Principes basiques de navigation astronomique et évolution de ses instruments

0.- Avertissement en guise d'introduction

Ce modeste document est une approche simple de quelques connaissances de la mécanique céleste et des méthodes de positionnement astronomique, vues par un navigateur.

Le texte et les dessins sont basés sur ceux d'un support de cours de navigation astronomique établi dans les années quatre-vingt-dix et fruit de mes années de navigation au long cours en qualité d'officier de marine marchande et de skipper de plaisance.
Ce document ne remplace donc nullement le cours précité et n'a d'autre prétention que celle de permettre à ceux que cela intéresse de mieux cerner les problèmes de navigation astronomique et de voir l'évolution des méthodes et instruments au cours du temps.
L'astronavigation étant une science appliquée, elle diffère de ce fait de l'astronomie des scientifiques en divers points. Que les astronomes nous pardonnent certaines infidélités !

Dans un premier chapitre sont décrits les principes rudimentaires de la navigation astronomique en fin de XXe siècle.
On y retrouvera aussi diverses définitions de cette matière.
A la suite seront décrites certaines particularités des astres les plus utilisés.
Nous suivrons plus loin l'évolution dans le temps des connaissances et des instruments.

La Terre daterait de quelque 4.6 milliards d'années, l'Univers de beaucoup plus longtemps selon les derniers calculs des astrophysiciens actuels.
Les premiers primates auraient vu le jour il y a 65 millions d'années et la position verticale remonte à environ 13 millions d'années. Il faut encore attendre une dizaine de millions d'années pour voir les premiers bipèdes et les outils primitifs auraient 2.5 millions d'années.
Pour se faire une meilleure idée de ces chiffres, on peut s'imaginer que si la Terre datait aujourd'hui d'une de nos années, il a fallu attendre le dernier jour du dernier mois, soit le 31 décembre pour que les premiers hominoïdés prennent la position verticale. Selon cette même échelle, les premiers outils susmentionnés ne remontent qu'à cinq heures et le Christ est né il y a moins de15 secondes.

Pourtant il y avait déjà des étoiles dans le ciel et les diverses civilisations ont eu des milliers d'années pour en observer les mouvements, y dessiner des constellations et découvrir petit à petit les cycles et évolutions des astres fixes comme errants. Ces derniers ont assez tôt été domptés pour servir à l'homme de repère géographique, puis de moyen de se situer sur Terre. Combien de générations d'observation intelligente ont été nécessaires à ces êtres pour avoir le génie de planter un bâton en terre pour observer, puis prévoir le retour des saisons en mesurant la longueur de l'ombre portée? L'homme découvre ici la notion du temps et des cycles.

Hormis la découverte de la verticalité qu'impose la gravité, l'homme a aussi déterminé que le plan de l'horizon était l'autre axe qui lui permettrait de mesurer le monde.

Pour la détermination de la rotondité de la Terre, des orbites des astres et la notion des distances astronomiques il faudra encore quelques secondes sur notre échelle annuelle de l'âge de la Planète Bleue.

On voit que tôt dans l'Antiquité il a été possible d'établir la latitude des lieux et tout marin peut la déterminer sans trop de difficulté, que ce soit par la longueur du jour ou par la position des étoiles (Soleil compris) au-dessus de l'horizon.
Par contre, la mesure de la longitude se fait en fonction du temps, car ladite longitude n'est autre qu'une expression de différence de temps entre deux lieux. Avec la technologie et la réalisation du chronomètre, la détermination de la longitude deviendra pratiquement un jeu d'enfant.

Alors, bienvenue à bord, largons les amarres et jouons !

Et pour débuter…

Le principe du tire-bouchon

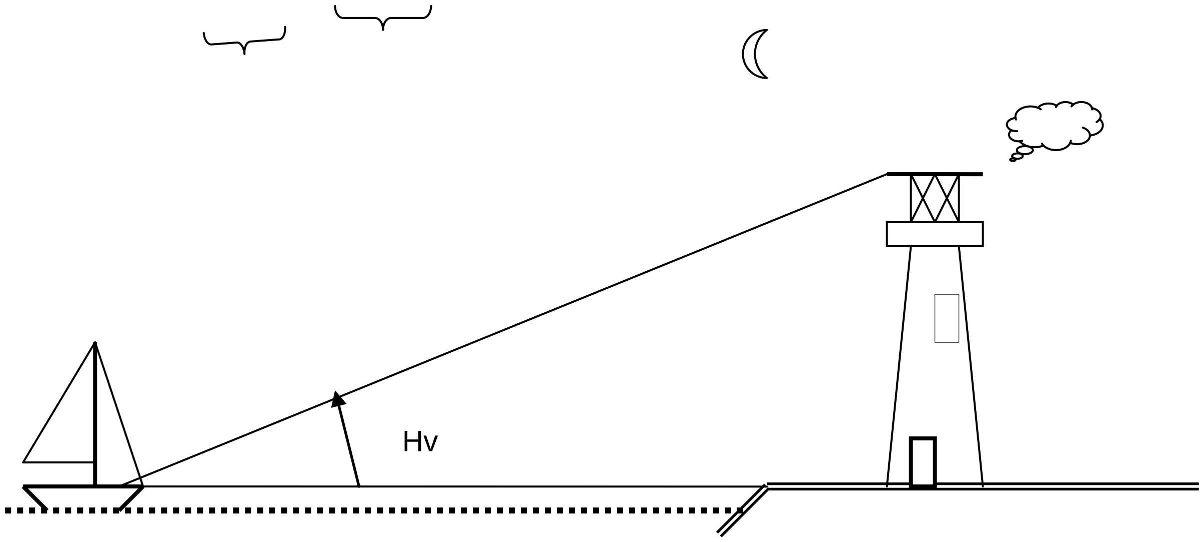
Pour ouvrir une bouteille de vin, il y a deux possibilités :
- Faire tourner le tire-bouchon dans le sens des aiguilles de la montre sans que la bouteille ne bouge.
- Tourner la bouteille dans le sens contraire des aiguilles de la montre, en maintenant le tire-bouchon bien fixement.

Ces deux solutions conduisent au même résultat et une fois la bouteille ouverte on ne peut savoir laquelle des deux méthodes a été utilisée.

De la même manière, avec les astres et les étoiles, on peut concevoir la situation de deux façons : ou les astres tournent au tour d'une Terre fixe, ou notre planète se déplace dans une voûte céleste d'étoiles fixes.

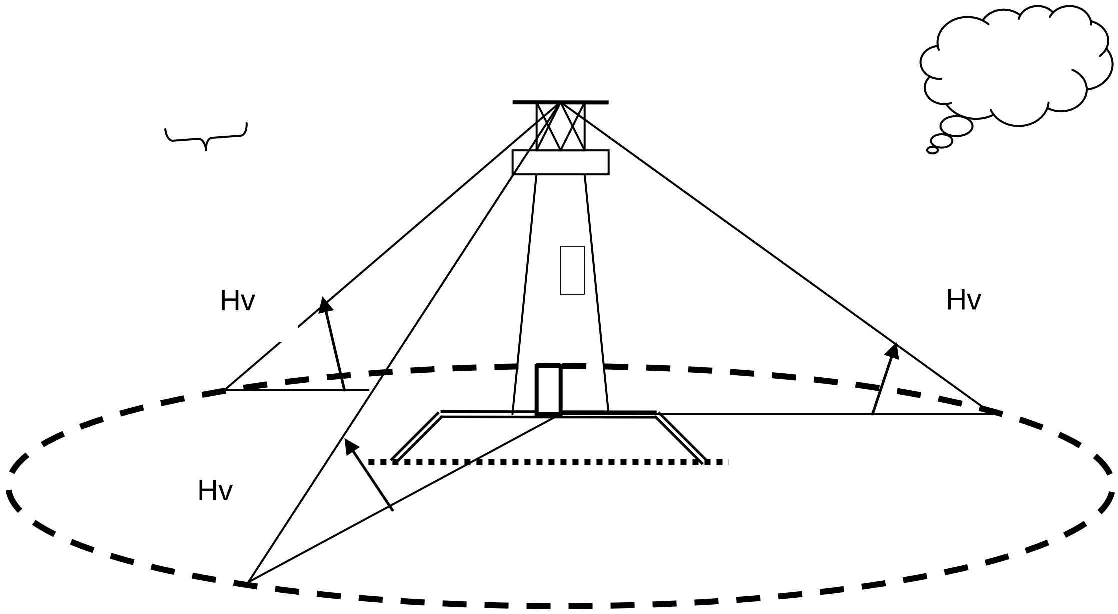
Principes basiques de la navigation astronomique et définitions

1.- Hauteur vraie (Hv)



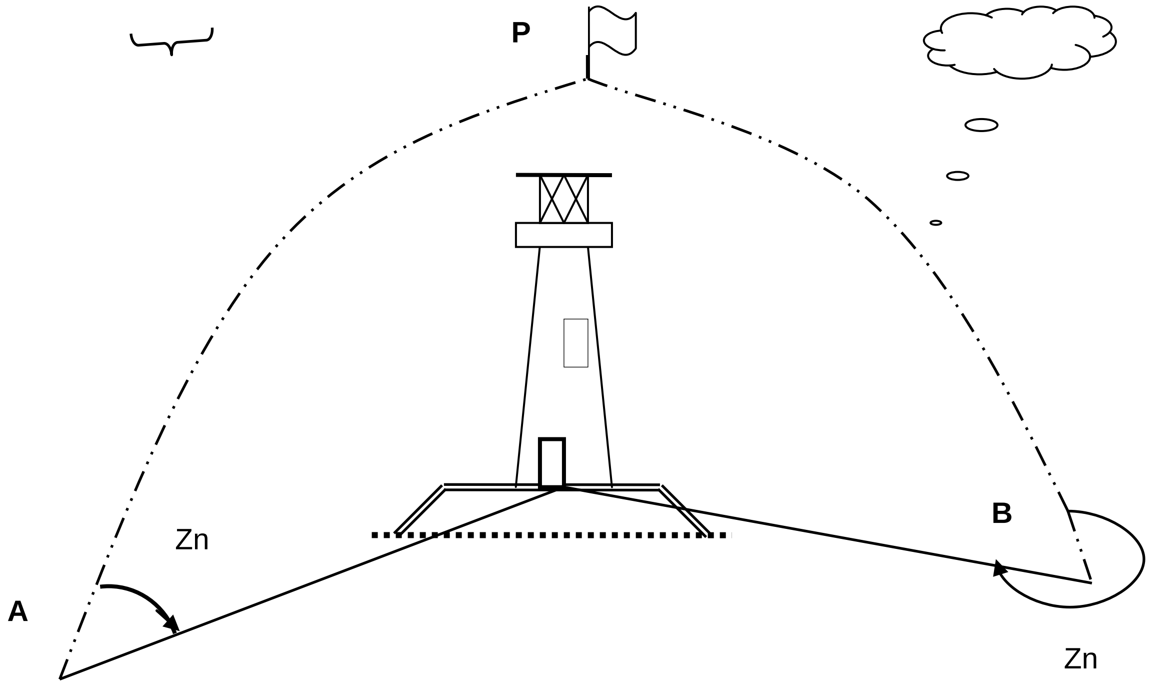
La « hauteur » d’un objet ou d’un astre est l’angle vertical entre cet objet et l’horizon. Il peut être dit que plus on s’approche d’un phare, plus l’angle augmente et plus on s’éloigne dudit phare, plus l’angle (ou la hauteur) diminue.
La hauteur vraie correspond pratiquement à l'éloignement de l’objet.

2.- Cercle d'égales hauteurs



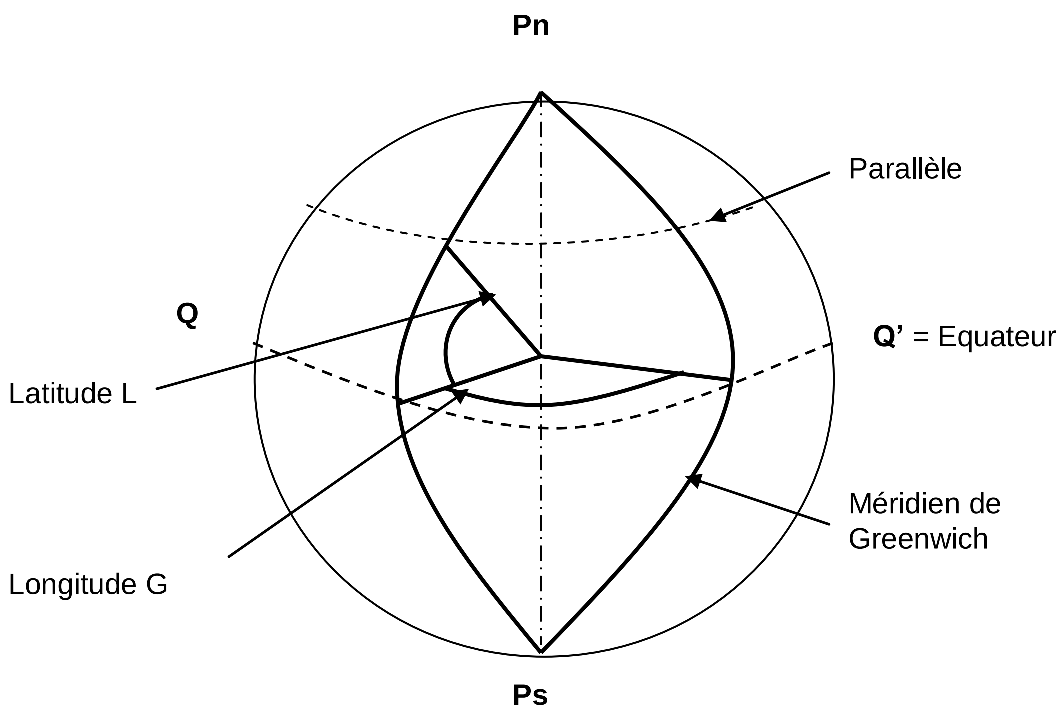
Tous les observateurs qui voient le phare à la même hauteur en dessus de l’horizon sont situés sur un « cercle d’égales hauteurs ». Le centre de ce cercle est la base du phare.

3.- Azimut



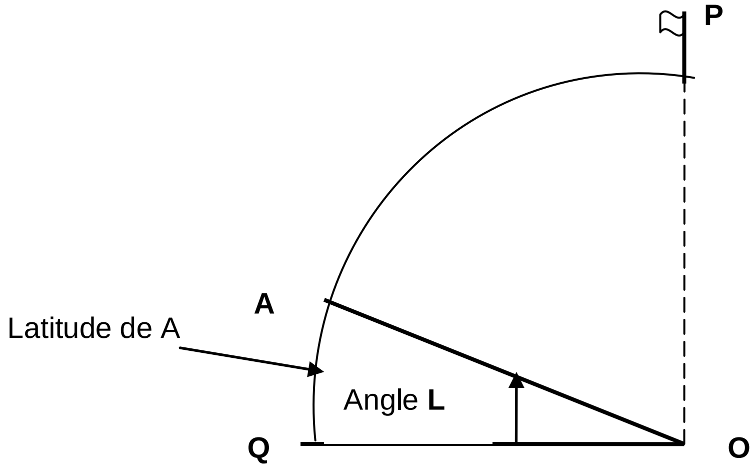
Les observateurs « A » et « B », situés sur le cercle d'égales hauteurs sont à la même distance du phare, mais le voient dans une direction différente. En d'autres mots, le compas de « A » indique un cap différent à celui de « B » pour se diriger vers le phare.
A et B sont différenciés par leur relèvement, l'azimut (Zn) en navigation astronomique. Actuellement, l'azimut se mesure entre le Nord et l'objet, dans le sens horaire.

4.- Définition d'un point



Sur la sphère terrestre, les positions sont données en degrés et minutes.

5.- Distances angulaires



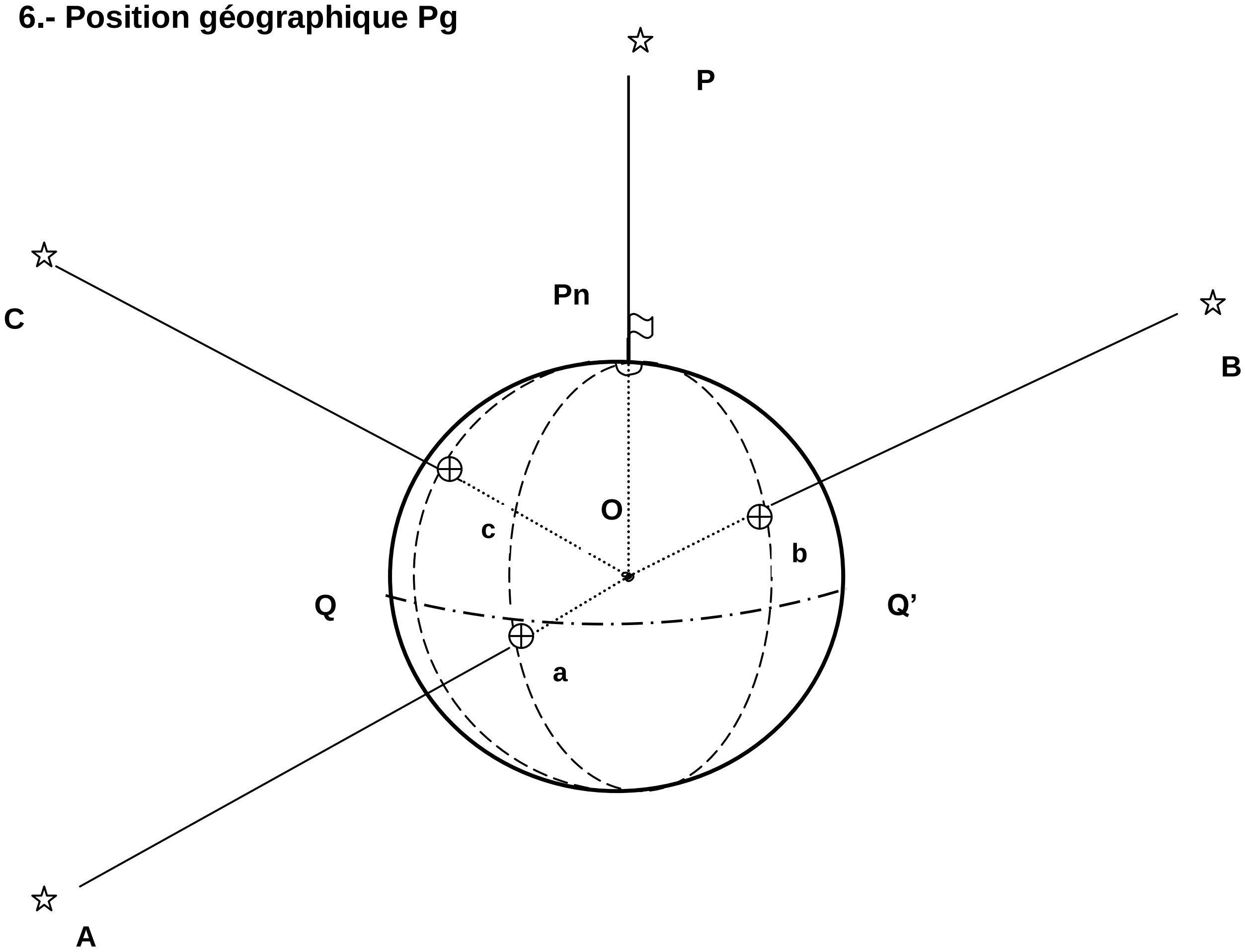
Sur une sphère, la distance angulaire entre deux points (positions), mesurée sur un arc de grand cercle, correspond à l’angle au centre, exprimé en degrés et minutes de cet arc (pas de seconde en navigation astronomique).

On appelle grand cercle, un cercle qui a pour centre celui de la sphère et qui la divise en deux parties (hémisphères). Par exemple :

- Les méridiens (passant par les pôles) sont des grand cercle, de même que l’équateur.
- Les parallèles, excepté l’équateur, ne sont pas des grands cercles.

Dans la figure ci-dessus A = 10° = 600 Milles, puisque 1 M = 1 ' d'arc = 1852 m

6.- Position géographique Pg



Chaque astre se trouve en un point bien précis de la surface terrestre, au zénith d'un observateur. Nous nommerons ce point la position géographique (Pg) de l'astre.

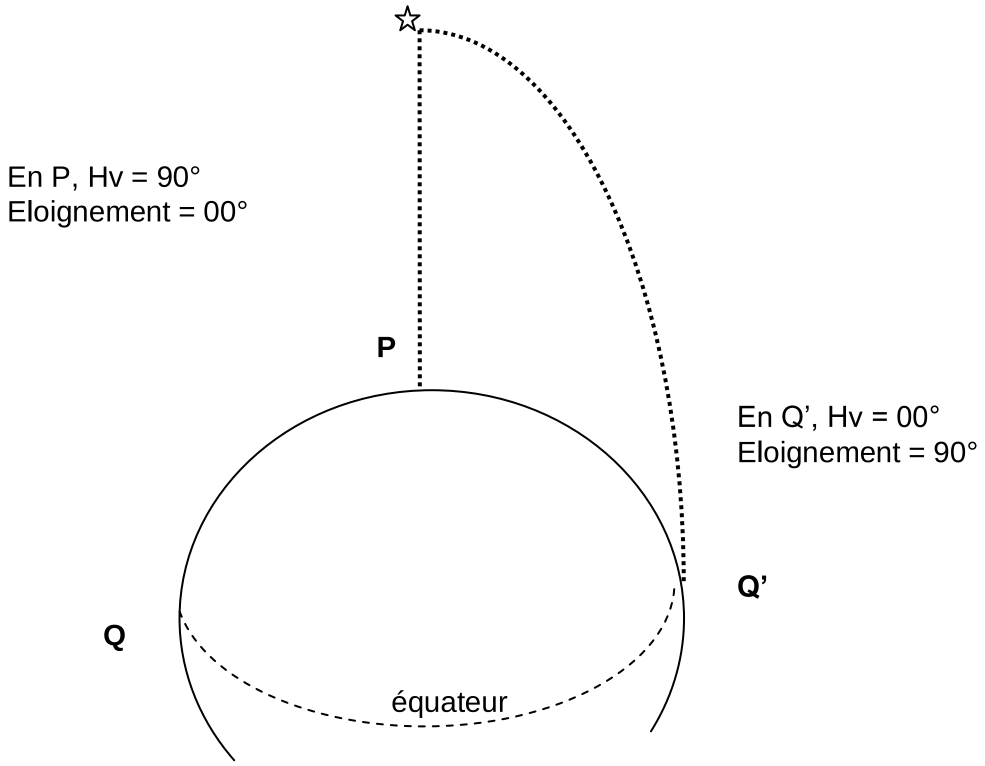
La position géographique est en quelque sorte le pied de notre phare ci-dessus.

7.- Hauteur d'un astre, H

La hauteur d'un astre au dessus de l'horizon est inversement proportionnelle à l'éloignement de la position géographique de l'astre:

Plus nous nous éloignons de la Pg, moins grande est la hauteur de l'astre au dessus de l'horizon; plus nous nous approchons de la Pg, plus grande est la hauteur de l'astre au dessus de l'horizon.

Exemple théorique de l'étoile polaire :



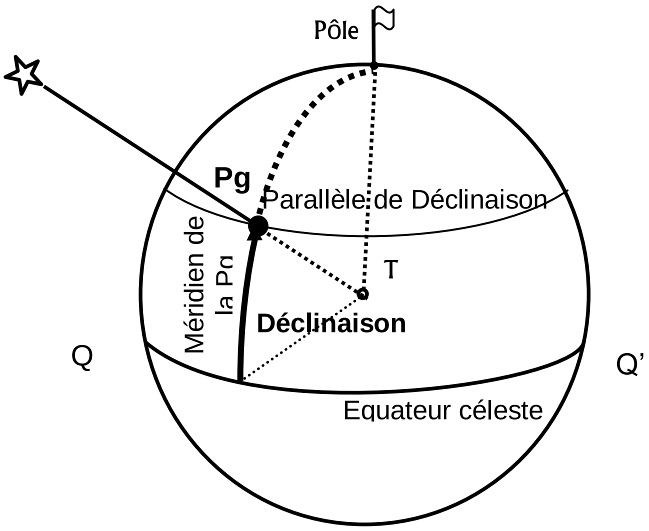
8.-L'heure

L'heure UTC (temps universel coordonné) correspond au temps moyen sur le méridien qui passe par Greenwich. méridien 0 pour les longitudes. L'heure UTC est la même dans tout le monde. Pour que l'heure en un lieu quelconque sur la terre corresponde env. à l'heure solaire, la surface de la terre a été divisée en fuseaux horaires théoriques de 15° de largeur (360° / 24 = 15°). Le fuseau horaire de Greenwich est compris entre 7°30'E à 7°30'W.
Pour compenser les irrégularités de la rotation de la terre, on ajoute une à deux fois par an une seconde intercalaire.

Les lettres TU (pour Temps Universel) sont fréquemment utilisées en français et cette abréviation a été adoptée dans ce document.

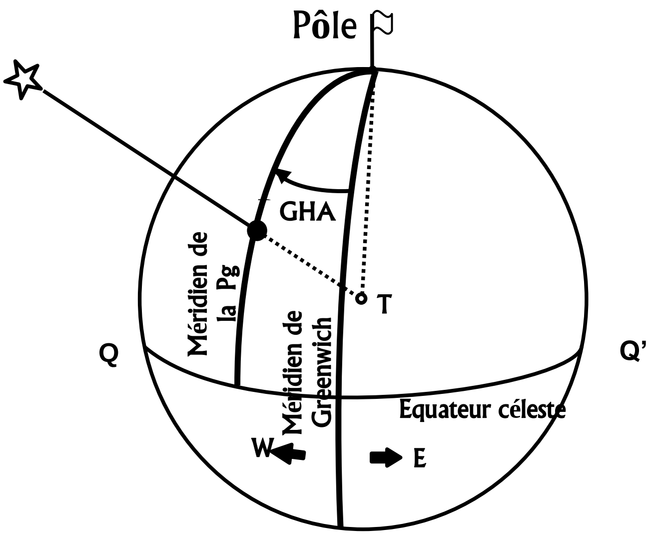
9.- La déclinaison D

La déclinaison D est l'angle entre l'équateur et la position géographique d'un astre. La déclinaison varie entre 0° et 90° Nord et 0° et 90° Sud.



10.- L' angle horaire (GHA)

L'angle horaire (GHA) est l'angle entre le méridien origine (Greenwich) et la position géographique de l'astre. L'angle horaire se compte de 0° à 360° dans le sens des aiguilles d'une montre.



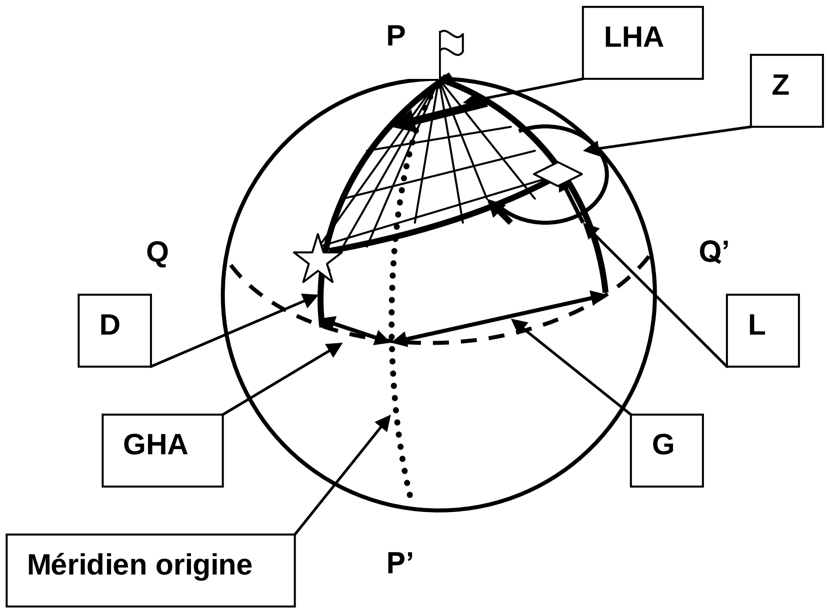
11.- Les éphémérides nautiques

Elles nous donnent pour chaque instant de l'année la position géographique (Pg) des astres. Pour éviter la confusion, ces positions ne sont pas données en latitude et longitude, mais en déclinaison et angle horaire.

Exemple : 23 avril 2007, Soleil

1500h	45° 24.5'	N 12° 32.5'	
(GMT)	(GHA)	(DEC)	(en anglais)
(UT)	(AHvo)	(D)	(en français)

12.- Triangle astronomique



◇ = O Observateur se trouvant en latitude (L) et longitude (G)

☆ = Pg Position géographique de l'astre situé par déclinaison (D) et angle horaire (GHA)

P P' Pôles
Q Q' Equateur
Zn Azimut de l'astre. Angle entre le méridien de l'observateur et la direction de l'astre, comme un relèvement
LHA Angle au pôle. Angle entre le méridien de l'observateur et celui de la Pg de l'astre.

Le triangle astronomique est celui qui relie les points ◇ et ☆ au pôle P de l'hémisphère dans lequel se trouve l'observateur.

Nous connaissons beaucoup d'éléments de ce triangle astronomique et pouvons calculer les autres. Soit les éléments:

- connus — l'angle au pôle (LHA)
  la latitude (L) ou son complément (90 - L)
  la déclinaison (D) ou son complément (90 - D)

- à déterminer — le côté O - Pg qui correspond à l'éloignement de la Pg par rapport à l'observateur, donc à 90 - hc.
  L'angle en O de la direction de l'astre qui est l'azimut (Zn).

Voir également les planches en fin de document.

13.- Formules mathématiques

Il n’est pas nécessaire d’être mathématicien pour résoudre les calculs astronomiques propre à la navigation.

Voici cependant quelques formules mathématiques usuelles pour résoudre un tel triangle sphérique:

Théorème du cosinus :

Dans un triangle sphérique on peut dire que le cosinus d’un côté est fonction des deux autres côtés ainsi que de l’angle oppose selon la formule suivante :

$$\text{Cos } a = \cos b * \cos c + \sin c * \cos A$$

Pour la navigation astronomique, on retiendra les formules suivantes :

$$\sin Hc = (\sin L * \sin D) + (\cos L * \cos D * \cos LHA)$$

$$\text{cotg } Zn = (\sin L * \text{cotg } LHA) - \left(\frac{\text{tg } D * \cos L}{\sin LHA}\right)$$

Dans tous les cas, pour obtenir la valeur de la hauteur d’un astre (H) et son azimut, nous devons connaître :

- La valeur de l’angle horaire local (LHA)

- La valeur de la déclinaison de l’astre (D)

- La valeur de la latitude (L)

Ceci signifie que dans la pratique nous avons besoin de deux éléments:

- Les éphémérides nautiques

- Un chronomètre

Les tables de calculs facilitent l'opération qui peut également se faire en utilisant les logarithmes ou une calculatrice électronique.

Parte.

¶ Tabla del verdadero.

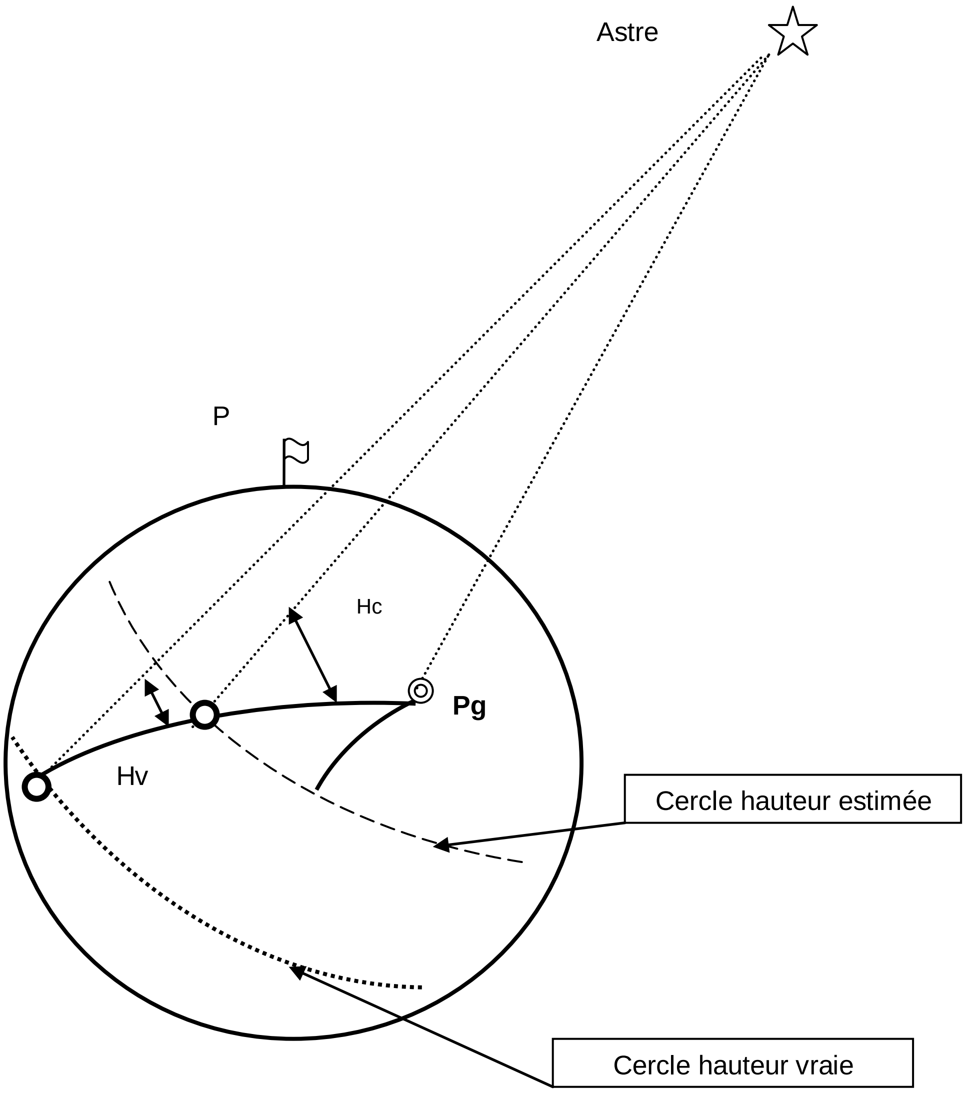
Meses.	Enero.		Febrero.		Março.		Abril.		Mayo.		Junio.	
Signos.	Capricor.		Aquarius		Piscis.		Aries.		Taurus.		Geminis.	
Dias	G	M	G	M	G	M	G	M	G	M	G	M
1	20	22	21	53	20	55	21	24	20	21	19	55
2	21	24	22	54	21	55	22	22	21	18	20	52
3	22	25	23	54	22	54	23	21	22	16	21	49
4	23	26	24	55	23	54	24	19	23	13	22	46
5	24	27	25	55	24	53	25	17	24	11	23	43
6	25	28	26	56	25	53	26	16	25	8	24	40
7	26	30	27	56	26	52	27	14	26	6	25	37
8	27	31	28	56	27	52	28	12	27	3	26	34
9	28	32	29	57	28	51	29	10	28	0	27	31
10	29	33	0 ♓	57	29	50	0 ♉	8	28	58	28	28
11	0 ♒	55	1	57	0 ♈	49	1	6	29	55	29	25
12	1	36	2	58	1	48	2	4	0 ♊	52	0 ♋	22
13	2	37	3	58	2	47	3	2	1	50	1	19
14	3	38	4	58	3	46	4	0	2	47	2	16
15	4	39	5	58	4	45	4	58	3	44	3	13
16	5	40	6	58	5	44	5	56	4	41	4	10
17	6	41	7	58	6	43	6	54	5	38	5	7
18	7	42	8	58	7	42	7	52	6	36	6	4
19	8	43	9	58	8	41	8	49	7	33	7	1
20	9	44	10	58	9	39	9	47	8	30	7	58
21	10	45	11	58	10	38	10	45	9	27	8	55
22	11	46	12	58	11	37	11	43	10	24	9	52
23	12	47	13	57	12	36	12	40	11	21	10	49
24	13	48	14	57	13	34	13	38	12	18	11	46
25	14	48	15	57	14	33	14	36	13	15	12	43
26	15	49	16	56	15	32	15	33	14	12	13	40
27	16	50	17	56	16	30	16	31	15	10	14	37
28	17	51	18	56	17	29	17	28	16	7	15	34
29	18	51	19	56	18	28	18	26	17	4	16	31
30	19	52			19	27	19	25	18	1	17	29
31	20	52			20	25			18	58		

Éphémérides du XVI^{e} siècle

14.- Théorie de Marcq Saint-Hilaire

A un moment précis et à un endroit donné, il est possible de calculer exactement la hauteur et l'azimut d'un astre au moyen des éphémérides
.
En comparant les calculs faits pour un lieu d'observation fixe présumé, la position auxiliaire Pa, nous pouvons déterminer "l'erreur" et rectifier la position présumée. Plus précisément, la comparaison entre le calcul et l'observation (faite au moyen du sextant), nous indique si nous sommes plus ou moins proches de la position géographique Pg de l'astre et l'azimut nous donne la direction.

La différence d'azimut entre le lieu présumé et le lieu réel est négligeable. Deux observateurs situés à des endroits différents, même à 60 M l'un de l'autre, verront l'astre dans la même direction, azimut (Zn). La différence d'angle est pratiquement non mesurable. Par exemple, nous avons le même Zn du soleil à Genève ou à Lausanne.



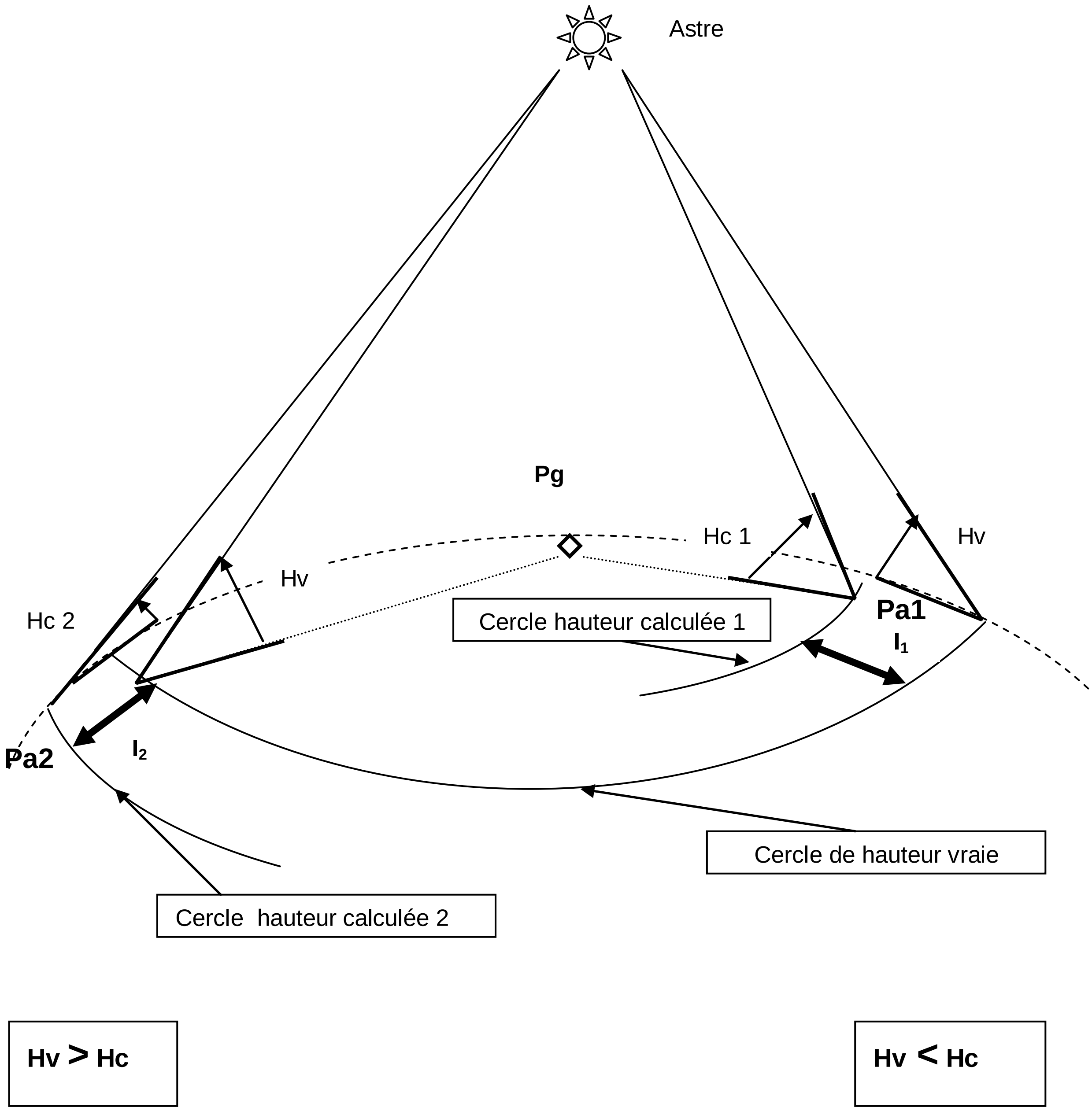
O = Observateur

O' = Observateur estimé

Sur la sphère terrestre

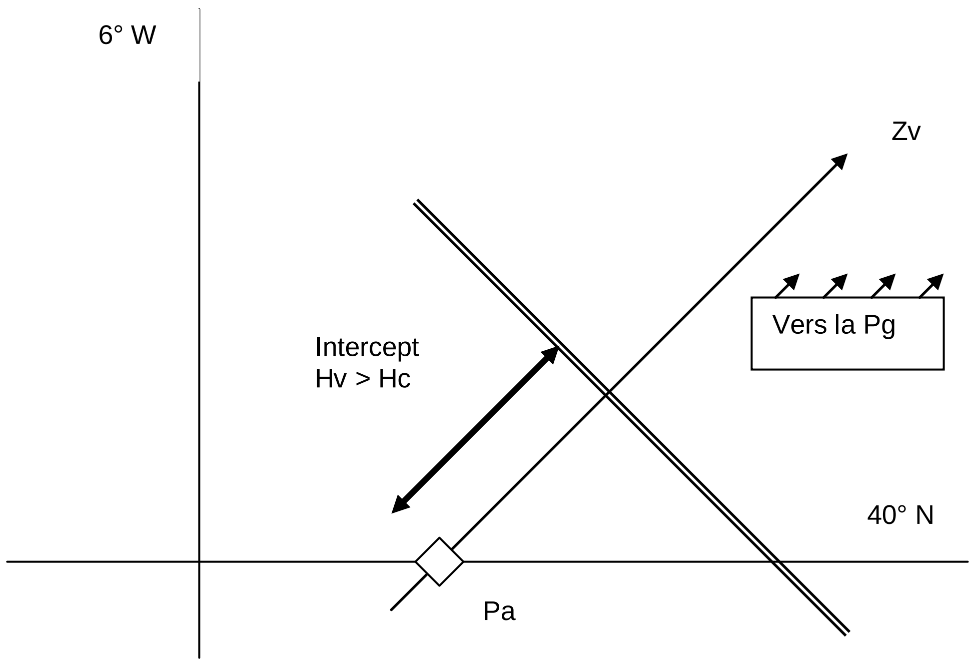
Il y a lieu maintenant de comparer le résultat calculé pour un observateur en Pa avec notre observation. St Hilaire et sa méthode nous ont appris que:

- si la hauteur vraie (mesurée avec le sextant) Hv est plus grande que la hauteur calculée (tables) Hc, notre droite de hauteur se trouvera plus près de la position géographique de l'astre Pg et ce d'autant de milles qu'il y a de minutes de différence entre Hv et Hc.
- Si la hauteur vraie (mesurée avec le sextant) Hv est plus petite que la hauteur calculée (tables) Hc, notre droite de hauteur se trouvera plus éloignée de la position géographique de l'astre Pg et ce d'autant de milles qu'il y a de minutes de différence entre Hv et Hc.



Sur la carte

Marq Saint-Hilaire substitua dans sa théorie une petite portion du cercle d’égales hauteurs par une droite, tangente audit cercle.



Ainsi la droite de hauteur représente une petite portion du cercle d'égales hauteurs centré sur la position géographique Pg.

La différence d'azimut sur une si petite portion de cercle d'égales hauteurs n'est pas significative et nous admettons ainsi que l'azimut est le même à la position approchée (Pa) et à la position de l'observateur (Po).

Une seule droite de hauteur, tout comme un seul relèvement, ne nous donne pas une position, mais un simple ligne de position. Pour obtenir un point concret, il nous faudra avoir deux, voir plusieurs droites de hauteur.

Le soleil

1.- L'astre

Cette étoile est l'astre le plus utilisé en navigation astronomique. La Terre fait le tour du Soleil en un peu plus de 365 jours. En un an le Soleil semble se déplacer au travers des constellations du zodiac sur une trajectoire appelée "écliptique".

Le mot "année" vient du latin *annulus*, l'anneau. L'année est l'intervalle de temps qui nous ramène les saisons et la notion est connue depuis la préhistoire. Initialement, les égyptiens n'accordaient que 360 jours à l'année. Cette notion passe à 365 jours 4000 ans avant notre ère.
Le temps qui s'écoule entre deux passages consécutifs du Soleil sur l'équinoxe du printemps, l'année tropique, représente 365,2422 jours. C'est elle qui ramène les saisons. Il y a aussi l'année sidérale de 365,25636 jours, mais pour la navigation astronomique nous nous contenterons de cette approche simple.

L'orbite décrite par la Terre est elliptique. Elle se situe entre 150'000'000 km (aphélie le 04-juillet) et 147'000'000 km (périhélie le 01 janvier). De ce fait nous voyons le diamètre du Soleil plus petit en été qu'en hiver, la moyenne étant de 32' d'angle.

Le Soleil permet de déterminer des droites de hauteur à divers moments de la journée. Depuis l'antiquité on a utilisé le Soleil dans le but de déterminer la latitude, sans chronomètre.
En disposant de l'heure TU, nous allons pouvoir calculer des droites de hauteur qui nous situeront également en longitude. Procédons par ordre de simplicité.

2.- La méridienne

Le calcul de la latitude par l'observation de la hauteur de la méridienne est très simple et rapide. Pratiquement, seul le soleil est utilisé pour ce genre d'observation car il est visible en même temps que l'horizon. C'est la plus ancienne méthode de positionnement, déjà utilisée depuis de nombreux siècles.

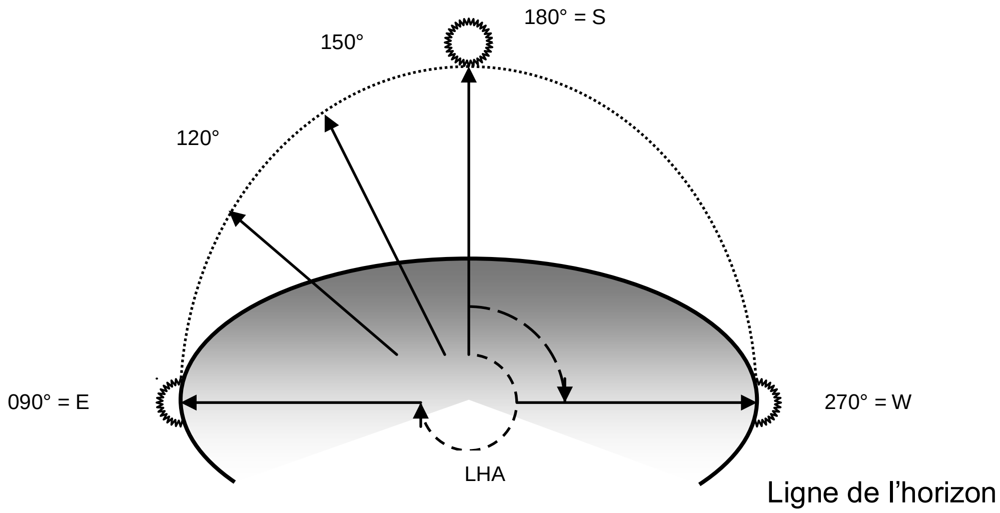
Au moment du passage au méridien d'un astre, l'azimut de ce dernier est de 000° ou 180° car à cet instant l'observateur et l'astre se trouvent sur le même méridien.

Bien qu'au point de vue astronomique il y ait une différence entre "passage au méridien" et "culmination" du soleil, le navigateur peut admettre que les deux événements se confondent. Aussi accepterons nous que la hauteur méridienne du soleil est la hauteur de cet astre au dessus de l'horizon au moment où il est au plus haut, soit à sa culmination. La connaissance exacte de l'heure n'est pas indispensable au calcul puisque seule la déclinaison est utilisée.

Si nous prenons des hauteurs égales du soleil avant et après son passage au méridien, la culmination se trouve pratiquement au milieu, que ce soit en ce qui concerne le temps ou qu'il s'agisse du trajet effectué par l'astre.

Au moment de la méridienne, le LHA du soleil est exactement de 000° ou de 360°. Entre le lever et la méridienne de ce même astre, la valeur du LHA est "grande", entre ~ 270° et 360°, alors qu'après la méridienne la valeur du LHA est "petite, soit entre 000° et ~ 90°.

On notera que la formule mathématique pour résoudre le triangle astronomique se converti dans le cas de la méridienne en une simple addition algébrique.

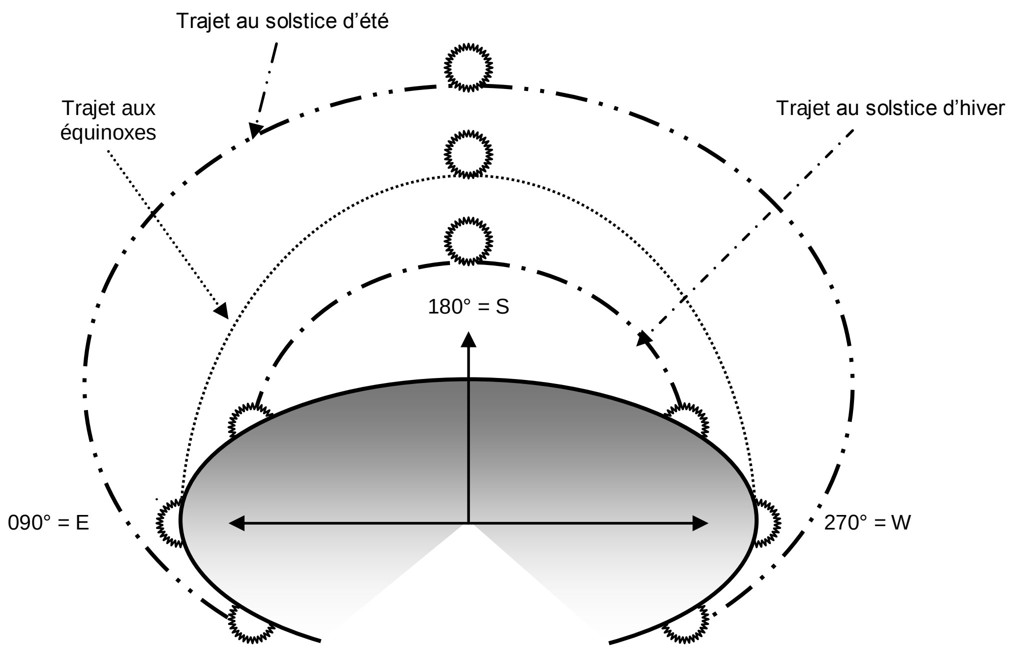


Hémisphère nord, époque de l'équinoxe

Zv entre 090° y 180°	Zv entre 180° y 270°
LHA entre 270° y 360°	LHA entre 000° y 090°

Le croquis ci-dessus illustre cette approche de la méridienne.

Concept de la méridienne, hémisphère nord :



La formule mathématique qui s'utilise le plus est:

Culmination regardant au Nord : $L = D - Dz$
Culmination regardant au Sud : $L = D + Dz$

Déclinaison et latitudes sont positives si elles sont Nord et négatives si elles sont Sud.

On peut également utiliser la clé suivante (voir formules de calcul) :

$$
\begin{array}{lll}
Dz\ (90° - Hv) & + DN & = LN \\
 & + DS & = LS \\
 & - DN & = LS \\
 & - DS & = LN
\end{array}
$$

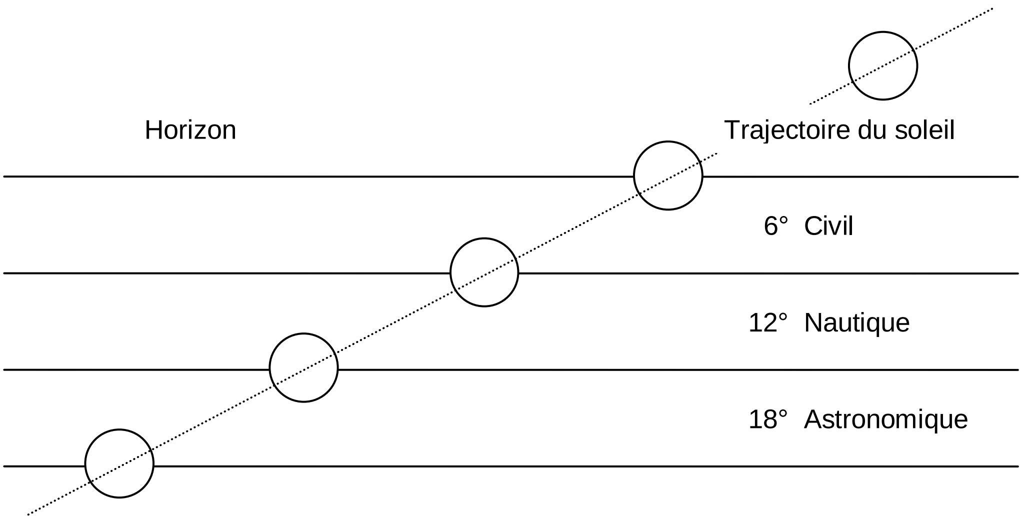
Les étoiles

Le gros avantage des étoiles, c'est que nous pouvons prendre diverses mesures de hauteur, pratiquement simultanément. Nous évitons ainsi tous les problèmes en relation avec le transport de point.

Les mesures au sextant doivent être prises alors que les étoiles utilisées sont visibles et qu'il en est de même avec l'horizon. Cela signifie qu'il est possible d'effectuer des mesures entre le début de l'aube et le lever du Soleil, ou entre son coucher et la fin du crépuscule.

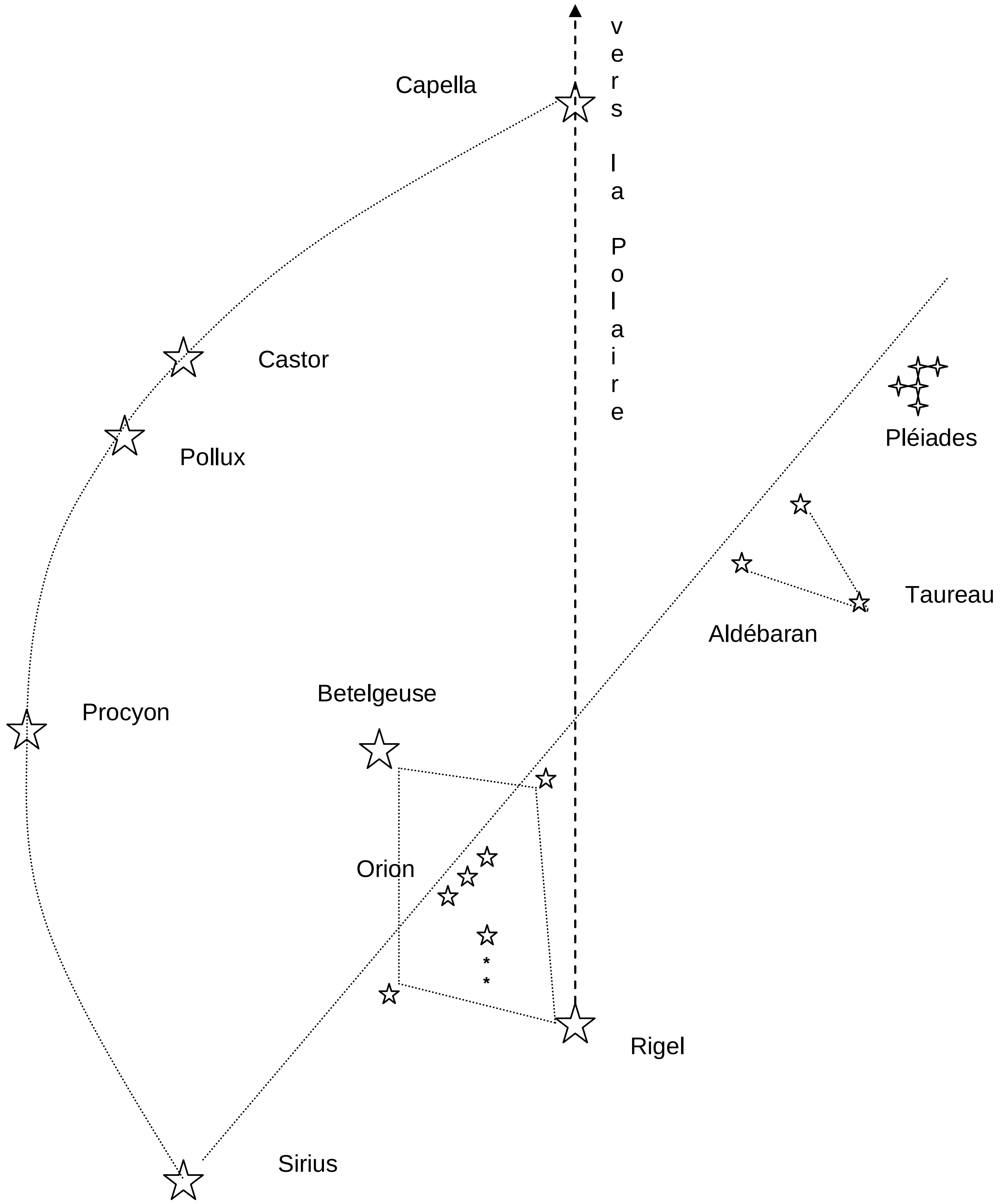
De nuit, il ne faut pas utiliser l'horizon éclairé par la Lune, car la lumière de cette dernière fausse les mesures.

En astronomie nous distinguons le crépuscule civile (Soleil à 6° sous l'horizon) du crépuscule nautique (Soleil 12° sous l'horizon) et finalement du crépuscule astronomique (Soleil 18° sous l'horizon, soit la nuit noire). Il est évident que si le Soleil se lève ou se couche " verticalement ", comme sous les tropiques, la diminution de luminosité est rapide. Par contre, dans les latitudes plus élevées, la trajectoire du Soleil est de plus en plus oblique et l'aube ou le crépuscule sont plus long, voire très long près des pôles, pouvant aller jusqu'à une période de 24 heures !



Bien que les étoiles se déplacent les unes par rapport aux autres à des vitesses vertigineuses, l'image de la voûte céleste peut être considérée comme constante pendant toute une année. Cela revient à dire que le GHA et la Déclinaison des étoiles reste constante entre le premier et le dernier jour de l'année. Cela revient aussi à dire qu'elles ne bougent pas les unes par rapport aux autres. Dès lors, connaissant la Pg d'une étoile ou d'un point de la voûte, nous sommes en mesure de pouvoir retrouver la Pg de toutes les autres étoiles utilisées en navigation astronomique.

Nous utiliserons comme point de référence (ou comme zéro) le Point Vernal, soit le point à l'infini déterminé par la direction Terre-Soleil à l'instant précis de l'équinoxe de printemps, soit aussi l'instant ou la déclinaison du Soleil passe de Sud à Nord et vaut donc zéro.



Constellation d'Orion, joyau des nuits d'hiver

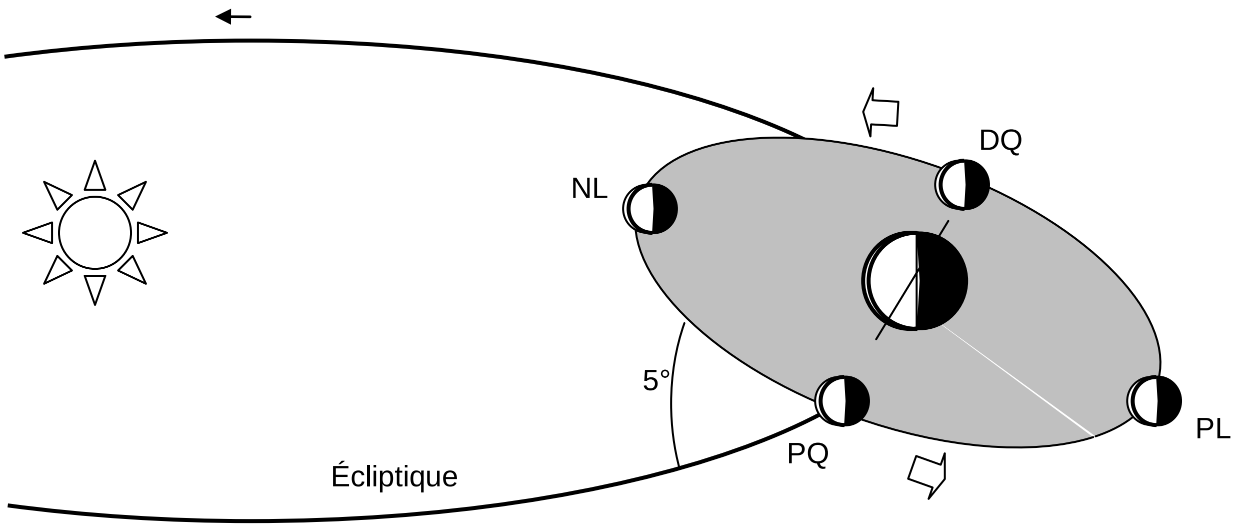
La lune

1.- L'astre

Quelques mots au sujet de Dame la Lune. Elle a un diamètre de 3476 Km (près d'un quart de celui notre planète) et tourne autour de la Terre sur une orbite elliptique de 356'000 Km en périgée et 406'000 Km en apogée.

Le plan de cette orbite lunaire fait avec celui de la Terre un angle d'environ 5°. Le passage de notre satellite sur le plan de l'orbite terrestre se nomme un **noeud** (ascendant ou descendant), une notion bien utilisée en agriculture par exemple.

La Lune met 27 jours, 7 heures, 43 minutes et 12 secondes pour effectuer sa rotation autour de la Terre, ce qui est appelé sa **période sidérale**. Pour l'observateur terrestre, la Lune aura parcouru sur son chemin toutes les constellations zodiacales. Chaque jour, elle se lève quelques 50 minutes plus tard, modifiant d'autant l'heure des marées, comme le savent les marins.

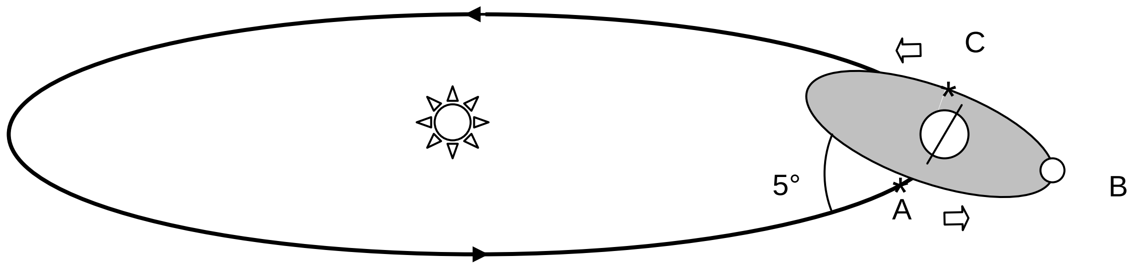


Écliptique et plan de rotation de la lune

NL = nouvelle lune
PQ = premier quartier
PL = pleine lune
DQ = dernier quartier

La combinaison du mouvement de la Lune autour de la Terre et du chemin parcouru par notre planète sur son orbite autour du Soleil font que le temps nécessaire à ce que les trois astres se retrouvent sur la même phase (p. ex. pleine lune) est de 29 jours, 12 heures, 44 minutes et 3 secondes, ce qui se nomme la **période synodique** de la lune.

La période synodique est donc d’environ 2 jours supérieure à la période sidérale. C’est cette période qui est utilisée dans les calendriers lunaires pratiqués par de nombreuses civilisations.
Citons par exemple les Gaulois avec une année de 13 mois lunaires de 28 jours (13 x 28 = 364 jours, ce qui est assez proche de l’année solaire).



Écliptique et conjonction
Éclipse de lune

A = noeud descendant
B = pleine lune
C = noeud ascendant

Lorsque les positions relatives des trois astres sont proches, la Lune nous montre sa face obscure et nous ne la voyons donc pas. La période dite de **Nouvelle Lune** dure environ 4 jours, deux avant et deux après la nouvelle lune théorique.

Lorsque notre satellite se sépare d’un angle suffisant du Soleil (vers l’Est pour nous), on voit apparaître le premier croissant de Lune.
C’est la phase croissante de la Lune.

Après une semaine, on se trouve en période dite de **premier quartier**. La Lune est visible pendant l’après-midi et pendant le début de la nuit, se levant comme nous l’avons vu chaque jour un peu plus tard.

Encore une autre semaine et nous sommes en phase de la **Pleine Lune**, l’astre nous accompagne toute la nuit.

Puis vient la phase décroissante de la Lune et, sept jours plus tard, nous sommes au **dernier quartier**. La Lune se lève à l’est vers minuit et reste encore visible la matinée.

Cela signifie pour le navigateur que notre satellite est visible en même temps que le soleil pendant pratiquement 14 jours par mois. On aurait donc grand tort de ne pas utiliser cette possibilité de déterminer en navigation astronomique notre position par une paire de droites de hauteurs simultanées de ces deux astres du ciel.

Dame la Lune tourne sur elle-même en une période de rotation correspondant exactement à sa période de translation autour de la Terre. De ce fait, elle nous présente toujours la même face, ce qui ne relève pas du hasard.
Il y a en effet une interaction entre les deux astres, à mettre sur le compte de l'importante force gravitationnelle de la Terre.

Lorsque le Soleil, la Terre et la Lune se retrouvent sur un même axe, on parle d'alignement, voire de conjonction. Si le plan de l'orbite de la Lune n'était pas incliné de quelques 5° par rapport à celui de l'écliptique, il y aurait forcément un alignement tous les 14 jours, une fois lors de la nouvelle lune, la suivante lors de la pleine lune.

De fait, cette situation ne se présente vraiment que tous les six mois environ et ce fut le cas la nuit du 15 juin 2011 où nous avons pu observer une éclipse totale de la Lune peu avant minuit. Gageons que les marées étaient très vives!

Nous avons vu que pour qu'il y ait **éclipse**, il faut que Soleil, Terre et Lune se trouvent pratiquement sur un même alignement, une éclipse ne pouvant donc avoir lieu que lors d'une nouvelle ou pleine lune.

Lors d'une **éclipse de soleil**, l'ombre de la (nouvelle) lune se note sur la surface de la Terre. Dite éclipse peut être totale ou partielle.
Sur Terre, la bande de visibilité d'une éclipse de soleil totale n'excède pas quelques centaines de kilomètres. Elle n'est donc pas visible en tout lieu.

L'**éclipse de lune** est due au passage de notre satellite dans le cône d'ombre de la Terre. Le diamètre de notre planète étant plus important que celui de la Lune, le cône d'ombre produit par la Terre est assez grand pour obscurcir l'entier de la surface de la Lune et le phénomène est visible depuis toutes nos latitudes.
Le phénomène dure environ 200 minutes, dont 60 de phase d'obscurcissement total. Pour l'éclipse du 15 juin 2011, cela a été entre 21 :22 et 23 :03 UT+2.

Nous constatons que globalement les mouvements des astres concernés sont assez complexes. En fait, il faut attendre **près de 19 années** (théoriquement 6'939 jours et quelques) pour retomber sur un ciel avec les astres concernés occupant des positions relatives pratiquement identiques.
Ces connaissances du temps n'étaient pas ignorées des anciens, même au néolithique. Des sites astronomiques comme Stonehenge et tant d'autres sur la planète l'ont bien montré. Par ailleurs, il y a à peine quelques siècles les calculs des marées se basaient encore sur ce cycle.

Cela signifie-t-il que les éphémérides et tables de marées de 1994 seraient utilisables pour l'année 2012 ? Malheureusement, si nous voulons l'exactitude exigée par une navigation sérieuse ce n'est pas véritablement le cas. En effet la durée du cycle n'est pas un chiffre parfaitement rond (en fait 6939,6882 jours) et il ne faut pas négliger les phénomènes de précession, nutations et de libration lunaire, ni le ralentissement de la révolution de la Terre sur son axe.

Sur la base des éléments connus aujourd'hui, on peut admettre que finalement la répétition de l'image exacte ne se répète que toutes les 70'499'183 lunaisons, soit 5'700'000 années…

On appelle **Epacte** le chiffre correspondant au nombre de jours qu'il faut ajouter à l'année lunaire pour qu'elle soit égale à l'année solaire. Ce concept faisait partie des connaissances dont avaient besoin les marins, tant pour la navigation astronomique que pour prédire les marées.

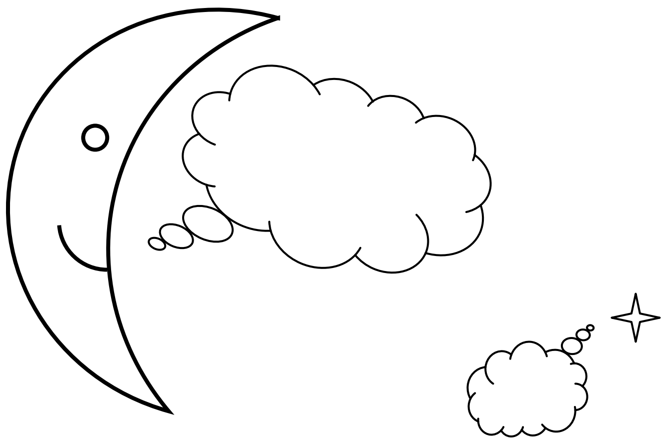
Au vu de ce qui précède, on comprendra que l'épacte est un chiffre qui change d'année en année.

Il peut être intéressant de voir les différentes valeurs pour ces prochaines années.

2008	21 jours	2013	18 jours	2018	13 jours	2023	08 jours
2009	04 jours	2014	28 jours	2019	24 jours	2024	19 jours
2010	15 jours	2015	09 jours	2020	06 jours	2025	02 jours
2011	26 jours	2016	20 jours	2021	17 jours	2026	11 jours
2012	18 jours	2017	03 jours	2022	27 jours	2027	21 jours

Ainsi, en ajoutant la durée du mois lunaire (période synodique de 29 jours, 12 heures, 44 minutes, 3 secondes) on peut obtenir un calendrier lunaire pour l'année qui nous intéresse.

Exemple pour 2010 :
L'épacte étant de 15 jours, la nouvelle lune antérieure sera le 16 décembre 2009 (31 décembre – 15 jours).
La première pleine lune aura lieu un peu plus de 14 jours plus tard (16 décembre + 14 jours = 30 décembre).
La nouvelle lune de janvier 2010 se produira le 15 janvier (16 décembre + 29½ jours arrondis).



Les planètes

1.- Généralités

Les planètes sont des astres qui comme la Terre gravitent autour de la même étoile, le Soleil.
Ces astres ne scintillent pas, sauf dans des circonstances atmosphériques exceptionnelles.
Les planètes se déplacent sur la sphère céleste, d'où leur nom d'astres errants. On les observe toujours dans la zone de l'écliptique, passant d'une constellation zodiacale à l'autre.

On distingue les planètes dites inférieures des planètes supérieures. Les premières ont des orbites intérieures à celle de la Terre. Ce sont Vénus et Mercure.

Parmi les planètes extérieures, seules Jupiter et Saturne s'utilisent en navigation astronomique, les autres étant trop peu visibles, voire invisibles dans la lunette d'un sextant.

La magnitude (brillance) de Vénus et de Jupiter est importante et en fait les deux planètes les plus utilisées en navigation astronomique. Vénus a un éclat plus brillant que les étoiles les plus lumineuses.
Mars, avec sa couleur rougeâtre est facilement identifiable et vient en troisième position.

Vénus est une planète intérieure. De ce fait, elle se lève ou se couche peu avant ou après le Soleil. Vénus avance ou rétrograde selon la saison et se retrouve de ce fait pendant 10 mois comme astre du matin, puis reste inobservable pendant 3-4 mois avant de devenir pour 10 nouveaux mois un astre errant du soir.
On l'appelle aussi « l'étoile du berger ».

♀	♂	♃	♄
Vénus	**Mars**	**Jupiter**	**Saturne**

Évolution des instruments de mesures

1.- Généralités

Nous avons vu que pour faire le point, il faut trouver sa latitude et sa longitude. La première est assez aisée à déterminer, même avec des instruments simples. Mais il n'en est pas de même avec la longitude qui nécessite une liaison avec le méridien d'origine.

En 1600, PHILIPPE III d'Espagne fut le premier à proposer une prime à celui qui trouverait une solution pratique au problème de la détermination de la longitude en mer. Il fut suivi par la Hollande, la France et surtout l'Angleterre qui proposa, en 1714, une prime de 20'000 Livres (soit plus d'un million de US$ de nos jours) à qui trouverait une méthode permettant de calculer la longitude à 30 milles près.

Dans son ouvrage intitulé « Astronomie », LA LANDE, écrivait en 1771 qu'il était de première importance de pouvoir trouver, en pleine mer, le degré de longitude où on se trouve. Il continuait en rappelant qu'il n'est pas difficile de trouver l'heure qu'il est sur un bateau en observant la hauteur d'un astre. Pour LA LANDE, le problème se réduit dès lors à savoir en tout temps l'heure qu'il est au méridien d'origine, soit Paris pour cet astronome français.

En Espagne, de grands navigateurs tels Pedro de Medina, Martin Cortés et beaucoup d'autres ont publié des quantités importantes de livres et tables, lesquels ont été traduits dans de nombreuses langues entre le XV^{e} et le XVII^{e} siècle en particulier. De ce fait le directeur du musée naval de Madrid écrivait à juste titre que l'Europe a appris à naviguer avec des livres espagnole.

Les instruments capables de mesurer le temps et de donner l'heure ont marqué l'humanité depuis la nuit des temps. Dans le chapitre qui suit, nous allons mentionner quelques-uns de ces instruments, mais le thème reste très vaste, tout comme la littérature y relative. Nous ne saurions que vous inciter à consulter les quelques titres mentionnés ci-dessous.

2.- Les instruments de mesure du temps

2.1 Le Gnomon

Ce mot vient du grec et signifie « l'indicateur ». Simple bâton planté en terre, cet instrument peut servir à mesurer l'heure, mais aussi la latitude d'un lieu.

Introduit dans la Grèce antique par Anaximandre, l'instrument babylonien était cependant connu depuis le 24^{e} siècle avant notre ère par les Chinois qui l'utilisaient déjà du temps de Yao.

L'ombre du bâton est infinie au lever du soleil, puis diminue d'heure en heure pour être la plus courte lors du passage de l'astre au méridien, avant de continuer son chemin en sens inverse au cours de l'après-midi. On obtient ainsi l'heure solaire.

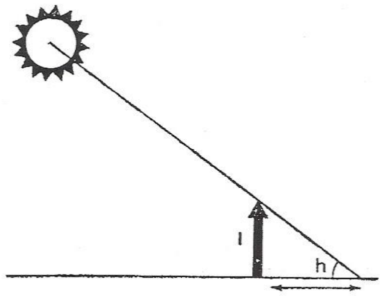


Fig. 1

La longueur de l'ombre varie aussi au cours des saisons. Une observation de l'extrémité de l'ombre du gnomon montre qu'aux équinoxes, elle décrit une droite, la trajectoire du soleil étant exactement sur l'axe est-ouest.
Au cours des autres périodes de l'année, cette même ombre décrit une courbe qui s'accentue jusqu'à un maximum lors du solstice.

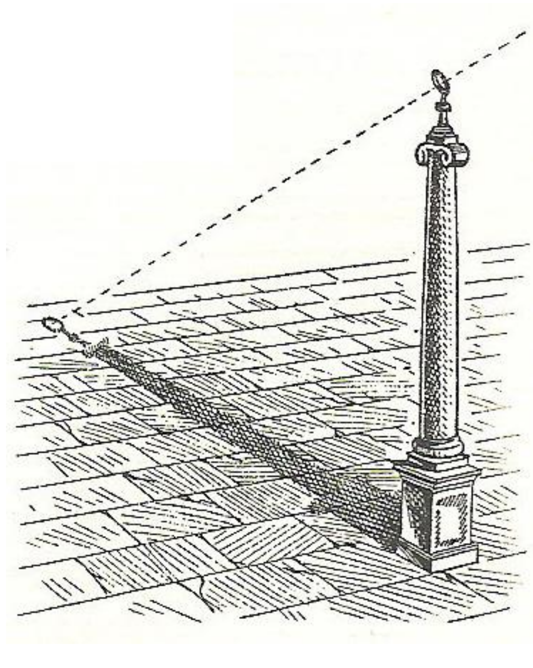


Fig. 2

Enfin, cet instrument permet aussi de mesurer la latitude d'un lieu, comme le décrit l'architecte romain VITRUVE et comme l'avait déjà écrit Claude PTOLEMEE au 2^{e} siècle de notre ère dans son ouvrage « l'Almageste », allant jusqu'à publier une « table des ombres » permettant de retrouver la latitude d'un lieu.

2.1.1 Base théorique

A la simple observation, on constate que le chemin parcouru par l'ombre de l'extrémité d'un gnomon est une droite aux équinoxes (Déclinaison = zéro), mais décrit une hyperbole inclinée vers le sud au solstice d'hiver (Déclinaison = maximum sud), une hyperbole inclinée vers le nord au solstice d'été (Déclinaison = maximum nord).On rappellera ici qu'au moment de la culmination, l'ombre est la plus courte et que l'on peut obtenir la latitude par la simple formule :

- Latitude = Distance zénithale + Déclinaison

ou

- Latitude = (90°- hauteur) + Déclinaison (N = +, S = -)

On a aussi : Tangente Hauteur du Soleil = hauteur du gnomon / longueur de l'ombre

Les anciens indiquaient la latitude d'un lieu par le simple rapport mathématique « gnomon / ombre », au moment de l'équinoxe (Déclinaison = zéro). Par exemple, la latitude de Rome était indiquée par Vitruve dans son ouvrage écrit au 1er siècle av. JC, comme un rapport de l'ombre équinoxiale de 8/9, ce qui se traduirait aujourd'hui par 41°38'.

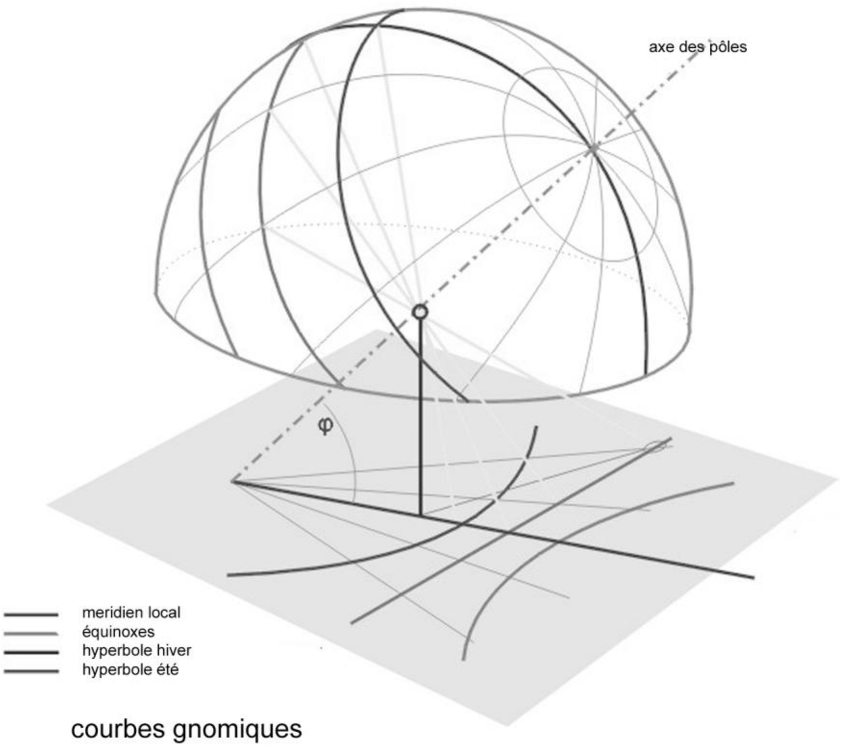


Fig. 3

2.1.2 Le compas solaire des Vikings

Une découverte faite dans le fjord de Uunartoq au Groenland montre que les Vikings étaient aussi avancés en art de navigation que les populations du bord de la Méditerranée.

De nombreuses investigations ont été faites par le Capitaine Carl Solver et Søren Thirslund sur les objets vikings découverts sur l'île verte.
Leurs recherches ont démontré que si les encoches qui marquent le bord du disque sont une forme de rose des vents, les lignes transversales gravées dans le bois de cette relique sont en fait des lignes gnomiques représentant le trajet de l'ombre d'un petit gnomon au cours de la journée.
Il suffit ainsi de placer cette ombre sur la ligne gnomique pour que l'utilisateur retrouve ainsi une indication du nord vrai (en fait le méridien du lieu), ce qui lui permet de déterminer le cap suivi par le navigateur.

Il reste évident que la ligne gnomique est déterminée par la latitude du lieu et par la Déclinaison (donc la date de la navigation effectuée). Les matheux retrouveront la formule mathématique dans tout bon ouvrage de navigation astronomique.

Un tel compas solaire n'était donc exact que pour une latitude et une période donnée. Des essais ont été réalisés dans les deux hémisphères par des navigateurs chevronnés, tel Sir Robin Knox Johnson. Il en résulte que pour une période de plusieurs semaines, la précision de l'instrument est plus que valable, tant que le changement de latitude n'est pas trop important.

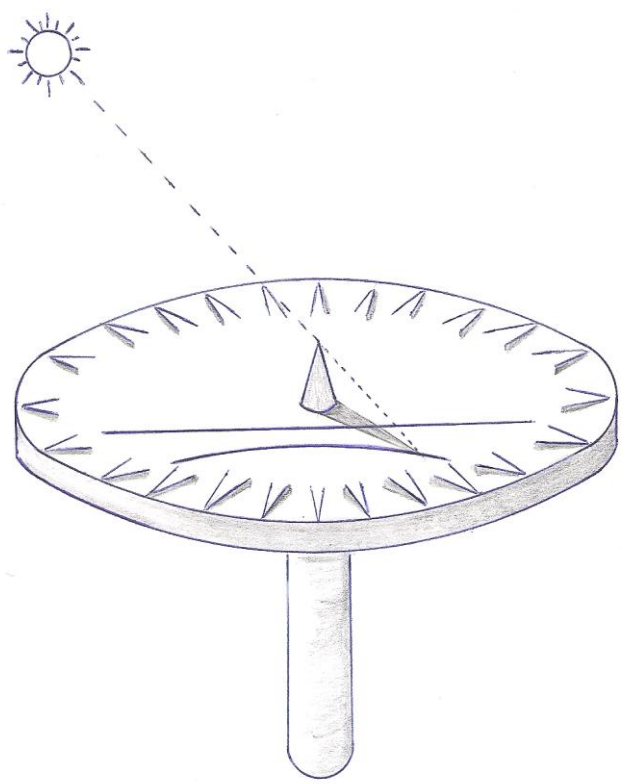


Fig. 4

2.2 Le Cadran solaire

L'instrument peut donner l'heure grâce à l'ombre d'un objet, souvent appelé le style.
Il existe un grand nombre de types de cadrans solaires, qu'ils soient verticaux, horizontaux, cylindrique, équatoriaux, polaires, analemmatiques, portables ou fixes.

Tous sont assujettis à la correction en relation avec l'équation du temps. La valeur de cette correction est souvent indiquée par une courbe en relation avec la date de la lecture, une donnée parfois inscrite sur la table du cadran solaire.

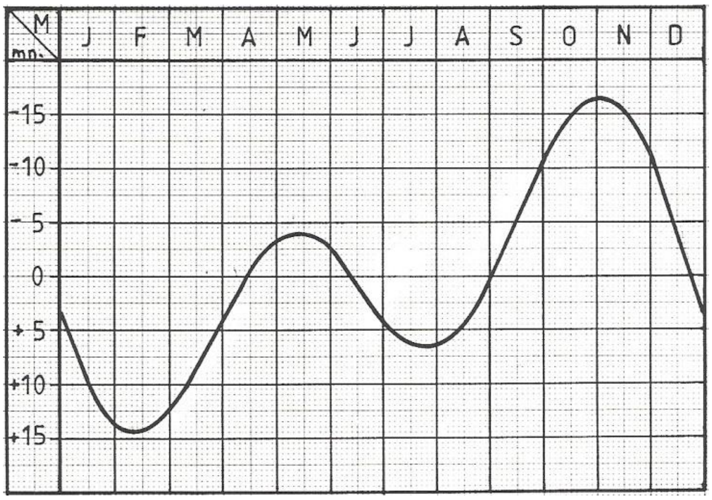


Fig. 5

Il y a une forte littérature sur ce sujet, largement plus passionnant qu'il n'y parait de prime abord. Citons en particulier l'ouvrage de Denis SAVOIE édité par Belin sous ISBN 2-7001-3338-6

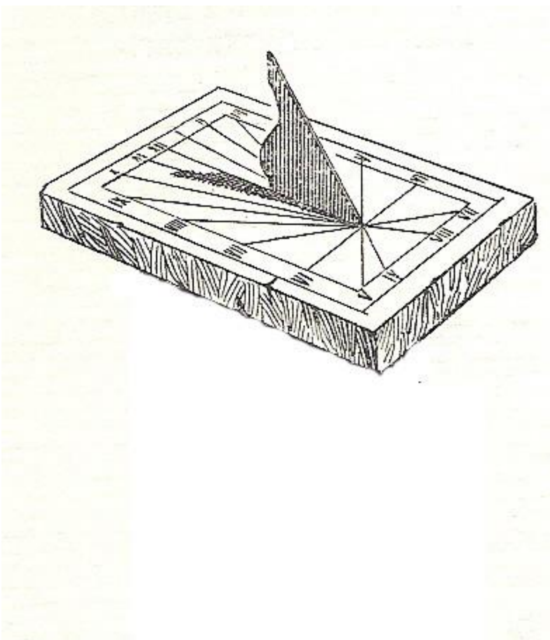


Fig. 6

2.3.- L'anneau solaire

C'est en fait un cadran solaire dans lequel l'ombre du style a été remplacée par un rayon du Soleil passant par un petit trou percé dans l'anneau.
On oriente l'instrument dans la direction du Soleil, tout en le maintenant suspendu à sa bélière.
Le rayon solaire produit une tache lumineuse sur la face interne de l'anneau, indiquant l'heure. Cette dernière se lit sur la graduation qui a été apposée à l'intérieur de l'anneau solaire.
Un curseur permet de modifier la position du trou, selon l'époque de l'année et de tenir ainsi compte de la valeur de la déclinaison.
Bien entendu la graduation interne correspond à une latitude précise.

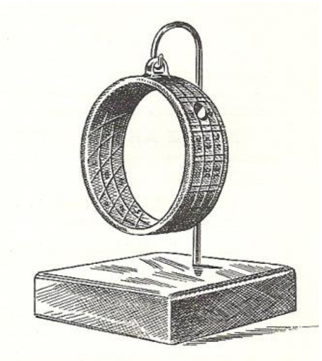


Fig. 7

2.4.- Le Nocturlabe

Cet instrument permet en fait de retrouver l'angle horaire d'une étoile circumpolaire. Les astres les plus utilisées sont Dubhé et Mérak de la Grande Ourse, deux étoiles plus connues sous le nom des Gardes et qui « pointent » vers la Polaire. Ces deux étoiles sont une véritable horloge céleste, d'autant plus que de nos jours la polaire est très près du pôle céleste.

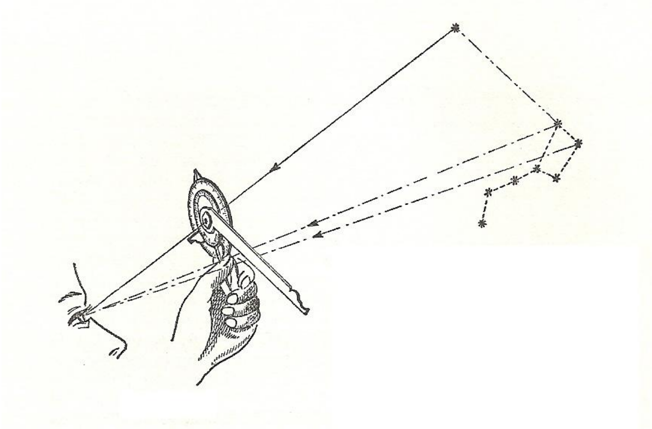


Fig. 8

La position des gardes change cependant journellement et le Nocturlabe permet astucieusement d'ajuster la mesure.

On vise la Polaire par le petit trou central de l'instrument. Puis on déplace l'alidade pour l'aligner sur les Gardes. Un disque qui tourne sur le centre de l'instrument est gravé d'un calendrier et d'un index. Il suffit d'amener l'index sur la date de la mesure et on peut lire l'heure solaire.

Bien entendu cet instrument ignore la question de la précession et des nutations.
Le nocturlabe, fort prisés au moyen âge, a eu sa période de gloire entre le XVIe et le XVIIIe siècles.

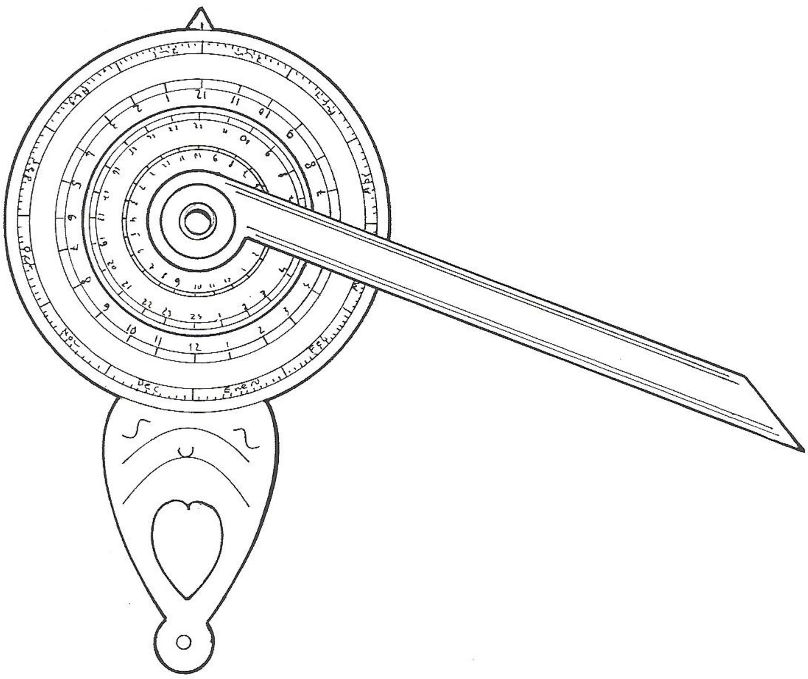


Fig. 9

2.4 Le torquetum (ou tanawa)

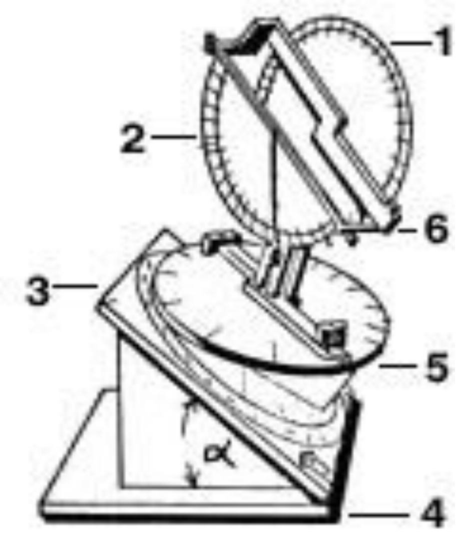
Le torquetum est un instrument utilisé pour mesurer directement les coordonnées dans trois plans, soit l'horizontal, l'équatorial et celui de l'écliptique, sans nécessité de procéder à des calculs.
L'instrument a été utilisé déjà du temps de Ptolémée II et permettait de mesurer la distances lunaire et celle d'autres corps célestes. Avec l'aide des tables établies par Eratosthène (alors directeur de la fameuse bibliothèque d'Alexandrie) le torquetum permettait de calculer la longitude d'un lieu d'une manière fort astucieuse.
Cet instrument a été oublié longtemps avant d'être réactualisé par Jabir Ibn Aflah en 1110 à Séville.

On a retrouvé le dessin d'un torquetum dans la « caverne des navigateurs » sur une petite île proche de la Nouvelle Guinée située sur une latitude de 5° S et une longitude de 138° E.

Dans cette même caverne se trouvait également des inscriptions relatant qu'en 232 avant JC, sous l'ordre du Capitaine Rata et du navigateur Maui, une flottille égyptienne avait atteint les côtes occidentales de l'Amérique. Cette information a été donnée par le scientifique Rick Sanders dans un texte publié en 2002 dans la revue « Fusion » sous le titre « Ancient navigators could have measured the longitude »

On retrouve d'autres informations à ce sujet sur la page Web
<21stcenturysciencetech.com>

Cette navigation ordonnée par les Pharaons semble confirmée par d'autres inscriptions égyptiennes que l'on a retrouvé à Tiguirica au Chili.



1) limbe
2) alidade des hauteurs
3) plan équatorial
4) base horizontale
5) plan de l'écliptique (23 ½°)
α) angle correspondant
à la co-latitude (90° - latitude)

Fig. 11 Torquetum

Fig. 10 Eléments du torquetum

3.- Les gardes temps

Parmi toutes les inventions humaines ayant pour but de mesurer le temps qui s'écoule, nous ne retiendrons ici que quelques éléments typiques, ayant un rapport avec la navigation ou pas.

3.1.- La Clepsydre

Egalement nommée horloge à eau, cet instrument garde temps est constitué d'un récipient rempli d'eau, percé dans sa partie inférieure. Le liquide s'écoule par ce trou et le niveau de l'eau restante indiquait les différentes heures.
Il y avait même des clepsydres avec flotteur, lequel actionnait une aiguille qui donnait l'heure.

QuickTime™ et un
décompresseur TIFF (non compressé)
sont requis pour visionner cette image.

Fig. 12

3.2.- Le sablier

Garde temps constitué de deux cônes ayant un même axe et communiquant à leurs sommets par une petite ouverture. Un des récipients est rempli de sable calibré. On mesure le temps qui s'écoule pour que le sable passe d'un récipient à l'autre, puis on retourne l'instrument et tout recommence.

Combien de mousses se sont endormis sur leur sablier ? Probablement autant que de quarts.

QuickTime™ et un
décompresseur TIFF (non compressé)
sont requis pour visionner cette image.

Fig. 13

Il y avait des sabliers pour des mesures typiques, destinés par exemple à celle de la vitesse du bateau au moyen du loch et de sa corde à nœuds. Les cuisiniers avaient aussi leurs sabliers pour que les œufs soient cuits à point.

3.3.- Les horloges à poids

L'usage de poids moteurs rendait évidemment de telles horloges intransportables. Après plus d'un siècle de progrès techniques, il fut possible de remplacer les poids par des ressorts dont le déroulement exerçait sur les rouages l'impulsion nécessaire.

3.4.- Le chronomètre de marine

Nous avons vu qu depuis l'an 1600 les scientifiques de toute l'Europe cherchent à inventer un garde temps qui garantisse une grande précision. Personne ne saurait prétendre être le père unique du chronomètre de marine.

C'est cependant John HARRISON qui, après un lourd combat, a finalement touché le 09-02-1765 la prime de 20'000 livres avec son chronomètre H-4.

D'autres horlogers ont également construit de merveilleux garde temps. Citons en particulier Le Roy et Berthoud qui nous sont assez proches.

Le musée International de l'Horlogerie à Chaux-de-Fonds a publié un document intitulé « Ferdinand Berthoud, Horloger Mécanicien du Roi et de la Marine ». Un livre passionnant que vous pouvez vous procurer lors d'une tout aussi passionnante visite du Musée précité qui vaut le détour dans ce Jura qui a produit tant de chronomètres de marine.

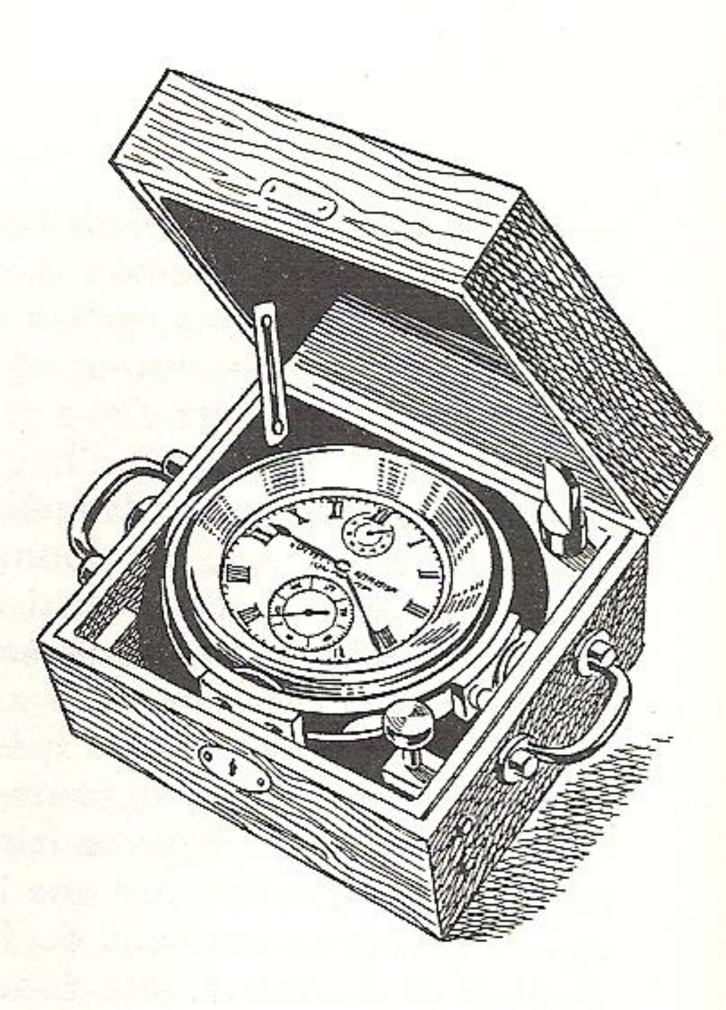


Fig. 14

4.- Mesures des angles

Sur terre, le premier instrument pour mesurer la hauteur du soleil fut le gnomon. Bâton fiché en terre, normal au plan de l'horizon, il projette une ombre inversement proportionnelle à la tangente de la hauteur de l'astre.

QuickTime™ et un
décompresseur TIFF (non compressé)
sont requis pour visionner cette image.

Fig. 15

4.1.- Le gnomon

Eratosthène, astronome grec de l'école d'Alexandrie, l'améliore en le fixant dans un demi sphère graduée qui permet de lire la hauteur de l'astre en tout instant. Accessoirement, cela permis au savant de mesurer le méridien et l'obliquité de l'écliptique.

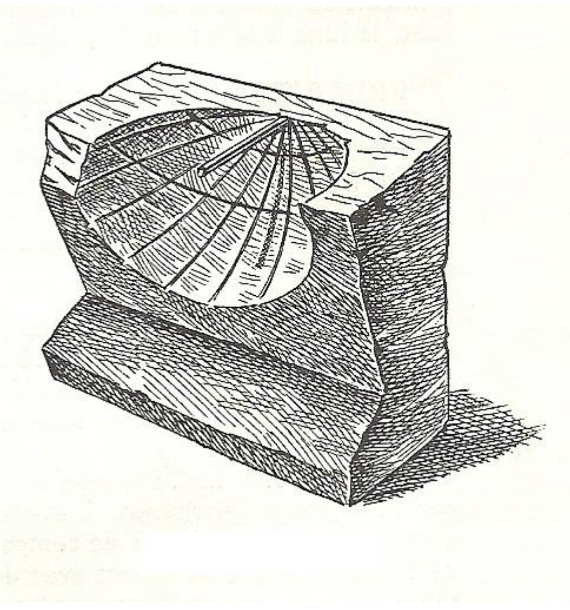


Fig. 16

4.2.- Le quadrant

Comme son nom l'indique, l'instrument se constitue d'un quart de cercle gradué sur le limbe. Un des rayons était pourvu de deux pinnules percées permettant de viser l'astre. Un fil à plomb indiquant la verticale, on pouvait ainsi lire la hauteur de l'astre.
On imagine bien que le quadrant ne devait guère être facile d'utilisation sur un navire en mer.

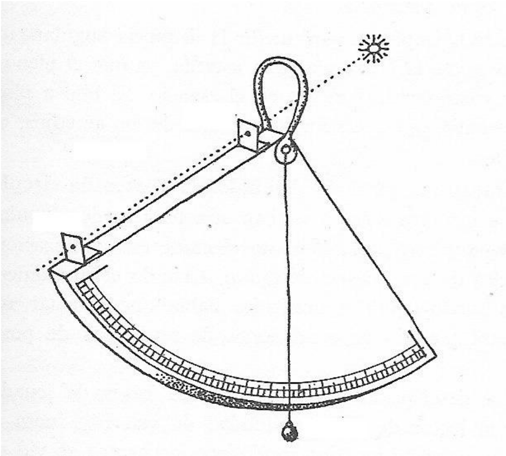


Fig. 17

4.3.- L'astrolabe marin

L'invention de l'astrolabe est attribuée à HIPPARQUE, au IIe siècle AC. La version marine remonte au XVe siècle.
Issu de l'instrument créé par et pour les astronomes, l'astrolabe marin se réduit à une simple couronne métallique ou roue ou encore marguerite avec quatre rayons, dont un plus imposant pour bien lester ce limbe. L'instrument était pourvu d'un point de suspension, généralement un anneau. La pinnule ou alidade (de l'arabe, al-idada) permet de viser l'astre par deux ouvertures, les graduations permettant de relever la hauteur de l'astre, seule mission restant à l'astrolabe marin par rapport à son usage astronomique.

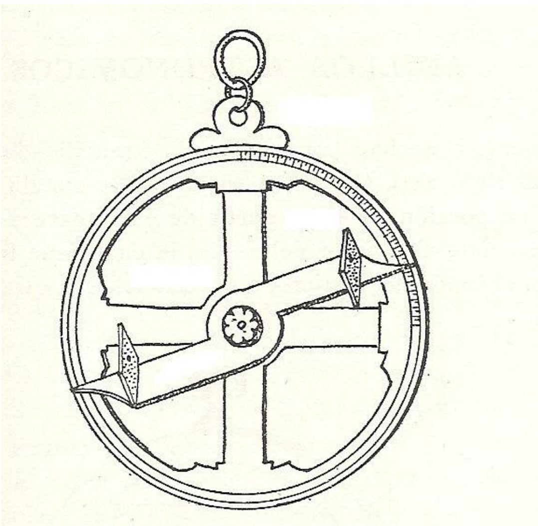


Fig. 18

L'astrolabe a été utilisé en mer du XVème au XVIIIème siècle.

Il y a eu des modèles constitués de deux couronnes concentriques pouvant se glisser l'une par rapport à l'autre, les pinnules étaient fixées sur le cercle intérieur, l'extérieur montrant les graduations.

La précision obtenue en mer était de l'ordre de 5° et inférieure au degré à terre.

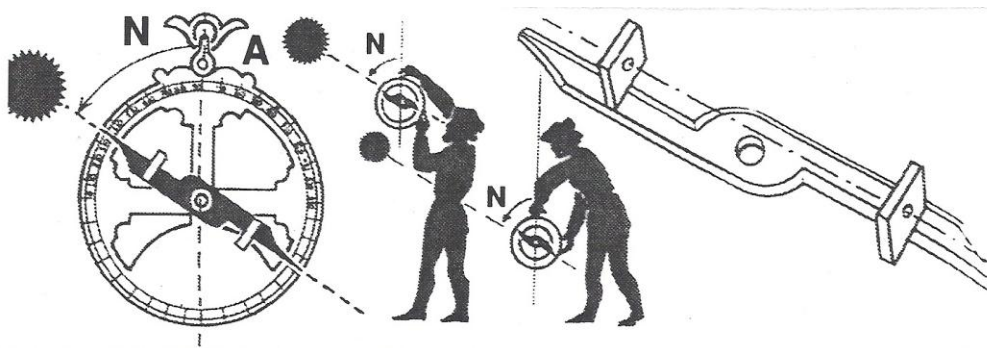


Fig. 19

4.4.- L'arbalète

Cet instrument, également appelé Bâton de Jacob, Verge d'Or ou Arbalestrille est décrit pour la première fois par l'astronome juif catalan Levi BEN GERSON en milieu de XIVe siècle.

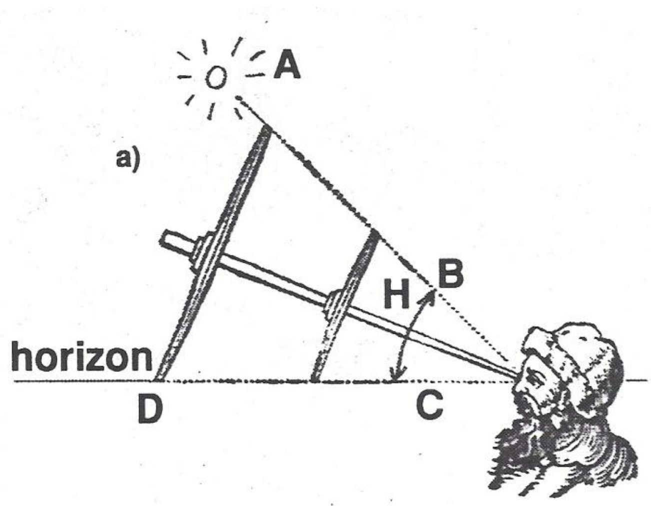


Fig. 20

L'arbalète se compose d'une longue tige, la verge, sur laquelle coulisse une équerre double appelée marteau. La verge est graduée et le marteau peut coulisser dessus.

Il existe des arbalètes allant jusqu'à 120 cm de long, à deux, voire trois marteaux mesurant de 4 à 30 cm et permettant de relever plus facilement de petits ou grands angles. Ceci implique trois graduations distinctes sur la verge, généralement une échelle sur chaque face de la flèche.

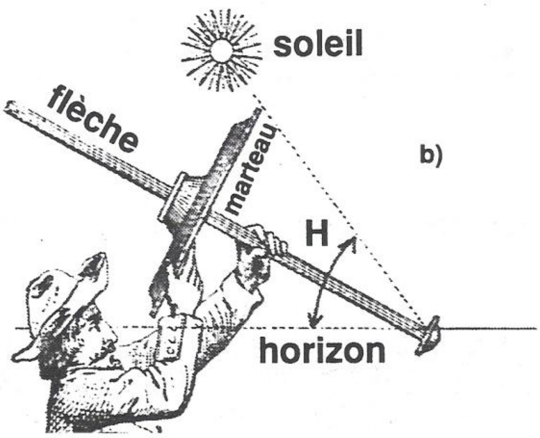


Fig. 21

Pour mesurer la hauteur du soleil et ne pas être ébloui par ce dernier, on fixe un écran à l'extrémité de la verge et on relève l'ombre du marteau sur cet écran, tout en alignant la partie basse du marteau sur l'horizon. Ceci signifie que l'observateur se met le dos au soleil, contrairement à la pratique pour une étoile qui se prend en visée directe.

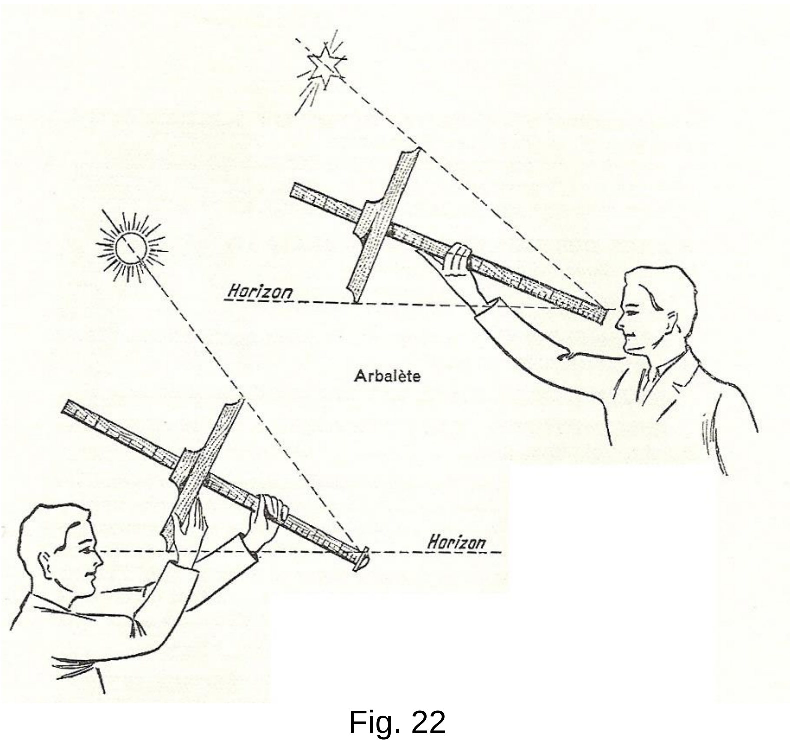


Fig. 22

L'utilisation n'est guère pratique et le zéro de l'instrument est délicat à estimer.
Utilisé en mer depuis le XVe siècle, le Bâton de Jacob restera en utilisation jusqu'à la fin du XVIIe.
Il ne permet pas de mesurer des grands angles.

4.5.- Le kamal

Basé sur le même principe que l'arbalète, le kamal était beaucoup utilisé sur les boutres arabes dans les mers orientales.
L'instrument est une simple pièce de bois rectangulaire, percée en son centre pour y fixer une cordelette à nœuds.
La mesure consistait à faire coïncider l'horizon avec la partie inférieure de la planchette, l'astre avec la partie supérieure. L'instrument était maintenu à une distance spécifique à chaque utilisateur, mesurée à partir de la pommette en comptant un certain nombre de nœuds.
On retrouve un instrument similaire, métallique, dans les Bermudes.

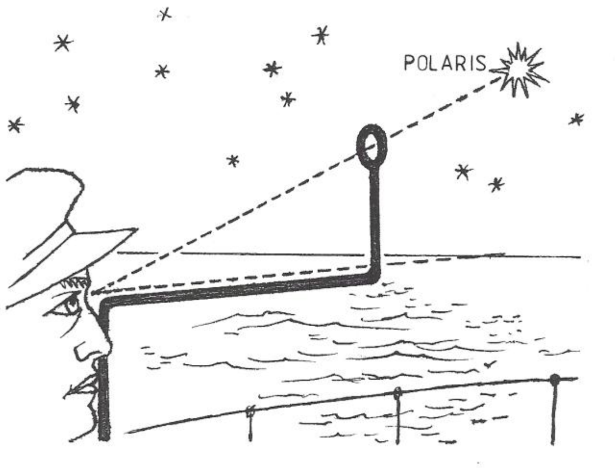


Fig. 23

Le kamal permettait de retrouver une latitude, par la polaire ou la méridienne par exemple, solution largement utilisée dans la navigation de l'époque dans les grandes traversées.

4.6.- Le quartier anglais

Il s'agit d'une amélioration de l'arbalète proposée par un grand breton, John DAVIS en 1594, ce qui explique que l'on retrouve l'instrument également sous le nom de quartier de DAVIS ou BACK STAFF.

Il est constitué de deux secteurs, avec un centre commun, l'un de 60°, l'autre de 30°. Une pinnule située au centre commun des secteurs était pourvue d'une fente longitudinale par laquelle on pouvait voir l'horizon. Une autre pinnule, parallèle à la première se bougeait sur le secteur supérieur (60°). La troisième coulissait sur le secteur inférieur (30°). Ces deux pinnules étaient percées d'un trou circulaire.

Pour observer le soleil, on faisait coïncider l'ouverture de la troisième pinnule avec celle de l'horizon et on faisait bouger la deuxième pinnule jusqu'à ce que le rayon du soleil passe par son ouverture et se retrouve lui aussi sur l'horizon.

La hauteur de l’astre était la somme des deux angles relevé sur les graduations.

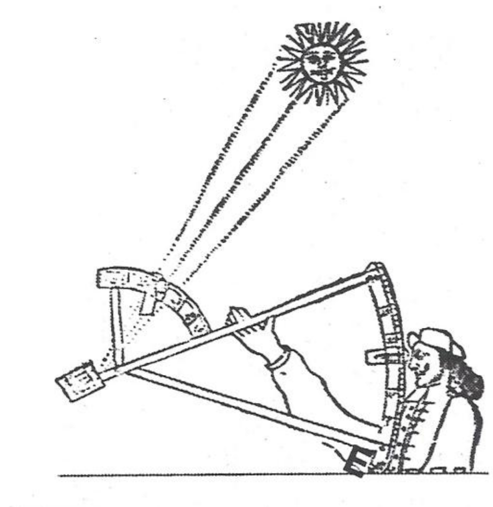


Fig. 24

Cet instrument a largement supplanté le Quadrant avec son fil à plomb. Le Quartier anglais disparaîtra à son tour avec l’entrée de l’Octant de Hadley et le début des instruments optiques, pourvus de miroirs.

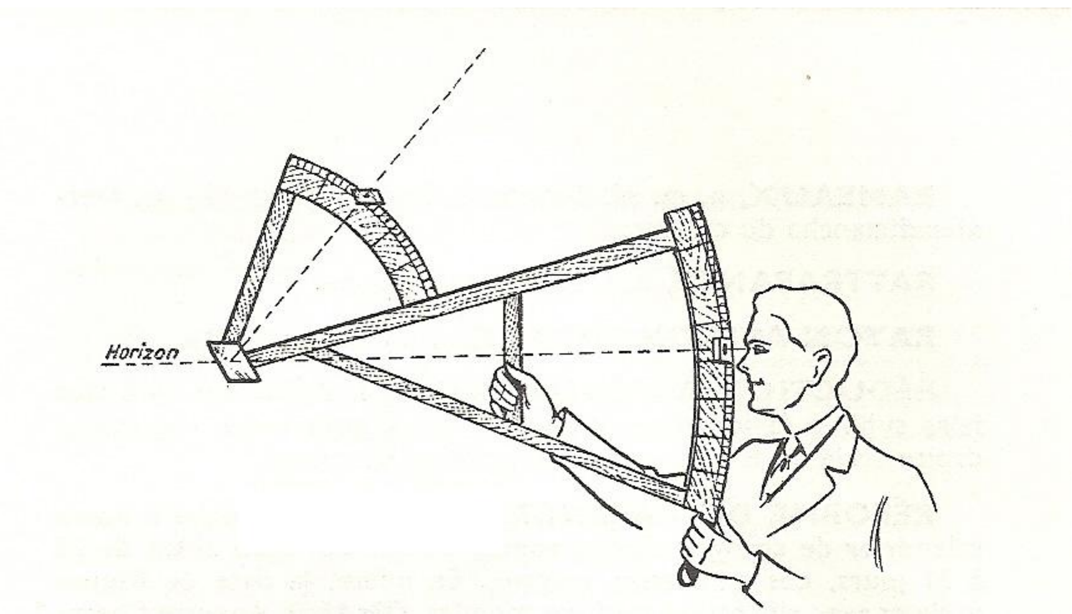


Fig. 25

4.7.- L’octant

Il faut attendre 1731 pour que John HADLEY présente à l’Académie Royale des Sciences de Londres le premier instrument utilisant des miroirs et de l’optique, sous la forme de l’octant.

Ce fut un pas notable dans le progrès de l’évolution des instruments permettant la mesure de la hauteur des astres sur l’horizon. L’instrument a pour paternité des grands scientifiques tels que NEWTON, HOOKE, ou GRANDJEAN DE FOUCHY et bien d’autres.

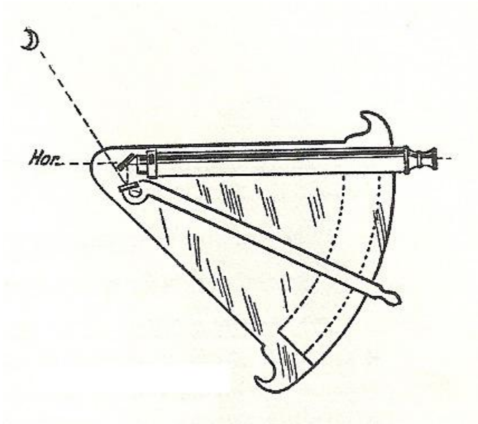


Fig. 26

L’instrument est à la base constitué d’un limbe d’un huitième de cercle, d’où son nom.
Le limbe permet ainsi de mesurer des angles de 0° à 90°. On retrouve pour la première fois sur la graduation du limbe l’introduction d’échelles transversales, les ancêtres du Nonius et du Vernier. La lecture devient ainsi plus précise.

La précision des mesures est de l’ordre de la minute.

L’octant a été utilisé jusqu’au milieu du XX^{e} siècle.

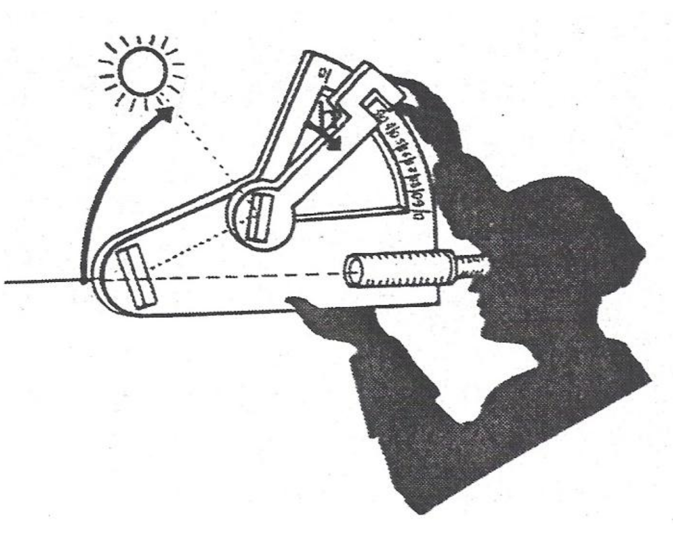


Fig. 27

4.8.- Le sextant

La nécessité de mesurer des angles de plus de 90° (par exemple pour les distances lunaires) a conduit à l'élaboration de l'instrument connu sous le nom de sextant.
L'invention est attribuée au Capitaine CAMPBELL, en 1757.

Il se compose d'un limbe métallique d'une ouverture de 60° (aujourd'hui 70°), d'où le nom de sextant.
Deux miroirs, le grand et le petit, permettent de faire des mesures par la mise en application des règles de l'optique.
Le grand miroir, situé au centre géométrique du limbe, pivote avec l'index. Il est normal au plan de l'instrument.
Le petit miroir est fixé au limbe, à l'opposé de la lunette. Ce petit miroir est constitué d'une partie réfléchissante et d'une partie transparente. On peut donc à la fois voir l'horizon dans la partie transparente et l'image de l'astre dans la moitié miroir. Les deux images étant ainsi superposées dans la lunette, on peut lire sur le limbe la valeur de l'angle mesuré.
L'astre est vu par double réflexion dans la lunette.

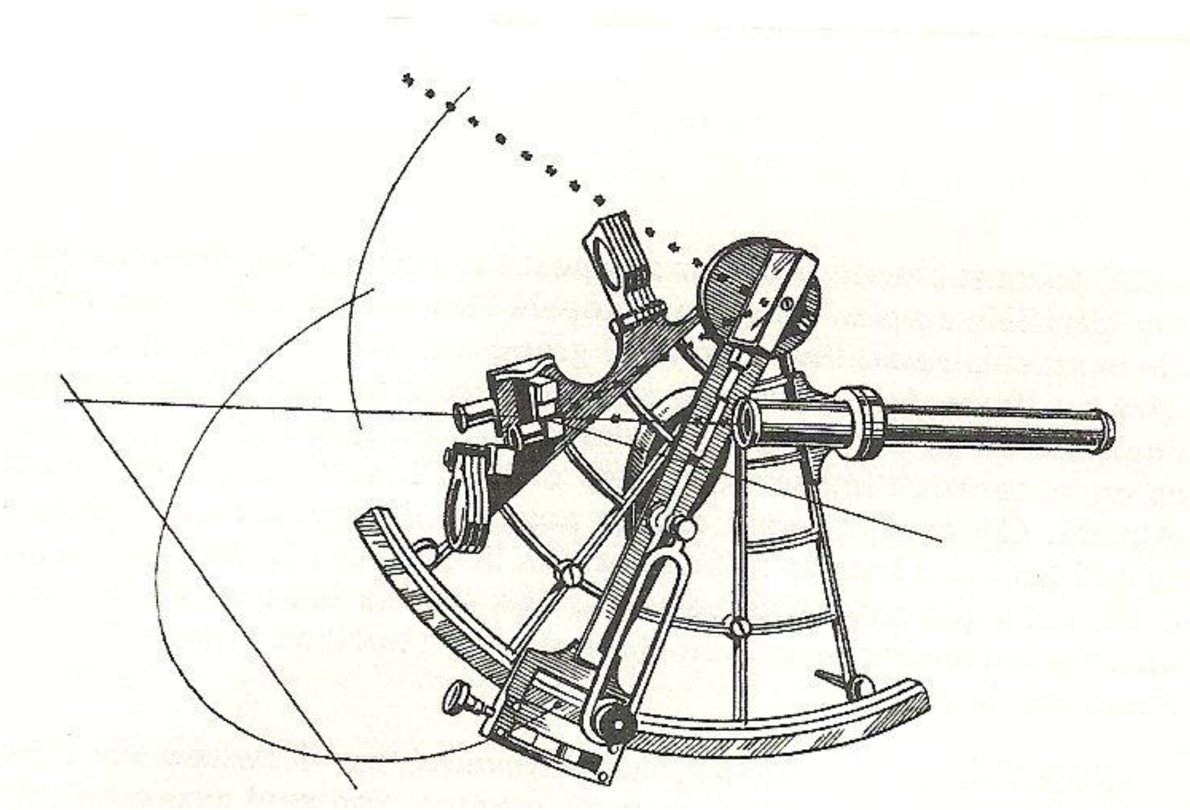


Fig. 28

Aujourd'hui une vis micrométrique permet de préciser la mesure, sans avoir à utiliser un vernier ou autre dispositif similaire.

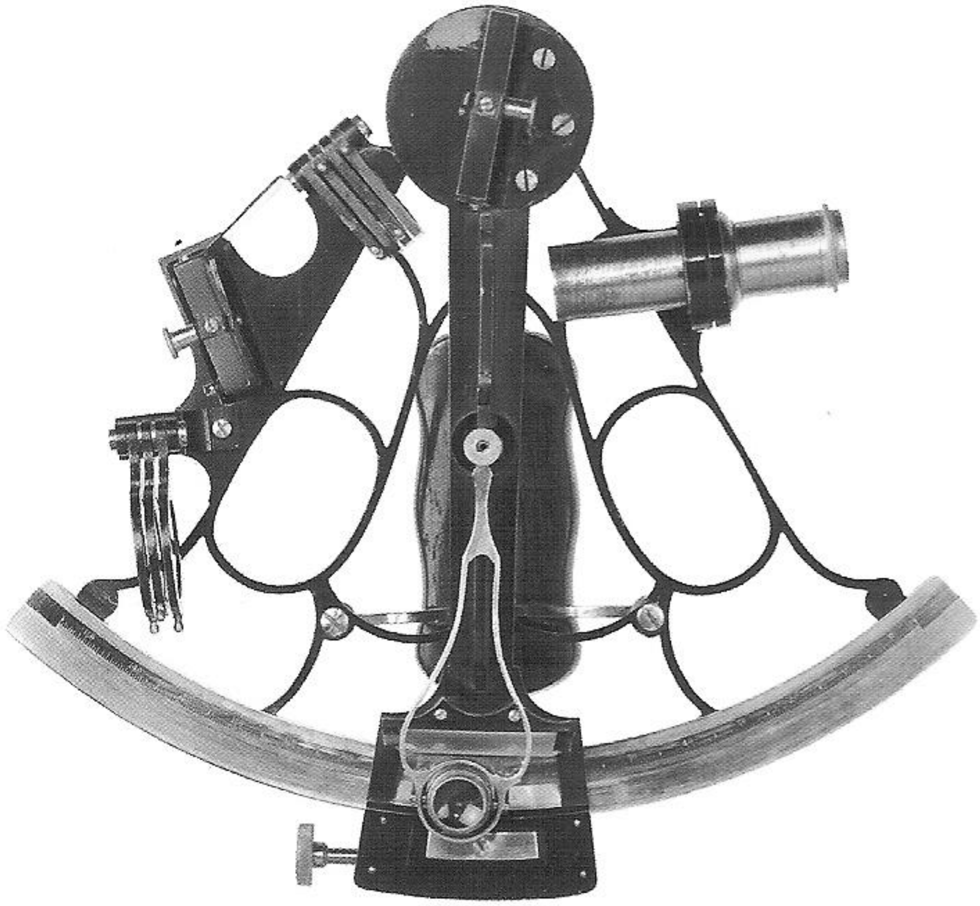


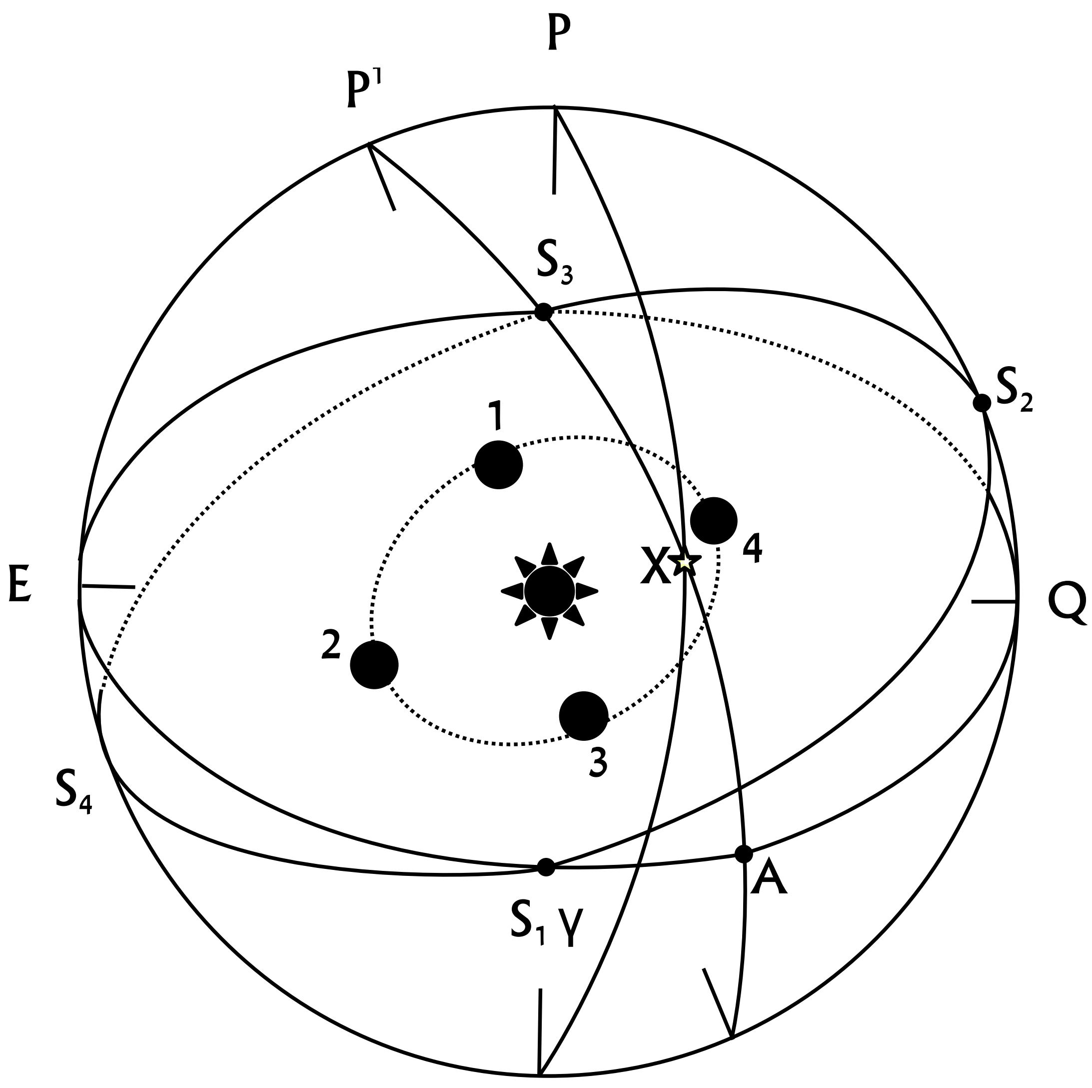
Fig. 29

Des filtres colorés peuvent être insérés devant le grand miroir pour atténuer la brillance des rayons du soleil. Il y a également des filtres pour améliorer la définition de l'horizon. Dans les modèles les plus actuels, on utilise un miroir sans tain pour l'horizon et les filtres sont remplacés par une optique type Polaroïd.

Avec la qualité de la microtechnique actuelle et les qualités d'optique de ce millénaire, on a atteint les limites de la perfection des mesures que l'on peut prendre avec un sextant. L'instrument est devenu plus précis que l'œil humain.

Ce dernier peut prétendre, dans le meilleur des cas à une mesure au quart de minute, soit au quart de mille. Cependant, sur un yacht, au large, il est généralement retenu qu'une précision de l'ordre de 1 à 2 minutes d'angle est déjà un exploit.

MOUVEMENT APPARENT DES ASTRES



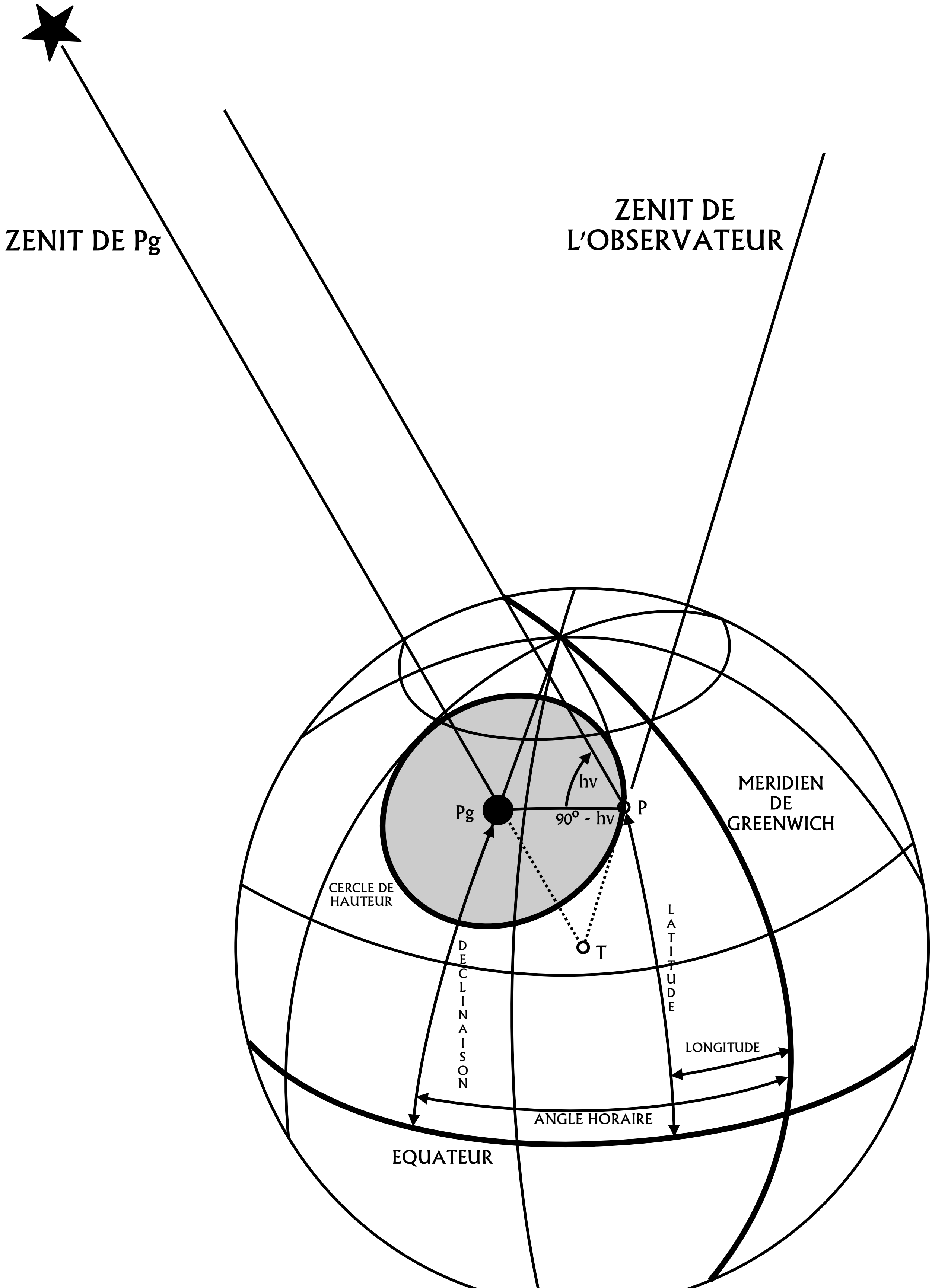
E, S_1, Q, S_3 représente le plan de l'équateur céleste,
S1, S2, S3, S4 représente le plan de l'écliptique.
P, pôle céleste
P', pôle de l'écliptique

1, position de la Terre le 21-03, équinoxe du printemps D = 0°
2, position de la Terre le 21-06, solstice d'été D = 23,5°N
3, position de la Terre le 22-09, équinoxe d'automne D = 0°
4, position de la Terre le 22-12, solstice d'hiver D = 23,5°S

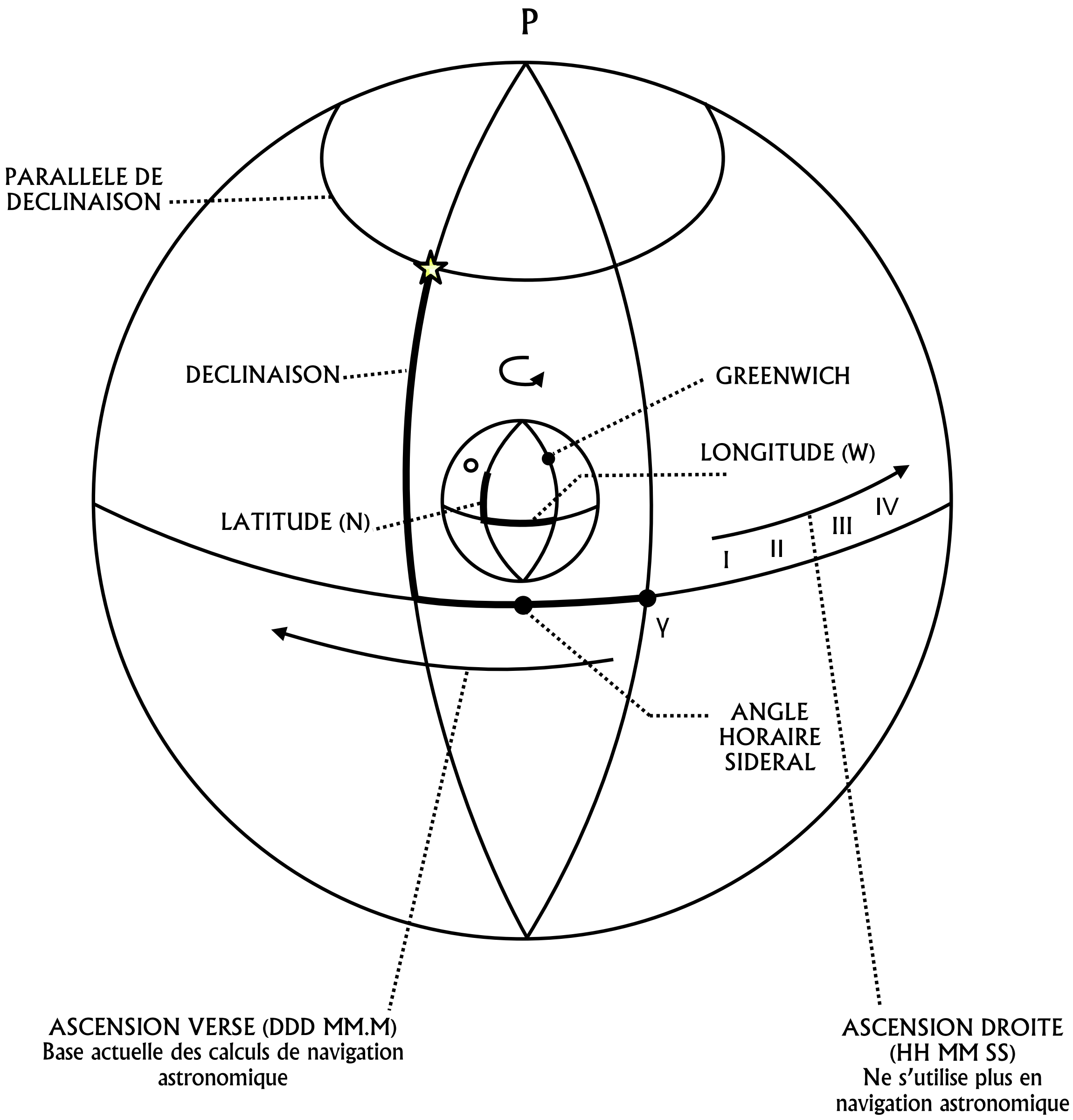
X, étoile

γ-A, son ascension droite
X-A sa déclinaison

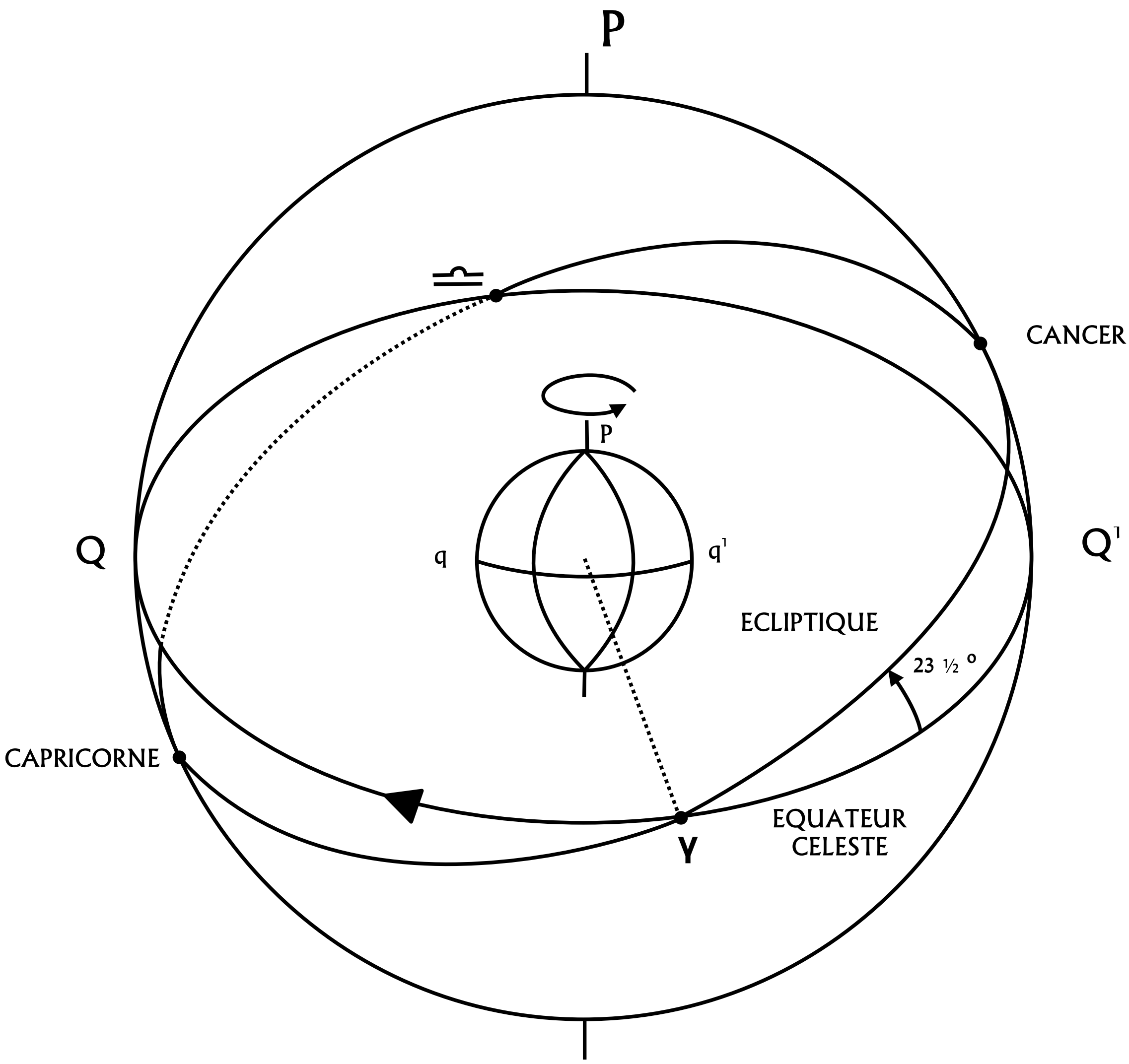
PRINCIPE DE LA DETERMINATION DE LA POSITION



COORDONNEES TERRESTRES ET CELESTES



LA SPHERE CELESTE



P = Pole céleste (au zénith du pole géographique terrestre).

QQ' = Equateur céleste (prolongation de l'équateur terrestre).

Ecliptique, plan sur lequel se déplace le soleil en image relative. L'angle entre les deux plans est de l'ordre de 23 ½ °.

γ = Point vernal, soit la position qu'occupe le soleil au moment de l'équinoxe de printemps.

LATITUDE PAR LA HAUTEUR MERIDIENNE

Date : __________________ **Elévation de l'oeil:** ___________

Position estimée, Pe : Le = ______°_____' N S / Ge = _______°_____' E W

HEURE DU PASSAGE AU MERIDIEN DU LIEU

T. pass. à Greenwich	____ h ____ m ____ s	Ge ____°	= ____ h ____ m
Ge (E - W +)	± ____ h _____ m ____ s	_____' =	____ m ___ s
T. pass. au Méridien de la Pe	(UT) ____ h ____ m ____ s		= ____ h ____ m ___ s

DECLINAISON

T. pass. (UT) _____h D _____°_____' N S d = _____

Pp. d _____m ± _____°_____'

D = _____° _____ ' N S

HAUTEUR VRAIE

Hauteur instrumentale =	_____°_____'
Correction instrumentale	± ___________
Ho	_____°______'
Cor. 1	_____ _____
Cor. 2	_____ _____
Hauteur vraie	**Hv = _____°____'**

LATITUDE

	89 ° 60 '	90° - Hv + D N = L N
Hauteur vraie, Hv	- _____° _____'	+ D S = L S
		- D N = L S
Distance zénithale, Zd	______° _____'	- D S = L N
Déclinaison D	± ______° _____'	

Latitude = _____°_____' N S

DROITE DE HAUTEUR PAR UN ASTRE ERRANT

Date : ________________ **Astre :** ________________ **Elévation de l'œil :** __________

Position estimée, Pe : **Le** _____°_____' **N S** / **Ge** _____°_____' **E W**

HEURE TU de l'observation : ______ **h** _______ **m** _______ **s**

LHA

TU ____ **h** **HA** _____°____' **v =** ___

____ **m** ____ **s** **pp. +** _____°_____'

GHA _____°_____'

(E + ; W -) **Ga ±** _____°_____'

LHA = _____° - - '

DECLINAISON

D ____°____' **N S** **d =** _____

pp. d ± _________

π = _____

D = _____° _____' N S

HAUTEUR CALCULEE

Da _______° **N S**

La _______° **N S**

HO / AP _____°____' **±** ____

Same Contrary **Cor. ±** _____'

Hc = ____°____'

180° (Latitude S)

360° (Latitude N)

______°

Zv = _____°

HAUTEUR VRAIE

Hauteur instrumentale, Hi _____°_____'

Cor. Instrumentales ± __________

Hauteur observée, Ho _____°_____'

Cor. 1 _____ _____

Cor. 2 _____ _____

Hv = ____°____'

(☾)

Ho ____________

Cor. 1 - ____________

Ha ____________

Cor. 2 + ____________

Ø - ____________

Hv ☾ ____________

INTERCEPT

Hauteur vraie Hv _____°____'

Hauteur calculée Hc _____°____'

Hv < Hc → Plus loin

Hv > Hc → Plus près

Intercept = _____'

DROITE DE HAUTEUR

Position auxiliaire Pa

Azimut

Intercept

La = ____° **N S** **Ga =** _____°_____' **E W**

Zv = ____°

_________ **Milles** **plus loin / plus près**

LATITUDE PAR LA POLAIRE

Date : ________________ **Elévation de l'œil : __________**

Position estimée, Pe : Le_____°_____' N / Ge_____°_____' E W

HEURE TU de l'observation : _______ h ________ m ________ s

ANGLE HORAIRE SIDERAL

TU ____ h **HA γ _____°____'**

____ m ____ s **pp. + _____°_____'**

GHA γ _____°_____'

(E + ; W -) **Ge ± _____°_____'** **HO 249, table 6**

LHA γ = _____°_____' **« Q » = _____'**

HAUTEUR VRAIE

Hauteur instrumentale = _____°_____'

Cor. instrumentales __________

Ho _____° _____'

Cor. astronomiques __________

Hv = _____°____'

LATITUDE

Hauteur vraie Hv = _____° _____'

Table A ± __________

Table B ± __________

Table C + __________

Latitude = ____° ____' N

HO 249

Hauteur vraie Hv = ____° ____'

Table 6, « Q » ± __________

Latitude = ____° ____' N

POINT PAR LES ETOILES

Date : ________________ Matin / Soir Elévation de l'œil : __________

Position estimée, Pe : Le = __________ N S / Ge = ____________ E W

CALCUL PREPARATOIRE

Heure TU lever / coucher du ☼ à Greenwich	____h ____m	HA γ	____° ____'
Crépuscule moyen (lever - ; coucher +)	1 5 m	p.p. ±	____° ____'
Heure d'observation à Greenwich	_____h ____m		____° ____'
Ge _____° = _____h _____m		GHA γ	____° ____'
Ge _____' = _____m		Ga ±	____° ____'
Ge (E - , W +)	± _____h ____ m	LHA γ	____° ____'
Heure prévue de l'observation à la Pe	TU _____h ____ m	Etoiles sélectionnées :	

Hc	Zn	Hc	Zn	Hc	Zn	Hc	Zn	Hc	Zn	Hc	Zn

HAUTEURS CALCULEES

Etoiles observées				
Heure observation TU	h m s	h m s	h m s	h m s
	° '	° '	° '	° '
HA γ				
p.p. +				
GHA γ =				
(+ E, - W) Ga ±				
	° --------	° --------	° --------	° --------
LHA γ =				
HO 249 La_____° N S	Hc Zv	Hc Zv	Hc Zv	Hc Zv

HAUTEURS VRAIES

Hauteur instrumentale, Hi				
Cor. Instrumentales ±				
Hauteur observée, Ho =				
Cor. Astronomique ±				
Hauteur vraie, Hv =				

INTERCEPTS

Hauteur vraie Hv	° '	° '	° '	° '
Hauteur calculée Hc				
Intercept	M	M	M	M
Azimut	°	°	°	°
Plus près loin	près loin	près loin	près loin	près loin
Longitude auxiliaire	° '	° '	° '	° '
Latitude auxiliaire	° -------	° -------	° -------	° -------

Précession, Nutation : ______ M au _______°

Hv < Hc Plus loin
Hv > Hc Plus près

Position : L = _____° _____' G = _____° ____'

LATITUDE PAR LA HAUTEUR MERIDIENNE

Date : ___29-04-2007____ **Elévation de l'oeil: ______3__m**

Position estimée, Pe : Le = __29_°__50_' N ~~S~~ / Ge = __119__°__49_' E ~~W~~

HEURE DU PASSAGE AU MERIDIEN DU LIEU

T. pass. à Greenwich _11_ h _57_ m _24_ s **Ge _119_° = __7_ h _56_ m**

Ge (E - W +) ± __7_ h __59_ m _16_ s **_49_' = __3_ m _16_ s**

T. pass. au Méridien de la Pe $\boxed{\text{(TU) \_03\_ h \_58\_ m \_08\_ s}}$ **= __7_ h _59_ m _16_ s**

DECLINAISON

T. pass. (TU) _03_h **D _14_°_19.1_' N ~~S~~** **d = _+ 0.8_**

Pp. d _58_m ± __0_°__0.8_'

$\boxed{\text{D = \_14\_° \_19.9\_ ' N}}$ ~~S~~

HAUTEUR VRAIE

Hauteur instrumentale = __74_°_12.0_'

Correction instrumentale ± _______04.0_'

Ho __74_°_16.0_'

Cor. 1 _____ +_12.8_'

Cor. 2 _____ -_00.2_'

Hauteur vraie $\boxed{\text{Hv = \_\_74\_°\_28.6\_'}}$

LATITUDE

89 ° 60 '

Hauteur vraie, Hv - __74_° _28.6_'

Distance zénithale, Zd ___15_° _31.4_'

Déclinaison D ± ___14_° _19.9_'

$\boxed{\text{Latitude = \_\_29\_°\_51.3\_' N}}$ ~~S~~

90° - Hv + D N = L N

~~**+ D S = L S**~~

~~**- D N = L S**~~

~~**- D S = L N**~~

Ou la formule mathématique :

Culmination regardant au N : L = D – Zd
Culmination regardant au S : L = D + Zd
Déclinaison et latitude sont
. positives lorsque Nord
- négatives lorsque Sud

DROITE DE HAUTEUR PAR UN ASTRE ERRANT

Date : ___11-10-2007___ Astre : ___SOLEIL_______ Elévation de l'œil : ________4_m

Position estimée, Pe : Le __45__°___20_' N ~~S~~ / Ge __010_°__11_' ~~E~~ W

HEURE TU de l'observation : ____09_ h ____18_ m ____43_ s

LHA

TU _09_ h HA _318_° _17.2_' v = ___

_18_ m _43_ s pp. + ___4_° _40.8_'

GHA _322_°_58.0_'

(~~E~~ + ; W -) Ga ± ___9_°_58.0_'

LHA = _313_° - - '

DECLINAISON

D _6_°_56.1_' ~~N~~ S d = _+0.9_

pp. d ± _____0.3_'

π = _____

D = __6_° _56.4_' ~~N~~ S

HAUTEUR CALCULEE

Da _____6_° ~~N~~ S

La ____45_° N ~~S~~

~~Same~~ Contrary

HO / AP __23_° _56_' ± _49_-

Cor. ± _- 46_'

Hc = _23_°_10_'

~~180° (Latitude S)~~

360° (Latitude N)

_127_°

Zv = _127_°

HAUTEUR VRAIE

Hauteur instrumentale, Hi __22_°_18.0_'

Cor. Instrumentales ± ___+ 2.3_'

Hauteur observée, Ho __22_°_20.3_'

Cor. 1 _____+ 10.2_'

Cor. 2 _____ + 0.1_'

Hv = _22_° _30.6_'

(☾)

Ho ___________

Cor. 1 - ___________

Ha ___________

Cor. 2 + ___________

Ø - ___________

Hv ☾ ___________

INTERCEPT

Hauteur vraie Hv __22_° _30.6_'

Hauteur calculée Hc __23_° _10.0_'

Intercept = _39.6_'

Hv < Hc → Plus loin

~~Hv > Hc → Plus près~~

DROITE DE HAUTEUR

Position auxiliaire Pa La = _45_° N ~~S~~ Ga = _009_°_58_ ' ~~E~~ W

Azimut Zv = _127_°

Intercept ____39.6_ Milles plus loin / ~~plus près~~

LATITUDE PAR LA POLAIRE

Date : __22042007___ **Elévation de l'œil : ________4_m**

Position estimée, Pe : Le___46_°__10_' N / Ge__010_°___46_' ~~E~~ W

HEURE TU de l'observation : ____19__ h ____56__ m ____16__ s

ANGLE HORAIRE SIDERAL

TU _19_ h **HA γ _136_° _26.5_'**

_56_ m _16_ s **pp. + __14_° _06.3_'**

GHA γ _150_°__32.8_'

(E + ; W -) **Ge ± __10_°__46.0_'** **HO 249, table 6**

LHA γ = _139_°_46.8_' **« Q » = _+_8_'**

HAUTEUR VRAIE

Hauteur instrumentale = __46_°_07.5_'

Cor. instrumentales ______-_3.0_'

Ho __46_° _04.5_'

Cor. astronomiques ______-_4.5_'

Hv = __46_°_00.0_'

LATITUDE			**HO 249**		
Hauteur vraie	**Hv =**	_____° _____'	**Hauteur vraie**	**Hv =**	_46_° _00.0_'
Table A	±	___________	**Table 6, « Q »**	±	______+_8.0_'
Table B	±	___________			
Table C	+	___________			

Latitude = ____° ____' N **Latitude = _46_° _08_' N**

POINT PAR LES ETOILES

Date : ____11-10-2007____ ~~Matin~~ / Soir **Elévation de l'œil :** ________4_m

Position estimée, Pe : Le = ___37° 35'__ N ~~S~~ Ge = _020° 20'___ E ~~W~~

CALCUL PREPARATOIRE

Heure TU ~~lever~~ / coucher du ☼ à Greenwich	_17_h _30_m	HA γ	_259_° _51.9_'
Crépuscule moyen (lever - ; coucher +)	1 5 m	p.p. ±	__6_° __01.0_'
Heure d'observation à Greenwich	_17_h _45_m		
Ge __20_° = ___1_h __20_m		GHA γ	_265_° _52.9_'
Ge __20_ ' = ___1_m		Ga ±	_020_° _20.0_'
Ge (E - , ~~W~~ +)	± __1_h _21_ m	LHA γ	__286_° _12.9_'
Heure prévue de l'observation à la Pe	TU __16_h _24_ m	Etoiles sélectionnées :	

Hc	Zn	Hc	Zn	Hc	Zn	Hc	Zn	Hc	Zn	Hc	Zn

HAUTEURS CALCULEES

Etoiles observées	Altair	Arcturus	Kochab	
Heure observation TU	16 h 20 m 44 s	16 h 24 m 18 s	16 h 27 m 08 s	h m s
HA γ	259 ° 51.9 '	259 ° 51.9 '	259 ° 51.9 '	° '
p.p. +	5 ° 11.9 '	6 ° 05.5 '	6 ° 46.4 '	
GHA γ =	265 ° 03.8 '	265 ° 57.4 '	266 ° 38.3 '	
(+ E, - W) Ga ±	20 ° 56.2 '	20 ° 02.6 '	20 ° 21.7 '	
LHA γ =	286 ° --------	286 ° --------	287 ° --------	° --------
HO 249 La_____° N S	Hc 59 56 Zv 156	Hc 25 29 Zv 276	Hc 42 20 Zv 341	Hc Zv

HAUTEURS VRAIES

	Altair	Arcturus	Kochab	
Hauteur instrumentale, Hi	59 ° 21.5 '	25 ° 24.5 '	42 ° 47.0 '	
Cor. Instrumentales ±	+ 2.6 '	+ 2.6 '	+ 2.6 '	
Hauteur observée, Ho =	59 ° 24.1 '	25 ° 27.1 '	42 ° 49.6 '	
Cor. Astronomique ±	- 4.1 '	- 5.6 '	- 4.6 '	
Hauteur vraie, Hv =	59 ° 20.0 '	25 ° 21.5 '	42 ° 45.0 '	

INTERCEPTS

	Altair	Arcturus	Kochab	
Hauteur vraie Hv	59 ° 20.0 '	25 ° 21.5 '	42 ° 45.0 '	° '
Hauteur calculée Hc	59 ° 56.0 '	25 ° 29.0 '	42 ° 20.0 '	
Intercept	36.0 M	7.5 M	25.0 M	M
Azimut	156 °	276 °	341 °	°
Plus près loin	~~près~~ loin	~~près~~ loin	près ~~loin~~	près loin
Longitude auxiliaire	20 ° 56.2 '	20 ° 02.6 '	20 ° 21.7 '	° '
Latitude auxiliaire	37 ° -------	37 ° -------	37 ° -------	° -------

Hv < Hc Plus loin
Hv > Hc Plus près

Précession, Nutation : ___1__ M au __085__ °

Position : L = _37_° _25_' N / G = _020_°_14_' E