

LE SYSTEME SOLAIRE

LES MOUVEMENTS APPARENTS DES ASTRES

La sphère céleste.

Les parallèles célestes.

Mouvements apparents des étoiles.

Mouvement apparent du Soleil.

Diverses définitions d'intervalle de temps.

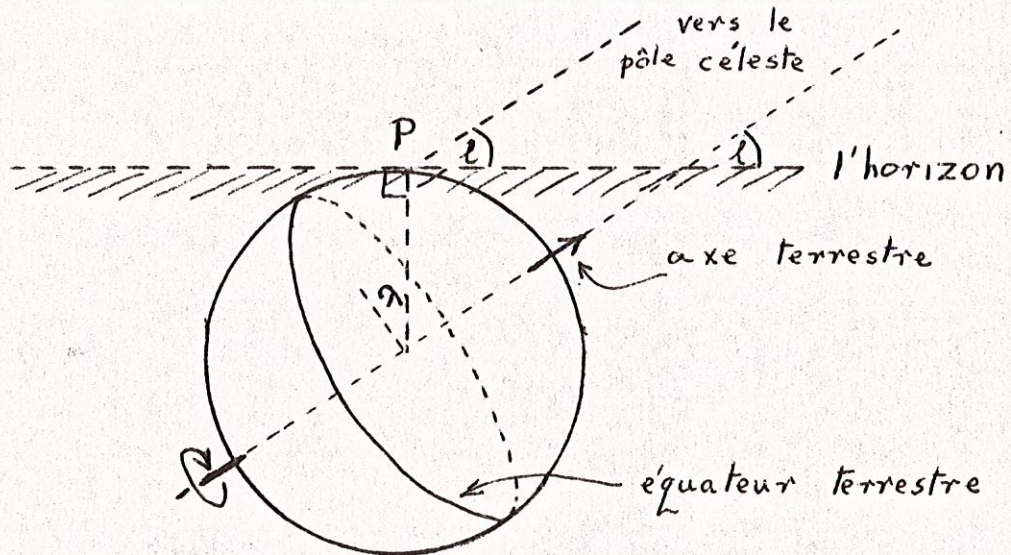
LA SPHERE CELESTE

Chacun sait que tout astre "se lève" vers l'est et "se couche" vers l'ouest. La voûte céleste semble tourner autour d'un point fixe : c'est, dans l'hémisphère boréal, le pôle céleste nord, voisin de l'étoile polaire. Dans la réalité, c'est, bien entendu, la Terre qui tourne autour d'un axe dont la direction est celle des pôles célestes.

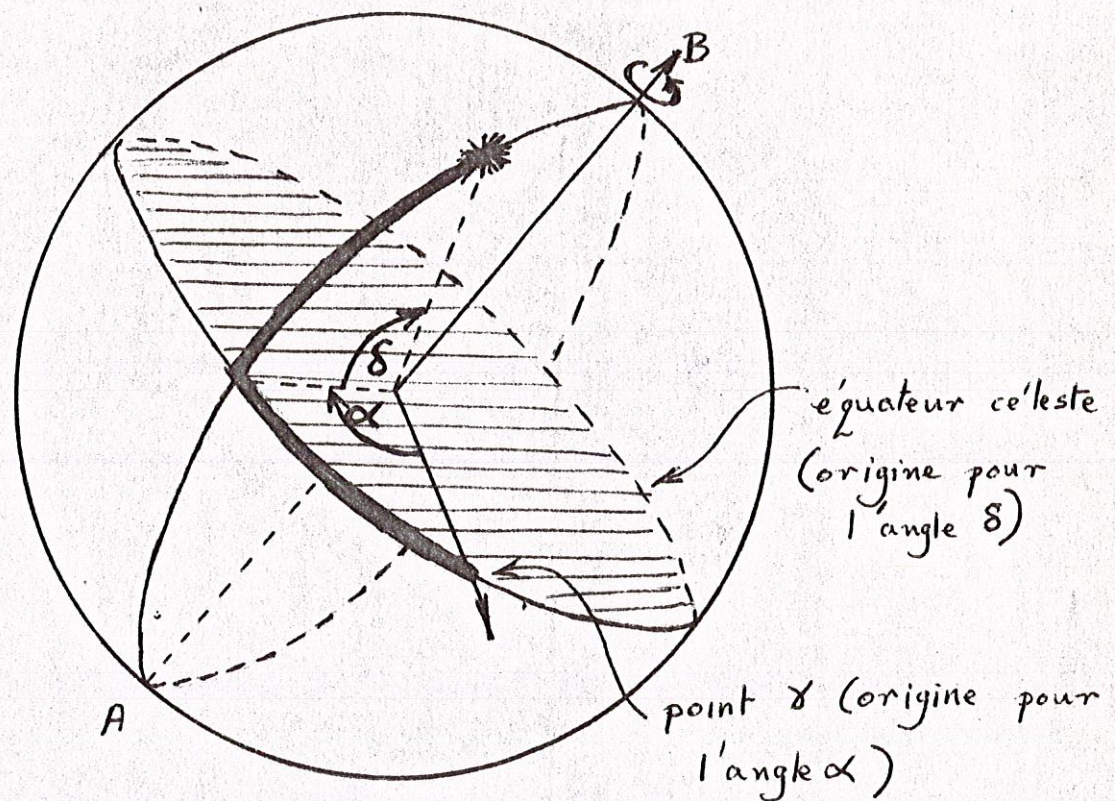
La voûte céleste fait un tour complet en 24 heures. Pour établir un catalogue des positions relatives des étoiles, il est très commode (ou au moins très traditionnel) de considérer que les étoiles sont "fixées" sur une sphère mobile et que le Soleil, la Lune et les planètes se déplacent lentement sur la surface de cette sphère, tout en partageant son mouvement de rotation.

Cette description des mouvements apparents des astres est plus ou moins correcte, selon les critères choisis et la précision de mesure disponible.

LA DIRECTION DU POLE CELESTE PAR RAPPORT A L'HORIZON



Considérons un point P de latitude λ sur la surface de la Terre. L'horizon est le plan tangent à P. La direction du pôle céleste est celle de l'axe de la Terre : donc l'angle "l" entre la direction du pôle céleste et l'horizon est égal à la latitude λ de P.

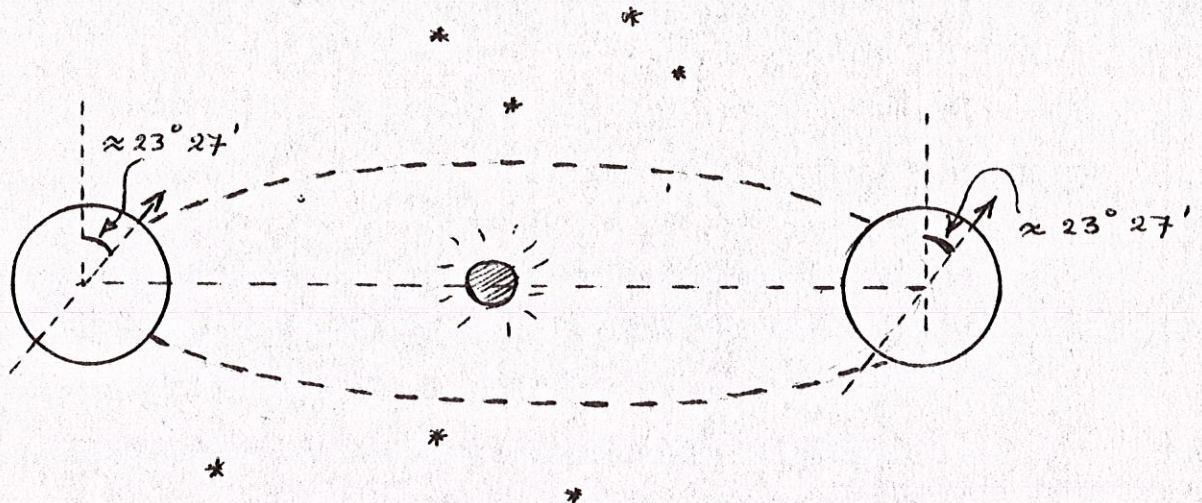


La position angulaire d'un astre sur la sphère céleste peut être définie par un système de coordonnées sphériques dont l'origine est dans le plan de l'équateur céleste : un point est repéré par un azimut δ et un angle α . On appelle δ la déclinaison : elle est positive pour les étoiles de l'hémisphère boréal céleste et négative dans l'hémisphère austral céleste. On appelle α l'ascension droite : elle est mesurée autour de l'axe des pôles à partir d'un point - le point γ - défini arbitrairement sur l'équateur céleste (voir plus loin). On remarque l'analogie avec les parallèles terrestres : la déclinaison est analogue à la latitude, et l'ascension droite à la longitude, le point γ étant en quelque sorte le "Greenwich" céleste.

L'ascension droite est exprimée habituellement en heures, minutes, secondes ; cette convention est très commode. L'ascension droite exprime en effet le temps écoulé entre l'observation dans une direction donnée du grand cercle contenant le point γ , et, l'observation dans la même direction du grand cercle contenant l'étoile. On prend $360^\circ \equiv 24$ heures (mais voir plus loin).

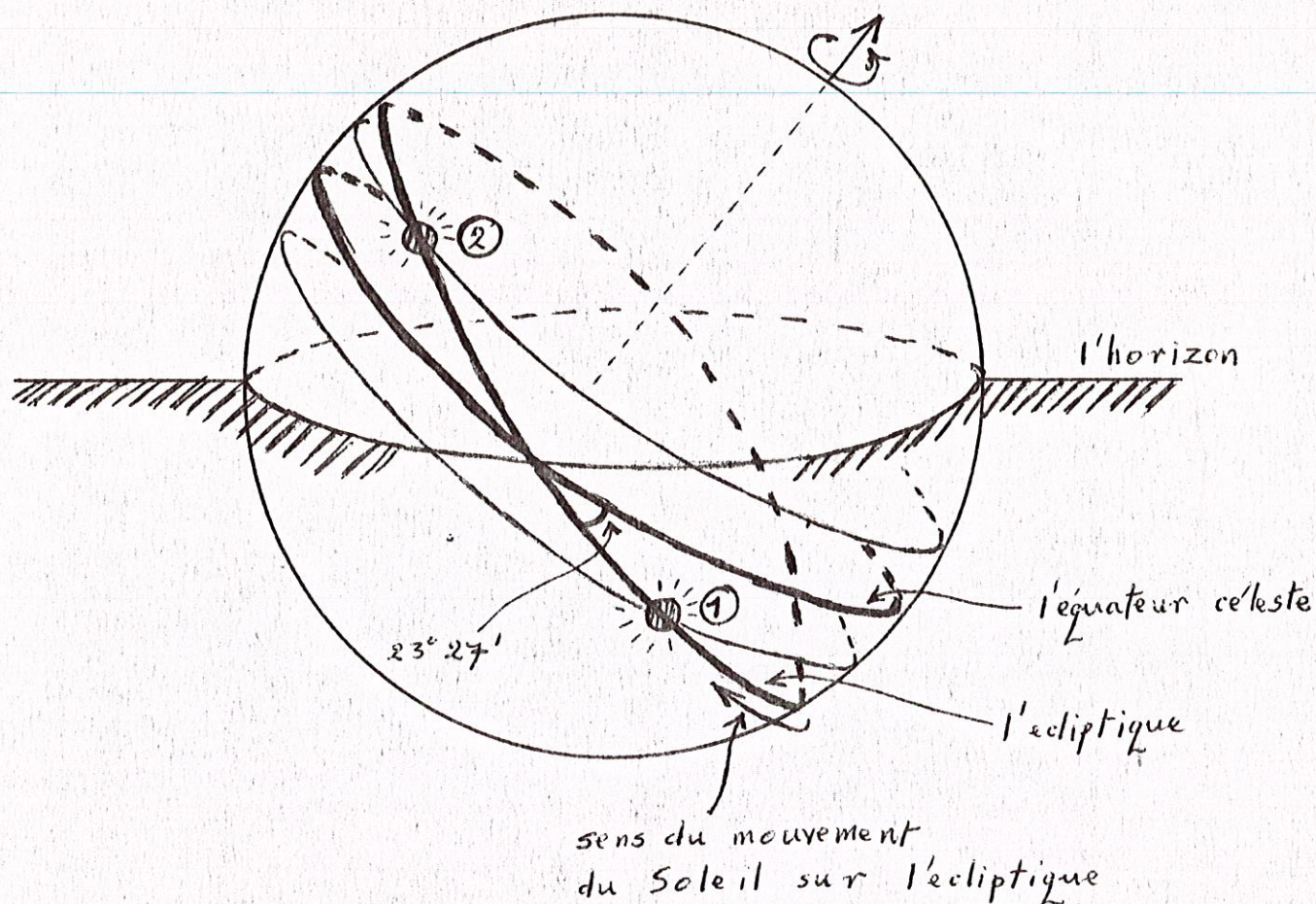
MOUVEMENT DU SOLEIL SUR LA SPHERE CELESTE

D'une part, la Terre tourne sur elle-même, et donc le Soleil participe au mouvement de rotation de la sphère céleste ; d'autre part, la Terre tourne autour du Soleil, d'un mouvement tel que la direction de son axe reste presque toujours constante par rapport aux étoiles.



Si l'on voyait les étoiles à la lumière du jour, ce mouvement orbital se manifesterait comme un mouvement lent du Soleil par rapport à un fond d'étoiles fixes.

L'équateur terrestre est incliné d'environ $23^\circ 27'$ sur le plan orbital de la Terre. Par conséquent, le Soleil trace sur la sphère céleste un cercle incliné d'environ $23^\circ 27'$ sur l'équateur céleste : son parallèle céleste change donc constamment, le Soleil faisant un tour complet en 1 année. Le cercle tracé par le Soleil s'appelle l'ecliptique.



On remarque que cette description s'accorde bien avec certaines observations de la vie courante :

LA HAUTEUR MAXIMUM ATTEINTE PAR LE SOLEIL DEPEND DU JOUR DE L'ANNEE.

A un moment donné de l'année, la hauteur maximum atteinte par le Soleil est déterminée par le grand cercle sur lequel il se trouve. Ainsi, en position 1 sur l'ecliptique, la hauteur maximum n'est pas très élevée (c'est l'hiver) ; par contre, en position 2 quelques mois plus tard, le Soleil arrive très haut (c'est l'été).

LES LONGUEURS DU JOUR ET DE LA NUIT VARIENT PENDANT L'ANNEE.

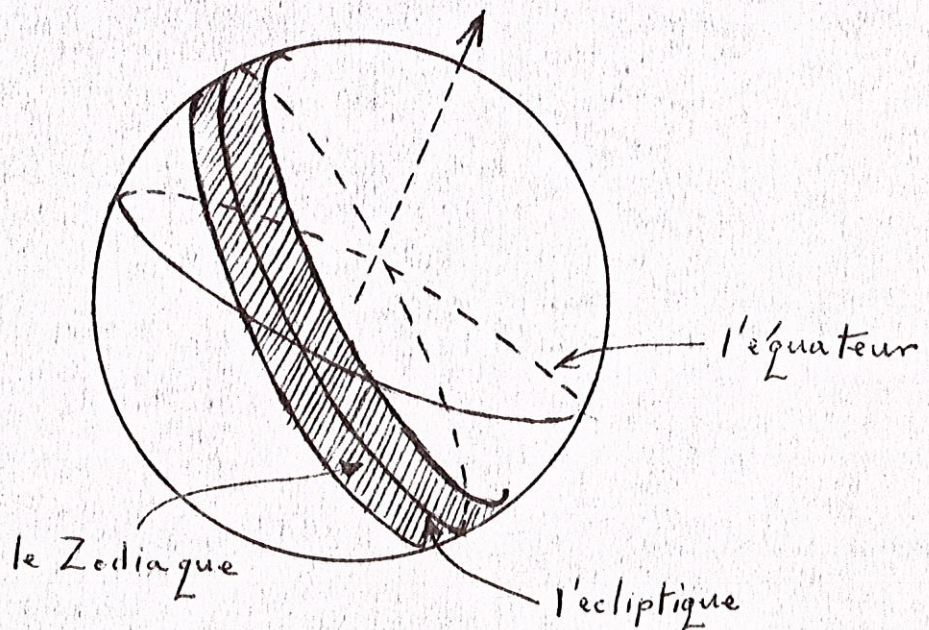
En position 1 (l'hiver), plus de la moitié du grand cercle portant le Soleil dans son mouvement diurne se trouve en dessous de l'horizon -la nuit est donc plus longue que le jour-. Par contre, en position 2 (l'été), c'est le contraire.

Remarquons que le jour et la nuit ont la même longueur quand le Soleil se trouve sur l'équateur céleste : ceci se passe le 21 mars et le 23 septembre (l'équinoxe vernal et l'équinoxe automnal).

Question A1 : Expliquer de la même manière d'autres phénomènes liés au mouvement apparent du Soleil sur la sphère céleste.

LES MOUVEMENTS APPARENTS DES PLANETES SUR LA SPHERE CELESTE

A l'exception du plan orbital de Pluton, les plans orbitaux des planètes sont à quelques degrés près confondus avec le plan orbital de la Terre. Par conséquent, toutes les planètes tracent des chemins inclinés de quelques degrés seulement sur l'ecliptique.



L'ensemble des chemins apparents de planètes définit ainsi une bande autour de l'écliptique ; les douze constellations traversées par cette bande s'appellent le Zodiaque -certains anciens de l'Antiquité et certains journaux contemporains de grande diffusion leur ont donné une signification mystique-.

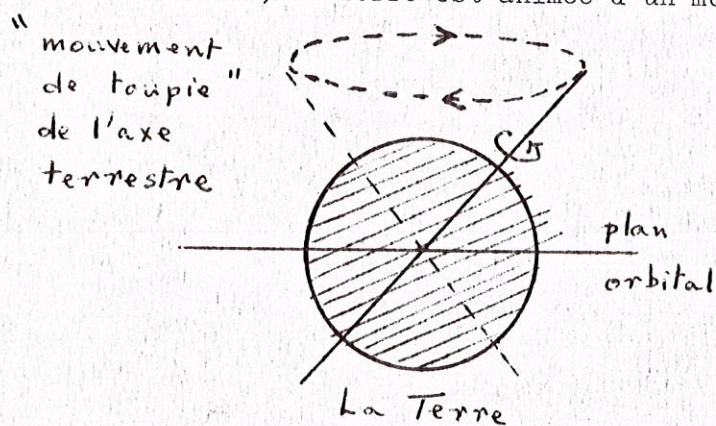
Question A2 : Vous vous trouvez dans un pays dont vous ne connaissez pas la langue. Trouvez un test rapide et efficace pour savoir quels journaux ne sont pas sérieux.

LE POINT γ ET LA PRESSION DES EQUINOXES

Nous avons vu que le système de coordonnées sphériques utilisé pour repérer les positions des étoiles sur la sphère céleste a besoin d'un "Greenwich" céleste. Pour cela, on a choisi le point occupé par le Soleil le 21 mars (une des deux intersections de l'écliptique avec l'équateur céleste). On l'appelle "le point γ ".

Le point γ n'a rien de particulier. Sa position sur la sphère céleste est déterminée par la direction de l'axe de rotation de la Terre par rapport aux étoiles. Si cet axe ne changeait pas, la position du point γ ne changerait pas par rapport au fond des étoiles "fixes".

Or, l'axe de rotation de la Terre n'est pas "gelé" dans l'espace : en effet, la Terre est animée d'un mouvement de "toupie", tel que l'axe



de rotation a une inclinaison constante par rapport au plan orbital, mais change de direction par rapport aux étoiles.

Par conséquent, les intersections de l'écliptique et de l'équateur céleste changent de position par rapport aux étoiles fixes. -le point γ se déplace sur l'écliptique.

Ce phénomène s'appelle la "précession des équinoxes". La précession n'est pas rapide -sa période est de 26.000 ans, ce qui correspond à un mouvement du point γ sur l'écliptique de $\frac{360^\circ}{26.000} \approx 50''$ par an. Néanmoins, comme les coordonnées des étoiles sont établis par rapport au point γ , il est nécessaire de corriger les catalogues du mouvement de précession.

QUELLE HEURE EST-IL ?

Tout phénomène régulier peut être utilisé pour mesurer les intervalles de temps. Plusieurs phénomènes célestes périodiques (le lever et le coucher des étoiles ou du Soleil, les phases de la Lune...) servent d'horloges depuis les temps préhistoriques et notre division actuelle de l'année en mois, semaines, jours, etc... est un reliquat de ces premières tentatives.

Le ciel nous fournit plusieurs "horloges" qu'il faut qualibrer les unes par rapport aux autres.

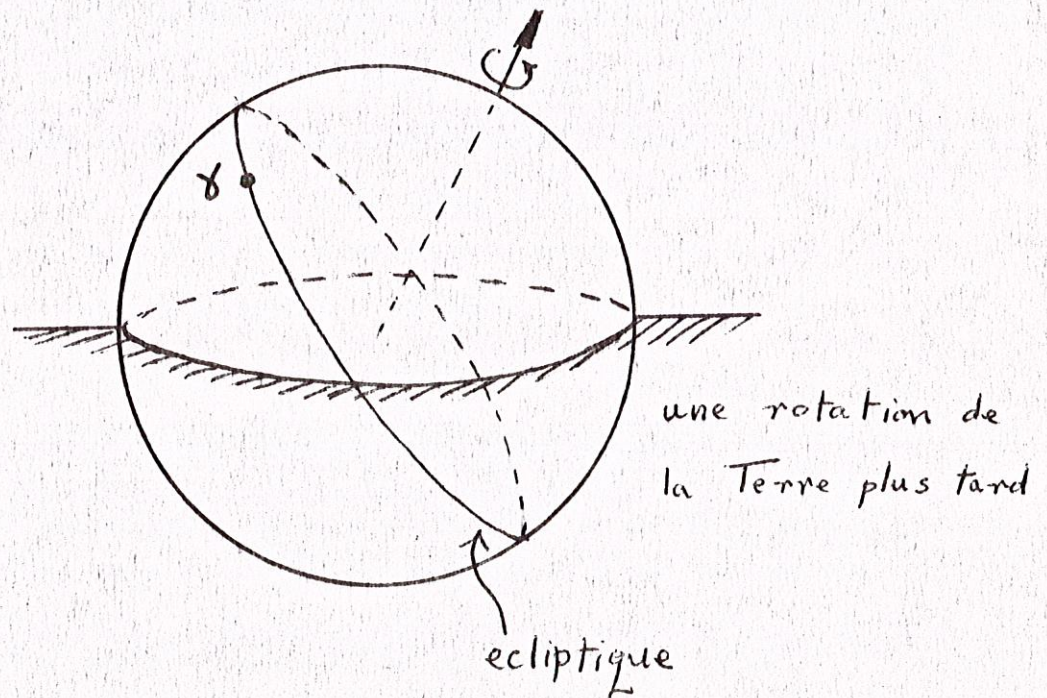
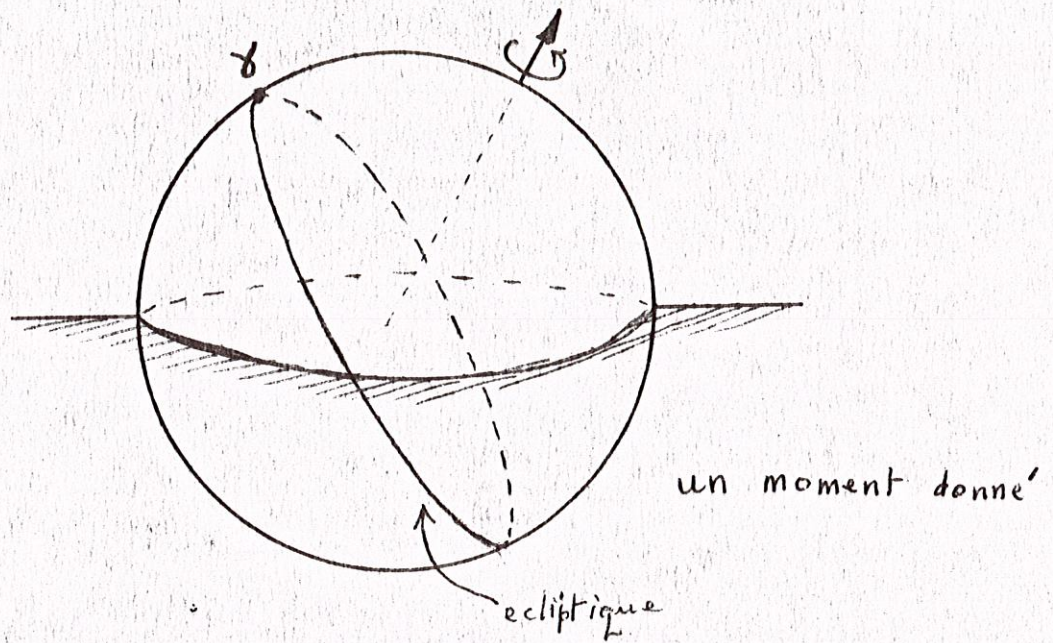
TEMPS SIDERAL ET TEMPS CIVIL

La rotation de la sphère céleste ramène un astre au même point dans le ciel à des intervalles réguliers : on pourrait donc définir un jour comme étant la période entre deux retours successifs au même point dans le ciel d'un astre donné.

Nous avons vu que le système de référence des étoiles sur la sphère céleste est défini par rapport au point γ . Il est alors commode de définir un jour sidéral comme étant la période entre deux passages successifs du point γ . Par définition, un jour sidéral est divisé en exactement 24 heures.

En première approximation, le point γ ne change pas de position par rapport aux étoiles "fixes" : son mouvement diurne est essentiellement dû à la rotation de la Terre.

Pourtant en deuxième approximation, le point γ n'est pas fixe : la précession de la Terre entraîne un mouvement sur l'écliptique dans le sens est-ouest de l'ordre de 50" par an (soit 0.125" par jour).

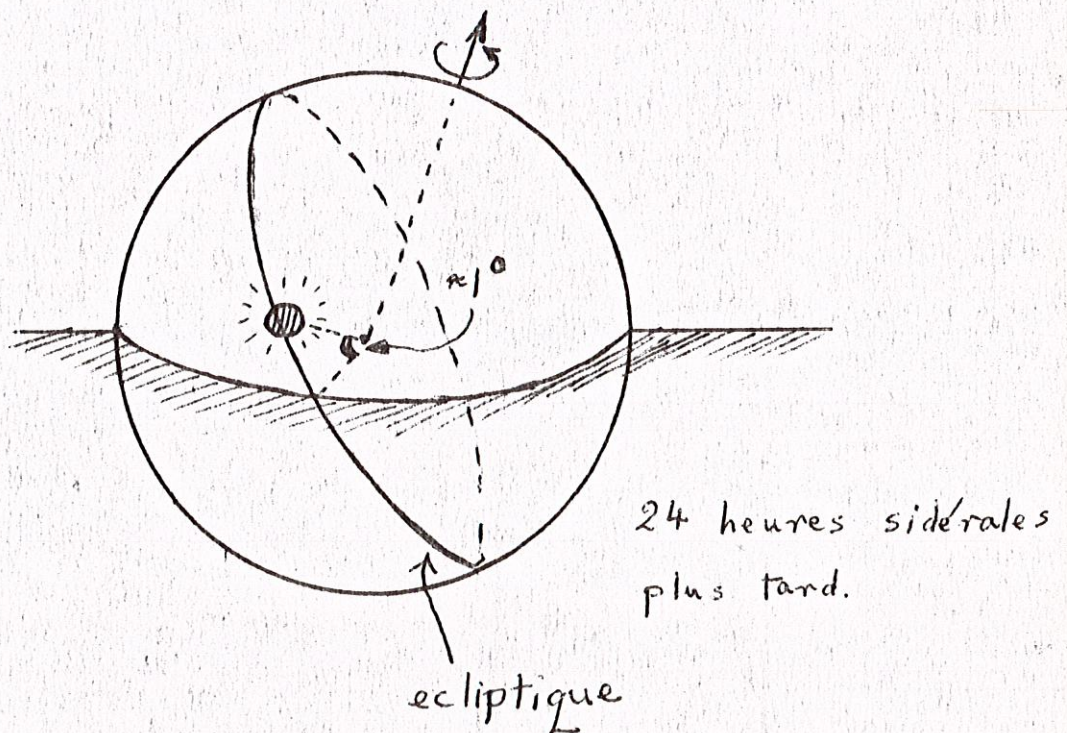
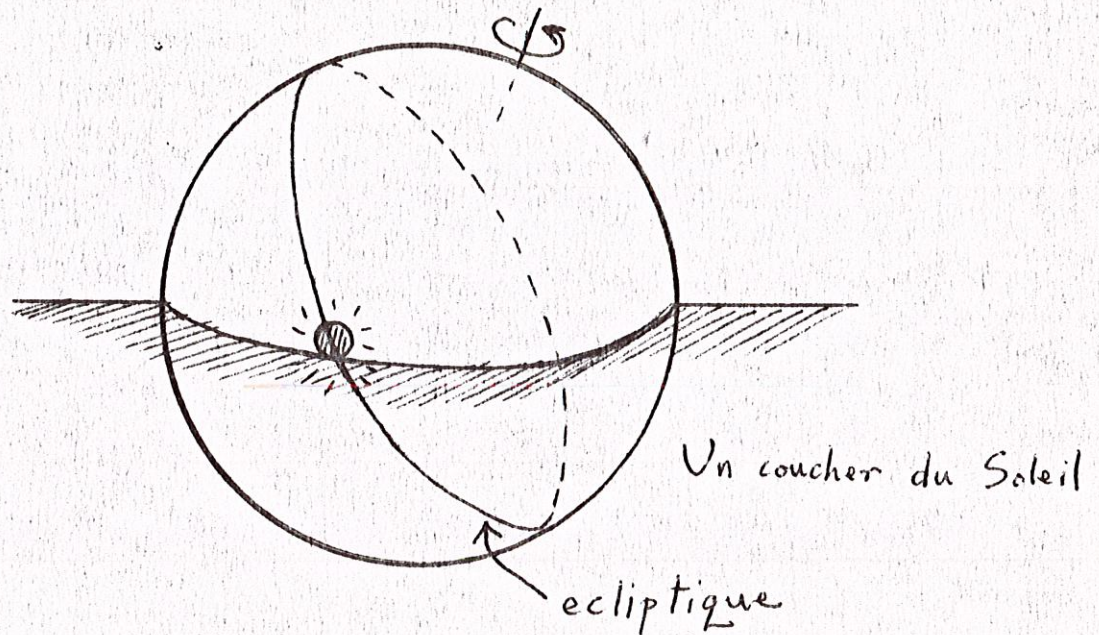


Par conséquent la période de rotation de la Terre, mesurée en unités de temps sidéral est supérieure à 24 heures.

Question A3 : Calculer la période de rotation de la Terre en heures, minutes, secondes sidérales.

Nos affaires courantes sont réglées par le Soleil (nonobstant les prétentions des astrologues) : un jour civil est défini par la période entre deux retours successifs du Soleil au même point dans le ciel.

Or, le Soleil n'est pas "collé" à la sphère céleste : la Terre tourne autour du Soleil, ce qui se traduit par un mouvement du Soleil sur l'écliptique. Les 360° de l'écliptique sont parcourus en 1 an dans le sens ouest-est. Si l'on compte environ 365 jours dans un an, en un jour le Soleil traverse environ 1° par rapport aux étoiles "fixes" :



par conséquent, le jour civil est de $1 \times \frac{24}{360} \times 60 \approx 4$ minutes plus long que le jour sidéral.

QUESTION A4 : Nos pendules ordinaires sont ajustées pour s'accorder avec le mouvement du Soleil. On observe une étoile donnée à 2h du matin. A quelle heure observera-t-on la même étoile 2 nuits plus tard ?

.....Mais Est-ce que la Terre tourne rond ?

La définition du jour et de ses sous-divisions (heure, minute, seconde) est basée sur la rotation de la Terre ; les divers mouvements réguliers de la Terre dans l'espace correspondent à plusieurs échelles de temps qui sont liées entre elles de façon simple.

Cette définition suppose que la rotation de la Terre est constante -c'est-à-dire que "l'horloge" ne change pas de vitesse.

Malheureusement, cette hypothèse n'est correcte qu'en première approximation. Deux phénomènes importants la remettent en cause :

a) La rotation est amortie régulièrement (voir plus loin, effet de marées) : cet amortissement est très lent, de l'ordre de 0,002 s par siècle.

b) La rotation change de période de façon irrégulière -le jour peut changer subitement sa durée d'un temps de l'ordre de 10^{-3} s. Les fluctuations peuvent être positives ou négatives, et apparaissent à des intervalles irréguliers de l'ordre de quelques dizaines d'années. L'origine de ces fluctuations n'est pas connue -elles doivent être liées aux processus internes de la Terre.

Si on suppose que la Terre tourne uniformément, ces effets (et en particulier le dernier) se traduisent par des mouvements aberrants de la Lune et des planètes proches -ces astres vont apparemment accélérer ou ralentir sans aucun rapport avec le mouvement et l'attraction des autres corps du système solaire.

Donc, en dessous d'une précision de $10^{-5}\%$, la sphère céleste (La Terre) s'avère une mauvaise horloge : on est amené à étalonner le mouvement de la Terre avec un phénomène cyclique plus stable du laboratoire -par exemple les oscillations d'un cristal de quartz, ou mieux encore, les oscillations d'un rayonnement monochromatique.

QUEL JOUR SOMMES-NOUS ?

Les phases de la Lune se répètent de façon très régulière, et un cycle complet dure 29,53 jours : c'est le mois lunaire. Une unité naturelle (puisqu'elle est facile à observer) pourrait être le quart de la Lune : sa durée est de $\frac{29,53}{4} = 7,38$ jours, et c'est l'origine de notre semaine de 7 jours.

Plusieurs civilisations anciennes utilisaient la Lune comme base de leur calendrier : le retour de chaque nouvelle lune signalait le début d'un nouveau mois, et on comptait un nombre entier de mois dans l'année.

On remarque que la Lune fait environ 12,3 tours de la Terre pendant l'année : par conséquent, un calendrier basé exclusivement sur le mois lunaire est déjà quelques jours en retard (si on compte 12 mois dans l'année) ou en avance (si on compte 13 mois) à la fin d'une année. A la fin de 3 ans il est sérieusement décalé par rapport à la position actuelle de la Terre autour du Soleil.

Le calendrier servait pour signaler les saisons, mais les saisons dépendent du Soleil ; par conséquent, les civilisations qui utilisaient le mois lunaire étaient obligées d'intercaler (ou de sauter) un ou deux mois tous les 3 ou 4 ans. Cette procédure était peu précise, et parfois amenait à des situations ridicules.

Le calendrier moderne (calendrier Grégorien) est basé sur une définition astronomique de l'année : une année tropicale est le temps au cours duquel le Soleil vu de la Terre reprend la même position par rapport aux étoiles "fixes". En pratique, c'est l'intervalle entre deux équinoxes vernal.

Une année ainsi définie comporte 365,2422 jours civils : si alors on compte 365 jours par an, il suffit d'intercaler 1 jour tous les 4 ans (les années bissextiles) pour "rattraper" le Soleil. Dans une année bissextile, le temps calculé à partir des jours civils n'est que $(4 \times 365 + 1) - (4 \times 365,2422) \approx 0,03$ jours en avance sur le temps "tropical". Il suffit alors de ne pas intercaler un jour au nouvel an de chaque siècle pour maintenir un très bon accord entre jours civils et temps tropical.

Dans ce système, les longueurs des mois ne sont plus liées aux phases de la Lune, le nombre de jours (28, 30 et 31) étant choisi de façon à ce que la somme de 12 mois (on retient tout de même quelques idées ancestrales) donne 365 jours.

Remarquons que l'année tropicale définie par rapport au point γ (ou la position du Soleil par rapport aux étoiles) n'est qu'une première approximation de la période de rotation de la Terre autour du Soleil : la précession du point γ (la précession des équinoxes) fait que l'année tropicale est 0,0142 jours plus courte que la période de rotation. En effet, la Terre reprend la même position par rapport aux étoiles "fixes" tous les 365,2564 jours civils : une année ainsi définie s'appelle une année sidérale (une définition conforme à celle du jour sidéral).

LES ETOILES FIXES SONT-ELLES FIXES ?

Jusqu'à une précision angulaire d'une dizaine de secondes, les positions relatives des étoiles ne changent pas, et la notion primitive de voûte céleste sur laquelle les étoiles seraient "clouées" reste utile.

Quand la précision des mesures dépasse cette limite, l'approximation n'est plus correcte. Trois cas principaux se présentent.

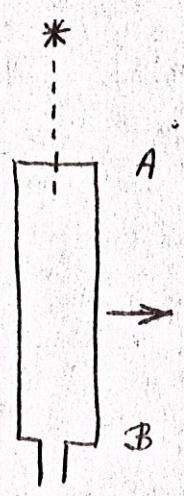
1) Le mouvement propre. Les étoiles ne sont pas au repos par rapport au système solaire : tout bouge. Le mouvement apparent d'une étoile donnée dépend de sa vitesse et de sa distance par rapport à la Terre : néanmoins, grosso modo, le mouvement apparent sera d'autant plus grand que l'étoile est plus proche. Par conséquent, le mouvement d'une étoile proche par rapport au système solaire se traduit par un changement de sa position apparente par rapport à un fond d'étoiles très lointaines. On appelle ce changement de position "le mouvement propre" ; remarquons qu'il est cumulatif et donc qu'un petit mouvement propre peut être détecté par des observations étalées sur plusieurs années. Le mouvement propre connu le plus grand est celui de "l'étoile de Barnard", il est de 10" par an ; plus typiquement, les valeurs pour les étoiles brillantes visibles à l'oeil nu sont de l'ordre de 1" par an.

2) L'aberration de la Lumière

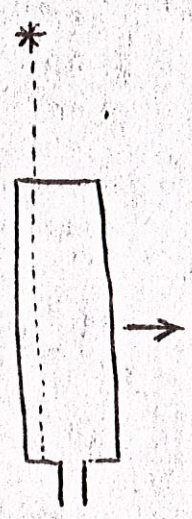
Considérons un télescope pointé vers une étoile.



Si le télescope est au repos par rapport à l'étoile, la lumière dirigée parallèlement à l'axe du télescope et entrant dans l'objectif en A, sortira en B au centre de l'oculaire.

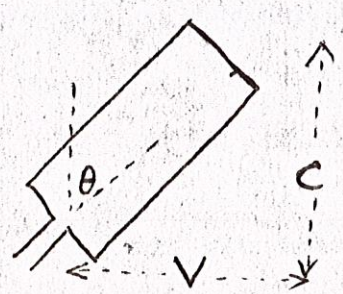


la lumière entre dans l'objectif



la lumière arrive sur le plan de l'oculaire, mais l'oculaire n'est plus là.

Supposons maintenant que le télescope a une composante de vitesse V perpendiculaire à la direction de l'étoile. La vitesse de propagation de la lumière est finie : donc la lumière met un temps fini pour aller de A en B. Pendant ce temps, l'oculaire se déplace et n'est plus au point d'arrivée de la lumière.

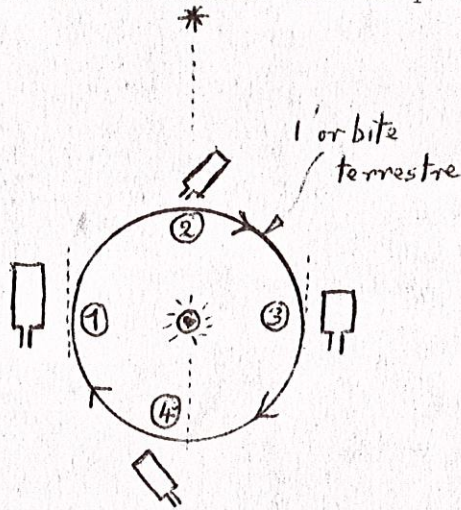


→ direction du mouvement du télescope

Pour "capter" la lumière, il faut incliner le télescope d'un angle θ par rapport à la direction "réelle" de l'étoile :

$$\text{tg } \theta = V/c$$

Or la Terre tournant autour du Soleil, un télescope ne sera en général pas au repos par rapport à une étoile quelconque. Considérons une étoile très lointaine dans le plan de l'orbite. Deux fois par an (positions



1 et 3), la Terre n'a aucune composante de vitesse perpendiculaire à l'étoile.

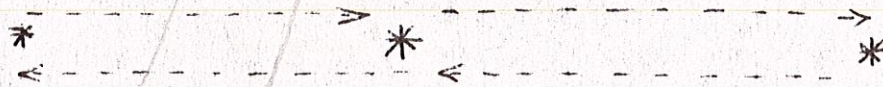
Par contre, aux positions 2 et 4 la composante de vitesse perpendiculaire à la direction de l'étoile est maximum ; donc il va falloir incliner le télescope pour observer l'étoile : la position apparente de l'étoile a changé.

L'inclinaison a la même valeur dans les deux cas, mais dans des sens opposés (pourquoi ?).

Pour des positions intermédiaires de la Terre; on observe des déplacements apparents intermédiaires -au cours de l'année, la position de l'étoile "oscille" autour de sa "vraie" position.

position apparente de l'étoile en 4

position apparente de l'étoile en 2



position apparente de l'étoile quand la Terre est en 1 ou 3.

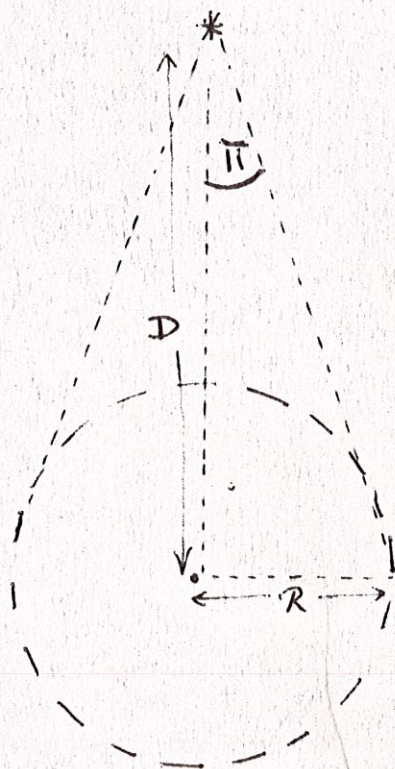
Un phénomène analogue se reproduit pour les étoiles hors du plan orbital de la Terre.

Ce phénomène ne dépend pas de la distance de l'étoile : toute étoile change sa position apparente de façon périodique. L'amplitude de ce mouvement est de 20,49", ce qui nous permet de calculer la vitesse orbitale de la Terre :

$$v/c \approx 20,49''.$$

On trouve alors $v \approx 29,8 \text{ km.S}^{-1}$.

QUESTION A5 : Ce résultat dépend-il de la longueur du télescope ?

3) La parallaxe stellaire

Comme la Terre tourne autour du Soleil, la position apparente d'une étoile proche devrait changer par rapport aux étoiles très lointaines ; ce déplacement devrait être périodique de période un an. Les parallaxes stellaires sont très petites : l'étoile la plus proche (α Centauri) a une parallaxe de $\approx 0,8''$. Comme on connaît le rayon R de l'orbite de la Terre, la parallaxe π nous permet de déterminer directement la distance d'une étoile très proche :

$$D \approx \frac{R}{\pi}$$

QUESTION A6 : Trouver quelques tests observationnels pour distinguer les effets du mouvement propre, de l'aberration et de la parallaxe.