



La  
**navigation  
astronomique**

François Meyrier



**VAGNON**

# SOMMAIRE

## INTRODUCTION //////////////////////////////////////5

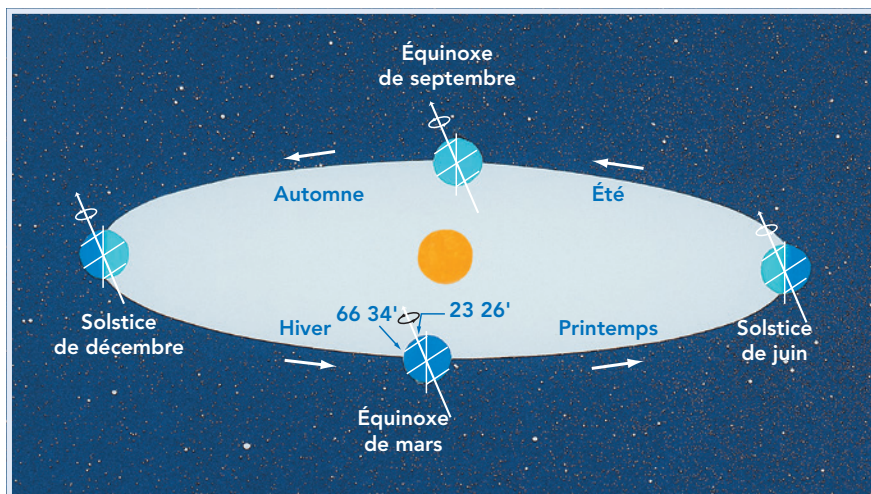
|                                                                                                         |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 1. OBJECTIF, MÉTHODE ET LIMITE                                                                          | 7   |
| 2. CHOIX DE LA CALCULATRICE                                                                             | 9   |
| 3. LE SOLEIL ET LA TERRE                                                                                | 11  |
| 4. LE SEXTANT                                                                                           | 23  |
| 5. LE TEMPS                                                                                             | 35  |
| 6. LES SYSTÈMES DE COORDONNÉES SPHÉRIQUES                                                               | 39  |
| 7. LES ÉLÉMENTS DE TRIGONOMÉTRIE<br>(NIVEAU SECONDAIRE)                                                 | 53  |
| 8. LA DROITE DE HAUTEUR                                                                                 | 59  |
| 9. LA MÉRIDienne                                                                                        | 65  |
| 10. LES FEUILLES DE CALCULS                                                                             | 73  |
| 11. PROBLÈMES ET CORRIGÉS                                                                               | 77  |
| 12. LE POINT D'ÉTOILES                                                                                  | 81  |
| 13. POINT PAR INTERSECTION DE DEUX DROITES -<br>TRANSPORT DE DROITES - CANEVAS DE CARTES<br>DE MERCATOR | 92  |
| 14. EXERCICES                                                                                           | 106 |
| 15. RÉPONSES                                                                                            | 109 |
| 16. ANNEXES - LES ÉPHÉMÉRIDES À 0 H T.U.                                                                | 115 |
| 17. RÉSUMÉ ET ABRÉVIATIONS                                                                              | 127 |



# 3

## LE SOLEIL ET LA TERRE

### L'ÉCLIPTIQUE



Plan de l'écliptique et saisons dans l'hémisphère nord.

Le centre de la Terre décrit **une ellipse dont le Soleil occupe l'un des foyers**.  
Le plan dans lequel est située cette ellipse porte le nom d'**écliptique**.

**C'est dans le plan de l'écliptique que se produisent les éclipses.**

L'axe de rotation de la Terre est la ligne des pôles qui n'est pas perpendiculaire au plan de l'écliptique.

Cette ligne des pôles terrestres reste toujours parallèle à elle-même et est inclinée de  $66^{\circ} 34'$  sur le plan de l'écliptique.

Deux mouvements animent la Terre :

- > un mouvement de rotation sur elle-même en 24 h environ,
- > un mouvement de révolution autour du Soleil en 365,2422 jours solaires moyens (365 jours 5 h 48 m 46 s).

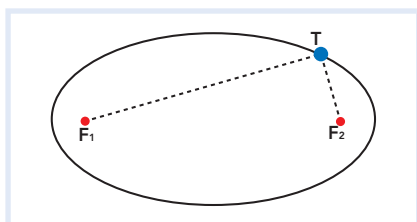
Nota : dans l'hémisphère sud les saisons sont inversées.

Les Planètes, dont les trajectoires sont également elliptiques, se déplacent dans des plans qui peuvent être considérés comme confondus avec le plan de l'écliptique.

**Rappel : une ellipse est le lieu des points T dont la somme des distances à deux points fixes  $F_1$  et  $F_2$ , appelés foyers, est constante.**

$$TF_1 + TF_2 = \text{Constante}$$

Le cercle est une ellipse dont les deux foyers sont confondus.

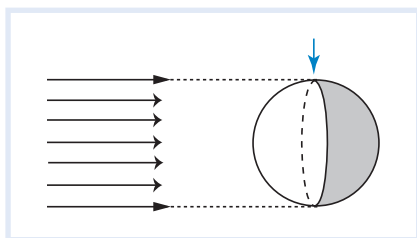


## LES ÉQUINOXES ET SOLSTICES (cercles polaires, tropiques, plan de l'équateur)

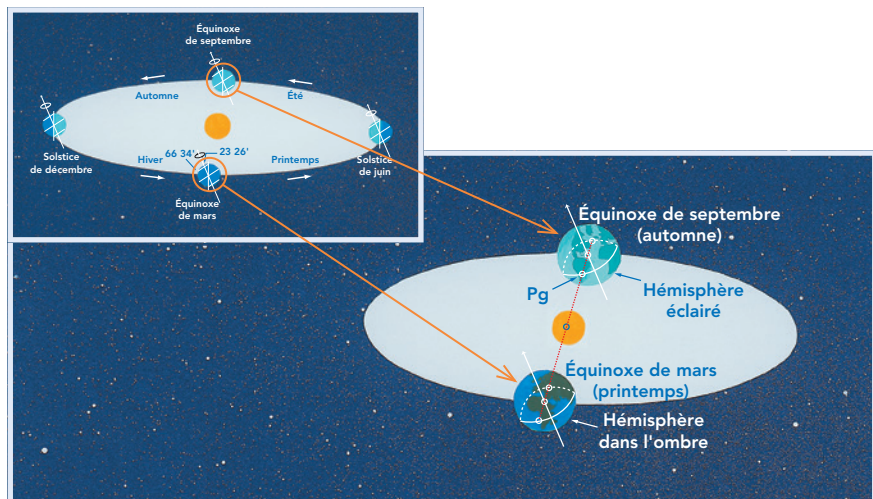
### Les équinoxes

Les rayons du Soleil reçus depuis la Terre étant parallèles entre eux, c'est un véritable cylindre de lumière qui éclaire la Terre selon un **cercle d'illumination**.

Ce cercle, qui marque la séparation de la Terre en deux parties égales, l'une éclairée, l'autre dans l'ombre, est perpendiculaire au plan de l'écliptique.



Aux équinoxes, le cercle d'illumination passe par les pôles terrestres et est contenu dans un plan perpendiculaire à l'équateur.



Dans sa course autour du Soleil, la Terre passera par deux positions opposées pour lesquelles le Soleil se trouvera être dans le plan de l'équateur.

Ces deux positions, occupées à six mois d'intervalle environ, portent le nom d'**équinoxes** (du latin *equinoxia* qui signifie nuit égale, ou encore durée du jour = durée de la nuit) et correspondent à une déclinaison  $D$  nulle du Soleil (voir la définition de la déclinaison au chapitre "Les coordonnées horaires  $D$ , AHG et AHL").

L'équinoxe de mars, le 20 mars à un jour près,  
marque le début du printemps.

L'équinoxe de septembre, le 23 septembre à un jour près,  
marque le début de l'automne.

## Les solstices

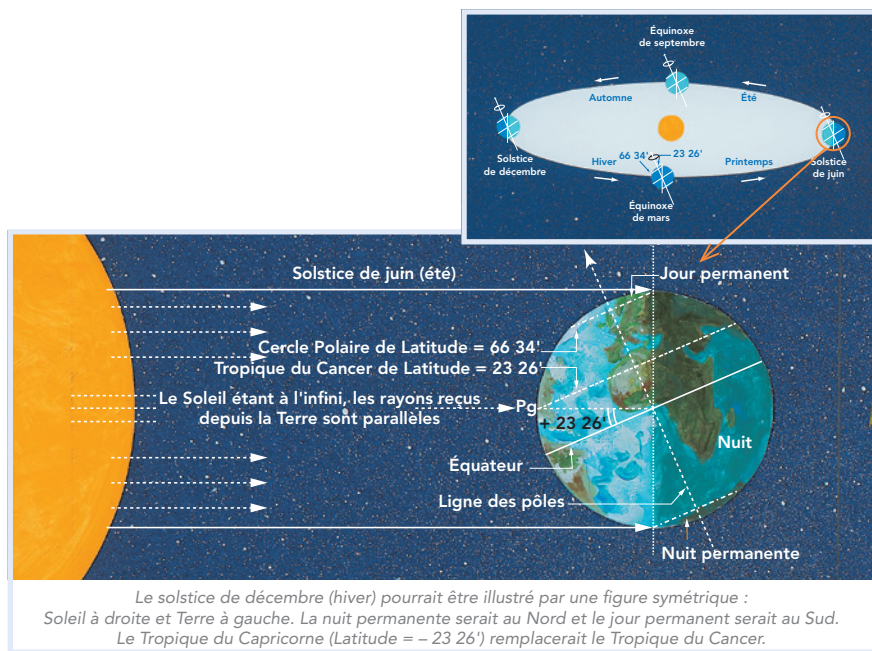
Pour deux autres positions, opposées, la droite qui joint le centre de la Terre au centre du Soleil fait un angle de  $23^\circ 26'$  avec le plan de l'équateur terrestre.

Ces deux positions, occupées à six mois d'intervalle environ, portent le nom de **solstices** (du latin *sol stat* - le soleil s'arrête) et correspondent à une déclinaison du Soleil de  $D = \pm 23^\circ 26'$ .

Nota : la définition de la déclinaison sera fournie au chapitre "Les coordonnées horaires  $D$ , AHG et AHL".

Sous nos latitudes, à  $D = + 23^\circ 26'$  correspond le jour le plus long de l'année ;  
à  $D = - 23^\circ 26'$  correspond le jour le plus court de l'année.





Un fil tendu entre les centres de la Terre et du Soleil perce l'écorce terrestre en un point Pg appelé **position géographique** (ou pied du Soleil sur la Terre).

Le solstice de juin, vers le 21 juin, marque le début de **l'été**.

Le solstice de décembre, vers le 22 décembre, marque le début de **l'hiver**.

## LE JOUR SIDÉRAL

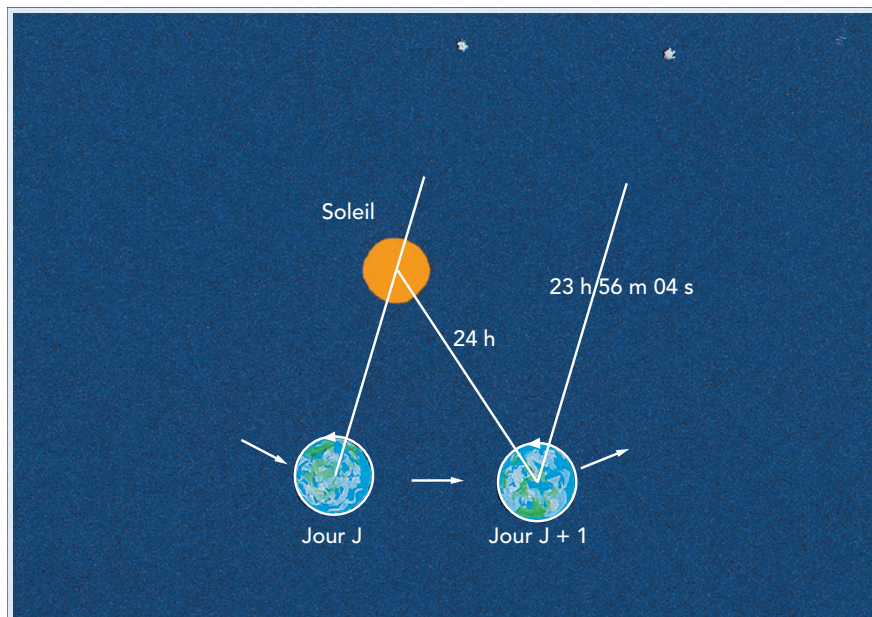
Le **jour sidéral** est l'intervalle de temps qui sépare deux passages consécutifs d'une étoile au méridien d'un même lieu.

Les  $360^{\circ}$  sont faits en 23 h 56 m 04 secondes.

Le **jour solaire vrai** est l'intervalle de temps qui sépare deux passages consécutifs du centre du Soleil au méridien d'un même lieu.

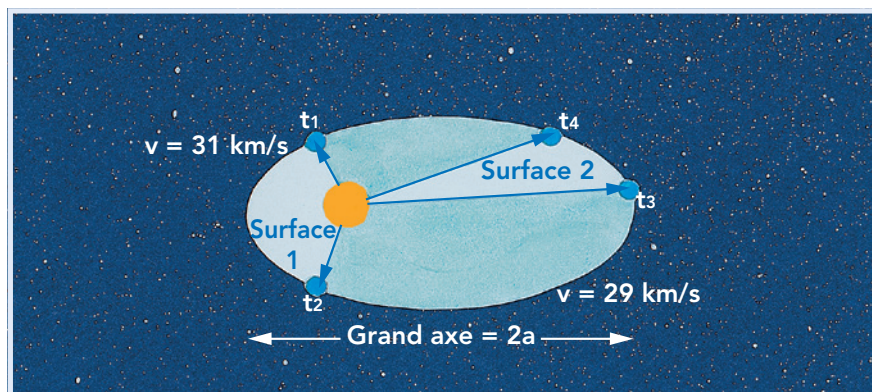
$24 \text{ h} - 23 \text{ h } 56 \text{ m } 04 \text{ s} = 3 \text{ m } 56 \text{ s}$  séparent ces deux notions.

En dépit de sa constance, le jour sidéral n'a pas été choisi comme définition du temps parce que nos occupations sont réglées sur le mouvement du Soleil, et non pas sur le mouvement des étoiles.



## LES TROIS LOIS DE KEPLER (bases des éphémérides)

Entre 1605 et 1618, l'astronome allemand Kepler précisa la représentativité du Système Solaire donnée par Copernic et formula trois lois relatives au mouvement des planètes.





- 1) La Terre décrit une ellipse dont le Soleil occupe un des foyers.
- 2) Loi des aires: en des temps égaux, le rayon vecteur balaie des aires égales.

$$\frac{\text{Surface 1}}{t_2 - t_1} = \frac{\text{Surface 2}}{t_4 - t_3}$$

*Les aires sont proportionnelles aux temps.*

- 3) Loi des carrés des temps de révolution: les carrés des temps de révolution T sont proportionnels aux cubes des demi-grands axes:  
 $T^2/a^3 = \text{Constante}.$

Ces lois furent complétées par les lois de la mécanique céleste énoncées en 1665 par le mathématicien anglais Newton et publiées en 1687 dans son ouvrage célèbre: "Principes mathématiques de philosophie naturelle".

Grâce à l'existence de ces lois, il est possible de donner à l'avance la position des astres - à la **seconde près** - dans une publication annuelle qui porte le nom d'**éphémérides**.

Le principe de la navigation astronomique étant de relever la hauteur des astres, il est précieux de disposer de leur position à l'instant même où l'on mesure leur hauteur au sextant. Sous cet aspect, on comprend mieux la terminologie souvent employée d'**amer céleste**.

## LA RÈGLE DES 4 X 21

Quatre fois par an (les 20 mars, 21 juin, 23 septembre et 22 décembre), le Soleil passe par quatre positions remarquables. Ces dates peuvent varier légèrement selon les années.

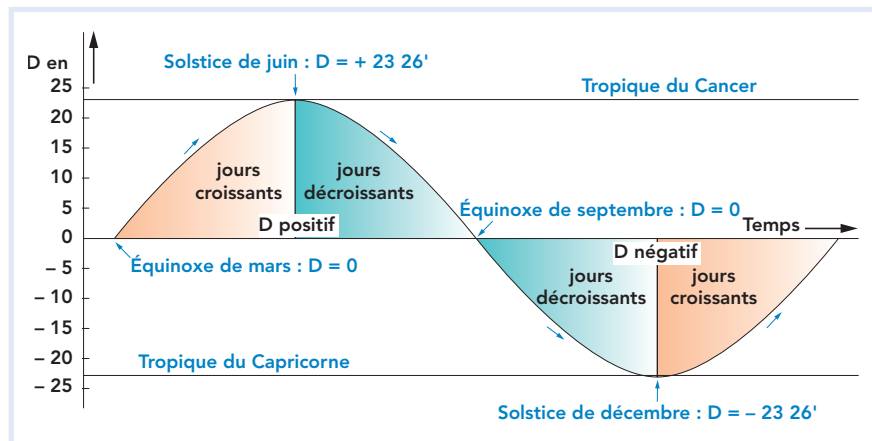
### Variation de la déclinaison d du soleil au cours de l'année

Examinons attentivement la figure ci-après qui représente la position du Soleil par rapport à l'équateur.

Si nous tendons un fil entre le centre de la Terre et le centre du Soleil, celui-ci coupe l'écorce terrestre en un point Pg appelé **position géographique du Soleil**. Ce point Pg étant sur la Terre, il pourrait être repéré par sa latitude comme l'est tout voilier à la surface du globe.

Nous utiliserons plutôt la **déclinaison D** qui, dans notre exemple, s'apparente tout à fait à une latitude.

Nota : la définition de la déclinaison sera fournie au chapitre "Les coordonnées horaires D, AHG et AHL".



L'examen de cette courbe ci-dessus fait ressortir que :

|                               |                                            |                                                                            |
|-------------------------------|--------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| Du 20 mars<br>au 23 septembre | le point Pg est<br>au-dessus de l'équateur | On dit que la déclinaison D<br>est positive                                |
| Du 23 septembre<br>au 20 mars | le Pg est<br>en dessous de l'équateur      | On dit que la déclinaison D<br>est négative                                |
| Du 21 juin<br>au 22 décembre  | la longueur des jours<br>diminue           | On dit que D décroît<br>ou encore que<br>la variation de D<br>est négative |
| Du 22 décembre<br>au 20 mars  | la longueur des jours<br>s'accroît.        | On dit que D croît<br>ou encore que<br>la variation de D<br>est positive   |

On note que, de façon continue, le Soleil passe d'une déclinaison de  $+23^{\circ} 26'$  (jour de l'été) à une déclinaison de  $-23^{\circ} 26'$  (jour de l'hiver), en ayant par deux fois une déclinaison nulle (jours du printemps et de l'automne).

Ces notions nous seront très utiles pour calculer la valeur exacte de la déclinaison à l'instant de la visée au sextant.

## QUELQUES GRANDEURS RELATIVES

### Diamètres comparés



|         | Diamètre en km | Diamètre en prenant pour base un diamètre du Soleil égal à 14 cm |
|---------|----------------|------------------------------------------------------------------|
| Lune    | 3 500          | 0,3 mm                                                           |
| Terre   | 12 700         | 1,2 mm                                                           |
| Soleil  | 1 400 000      | 14 cm                                                            |
| Mars    | 6 700          | 0,6 mm                                                           |
| Jupiter | 142 000        | 1,4 cm                                                           |

### Distances comparées



|                                             | Distance en km                               | Distance en prenant pour base une distance de la Terre au Soleil égale à 15 mètres | Temps mis par la lumière pour joindre les deux Astres (à la vitesse de la lumière de 300 000 km/s) |
|---------------------------------------------|----------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Terre - Lune                                | 384 000                                      | 3,8 cm                                                                             | 1,3 seconde                                                                                        |
| Soleil - Terre                              | 150 000 000                                  | 15 m                                                                               | 8 minutes                                                                                          |
| Soleil - Jupiter                            | 780 000 000                                  | 78 m                                                                               | 43 minutes                                                                                         |
| Soleil - Proxima du Centaure <sup>(1)</sup> | 42 000 milliards (= 4,2 a.l.) <sup>(3)</sup> | 4 200 km                                                                           | 4,2 années                                                                                         |
| Soleil - Andromède <sup>(2)</sup>           | $3 \times 10^{19}$ (= 3 millions d'a.l.)     | 3 milliards de km                                                                  | 3 millions d'années                                                                                |

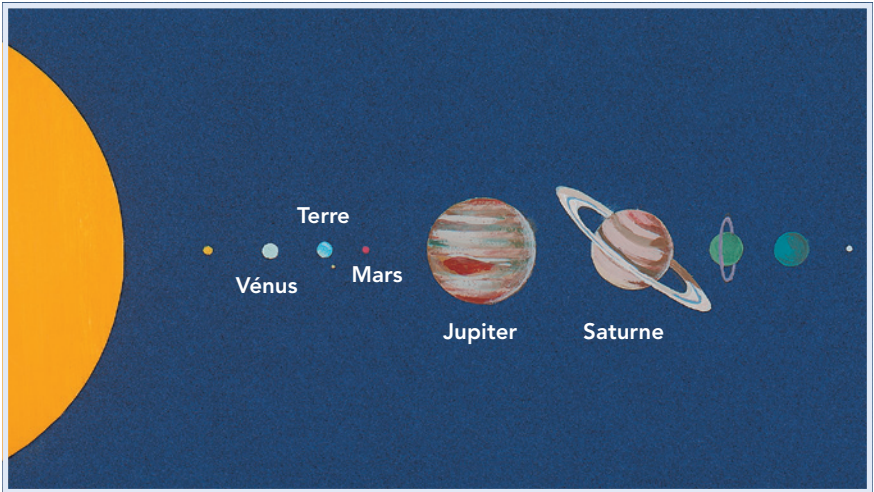
(1) Proxima du Centaure est l'Étoile la plus proche de la Terre.

(2) Andromède est la seule Galaxie de l'hémisphère nord, visible à l'œil nu.

(3) a.l.: année-lumière.

## Système solaire : volumes comparés

(Les distances relatives ne sont pas conformes)



a. l. = année-lumière

= distance parcourue par la lumière en un an à la vitesse de 300 000 km/sec

= 300 000 km/sec x 60 sec/min x 60 min/h x 24 h/j x 365 j

≈ 10 000 milliards de km

=  $10^{13}$  km

## Système solaire : orbites comparées

(Les distances relatives sont conformes)



T = Terre ; V = Vénus ; S = Soleil

Rappels :

1 million = 1 000 000 =  $10^6$

1 milliard = 1 000 000 000 =  $10^9$

## QUELQUES JALONS CHRONOLOGIQUES

| Date  | Auteur                                             | Principale découverte                                                                                                                                                                               |
|-------|----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| - 600 |                                                    |                                                                                                                                                                                                     |
|       | Anaximandre                                        | Terre au centre d'une sphère                                                                                                                                                                        |
| -500  |                                                    |                                                                                                                                                                                                     |
|       | Anaxagore                                          | Rotondité de la Terre                                                                                                                                                                               |
| -400  |                                                    |                                                                                                                                                                                                     |
|       | Héraclide du Pont                                  | Rotation de la Terre                                                                                                                                                                                |
| -300  |                                                    |                                                                                                                                                                                                     |
| - 230 | Aristarque de Samos<br>Eratosthène                 | Héliocentrisme (sera repris 18 siècles plus tard)<br>Calcul de la circonférence de la Terre à 10 % près                                                                                             |
| -200  |                                                    |                                                                                                                                                                                                     |
| -100  | Hipparque                                          | Calcul de la durée de l'année<br>Découverte du phénomène de précession des équinoxes<br>Calcul de la distance Terre-Lune<br>Publication d'un catalogue des étoiles<br>Invention de la trigonométrie |
| 0     |                                                    |                                                                                                                                                                                                     |
| 200   | 150 Ptolémée                                       | Système géocentrique<br>Mise au point d'un catalogue des étoiles<br>Son principal ouvrage, bien qu'écrit en latin, et plus connu sous le nom d'Almageste qui est le titre de sa version en arabe    |
|       | 1252 Royaume de Castille<br>1492 Christophe Colomb | Publication des Tables Alphonsines<br>Découverte de l'Amérique                                                                                                                                      |
| 1500  |                                                    |                                                                                                                                                                                                     |
|       | 1543 Copernic                                      | Héliocentrisme                                                                                                                                                                                      |
|       | 1572 Tycho-Brahé                                   | Recueil d'observations                                                                                                                                                                              |
|       | 1584 Giordano Bruno                                | Emit l'hypothèse de l'existence d'autres Systèmes Solaires (fut pour cela condamné au bûcher)                                                                                                       |
| 1600  |                                                    |                                                                                                                                                                                                     |
|       | 1609 Kepler                                        | Orbites elliptiques de la Terre et des Planètes<br>Loi des aires<br>Loi des carrés des temps de révolution (1618)                                                                                   |
|       | 1610 Galilée                                       | Découverte des satellites de Jupiter<br>Mise au point de la lunette qui porte son nom                                                                                                               |
|       | 1614 Neper                                         | Invention des Logarithmes                                                                                                                                                                           |
|       | 1656 Huygens                                       | Mise au point du pendule des horloges                                                                                                                                                               |
|       | 1687 Newton                                        | Découverte des lois de la Mécanique céleste et du calcul différentiel. Invention du télescope                                                                                                       |
| 1700  |                                                    |                                                                                                                                                                                                     |
|       | 1731 Hadley                                        | Invention de l'octant et du sextant                                                                                                                                                                 |
|       | 1765 Harrison                                      | Mise au point de la montre H 4 qui remporta le prix de la longitude                                                                                                                                 |
| 1800  |                                                    |                                                                                                                                                                                                     |
|       | 1837 Sumner                                        | Découverte fortuite de la droite de hauteur                                                                                                                                                         |
|       | 1846 Le Verrier                                    | Découverte de la planète Neptune uniquement par le calcul                                                                                                                                           |
|       | 1875 Amiral français<br>Marcq de Saint-Hilaire     | Théorie de la droite de hauteur                                                                                                                                                                     |
| 1900  |                                                    |                                                                                                                                                                                                     |
|       |                                                    | Consol, Loran, Decca, Satnav, puis G.P.S.                                                                                                                                                           |
| 2000  |                                                    |                                                                                                                                                                                                     |



## QUATRE PRÉCURSEURS DU SEXTANT

### Le quadrant marin

Le quadrant marin de Gunter est formé d'un quart de cercle en bois, en laiton ou en cuivre. Tel un rapporteur, il est gradué de  $0^\circ$  à  $90^\circ$ .

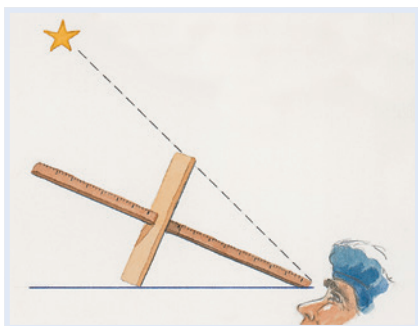
- > On aligne l'astre à travers les deux pinnules. La hauteur de l'astre est donnée directement par la lecture de la trace du fil à plomb sur le limbe. Le quadrant a été utilisé entre 1450 et 1650 (200 ans). La référence est la verticale (fil à plomb).



### Le bâton de Jacob

Le bâton de Jacob (ou arbalète ou arbalétrille) est attribué à Levy ben Gerson. Il est constitué de marteaux en bois couissant sur un bâton gradué en degrés. Son usage s'étend de la fin du XV<sup>e</sup> siècle à la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle (300 ans). Quatre marteaux amovibles de tailles différentes peuvent être utilisés.

- > Les hauteurs se lisent directement sur les quatre faces graduées du bâton. La référence est l'horizon.



### L'astrolabe marin

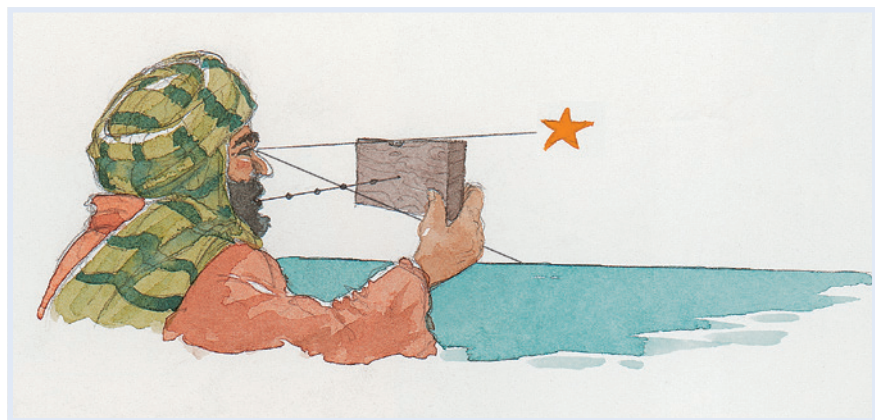
L'astrolabe marin est en bronze épais évidé (afin d'offrir peu de prise au vent). Il fut en usage de 1450 à 1800 (350 ans). Sa partie basse est en métal plein afin de bien marquer la verticale (fil à plomb).

- > On aligne l'astre à travers les deux pinnules de l'alidade mobile et on lit la distance zénithale directement sur le limbe gradué. L'ensemble est suspendu à une bélière à double articulation. Il reste, de par le monde, 64 astrolabes dont 2 en France.



## Le kamal

Le Kamal est une planchette rectangulaire en bois, percée en son centre. Une ficelle de longueur fixe est tendue entre les dents de l'observateur et le centre du kamal. Une autre ficelle est tendue entre le kamal et une étoile.



- > L'ensemble est réglé pour une hauteur donnée de la Polaire en fonction du port de destination. Ceci permet une navigation en latitude sur un parallèle. (La ficelle comporte plusieurs nœuds permettant des changements de latitude). Cet instrument très simple et peu onéreux est apparu au Moyen-Âge et était encore en fonction en 1875 dans l'océan Indien.

La précision de ces quatre instruments de mesure ne dépasse pas le degré, c'est-à-dire les 60 milles marins (ou 111 km).

**V**ous trouverez dans ce manuel l'explication du principe de la droite de hauteur qui base la navigation sur l'observation du Soleil, des planètes et des étoiles. Avec un souci de clarté, l'auteur développe une approche qui convient quel que soit l'astre observé (sauf la lune). Les observations et les calculs sont consignés sur des imprimés imaginés par l'auteur pour la pratique de la visée au sextant, pendant la période de l'apprentissage pédagogique.

*Après des études scientifiques, c'est lors de son service militaire dans la Marine Nationale que François Meyrier s'est initié à la navigation astronomique. Naviguant depuis l'âge de 16 ans, il a conduit de très nombreuses croisières et convoys en équipages.*

*Il se consacre aujourd'hui à la préparation aux grandes traversées (mini-Transat, Transat des Alizés) et anime des sessions de formations dans les Écoles de Voile et Clubs Nautiques (Les Glénans, le GIC, EFT, STW, Section Voiles des Comités d'Entreprises...)*

*Passionné par « l'Histoire du point à la mer » il participe aux animations du Musée de la Marine.*