



Les Cahiers de la S.R.D.

10

NAVIGATION ASTRONOMIQUE

3 Les mesures en mer

Avertissement

Ces cahiers ont pour vocation de synthétiser les connaissances relatives à chacun des thèmes abordés. Ils sont le fruit de la mutualisation des expériences communes des auteurs en matière de navigation.

Ils ne nécessitent pas de pré-requis scientifiques pour leur compréhension. Mais ils essaient néanmoins de ne pas céder à la facilité de la simplification abusive qui fausserait l'intention initiale : celle de faire comprendre les interactions complexes qui régissent le fonctionnement d'un voilier.

Malgré toute l'attention qui a été portée à la rédaction de ces pages, certaines erreurs ou imprécisions peuvent subsister. Les auteurs s'en excusent et remercient le lecteur pour son indulgence. Ils le remercient également de leur faire part de ses remarques et suggestions.

Bonne lecture et surtout bonnes navigations,

Les auteurs

NAVIGATION ASTRONOMIQUE

LES MESURES EN MER

6 LA MESURE DE LA HAUTEUR DU SOLEIL

Il s'agit de mesurer avec précision 2 choses :

1 - **L'angle** entre l'astre choisi et l'horizon. On utilise pour cela le **sextant** et la mesure ainsi obtenue est la "hauteur de l'astre". Nous verrons que cette hauteur doit être corrigée pour tenir compte de certaines imperfections.

2 - **L'instant** précis de cette mesure : il s'agit de l'heure précise à la seconde à laquelle l'astre choisi tangente l'horizon, dans l'œil du sextant. On la mesure à l'aide d'un chronomètre.

6.1 LE SEXTANT

Le sextant permet de mesurer des angles jusqu'à 120° bien que le limbe ne fasse qu'un sixième de cercle (60°), ce qui vaut son nom au sextant. C'est la double réflexion des rayons lumineux sur un jeu de miroirs qui le permet.

6.4.1 Constitution

Le sextant (Figure 40) est constitué d'un groupe de sous-ensembles fixés à demeure sur un bâti et d'un groupe de sous-ensembles solidaires de **l'alidade** mobile par rapport à ce bâti.

L'alidade pivote par rapport au bâti autour d'un axe de rotation dans sa partie supérieure. Elle supporte le grand miroir. Sa rotation peut se faire :

- à forte amplitude en débloquant le système de blocage, l'alidade est libre de pivoter (réglage grossier)
- à faible amplitude, c'est la vis micrométrique entraînée par le tambour qui provoque la rotation (réglage fin)

La valeur de l'angle à mesurer est lue sur le limbe.

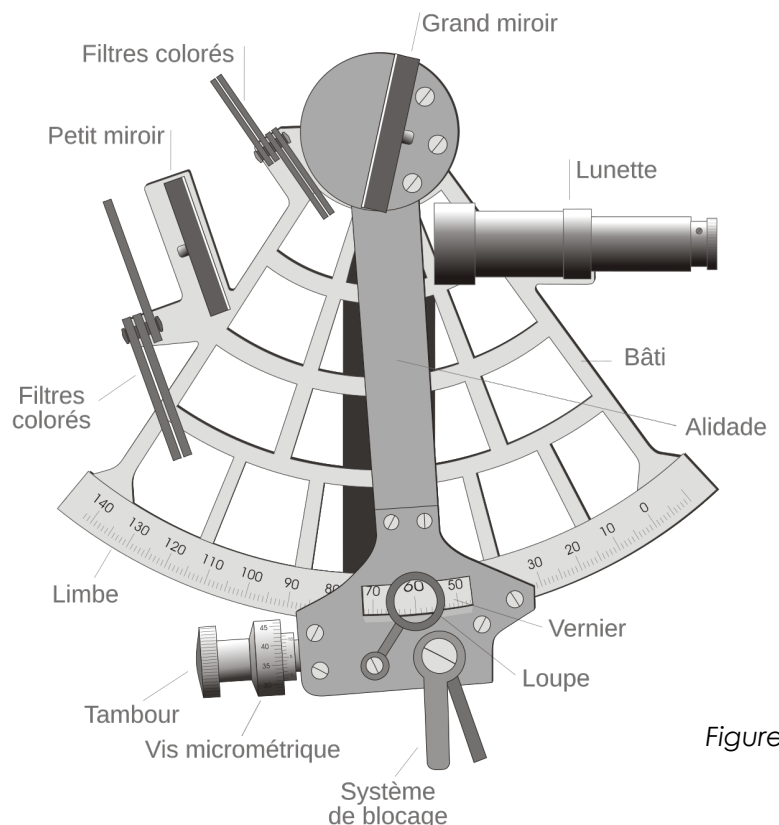
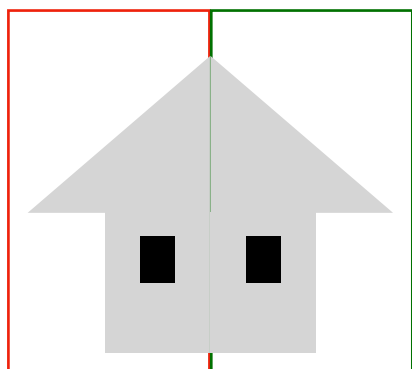


Figure 40

La lunette, le petit miroir et les différents filtres sont fixes sur le bâti.

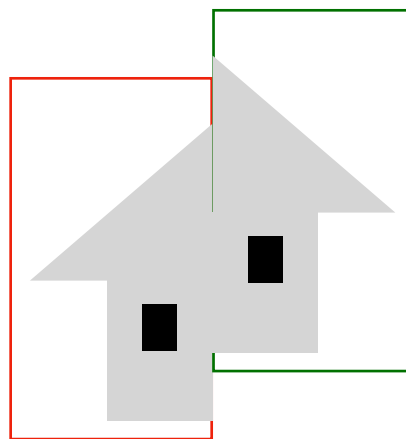
Le petit miroir est en deux parties, une **réfléchissante** qui va dévier les rayons lumineux vers le grand miroir et l'autre **transparente** qui va permettre la visée directe sur l'horizon.

En position 0° , le grand miroir est **parallèle** au petit miroir. Le rayon lumineux dévié par les deux miroirs est parallèle au rayon lumineux non dévié. En imaginant que l'on vise un objet suffisamment éloigné à travers la lunette, on verra sur la partie droite son image par le grand miroir et sur la partie gauche son image directe. Si le sextant est bien réglé ces deux moitiés de l'objet coïncideront pour reconstituer sa forme (Figure 41), sinon les deux images seront décalées (Figure 42).



Sextant bien réglé

Figure 41



Sextant à régler
Erreur de colimation

Figure 42

6.1.2 Exemple d'utilisation : mesure d'un angle entre deux amers

En maintenant la visée (partie transparente-visée directe) sur un point de repère (par exemple le phare) et en amenant par la vis de réglage micrométrique l'image d'un point visé (par exemple la balise cardinale), en coïncidence avec le point de repère, on peut lire sur le limbe l'angle entre ces deux points. Dans ce cas le sextant est maintenu « horizontal » Figure 43.

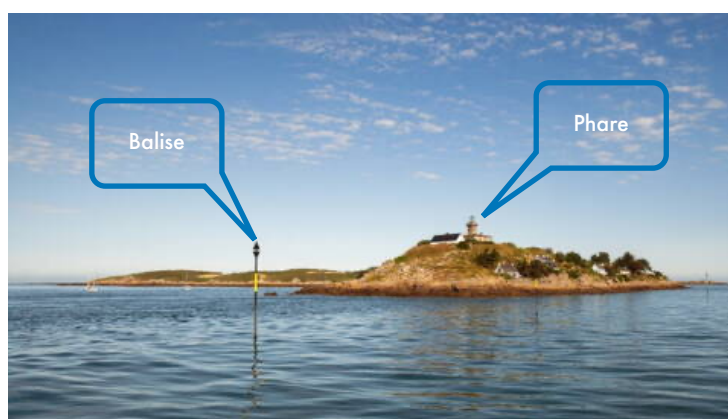


Figure 43



Nous utiliserons le sextant pour mesurer la hauteur du soleil au dessus de l'horizon en faisant « tangenter » son image sur l'horizon. (Voir 4.3 protocole de mesure)

6.1.3 Principe optique

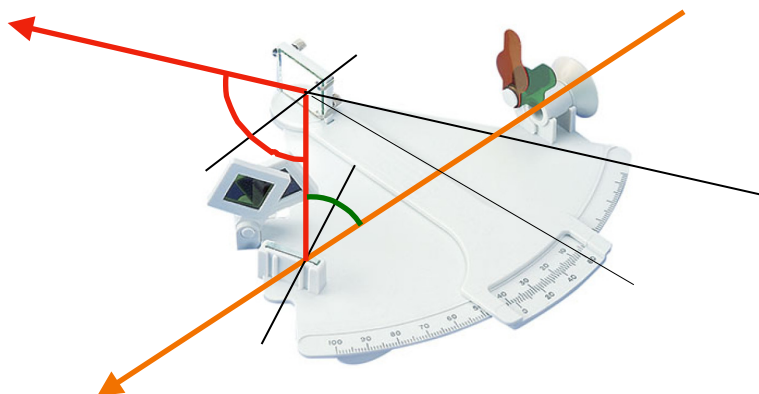
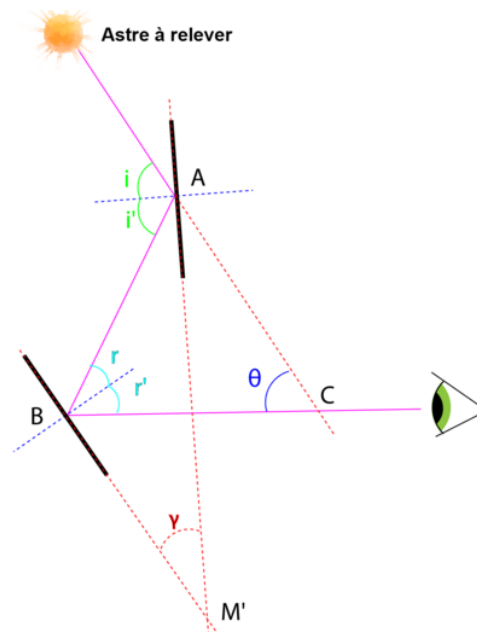


Figure 44



On montre (Figure 44) à l'aide des lois de la réflexion sur les miroirs et un peu de géométrie que :

- si θ désigne l'angle entre la direction de l'astre visé (AC) et la direction BC,
- Si γ désigne l'angle entre les deux miroirs,

$$\text{Alors : } \theta = 2 \cdot \gamma$$

Ainsi un angle θ de 120° correspondra à un angle γ de 60° ; angle qui est mesuré sur le limbe. Pour faciliter la lecture le limbe est gradué selon θ . Deux graduations séparées d'un degré sur le limbe correspondant à la mesure d'un demi-degré. Le tambour et la vis micrométrique amélioreront la précision de la mesure à l'intérieur de la plage de mesure qui va de 0° à 60° .

6.1.5 De la hauteur mesurée à la hauteur vraie : que d'erreurs !

La lecture d'un sextant bien réglé permet une précision de $0,2'$ d'arc. En théorie, un observateur pourrait donc déterminer sa position avec une précision de 0,2 mille marin (puisqu'un mille correspond à $1'$ d'arc de grand cercle), soit environ 370 mètres. Dans la pratique, les navigateurs obtiennent une précision de l'ordre de 2 à 5 milles marins (mouvements du navire, houle, horizon plus ou moins net, imprécisions de l'heure ou de l'estime entre les visées successives du même astre ou d'astres différents).

Les **erreurs instrumentales** du sextant sont l'excentricité et la collimation.

- L'excentricité ϵ une donnée propre du sextant à la construction et ne peut être corrigée. Elle est fonction de la hauteur mesurée et est inscrite sur le certificat dans la boîte du sextant. Sa valeur est fonction de l'angle mesuré.
- La collimation c peut être réglée et il y a lieu de la vérifier avant chaque observation en superposant l'image directe d'un astre et son image réfléchiée et inversement, la collimation étant égale à la moyenne de ces deux mesures.

Si la collimation dépasse $3'$, il faut vérifier et rectifier :

- l'axe optique (vieux sextants), qui doit être parallèle au plan du limbe, en comparant les visées d'une mire à 30 m. par la lunette et par des cavaliers posés sur le limbe. On agit ensuite sur les vis de réglage du collier porte-lunette ;
- le grand miroir, qui doit être, en comparant la visée directe d'un cavalier avec la visée réfléchiée par le grand miroir d'un second cavalier. On agit ensuite sur la vis de réglage du grand miroir ;
- le petit miroir, qui doit être perpendiculaire au plan du limbe et parallèle au grand miroir, en visant un point éloigné ou l'horizon : les deux images doivent être confondues et le rester en inclinant le sextant. On agit sur les vis de réglage du petit miroir.

Les **erreurs et corrections non instrumentales**, qui viennent entacher la précision de la mesure sont :

1 Les corrections liées au **protocole de mesure**

- La dépression **d** : l'œil de l'observateur n'étant pas au niveau du sol, son horizon visible est plus éloigné que l'horizon vrai.
- Le demi-diamètre : les mesures sont supposées faites en prenant le centre de l'astre sur l'horizon, ce qui en pratique n'est pas possible pour les corps célestes proches et entraîne une autre correction à apporter.
- La réfraction **R** : le rayon lumineux venant de l'espace et entrant dans l'atmosphère terrestre change de milieu de propagation, par là-même son trajet s'en trouve dévié (on ne voit pas l'astre « où il est », comme la paille dans le verre d'eau) La parallaxe : l'observateur est supposé au centre de la terre pendant les mesures, ce qui n'est bien sûr pas le cas, et entraîne de ce fait une autre correction.

Tous ces facteurs correctifs ne sont pas « parfaits », par exemple les indices de réfraction sont donnés dans les tables en fonction de la température et de la pression atmosphérique (mesurées à bord) et ne seront que partiellement représentatifs des conditions sur le trajet du rayon lumineux.

2 Les erreurs de l'**observateur**

- erreur d'angle : en fonction de la netteté de l'horizon, de la clarté du ciel, de la qualité du sextant, de l'habileté de l'observateur.
- erreur de temps : le navigateur doit coordonner sa mesure d'angle avec une prise du temps, la parfaite synchronisation des mesures est indispensable, le chronomètre doit être à l'heure à la seconde près (ou sa correction de marche connue)

La hauteur vraie H_v est déduite de la hauteur mesurée H_m par la formule :

$$H_v = H_m + \varepsilon + \delta + c - d - R + P \pm \delta$$

avec :

- ε l'excentricité du sextant, invariable 'défaut de construction', donnée par le constructeur du sextant (voir notice de l'appareil)
- c , la collimation du sextant ;
- d , la dépression de l'horizon, fonction de la hauteur de l'œil de l'observateur, donné par les éphémérides ;
- R , la réfraction astronomique, liée à l'atmosphère terrestre ;
- P , la parallaxe (négligeable pour les étoiles et les planètes), due au fait que l'observateur se suppose au centre de la terre ;
- δ , le demi-diamètre (apparent) de la lune ou du soleil, affecté du signe + si on a visé le bord inférieur, du signe - si on a visé le bord supérieur.

Pour le soleil, les éphémérides donnent la valeur journalière de δ ainsi que la somme : $-d-R+P+ \delta_m$

δ_m étant le demi-diamètre moyen et on applique une deuxième correction :

- + ($\delta - \delta_m$) pour le bord inférieur et
- - ($\delta + \delta_m$) pour le bord supérieur.

Pour la lune on applique une formule analogue avec des valeurs données par les éphémérides.

6.1.5 Entraînement à la visée

Sans horizon et sans astre visible, il est toujours possible de s'entraîner à faire des mesures au sextant. On pourra mesurer par exemple la hauteur angulaire de la cime d'un arbre par rapport au sol, ou la hauteur d'un bâtiment.

Le soleil apparaissant vers la fin d'après-midi au dessus de Port Guillaume, il faudra attendre qu'il soit au dessus de l'eau pour pouvoir mesurer sa hauteur au dessus de l'horizon depuis la grève. La fenêtre d'observation peut être assez réduite, néanmoins on peut s'entraîner dès que le soleil est visible à mesurer sa hauteur par rapport à un autre point que l'horizon. Cet entraînement n'est pas superflu et sera bénéfique lorsqu'on se retrouvera sur un pont d bateau assez mobile !

6.2 L'HEURE TU

C'est le moment de rappeler les différentes heures que nous pouvons utiliser : l'heure **locale** (été-hiver), l'heure temps universel **TU**, l'heure **GMT** (Greenwich Meridian Time), l'heure **UTC** (temps universel coordonné)

4.2.1 Temps universel Tu et temps universel coordonné

Le temps universel **TU** est basé sur la rotation d de la Terre, alors que le temps universel coordonné **UTC** est basé sur des horloges atomiques. La rotation de la Terre présentant quelques irrégularités on utilise le temps **UTC** beaucoup plus stable. **TU** peut varier légèrement par rapport à UTC, l'écart ne peut dépasser 0,9 s sur un an.

Basées sur les mouvements des étoiles et planètes, les éphémérides nautiques utilisent le temps **TU**. Nous considérerons que **TU** et **UTC** sont substituables pour nos calculs de position, la différence entre les deux n'altérant pas significativement nos résultats.

L'expression **GMT** (Greenwich Mean Time) est obsolète, mais elle peut être assimilée à l'heure **TU**.

Il est crucial d'avoir le temps universel **TU** exact à bord car une erreur de 10 secondes peut entraîner une erreur d'intercept de 2,5 milles nautiques.

4.2.2 Temps universel et heure locale : les fuseaux horaires

La raison des fuseaux horaires est de maintenir une norme de temps cohérente au sein de chaque zone, ce qui facilite la coordination des activités à travers de vastes distances. Ils permettent également de conserver une mesure du temps cohérente avec la rotation de la Terre, garantissant que la lumière du jour et l'obscurité correspondent approximativement à l'heure locale dans différentes régions, et facilitent la vie quotidienne à bord de votre navire.

Les limites des fuseaux horaires ne suivent pas strictement les lignes longitudinales et peuvent être ajustées pour des considérations politiques, géographiques ou culturelles, ainsi que pour l'heure d'été.

Par conséquent, des irrégularités peuvent survenir, comme des régions différentes au sein d'un même pays étant dans des fuseaux horaires différents.



En effet, les fuseaux horaires fonctionnent en divisant la Terre en segments basés sur les lignes de longitude. Par ailleurs, le point de référence principal pour les fuseaux horaires est le méridien de Greenwich, qui passe par Greenwich, en Angleterre. Ce point de référence a été choisi de préférence à Paris car l'antéméridien de Greenwich ne croise pas de terre.

La Terre est divisée en 24 fuseaux horaires, chacun d'environ 15 degrés de longitude de large, avec la ligne de changement de date internationale suivant généralement le 180e méridien.

TU : temps universel **Tcf** : temps du fuseau (heure locale)

$$\text{TU} = \text{Tcf} + f$$

Et enfin l'**heure en vigueur ou heure légale** qui tient compte de l'heure d'été et de l'heure d'hiver :

Heure d'été : **UTC** + 2

Heure d'hiver : **UTC** + 1

Depuis 2002, le changement d'heure s'opère de façon homogène dans tous les États membres de l'UE :

- le **passage à l'heure d'été** s'effectue dans la nuit du dernier samedi au **dimanche du mois de mars** ;
- le **passage à l'heure d'hiver** s'effectue dans la nuit du

fuseau horaire	f	fuseau horaire	f
7.5° W - 7.5 E	0	7.5° O - 22.5° O	+1
7.5° E - 22.5° E	- 1	22.5° O - 37.5° O	+2
22.5° E - 37.5° E	- 2	37.5° O - 52.5° O	+3
37.5° E - 52.5° E	- 3	52.5° O - 67.5° O	+4
52.5° E - 67.5° E	- 4	67.5° O - 82.5° O	+5
67.5° E - 82.5° E	- 5	82.5° O - 97.5° O	+6
82.5° E - 97.5° E	- 6	97.5° O - 112.5° O	+7
97.5° E - 112.5° E	- 7	112.5° O - 127.5° O	+8
112.5° E - 127.5° E	- 8	127.5° O - 142.5° O	+9
127.5° E - 142.5° E	- 9	142.5° O - 157.5° O	+10
142.5° E - 157.5° E	- 10	157.5° O - 172.5° O	+11
157.5° E - 172.5° E	- 11	172.5° O - 180° O	+12
172.5° E - 180° E	- 12		

dernier samedi au **dimanche du mois d'octobre**.

Pour l'instant ce dispositif est encore actif dans l'UE. Mais il vaut mieux se renseigner de l'heure en vigueur pour chacun des pays dans lesquels nos navigations nous amènent.

L'utilisation de la navigation astronomique impose concrètement d'avoir une horloge à bord calée sur l'heure **UT** (ou **UTC**)

Quelques exemples de jongleries avec l'heure :

Votre montre réglée à l'heure universelle (TU) indique 11h 14m 36s.

La longitude est de 65° Ouest.

Calculez l'heure locale à bord (Tcf):

$$Tcf = TU - (f) = 11h 14m 36s - (+4) = 07h 14m 36s$$

Votre montre réglée à l'heure universelle (TU) indique 11h 14m 36s.

La longitude est de 65° Est.

Calculez l'heure locale à bord (Tcf) :

$$Tcf = TU - (f) = 11h 14m 36s - (-4) = 15h 14m 36s$$

4.2.3 L'heure à bord

Il est primordial d'avoir l'heure TU à bord. Pour être indépendant des moyens de positionnement par satellite (GPS par exemple) qui peuvent fournir l'heure TU, il est bon d'avoir une montre ou une horloge indépendante.

Les horloges et montres atomiques ou radio-pilotées sont des dispositifs de mesure du temps précis car ils sont synchronisés avec des émetteurs radio qui, à leur tour, reçoivent leurs signaux horaires à partir d'horloges atomiques au césium hautement précises.

A défaut de disposer d'un de ces instruments à bord une montre ou horloge plus « classique » (mécanique ou à quartz) peut faire l'affaire à condition d'en connaître son erreur. Il faut donc tenir un journal pour suivre l'évolution de l'erreur de votre montre dans le temps!

Les stations radio qui émettent l'heure à des moments prédéfinis en utilisant les top horaires peuvent vous permettre de vous recalculer sur l'heure TU et de connaître l'erreur de votre montre.

WWV (station de radio) Sa principale fonction est d'émettre en continu le temps universel coordonné et un étalon de fréquence. La station envoie l'heure simultanément sur cinq fréquences: 2,5 Mhz, 5Mhz, 10Mhz, 15 Mhz et 20Mhz

Le signal horaire de WWV est également accessible par téléphone en appelant le +1 (303) 499-7111 (WWV).

Le site <https://heurelegalefrancaise.fr>, fournit l'heure **TU** en « temps réel ».

6.3 PROTOCOLE DE MESURE

a - Munissez-vous d'un chronomètre de sport (un modèle de base suffit) et attendez que la montre en **heure TU** du bord termine la minute en cours. Lorsque la trotteuse des secondes est à 0, déclenchez le chronomètre. Notez l'heure de la montre (par exemple : 10h 28min 0s)

b - Montez sur le pont du bateau avec votre chronomètre et votre sextant et placez-vous face au soleil, à l'endroit le plus stable possible. Le pied du mat, en général. Le chronomètre "tourne" toujours...

c - Mettez le sextant à 0 et visez l'horizon. Si celui-ci vous apparaît comme une ligne continue, c'est que votre sextant est parfaitement réglé ; passez au point **d**. Si l'horizon vous apparaît "en escalier", cas le plus fréquent, agissez sur le tambour du sextant pour aligner les 2 parties. La valeur alors lue sur le sextant est la *collimation* dont il faudra tenir compte lors des calculs. Si cette valeur est supérieure à 10', votre sextant a sans doute besoin d'un bon réglage. Le chronomètre "tourne" toujours...

d - Mettez les filtres en place et visez le soleil. Lorsque celui-ci apparaît dans la lunette, débrayez le tambour et basculez le corps du sextant pour aller chercher l'horizon, tout en gardant le soleil dans le grand miroir. Quand vous avez l'horizon et le soleil ensemble dans la lunette, embrayez le tambour. Le chronomètre "tourne" toujours...

e - Voilà maintenant le point délicat de la mesure : vous devez faire exactement tangenter le bord inférieur du soleil avec la ligne d'horizon. A l'instant précis où vous obtenez cette tangence parfaite, sextant bien

vertical, vous **arrêtez** le chronomètre

Attention astuce : n'essayez pas de faire tangenter le soleil sur l'horizon en tournant le tambour dans tous les sens. Mais utilisez plutôt le déplacement naturel du soleil : si c'est le matin, le soleil monte. Placez-le donc à moitié "dans l'eau" et attendez qu'il monte sans toucher à rien. Balancez le sextant de droite à gauche pour déterminer la verticale exacte, et à l'instant où il tangente l'horizon, arrêtez le chronomètre. Si c'est l'après-midi, procédez de même, mais en mettant le soleil un peu au dessus de l'horizon, et attendez qu'il descende.

f - Redescendez à la table à carte sans rien toucher (en passant dans le cockpit, jetez un coup d'œil au compas du bord qui vous indique dans quelle direction se trouve le soleil, à peu près) et ajoutez l'indication du chronomètre à l'heure initiale pour obtenir l'**heure exacte de la visée**. Par exemple, en continuant le cas du **§a** ci-dessus, si vous avez arrêté votre chronomètre à 0h 4min 12s, l'instant de la mesure est : 10h 28min + 4min 12s = 10h 32min 12s.

Le sextant quant à lui, vous indique la **hauteur angulaire** de l'astre au-dessus de l'horizon. Il s'agit de la hauteur donnée par l'instrument, appelée "Hauteur Instrumentale" H_i . La Hauteur Vraie H_v sera obtenue après correction de H_i .

Une autre technique consiste à faire sa mesure de hauteur et au moment où la mesure est correcte on compte les secondes mentalement en égrenant A1, A2, A3, etc. Arrivé à la table à carte on note l'heure TU exacte et on lui soustrait ensuite le nombre de secondes comptées.

Exemple : on a compté 48 s entre la mesure et l'instant où on a regardé l'heure. A cet instant il était 11h 44 min 12 s. La mesure s'est donc faite à 11 h 43 min 24 s.

7 CONCLUSIONS

Il est beaucoup plus rapide, simple et précis d'utiliser son GPS pour se positionner. En croisière côtière ou à la journée c'est indéniablement un avantage que ne peut compenser la navigation astronomique.

Sur de longues traversées, où on a du temps devant soi, ces techniques de navigation astronomique peuvent se révéler intéressantes et sources d'occupation et peuvent nous ramener à une rigueur dans nos pratiques que les outils numériques modernes nous font parfois perdre de vue.

Chacun suivant sa formation et ses connaissances peut y trouver une source d'agrément en se satisfaisant de pratiquer des techniques de positionnement qui ont été celles des navigateurs, petits ou grands, des siècles passés.

*Vous arrivez à voir
l'écran de son GPS ?*

Non, pas moi...

*Moi non plus, zut ! Il va
falloir se taper les
calculs...*



LES MESURES EN MER

6 La mesure de la hauteur du soleil	2
6.1 le sextant	2
6.1.1 Constitution.....	2
6.1.3 Principe optique.....	4
6.1.5 De la hauteur mesurée à la hauteur vraie : que d'erreurs !.....	4
6.1.5 Entraînement à la visée.....	5
6.2 L'heure TU.....	6
4.2.1 Temps universel Tu et temps universel coordonné.....	6
4.2.2 Temps universel et heure locale : les fuseaux horaires	6
4.2.3 L'heure à bord.....	7
6.3 Protocole de mesure	7
7 Conclusions	8