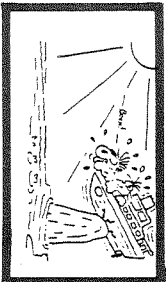


Technique navigation



# Calculatrice à bord

# Navigation astronomique

Dans les volets précédents de cet article, nous avons découvert le monde des ordinateurs de poche et leur application à bord d'un bateau pour le calcul des marées. Voyons à présent leur utilisation en navigation astronomique.

## I. Rappels théoriques

### a) Principe de la navigation astronomique

La grande question pour le marin est : "ou suis-je ?" (s'il y a 60 nœuds de vent, on ajoute souvent : "mais que suis-je venu faire ici ?"). En vue des côtes la réponse est facilement donnée en prenant le relèvement ou l'alignement de points remarquables, les amers, puis en reportant ces observations sur la carte marine correspondante. Au large, quand ces amers ont disparu derrière l'horizon, les seuls repères utilisables (à part les systèmes radiolécriques) sont les amers célestes : soleil, planètes, étoiles. La démarche est la même qu'en navigation côtière : si vous observez plusieurs amers simultanément (plusieurs étoiles par exemple) vous pourrez en déduire immédiatement votre position en latitude et longitude : si vous ne pouvez observer qu'un seul amer à la fois (le soleil dans la journée), vous vous situerez sur une droite tracée sur la carte. Il faudra combiner cette droite avec celle obtenue par une observation ultérieure ou antérieure pour obtenir un point complet par intersection.

Les différences principales entre amers terrestres et célestes sont les suivantes :

- **Les amers terrestres** sont fixes : du premier janvier au 31 décembre, "Goulphar" est planté dans les caloux de "Belle Isle". Les astres, eux, se déplacent sur la voûte céleste tout au long du jour et de l'année. Mais leurs mouvements sont parfaitement connus et leur position dans le ciel peut être calculée à tout moment. Il est donc nécessaire pour effectuer ce calcul à bord, d'avoir une heure très précise à la seconde près.

Pour relever un amer terrestre, on utilise un compas qui donne la direction de cet amer par rapport au nord, dans le plan horizontal de l'observateur. Pour relever un astre on utilise également un compas pour relever sa direction par rapport au Nord (son Azimut).

Mais, surtout, il faut y ajouter un sextant pour mesurer la hauteur de cet astre dans un plan vertical, c'est-à-dire l'angle que fait sa direction avec celle de l'horizon.

- **Les amers célestes** sont situés à des distances énormes de nos yeux. La Lune, astre le plus proche est déjà à presque 400.000 km de la Terre, le Soleil est à environ 150 millions de km ! La valeur de ces distances n'a donc aucune importance pour le navigateur qui ne s'intéresse qu'à la direction dans laquelle il voit ces astres (ce qui n'est pas le cas de l'astronomie). Considérer donc que tous les astres évoluent sur une sphère concentrique au globe terrestre et

de rayon infini : c'est la "sphère céleste".

Pour effectuer un point astronomique, surtout avec l'aide d'un ordinateur de poche, il n'est pas nécessaire d'en comprendre davantage. Si vous êtes très pressés, vous pouvez donc dès maintenant sauter au chapitre II, programmer votre calculatrice et utiliser aussitôt le programme "Soleil", qui est prévu pour ça : en 2 minutes, vous aurez votre droite de hauteur. C'est d'ailleurs la démarche un peu bête mais efficace de beaucoup de navigateurs utilisant des tables, sans vraiment comprendre ce qu'ils font ! Mais c'est dommage, car les notions d'astronomie qui régissent ces calculs de navigation sont très simples, assez intuitives et, à mon avis, passionnantes. En outre, leur connaissance permet d'être critique sur les observations et les calculs effectués.

Commençons donc par bien assimiler le système de repérage des astres dans le ciel : leurs coordonnées et la manière dont ils varient dans le temps.

### b) Systèmes de coordonnées équatoriales

Notre position sur le globe terrestre est définie par deux grandeurs angulaires : latitude et longitude (figure 1).

- **La latitude L** est l'angle que fait le rayon terrestre passant par votre position avec le plan de l'Equateur. Elle varie de 0° (Equateur) à 90°N (Pôle Nord) et de 0° à 90°S (Pôle Sud).

- **La longitude G** est l'angle que fait le méridien passant par votre position avec un méridien de référence : le méridien de Greenwich à 180° Ouest et de 0° Est. Exacte-

ment de la même manière, on peut définir la position d'un astre dans le ciel par deux grandeurs angulaires comptées à partir des mêmes références : la déclinaison et l'angle horaire, appelées coordonnées équatoriales :

- **La déclinaison D** (figure 2 : la terre vue de côté) est l'angle que fait la direction de l'astre avec le plan équatorial terrestre. On peut dire que c'est la latitude de l'astre. Elle varie donc de 0° à 90°N et de 0° à 90°S.

- **L'angle horaire Greenwich AHG** (figure 3 : la Terre vue de dessus) est l'angle que fait la direction de l'astre avec le plan méridien de Greenwich. On peut dire que c'est la longitude de l'astre. Il est compté de 0 à 360° en partant vers l'Ouest à partir de Greenwich.

Attention donc à cette différence importante avec la mesure des longitudes terrestres (comptées de 0 à 180° Est ou Ouest).

Du point de vue mathématique ce n'est pas bien malin, mais la faute historiquement en revient aux premiers navigateurs européens qui en décidèrent ainsi :

On définit un deuxième angle horaire de l'astre, non plus par rapport au méridien de Greenwich, mais par rapport au méridien de l'observateur ; c'est l'angle horaire local AHL. Il est compté dans le même sens que AHG (0° à 360° en tournant d'Est en Ouest). Il fait bien sûr intervenir la position en longitude de l'observateur. Dans le cas d'une longitude Est (figure 3), on voit que AHL est la somme de AHG et G. Dans le cas général AHL est donné par la formule.

$$(1) \quad \boxed{\text{AHL} = \text{AHG} - G}$$

avec G positif en longitudes Ouest et négatif en longitudes Est

Cette règle de signe pour les longitudes est la convention internationale utilisée dans tous les calculs qui suivront.

Signification pratique de ces grandeurs : cas du Soleil.

La Terre est soumise dans l'Espace à plusieurs mouvements dont les deux principaux sont la rotation journalière sur elle-même et la révolution annuelle autour du Soleil. Tout astre fait donc "apparemment" le tour de la Terre en 24 heures (figure 3). Il survole successivement le méridien de Greenwich, l'Amérique, le Pacifique, l'Asie et à nouveau l'Europe. L'AHG du Soleil va donc en 24 heures, croître de 0° à 360° à une vitesse moyenne de  $360°/24 = 15°$  par heure.

L'heure "Temps Universel" (TU) étant à peu près définie comme l'heure solaire à Greenwich, il en résulte que le soleil passera au-dessus du méridien de Greenwich vers midi TU (pas tout à fait à cause des irrégularités des mouvements terrestres dont nous parlerons plus loin), son AHG sera alors nul.

calculée de l'astre, donc sur votre position.

Reparons de la déclinaison du Soleil. La Terre effectue sa révolution annuelle autour du soleil sur une orbite (légalement) elliptique appelée "l'ellipse" (figure 4). Cette ellipse définit donc un plan dans l'espace, le "plan de l'ellipse". Or il se trouve que ce plan n'est pas confondu avec le plan de l'équateur terrestre : l'axe N-S des pôles terrestres (autour duquel s'effectue la rotation journalière) est incliné de  $23°27'$  par rapport à une perpendiculaire au plan de l'ellipse. Cette valeur moyenne de l'inclinaison est fixe à notre échelle de temps, de telle sorte que l'axe des pôles est dirigé vers un point fixe du ciel ("l'étoile Polaire", côté Pôle Nord).

Il en résulte que, tout au long de l'année, la projection verticale du Soleil sur le globe terrestre (*"Pied du Soleil"*) se déplace de part et d'autre de l'équateur entre deux positions extrêmes qui définissent les "Tropiques du Cancer" ( $L = 23°27'N$ ) et du "Capricorne" ( $L = 23°27'S$ ). La déclinaison du Soleil varie

Position de la Terre sur la Figure 4, p. 60	Date (à 1 jour près)	Signification (en hémisphère Nord)	Valeur de la déclinaison
1	21/22 Décembre	Solstice d'hiver	$23°27'$ Sud
2	21 Mars	Equinoxe de Printemps	$0°$
3	21/22 Juin	Solstice d'été	$23°27'$ Nord
4	23 Septembre	Equinoxe d'Automne	$0°$

Tableau n° 5

Vers minuit TU le soleil passera aux antipodes de Greenwich, on aura alors AHG = 180°. Le même raisonnement s'applique pour un observateur situé n'importe où sur la Terre sur un méridien de longitude G. On étudie alors les variations de AHL, l'angle horaire local (toujours figure 3). Quand AHL = 0°, le soleil culmine dans le méridien de l'observateur c'est le midi vrai du lieu. Le soleil apparaît à l'Est au ras de l'horizon de l'observateur quand son AHL est d'environ  $270°$ . Il se couche à l'Ouest pour AHL  $\approx 90°$ . Il est donc très important de retenir la règle suivante, très simple :

Le soleil (ou n'importe quel astre) n'est visible en un lieu que lorsque son AHL en ce lieu est compris entre  $270°$  et  $90°$ .

pour  $270°$  AHL  $360°$  c'est le matin pour  $0°$  AHL  $90°$  c'est l'après-midi

Souvenez vous également que, étant donné la variation de  $15°$  par heure des angles horaires, une erreur de 4 secondes sur un temps mesuré induira une erreur de une minute de longitude sur la position

Fig. 1

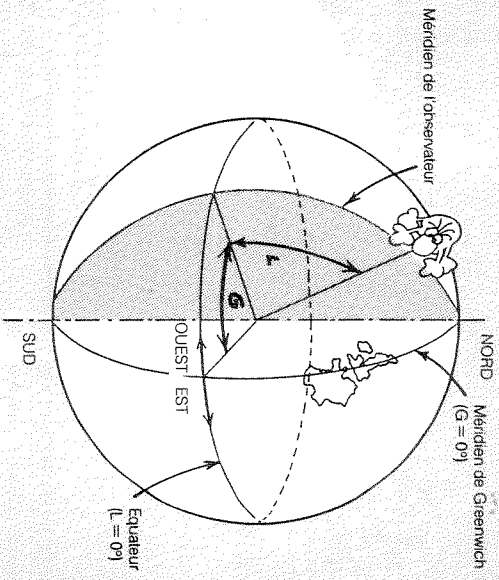


Fig. 2

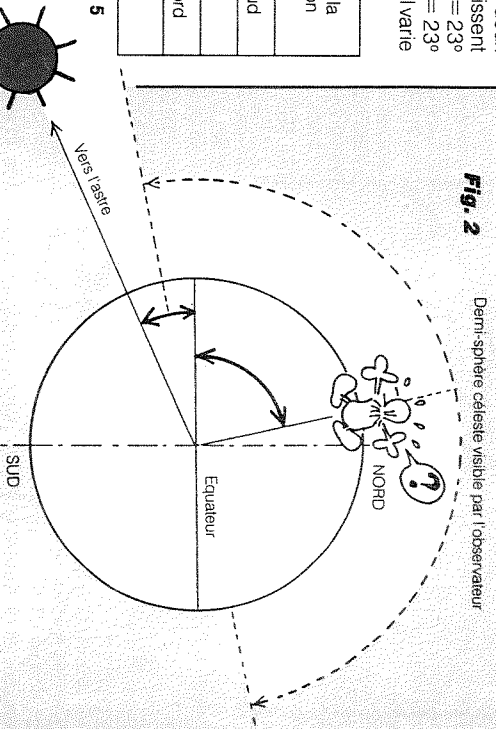
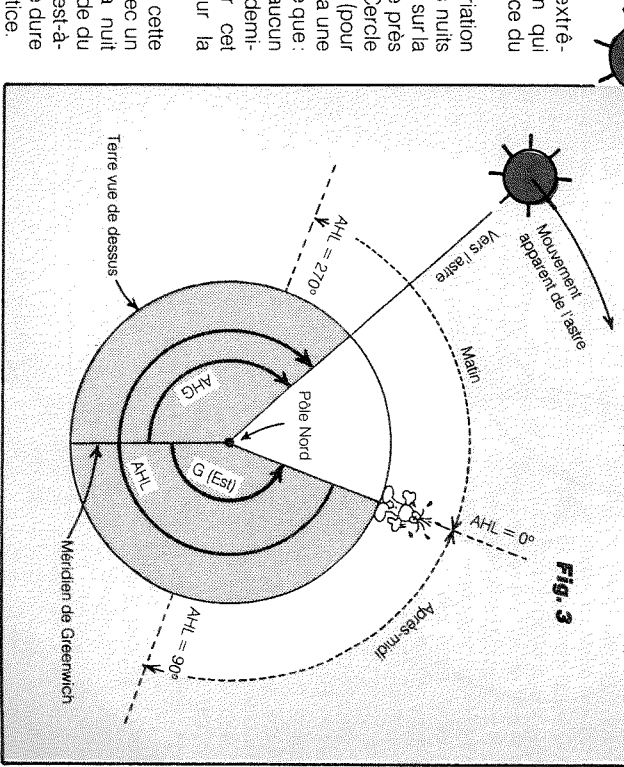


Fig. 3



donc entre ces valeurs extrêmes et c'est cette variation qui génère les saisons à la surface du globe (voir tableau n° 5). Autre conséquence de la variation de la déclinaison solaire : les nuits et jours polaires. Considérons sur la figure 2, un observateur situé près du Pôle Nord, au-delà du Cercle Polaire Arctique ; en hiver (pour l'hémisphère Nord), le Soleil a une déclinaison Sud, de telle sorte que : il ne peut apparaître à aucun moment de la journée dans la demi-sphère céleste visible par cet observateur (en pointillé sur la figure).

C'est la nuit polaire. Au pôle cette nuit dure 6 mois, alternant avec un jour continu de 6 mois. La nuit polaire existe jusqu'à la latitude du cercle Polaire ( $L = 66°33'$ , c'est-à-dire  $90° - 23°27'$ ), où elle ne dure que 24 heures le jour du solstice.

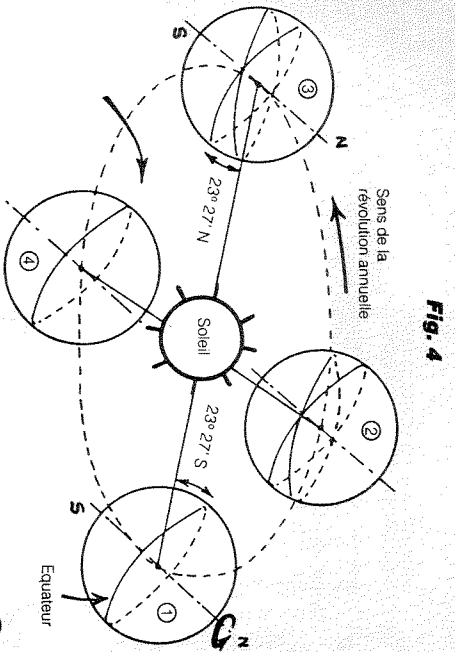


Fig. 4

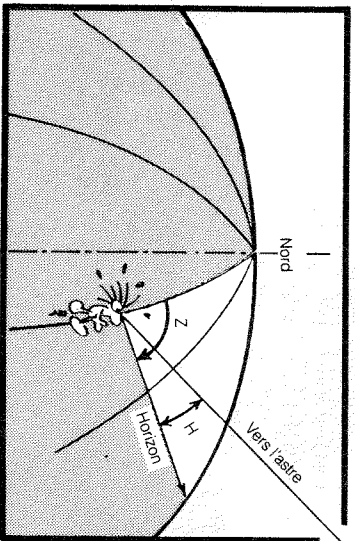


Fig. 6

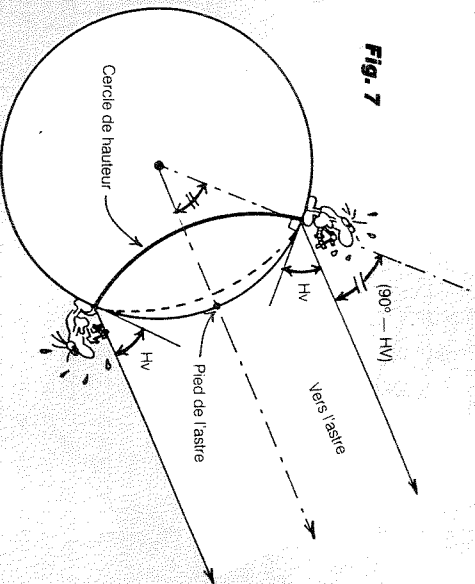


Fig. 7

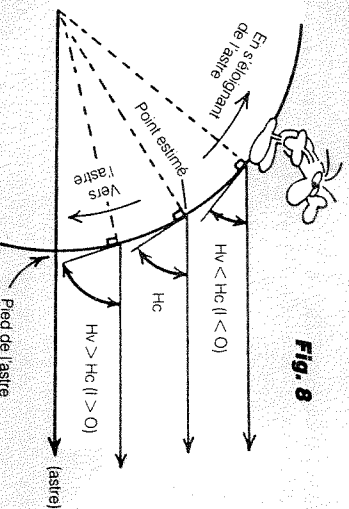


Fig. 8

### c) Coordonnées horizontales d'un astre

Ce sont les grandeurs directement mesurables par un observateur terrestre (figure 6) :

- L'Azimuth de l'Astre Z est l'angle que fait la direction horizontale de l'astre avec le nord géographique de l'observateur. Il peut se mesurer au compas (en corrigeant de la variation magnétique) mais le relevement d'un astre, surtout haut perché, est peu précis. Pour le Soleil dans l'hémisphère nord, l'Azimuth varie de 90° environ au lever, à 270° au coucher. Au midi vrai du lieu, le soleil culmine plein sud, son azimuth est donc égal à 180°.

● **La hauteur de l'astre H** est l'angle, mesuré dans le plan vertical de l'observateur (hachuré sur la figure 6) que fait la direction de l'astre avec la direction de l'horizon. Cet angle se mesure avec un instrument optique de précision : "le sextant" dont le principe et le maniement sont donnés dans tous les ouvrages de navigation. Attention ! la hauteur lue sur le sextant, appelée "hauteur observée" (HO) est fautive. Pour qu'elle devienne une "hauteur vraie" (HV) utilisable dans les calculs, il faut la corriger :

- **De l'erreur instrumentale** du sextant (principalement, la collimation C exprimée en minutes d'angle).
- **De l'erreur de dépression de l'horizon** due à la hauteur de l'œil (O en mètres) de l'observateur au-dessus du niveau de la mer.
- **De l'erreur de réfraction** due à la déviation par les couches atmosphériques des rayons lumineux issus de l'astre. Cette erreur augmente quand la hauteur de l'astre diminue. Il n'est donc pas conseillé d'observer des astres trop bas (minimum 15°).
- **Pour le soleil, de l'erreur de demi-diamètre** car on observe en général le bord inférieur du disque solaire au lieu d'observer son centre. Le demi-diamètre apparent du soleil est de 16'.
- **L'erreur de parallaxe** (due au rayon de la terre) peut être négligée en navigation de plaisance. Toutes les erreurs sont calculées sous forme de tables dans les documents nautiques. Dans les programmes qui suivent, la correction globale sera calculée par la formule :

$$(2) \quad H_v = H_o + \left[ \frac{16 + C + 1,77 \sqrt{O} - \operatorname{tg}(90 - H_o - C/60)}{60} \right]$$

Cette formule est valable pour une observation du bord inférieur du soleil. Pour le bord supérieur, remplacez (16) par (-16) en début de crochets. Pour une observation d'étoile ou de planète (qui sont des points lumineux sans diamètre apparent, supprimez le (16)).

### d) Principe de la droite de hauteur

Quelle est donc la relation qui va nous permettre de passer des grandeurs mesurées Hv et Z aux coordonnées géographiques de notre position ?

Regardez la figure 7. Les deux observateurs voient l'astre (rejeté à l'infini, donc tous les rayons en provenant sont parallèles) sous la même hauteur Hv. Ils sont tous les deux sur un même cercle défini par :

- **Son centre**, au pied de l'astre déterminé sur le globe terrestre par la déclinaison et l'angle horaire de l'astre.
- **Son rayon** (angulaire) égal à (90° - Hv).

Il en serait de même en tout point de ce cercle. Le fait d'observer un astre sous une hauteur Hv vous situe donc quelque part sur un cercle de la surface terrestre : c'est le "cercle de hauteur" qui a, en général, un très grand rayon (plusieurs milliers de milles).

En conséquence, une portion de ce cercle tracée sur la carte marine de la région où votre estime vous situe est quasiment confondue avec une droite tangente, appelée "droite de hauteur".

En résumé donc, la connaissance de la hauteur observée de l'astre, de l'heure exacte de l'observation, et d'une position estimée approximative permet de vous situer sur une droite, dont la principale caractéristique est d'être perpendiculaire à la direction d'observation de l'astre, puisqu'elle est tangente au centre de hauteur. Cette caractéristique est très intéressante car elle vous permet à l'avance de savoir quel type de positionnement une observation astronomique va vous fournir. Le soleil observé tôt le matin ou tard le soir (Azimuth proche de 90° ou 270°) donnera une droite de hauteur Nord-Sud, donc une position précise en longitude, inconnue en latitude. Une observation au midi vrai du lieu (une "méridienne", Z = 0 ou 180°) vous fournira au contraire une latitude. Une représentation intuitive de la droite de hauteur est

donnée par la ligne que forment vos deux bras en croix quand, sur le pont du bateau, vous regardez l'astre bien en face.

## e) Calcul et tracé d'une droite de hauteur de soleil

**Une observation de soleil à l'heure**  
T vous a donné la hauteur vraie Hv. Votre estime vous situe à une position déterminée par la latitude L et la longitude G. La méthode classique dite "de l'intercept" consiste à calculer la hauteur et l'azimuth sous lesquels vous verriez le soleil à cet instant T, si vous étiez exactement au point estimé puis à comparer cette hauteur calculée Hc à la hauteur effectivement mesurée Hv. La différence entre les deux s'appelle "l'intercept", c'est en quelque sorte l'erreur d'estime. Exprimée autrement, cela revient à calculer le cercle de hauteur passant par le point estimé, puis à en déduire le cercle passant par votre position réelle grâce à l'intercept, qui vous indique la différence des rayons entre ces deux cercles concentriques. Les azimuths calculés et réels sont normalement identiques si le point estimé n'est "pas trop faux", une erreur (vérifiée par la valeur de l'intercept) maximale de 30 milles est tolérable.

### Comment faire pratiquement ?

- Avec l'heure T et la longitude estimée G vous déterminez les coordonnées équatoriales du soleil: D et AHL.
- Soit par des tables, les éphémérides nautiques, donnant ces valeurs toutes l'année de l'heure.
- Soit par le programme d'éphémérides pépétuelles proposé au chapitre suivant qui vous dispense de l'utilisation des tables.
- Vous calculez ensuite la hauteur de l'azimuth du soleil, vu du point estimé par les formules suivantes :

$$(3) \quad Hc = \arcsin \left( \sin D \cdot \sin L + \cos D \cdot \cos L \cdot \cos AHL \right)$$

$$Z = \arccos \left( \frac{\sin D - \sin L \cdot \sin Hc}{\cos L \cdot \cos Hc} \right)$$

avec la condition  $\sin AHL > 0 \Rightarrow Z = 360^\circ - Z$

Ce sont en fait les formules de passage de coordonnées équatoriales (D, AHL) en coordonnées horizontales (Z, Hc). C'est bien sûr la calculatrice qui travaille pour vous. En méthode manuelle on utiliserait les "Tables américaines HO 249", par exemple.

- Vous calculez l'intercept :

$$(4) \quad I = Hv - Hc$$

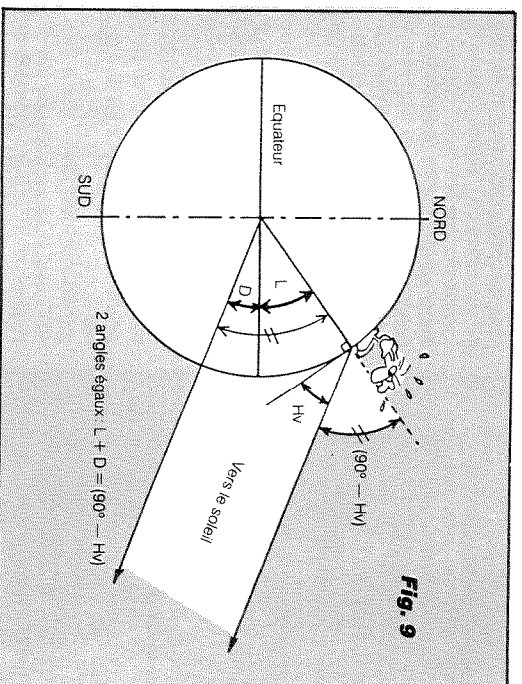


Fig. 9

1 minute d'intercept = 1 mille sur la carte.

- Vous tracez sur la carte (voir l'exemple traité au chapitre suivant) :
  - Le point estimé
  - La droite d'azimuth à partir du point estimé
  - Sur cette droite vous reportez l'intercept en milles vers l'astre si l est positif en s'éloignant de l'astre si l est négatif (pour s'en souvenir, voir la figure 8).

— Au bout du segment d'intercept, vous tracez une perpendiculaire, c'est la droite de hauteur. Terminé pour la manœuvre qui, avec l'ordinateur, a duré 3 minutes.

Toutefois, les observations astronomiques effectuées sur un petit bateau de plaisance sont sujettes à moules erreurs : erreur de mesure de la hauteur par mer agitée ou horizon douteux, erreur de lecture du sextant ou de la montre, etc. Il est donc prudent de toujours doubler ou tripler chaque observation.

Quand on effectue les calculs à la main, on n'a généralement pas envie de les faire deux ou trois

fois... donc on fait une moyenne, avant calcul, sur les temps et les hauteurs observées. Mathématiquement, ce n'est pas très correct (sauf si on le fait graphiquement en éliminant les valeurs aberrantes).

Quand on effectue les calculs à la machine, c'est tellement rapide qu'on doit calculer complètement toutes les droites correspondant aux observations successives. On critique ensuite sur les résultats, l'intercept et Azimuth, que l'on peut moyenner après avoir éliminé les valeurs aberrantes.

## f) Cas particuliers de l'observation méridienne

Si vous observez le soleil juste au moment où il passe au-dessus de vous, c'est-à-dire au midi vrai de votre position (AHL = 0°), alors les calculs se simplifient beaucoup. Le problème n'est plus dans l'espace à 3 dimensions comme dans le cas général de la figure 7 il se résout dans un plan, la ligne méridien qui contient à la fois le centre de la Terre, l'observateur et le Soleil (figure 9). Il existe alors une relation très simple qui permet de calculer la latitude à partir de la hauteur vraie du Soleil Hv et de sa déclinaison D.

$$(5) \quad L = D + (90^\circ - Hv)$$

avec L et D négatives quand elles sont SUD. Cette relation ne fait pas intervenir l'angle horaire.

Donc vous n'avez pas besoin de l'heure exacte pour calculer votre latitude par une observation méridienne. C'est l'intérêt énorme de cette méthode connue depuis longtemps par les anciens navigateurs. La seule heure grossière à déterminer est celle du midi vrai de votre lieu. On la calcule à partir de la longitude estimée convertie en temps ( $15^\circ = 1$  heure). Le programme "Soleil" s'en charge pour vous, ainsi que du calcul de la latitude. L'heure de l'observation tolère une incertitude de quelques minutes, car au moment du midi vrai le soleil culmine à sa hauteur maximale avant de redescendre dans l'après-midi, donc sa hauteur observée au sextant reste constante 3 ou 4 minutes.

Remarque : la formule (5) n'est en fait valable que lorsque le soleil

culmine dans votre Sud ou midi vrai (cas de l'hémisphère nord, au nord du tropique).  
Pour les autres cas, la formule subit un changement désigné :

$$(5 \text{ bis}) \quad L = D - (90^\circ - Hv)$$

Mais ne vous en souciez pas, le programme de calcul en tient compte tout seul !

## g) Les éphémérides pépétuelles

Elles sont intégrées dans le programme "Soleil". Dès que vous lui avez fourni l'heure et la date, il calcule automatiquement la déclinaison et l'angle horaire du Soleil. Cette partie du programme remplace donc les tables éphémérides (françaises, "Reed's" anglais, ou autres) avec une précision suffisante pour la navigation certes inférieure mais grandement suffisante pour la navigation de plaisance. Vous devez toutefois posséder ce document à bord en cas de panne du calculateur. Les explications qui suivent satisferont le lecteur curieux de comprendre le principe de ces éphémérides pépétuelles : mais ce n'est pas du tout indispensable pour utiliser le programme "Soleil".

### Principe des éphémérides pépétuelles

Si la Terre avait des mouvements parfaits dans l'espace (orbite circulaire autour du Soleil, axe des pôles rigoureusement fixe et perpendiculaire au plan de l'écliptique) le problème des éphémérides solaires se résoudrait avec un simple chronomètre : à 12 h TU exactement le soleil passerait tous les jours à Greenwich, l'AHG varierait linéairement comme le temps du chronomètre, la déclinaison serait une sinussoïde pure de période annuelle. Malheureusement l'orbite terrestre est une ellipse (l'écliptique) dont le soleil est un des foyers (figure 4). En vertu de la loi des aires, la terre décrit cette orbite à vitesse variable (l'été est plus long de 4 jours que l'hiver). De plus l'axe des pôles terrestres est incliné et animé de 2 mouvements oscillatoires de faible amplitude, dus à l'attraction combinée de la Lune et du Soleil : la précession et la nutation. La terre se comporte comme un gyroscope. Il résulte de tout ceci que la variation de l'AHG n'est pas régulière : tout au long de l'année l'AHG à 12 h TU à Greenwich varie de  $35^\circ 6'$  à  $04'$  la déclinaison décrit une pseudo-sinussoïde annuelle. De plus la période de ces phénomènes n'est pas égale aux 365 jours de notre année calendaire

Tableau n° 10: Listing du programme Soleil

```

INPUT "SOLEIL : JOUR", J, "MOIS", M, "AN", A, A:Ø = Ø
INPUT "LAT", L, "LONG", G: N = L: GOSUB 5ØØ: L = N: N =
G: GOSUB 5ØØ: G = N
INPUT "TU", T: N = T: GOSUB 5ØØ: T = N: IF T = Ø THEN T =
12: GOTO 3Ø
INPUT "HSEXT", H: N = H: GOSUB 5ØØ: H = N: ON AØ GO
TO 25
INPUT "COR SEXT", C, "CORTU", CØ, "H OEL", O: N =
CØ/1ØØ: GOSUB 5ØØ: CØ = N
H = H + C + 16 - 1,77 * ØAØ5 - TAN(ØØ - H - C/6Ø)) / 6Ø
: T = T + CØ
R = 281,22Ø83 + ØØ171,99 * (A - 1899,5)
Q = 11,726145 - 6,5 E - Ø5 * (A - 19ØØ)
U = 2,314243 + (A - 1901) * Ø,25964 - INT ((A - 19Ø1)/4)
B = INT (3Ø,6 * M) + Ø,6 - 33
IF INT (A/4) = A/4 THEN B = B + 1
IF M < 3 THEN B = 31 * M - 31
TØ = B + J + 1724
W = Ø,9856 * (TØ - U)
V = R + W + 1,913671 * SIN W + Ø,Ø19974 * SIN (2 * W) +
Ø,ØØØ289Ø7 * SIN (3 * W)
D = ASN (SIN (2 * Q) * SIN V)
Y = (T + 12) * 15 - V + R + W + TAN Q * 2 * SIN (2 * V) * 18Ø/Ø1
IF V > = 36Ø THEN V = V - 36Ø
P = Y - TAN Q * 4 * SIN (4 * V) / 9Ø/Ø1: P = ASNSINP - G: IF T =
12 THEN 2ØØ
K = ASN (SIND * SINL + COSD * COSL * COSP):
Y = (H - K) * 6Ø
Z = ACS (SIND - SINL * SINK) / (COSL * COSK)
IF SINP > Ø THEN Z = 36Ø - Z
PRINT USING "###.#": "INT", "Y", "NM", "Z", "AØ" = 1
IF SINZ = Ø THEN L1 = L + COSZ * Y/6Ø: PRINT
"LAT = ", DMS$(L1)
GOTO 2Ø
E = 12 - P/15: PRINT "TPASS = ", DMS$(E): T = E: GO TO 23
S = SGN N: N = ABS N: E = FRACN * 1ØØ: N = INT N + INTE /
6Ø + FRAC / 36
N = N * S: RETURN
115
2ØØ
5ØØ
51Ø

```

Tableau n° 13: 2e exemple d'utilisation du programme Soleil, calcul de latitude méridienne

Explications	Clavier	Affichage
Allumer la machine. Lancer le programme pour calculer L passage	Run ↵	Soleil : jour ?
Entre le jour (16)	16 Enter	Mois ?
Entre le mois (03)	Ø3 Enter	An ?
Entre l'année (1987)	1987 Enter	Lat ?
Entre la latitude estimée (42° 17'S)	- 42,17 Enter	Long ?
Entre la longitude estimée (62° 18'W)	62,18 Enter	Tu ?
Entrer zéro pour l'heure qui est inconnue. Le calculateur affiche l'heure Tu du passage du soleil au méridien du point estimé. Tpass : 16 h 18 mn	Ø Enter	Tpass : 16h 17 59,97
Vous éteignez la machine. A l'heure Tpass calculée, vous faites votre observation. Alors, vous rallumez la machine, réajustez idéalement cette première partie, puis vous continuez ainsi :		
Frapper Enter pour continuer	Enter	H Sext ?
Entrer la hauteur observée au sextant (49° 16')	49,16 Enter	Cor Sext ?
Entrer la correction instrumentale (collimation : 3,5')	3,5 Enter	Cor Tu ?
Entrer zéro pour la correction de la montre non utilisée	Ø Enter	H Øal ?
Entrer la hauteur de l'œil (2 m)	2 Enter	Int : 2,9 NM
Le calculateur affiche l'intercept (I : 2,9 NM)		
Puis l'azimut Z : 0° : normal pour une méridienne	Enter	Z : 36Ø
Puis la latitude calculée : L : 42° 14' 06" S	Enter	Lat : 42° 14,6

mais aux 365 jours 5 heures 48 mn 46 secondes de l'"année tropique" (définie comme le temps s'écoulant entre deux équinoxes de printemps).

Cela signifie que d'une année sur l'autre le soleil se retrouve exactement dans la même position à un intervalle de 365,24 jours.

Les années bissextiles de 366 jours ont été justement prévues pour compenser tous les 4 ans ce décalage d'un quart de jour entre année civile et année tropique.

Une première méthode pour obtenir des éphémérides solaires pertinentes consisterait à enregistrer les éphémérides complètes d'une année quelconque (c'est-à-dire AHG et D à 0 heure chaque jour + l'interpolation linéaire journalière), puis pour l'année désirée corriger ces valeurs de l'écart de temps induit par la différence année civile/année tropique. Cette méthode, parfaitement valable est décrite en détail dans l'ouvrage "Guide pratique de navigation astronomique" de Roger Florent. Elle permet notamment en calcul manuel, d'utiliser des tables éphémérides périodiques, avec un coefficient correcteur. On peut bâtir un programme de calcul sur cette méthode, mais ce programme nécessiterait le recours à des éphémérides écrites, ou bien la mise en mémoire machine des données nécessaires au calcul éphéméride sur une année complète, ce qui du point de vue informatique est lourd et peu élégant.

La méthode utilisée dans le programme "Soleil" calcule directement "l'équation du temps civil" pour une année quelconque comptée à partir d'une année de référence arbitraire (1900). Ce temps civil converti en valeur angulaire donne la valeur de AHG à 0 heure tous les jours.

Le calcul prend en compte bien sûr tous les paramètres astronomiques : précision, nutation, obliquité de l'axe des pôles, excentricité de l'éccliptique. Les formes numériques de ce calcul apparaissent dans les lignes 30 à 85 du listing du programme (tableau n° 10).

## II - Le programme Soleil

Ce programme calcule (à partir des formules (1) à (4)) l'intercept et l'azimut permettant le tracé d'une droite de hauteur de Soleil, en partant de la hauteur observée, de l'heure d'observation et d'une position estimée. Il inclut une partie "éphémérides perpétuelles", donc ne nécessite aucun document annexé.

Une option permet le calcul de l'heure de la méridienne en un lieu donné, puis de la latitude à partir de la hauteur observée.

Le listing est fourni dans le tableau n° 10. Il est écrit en Basic pour Casio FX 750, où il occupe 0,95 Ko de mémoire RAM; il suffit de le frapper tel quel au clavier de la machine, les conseils (transformations à effectuer pour rentrer ce programme dans un autre calculateur, recherche d'erreurs, etc.) formulés dans le volet précédent à propos du programme MARÉE restent valables ici. Passons à l'utilisation de ce programme.

### a) 1er exemple d'utilisation : calcul de droite de hauteur

Le 16 mars 1987, vous êtes au large des côtes argentines et vous faites deux observations consécutives du soleil, le matin :

Heure TU	Haut. observée
13 h 15 mn 28 s	32° 31'
13 h 16 mn 35 s	32° 43'

La correction instrumentale du sextant est de + 3,5". Vous êtes à 2 mètres au-dessus de l'eau. Votre montre avance de 1 mn 10 s et votre position estimée au moment des observations est :

L = 41° 57' S G = 62° 13' W

Vous allez calculer complètement les deux droites de hauteur correspondant à ces observations. La démarche à suivre est donnée dans le tableau n° 11.

#### Remarques sur ce tableau

- Format d'entrée des données : angles (lat, long, hauteur) : DD.MMSS (D : degré, M : minute, S : secondes)
- heures : HH.MMSS (H : Heures)
- Correction du sextant : minutes et 1/10° de minutes avec signe
- Correction de la montre : minutes et secondes avec signe
- Les latitudes Sud et longitudes Est sont à rentrer négativement.
- Au calcul de la 2° droite de hauteur, le calculateur ne vous redemande pas les corrections d'heure et de hauteur, il les suppose identiques à celles rentrées pour la première droite.
- Vous avez obtenu deux valeurs d'intercept voisines (- 2,1 et - 0,6 milles), ce qui prouve qu'aucune des observations n'est trop mauvaise. Pour le tracé de la droite



(figure 12), prenez un intercept moyen de (— 1,5 mille).

**b) Deuxième exemple d'utilisation : observation méridienne**

La droite que nous venons de calculer, recoupée par l'estime la précédant, vous situe en principe à quelques dizaines de milles près, sinon mieux. Vous pouvez donc prévoir grossièrement la position estimée lors du midi vrai de votre lieu : vous marchez à 6 nœuds au 190 vrai et le midi surviendra à peu près vers 16 h (puisque 62° W correspond à 4 heures environ). Un tracé sur la carte vous situe vers :

L = 42° 17' S G = 62° 18' W

Vous utilisez alors le programme Soleil pour calculer l'heure exacte du passage du soleil au méridien de ce lieu (voir tableau 13, partie supérieure).

Vous trouvez :

TPASS = 16 h 18 mn

Vous attendez ce moment-là pour observer le soleil (en fait vous observez un peu avant, et un peu après pour vérifier qu'il y a effectivement culmination de l'astre). Vous trouvez :

H<sub>0</sub> = 49° 16'

Vous rallumez la machine (qu'il a bien fallu éteindre depuis le calcul de TPASS), relapez la première partie du tableau 13, puis la deuxième, en entrant cette hauteur observée. Vous obtenez l'intercept et l'azimuth de la droite méridienne, puis

L = 42° 14' 06" S

**Remarque :** Cette méridienne est traitée par le programme comme une droite de hauteur. Nécessairement, l'azimuth calculé est égal à 0° (hémisphère Sud, où le Soleil culmine au Nord). Le résultat en latitude est bien sûr le même que par le calcul classique (formules 5 et 5 bis de la partie théorique). Mais cette méthode lève l'ambiguïté de signe évoquée pour les formules classiques.

**III - Calcul d'une position par transfert de droites**

En utilisant la droite de hauteur du matin et la méridienne de l'exemple précédent, vous allez pouvoir calculer votre position exacte. Le principe en est bien connu en navigation côtière : si vous ne pouvez relever qu'un seul amer à la fois (un grand phare la nuit sur l'horizon, par exemple), vous en effectuez deux relevements à 1 heure ou 2 d'intervalle. Sur la carte vous tracez normalement le deuxième relevement, puis le premier en le translatant parallèlement à lui-même dans la direction de la route vraie du bateau, de la distance parcourue entre les deux relevements : c'est un transfert, ou transport de droite. L'intersection des deux droites donne votre position.

Le même raisonnement s'applique aux droites de hauteur d'astre. La figure 14 illustre le transport de la droite du matin sur la méridienne. L'intersection des deux donne une position de

L = 42° 14' S G = 62° 20' W

à 16 h 18 mn TU

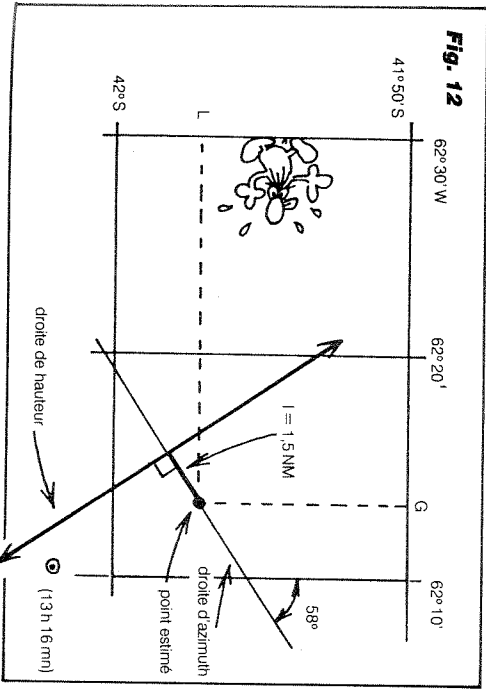
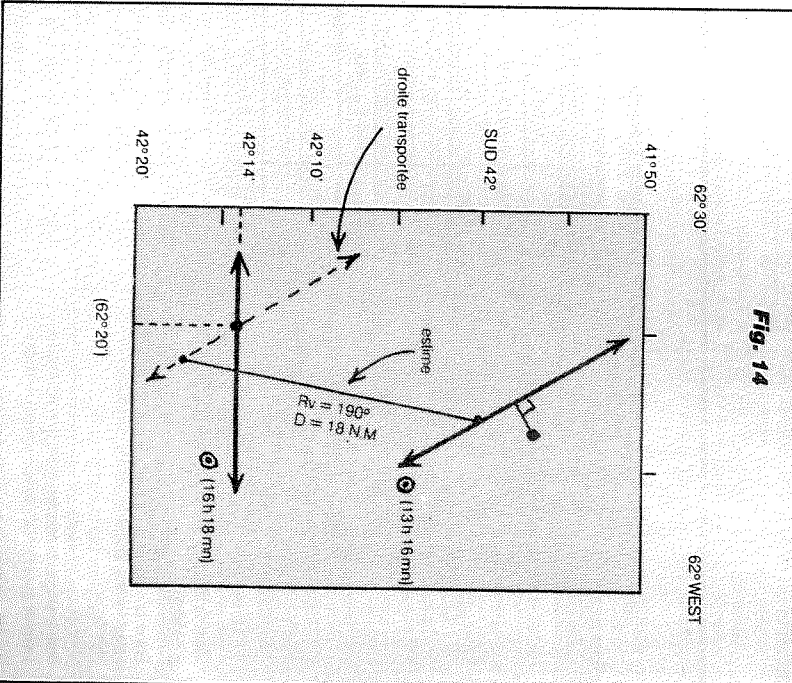


Tableau n° 11 : 1<sup>er</sup> exemple d'utilisation du programme Soleil, calcul de droites de hauteur

Explications	Clavier	Affichage
Allumer la machine. Lancer le programme pour la 1 <sup>re</sup> observation	Run	Soleil: Jour?
Entrer le jour (16)	16 Enter	Mois?
Entrer le numéro du mois (Mars: 03)	03 Enter	An?
Entrer l'année (1987)	1987 Enter	Lat?
Entrer la latitude estimée (41° 57' S, donc négative)	- 41.57 Enter	Long?
Entrer la longitude estimée (62° 13' W, donc positive)	62.13 Enter	Tu?
Entrer l'heure Tu d'observation (13h 16mn 38s)	13.1638 Enter	H Sext?
Entrer la hauteur observée au sextant (32° 31')	32.31 Enter	Cor Sext
Entrer l'erreur instrumentale en minutes (collimation: + 3,5)	3.5 Enter	Cor Tu?
Entrer l'erreur de la monture (avance de 1 mn 10s)	- 1.10 Enter	H owl?
Entrer la hauteur de l'œil de l'observateur en m (2 m)	2 Enter	
Le calculateur affiche l'intercept calculé en milles, avec signe	Enter	Int: 2.1 NM
Puis en repressant Enter, l'azimuth calculé en degré [Z: 58,1°]	Enter	Z: 58.1
Relancer le calcul pour la deuxième observation	Enter	Tu?
Entrer l'heure Tu de la 2 <sup>e</sup> observation (13h 17 mn 45s)	13.1745 Enter	H Sext?
Entrer la hauteur observée (32° 43')	32.43 Enter	
Le calculateur affiche le nouvel intercept (I: 0,6 NM)	Enter	Int: 0.6 NM
Puis le nouvel azimuth [Z: 57,8°]	Enter	Z: 57.8
Continuer éventuellement pour une 3 <sup>e</sup> observation	Enter	Tu?



Pour que cette méthode donne un résultat précis, quelques conditions doivent être respectées :

- Tenez une estime précise entre les deux observations. N'oubliez jamais de noter le loch à chaque observation astro. Pour cette raison, il est préférable de ne pas recouper des droites de hauteur trop espacées dans le temps.
- 2 droites doivent faire entre elles un angle minimum de 30° pour que leur intersection donne un point précis. Ne transportez donc pas des droites correspondant à des observations trop rapprochées (pas moins de 1 à 2 heures en fonction de la latitude et de l'heure.

- Choisissez une échelle de carte bien adaptée pour vos tracés. N'effectuez pas un transfert de droites sur un routier Atlantique, où l'épaisseur du trait de crayon représente déjà quelques milles! Au large, dessinez des "Canevas de Mercator" en prenant au minimum 8 cm par degré de latitude.

Vous voyez donc que la méthode graphique de transport de droites est rapide et précise. L'aide de l'ordinateur ne s'impose pas ici, néanmoins nous vous proposons un programme de transfert de droites sans tracé. Quel en est l'intérêt ?

- Vous dépanner et améliorer la précision de la position calculée si vous n'avez pas de carte à échelle correcte (et la grosse fiemme de dessiner un Canevas de Mercator).

- Etre au goût du jour, en aussi bien que les calcul spécialisées du commerce (Tamaya, Avel II). Mais, de grâce, ne faites pas certains utilisateurs de SA qui naviguent "tout électronique et compas interfacés à de "Way Point", alarmes de distance, etc. sans rien inscrire sur la carte.

Tracez toutes vos droites de hauteur, leurs transports et l'estime ces informations portées sur un blanc résumé à elles seules la navigation. Elles permettent critique immédiate d'un résultat le bon sens : une grosse d'étourderie (Intercept montrant faisant sortir de la carte par ple) saute aux yeux, beaucoup que sur un écran d'ordinateur plus cette information stock disponible à tout moment, quelques jours plus tard savez des doutes tardifs sur la navigation et qu'il vous faille noter le temps à la recherche de leur sournoise...

**Les Hors Série de Loisirs Nautiques, une véritable encyclopédie de l'architecture et de la construction navales de Plaisance. Voir page 100 bon de commande**

Tableau n° 16 : Exemple d'utilisation du programme Transfert

Explications		Clavier	Affichage
Allumer la machine. Lancer le programme		Run →	Transfert : L
Entrer la latitude estimée (41° 57'S)		— 41.57 Enter	Long1 ?
Entrer la longitude estimée (62° 13'W)		62.13 Enter	11 ?
Entrer l'intercept (— 1,5 mille)		— 1.5 Enter	Z1 ?
Entrer l'Azimuth (58°)		58 Enter	Lat2 ?
Entrer la latitude estimée (42° 17'S)		— 42.17 Enter	Long2 ?
Entrer la longitude estimée (62° 18'W)		62.18 Enter	12 ?
Entrer l'intercept (+ 2,9 Milles)		2.9 Enter	Z2 ?
Entrer l'Azimuth (0° pour la Méridienne)		0 Enter	Distance
Entrer la distance estimée entre les 2 observations (18 Milles)		18 Enter	R vraie ?
Entrer la route vraie entre les 2 observations (190°)		190 Enter	
Le calculateur affiche la latitude calculée (42° 14' 6"S)			Lat: — 42° 14' 6" S
Puis la longitude calculée (62° 20' 8"W). Position calculée pour l'instant de la 2° droite de hauteur		Enter	Long: 62° 20' 8" W

## IV. Le programme transfert

Son listing est fourni dans le tableau n° 15. Le principe de calcul est le suivant : chacune des deux droites de hauteur est définie par son intercept I, son azimuth Z, les coordonnées du point estimé (L et G) qui ont été utilisées lors de son calcul par le programme "Soieff".

L'estime entre les deux observations est définie par la distance parcourue D et la route vraie suivie R. Dans la version "estime composée", le programme vous demande une succession de distances et routes parcourues et il effectue lui-même la composition vectorielle (au cas où vous tirez des bords de près par exemple).

Le programme effectue alors analytiquement le transport de la droite n° 1 sur la droite n° 2 et calcule leur intersection. Il affiche le résultat en coordonnées géographiques.

Vous pouvez donc au choix taper ce programme dans sa version simple (partie supérieure du tableau n° 15) ou avec "estime composée" en rajoutant les lignes 20 à 23. Ce programme occupe environ 0,4 Ko de mémoire RAM.

### Exemple d'utilisation

Il est détaillé dans le tableau n° 16. Il reprend les données de l'exemple graphique du paragraphe précédent (c'est la version simple du programme).

### Quelques remarques sur le tableau n° 16

- Toutes les distances à rentrer (Intercepts et distance parcourue) sont exprimées en milles nautiques (abréviation : N.M.).
- Si le deuxième point estimé est identique au premier, rentrez zéro pour LAT2 et LONG2. C'est plus rapide que de retaper les valeurs.
- La position calculée est évidemment la même que celle obtenue pour le tracé sur la carte !
- Si vous utilisez la version avec estime composée, terminez l'entrée de la série de valeurs (D, R) par des valeurs (O,O). Le programme enchaînera directement sur le calcul de point.

Ouf ! Vous voici à la fin de ce volet, un peu musclé peut-être. La prochaine fois, nous verrons comment utiliser les étoiles et les planètes en navigation, toujours à l'aide d'un ordinateur de poche. Les méthodes sont très proches de celles que nous venons d'étudier pour le soleil. Le prochain volet devrait donc vous paraître beaucoup plus facile.

**H. LEGOFF**

Dessins : T. REY

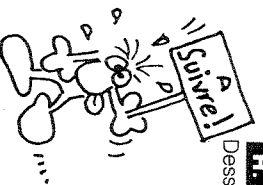


Tableau n° 15 : Listing du programme "Transfert"

```

10 INPUT "TRANSFERT: LAT 1"; L1, "LONG 1"; G 1, "I 1"; I1, "Z
1", Z 1
15 INPUT "LAT 2", L 2, "LONG 2"; G 2, "I 2"; I 2, "Z 2"; Z 2
20 INPUT "DISTANCE"; D, "R VRAIE"; R
25 X=L 1:GOSUB 100:L 1=X:X=G 1:GOSUB 100:G 1=X
   X=L 2:GOSUB 100:
L 2=X:X=G 2:GOSUB 100:G 2=X
30 IF L 2 + G 2 = 0 THEN L 2 = L 1:G 2 = G 1
35 X=(L 2 - L 1)*60:Y=(G 2 - G 1)*60* COS(L 1 + L 2)/2
40 A=COS Z 1 * SIN Z 2 - COS Z 2 * SIN Z 1:B=11 + D * COS(Z
1 - R):C=12 * COS Z 2 - Y * SIN Z 2
45 Y=(B * COS Z 2 - C * COS Z 1)/A:X=
(B * SIN Z 2 - C * SIN Z 1)/A
50 L=L 1 + X/60:G=G 1 + Y/60/COS(L 1 + L 2)/2
55 PRINT "LAT=";DMS$(L),"LONG=";DMS$(G):
GO TO 10:END
100 S=SGNX:X=ABSX:E=FRACX*100:X=INTX + INTE/60
+ FRACE/36:X=X*S:RETURN

```

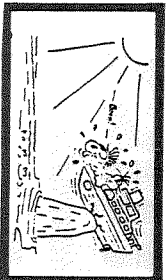
### VARIANTE AVEC ESTIME COMPOSEE; AJOUTER LES LIGNES:

```

20 INPUT "DIST"; A, "R VRAIE"; B: X = X + A * COS B: Y = Y + A *
SIN B: IFA = 0 THEN 22
GO TO 20
21 D=(X^2 + Y^2)^.5:R=ATN(Y/X):IF X < 0 THEN R = 180
22 -R:IF Y < 0 THEN R = 360 -R
23 PRINT "D=";D,"R=";DMS$(R)

```





# Calculatrice à bord

# Navigation astronomique aux étoiles et planètes

Le précédent volet de cet article proposait, outre une présentation générale de la navigation astronomique, un programme de calcul de droite de hauteur de soleil.

Beaucoup de navigateurs n'utilisent que le soleil pour se positionner au large, car selon une opinion assez répandue, ils pensent que la navigation aux étoiles et aux planètes est beaucoup plus complexe. Les lignes qui suivent vont tenter de vous prouver le contraire.

Sans aucune connaissance d'astronomie, mais avec l'aide de votre calculateur de poche, vous pourrez identifier simplement et sans erreur les astres nocturnes,

## V - Rappels théoriques

Les astres observables la nuit sont de deux types bien distincts :

- \* les étoiles que sont des soleils générateurs de lumière très lointains. Chaque étoile possède son propre système planétaire orbitant autour d'elle et invisible pour nous ;
- \* les planètes beaucoup plus proches puisqu'elles appartiennent à notre système solaire. Ces planètes possèdent en général des satellites. Le seul qui nous importe en navigation est la Lune, satellite de notre planète Terre.

Du point de vue de la navigation astronomique, nous allons étudier les similitudes puis les différences entre ces astres nocturnes et le

soleil. Ayez donc sous les yeux la partie théorique du volet précédent, à laquelle il sera fait fréquemment allusion.

## a) Similitudes avec le soleil

La notion de "sphère céleste" concentrique au globe terrestre est commune à tous les astres. Le repérage géométrique sur cette sphère se définit donc identiquement pour le soleil, les étoiles, les planètes :

- \* coordonnées équatoriales : déclinaison (D), angle horaire Greenwich (AHG), angle horaire local (AHL)

puis à partir de leur observation au sextant calculer votre position aussi rapidement qu'avec le soleil et avec une précision nettement supérieure. Le principe et la méthode des calculs à effectuer étant très proches de ceux étudiés précédemment pour le soleil, la compréhension de ce nouveau volet nécessitera vraiment un effort minime.

Enfin, au-delà de l'aspect utilitaire, l'observation du ciel nocturne en haute mer possède quelque chose de magique, dont l'attrait ne fait qu'augmenter au fur et à mesure que l'on en découvre les secrets, les constellations, les nébuleuses, les galaxies.

- \* coordonnées horizontales, directement mesurables au compas et au sextant : azimuth (Z) et hauteur (H).

Le principe du positionnement par droite de hauteur est rigoureusement le même, quel que soit l'astre utilisé. Pour résumer les paragraphes I-c et I-d du volet précédent, disons que :

- \* pour une heure Tu d'observation T et une position estimée (Latitude L, longitude G), on calcule les coordonnées équatoriales de l'astre (D) et (AHL) à l'aide de tables d'Éphémérides ou du programme "Étoile".
- \* on calcule alors la hauteur (Ho) et l'Azimuth (Z) que l'astre présenterait vu de cette position estimée, soit par les formules trigonométriques des paragraphes déjà cités réso-

lues à l'ordinateur, soit par des tables (HO 249 ou autres).

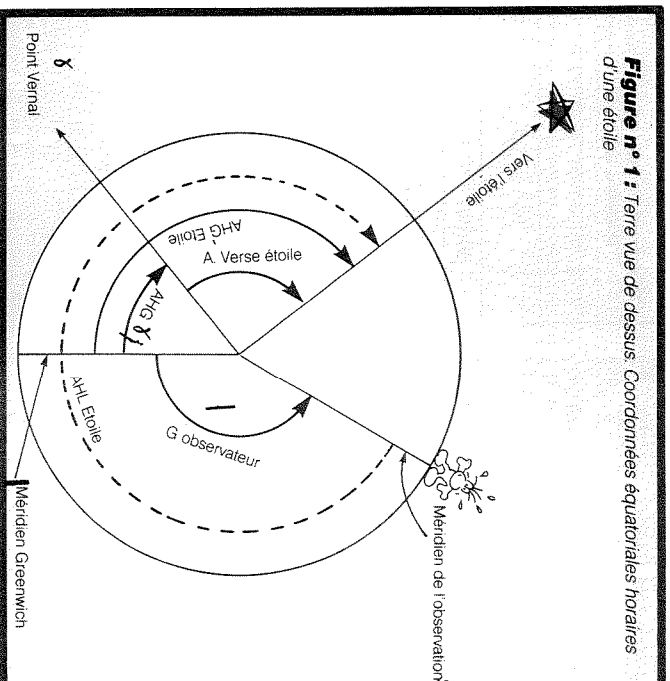
- \* on compare ces valeurs réellement observées en calculant l'intercept, différence entre Hv (hauteur vraie) et Hc (hauteur calculée).
- \* on trace sur la carte le point estimé, l'intercept puis la droite de hauteur.

## b) Différences avec le soleil

### b 1) Conditions d'observation des astres

Sauf Venus et la Lune, observables parfois de jour, les étoiles et planètes ne se voient que la nuit. Mais comme il faut un bel horizon pour se

**Figure n° 1 :** Terre vue de dessus. Coordonnées équatoriales horaires d'une étoile



précèdent, chaque étoile, étant fixe par rapport à ce point, peut être caractérisée par l'angle constant que fait son méridien avec celui du point Vernal, compté de 0 à 360° vers l'ouest comme les angles horaires : c'est la définition de l'«Ascension Verse» (AV) d'une étoile (figure 1).

Il ne reste plus qu'à déterminer le mouvement apparent de ce point Vernal pour un observateur terrestre. La sphère céleste fait en apparence le tour de la Terre en un «Jour Sidéral» de 23h 56 mn. Deux conséquences pratiques en découlent pour nous :

## b2) Cas particulier des Etoiles

Parmi les milliers d'étoiles de notre Galaxie, seulement une cinquantaine sont suffisamment lumineuses pour être utilisables en navigation. Les étoiles sont, à échelle humaine, immobiles entre elles, d'où leur nom d'«*astres fixes*». Elles forment sur la sphère céleste des figures géométriques de forme invariable et très reconnaissable, les constellations : «*le Lion, Cassiopee, la Grande Ourse, la Croix du Sud*», etc. Cette fixité des étoiles entre elles simplifie énormément leur système de repérage temporel dans le ciel :

- \* la déclinaison (D) d'une étoile a une valeur quasiment constante dans le temps.

- \* si l'on choisit un point de référence arbitraire dans la sphère céleste, «*le point Vernal*» qui correspond à la position du soleil à l'équinoxe de printemps, intersection de l'Equateur terrestre et de l'Écliptique sur la figure 4 du volet

- \* les étoiles, comme tous les astres, se lèvent à l'est et se couchent à l'ouest une fois par journée.
- \* en un point fixe du globe, le ciel nocturne présente chaque nuit à la même heure (moins 4 minutes) le même aspect, ce qui est très utile pour reconnaître les constellations.

L'«*angle horaire Greenwich*» du point Vernal (noté AHG  $\chi$ , car le point Vernal s'appelle conventionnellement  $\chi$ ) varie uniformément de 360° en un jour Sidéral donc de 360,985° en un jour civil de 24 heures, tout au long de l'année. Le calcul de (AHG  $\chi$ ) est donc extrêmement simple : on multiplie le nombre de jours civils et fraction de jour écoulés entre l'instant d'observation et une date de référence. (01 janvier 1901 à 00h TU) par cette valeur angulaire constante, puis on y ajoute une autre valeur constante correspondant à l'(AHG  $\chi$ ) à cette date de référence. Pour obtenir l'(AHG) d'une étoile, on rajoute l'Ascension Verse de cette étoile selon la formule (6)

(6)

$$D = \text{Arc sin} \left( \frac{\text{Sin } L \cdot \text{Sin } H_v + \text{Cos } L \cdot \text{Cos } H_v \cdot \text{Cos } Z_v}{\text{Sin } H_v - \text{Sin } L \cdot \text{Sin } D} \right)$$

$$Q = \text{Arc cos} \left( \frac{\text{Cos } L \cdot \text{Cos } D}{\text{Cos } L \cdot \text{Cos } D} \right)$$

Si  $Z_v > 180$  alors  $Z_v = 360 - Z_v$  et  $AV = 0 - AHG \chi$   
Si  $Z_v < 180$  alors  $AV = 360 - Q - AHG \chi$

avec  $H_v$  hauteur vraie (observée puis corrigée),  $Z_v$  azimuth vrai AHG,  $\chi$  calculé à partir de la longitude estimée et de l'heure TU.

(6)

$$\text{AHG étoile} = \text{AHG } \chi + \text{AV étoile}$$

(voir figure 1)

connaissant la longitude estimée 6, on en déduit l'(AHL) de l'Etoile :

(7)

$$\text{AHL étoile} = \text{AHG étoile} - G$$

Les éphémérides perpétuelles du programme «*Etoile*» reposent sur ce principe.

Le calcul tient compte évidemment des années bissextiles écoulées depuis 1901. Dans ce programme, on met en mémoire les caractéristiques (Ascension Verse et Déclinaison) de 20 étoiles principales. Ces valeurs varient en fait très légèrement dans le temps à cause des oscillations de l'axe des Pôles terrestres (précession, nutation). On a donc stocké (AV) et (D) pour une année donnée (1981) et leurs corrections annuelles moyennes (très faibles moins de 1 minute d'arc par an).

## b3) Comment identifier les Etoiles ?

La méthode traditionnelle consiste à reconnaître à vue les constellations remarquables ainsi que les étoiles les plus brillantes. De là on en déduit la position de toutes les autres. Un excellent ouvrage «*Le Guide des Etoiles*» du Commandant Sizaire (éditions Francaises) explique parfaitement la démarche à suivre. C'est simple, amusant et très efficace. Le seul inconvénient apparaît en cas de ciel nuageux, où les constellations peuvent être partiellement masquées ne laissant apparaître que quelques étoiles solitaires.

Dans ce cas, l'option «*Recherche*» du programme «*Etoile*» permet l'identification de ces étoiles inconnues. En même temps que la hauteur de l'astre et l'heure d'observation, vous relevez l'azimuth de l'étoile au compas. Un calcul type droite de hauteur mais effectué à l'envers (formule 8) donne l'ascension Verse (AV) et la Déclinaison (D) de l'étoile.

En comparant les valeurs calculées de (AV) et (D) avec celles d'une table d'étoiles, vous identifiez votre étoile inconnue. Cette méthode est, dans le principe, identique à celle utilisant les disques identificateurs type «*Star Finder*» américain. Dernière possibilité pour reconnaître les étoiles, la méthode préparatoire : dans le cas d'observations circumpolaires, vous pouvez prévoir à l'avance l'heure approximative des visées (dans la demi-heure qui suit ou précède le coucher ou lever de soleil).

A partir de cette heure moyenne et de la position estimée à ce moment-là, vous faites le calcul prévisionnel des hauteurs et azimuths des étoiles qui seront visibles. A la main, ce serait un peu long, mais l'option «*Listage*» du programme «*Etoile*» fait le travail pour vous et, parmi les 20 étoiles mémorisées, elle vous fournit la liste et les coordonnées horizontales de toutes celles qui seront observables à plus de 15° au-dessus de l'horizon. Vous choisissez vos préférés parmi cette liste, puis à l'heure prévue vous montez sur le pont avec le sextant prêt-à-l'emploi sur la hauteur calculée, et le compas de relèvement autour du cou. Le même travail préparatoire

**Tableau n° 1 : Listing du programme "Étoile"**

```

10 INPUT "ÉTOILE, JOUR", J, "MOIS", M, "AN", A: A0 = 0
15 INPUT "LAT", L, "LONG", G: N = L: GOSUB 500: L = N: N = G:
   GOSUB 500: G = N
20 INPUT "TU", T, "HEXEXT", H: N = T: GOSUB 500: T = N: N = H:
   GOSUB 500: H = N
21 IF H = 0 THEN 450 ELSE ON A0 GOTO 3
22 INPUT "COR SEXT", C, "CORTU", CO, "H OEL", O: N = CO/100:
   GOSUB 500: CO = N
23 H = H - (1.77*O)/0.5 + TAN(90 - H - C/60) - C/60:
   T = T + CO
25 GOSUB 300
30 INPUT "PLAN 1, MANU 2, MEMO 3, RECH 4", F
35 ON F GOSUB 200, 350, 370
40 IF F = 4 THEN 400
45 GOSUB 100
50 Y = (H - Y)*60: PRINT USING "###.##": "INT=", Y: "NM", "Z=",
   Z: A0 = 1: GOTO 20
100 Z = A0 = 1: GOTO 20
105 Y = SINL*SINR + COSL*COSR: COSP = Y = ASNY
110 Z = ACS(SINR - SINL*SINR)/(COSL*COSY)
115 IF SINP > 0 THEN Z = 360 - Z
   RETURN
   REM: PLANETE
200 INPUT "AHG Ø", Q, "DEC Ø", D, "V", Q0, "D", D0
205 N = Q: GOSUB 515: Q = N: N = D: GOSUB 515: D = N
   P = Q + T*(15 + Q0/60) - G: R = D + T*D0/60: P = FRAC
   (P/360)*360: A0 = 1: RETURN
   REM: ARIES
300 K = 365.25*(A - 1901) + J
305 B = INT(30.6*M + 0.6) - 32.75
310 IF M < 3 THEN B = 31*M - 31
320 T0 = INT(K + B) + T/24
325 P = 98.900 + 360*(985647342*T0 - G): P = FRAC(P/360)*360
   RETURN
330 REM: MANUEL
350 INPUT "AS VERSE", Q, "DEC", R: N = Q: GOSUB 515: Q = N:
   P = P + Q: A0 = 1: RETURN
360 REM: MEMO
370 INPUT "NUM ÉTOILE", I
375 Q = XI(I0) + XI(I, (1)*A - 1981)
380 Q = ACS(SINH*SINH + COSL*COSL*COSZ)
385 Q = ACS(SINH - SINL*SINR)/(COSL*COSR)
390 IF D = 1 THEN Q = Q - P ELSE Q = 360 - Q - P
400 PRINT "AS VERSE =", USING "#####": DMS $(Q), "DEC =",
   DMS $(R), A0 = 1: GOTO 20
405 REM: LISTAGE
410 GOSUB 300: P0 = P
451 FOR I = 0 TO 19
452 Q = XI(I0) + XI(I, (1)*A - 1981) + (M - 1)/12)
455 R = XI(I, 2) + XI(I, 3)*A - 1981 + (M - 1)/12)
460 P = P0 + Q: GOSUB 100
465 IF Y < 15 THEN 480
470 PRINT "ÉTOILE N°", I, "H =", USING "#####": DMS $(Y),
   "Z =", USING "#####": DMS $(Z)
480 NEXT I: GOTO 20
500 REM: CONVERSION
505 S = SGN(N): N = ASBN: E = FRAC(N*100): N = INT(N + INTE/60
   + FRACE/36)
510 N = N*S: RETURN
515 S = SGN(N): N = ABS(N): N = INT(N + FRAC(N)/6): N = N*S:
   RETURN

```

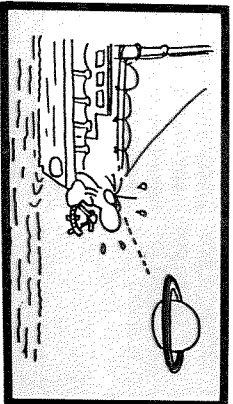


Figure n° 2

**Tableau n° 2 : Ascension Versé et Déclinaison des 20 principales étoiles. Données décimales servant à charger le tableau-machine XI**

N°	Nom de l'étoile	Ascension Versé		Déclinaison	
		1981	Variation annuelle	1981	Variation annuelle
0	Achernar	335.75	-0.0093	-57.33	+0.0052
1	Acix	173.61	-0.0140	-63.00	-0.0055
2	Aldebaran	291.30	-0.0143	16.47	+0.0020
3	Altair	62.53	-0.0122	8.82	+0.0027
4	Anares	112.93	-0.0153	-26.31	-0.0022
5	Arcturus	146.30	-0.0115	19.28	-0.0052
6	Bételgeuse	271.47	-0.0135	7.40	+0.0002
7	Canopus	264.13	-0.0055	-52.69	-0.0005
8	La Chèvre	281.18	-0.0185	45.98	+0.0010
9	Deneb	49.79	-0.0085	45.21	+0.0037
10	Fomalhaut	15.85	-0.0138	-29.72	+0.0053
11	Pollux	243.97	-0.0153	28.07	-0.0025
12	Procyon	245.43	-0.0132	5.27	-0.0027
13	Regulus	208.16	-0.0133	12.06	-0.0048
14	Rigel	281.60	-0.0120	-8.22	+0.0012
15	Rigel-Kent	140.41	-0.0172	-60.76	-0.0042
16	Sirus	258.93	-0.0110	-16.69	-0.0013
17	L'Épi	158.95	-0.0132	-11.06	-0.0052
18	Vega	80.92	-0.0085	38.77	+0.0010
19	La Polaire (88)	325.21	0.000	89.215	0.000

**Tableau n° 3 : Listing du programme de chargement des étoiles en mémoire (chargement du tableau machine XI)**

```

10 DIM X(20,4)
20 FOR I = 0 TO 19
30 FOR J = 0 TO 3
40 PRINT "ÉTOILE", I, "COL", J: WAIT 40
50 INPUT X(I, J)
60 NEXT J
70 NEXT I
80 END

```

peut être effectué manuellement avec le tome n° 3 des tables HO 249 (*Titre "Selected Stars"*).

**b4) Cas particulier des planètes (fig. 2)**

4 planètes du système solaire sont utilisables en navigation : Mars, Jupiter, Saturne, planètes extérieures et Vénus, planète intérieure à l'orbite terrestre.

**Mouvement apparent des planètes :**

Les planètes orbitent toutes autour du soleil dans le même sens que la terre, et dans des plans proches de

celui de l'écliptique terrestre. En conséquence, les planètes nous apparaissent toujours dans les constellations zodiacales (c.à.d. proches de l'écliptique), mais elles se déplacent par rapport à ces constellations : ce sont des "astres errants" sur la voûte étoilée.

Ces planètes étant relativement proches de nous (comparativement aux étoiles), leur mouvement apparent est assez rapide, complexe, et irrégulier dans le temps.

On constate des phénomènes d'"ar-rêts" et de "marches arrière" assez étonnants (les "stations" et

les "rétrogradations planétaires" pour les astronomes). Il en résulte que les variations horaires de l'AHG et de la Déclinaison d'une planète ne sont pas du tout constantes au cours d'une année. Dans les éphémérides nautiques, ces valeurs sont données pour chaque planète d'heure en heure. En bas de chaque colonne journalière, apparaissent en plus les valeurs "v" et "d" des corrections à apporter pour les interpolations entre chaque heure ronde.

Des Ephémérides Perpétuelles sont bien sûr réalisables pour chaque planète, mais les programmes de calculs nécessaires (si l'on désire une bonne précision) sont longs et encombrants pour un ordinateur de poche. Aussi le programme "Étoile" possède-t-il une option "Planète" simplifiée qui nécessite l'introduction manuelle des valeurs de l'AHG et de la Déclinaison de la planète choisie lues dans des Ephémérides Nautiques pour Oh Tu du jour considéré. Le calculateur demande également les valeurs de "v" et "d". Nous verrons par contre qu'un calculateur spécialisé comme le "HP 41" muni de son module "Navigation" fournit directement les Ephémérides des 4 planètes sans aucun document annexe de luxe !!

### b5) Comment identifier les planètes ?

L'observation directe est la meilleure solution. Là encore, le "Guide des Étoiles" indique quelques critères simples d'identification. Pour différencier une planète d'une étoile, on peut dire que :

- \* une planète ne scintille pas et donne parfois un reflet sur la mer
- \* observée aux jumelles, une planète présente un diamètre non nul qui répond au grossissement de l'appareil (très visible avec des jumelles "Zoom").

\* Vénus est la planète la plus facile à identifier car elle est 12 fois plus brillante que la plus puissante des étoiles (Sirius) et, en tant que planète intérieure, elle apparaît tous les jours plus proche du Soleil, en fin ou en début de nuit, jamais au milieu. Enfin pour les débutants : si vous avez descendu au sextant un astre inconnu mais assez brillant, que cet astre n'est pas identifié comme une étoile importante par l'option "Recherche" du programme "Étoile", alors (sauf erreur de mesure), c'est nécessairement une planète. Avec l'option "Planète" calculé alors l'intercept et Azimuth en supposant que l'astre est successivement l'une des 4 planètes observables. Quand vous trouvez un intercept non délimité (inférieur à 20 milles, par exemple), c'est bon, vous avez identifié votre planète, et calculé sa

droite de hauteur par la même occasion.

La méthode est très rapide car le programme calcule vite, il n'y a que 4 planètes à inventorier et leur AHG et (D) à 0 heure apparaissent côte à côte à la même page des Ephémérides Nautiques.

### c) Cas très particulier de la Lune

La Lune est l'unique satellite naturel de la terre. Elle en est très proche (380.000 km à comparer aux 150 millions de km terre/soleil). En conséquence, ses mouvements apparents sont très rapides et de plus, ils sont perturbés par la présence des autres planètes du système solaire. Le calcul de la position de la Lune est donc le plus compliqué de tous en astronomie de position :

— les corrections à la hauteur observée doivent prendre en compte, en plus de la dépression de l'horizon et de la réfraction atmosphérique, le demi-diamètre et la parallaxe de l'astre qui varient de jour en jour.

— la déclinaison et l'AHG de la Lune varient tellement rapidement et irrégulièrement, que les coefficients de correction "v" et "d" sont donnés d'heure en heure dans les Ephémérides Nautiques.

Un programme d'Ephémérides Perpétuelles est certes réalisable, mais sera très long. Seul le calculateur "HP 41", toujours lui, offre des Ephémérides lunaires. Notre programme "Étoile" ne comporte donc pas d'option "Lune"... par souci de légèreté. Mais une fois familiarisé avec votre machine chérie, vous pourrez tout à fait "rebricoler" l'option "planète" et en faire une option "lune" supplémentaire.

Il suffit de transformer les entrées de données de telle sorte que le calculateur vous demande :

- \* les valeurs des corrections à la hauteur observée
- \* les valeurs horaires de D, AHG, v et d (toutes valeurs à relever dans les Ephémérides Nautiques à la colonne Lune du jour considéré). Le reste des calculs est inchangé par rapport aux autres planètes.

## VI- Le programme étoile

### a) Présentation générale

Le listing de ce programme est fourni dans le *tableau n° 1*. Il est écrit en "Basic" pour le calculateur Casio FX 750. L'architecture générale de ce programme est la suivante :

lignes 10 à 50 : Programme Principal comprenant l'introduction des données, le choix des options, l'affichage des résultats.

lignes 100 à 115 : sous-programme de calcul du triangle de position

lignes 200 à 210 : sous-programme "Planète"

lignes 300 à 330 : sous-programme du point Vernal (Ephémérides Perpétuelles)

lignes 350 à 360 : sous-programme "Manuel"

lignes 370 à 390 : sous-programme "Mémoire"

lignes 400 à 430 : sous-programme "Recherche"

lignes 450 à 480 : sous-programme "Listage"

lignes 500 à 515 : sous-programmes de conversions angulaires.

L'écriture de ce programme est volontairement très aérée de telle sorte que vous puissiez éventuellement le modifier sans difficulté, par exemple :

- rajouter l'option "Lune" en sous-programme supplémentaire
- augmenter le nombre d'étoiles en mémoire ou modifier leur mode de stockage, en fonction du calculateur utilisé (voir paragraphe suivant)
- compacter le programme, pour qu'il occupe moins de place en mémoire RAM.

### b) Mise en mémoire des 20 étoiles

Le *tableau n° 2* donne les valeurs de (AV) et (D) en 1981 et leurs variations annuelles pour les 20 étoiles principales (valeurs exprimées en degrés décimaux). Ce tableau comprend donc 20 lignes numérotées de 0 à 19 (une ligne par étoile) et 4 colonnes numérotées de 0 à 3. Il faut introduire toutes ces valeurs dans l'ordinateur, dans la mémoire duquel est réservé un emplacement XI (20, 4), c'est-à-dire en clair un tableau appelé XI de dimensions (20 X 4) cases. Pour charger ce tableau X1, 2 solutions s'offrent à vous :

- \* soit taper au clavier les valeurs une par une :  
X1 (Ø)Ø = 335,75 Enter  
X1 (Ø)1 = — ØØ93 Enter  
X1 (Ø)2 = — 57,33 Enter  
X1 (Ø)3 = + ØØ52 Enter  
X1 (1)Ø = 173,61 Enter

etc. etc. jusqu'à la dernière ligne et la dernière colonne

\* soit taper le petit programme de chargement (fourni par le *tableau n° 3*) dans une autre zone-programme du calculateur. Vous faites ensuite fonctionner ce programme qui vous demande successivement toutes les valeurs du tableau X1. Ce n'est rien d'autre que la forme automatisée de l'opération manuelle précédente.

### Remarques :

- \* tout comme pour le programme "Étoile", vous n'avez à charger le

tableau X1, qu'une fois pour toutes.

Si vous désirez ultérieurement remplacer une étoile par une autre, il suffit de corriger la ligne correspondante et uniquement celle-là ;

\* la dernière étoile du tableau (n° 19) est la "Polaire". Cette étoile particulière est très intéressante car sa hauteur observée est égale à moins

de 1° près à la latitude de l'observateur et son azimuth est toujours quasiment plein Nord, ce qui est bien pratique pour vérifier la variation des compass. Mais la variation annuelle de son ascension Varse est moins régulière que pour les autres étoiles. En conséquence, pour une meilleure précision des résultats calculés, il est préférable de rentrer dans le tableau les valeurs moyennes de l'année en cours pour (AV) et (D) de la "Polaire" et de les changer tous les ans (en consultant les Ephémérides Nautiques d'un copain). Les perfectionnistes pourront même changer ces valeurs tous les trois mois, on gagne une minute de précision sur la latitude calculée :

\* du point de vue programmation, le stockage des 20 Étoiles en tableau X1 présente de nombreux avantages (accès très simple aux données numériques, encombrement minimum de la mémoire RAM). Il présente un seul inconvénient : le tableau n'est pas à l'abri d'une fausse manœuvre qui pourrait le vider (un ordre "Clear" ou "Dirnx" par exemple).

Si donc vous ne supportez pas l'idée de perdre vos chères étoiles (peu de chance que ça arrive... toutefois), ou bien que votre calculateur n'accepte pas les tableaux à deux dimensions, vous pouvez rentrer les coordonnées des étoiles en ordre "Data", et les relire dans le programme par un "Rastore". Pour plus de détails, consultez le manuel de programmation de votre calculateur.

A suivre  
**Hervé LEGOFF**

Suite et fin  
au prochain numéro

AV = 194° 18' D = 61° 50' N

C'est donc "Dubhé" que vous avez piégé dans le sextant.

Remarque : les valeurs de la table diffèrent légèrement des valeurs calculées à partir de l'observation pour deux raisons : d'abord parce que le point estimé utilisé dans le calcul n'est pas nécessairement votre position réelle, ensuite et surtout parce que l'azimut de l'étoile mesuré au compas est très imprécis. 5° d'incertitude en général suffit pour les astres élevés.

Avant donc d'identifier "Dubhé", vous calculez sa droite de hauteur comme indiqué dans la deuxième partie du *tableau n° 7*. Comme cette étoile ne fait pas partie des 20 astres mémorisés par l'ordinateur, vous utilisez l'option manuelle "Manu".

**d) 4° exemple :** droite de hauteur de planète (option "Plan")  
En plus des quatre étoiles précédentes, vous avez observé la planète "Mars", reconnaissable à son éclat rouge, et vous avez trouvé :

Ho = 41° 37' à 20h 04mn 40s TU

Pour calculer sa droite de hauteur, vous utilisez l'option "Plan" conformément au *tableau n° 8*. Rappelez-vous qu'il vous faut consulter les Ephémérides Nautiques 1987 à la page du 12 mars pour fournir au calculateur les valeurs de AHG et D à 0 heure, ainsi que "v" et "d".

### e) Remarque sur les tableaux d'utilisation

Dans les tableaux 6 à 8, toutes les options du programme "Etoile" ont été exécutées à la suite sans jamais étendre le calculateur. Vous pouvez bien sûr exécuter une option unique ou plusieurs dans un ordre quelconque et en éteignant la machine à chaque fois. Simple-ment, à chaque remise en marche, le calculateur vous redemandera les données initiales (date, mois, année, estime, corrections sextant et montre, hauteur de l'observateur), valeurs qu'il garde en mémoire tant qu'on ne l'éteint pas.

\* les formats d'entrées d'angles et heures, les conventions désignées sont toujours les mêmes (voir programme "Soleil" du volet précédent), sauf :

dans l'option "Planète" où les données issues des Ephémérides Nautiques (AHG et D) doivent être rentrées exactement dans la forme où elles apparaissent dans ce document, c'est-à-dire avec des secondes décimales.

### f) Tracé des droites de hauteur et détermination de la position

Une droite de hauteur d'étoile ou de planète se trace sur la carte de la même manière qu'une droite de soleil (voir volet précédent).

Sur la figure n° 3 apparaissent les 4 droites d'étoiles et la droite de "Mars" que nous venons de calculer. Le point estimé a été choisi identique pour les 5 calculs, donc pour les 5 droites de hauteur. D'autre part, comme toutes les observations ont été effectuées en moins de 8 minutes, nous n'avons pas transporté les droites pour tenir compte du déplacement effectif du navire pendant cet intervalle de temps (0,8 mille à 6 nœuds), ceci afin de simplifier le graphique.

Interprétons les résultats : le point estimé (48° 32N/25° 12W) se situe approximativement au centre du triangle le plus significatif constitué par les droites de "Bételgeuse", "Dubhé" et "Régulus". La droite de "Mars" en passe très près. Nous prendrions donc ce point estimé comme position effective à l'heure moyenne des observations : 20h TU. La précision du positionnement est évaluée par la distance moyenne de ce point aux sommets du triangle, soit 5 milles environ. Qualité moyenne ! Dans de bonnes conditions, un navigateur expérimenté peut espérer une précision de 2 milles sur un point étoilé (en tenant compte, au tracé des droites, du déplacement du navire entre les observations).

Petite remarque pour souligner l'importance du bon sens et de la critique objective en navigation : si, dans l'exemple traité, vous mettez en doute l'observation de "Bételgeuse" et ne tenez plus compte de la droite correspondante, alors toutes les autres droites se recoupent à 0,5 mille près sur un point de coordonnées (48° 26'N/25° 09' W), qui doit être considéré comme nouvelle position effective (ce point est situé à 6 milles du précédent, donc à la limite du domaine d'incertitude déjà cité). A vous de choisir, en fonction de la qualité respective des observations effectuées...

## VIII - Le calculateur HP 41 C en navigation astro

Nous avons déjà fait allusion à plusieurs reprises aux multiples possibilités de cette machine équipée du module "Navigation". A la lumière des connaissances acquises dans les chapitres précédents, examinons plus en détail son utilisation en Astro.

Tableau n° 4 : Calcul prévisionnel des étoiles observables (option Listage)

Explications	Clavier	Affichage
Allumer la machine, lancer le programme "Etoile"	Run	Etoile, jour ?
Entre le jour (12)	12 Enter	Mois ?
Entre le mois (03)	03 Enter	An ?
Entre l'année (1987)	1987 Enter	Lat ?
Entre la latitude estimée (48° 32' N donc positif)	48 32 Enter	Long ?
Entre la longitude estimée (25° 12' W donc positif)	25 12 Enter	TU ?
Entre l'heure prévue pour l'observation (20h)	20 Enter	HSext ?
Enter zéro pour la hauteur sextant inconnue, puis un préfixe le calcul. La machine affiche la première étoile visible : n° 2 donc Aldebaran, hauteur = 55° 24' 02"	0 Enter	Etoile N2 : H = 55° 24' 2
Affichage de l'azimut d'Aldebaran : 207° (arrondi)	Enter	Z = 207° 38'
Affichage de l'étoile suivante : n° 6 donc Bételgeuse hauteur = 48° 44' 01"	Enter	Etoile N6 : H = 48° 44' 1
Affichage de l'azimut de Bételgeuse : 174° (arrondi)	Enter	Z = 174° 9' 3
Et ans de suite	Enter	Etoile N8 : H = 85° 18' 4
Azimut de Capella	Enter	Z = 239° 14'
Hauteur	Enter	Etoile N11 : H = 58° 21'
Azimut de Pollux	Enter	Z = 118° 52'
Hauteur	Enter	Etoile N12 : H = 39° 48' 9
Azimut de Procyon	Enter	Z = 139° 43'
Hauteur	Enter	Etoile N13 : H = 24° 2' 3
Azimut de Régulus	Enter	Z = 99° 12' 1
Hauteur	Enter	Etoile N14 : H = 32° 59' 1
Azimut de Rigel	Enter	Z = 187° 23'
Hauteur	Enter	Etoile N16 : H = 23° 8' 59
Azimut de Sirius	Enter	Z = 162° 53'
Hauteur	Enter	Etoile N19 : H = 49° 2' 6
Azimut de la Polaire	Enter	Z = 359° 5'

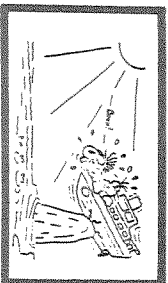
Etoile	Heure TU	Hauteur observée	Azimuth observé	
			20 15 Enter	HSext ?
Régulus	19h 57mn 24s	23° 48'	etc	etc
Bételgeuse	19h 59mn 14s	48° 41'		
Aldebaran	20h 00mn 48s	55° 22'		210°
Inconnue ?	20h 02mn 18s	45° 30'		40°

Tableau n° 5 : Résultats des observations

Etoile	Heure TU	Hauteur observée	Azimuth observé
Régulus	19h 57mn 24s	23° 48'	100°
Bételgeuse	19h 59mn 14s	48° 41'	175°
Aldebaran	20h 00mn 48s	55° 22'	210°
Inconnue ?	20h 02mn 18s	45° 30'	40°

Correction sextant : +35' Correction montre : +0mn 39s Hauteur observateur : 2,5m





# Calculatrice à bord navigation astronomique deux étoiles et planètes

Le précédent volet de cet article proposait, outre une présentation générale de la navigation astronomique, un programme de calcul de droite de hauteur de soleil.

Beaucoup de navigateurs n'utilisent que le soleil pour se positionner au large, car selon une opinion assez répandue, ils pensent que la navigation aux étoiles et aux planètes est beaucoup plus complexe. Les lignes qui suivent vont tenter de vous prouver le contraire.

Sans aucune connaissance d'astronomie, mais avec l'aide de votre calculateur de poche, vous pourrez identifier simplement et sans erreur les astres nocturnes.

## VII. Utilisation du programme "Etoile"

Voyons à présent comment utiliser ce programme sur des exemples concrets.

**a) 1<sup>er</sup> exemple :** préparation aux observations d'Etoiles  
 Le 12 mars 1987 vers 19h 30 mn, votre position estimée est la suivante :

L = 48° 32' N    G = 25° 12' W

Un calcul manuel rapide vous donne 19h 40mn TU pour l'heure du coucher de soleil. Le ciel est bien dégagé, vous prévoyez donc de faire un joli point cépousculaire vers 20 h. A l'aide de l'option "Listage", vous calculez les coordonnées des étoiles qui seront visibles à ce moment-là. La démarche à suivre est indiquée dans le *tableau n° 4*. Remarquons que le choix de l'option "Listage" s'effectue automatiquement par le fait de rentrer la valeur zéro pour la hauteur sextant.

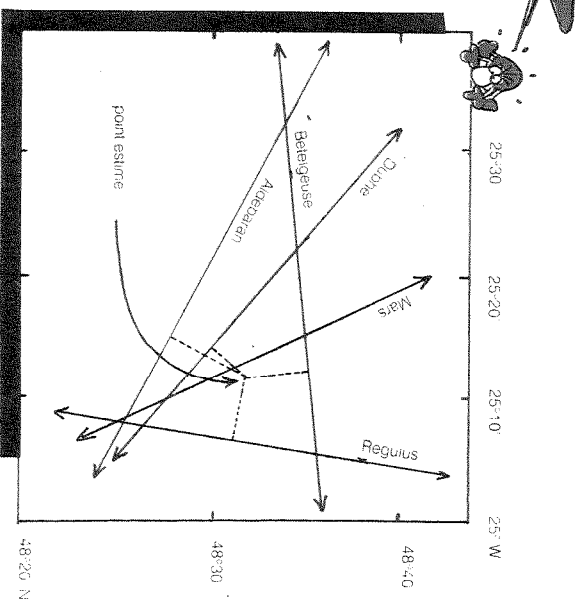
puis à partir de leur observation au sextant calculer

voire position aussi rapidement qu'avec le soleil et avec une précision nettement supérieure. Le principe et la méthode des calculs à effectuer étant très proches de ceux étudiés précédemment pour le soleil, la compréhension de ce nouveau volet nécessitera vraiment un effort minime.

Enfin, au-delà de l'aspect utilitaire, l'observation du ciel nocturne en haute mer possède quelque chose de magique, dont l'attrait ne fait qu'augmenter au fur et à mesure que l'on en découvre les secrets, les constellations, les nébuleuses, les galaxies.

L'ordinateur vous a donc fourni 9 étoiles observables. Choisissez-en trois, si possible, uniformément réparties sur les 360° d'azimut. Vers 20 h, vous montez sur le pont

avec le sextant calé sur la hauteur calculée pour la première étoile choisie, vous balayez l'horizon dans un secteur de 20° autour de l'azimut calculé et vous devez voir



apparaître dans la lunette du sextant l'image réfléchie de cette étoile,

proche de la ligne d'horizon. Affinez le réglage du sextant pour bien poser l'étoile sur l'horizon, notez l'heure et la hauteur observée. Terminez pour la première étoile, passez aux deux suivantes de la même manière, inscrivez les résultats bruts de vos observations dans un tableau (du type *tableau n° 5*).

En plus de "Regulus", "Betelgeuse" et "Aldebaran" identifiées clairement, vous avez observé une autre étoile inconnue dans l'azimut 40° (dernière ligne du *tableau n° 5*). Voyons d'abord comment calculer les droites de hauteur correspondant aux trois premières étoiles identifiées.

**b) 2<sup>e</sup> exemple :** calcul de droite de hauteur d'étoiles en mémoire (option "Memo").  
 La démarche est indiquée dans le *tableau n° 6*. L'ordinateur vous donne successivement les azimuts et intercepts des 3 Etoiles.

**c) 3<sup>e</sup> exemple :** identification d'une étoile inconnue (option "Rech")  
 Quelle est donc cette quatrième étoile que vous avez observée à 45° 30' de hauteur dans l'azimut 40°. Sans éteindre la machine à la suite du calcul précédent, lancez l'option "Rech" comme indiqué dans la première partie du *tableau n° 7*. Le calculateur vous donne l'(AV) et la déclinaison de cette étoile inconnue. En consultant une table d'étoiles, vous cherchez à vue celle qui présente les coordonnées les plus proches des valeurs fournies par le calcul. Vous trouvez pour "Dubhe".



Tableau n° 6 : Calcul de droites de hauteur d'étoiles en mémoire (option Mémoire)

Explications	Clavier	Affichage
Introduction des données initiales identique au début du tableau n° 4	Run	Etoile_jour ?
	12 Enter	Mos ?
	Ø3 Enter	An ?
	1987 Enter	Lat ?
	48 32 Enter	Long ?
	25 12 Enter	TU ?
Enter l'heure TU d'observation de Regulus (19h 57 mn 24s)	19 5724 Enter	HSex ?
Enter la hauteur observée au sextant (23° 48')	23 48 Enter	CorSex ?
Enter la correction instrumentale du sextant (+ 3,5')	3 5 Enter	CorTu ?
Enter la correction de la monture (0 mn 39 s de retard)	+ Ø39 Enter	H Oat ?
Enter la hauteur de l'œil de l'observateur (2,5 m). Le calculateur affiche la liste des options numérotées de 1 à 4	2 5 Enter	Plan 1, Manu 2 Memo 3, Rech 4 ?
Choisir l'option Memo, numérotée 3	3 Enter	NU Etoile ?
Enter le numéro de Regulus dans la liste (n° 13). Le calculateur affiche l'intercept calculé (3,8 milles)	13 Enter	Int = 3,8 NM
Passer à l'observation suivante	Enter	Z = 98,8
Enter l'heure d'observation de Betelgeuse (19h 59 mn 14s)	19 5914 Enter	HSex ?
Enter la hauteur observée (48° 41')	48 41 Enter	Plan 1, Manu 2 etc ?
Choisir l'option Memo (n° 3)	3 Enter	NU Etoile ?
Enter le numéro de Betelgeuse (n° 6). Le calculateur affiche l'intercept (— 3,3 milles)	6 Enter	Int = 3,3 NM
puis l'azimut (174°)	Enter	Z = 174,1
Passer à l'observation suivante	Enter	TU ?
Enter l'heure d'observation d'Aldebaran (20h 00 mn 48s)	20 Ø048 Enter	HSex ?
Enter la hauteur observée (55° 22')	55 22 Enter	Plan 1, Manu 2, etc ?
Choisir l'option Memo (n° 3)	3 Enter	NU Etoile ?
Enter le numéro d'Aldebaran (n° 2). Le calculateur affiche l'intercept (4,7 milles)	2 Enter	Int = 4,7 NM
puis l'azimut (208°)	Enter	Z = 208,2

Le programme universel pour calculer une droite de hauteur d'étoile a pour nom "Sight", que vous tapez au clavier. Le calculateur vous demande alors la position estimée, la date, l'heure et la hauteur observée de l'étoile, l'élévation de l'œil et enfin "Which Body", quel astre ? Et là, commencez la magie ! Vous avez

le choix entre le soleil, la lune, 4 planètes ou 57 étoiles. Vous choisissez l'astre par son nom (en anglais) et au bout de 30 secondes environ, la machine affiche l'intercept puis l'azimut. Et c'est précis ! moins de 1 minute d'erreur en intercept pour Soleil et étoiles, 5 minutes maxi pour la lune.

**Quelques remarques sur l'utilisation de "Sight"**

- \* Vous ne pouvez pas rentrer les corrections instrumentales (sextant et montre), c'est dommage, il faut les faire à part.
- \* Si vous désirez calculer une droite d'astre en n'utilisant pas les éphémérides internes du calculateur, mais un document annexe c'est possible. Le calculateur interpole entre les valeurs rondes de AHG et D que vous lui fournissez.
- \* Pour Lune et Soleil, vous avez le choix entre observation du bord supérieur ou inférieur.

A part le programme "Sight", existe le programme "Almanac", qui donne pour tous les astres en mémoire, l'AHG et D à une heure et date choisies.

Un aspect très intéressant du module "navigation" est que tous les éléments de calculs intervenant dans "Sight" sont accessibles à l'utilisateur sous forme de sous-programmes distincts. Chons, entre autres : résolution du triangle de position, calcul du temps sidéral, du calendrier Julien, des constantes astronomiques des astres en mémoire, changements de repères. L'utilisateur "branché" qui veut créer ses propres programmes, peut donc bénéficier de ces sous-programmes très puissants et déjà tout faits. On peut par exemple programmer :  
\* le calcul de l'heure de la Meridienne de soleil

\* l'identification d'étoiles inconnues avec recherche directe du nom dans la "Bibliothèque" des 57 étoiles

\* la prévision des astres visibles.

Les astronomes (amateurs seulement, car la précision est quand même limitée) pourront calculer les coordonnées équatoriales et eccliptiques de tous les astres.

Ici prend fin cette série d'articles concernant l'utilisation des ordinateurs de poche en navigation. Les programmes d'Astro proposés ont été volontairement découpés en éléments indépendants : soleil, astres nocturnes, programme de transfert. Ceci afin d'en simplifier la compréhension et l'implantation dans le calculateur pour les débutants. Bien sûr, ces éléments peuvent être regroupés en un programme unique et optimisé en taille (comme le programme "Sight" du HP41C).

Le gain de place en mémoire permettra alors d'intégrer des complètement tels que : les éphémérides de planètes, les calculs de route orbitonomiques et loxodromiques.

De tels développements pourront faire l'objet d'un article ultérieur. En attendant, amusez-vous bien avec votre petit ordinateur (jouez au perdu, aux échecs ou à la bataille navale avec lui, il adore ça), n'oubliez quand même pas de naviguer entre deux mises au point de programmes et écrivez par l'intermédiaire de la revue, si vous avez des remarques (agréables ou pas...) à formuler à propos de ces articles.

**Hervé LEGOFF**

Dessins : Thierry REY

Tableau n° 8 : Droite de hauteur de planète (option Planète)

Explications	Clavier	Affichage
Suite du tableau n° 7, sans éteindre le calculateur	Enter	TU ?
Enter l'heure d'observation de Mars (20h 04 mn 40s)	Ø0Ø44Ø Enter	HSex ?
Enter la hauteur observée (41° 37')	41 37 Enter	Plan 1, Manu 2, etc ?
Choisir l'option Plan numérotée 1	1 Enter	AHG Ø ?
Enter la valeur de AHG à 0 heure (Ephémérides : 128° 27,3')	128 27 3 Enter	DecØ ?
Enter la valeur de la déclinaison à 0h (Ephémérides : 16° 25,5'N)	16 25 5 Enter	V ?
Enter la correction horaire du AHG (Ephémérides : v = + 0,8)	Ø 8 Enter	D ?
Enter la variation horaire de Déclinaison (Ephémérides : d = + 0,5)	Ø 5 Enter	Int = Ø,8 NM
Le calculateur affiche l'intercept (0,8 milles)	Enter	Z = 244,7