon et les instruments d'observation proprement dits destinés à pointer une direction.

II.2.1.- Instruments gnomoniques :

Ces instruments ont un intérêt historique et, à l'heure actuelle, décoratif. Les anciennes civilisations méditerranéennes avaient été frappées par le mouvement de l'ombre des objets et la variation de leur longueur au cours de la journée. Il était naturel d'utiliser ces propriétés en examinant l'ombre portée d'un objet approprié : le gnomon. Les premiers gnomons furent sans doute des bâtons verticaux comme on en voit encore dans certaines tribus primitives."L'heure" est déterminée par la longueur de l'ombre (l'étalon étant généralement la longueur d'une relique vénérée). La longueur de l'ombre variant au cours de l'année pour une heure donnée, l'heure obtenue était très empirique. Elle devait suffire cependant aux exigences d'une vie en collectivité particulièrement fruste. C'est en effet une règle souvent vérifiée que ces exigences conditionnent le savoir scientifique et la qualité des instruments. Ce type de gnomon suffisait à repérer le milieu de la journée. Les obélisques égyptiennes n'avaient sans doute pas d'autre vocation. Par ailleurs, la mesure de l'ombre à midi pouvait servir de datation annuelle et fonder les bases d'un calendrier.

Les Egyptiens furent probablement les premiers à construire des cadrans solaires, qui ne soient pas de simples bâtons plantés en terre. Le plus ancien qu'on ait gardé date d'environ 3.000 ans avant J.C. (fig. 46).

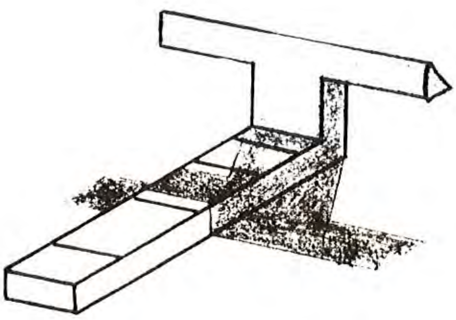
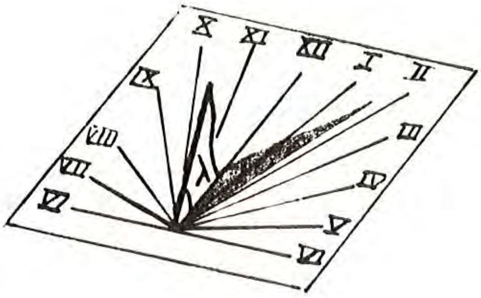


Fig 46

Une barre horizontale projette son ombre sur une latte divisée de façon inégale pour compenser le mouvement variable de l'ombre qui se meut plus vite au coucher ou au lever du Soleil qu'au milieu de la journée. Ce type de cadran ne tenait apparemment pas compte de la variation de cette vitesse avec la date, et ne permettait de réaliser que des divisions grossières de la journée. Les cadrans solaires se sont peu à peu perfectionnés, au même rythme que les connaissances, pour adopter des formes multiples comme celle classique, du gnomon incliné d'un angle égal à la latitude du lieu sur le plan horizontal (fig. 47).

Fig 47



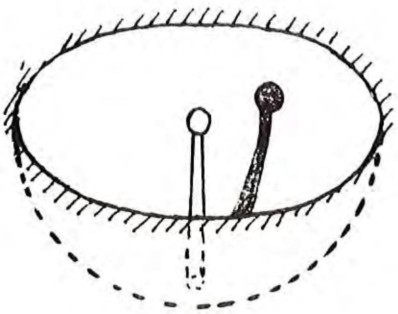
Les dates peuvent être déduites de la longueur de l'ombre.

Les cadrans peuvent être également verticaux, déclinant, occidentaux, orientaux, polaires, sphériques, etc...

Leurs formes, innombrables, semblent seulement limitées par l'imagination du constructeur.

Un autre type d'instrument gnomonique très répandu a été le polos (fig. 48). C'était une calotte de pierre au centre de laquelle s'érigeait le gnomon, pouvant porter une boule à son extrémité. Dès que le Soleil s'élevait à l'horizon, l'ombre de la boule entrait dans la concavité et l'on obtenait ainsi l'image renversée de la voûte céleste. Lors de la journée, l'ombre décrivait un arc de cercle centré sur l'image du pôle céleste nord.

Fig 48



Dans les polos perfectionnés, on traçait quatre fois dans l'année (équinoxes et solstices) les arcs de cercle correspondants. Chacun de ces arcs était alors divisé en 12 parties égales et on joignait les points correspondants pour obtenir les 12 lignes horaires. On avait alors les 12 heures temporaires de la journée. La simplicité de cette construction explique d'ailleurs que les polos étaient plus répandus dans l'antiquité que les cadrans solaires, du moins sous la forme qu'on leur connaît actuellement où ils mesurent des heures égales. Ce qui explique également que ces derniers ont peu à peu supplanté les polos qu'on ne retrouve plus au Moyen-Age.

Des origines de l'humanité au Moyen-Age, les instruments gnomoniques ont donc permis de passer d'une division très grossière du jour à une division relativement précise, semblable à celle que nous adoptons maintenant.

Leur intérêt historique est donc indéniable. Ils ont été progressivement remplacés par les instruments d'observation, plus précis et plus maniables (et par les garde-temps).

II.2.2.- Instruments d'observation :

La nuit, la rotation diurne des étoiles permet d'établir une division du temps plus ou moins raffinée. On peut prendre par exemple les passages au méridien d'étoiles régulièrement espacées sur la voûte céleste. A ce titre, l'instrument d'observation le plus ancien que l'on connaisse semble être le merkhet des Egyptiens. C'est une sorte de fourche tenue par l'observateur, l'assistant tenant un fil à plomb. Observateur et assistant sont orientés selon l'axe Nord-Sud et séparés d'une dizaine de mètres. L'observateur repère le passage de l'étoile au méridien lorsque, à l'intérieur des branches de la fourche, il voit l'étoile confondue avec celle du fil à plomb.

Le "nocturnlabe" est un ancien instrument reposant aussi sur ce principe. C'est une sorte de cercle gradué, tenu à la main, dont le centre est mis en coïncidence avec la polaire. Un index suit la rotation diurne d'une étoile donnée et fournit l'heure locale. Ainsi, la direction passant par la polaire et les étoiles α, β de la Grande-Ourse consituent une très belle aiguille.

D'une façon générale, l'utilisation des instruments d'observation repose sur un principe simple : la position d'un corps dans le ciel local permet de connaître le temps local si le mouvement (apparent) de ce corps est très bien connu.

Ceci s'applique surtout au Soleil et aux étoiles. Depuis l'Antiquité le mouvement annuel apparent (en coordonnées écliptiques ou en coordonnées universelles) est très bien connu. On connaît donc les coordonnées horaires ($\delta_{\odot}, H_{\odot}$) du Soleil à tout instant. Si on connaît la latitude λ du lieu (on peut la déterminer à partir de la hauteur de la polaire ou du Soleil au méridien puisqu'on connaît $\delta_{\odot}$), la hauteur $h_{\odot}$ du Soleil peut être calculée à partir de $\delta_{\odot}$ et $H_{\odot}$.

Montrer que : $\sin h = \sin\lambda \sin\delta + \cos\lambda \cos\delta \cos H$

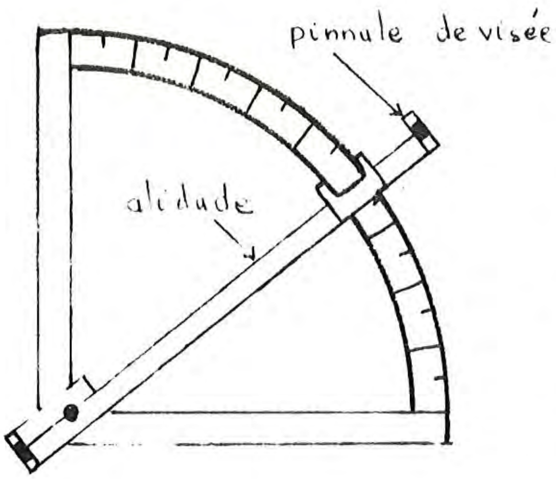
(on peut utiliser les formules de transformation (δ, H) $\leftrightarrow$ (a,h) ou résoudre le triangle sphérique Pôle Nord - Zénith - Soleil)

On voit donc que, inversement, $H_{\odot}$ peut être déduit de la valeur de $\delta_{\odot}$ et de la mesure de $h_{\odot}$. On connaît alors l'heure solaire locale ($H_{\odot} + 12h$).

Il en va de même pour les étoiles dont le mouvement est très bien connu puisqu'elles sont en première approximation fixes sur la voûte céleste ($\alpha_* \simeq$ cste. $\delta_* \simeq$ cste). La mesure de h_* donne H_* et donc le temps sidéral local $T = H_* + \alpha_*$. Si on prend en particulier l'instant du passage de l'étoile au méridien $T = \alpha_*$. On a vu la conversion entre jour sidéral et jour solaire. On peut donc connaître le temps solaire local à partir du temps sidéral local.

Avant l'invention du télescope, les instruments d'observateurs sont pour la plupart constitués d'alidades, sortes de règles munies de pinnules de visée et se déplaçant sur un cadran gradué. L'amplitude du cadran donne son nom à l'instrument : quadrant (90°) (figure 49), octant (80°), sextant (60°).

Fig 49



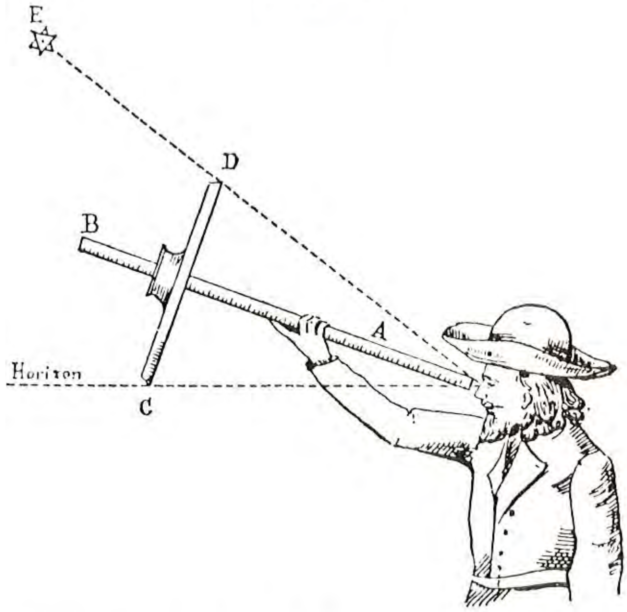
Ces instruments pouvaient être montés de diverses façons, fixe ou mobile, azimutale ou équatoriale.
Le quadrant vertical de Tycho Brahé, summum de la précision de son époque, était un quadrant fixé dans le plan du méridien, dont le rayon atteignait 2m et permettait des lectures d'angle de précision inférieure à la minute d'arc. Soit une précision théorique de quelques secondes dans la mesure du temps local. Cette précision n'était pas atteinte en fait à cause de l'incertitude sur l'ascension droite des étoiles.

L'astrolabe fut très longtemps un instrument de choix pour les marins dans la détermination du temps solaire local à partir de la hauteur du Soleil mesurée au moyen d'une alidade.

Un instrument également fort utilisé dans la mesure des hauteurs du Soleil ou des étoiles fut la Croix de Jacob (fig. 50).

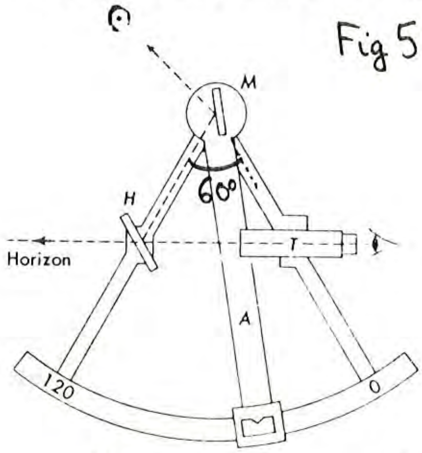
Les mesures effectuées à l'aide de cette croix pouvaient atteindre une précision voisine de la minute d'arc. Elles permirent ainsi de mettre en évidence l'effet de réfraction atmosphérique qu'il était désormais nécessaire de prendre en compte. La précision s'améliora lorsqu'on utilisa des miroirs pour amener en coïncidence l'image de l'astre et celle de l'horizon. Mais le véritable bond dans l'observation se fit avec l'invention du télescope. L'amélioration de la précision des mesures depuis a suivi le perfectionnement considérable de cet instrument.

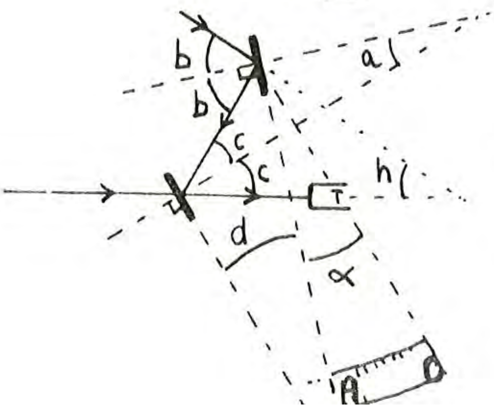
Fig 50



Le remplacement des pinnules par des lunettes a renforcé la précision des anciens instruments. L'adjonction de la lunette au système de miroirs a permis de fabriquer le sextant moderne (fig. 51) toujours utilisé par les marins pour faire le point.

Fig 51





$a = b - c$

$h = 2b - 2c$

$\Rightarrow h = 2a$

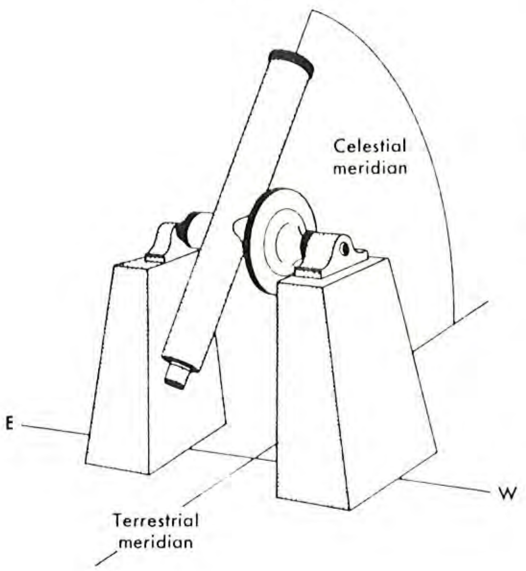
$a = d$

$\alpha = d$

$\Rightarrow \alpha = \frac{h}{2}$

Le souci de déterminer avec précision le temps local et les coordonnées universelles des étoiles a amené la construction d'un appareil spécifique : l'instrument de transit (fig. 52). Il est apparu à la fin du 17e siècle. C'est un petit télescope de 10 cm d'ouverture environ, qui ne peut être bougé que selon un axe de rotation Est-Ouest, supporté par 2 solides piliers. Le télescope est donc astreint à se mouvoir dans le plan méridien. Il mesure donc le temps sidéral local par le passage au méridien d'une étoile d'ascension droite connue de même qu'associé à un garde-temps précis il permet de mesurer les coordonnées universelles des astres. Un "micromètre" impersonnel permet de suivre le passage de l'étoile au méridien.

Fig 52

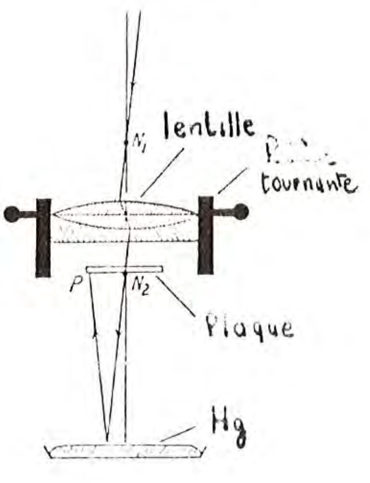


Pour améliorer la précision, on a utilisé, au début du 19e siècle de plus grosses lunettes jointes à un cercle gradué où les lectures sont faites à l'aide de microscopes. L'instrument a pris le nom de cercle transit ou cercle méridien. La finesse des observations nécessite un réglage constant de ce type d'appareil, une connaissance approfondie des erreurs systématiques et la mesure précise de la réfraction atmosphérique. Bien qu'encore utilisé, il a été remplacé par deux instruments plus fiables : le tube photographique zénithal et l'astrolabe impersonnel de Danjon.

<u>Le tube photographique zénithal</u> est utilisé pour observer les étoiles appartenant à un catalogue (le FK4) lorsqu'elles passent au zénith. Ce catalogue contient 1.535 étoiles, particulièrement bien étudiées, qui définissent pratiquement le système de coordonnées universelles. Leurs ascensions droites et déclinaisons apparentes varient sous l'effet de la précession, de la nutation et de l'aberration (l'effet parallactique est négligeable pour ces étoiles) mais leurs positions apparentes peuvent être calculées à l'avance et être publiées dans des tables. L'observation des temps de transit de ces étoiles peut fournir, après corrections adéquates, une mesure de l'erreur de l'horloge sidérale utilisée lors des transits. En revanche, si ce garde-temps est très précis et très stable, l'observation des temps de transit peut mettre en évidence les irrégularités de la rotation terrestre responsables de la non uniformité des échelles de temps astronomiques (de même que les variations de latitude du lieu dues au mouvement du pôle peuvent être mises en évidence par les écarts à la hauteur prévue)

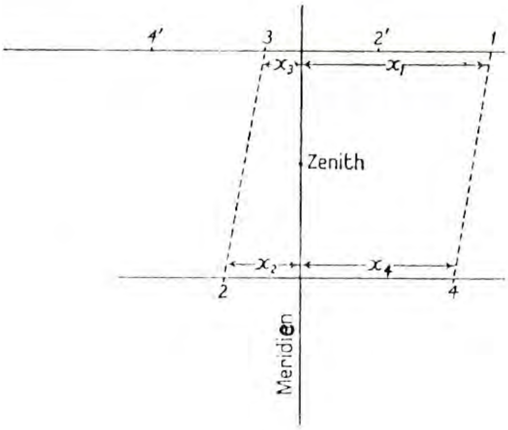
Le tube zénithal présente l'avantage de ne pas nécessiter autant de corrections que le cercle méridien. La réfraction et la flexion du tube, en particulier, ne jouent pas.

Fig 53



L'instrument contient une lentille objectif montée dans un plan horizontal au-dessus d'un bains de mercure réfléchissant. Seules les étoiles proches du zénith ($z \lesssim 15'$) sont observées, par passage des rayons à travers la lentille, reflexion sur la surface de mercure et convergence sur la surface d'une plaque photo horizontale placée sous la lentille.

L'optique est telle que l'un des points nodaux (N_2) de l'objectif se situe dans le plan focal image où se trouve la plaque photo. Les images stellaires ne sont donc pas affectées par des erreurs dues aux déplacements éventuels de la lentille. L'utilisation du bain de mercure incorpore automatiquement la direction de la verticale locale dans l'instrument. La plaque n'est pas fixe mais se déplace dans le sens Est-Ouest pour compenser la rotation terrestre de sorte que l'image stellaire reste ponctuelle.



4 photos sont prises à des temps t_1, t_2, t_3, t_4 équidistants , mais en t_2, t_3, t_4 l'ensemble tourne de 180°.
Sans ces rotations, les images seraient en 1, 2', 3 , 4'. Les images réelles se trouvent en 1, 2, 3, 4, 2 et 4 étant symétriques de 2' et 4' par rapport au point image (non connu) du zénith.
Si v est la vitesse de déplacement de l'image et t le temps de passage de l'étoile au méridien,

$$t_1 = t_m - x_1/v$$
$$t_4 = t_m + x_4/v$$

d'où : $t_m = \frac{1}{2}(t_1+t_4) - \frac{1}{2}(x_4-x_1)/v$

de même : $t_m = \frac{1}{2}(t_2+t_3) - \frac{1}{2}(x_2-x_3)/v$

On élimine v entre ces deux équations et on en déduit t_m.

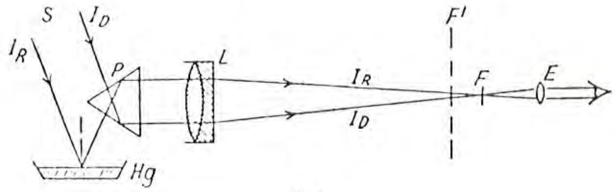
De même l'écart entre les lignes 1 — 3 et 2 — 4 donne la distance zénithale z de l'étoile.

Il y a une douzaine de tubes photographiques zénithaux dans le monde, de longueur focale 4m environ, capables de mesurer le temps avec une précision de l'ordre de la milliseconde et la latitude du lieu à 0,05" près.

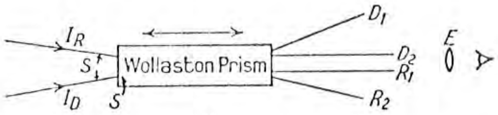
<u>L'astrolabe impersonnel</u> de Danjon résulte de l'amélioration par cet astronome de l'astrolabe prismatique, instrument connu depuis longtemps.

L'astrolabe prismatique reçoit 2 faisceaux parallèles de la même étoile. L'un d'eux (I_R) est réfléchi par un bain de mercure, passe dans un prisme de 60° où il subit une réflexion interne, entre dans le télescope horizontal qui en forme une image.

Fig 54



(a)



(b)

Le second faisceau (I_D) est réfléchi sur la face interne basse du prisme et passe dans le télescope qui en forme aussi une image. Si la hauteur de l'étoile est de 60°, les 2 images sont confondues. Danjon a montré que dans cette forme d'astrolabe, chaque faisceau arrive sur la moitié de la surface de l'objectif du télescope et ils convergent en étant inclinés l'un par rapport à l'autre. De sorte qu'une légère erreur dans la focalisation de l'oculaire change la séparation des images. Danjon a introduit entre l'objectif et le plan focal (F) un prisme de Wollaston, mobile, qui fournit 2 images de chaque faisceau. 2 des images sont occultées par un diaphragme, les 2 autres étant formées par des rayons parallèles (D_2, R_1). La séparation de ces images n'est pas affectée par des changements dans la focalisation et ne dépend que de la position du prisme. La position de ce prisme correspondant à la coïncidence des images d'une étoile de hauteur 60° est connue. Lorsque le temps passe, la hauteur de l'étoile varie et donc la séparation des images varie. Le prisme est déplacé de façon à compenser cette variation. L'opérateur peut maintenir les 2 images en coïncidence pendant une période de temps qui est enregistrée ce qui permet de mieux déterminer l'instant où la hauteur de l'étoile est 60°. (En ce sens l'astrolabe porte la qualification d'impersonnelle). L'astrolabe impersonnelle sert à mesurer le temps local et la latitude du lieu ainsi qu'à l'amélioration des coordonnées stellaires. Sa précision est semblable à celle du tube photographique zénithal. Son grand avantage est sa mobilité en azimut. On peut faire en peu de temps l'observation d'étoiles d'ascensions droites très différentes. Les instruments fixes dans le méridien ne peuvent le faire qu'avec des intervalles de temps très longs ce qui permet à des erreurs périodiques de se faire jour, entraînant des décalages systématiques entre régions du ciel.

II.3.- Les garde-temps :

Les instruments astronomiques captent à un instant donné la phase des horloges naturelles astronomiques. Elles fournissent une date dans les échelles de temps définies par ces horloges. Ces échelles présentent toutes les garanties au point de vue de la pérennité mais ne sont pas toujours accessibles car maint phénomène peut occulter les astres. Il faut donc conserver le temps déterminé par l'observation astronomique (il faut noter les promesses des réceptions radio qui ne sont pas affectées par les conditions météorologiques ; certains grands navires ont des "radio-sextants" qui permettent de repérer la position du Soleil à 1 minute d'arc près) d'où la nécessité de construire des horloges artificielles appelées officiellement garde-temps.

La première idée pour conserver le temps fut de matérialiser l'écoulement du temps par l'écoulement physique d'un fluide : l'eau dans le cas des clepsydres, le sable dans le cas des sabliers.

Les clepsydres sont probablement aussi anciennes que les cadrans solaires. La plus ancienne remonte à 1.400 av J.C. Les formes d'horloges à eau pouvaient être multiples (récipient gradué, boule creuse flottante qui seremplit d'eau et qui s'enfonce, flotteur qui monte avec le niveau d'eau et entraîne les aiguilles d'un cadran, etc...) Certaines pouvaient atteindre une grande complexité comme le cadeau de Haroun-al-Raschid à Charlemagne, véritable précurseur des pendules modernes avec aiguilles, sonneries et automates. Les clepsydres étaient naturellement associées avec des cadrans solaires ou des polos. A Rome, les polos permettaient de calibrer les clepsydres qui pouvaient alors les suppléer en l'absence du soleil et donner l'heure la nuit (le calibrage était alors fourni par les indications du polos pour la journée ayant la même durée que la nuit en question).

Le sablier est aussi très ancien. Le plus vieux remonte à 1.200 av. J.C. L'avantage du sablier, sur la clepsydre est quele sable ne gèle pas (s'il n'est pas imprégné d'humidité) Il est, de plus, facilement transportable et très maniable. Son rôle dans l'antiquité et au moyen-âge a été primordial. Les discours des orateurs, tribuns, avocats, les sermons des ecclésiastiques étaient réglés par l'écoulement du sable. Les quarts des navires, jusqu'à une époque très récente, également. (et les oeufs à la coque actuellement...).

Un autre type de garde-temps à écoulement est constitué par les chandelles, lampes, bougies, cierges qui servaient autrefois, principalement dans les monastères, à diviser le temps d'activité. Le combustible était calibré (graduations des bougies et des récipients) et la position de la flamme (ou son extinction) indiquait le temps écoulé. (Il fallait se méfier des courants d'air). Ces appareils rivalisaient dans le respect des horaires du culte avec les moines-horloges qui mesuraient le temps en récitant des prières et en chantant des psaumes. On en trouve une survivance dans les feux des enchères.

Les garde-temps à écoulement pouvaient être très précis pour les besoins de l'époque. La sujétion principale de ces appareils était due à leur durée limitée de fonctionnement. Il fallait périodiquement les remplir (ou les vider) ou les retourner, ou les remplacer (voir Astérix chez les Helvètes). Ces interruptions pouvaient entraîner des aléas sérieux dans la mesure continue du temps.

La volonté de s'affranchir de ce type de sujétion a conduit à utiliser très tôt des mouvements mécaniques dant le déroulement puisse se faire de façon indéfinie, avec un "remontage" de temps à autre qui ne rompe pas la régularité du mouvement. L'amélioration continue du dispositif mécanique de régulation a amené les horloges modernes qui peuvent fonctionner des jours, des mois ou des années sans qu'il soit nécessaire de remonter leur mouvement. Il fallait pour cela abandonner les étalons de durée et construire des étalons de fréquence ou oscillateurs. Il fallait ensuite transformer le mouvement oscillant en un mouvement uniforme pour raccorder entre eux les événement successifs de la chronologie. Ce fut le rôle des aiguilles se déplaçant devant le cadran remplacées actuellement par des appareils plus modernes d'indication et d'interpolation du temps.

Les premières horloges mécaniques utilisaient des systèmes frustes basés plus ou moins sur des oscillateurs de relaxation utilisant l'inertie pour créer une "constante de temps". L'exemple le plus ancien est celui de la clepsydre à bascule (fig. 55).

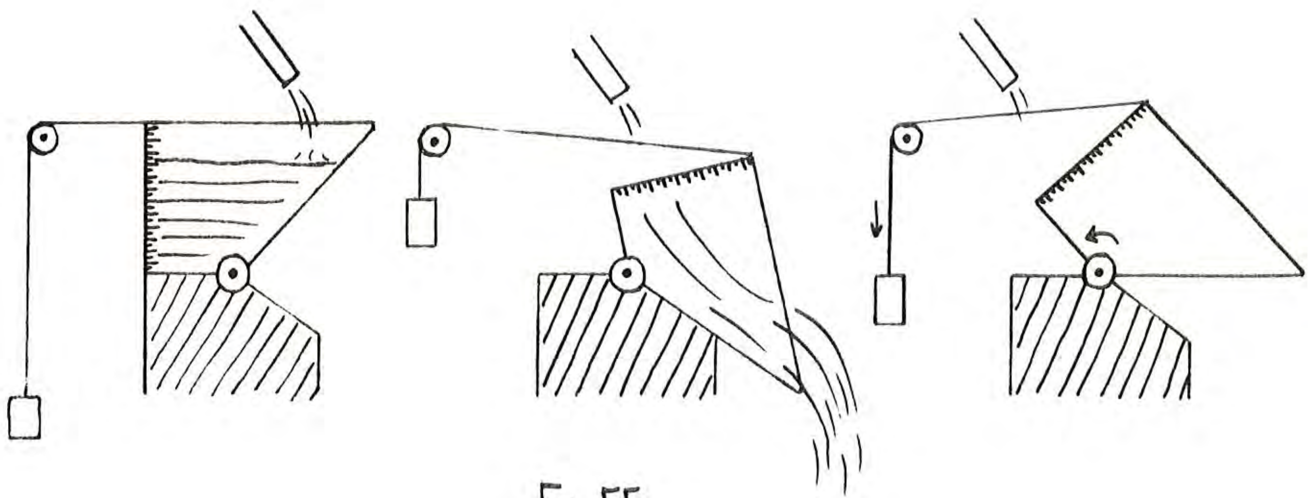


Fig 55

L'inventeur de la première horloge mécanique digne de ce nom, avec rouages et cloches, n'est pas connu. On nomme parfois Archimède (250 av. J.C.). Les oscillations des horloges mécaniques sont en général entretenues par "l'échappement à foliot" : un balancier horizontal chargé de masses à ses extrémités (pour régler la période) vient, en oscillant, régler par des butées la rotation d'une roue à dents sollicitée par le poids. Il n'y avait pas au début d'aiguilles ni de cadrans mais des cloches ou des carillons. Ces horloges étaient réservées aux personnages éminents comme celle du roi Charles V, construite en 1360, et qu'on peut encore voir. L'usage des horloges à foliot commença à se généraliser à la fin du 14e siècle. Elles étaient en fer, ouvertes sur trois côtés et n'avaient généralement qu'une aiguille. A la même époque apparut l'échappement à ressort. Le poids a l'avantage sur le ressort d'exercer une force constante. Le ressort a l'avantage d'être léger et peu encombrant. Les premiers ressorts étaient des enroulements faits de cuivre et d'acier. Ils avaient le fâcheux défaut d'exercer une tension de plus en plus faible à mesure qu'ils se déroulaient et les horloges prenaient un retard considérable. On essaya d'y remédier au moyen d'une "fusée", sorte de roue cônique évasée vers le bas. Le ressort se déroulait de haut en bas et l'enroulement de plus en plus large du ressort servait à compenser la diminution de sa tension.

Echappements à foliot et à ressort constituaient en fait des régulateurs grossiers pouvant occasionner des retards importants. L'horloge de Charles V pouvait retarder de 2 heures par jour. La constante de temps obtenue était trop sujette à des variations extérieures (pression, température) et comme dans tous les systèmes à relaxation, la période des oscillations était sensible à des paramètres secondaires tels que l'énergie appliquée (problème du ressort) ou l'amplitude des oscillations.

La précision et la stabilité ne se firent jour que lorsqu'on put disposer, grâce à l'échappement pendulaire, d'un régulateur à mouvement sinusoïdal, à force de rappel constante. Il était possible de mesurer des durées pour le comptage d'oscillations égales d'un pendule et Galilée avait découvert le premier l'isochronisme des pendules de même longueur (pour de petites oscillations, la période est indépendante de l'amplitude) et le premier, il avait essayé de combiner pendule et horloge. La mesure précise du temps était alors devenue un problème crucial. Le monde était alors en pleine expansion maritime et donc économique. Mais les premiers explorateurs ne s'éloignaient guère des côtes et malgré l'utilisation du compas magnétique ils ne pouvaient donner qu'une estimation grossière de la position de leur navire: Colomb croyait avoir atteint les Indes. La sécurite des routes maritimes et la connaissance des terres abordées exigeaient que les marins puissent connaître leur position avec une précision minimale. La latitude était aisément accessible mais la longitude posait un tel problème que les gouvernements furent amenés à proposer des prix et finalement à créer des observatoires d'Etat. Le problème pouvait en effet être abordé par l'observation astronomique. Il faut disposer d'un phénomène rapidement évolutif (pour que la précision soit suffisante) dont l'étude permet de déterminer à quelle heure locale d'un lieu standard (Paris puis Greenwich) une phase précise du phénomène se produit. L'observateur de cette phase en un lieu quelconque permet donc de connaître le temps du méridien origine. Le temps local de cet endroit étant aisément déterminé par la hauteur des astres sur l'horizon, la longitude est obtenue par simple différence. Galilée avait proposé d'utiliser les éclipses des satellites de Jupiter visibles sur toute la Terre au même instant mais les tables de leurs mouvements étaient trop imparfaites. Beaucoup plus prometteuse était l'observation du mouvement de la Lune, qui chaque jour progresse de 13,2° ($\simeq \frac{360°}{27}$) sur son orbite. Une erreur d'une minute par exemple dans la longitude de la Lune correspond à une erreur de $\frac{1}{13,2 \times 60} \times 24 (h)$ dans la détermination du temps local soit $\simeq$ 27 minutes dans la longitude locale. Mais au XVIIe les marins étaient satisfaits de pouvoir connaître leur position à un ou deux degrés près. Pour accroître la précision, il fallait avoir une connaissance aussi approfondie que possible du mouvement de la Lune. Cette nécessité a contribué de façon importante à l'éclosion de la mécanique céleste et des théories du mouvement de la Lune (plus de 2000 termes de perturbation interviennent dans les éphémérides lunaires). Le problème est venu buter de façon insoluble sur les irrégularités de la rotation terrestre mises en évidence à la fin du siècle dernier. Le mouvement de la Lune ne pouvait plus servir à la détermination très précise de la longitude mais en fait à étudier les variations de la rotation terrestre. La solution a été trouvée de façon différente grâce à l'invention de la télégraphie sans fil. Désormais le temps de Greenwich est transmis à toutes les parties du monde par ondes radio.

Si on en revient aux garde-temps, il est clair que leur rôle de substitut des observations astronomiques pouvait également servir à la mesure de la longitude. Il suffisait d'emporter avec soi le temps de Greenwich grâce à une horloge suffisamment stable et de comparer ses indications avec le temps local. D'où l'intérêt des Etats du XVIIe siècle porté à la conception des garde-temps et les recherches, demeurées infructueuses, de Galilée. La solution fut apportée par Huygens, en 1656, avec l'échappement pendulaire. Le pendule en oscillant règle la rotation des roues dentées qui, en retour, lui fournissent une impulsion qui entretient ses propres oscillations, les rouages transmettant ainsi au pendule l'énergie accumulée dans les poids. On tenait là, enfin, un instrument suffisamment précis qui puisse servir par exemple à mesurer les ascensions droites par différence de leurs tem ps de passage au méridien avec le temps de passage d'une étoile d'ascension droite connue. Ce n'était plus un luxe d'ajouter une aiguille pour les minutes. Quant à la longitude, il était exclu d'emporter une horloge à pendule à bord de navires soumis au tangage et au roulis. C'est encore Huygens qui résolut le problème en inventant le balancier spiral permettant de construire les premiers "chronomètres portatifs". A partir de cette époque les grandes lignes des garde-temps étaient fixées telles qu'elles sont encore en usage actuellement dans les pendules ou les montres.

Au XVIIIe siècle, l'horlogerie connut un développement considérable formant en son sein des artisans ingénieux et habiles dont les inventions, comme les machines à tisser, jetèrent les bases techniques de la révolution industrielle. L'usage des horloges, le port des montres se popularisèrent rapidement. Les poids furent dissimulés dans des boîtes et l'on obtint les premières "horloges de grand-père". On chercha à miniaturiser le plus possible les horloges afin d'en faire des montres, aisément transportables, dont les premiers spécimens remontent au XVIe siècle. L'ornementation des horloges devint un art à part entière en même temps que, comme toute technique qui recule ses limites, l'horlogerie se mit à fabriquer des "gadgets" : coucous, alarmes, réveils, phases de la lune, positions des planètes, etc... Mais le plus remarquable dans l'évolution de l'horlogerie est sans doute le soin, voire l'acharnement, mis par les artisans à augmenter la précision de leurs instruments en réduisant les différentes causes de fluctuation dans la marche des mécanismes.

En 1701, sous la recommandation de Newton, le Gouvernement Anglais offrit un prix de 30.000£ à celui qui réaliserait un instrument d'une précision d'une minute par jour, c'est-à-dire permettant de déterminer la longitude à moins d'un quart de degré. Une cause importante d'erreur était due à la température responsable de la dilatation ou de la contraction des parties métalliques des balancier spirale et pendulaire. Graham, apprenti de Tompion "le père de l'horlogerie anglaise", proposa de remplacer la lentille du pendule par un récipient rempli de mercure. Mais c'est Harrison qui remporta le prix en construisant des balanciers à partir de métaux ayant des coefficients d'expansion différents. Les chronomètres ne variaient pas de plus de quelques minutes sur plusieurs mois comme put le constater le capitaine Cook. Le français Pierre Le Roy eut l'idée de monter les chronomètres sur cardans, éliminant ainsi totalement les effets des mouvements du navire. Pour les sédentaires, les effets thermiques pouvaient être supprimés en plaçant les horloges dans des lieux thermostatés comme la Galerie des Catacombes, située à 20m en-dessous de l'Observatoire de Paris, qui est munie de dispositifs de régulation thermique.

Outre la compensation des effets thermiques, les efforts ont porté sur l'isochronisme des oscillations, la régularité des échappements, la commodité du remontage, la réduction progressive des frottements par l'emploi des pierres, l'amélioration du graissage, la mise sous pression réduite et constante pour éliminer les effets variables de la viscosité de l'air, l'élimination des effets du champ mangétique terrestre, etc... On a buté en fin de compte sur des obstacles pratiquement insurmontables comme les frottements ultimes des échappements ou des contacts électriques, les usures par vieillissement, les variations de la pesanteur. Les horloges astronomiques modernes sont donc finalement placées dans des endroits à température soigneusement maintenue, dans des cloches hermétiques isobares. Le balancier comporte en général une tige d'invar pratiquement insensible aux dilatations thermiques, avec une lourde lentille de bronze. La suspension par lame flexible assure un minimum de frottements à l'oscillation et le balancier n'est amorti par aucun organe inutile tels que les roues à rochet ou les aiguilles. Il ne porte que l'échappement et un contact électrique. L'échappement comporte une petite roue dentée dont l'énergie motrice est fournie pas un poids, le poids étant remonté électriquement toutes les 30 secondes par un électro-aimant alimenté par une pile. Il existe une très légère influence des irrégularités de la taille des dents. Les secondes successives n'ont pas tout à fait la même longueur mais les irrégularités se reproduisent périodiquement, en fonction du nombre de dents du rouage. Le contact électrique est un contact à la seconde qui sert à la mesure du temps. Le mouvement du balancier peut commander une minuterie d'aiguilles, les risques d'erreurs étant alors augmentés et la précision de lecture réduite. Il est préférable d'avoir seulement un système d'enregistrement des impulsions fournies par les contacts à la seconde.

De telles horloges fonctionnent sans entretien particulier pendant plusieurs années. Il faut ensuite ouvrir les cloches hermétiques pour changer les huiles qui s'épaississent. Une telle opération arrête l'horloge et perturbe sa marche (quantité dont avance ou retarde un garde-temps en 24h).

On est allé encore plus loin dans le raffinement en remplaçant l'échappement mécanique par des dispositifs d'entretien électriques ou électroniques. L'horloge de Shortt comporte 2 pendules, le "maître" et "l'esclave", situés dans une enceinte thermostatée à vide modéré. Les indications de temps (aiguilles ou enregistrement des battements) sont donnés par l'esclave qui bat très légèrement moins vite que le maître. Les 2 pendules battent indépendamment sauf que, toutes les 30 secondes, une impulsion vient du maître, grâce au contact qu'il porte, qui opère un mécanisme forçant l'esclave à revenir en phase avec lui. Au même moment, une impulsion venant de l'esclave opère un remontoir qui donne une légère impulsion au maître pour lui faire regagner l'énergie qu'il a perdue dans les 30 secondes précédentes. Dans le pendule électrique de Schuler, il n'y a même plus de contact électrique.

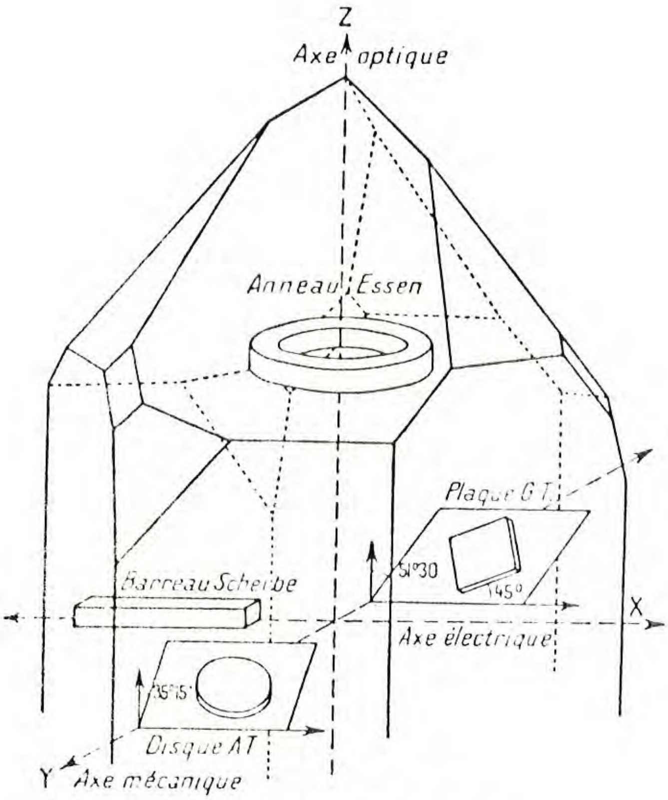
C'est un rayon lumineux intercepté par le balancier, qui agit sur une cellule photoélectrique dont le courant, amplifié, vient fournir une impulsion dans une bobine liée au balancier et donne un signal de temps. Les chronomètres modernes n'ont également plus d'échappement moteur. Dans le chronomètre de marine Le Roy, le balancier entretient lui-même son mouvement par le déplacement d'un aimant dans une bobine dont le courant est commandé par un transistor excité lui-même par une deuxième bobine. Ce système a été étendu aux montres-bracelets elles-mêmes, où tous les organes, balanciers, bobines, piles, sont réduits à des dimensions microscopiques.

L'absence de contacts supprime l'usure et le frottement et permet d'atteindre des précisions remarquables. Le pendule de Shortt a une précision de 10^{-3}s par jour (ou une marche de 10^{-3}s) soit un écart en fréquence de $10^{-3}/86400 \simeq 10^{-8}$ La variation progressive de marche (due au vieillissement) peut descendre en-dessous de 10^{-3}s/jour par mois, soit une dérive mensuelle en fréquence de 10^{-8}. Les irrégularités des secondes successives atteignent parfois quelques 10^{-3}s. La précision atteinte est suffisante pour mettre en évidence les principales irrégularités de la rotation terrestre. Mais une difficulté insoluble s'oppose aux horloges à balancier : la variation de la pesanteur, force de rappel de ce balancier. La marée de l'écorce terreste, due à l'attraction luni-solaire, peut être décelée à partir des variations de période du pendule. Les phénomènes géologiques en affectent également les battements. On dispose donc, dans les observatoires les garde-temps selon des orientations différentes, pour que les séismes produisent des effets différents. L'enregistrement électronique des contacts des pendules met en évidence l'action des séismes avec assez de précisions pour que les caractéristiques de la secousse puissent être reconstituées. C'est pourquoi, depuis une cinquantaine d'années les recherches se sont aiguillées vers des garde-temps n'utilisant plus de balancier.

On a d'abord utilisé les vibrations des diapasons dont la fréquence de vibration avoisine 1.000 Hz puis les cristaux de quartz qui sont piézo-électriques (ils vibrent si on les soumet à une tension électrique) et dont la fréquence est un avantage sur les horloges à balancier ; de petites irrégularités d'une oscillation à l'autre disparaissent complètement en moyenne ; les variations accidentelles de la pesanteur restent pratiquement sans effet car elles sont trop lentes pour perturber les oscillations ; le coefficient d'amortissement est extrêmement faible. Un excellent pendule oscillant librement perd en une journée la moitié de son amplitude par dissipation d'énergie. Par comparaison, un quartz (s'il avait la même fréquence) mettrait 1 mois, soit en fait quelques secondes compte tenu de sa fréquence réelle. L'entretien des oscillations est obtenu par un amplificateur électronique qui est un oscillateur (dont la fréquence est adaptée à celle du quartz) et qui fournit un courant alternatif de même fréquence. La valeur élevée de la fréquence permet d'appliquer à ce courant la méthode d'interférence et d'arithmétique des fréquences (addition, soustraction, multiplication et démultiplication...) mises au point pour leur mesure et rend ainsi possible des procédés de comparaison entre garde-temps entièrement souples et précis.

Dans la pratique, pour fabriquer une horloge à quartz, il faut tailler une lame dans un cristal de quartz. La façon dont la lame est taillée n'est pas du tout indifférente.

Fig 56



Tailles de quartz piézo-électriques.

La forme (disque, plan, anneau, barreau, ...), l'orientation, la disposition des électrodes (obtenues par dépôt de métal) sur la lame déterminent ses caractéristiques : fréquence, amortissement, coefficient de variation avec la température, constance dans le temps... On taille actuellement des disques minces dits A.T. (figure 56) qui donnent des fréquences de 1 à 5 MHz. Pour annuler les variations dues à la température, l'humidité, le frottement de l'air, le disque de métal est placé dans une ampoule vidée, placée elle-même dans une enceinte thermostatique (en général un vase Dewar, assurant une température de l'ordre de 70° C et calorifugé de telle sorte que la température ne fluctue pas de plus de 10^{-4} °C). On utilise également des températures très froides, destinées à ralentir les différents processus physiques (évaporation, agitation thermique) expliquant le vieillissement du cristal. Les amplificateurs d'entretien des oscillations (actuellement à transistors) doivent être rendus aussi insensibles que possibles aux causes de variations extérieures. L'amplitude doit rester très faible pour éviter les défauts d'isochronisme analogues aux horloges à échappement mécanique ; la phase du courant produit par l'amplificateur doit être précisément choisie et stabilisée. Les circuits doivent être peu sensibles aux variations de la tension d'alimentation (montage en contre réaction) qui est en outre stabilisée à moins de 1% près. Cristal et amplificateur constituent un oscillateur ne subissant pas d'écarts de fréquence de plus de 10^{-10}. Une partie du courant haute fréquence, aussi faible et stable que possible peut être prélevée à cet oscillateur pour ramener la haute fréquence à des valeurs utilisables pour les mesures du temps, 1.000 Hz par exemple. Le courant à 1.600 Hz permet le fonctionnement d'un moteur synchrone entraînant une minuterie d'aiguilles.

On utilise plutôt, actuellement, des diviseurs électroniques à impulsions, infiniment plus précis que les systèmes d'aiguilles. Ces diviseurs comptent le nombre d'impulsions, chaque étage de comptage avançant d'une unité lorsque le précédent a reçu un nombre déterminé d'impulsions. On peut alors par des dispositifs électroniques appropriés obtenir des impulsions très brèves et régulières, à la seconde par exemple, déterminées à une fraction de millième de seconde. Ces mêmes dispositifs permettent de numéroter les impulsions de seconde ainsi réalisées et d'afficher l'heure. L'ensemble cristal, amplificateur, diviseur électronique constitue alors une horloge.

Les secondes successives obtenues avec les meilleures horloges à quartz diffèrent d'environ 10^{-6}s. Le vieillissement du cristal se traduit par une dérive. La variation progressive de marche (mesurée par rapport à une horloge atomique étalon) peut atteindre 0,1 ms (soit 10^{-9} en fréquence) au bout d'un mois. Les fluctuations d'un jour à l'autre sont d'environ 0,01s (soit 10^{-10} en fréquence). Grâce aux horloges à quartz, Stoyko a pu mettre en évidence les irrégularités saisonnières de la rotation terrestre.

Par définition, un garde-temps ne soit pas s'interrompre sous peine de le perdre. Celà explique que des précautions doivent être prises pour remédier à toute interruption de l'alimentation (panne, grève, etc...) d'autant plus que, par l'effet de dérive, la fréquence après l'interruption diffère légèrement de la fréquence avant. La dérive, si faible soit-elle, nécessite pour la détermination momentanée de l'heure une interpolation de la marche des horloges à quartz. Une telle sujétion est devenue inacceptable au vu des exigences de plus en plus sévères des astronomes et physiciens. On s'est donc tourné vers des phénomènes physiques oscillatoires considérés comme invariants : les transitions atomiques, bases des garde-temps atomiques. Mais les horloges à quartz ne sont pas pour autant tombées en désuétude car l'emploi des garde-temps atomiques ne peut se concevoir sans l'adjonction d'un oscillateur à quartz de la plus haute qualité possible.

Les générateurs atomiques de fréquence (garde-temps ou étalons de fréquence) utilisent les résonances internes, d'origine quantique, de la matière. Toute transition d'un état d'énergie E_1 à un état d'énergie E_2 s'accompagne de l'émission (ou de l'absorption) d'un rayonnement de fréquence $\nu = \frac{|E_2 - E_1|}{h}$. On obtient une raie spectrale dont la fréquence est caractéristique du corps et des niveaux considérés. Cette raie a une largeur naturelle (qui dépend du temps passé par le corps dans les niveaux d'énergie) qui peut être affectée par la température (élargissement thermique), le mouvement du corps (effet Doppler), les champs électriques (effet Stark), magnétiques (effet Zeeman), etc...

Dans les conditions normales d'équilibre thermique les populations des niveaux sont comparables. L'absorption et l'émission ont des probabilités égales et on n'observe rien. Il faut modifier les populations pour mettre en évidence la raie spectrale. La première méthode utilisée a été l'absorption moléculaire (raie de NH_3 à 1,25cm correspondant à l'inversion du tétraèdre). On utilise actuellement les transitions de structure hyperfine qui se fait

- par <u>jet atomique</u> (1940, Rabi) : on utilise des alcalins (1 électron de valence) qui ont des niveaux d'énergie très voisins correspondant aux moment magnétique du noyau et de l'électron de valence parallèles et antiparallèles. Le moment magnétique global diffère donc selon le niveau d'énergie. Un champ magnétique très inhomogène exerce des forces très différentes sur les atomes de chaque niveau ce qui permet de les sélectionner. Le principe de sélection est le même dans les jets moléculaires (moment dipolaire de NH_3)

- par <u>pompage optique</u> (1949, Kastler) : on peut peupler ou dépeupler un niveau hyperfin au profit d'un autre en éclairant les atomes avec une lumière de fréquence et de polarisation appropriées, qui les fait passer par un niveau intermédiaire excité.

La transition atomique s'effectue au sein d'un guide d'onde (ou cavité résonante) réglé sur la fréquence de transition (d'où la valeur centimétrique des transitions choisies qui en permet la construction). La cavité est excitée par un courant haute fréquence qui y crée un champ électromagnétique stationnaire. Les transitions atomiques sont maximales lorsque le courant haute fréquence est exactement accordé sur la fréquence de transition. On a alors des variations énergétiques (en émission ou en absorption) qui sont maximales et permettent la détection de la résonance. La fréquence du générateur haute fréquence excitant la cavité est égale à la fréquence de transition, à la précision de l'appareil près. Cet appareil s'appelle un résonateur. Le résonateur est un étalon de fréquence, qui fournit une une fréquence fixe, prédéterminée par le calcul et par construction et qui peut servir de base à la définition d'une échelle de temps. Le résonateur n'est pas lui-même un garde-temps. Le générateur haute fréquence constitue un oscillateur auxiliaire de mesure dont on peut comparer la fréquence à celle d'un garde-temps quelconque assurant la continuité de la conservation du temps entre les comparaisons successives. Le résonateur étalon peut alors servir à mettre en évidence la dérive des garde - temps.

Pour avoir un garde-temps atomique, il faut fabriquer un oscillateur asservi. On dispose toujours du résonateur mais on utilise le courant qui en sort pour asservir le générateur haute fréquence (en l'occurence un oscillateur à quartz), grâce à ce "servo-mécanisme". La fréquence de l'oscillateur à quartz reste bloquée sur celle de la transition atomique, d'où la nécessité d'avoir des horloges à quartz de la meilleure qualité.

Si on a choisi d'envoyer dans le résonateur les atomes ou molécules correspondant au niveau d'énergie supérieur de la transition, il y a cession d'énergie au sein de la cavité et dans certaines conditions le phénomène de résonance peut s'entretenir et fournir directement un courant à fréquence très élevée, que l'on peut ensuite utiliser dans les mesures. On n'a plus un résonateur passif mais un générateur. C'est le cas des masers (Microwave Amplification by Stimulated Energy of Radiation). Dans le maser à NH_3, les molécules sont triées par une lentille électrostatique et dirigées vers la cavité résonante. Lorsque la fréquence de l'oscillateur à quartz est accordée sur la transition atomique, les molécules cèdent de l'énergie ce qui crée une amplification, la puissance de sortie du résonateur devenant supérieure à la puissance d'entrée. Au-delà d'une valeur critique du nombre de molécules actives entrant dans la cavité les oscillations peuvent s'entretenir par l'absence même de courant extérieur.

Les masers peuvent servir d'étalon de fréquence. Maser et oscillateur asservis peuvent constituer des garde-temps s'ils sont susceptibles de fonctionner sans arrêt assez longtemps. Cela pose en pratique des problèmes difficiles à cause de la complexité et de la fragilité de l'appareillage nécessaire (électronique, maintien du vide, thermostats, etc...) et par l'épuisement des corps employés, les réactions physico-chimiques avec les parois de la cavité, etc... Les garde-temps atomiques connaissent des problèmes de vieillissement, comme les autres.

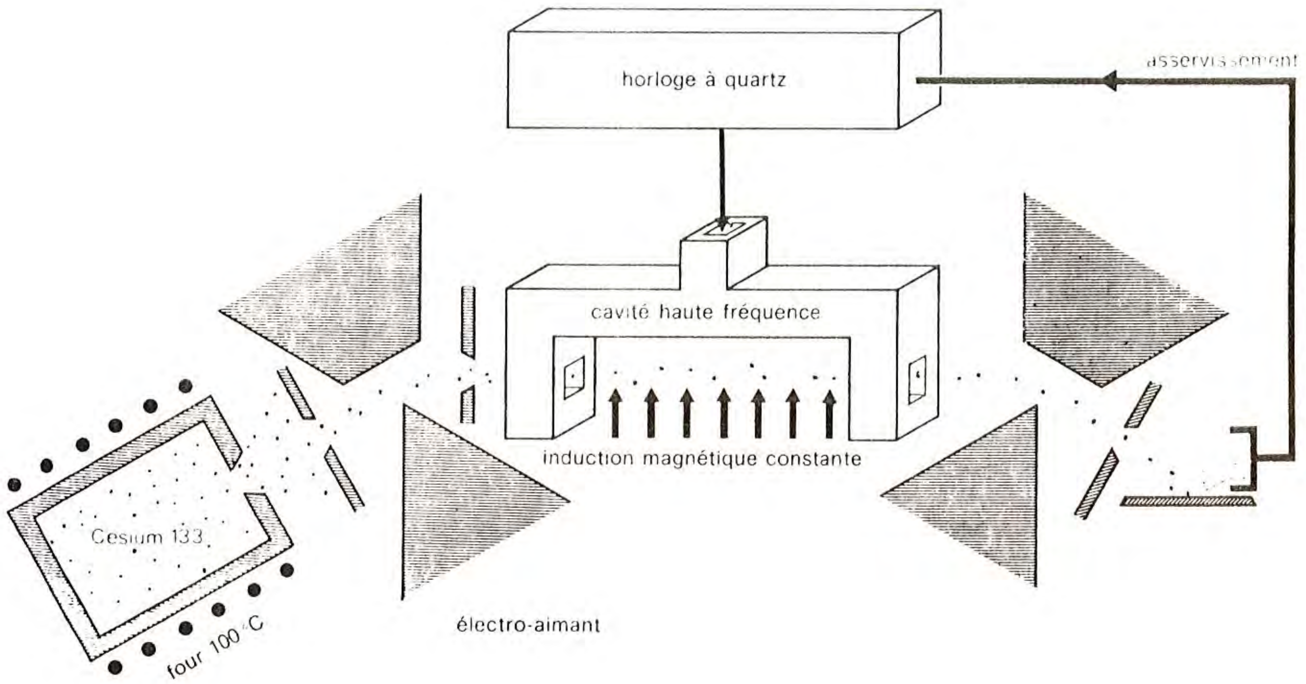
La raie 1,25 cm de NH_3 a été mise en évidence par Cleeton et Williams en 1934. En 1948, Lyons réalisait au Bureau of Standards (Colorado) le premier étalon de fréquence utilisant l'absorption de cette raie. L'élargissement de la raie sous diverses influences dont la principale était l'éffet Doppler, limitait la précision et a fait abandonner la méthode d'absorption. Townes, en 1952, a fait fonctionner le premier maser à ammoniac et en 1960, Ramsey à mis au point le premier maser à hydrogène atomique reposant sur la raie à 21 cm, qui exige donc de très grandes cavités résonnantes.

Lyons mit au point, en 1952, le premier résonateur à césium qui utilise la méthode du jet atomique. La forme définitive de ce résonateur a été conçue en 1955 au National Physical Laboratory par Essen. Les résonateurs à jet atomique utilisent également le thallium (1962) et le rubidium.

Le rubidium est aussi employé dans les méthodes de pompage optique depuis 1958, ainsi que dans des masers (1966).

La figure 57 décrit une horloge atomique à Césium 133.

Fig 57



Le césium présente un intérêt particulier à cause de la définition actuelle de la seconde. En vertu de la décision de la 13e Conférence Générale des Poids et Mesures, la seconde est la durée de 9.192.631.770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre les 2 niveaux hyperfins (F = 4, m = 0) et (F = 3, m = 0) de l'état fondamental de l'atome de césium 133. Cela équivaut à dire que la fréquence de cette transition est de 9.192.631.770 Hz.

Un four à la température de 100°C émet un jet d'atomes de césium dans une chambre où l'on a fait un vide poussé. Ce jet est diaphragmé et passe dans l'entrefer d'un aimant créant un champ très inhomogène. Les atomes ont alors des trajectoires différentes et un second diaphragme permet de sélectionner les atomes d'un état particulier (F = 3 par exemple). L'ensemble aimant-diaphragmes constitue un "spectomètre magnétique". Les atomes de césium passent alors dans un résonateur en U où règne un champ d'induction homogène et faible. L'énergie des atomes est en effet perturbée dans le champ magnétique terrestre par effet Zeeman. On préfère donc avoir un champ connu, faible mais suffisant pour quantifier la direction des moments atomiques et séparer les différentes composantes Zeeman (il y a $2 \times 3 + 1 = 7$ composantes pour le niveau F = 3, correspondant à m = 3, 2, 1, 0, -1, -2, -3) de façon suffisante pour qu'on puisse aisément les distinguer de la transition de référence (F = 3, m = 0) $\longleftrightarrow$ (F = 4, m = 0). La résonance n'est donc observée que sur les atomes de nombre quantique magnétique nul (leur moment est perpendiculaire aux lignes de champ). L'énergie de ces atomes ne varie qu'au second ordre avec l'induction magnétique. La correction est faible et aisément calculable. Pour éviter les champs magnétiques on effectue un blindage du résonateur. A la sortie du résonateur on dispose également d'un spectromètre magnétique qui fait converger sur un détecteur les atomes d'un état donné (F = 3 par exemple). Ce détecteur est une grille chaude de tungstène qui ionise les atomes, lesquels sont attirés vers une plaque négative et créent un courant qui peut être amplifié. On fait varier la fréquence de l'horloge à quartz qui excite la cavité haute fréquence. Lorsqu'elle est égale à la fréquence de la transition, les atomes passent de l'état F = 3 à F = 4 et le courant détecté passe par un minimum. L'obtention de ce minimum se produit donc à la résonnance et la fréquence de l'horloge à quartz est alors la fréquence étalon. On dispose de l'étalon de fréquence à césium. Si on veut un garde-temps, il faut asservir l'horloge à quartz sur le courant fourni par le détecteur de façon à bloquer sa fréquence sur celle de la transition atomique.

Pour avoir une raie aussi fine que possible, on limite l'élargissement thermique grâce à la vitesse thermique relativement faible des atomes de césium (200m/s à 100°C) A 100°C, la pression de vapeur de césium est suffisante pour que le jet ait une bonne intensité. L'orientation du champ à haute fréquence est perpendiculaire au déplacement des atomes ce qui élimine l'effet Doppler. Les défauts de stationnarité de l'onde de radiofréquence sont décelés et corrigés sur les horloges étalon en inversant le sens du jet atomique. Finalement la largeur de la résonance est essentiellement déterminée par la durée limitée pendant laquelle un atome interagit avec l'onde résonnante. On a donc une horloge d'autant plus précise que la longueur du jet soumise à l'onde de radiofréquence est grande. On atteint actuellement plusieurs mètres ce qui pose de difficiles problèmes de réalisations mécaniques et d'homogénéité des champs. Dans le cas de l'horloge à césium la largeur de la résonnance est ainsi réduite à 100 Hz et la qualité du signal du détecteur permet à l'horloge à quartz de ne pas s'éloigner du centre de la résonance de plus de un cent millième de cette largeur, soit un millième de Hertz.

L'exactitude, c'est-à-dire l'écart relatif entre la fréquence de l'étalon atomique à césium et la fréquence étalon est donc de 10^{-13}. La seconde est de loin l'unité du système international la mieux définie. La stabilité, c'est-à-dire la variation de la fréquence des horloges atomiques en fonction du temps dépend, comme les autres garde-temps, de l'intervalle de temps considéré. A très court terme, c'est-à-dire d'une oscillation à une autre, l'écart relatif de fréquence est de 10^{-9}, en raison des phénomènes statistiques et du bruit des circuits électroniques annexes. Au bout d'une seconde elle est de 10^{-12}. Elle baisse à cause de la diminution de l'importance relative du bruit et est la meilleure pour des temps de l'ordre de quelques dizaines de minutes. (elle vaut alors 10^{-13}). Pour des durées plus longues, elle est de quelques 10^{-13} : les horloges atomiques actuelles gardent mieux que le dix-millionième (10^{-7}s) par jour (soit une seconde en 30.000 ans). A long terme elles connaissent une dérive très faible, du même ordre de grandeur.

III.- LES DIFFERENTS TEMPS

III.1. Le temps sidéral :

Par définition le temps sidéral T_s en un lieu donné à un instant donné est l'angle horaire du point vernal γ . Le point vernal est le noeud ascendant de l'écliptique et de l'équateur céleste. L'écliptique et l'équateur sont animés d'un mouvement de grande période auquel se superposent des oscillations rapides de faible amplitude (la nutation se superpose à la précession dans le cas de l'équateur céleste). On parle de point vernal vrai lorsque l'on considère l'intersection de l'écliptique moyen (écliptique réel corrigé des oscillations rapides) avec l'équateur réel. Le temps sidéral correspondant est le temps sidéral apparent. Le point vernal moyen est l'intersection de l'écliptique moyen avec l'équateur moyen (équateur réel corrigé de la nutation). On a alors le temps sidéral moyen. L'écart entre le temps sidéral apparent et le temps sidéral moyen dû à la nutation est "l'équation des équinoxes" dont la valeur à l'instant et la date choisis est fournie par les tables.

Les coordonnées célestes sont dites apparentes si elles sont définies d'après l'équateur et le point vernal vrais, moyennes s'il s'agit de l'équateur et du point vernal moyens. En pratique, l'équation des équinoxes est faible et on ne fera pas la différence ici entre ce qui est apparent (ou vrai) et ce qui est moyen. Mais dans les pointages de précision et les études astrométriques il faut en tenir compte.

Le temps sidéral varie avec la rotation diurne de même qu'il varie avec le lieu à un instant considéré. La valeur locale dépend de la longitude du lieu. Si l'on parle du temps sidéral sans autre précision, il s'agit du temps sidéral de Greenwich (T_{sG}).

Montrer que, pour un lieu de longitude L, on a

$$\boxed{T_s + L = T_{sG}}$$

(L $>$ 0 si longitude Ouest, L $<$ 0 si longitude Est)

On sait que $T_s = H + \alpha$ On peut donc également définir le temps sidéral comme l'ascension droite d'une étoile passant au méridien à l'instant considéré (H = 0) ce qui fournit un moyen de mesure du temps sidéral local. Il est en effet exclu d'observer le point vernal qui n'est qu'un point fictif. Il faut donc disposer d'un ensemble d'étoiles dont les coordonnées célestes sont calculées de façon précise dans les tables après correction des aberration, précession, nutation. Les étoiles sont celles du catalogue FK4 dont les valeurs sont internationalement acceptées. La précision de mesure du temps sidéral est celle des meilleurs instruments astrométriques, tube photographique zénithal et astrolabe impersonnel : environ une milliseconde.

Les variations de la rotation terrestre affectent de la même façon le jour sidéral et le jour solaire. La conversion entre jour sidéral (moyen) et jour solaire (moyen) qu'on a déjà vue est valable en permanence.

TABLE I

temps sidéral	temps moyen	temps moyen	temps sidéral
1j	23h 56mn 4,09054s	1j	24h 03mn 56,55536s
1h	0h 59mn 50,17s	1h	1h 0mn 9,86s
1mn	0mn 59,84s	1mn	1mn 0,16s
1s	0,99727s	1s	1,00274s

Le point γ est confondu avec le Soleil lors de l'équinoxe de printemps et, avec l'aide de la table I, il est possible de calculer le temps sidéral en tout lieu à la date et à l'instant choisis. Il est très commode d'utiliser des horloges sidérales qui donnent l'heure sidérale en permanence, mais on peut utiliser également la table II qui donne, le long de l'année, le temps sidéral de Greenwich à minuit (0h T.U.), $T^{o}_{s\,G}$, pour l'année 1978. Cette table est valable pour toute année = année bissextile + 2. Pour l'année = bissextile + 1, il faut ajouter $\sim$ 1mn à la table II et en retrancher 1mn pour l'année = année bissextile + 3. Pour l'année bissextile, on retranche 2mn jusqu'au 28 février inclus, puis on ajoute 2mn aux chiffres de la table II.

La table II ne donne le temps sidéral, $T^{o}_{s\,G}$, que tous les 4 jours. Pour les autres, on ajoute $\sim$ 3,9 mn par jour. Au sein de chaque jour, on peut compter 0,5mn toutes les 3 heures. On peut utiliser la table I pour plus de précision. On peut donc désormais calculer, à une date donnée, le temps sidéral local correspondant à une heure (solaire) donnée ou inversement calculer l'heure correspondant à un temps local donné.

TABLE II

Temps Sidéral de Greenwich à 0h T.U.

Date	h	m	Date	h	m	Date	h	m	Date	h	m
Jan 1	6	40,9	Avr 3	12	43,6	Juill 4	18	46,4	Oct 4	0	49,1
5	6	56,7	7	12	59,4	8	19	02,1	8	1	04,9
9	7	12,5	11	13	15,2	12	19	17,9	12	1	20,6
13	7	28,2	15	13	31,0	16	19	33,7	16	1	36,4
17	7	44,0	19	13	46,7	20	19	49,4	20	1	52,2
21	7	59,8	23	14	02,5	24	20	05,2	24	2	07,9
25	8	15,5	27	14	18,3	28	20	21,0	28	2	23,7
29	8	31,3									
Fev 2	8	47,1	Mai 1	14	34,0	Aout 1	20	36,8	Nov 1	2	39,5
6	9	02,9	5	14	49,8	5	20	52,5	5	2	55,2
10	9	18,6	9	15	05,6	9	21	08,3	9	3	11,0
14	9	34,4	13	15	21,3	13	21	24,1	13	3	26,8
18	9	50,2	17	15	37,1	17	21	39,8	17	3	42,6
22	10	05,9	21	15	52,9	21	21	55,6	21	3	58,3
26	10	21,7	25	16	08,7	25	22	11,4	25	4	14,1
			29	16	24,4	29	22	27,1	29	4	29,9
Mars 2	10	37,5	Juin 2	16	40,2	Sept 2	22	42,9	Dec 3	4	45,6
6	10	53,3	6	16	56,0	6	22	58,7	7	5	01,4
10	11	09,0	10	17	11,7	10	23	14,5	11	5	17,2
14	11	24,8	14	17	27,5	14	23	30,2	15	5	32,9
18	11	40,6	18	17	43,3	18	23	46,0	19	5	48,7
22	11	56,3	22	17	59,1	22	0	01,8	23	6	04,5
26	12	12,1	26	18	14,8	26	0	17,5	27	6	20,3
30	12	27,9	30	18	30,6	30	0	33,3	31	6	36,0

EX : Calculer le temps sidéral à Paris le 25 décembre à 1h T.U.

La table II donne T^o_{sG} = 6h 04,7 mn à 0h T.U. le 23 décembre.

Le 25 décembre à 0h T.U T^o_{sG} = 6h 04,7 mn + 7,8mn = 6h 12,5mn

A 1h T.U. (soit 1h 0mn 9,86s en temps sidéral) :

T^o_{sG} = 6h 12,5mn + 1h 0,2mn = 7h 12,7mn

La latitude de Paris est 9mn 21s Ouest, d'où le temps cherché =

7h 12,7 mn - 9,3 mn = 7h 3,4mn

Ce type de calcul est d'importance pour l'observation car il pe met d'orienter aisément les instruments à monture équatoriale.

La figure 58 montre un tel appareil, qui vise une direction exprimée en coordonnées horaires (δ,H). La valeur de δ est trouvée dans les éphémérides ainsi que celle de α. On affiche δ sur le cercle de déclinaison, ce qui oriente une fois pour toute (théoriquement) le tube du télescope par rapport à l'axe de rotation diurne. On affiche de même la valeur de $H = T_s - \alpha$ sur le cercle des ascensions droites que l'on obtient à partir du calcul de Ts, temps sidéral local ou par simple lecture sur une horloge sidérale.

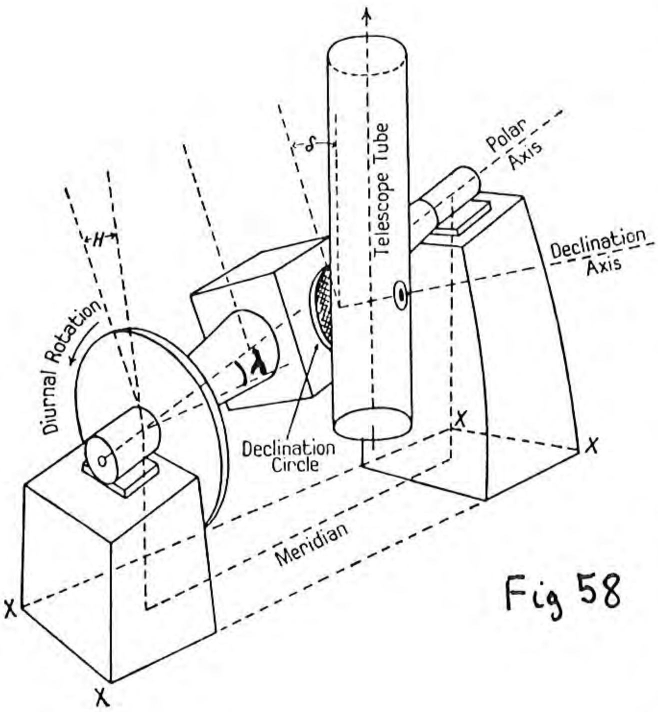


Fig 58

Si la manipulation est correcte, l'objet recherché doit se trouver dans le champ du télescope. Le mouvement de rotation diurne du télescope autour de l'axe polaire permet ensuite de suivre l'objet à volonté. Dans les appareils importants, un "guidage" s'avère nécessaire pour compenser les effets de la réfraction et de modification de l'appareil lui-même, opérations d'affichage et de guidage étant automatisées au maximum.

EX : Pointer un télescope équatorial vers Jupiter, le 25 décembre 1978 à 1h T.U. sous le ciel de Paris.

Pour le 25 décembre (la planète bouge lentement) :

$\alpha_{♃} = 8h\,41m$, $\delta_{♃} = 18°54'$

On sait que le temps sidéral local est alors :

T_s = 6h 3,4mn d'où H = 7h 3,4mn - 8h 41mn = - 1h 37,6mn = 22h 22,4mn

Il suffit d'afficher 18°54' sur le cercle des déclinaisons et 22h 22,4mn sur le cercle des ascensions droites.

On peut calculer l'heure T.U. à laquelle Jupiter passe au méridien de Paris, le 25 décembre 1978.

H = 0 soit Ts = 8h 41mn

soit TsG = 8h 41mn + 9,3mn = 8h 50,3mn. T^o_{sG} = 6h 12,5mn (le 25 décembre)

TsG - T^o_{sG} = 8h 50,3mn - 6h12,5mn = 2h 37,8mn. Jupiter passe donc au méridien à 2h 37,4mn T.U. (qui équivaut à 2h37,8m de temps sidéral)

On voit qu'on peut faire le calcul plus rapidement si on dispose de la valeur de H correspondant à 1h T.U. Le télescope doit tourner d'un angle correspondant à 1h 37,6mn (temps sidéral) soit 1h 37,4mn en temps solaire moyen et on retrouve bien 1h T.U. + 1h 37,4mn = 2h 37,4mn T.U.

Dans le cas d'une monture azimuthale, on doit, connaissant la latitude du lieu, faire la conversion (δ,H) $\longrightarrow$ (a,h).

III.- LE TEMPS UNIVERSEL

Le temps universel constitue une échelle de temps (le temps de la vie civile, comme on l'a vu plus haut) définie d'après la position du Soleil : c'est un temps solaire, lié à la rotation de la Terre sur elle-même.

On a vu les notions de jour solaire vrai et de jour solaire moyen. En raison de la nature elliptique de la trajectoire terrestre et de l'inclinaison de cette trajectoire par rapport à l'axe de rotation, le jour solaire vrai est affecté d'irrégularités importantes qui peuvent atteindre 30 s d'un jour à l'autre. A ce jour solaire vrai peut être associé le temps solaire vrai (TSV) qui, en un lieu donné, est l'angle horaire H du Soleil réel. Les irrégularités du jour solaire vrai se répercutent sur le temps solaire vrai, si bien qu'on a cherché à définir un temps solaire moyen (TSM) lié au jour solaire moyen, lui-même défini par un objet fictif, le Soleil moyen.

Ce Soleil moyen peut être défini comme un objet dont l'ascension droite varierait uniformément. Calculons $\alpha_\odot$ pour plus de précision.

On passe des coordonnées équatoriales (α, δ) aux coordonnées écliptiques géocentriques (ℓ, h) par une rotation d'angle ε, d'où pour le Soleil ($h_\odot = 0$)

$$\cos \ell = \cos \delta \cos \alpha$$

$$\cos \delta = \cos \ell \cos \alpha + \sin \ell \sin \alpha \cos \varepsilon$$

ce qui donne par élimination de $\cos \delta$,

$$\operatorname{tg} \alpha = \operatorname{tg} \ell \cos \varepsilon$$

$$\cos \varepsilon = \frac{1 - \operatorname{tg}^2 \frac{\varepsilon}{2}}{1 + \operatorname{tg}^2 \frac{\varepsilon}{2}} \qquad \text{d'où} \quad \operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} \ell = -\operatorname{tg}^2 \frac{\varepsilon}{2} (\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \ell)$$

soit encore :

$$\sin(\alpha - \ell) = -\operatorname{tg}^2 \frac{\varepsilon}{2} \sin(\alpha + \ell)$$

α est voisin de ℓ, d'où :

$$\alpha \simeq \ell - \operatorname{tg}^2 \frac{\varepsilon}{2} \sin 2\ell$$

avec un précision suffisante.

soit encore $\alpha \simeq \ell + R$

où : $R = -\mathrm{tg}^2\frac{\varepsilon}{2} \sin 2\ell$

est appelé "réduction à l'équateur".

Par ailleurs, $\ell = \varpi + v$ (voir mouvement des planètes) avec,

au premier ordre en e, $v \simeq n(t-t_0) + 2e \sin n(t-t_0)$

$$v - n(t-t_0) \simeq 2e \sin n(t-t_0) = C$$

équation du centre.

t est le temps (uniforme) de la mécanique, d'où :

$$\alpha_{\odot} \simeq \varpi + n(t-t_0) + C + R$$

On sait que : $H_{\odot}(TSV) = T_s - \alpha$

Si on considère l'ascension droite apparente, Ts est le temps sidéral apparent. Il n'est pas uniforme et on peut le mettre sous la forme mathématique :

$$T_s = T_{s0} + T_{s1} t + s(t)$$

où Tso et Ts1 sont des constantes fournies par l'observation et s(t) représente en première approximation l'équation des équinoxes.

D'où : $H_{\odot} = T_{s0} - \varpi + nt_0 + (T_{s1} - n)t - (C + R - s(t))$

$$H_{\odot} = T_{s0} - \varpi + nt_0 + (T_{s1} - n)t - E(t)$$

où : $E(t) = C + R - s(t)$, "l'équation du temps" est un terme périodique,

s est petit par rapport à C et R d'où $E \simeq C + R$.

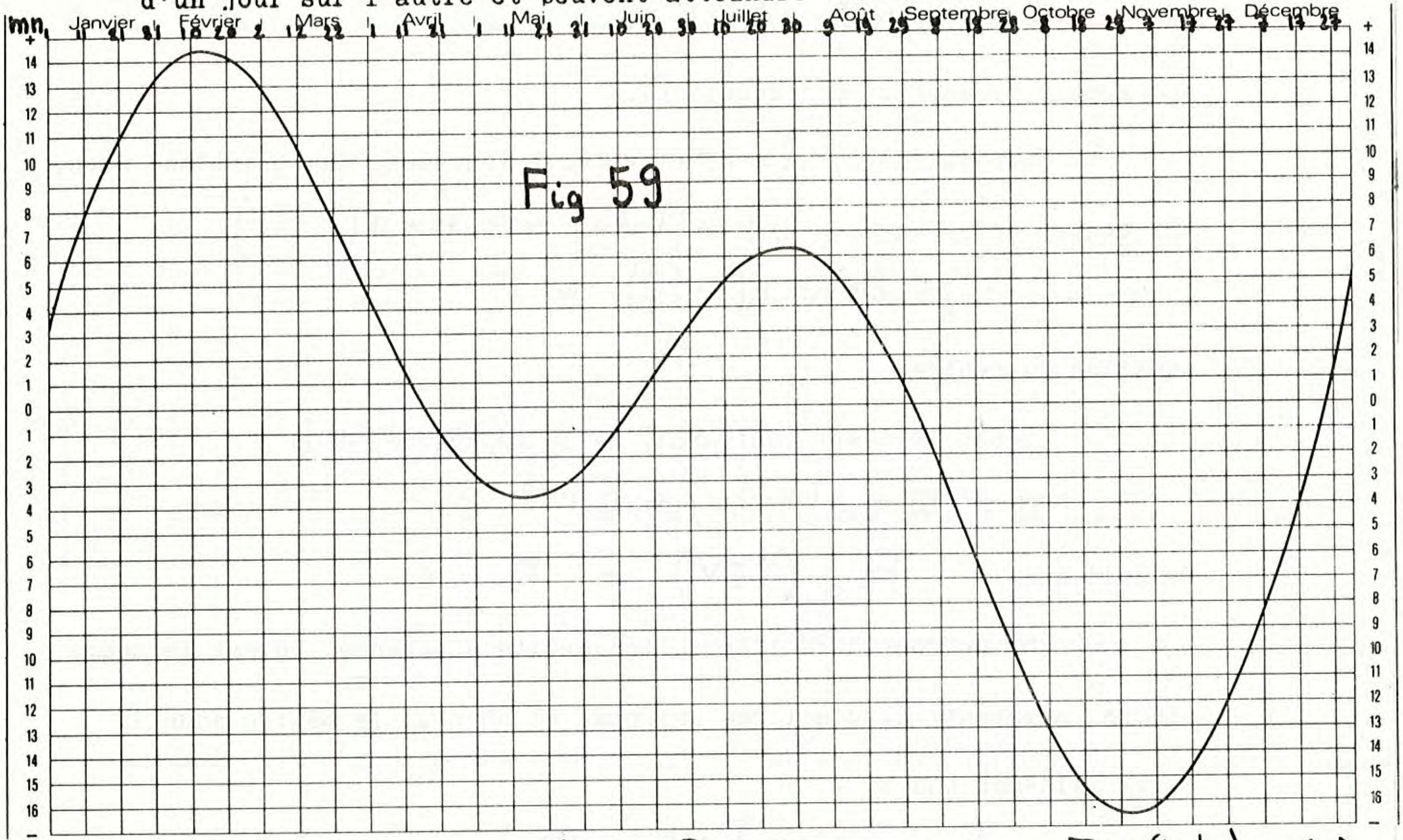
Le soleil moyen est défini par son angle horaire $H_{\odot m}$ tel que $H_{\odot} = H_{\odot m} - E(t)$

Par définition le temps solaire moyen (TSM) est égal à $H_{\odot m}$ doù :

$$\boxed{TSM = TSV + E(t)}$$

La figure 59 donne la variation annuelle de l'équation du temps.

Les écarts entre temps solaire vrai et temps solaire moyen se cumulent d'un jour sur l'autre et peuvent atteindre 16 minutes.



Comme H = Ts - α, $H_{\odot m} = T_s - \alpha_{\odot m}$ et $\alpha_{\odot m} = \bar{\omega} + n(t - t_0) + s(t)$

On peut donc considérer que le Soleil moyen est un point de l'équateur céleste dont l'ascension droite apparente est définie par la relation précédente. $\alpha_{\odot m} - s$ qui représente l'ascension droite moyenne du Soleil moyen varie de façon uniforme en première approximation (en fait varie légèrement à cause de l'avance au périhélie de la Terre).

Le temps solaire moyen est un temps local par définition et a pour un lieu de longitude L

$$\boxed{TSM_{(L)} = TSM_{(L=0h)} - L}$$

Le temps solaire moyen du lieu étant égal à 0h lorsque le Soleil moyen passe au méridien du lieu, on doit définir le temps civil = TSM + 12h pour éviter de changer le jour en plein milieu de la "journée". Par définition, on appelle temps universel (T.U.) le temps civil du méridien de Greewich (L = 0h)

$$\boxed{T.U. = TSM_{(L=0h)} + 12h}$$

Cette définition est fondamentale car, pour des raisons de commodité, chaque lieu ne peut avoir son heure : on divise donc la Terre en 24 fuseaux horaires (équivalents à 360/24 = 15°) où tous les pays (et les lieux) à l'intérieur d'un même fuseau adoptent le même temps légal qui est le temps civil du méridien central du fuseau, en règle générale. Donc, en général, le temps légal d'un fuseau n (le fuseau centré sur Greenwich est le fuseau 0) est égal à T.U. + nh.

En France le temps légal est le temps universel (la France est située dans le fuseau 0) depuis le 9 mars 1911.

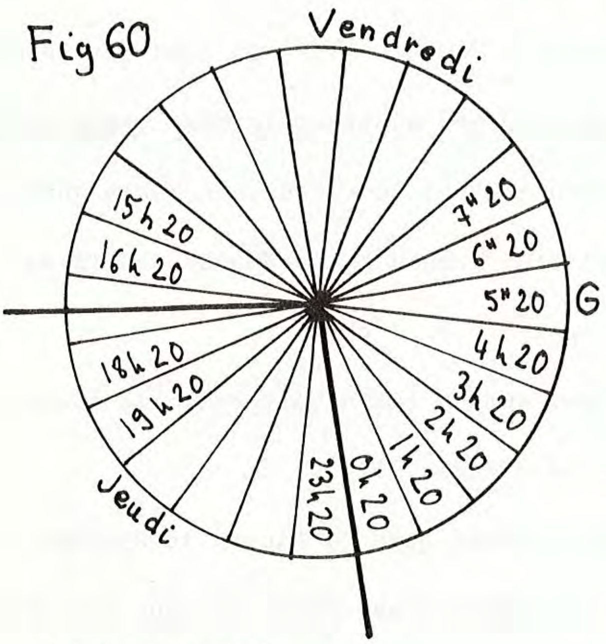
Mais la France, comme d'autres pays, a adopté le système de l'heure d'Eté : on avance l'heure légale d'une heure lorsque les jours sont longs. L'heure d'été en France a été appliquée de façon plus ou moins simple et régulière. En 1978, l'heure légale a été T.U. avancée d'une heure (heure d'été) entre le dimanche 2 avril à 2h (1h T.U.) et le dimanche 1 octobre à 3h (1h T.U.).

Un navire passant d'un fuseau à l'autre change son heure d'unité Il l'augmente s'il se dirige vers l'est et la diminue s'il se dirige vers l'ouest. Le premier tour du monde, entrepris par Magellan, fut effectué en voguant vers l'ouest ; à leur retour en Espagne les survivants de l'expédition arrivèrent le dimanche 7 septembre alors qu'ils se croyaient au samedi 6 septembre.

Inversement, Phileas Fogg (Jules Verne) put réussir son pari du tour du monde en 80 jours alors qu'il en avait fait 81 en réalité, mais il était parti vers l'Est.

Par convention, on change de jour à minuit. On change donc le nom du jour sur le méridien qui sépare les fuseaux où l'heure est supérieure à 23 heures et à 0heure

Fig 60



Le changement de nom s'effectue également sur le méridien de longitude 180° appelé anti-méridien de Greenwich. La figure 60 montre la répartition des jours correspondants à 5h20 à Greenwich.

Lorsqu'un bateau traverse l'anti-méridien de Greenwich dans le sens est-ouest, il doit ajouter un jour et inversement.

Détermination du temps universel.

On peut, en théorie, connaître T.U. à partir de l'observation directe du Soleil. L'observation du transit du Soleil donne aisément $\delta_\odot$. On a alors $\alpha_\odot$ par $\sin\alpha_\odot = \mathrm{tg}\,\delta_\odot \cos\varepsilon$ (d'où cela vient-il ?) d'où $T_S = \alpha$ et on peut connaître T.U. grâce à la table II. En fait, l'observation du Soleil est peu pratique et peu précise et on préfère connaître le temps sidéral par les étoiles du catalogue FK4.

Comment a été calculée la table II ? Le temps solaire moyen de Greenwich (T.U. - 12h ou G.M.T.) s'obtient à partir de $TSM = T_s - \alpha_{\odot m}$

Le temps sidéral est donné par le passage au méridien des étoiles FK4. L'ascension droite $\alpha_{\odot m}$ du Soleil moyen est connue d'après la définition du Soleil moyen : on l'a vu de façon approchée lors du calcul de l'équation du temps.

Pour être plus précis, il faut inclure dans l'expression de la longitude ℓ du Soleil les variations du périgée et les termes d'ordre supérieur en e. Le travail de base pour l'étude du mouvement du soleil a été fait par Newcomb (1900).

La longitude du Soleil par rapport au point vernal moyen peut se mettre sous la forme

$$\ell_{\odot} = L_0 + L_1 T + L_2 T^2 + \Sigma P \qquad (1)$$

où L_0, L_1, L_2 sont des constantes dépendant de l'origine et de l'unité de temps adoptées et ΣP représente la somme des différents termes périodiques. La longitude moyenne du Soleil est obtenue en éliminant ces termes. L'ascension droite peut être calculée à partir de (1) et se mettre sous une forme mathématique semblable. Après élimination des termes périodiques, on obtient l'ascension droite moyenne du Soleil par rapport à l'équinoxe moyen sous la forme $\alpha = A + BT + CT^2$.

Le Soleil moyen est alors défini comme un point fictif de l'équateur céleste ayant pour ascension droite la valeur moyenne ainsi calculée :

$$\alpha_{\odot m} = A + BT + CT^2$$

Ce qui donne, d'après Newcomb,

$$\alpha_{\odot m} = 18h\,38m\,45s,836 + 8640184\,s,542\,T + 0s,0929\,T^2 \quad (2)$$

où T est le nombre de siècles de 36.525 jours solaires moyens qui se sont écoulés depuis le 0 janvier 1900 (31 décembre 1899) à 12hT.U. de Greenwich.

La donnée de $\alpha_{\odot m}$ permet donc de connaître TSM à partir de la mesure de Ts (moyen puisque $\alpha_{\odot m}$ est donnée par référence à l'équinoxe moyen). La table II est facilement calculée puisqu'à 0h T.U., TSM = 12h. Le temps sidéral moyen de Greenwich à 0h T.U. de la date considérée est égal à 6h 38mn 45,836s $+(\ )T+(\ )T^2$ où T est connu d'après la date. Cet angle est par définition l'angle horaire de l'équinoxe moyen à 0hT.U. de la date à Greenwich.

La précision d'obtention de T.U. est la même que celle de Ts, c'est-à-dire 10^{-3}s.

Irrégularités du T.U.

Si la rotation de la terre était uniforme, l'échelle de Temps Universel le serait également. On sait en fait qu'il n'en est rien et que la rotation terrestre subit des variations séculaires, saisonnières, aléatoires, de même que les pôles ont un mouvement sur la surface terrestre. Newcomb fut le premier à mettre effectivement en évidence ces variations en constatant que la Lune était parfois en avant, parfois en retrait par rapport aux positions données par les éphémérides de son mouvement.

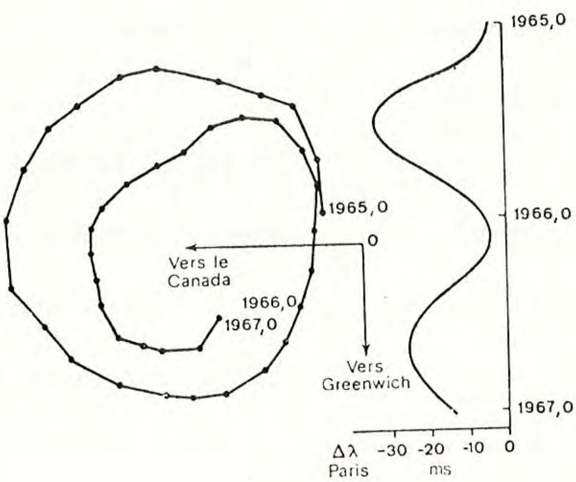
Le temps universel calculé précédemment, sans correction des effets de variations s'appelle TU0 (la seconde est la 1/86400° partie du jour solaire moyen TU0).

On corrige TUO des variations dues au mouvement du pôle pour obtenir TU1. Les mouvements du pôle (par rapport à une origine fixe internationale, choisie arbitrairement) créent une variation des méridiens de Greenwich et du lieu de telle sorte que la T.U. du lieu varie d'une grandeur $\Delta\lambda$ qui dépend des coordonnées du pôle vrai par rapport à l'origine fixe et de la position de l'observatoire considéré :

$$TU1 = TU0 + \Delta\lambda$$

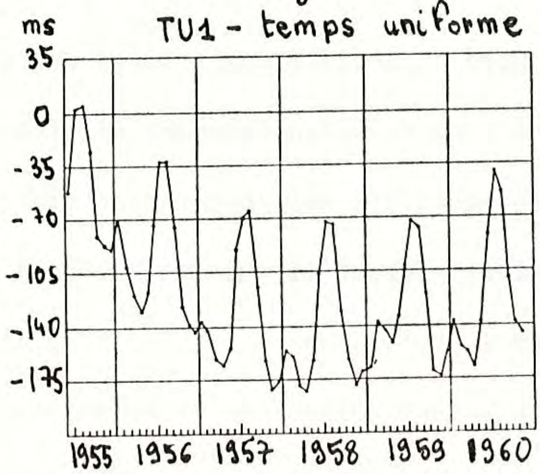
$\Delta\lambda$ peut atteindre quelques dizaines de millisecondes (figure 61).

Fig 61

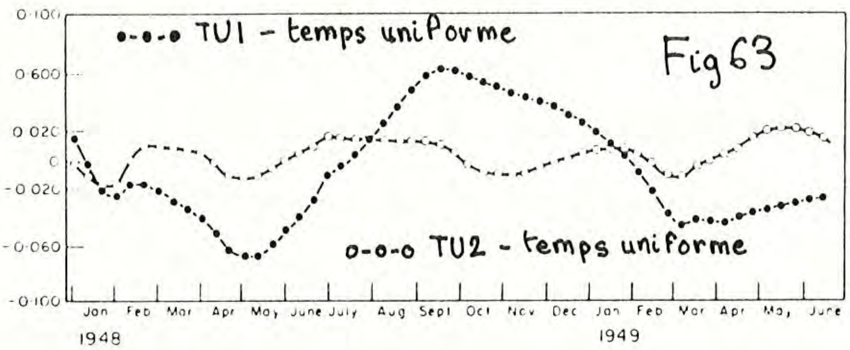


La figure 62 montre les irrégularités de TU1 sur plusieurs années, qui correspondent à une variation aléatoire à laquelle se superpose une variation saisonnière. On applique à TU1 une correction annuelle ΔT_S (figure 29) pour éliminer la variation saisonnière.

Fig 62

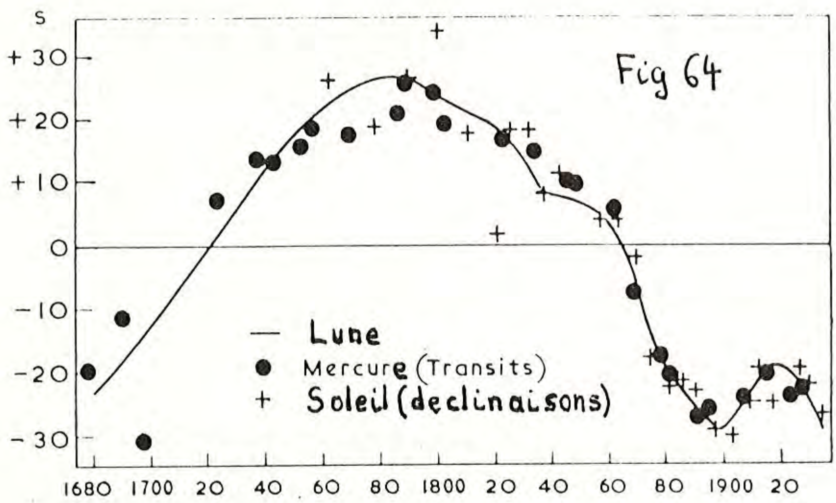


Par définition TU2 = TU1 + ΔT_S

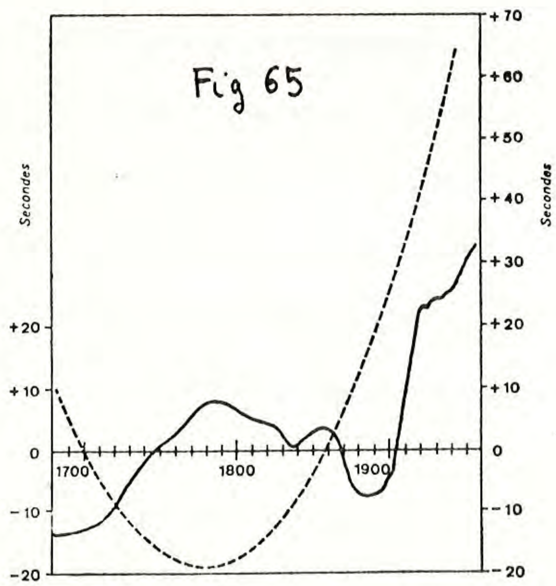


Sur un an, TU2 ne subit plus que des variations aléatoires de court terme (figure 63).

L'étude des observations du Soleil, de la Lune et des planètes a permis de mettre en évidence les variations aléatoires de long terme depuis 1680, qui masquent le ralentissement séculaire.



La figure 64 donne la déviation temps uniforme - TU2, compte non tenu du ralentissement séculaire.



La figure 65 donne l'écart temps uniforme-TU2 compte tenu du ralentissement séculaire. La courbe en tirets est la parabole (loi en t^2) du ralentissement séculaire, qu'on a positionnée de façon arbitraire.

Il y a ralentissement de la rotation terrestre lorsque la concavité de la courbe temps uniforme-TU2 est tournée vers le haut.

L'ensemble des irrégularités de la rotation terrestre explique que le temps universel n'a un degré d'uniformité que de 10^{-7}. Il est donc impropre à une mécanique ou une physique de précision et on l'a remplacé dans la définition de l'unité de temps par un temps plus uniforme : le temps des éphémérides, lui-même remplacé par le temps atomique.

Pourtant, le temps universel reste en usage. Rappelons qu'il est la base du système international de l'heure légale. On a objecté à son remplacement par un temps plus uniforme que ce dernier serait moins naturel et qu'il éloignerait peu à peu midi du passage méridien du Soleil. Notons que l'écart qui s'introduirait ne serait que de quelques minutes au bout de plusieurs siècles et que le public accepte sans broncher de vivre avec des écarts atteignant 2 heures sur le temps de son méridien (heure d'été).

Des objections plus sérieuses ont été avancées par les marins. La connaissance de T.U. fixe les positions de la sphère étoilée par rapport à des repères terrestres. En déterminant la hauteur des astres grâce au sextant, les marins obtiennent leur position par rapport à ces repères, c'est-à-dire leur point. Dans la navigation courante, la précision des hauteurs mesurées au sextant est de une à deux minutes d'arc. Le temps universel doit leur être diffusé et avec une précision suffisante pour ne pas intrduire d'erreur supplémentaire : c'est-à-dire meilleure que la seconde.

Les géodésiens ont également besoin du temps universel pour connaître leur position, avec une précision plus grande, Le temps universel est utilisé dans la trajectographie des satellites artificiels, la direction du satellite étant mesurée par rapport aux directions d'étoiles grâce à une photographie.

En recherche fondamentale, le temps universel sert d'indicateur des irrégularités de la rotation terrestre, après comparaison avec le temps atomique. Avec les mesures de latitude elles permettent de mesurer le mouvement du pôle si bien que toutes les caractéristiques de la rotation terrestre sont connues, ce qui nous permet d'avoir une idée plus précise de la structure du globe terrestre.

La mesure de T.U. permet également d'améliorer les catalogues d'étoiles et les constantes astronomiques, elle fournit des données sur la dérive des continents, etc...

III.1.- Le temps des éphémérides :

Devant les défauts d'uniformité du temps universel, la Convention internationale des poids et mesures a adopté en 1956 une nouvelle définition de la seconde reposant non plus sur la rotation de la Terre sur elle-même mais sur le mouvement de la Terre autour du Soleil. C'est un phénomène physique plus simple, les astres pouvant être assimilés à des points matériels et les équations qui régissent leur mouvement peuvent être exactement établies en fonction d'un temps t, le temps de la mécanique postulé uniforme qu'on cherche à représenter par le temps des éphémérides : T.E.

La seconde des éphémérides est définie d'après la longitude du Soleil vrai donnée par la formule (1). On adopte les valeurs de Newcomb de telle sorte que

$$l_{\odot} = 279^{\circ}41'48'',04 + 129602768'',13\,T + 1'',089\,T^2 + \Sigma P \quad (3)$$

T n'est plus cette fois compté en siècles de temps universel (qu'on croyait uniforme lorsque Newcomb l'a calculé) mais en siècles dits "juliens" de temps uniforme (en pratique temps des éphémérides).

La valeur moyenne de la longitude du Soleil par rapport à l'équinoxe moyen est donc : $\overline{\ell_\odot} = \ell_\odot - \Sigma P$ (4)

L'année tropique est définie mathématiquement comme le temps requis pour que $\overline{\ell_\odot}$ croisse de 360° (ou de 1296000") à la vitesse de changement instantanée de $\overline{\ell_\odot}$

$$\frac{\partial \overline{\ell_\odot}}{\partial T} = 1\,296\,027\,68'',13 + 2'',178\,T$$

L'année tropique devient donc, en siècles juliens,

$$A.T. = 1\,296\,000 / (129\,602\,768,13 + 2,178\,T)$$

Cette année n'est pas constante à cause du terme en T et pour la fixer, il faut préciser la valeur de T que l'on choisit.

On choisit T = 0, c'est-à-dire le 0 janvier 1900 à 12h T.E. (soit 31 décembre 1899 à 12h T.E.). Cet instant est également pris comme origine de l'échelle de temps T.E.

On a alors en secondes :

$$AT = 365,25 \times 100 \times 86400 \times 1\,296\,000 / 129\,602\,768,13$$

soit : $A.T. = 31\,556\,925,9747$ s

La convention internationale des Poids et Mesures a donc défini, en 1956, la seconde T.E. comme la fraction 1/31556925,9747 de l'année tropique pour janvier 0, 12h T.E.

Si l'on veut compter T.E. en jours, on a TE = 0,5j + 36525T (où T est toujours exprimé en siècles juliens de 36525 jours des éphémérides comptés à partir de 1900, janvier 0 à 12h TE).

Détermination de TE :

Si on connaît la longitude $\overline{\ell_\odot}$ par rapport à l'équinoxe moyen (longitude moyenne), la formule (1) permet de donner T.E. par résolution d'une équation à 1 degré en t : Dans la formule (1) on remplace t par TU dans les termes en T^2 et $\Sigma\rho$ qui ne sont que des termes correctifs. On doit donc résoudre l'équation $L_{\odot} + L_1 t = \ell_{\odot} - L_2 t^2 - \Sigma P$ et la racine t fournit TE = t.

Il suffit donc de mesurer la hauteur du Soleil lors de son passage au méridien, ce qui donne $\delta_{\odot}$ d'où $\ell_{\odot}$ apparente par $\sin \alpha_{\odot} = \operatorname{tg} \delta_{\odot} \cos \varepsilon$ et $\operatorname{tg} \ell_{\odot} = \operatorname{tg} \alpha_{\odot} / \cos \varepsilon$. On corrige de la précession et de la nutation pour avoir la longitude moyenne. La difficulté des observations solaires et la faible variation de au cours du temps entraînent des erreurs de plusieurs secondes sur TE. En pratique on doit faire différemment, par l'observation de la Lune qui présente l'avantage de se déplacer 13 fois plus vite que le Soleil.

Le mouvement de la Lune a été développé de façon extrêmement précise par Brown en fonction du temps de la mécanique auquel on assimile le temps des éphé mérides. Lorsque la Lune occulte des étoiles, on a $\alpha_{☾} = \alpha_{*}$ et $\delta_{☾} = \delta_{*}$. La tabulation du mouvement de la lune permet de connaître t = TE à partir des valeurs de (α, δ) observées. Les occultations étant relativement rares, on utilise plutôt un procédé photographique dû à Markowitz (1934). La chambre de Markowitz permet de photographier la Lune et le champ d'étoiles environnant grâce à un mécanisme atténuateur de la lumière de la Lune et compensateur de son mouvement. On peut alors connaître les coordonnées (α, δ) de la Lune en comparant avec l'ensemble des étoiles proches ce qui est plus précis que la simple occultation. Par un tel procédé on détermine TE actuellement à 0,1s près.

L'uniformité du TE est limitée par les défauts inévitables de la théorie et son rattachement au mouvement annuel apparent du Soleil. L'unité de temps a été définie pour une époque donnée (1900) et n'est plus disponible car l'année tropique est variable. Pourmesurer le degré d'uniformité de l'échelle TE, il faut moyenner les observations rétrospectivement sur plusieurs années. On estime le degré d'uniformité égal à 10^{-9}.

Ecart TE - TU :

La mesure de ΔT = TE - TU est indicatrice des variations de la rotation terrestre. Puisqu'on n'a aucune raison de suspecter l'uniformité du temps de la mécanique, on postule que l'écart qui apparaît entre les positions observées du Soleil, de la Lune, des planètes et les positions prédites à partir de tables utilisant le temps universel sont dues aux défauts d'uniformité de ce dernier. ΔT est une mesure de cet écart.

L'équation (4) ne donne plus exactement la longitude moyenne du Soleil si T est exprimé en siècles de temps universel. La longitude du Soleil moyen diffère très légèrement de la longitude moyenne du Soleil (le décalage très faible est estimé à 0s,0203 T^2)

On a constaté que pour redonner la bonne valeur de $\overline{\ell_\odot}$ il fallait ajouter à l'équation (4) exprimée en TU un terme correctif $\Delta\ell_\odot = 1'',00 + 2'',97 + 1'',23 T^2 + 0,0747\, B$ où T est toujours en siècle TU et B représente en secondes d'arc une correction à ajouter aux longitudes calculées de la Lune pour les faire concorder avec les observations.

Comme on postule que l'équation (1) doit être rigoureusement satisfaite avec T exprimé en siècles TE, la correction $\overline{\Delta\ell_\odot}$ vient de Δ T. Le soleil parcourant environ 3600" par jour,

$$\Delta T \simeq \frac{86400}{3600} \times \overline{\Delta\ell_\odot}$$

On trouve :

$$\Delta T = 24s,349 + 72s,318\,T + 29s,950\,T^2 + 1,821\,B \quad (5)$$

avec T en siècles TU.

L'équateur (5) permet de calculer ΔT à une époque où existait seul le temps universel. Le calcul précis de ΔT n'est en fait réalisable que pour une époque où les observations sont assez fines, si elles existent. En gros, depuis 1700, de même que la formule (1) n'a été établie par Newcomb qu'à partir d'observations du Soleil ultérieures à 1680. Dans la figure (65) la courbe donne en fait ΔT entre 1680 et 1960 car le temps uniforme par rapport auwuel on compare le temps universel n'est autre que TE. On a fait coïncider TE et TU au voisinage de 1900. L'écart ΔT a pu être reconstitué de façon satisfaisante pour des époques très anciennes en utilisant par exemple des observations d'éclipses faites dans le passé et dont l'instant était noté en temps solaire et en comparant l'heure notée par les observateurs de cette éclipse à l'heure calculée en temps des éphémérides. ΔT atteint 3 heures pour la Grèce antique et la cause majeure de cet écart est le ralentissement séculaire.

En 1978 $\Delta T \simeq 49s$.

Usage :

Vu le délai d'obtention de l'unité de temps des éphémérides, le TE est mal approprié pour le physicien qui désire immédiatement une valeur précise. En 1955, Essen annonça qu'une horloge atomique du National Physical Laboratory pouvait fonctionner avec une précision meilleure que 10^{-9}, bien meilleure que la précision des échelles de temps astronomiques TU et TE. Il était donc naturel de définir une unité de temps astronomique provisoire, aussi proche que possible de l'unité de temps TE et qui permette d'y avoir facilement accès. La correspondance entre TE et temps atomique TA fut obtenue par une campagne d'observations de la Lune entre

1955 et 1958. On trouva que la seconde TE correspond à 9.192.631.770 périodes de la transition $(F = 4, m = 0) \leftrightarrow (F = 3, m = 0)$ de l'atome de Césium 133, ceci avec une précision de 10^{-9}.

De là est venue naturellement la définition de la seconde atomique (1967) définie à partir de la transition du Césium 133, opération plus rationnelle que de définir la transition du Césium à partir d'une unité de temps difficilement accessible et de ce fait d'une précision insuffisante (10^{-9}) pour des expériences raffinées.

Pour les travaux sur des observations récentes, le temps des éphémérides est donc remplacé par le temps atomique (en tenant compte de l'écart TE - TA qui vaut 32,18s actuellement pour des raisons pratiques et qui reste pratiquement constant). TE n'a jamais été diffusé et n'est accessible que par ses écarts avec TU ou TA.

La nécessité du maintien de TE est l'objet de controverses chez les astronomes. Il lui reste pourtant un usage important. Avant 1956 où il a été relayé par le temps atomique, le temps des éphémérides constitue la meilleure représentation du temps uniforme. Il reste, de ce fait, indispensable pour interpréter les observations anciennes. Il a été suffisamment reconstitué loin dans le passé, pour le permettre et son degré d'uniformité est suffisant. TE (en fait TA + 32,18s) reste l'argument fondamental des éphémérides actuelles du Soleil, de la Lune et des planètes : les coordonnées futures sont prévisibles à des dates exprimées en TE et non en TU. La quantité $\Delta T = TE - TU$ ne peut être déterminée qu'expérimentalement après coup puisqu'elle dépend de la rotation terrestre. Si on se contente d'une précision moyenne, on peut construire les éphémérides de ces objets en TU, par extrapolation de ΔT. TA n'a pas encore complètement supplanté TE à cause de l'importance des observations des siècles derniers.

III.4.- Le temps atomique :

Après la définition de la seconde atomique, on a construit avec prudence une échelle de temps atomique internationale (T.A.I.) obtenue par simple addition d'unités de temps atomique. TAI a vu le jour seulement en octobre 1971 et son établissement a été confié au BIH (Bureau International de l'Heure). On a donc attendu 4 ans afin de s'assurer des qualités du temps atomique et d'obtenir des garanties suffisantes contre le risque d'interruption intempestive, les étalons atomiques étant moins fiables à cet égard que la rotation terrestre. Pour obtenir TAI on pouvait considérer un unique étalon comme horloge fondamentale ou comparer entre eux plusieurs étalons et réaliser, par le calcul, un étalon moyen. On a choisi la deuxième méthode pour éviter tout risque d'interruption. Quelques laboratoires ou quelques pays construisent leur temps atomique individuel. La comparaison de ces temps individuels permet d'obtenir le TAI sous forme de corrections faites par le BIH, à ajouter à chacun d'entre eux.

L'accessibilité du temps atomique est immédiate si l'on dispose d'un laboratoire ayant un étalon atomique. La précision de lecture sur le temps atomique fourni par cet étalon peut atteindre 10^{-9}s. Dans le cas de TAI, il faut synchroniser les différents temps des différents étalons et réajuster fréquamment la synchronisation cas ces étalons divergent entre eux. La précision de lecture peut atteindre 1μs, voire 0,1 μs. TAI est ainsi obtenu à un degré d'uniformité qui dépend des performances de stabilité des étalons. Il est actuellement de quelques 10^{-13}.

L'origine de TAI a été fixée le 1er janvier 1958 et à cette date TAI et TU ont été mis en coïncidence. Au 1e janvier 1978, on avait TAI - TU = 16,4s.

Usage :

Le temps atomique sert à la conservation de la seconde internationale. L'échelle de temps atomique internationale est de loin la meilleure qu'on sache réaliser, en regard des exigences de la métrologie moderne.

Comme échelle de temps uniforme, TAI, comme TE, permet les études théoriques de mouvements et de fait il tend à remplacer TE dans le calcul des éphémérides. TAI sert en effet à "lisser" les valeurs de TE. Les deux temps étant uniformes, TE - TAI doit varier linéairement si les unités de temps respectives présentent une légère différence. On peut donc éliminer les inégalités de TE qui seraient nuisibles. La discussion des observations de TE prenant plusieurs années, TAI est utilisé comme moyen d'extrapolation de TE. On sait qu'actuellement TE = TAI + 32,18s avant que la réduction d'observations futures aient modifié cette égalité. Les tables donnent les valeurs de $\Delta T(A)$ = TAI + 32,18s - TU1 depuis 1956.

Le temps atomique sert aussi à étudier les effets relativistes, par comparaison avec le temps d'horloges embarquées sur satellites ou planètes, artificiels ou non. A très long terme, sa comparaison avec TE ou tout autre temps gravitationnel peut contribuer à l'étude des phénomènes quantiques et de la gravitation : il est possible qu'on mette en évidence des irrégularités de TE d'origine astrophysique (phénomènes de pertes de masse ou d'accrétion surle Soleil) ; il est aussi possible qu'on mette en évidence une divergence entre unités de temps TE et TA qui résulterait d'une variation des constantes fondamentales de la physique en raison de l'expansion de l'Univers, si c'est bien le cas.

Enfin, et ce n'est pas le moindre, le temps atomique sert à la coordination des signaux horaires des différents observatoires ou laboratoires contribuant à la définition du temps, à leur synchronisation et à la diffusion dans le monde entier du temps universel coordonné (TUC).

III.5.- Le temps diffusé :

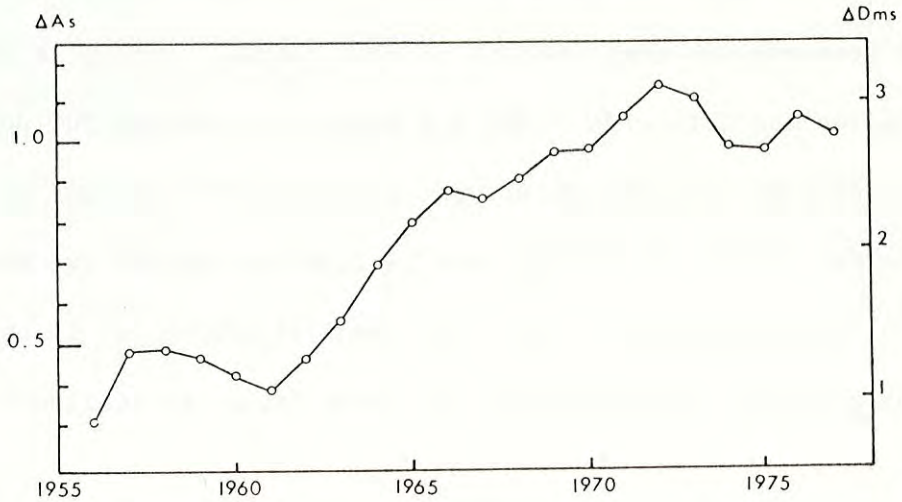
La diffusion du temps peut se faire localement par lignes ou à plus grande distance par émission radio. La liaison par ligne la plus connue est réalisée par l'horloge parlante. La précision des tops se détériore au cours du transport par lignes vers les différents centraux téléphoniques et l'horloge parlante n'est guère utilisée.

Plus générale et plus précise est la radiodiffusion sur ondes courtes des signaux horaires à grande portée. Les réceptions les plus précises se font sur oscilloscope et la précision est limitée à 10^{-3}s. Certains procédés de réception de fréquence étalon utilisant des horloges atomiques et des diffusions sur ondes longues et très longues permettent de descendre jusqu'à 0,1 μs.

Avant 1972, la plupart des stations d'émissions du temps diffusaient un temps universel coordonné astreint à garder TU2 à 0,1s près, grâce à des sauts discrets de 0,1s décidés, le temps voulu, par le BIH. Depuis le 1 janvier 1972, l'unique temps diffusé par tous les signaux horaires est TUC. TUC n'est autre que TAI auquel on fait subir des ajustements de 1 seconde exactement, quand c'est nécéssaire, afin que TUC ne diffère jamais de TU1 par plus de $\pm$ 0,9s. Ainsi le 1 janvier 1978 à 0h TUC, on a retiré 1s à TUC pour qu'il "garde le contact" avec TU1 et de ce fait TAI - TUC est passé de 16 à 17s. Les sauts ont lieu actuellement le 1 janvier car la rotation terrestre est actuellement telle que le Temps Universel perd à peu près une seconde par an (mais le saut peut aussi se faire les 1 avril 1 juillet, 1 septembre, par convention internationale).

La figure 66 montre la durée moyenne annuelle du jour en secondes atomiques (86400 + ΔDms). ΔA(s) est le retard pris par TU sur TAI en un an.

Fig 66



Comme TUC est le seul temps qui soit mis à la disposition des utilisateurs, c'est en fait lui qui est utilisé partout depuis 1972 et non le temps légal TU + nh. L'horloge parlante de l'observatoire de Paris diffuse depuis bien longtemps TUC + 1h et TUC + 2h (heure d'été). De nouvelles dispositions légales sont en préparation qui stipuleront que l'heure l'égale française s'obtient par addition d'un nombre entier d'heures (fixé par décret) au temps universel coordonné TUC.

TUC est diffusé à 10^{-3}s près. Dans le cas où une extrême précision est nécessaire, il peut être mis à la disposition des utilisateurs, à moins de 10^{-6} près, grâce à certaines techniques utilisées conjointement avec les publication du BIH.

TAI n'est pas diffusé mais peut être aisément déduit de la diffusion de TUC par la connaissance de TAI - TUC qui est un nombre entier de secondes atomiques. La précision de sa diffusion est donc la même que TUC.

TU1, si utile aux marins, n'est pas non plus diffusé mais par définition TUC ne s'écarte pas de TU1 de plus de 1s, ce qui suffit pour faire un point de bonne précision. La plupart des émissions de signaux horaires diffusent suivant un code simple, uniformisé et audible une correction DUT1 = TU1 - TUC qui permet de corriger TUC pour avoir TU1 à moins de 0,1 près. Si on veut connaître TU1 avec une précision encore meilleure, il faut faire appel aux publications de BIH qui donnent des tables de valeurs de TUC - TU1. TU1 étant déterminé par l'observation astronomique, sa précision n'est de toute façon pas meilleure que 10^{-3}s.

IV.- LE CALENDRIER

Au-delà du jour, les hommes ont introduit des divisions du temps à moyen ou long terme dont les plus usitées sont :

- <u>la semaine de 7 jours</u> : dont l'origine est babylonienne. Le nombre 7 avait un caractère fatidique et chez les grands personnages de la Mésopotamie on observait une sorte de trêve du 7e jour. L'origine fatidique du nombre 7 provient probablement des 7 "planètes" (Saturne, Jupiter, Mars, le Soleil, Vénus, Mercure, la Lune). Notons toutefois que les Egyptiens, les Chinois, les Grecs comptèrent d'abord en décades.
- <u>le mois d'une trentaine de jours</u> : L'origine en est clairement l'horloge astronomique constituée par les phases lunaires dont la période (mois lunaire) est de 29,5j (29,5306 jours solaires moyens).

- **l'année** : dont l'origine est évidemment l'année tropique ou année des saisons (1 at : 365,2422 j.s.m.).

L'année compte 12 mois environs. La longueur exacte de l'année a été très variable selon les pays et les époques. Le numérotage par année constitue la base des calendriers.

- **le siècle de 100 années** : le nombre d'années n'a pas toujours été de 100. Pline appelait siècle une période de 30 ans.

- **l'ère** : Une ère est un point fixe auquel on rapporte les années par leur numéro d'ordre. Les ères ont été nombreuses au cours de l'Histoire et plusieurs sont encore en usage. Elles ont été définies longtemps après l'événement, le plus souvent mythique, qui leur a donné naissance et leur emploi n'est entré dans les moeurs que plusieurs siècles après leur début théorique.

L'ère de Rome, censée correspondre à la fonsation de la Ville part de l'année 754 av. JC.

Les Olympiades, comptées tous les 4 ans, partent de 776 av. J.C., année à partir de laquelle sont enregistrés le nom des vainqueurs des Jeux Olympiques.

L'ère chrétienne, qui démarre théoriquement (il n'en est rien en fait) à la naissance du Christ. Proposée par un moine scythe, Denys le Petit, en 532, elle a été adoptée d'emblée par l'Eglise. Elle n'a été adoptée en France que sous Charlemagne et ne figure sur les diplômes royaux qu'à partir de Hugues Capet.

L'ère musulmane ou Hégire, débute le 16 juillet 622, date de la fuite de Mahomet vers Médine.

L'ére judaïque commence en l'an 3761 avant notre ère (ère chrétienne).

Depuis que l'Homme a ébauché des calendriers dignes de ce nom, on constate qu'il a utilisé principalement deux horloges de longue période : les phases lunaires et le mouvement apparent annuel du Soleil.

Dans le souci de compter les jours, il a élaboré des centaines de calendriers différents reposant sur la Lune, sur le Soleil ou sur les deux à la fois. Le problème fondamental qu'il a dû affronter est que l'horloge lunaire et l'horloge solaire ont des périodes qui n'ont pas entre elles de rapports simples. L'histoire du calendrier peut se résumer par une série de tâtonnements dans la recherche de ces périodes et dans leur ajustement. Cette recherche a stimulé la naissance de l'Astronomie et constitué une grande partie de l'Astronomie des Anciens.

La périodicité des phases lunaires est la plus évidente et les premiers calendriers ont dû être lunaires, avec des mois de 29 et 30 jours. Les calendriers uniquement lunaires présentent l'inconvénient de se décaler par rapport à l'année des saisons. Ce décalage pouvait être mis en évidence en comparant les dates successives de phénomènes naturels annuels. Ces phénomènes furent le plus souvent les levers héliaques d'étoiles remarquables mais aussi les hauteurs du Soleil au méridien, voire des phénomènes climatiques réguliers comme la crue du Nil. Les plus anciens documents écrits dont on dispose, vieux de 6.000 ans, montrent que les peuples de Mésopotamie ont essayé d'adapter leur calendrier, à base lunaire, avec l'année solaire.

Une année composée de 6 mois de 29 j et 6 mois de 30 j, comporte 354 j et au bout de 3 ans un décalage d'un mois environ apparaît par rapport aux saisons. Pour des raisons tenant à la rigueur des dogmes religieux en vigueur, ce décalage pouvait à la longue devenir insupportable. La toute-puissance des dogmes doit se manifester dans des cérémonies ou fêtes à des dates (lunaires) fixes. Les diverses fêtes marquant l'activité sociale (semailles, moissons, hivernage,...) tendaient alors à s'écarter de plus en plus des saisons correspondantes.

Aussi Sumériens, Assyriens, Babyloniens, puis les Hébreux intercalèrent, un peu au petit bonheur, un mois tous les trois ans. D'autres procédés d'ajustement furent utilisés, reposant sur le même principe : faire coïncider au mieux un nombre entier de mois avec un nombre entier d'années :

$$37 \times 29{,}5306 = 1092{,}6322 \text{ j.s.m.}$$
$$3 \times 365{,}2422 = 1095{,}7266 \text{ j.s.m.}$$

Ces chiffres constituent la base du cycle de 3 ans : il y a deux années de douze mois (354 j) et une troisème année qui se voit ajouter un mois de 30 j. On obtient ainsi 37 mois pour 3 ans. Ces 37 mois (ou 3 ans) correspondent à 1092 jsm. On voit que le mois lunaire est légèrement sous-estimé alors que l'année tropique est sous-estimée d'un jour par ans.

On a aussi :

$$99 \times 29{,}5306 = 2923{,}5294 \text{ j.s.m.}$$
$$8 \times 365{,}2422 = 2921{,}9376 \text{ j.s.m.}$$

Ces chiffres constituent la base du cycle de 8 ans : 5 années de 354 j auxquelles on ajoute 3 années de 13 mois, le 13e mois ayant 30 j. On a ainsi 99 mois pour 8 ans. Les 99 mois (ou les 8 ans) correspondent à 2922 jsm. Le cycle de 8 ans (ou octaétéride) est donc plus précis que le cycle de 3 ans.

Plus précis encore est le cycle de 19 ans, ou cycle de Méton, utilisé d'abord par les Babyloniens puis par les Grecs de façon plus large

$$235 \times 29,5306 = 6939,6810$$
$$19 \times 365,2422 = 6939,6018$$

Le cycle de Méton compte 7 années de 354j, 6 années de 384 j, 5 années de 355j (5 mois de 29j et 7 mois de 30j), 1 année de 383 j (354j + 1 mois de 29 j) ; soit en tout 6940 j ou 125 mois de 30 j + 110 mois de 29 j en 19 ans.

Ces beaux calculs théoriques aboutissent à une réalité qui l'est moins. Les durées des périodes naturelles n'étaient pas connues avec précision et on constate, à l'expérience, que l'application des cycles a été très empirique et très inégale par les Mésopotamiens, les Hébreux ou les Grecs. Invasions, changements de dynastie, rivalités politiques locales, rivalités internes, connaissances astronomiques insuffisantes ont altéré l'application des cycles pendant toute l'Antiquité.

Le calendrier égyptien donne l'exemple peu ordinaire d'être resté le même pendant des milliers d'années avec tous les inconvénients qu'une telle fixité pouvait entraîner.

A ses origines, le calendrier comportait 12 mois égaux de 30 j groupés en décades, soit une année de 360 jours. 5 jours (épagomènes) furent rajoutés à la fin du 12e mois pour constituer le "calendrier vague" dont l'usage se perpétua pendant 4.000 ans. La dérive par rapport aux saisons atteignait un jour en 4 ans, 1 mois en 120 ans, 6 mois en 730 ans : le décalage était alors complet et les rites agricoles inscrits au calendrier tombèrent à contre-sens : on chanta la canicule et les récoltes en plein hiver. Au bout de 1461, tout revenait dans l'ordre. Cette période, dite période sothiaque, était alors célébrée avec faste. Le poids de la tradition et la toute puissance des prêtres expliquent que les Egyptiens aient pu s'accommoder si longtemps des divagations de leur calendrier civil parmi les saisons.

A Rome, l'année primitive, dite année de Romulus, comptait 304 jours. Sous Tarquin, on ajouta 51 jours, car "l'impair plaît aux dieux". L'année comptait 4 grands mois de 31 jours, 7 mois de 29 jours et 1 mois de 28 jours : Februarius (février). Comme les autres, les Romains durent procéder à l'intercalation. Tous les 2 ans, ils ajoutèrent un mois, Mercedarius, entre le 23 et le 24 février. Les romains obtinrent ainsi une année de 366 jours en moyenne mais ils ne surent pas en pratique raccorder leur année civile avec les saisons et le collège des Pontifes, devant un désaccord persistant, reçut le droit de donner au mois intercalaire la longueur appropriée aux circonstances. Le calendrier devint alors un moyen de corruption et de fraude. Les Pontifes abusèrent de leur pouvoir en allongeant ou en raccourcissant l'année suivant qu'ils voulaient favoriser les Consuls en exercice ou leurs successeurs. Ils avançaient ou retardaient les échéances, permettaient aux fermiers du fisc de rapides bénéfices ou les amenaient à la faillite. Avec ces abus, on en était arrivé à célébrer au printemps les fêtes d'automne et la moisson en plein hiver.

Ces excès amenèrent Jules César à entreprendre l'élaboration du calendrier Julien avec l'aide de l'astronome Sosigènes.

Le calendrier julien est essentiellement solaire : il ne tient pas compte de la lune et il constitue à peu de chose près notre calendrier actuel. Il y a trois années de 365 jours et une année bissextile de 366 jours, soit une année moyenne de 365,25 j que l'on supposait être alors la longueur de l'année tropique bien que Hipparque ait donné une valeur légèrement inférieure. L'année est divisée en mois dont les nôtres sont l'exacte réplique.

Notons que l'on désigne toujours par siècle julien des siècles de 36525 jours et que les astronomes emploient un système de datation en jours juliens qui est commode pour diverses opérations. L'origine de cette datation est le 1e janvier 4713 av JC., à midi. La journée qui sépare le midi du 1er janvier de cette année et celui du 2 janvier porte le n° 0. Ainsi, le jour qui commence à midi le 0 janvier 1900 porte le numéro 2415020. Ce système de numérotation peut s'appliquer à toute échelle de temps. Sauf avis contraire, il s'agit en général de TU. Mais il est également possible de définir la date julienne dans l'échelle TE, ce qu'il faut préciser explicitement.

L'inexactitude du calendrier julien apparrait dans une simple soustraction

$$365,25_j - 365,2422_j = 0,0078_j$$

soit 11mn 14s.

En un siècle de 100 années juliennes, l'excès atteint 0,78j et au bout de 4 siècles, le calendrier julien est en retard de trois jours sur les saisons. La date du passage du Soleil à l'équinoxe de printemps avance de 3 jours tous les 4 siècles dans le calendrier julien.

Le concile de Nicée, constatant que l'équinoxe de printemps tombait le 21 mars, en l'an 325, lia la célébration de Pâques (pour des raisons historiques voulant que la mort du Christ avoisinât l'équinoxe de printemps) au 21 mars, pensant que cette date serait toujours celle de l'équinoxe de printemps.

Le calendrier julien continua évidemment à dériver et le 21 mars s'écarta peu à peu de l'équinoxe de printemps. Au VIIIe siècle, l'Eglise s'en émut : à suivre les prescriptions du concile, Pâques fête printan ière finirait par se célébrer en été. Mais ce ne fut qu'en 1582 que le pape Grégoire XIII entreprit l'élaboration du calendrier "grégorien", notre calendrier actuel.

La réforme grégorienne comporte deux aspects :

- <u>il faut mettre le calendrier "à l'heure"</u> :

Depuis le Concile de Nicée, 1257 ans se sont écoulés, l'équinoxe de printemps tombe le onze mars et a de ce fait 10 jours d'avance. Il fallait donc raccourcir l'année 1582 de 10 jours et par décision pontificale le lendemain du jeudi 4 octobre fut le vendredi 15.

- <u>il faut corriger le calendrier julien lui-même et donc constituer un nouveau calendrier</u> :

Le calendrier grégorien a une année moyenne de

$365{,}2425\text{j} = 365 + 3/4 - 3/400$

Cette égalité définit le procédé employé.

1) les années continuent d'être bissextiles de 4 en 4 ans, suivant la règle julienne.

2) on doit en plus retirer 3 jours en 400 ans ; les années séculaires (dont le millésime se termine par 2 zéros) ne sont plus bissextiles, sauf celles dont le nombre de siècles est divisible par 4.

Ainsi 1700, 1800, 1900 ne sont plus bissextiles mais 2000 le reste. On voit donc qu'en pratique la réforme grégorienne passera inaperçue pour ceux d'entre nous qui sont nés après 1900 (et qui n'atteindront pas 2100).

Il reste un petit écart :

365,2425 - 365,2422 = 0,0003. Le décalage est de 3 jours en 10.000 ans soit en gros 1 jour en 3000 ans. Il n'apparaît pas nécessaire d'envisager la correction dans l'immédiat d'autant plus que sur cette période vont intervenir des facteurs dont l'effet est du même ordre :

- l'année tropique n'est pas constante. Elle diminue d'environ 5 secondes par millénaires mais cet effet est cumulatif (voir ralentissement de la rotation terrestre) et est en t^2. L'accumulation des racourcissements annuels avancerait l'équinoxe de 3 jours en 10.000 ans
- le ralentissement séculaire de la rotation terrestre est aussi en t^2 et donnerait à son tour 3,5 j d'avance à l'équinoxe en 10.000 ans.

Les 3 causes d'écart (imperfection grégorienne, racourcissement de l'année tropique, allongement du jour) se cumuleraient donc pour donner 10 jours d'avance à l'équinoxe en 10.000 ans, les 2 dernières devenant prépondérantes sur un encore plus long terme. D'autres facteurs inconnus de nous pourraient également intervenir de façon plus brutale et la précision du calendrier grégorien suffit aux exigences actuelles.

La mise en place de ce calendrier ne se fit pas sans mal. Les pays catholiques l'adoptèrent rapidement : Italie, Espagne, Portugal : immédiatement. La France : la même année. Les Etats catholiques d'Allemagne et de Suisse en 1584. La Pologne en 1586. La Hongrie en 1587.

Ce fut beaucoup plus long pour les pays protestants. "Les protestants aiment mieux être en désaccord avec le Soleil que d'accord avec le Pape".

Pays-Bas, Allemagne et Suisse s'inclinèrent vers 1700, l'Angleterre et la Suède en 1752 seulement.

Vives furent les réticences, surtout pour les 11 jours, même dans les pays catholiques. La réaction fut particulièrement violente en Angleterre. L'année y commençait le 25 mars. On accepta le 1er janvier en même temps que le calendrier grégorien. Dès le 1er janvier 1751 on compta 1752. L'année 1751 anglaise avait perdu ses trois derniers mois. Puis, en septembre 1752, 11 jours furent supprimés. C'était beaucoup pour un seul peuple. Des manifestations se produisirent aux cris de "Rendez-nous nos trois mois !" ou "rendez-nous nos onze jours !"

Les pays de tradition orthodoxe, Russie, Grèce, Bulgarie, Yougoslavie n'ont adopté le calendrier qu'au cours de ce siècle et leur retard atteignait treize jours. Le calendrier grégorien est d'un usage à peu près universel actuellement. Il existe encore des calendriers luni-solaires comme le calendrier israélite : celui-ci assure une valeur moyenne du mois (29,53059 j) voisine de la lunaison et une durée moyenne de l'année (365,2468 j) voisine de l'année tropique, en faisant des années de 12 mois (communes) et de 13 mois (embolismiques) suivant un cycle de 19 ans. Il existe même des calendriers uniquement lunaires: le calendrier musulman donne à la valeur moyenne du mois (29,53056 j) une bonne approximation de la lunaison et à l'année une valeur ne correspondant pas à l'année tropique. La valeur moyenne est de 354,37j, obtenue en faisant alterner des années de 354 j (communes) et 355 j (abondantes) suivant un cycle de 30 ans.

Le calendrier grégorien n'est pas exempt de défauts, même si nous y sommes habitués. Le nombre de jours (et donc de jours de travail) est variable ; le jour de la semaine correspondant à une date donnée varie perpétuellement ; en particulier les dimanches et jours de repos ; il y a des fêtes mobiles (Pâques) et fixes (dont on n'est pas sûr qu'elles tombent sur un jour ouvrable) etc...

Des études de calendrier dit "universel" ont lieu actuellement Etant donné le poids des habitudes et le caractère relativement mineur des défauts, un calendrier universel (si on arrivait à un accord général) ne s'imposerait pas rapidement.