

L'avenir de la navigation astronomique dans la marine marchande

Loïc BARBOT - pemlb@free.fr
Professeur de l'Enseignement Maritime
École Nationale Supérieure Maritime de Marseille

mémoire de brevet technique
septembre 2013

RESUMÉ

Lorsque le navire s'éloigne de la côte et que les amers terrestres disparaissent, le marin lève les yeux vers les amers célestes. Ainsi la navigation astronomique a accompagné les explorateurs dans la recherche des « nouveaux continents » puis les expéditions commerciales et navales. Au gré des progrès scientifiques, le marin a aiguisé cet outil de navigation pour mesurer son cap, sa latitude puis sa longitude.

Depuis le milieu du XX^{ème} siècle les documents, les instruments et les méthodes de calcul du point astronomique n'ont pas ou peu évolué. Cette technique ne nécessite aucune source d'énergie ou ordinateur mais une horloge à l'heure. Sa précision est d'environ un mille sur la position et de 0,1 ° sur le cap. Elle est désormais considérée comme un moyen de secours lorsque les moyens de positionnement modernes sont en panne.

L'apparition des « astres artificiels » du GPS a simplifié le travail du navigateur. Après quelques décennies de doute et d'évaluation, la marine marchande a adopté le positionnement par satellite et adapté l'organisation du quart à des systèmes très automatisés. Cette récente évolution a sensiblement amélioré la sécurité nautique et permis à des marins moins qualifiés d'assumer le quart en passerelle.

L'attrait du positionnement par satellite a justifié l'abandon progressif des anciennes techniques de navigation non seulement au large mais aussi en vue des côtes voire dans les ports ! La pratique des observations au sextant et des points par relèvements et distances s'est réduite alors que la maîtrise de ces techniques requiert une longue expérience. Comme par scrupule, la réglementation maritime a conservé l'obligation d'utiliser les étoiles pour mesurer l'erreur du compas.

Tandis que l'astronomie était délaissée par les marins, elle suscitait un intérêt croissant dans l'industrie spatiale et militaire. Les algorithmes et les capteurs ont connu un développement fulgurant pour améliorer la précision du positionnement en quatre dimensions et des attitudes à partir d'observations astronomiques.

Les progrès des secteurs spatiaux et militaires pourraient bénéficier aux domaines maritime et aéronautique mais les principaux obstacles sont financiers et réglementaires. Si un industriel ose adapter les équipements nautiques des navires marchands à une navigation astronomique et côtière automatisée, il permettra aux marins d'entretenir l'expérience des techniques dites « de secours ». Car l'observation au sextant et le point par relèvement et distances demeurent efficaces quand tous les systèmes modernes sont en panne ; mais leur pratique nécessite une expérience longue à acquérir.

Ce système optique et électronique pourrait aussi servir à la veille anticollision, à la recherche d'un homme à la mer ou de la pollution. En y ajoutant un télémètre laser, il permettrait une navigation côtière précise et une alternative au radar classique.

Une petite entreprise s'est lancée dans l'aventure en s'adressant aux navires de plaisance : le viseur stellaire est constitué d'une caméra en lumière visible et d'un inclinomètre pour calculer automatiquement une position à 1 mille près. Les essais du prototype sont en cours et devraient être publiés fin 2013. Les performances d'un tel capteur peuvent être sensiblement améliorées par une caméra infrarouge et des moteurs de pointage sans dépasser le coût d'un compas gyroscopique ou d'un radar agréés par l'OMI. Une précision du point final de 100 m est déjà possible avec les technologies et coûts de production actuels. Compte tenu des progrès scientifiques et des économies d'échelle pour une production industrielle, un système calculant le point avec une précision de 10 m est envisageable d'ici 2020 à bord des navires marchands.

Avec le sextant et les éphémérides nautiques sur papier, l'avenir de la navigation astronomique est limité à celui des moyens de secours, comme le compas magnétique classique ou le sondeur à main. Avec des capteurs modernes et l'aide de l'ordinateur, la navigation astronomique peut rivaliser avec le GPS et envisager un bel avenir dans la marine marchande.

COPYRIGHT

L'auteur renonce à tout droit de diffusion ou reproduction de ce document. Certaines illustrations soumises à un copyright antérieur doivent faire l'objet d'une autorisation préalable à toute diffusion ou reproduction auprès de l'auteur ou de l'éditeur mentionné en référence bibliographique.

PRÉAMBULE

Les prix donnés en euros sont calculés avec les parités suivantes de juin 2013 :

1 \$ = 0,7624 €

1 £ = 1,1763 €

Ces prix sont donnés hors taxe.

Le mille marin est abrégé « 1M ».

REMERCIEMENTS

J'exprime mes vifs remerciements aux nombreuses personnes, amies ou inconnues auparavant, qui ont pris sur leur temps de travail ou sur leurs loisirs pour répondre à mes questions par courriel, téléphone ou de visu. Une petite partie d'entre eux est citée dans les références bibliographiques « échanges privés ».

TABLE DES MATIÈRES

1. LA NAVIGATION ASTRONOMIQUE SUR LES NAVIRES MARCHANDS	9
a) <i>Les documents , instruments, méthodes : précision et coût</i>	9
les documents astronomiques : éphémérides ou almanach nautiques	9
les instruments de la navigation astronomique	18
les méthodes de calcul du point astronomique	25
b) <i>La réglementation</i>	35
c) <i>La pratique</i>	38
d) <i>La concurrence du GPS et de l'ECDIS</i>	39
2. AMÉLIORATION DE LA NAVIGATION ASTRONOMIQUE	41
a) <i>Les éphémérides nautiques</i>	41
b) <i>Les instruments de visée</i>	48
c) <i>La référence horizontale</i>	59
d) <i>La mesure du temps</i>	63
e) <i>La stabilisation de la visée</i>	65
f) <i>La réfraction atmosphérique</i>	68
g) <i>La détermination du point</i>	73
h) <i>Des réalisations existantes</i>	78
3. UN INSTRUMENT POUR LA MARINE MARCHANDE	83
a) <i>Un cahier des charges</i>	83
b) <i>Un prix maximum</i>	87
c) <i>La réglementation</i>	88
BIBLIOGRAPHIE	91

Introduction

La navigation astronomique est peu à peu délaissée par les marins de commerce depuis que les systèmes modernes de positionnement sont apparus, plus précis, simples et rapides. Même si l'astronomie fascine encore les passagers et chatouille la fibre écologique, voire nostalgique, de quelques officiers, elle n'est plus pratiquée dans la marine marchande que par obligation et sans réelle indépendance aux systèmes modernes de positionnement. La voilà bientôt rangée au musée des « moyen de secours » dont les écoles assurent théoriquement la conservation.

Les astres servent toujours de repère aux activités spatiales. Les militaires s'y intéressent davantage depuis l'apparition des moyens modernes de navigation. Ces deux secteurs ont développés de nombreux instruments pour lire sur la voûte céleste la position et l'orientation des véhicules. Parmi ces techniques, certaines pourraient être adaptées à la navigation maritime pour rendre l'astronomie concurrente voire avantageuse en comparaison des astres artificiels.

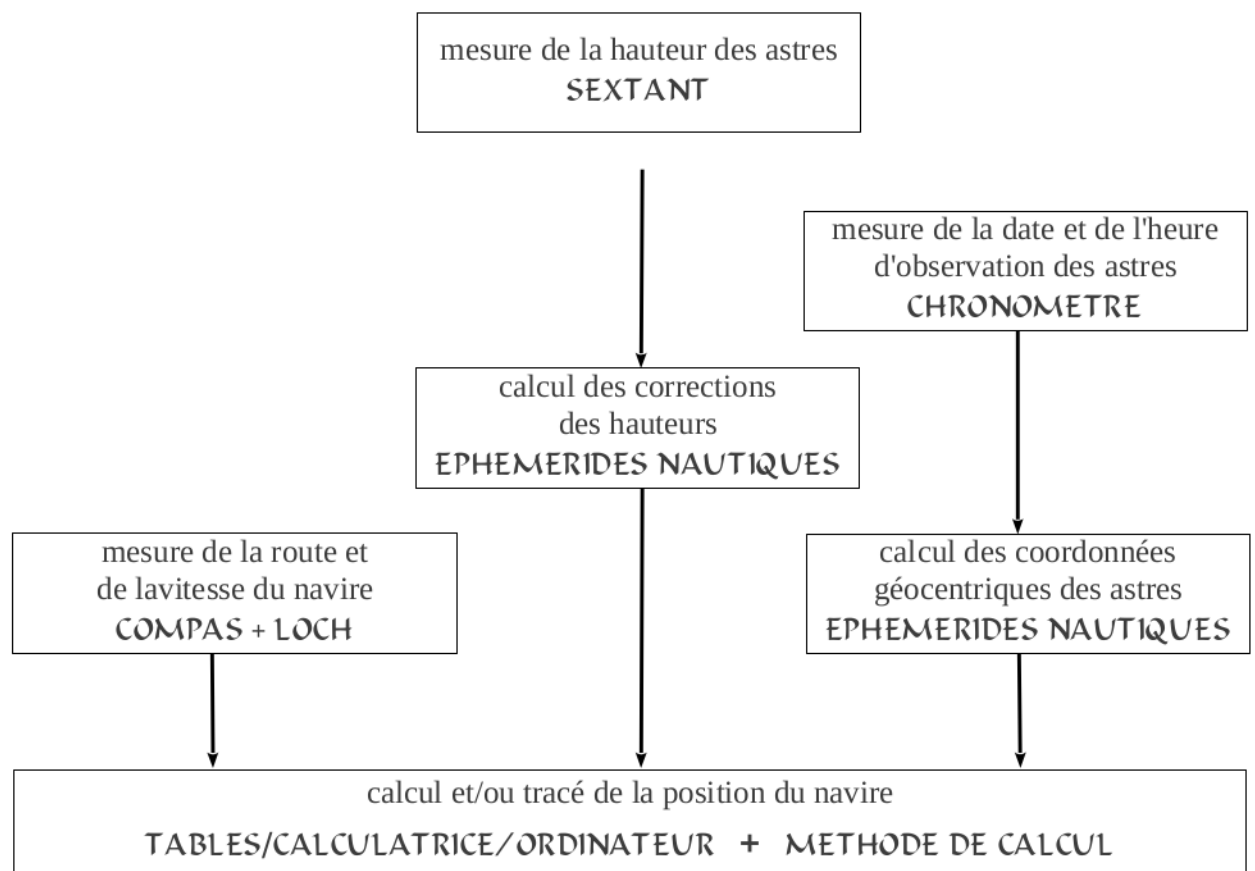
La dernière partie ébauche le cahier des charges d'un système de navigation maritime astronomique et côtière puis propose de repérer les freins à son développement industriel.

1. LA NAVIGATION ASTRONOMIQUE SUR LES NAVIRES MARCHANDS

Dans cette première partie, nous décrivons la manière dont la navigation astronomique est mise en œuvre à bord des navires marchands en 2013 : les méthodes disponibles, les normes réglementaires, la pratique. Enfin nous citerons les techniques de navigation « concurrentes » qui posent parfois la question d'abandonner les observations astronomiques.

a) Les documents, instruments, méthodes : précision et coût

La navigation astronomique dans la marine marchande est considérée comme un moyen de positionnement de secours. Dans ces conditions, la documentation et les instruments nécessaires à la détermination du point sont choisis pour obtenir une précision grossière. Le point astronomique passe chronologiquement par les étapes suivantes :



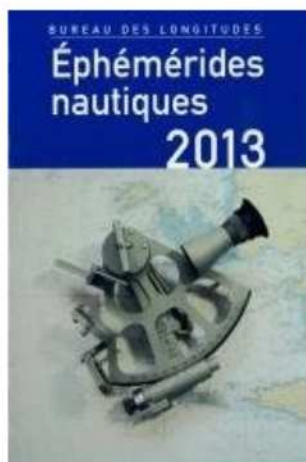
Les erreurs de chaque étape s'ajoutent et dégradent la précision du point final. L'équipement disponible à bord des passerelles est fixé par le propriétaire du navire entre un minimum imposé par la réglementation et un maximum limité par les ressources financières.

- **les documents astronomiques : éphémérides ou almanach nautiques**

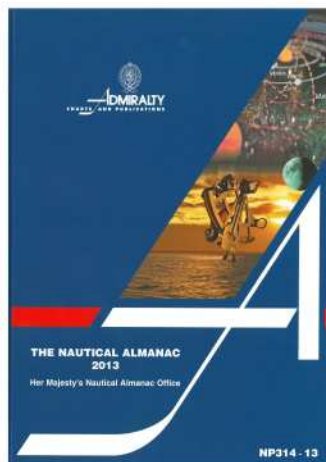
Les éphémérides nautiques sont les ouvrages donnant la position des astres (Soleil, Lune, planètes et étoiles visibles à l'œil nu) dans un système de coordonnées exploitable par le navigateur (coordonnées géocentriques : horaires ou équatoriales) arrondi à 0,1 ' d'angle près, soit à 6 " près.

Ces informations sont diffusées sur papier par des organismes gouvernementaux :

- « Éphémérides nautiques » de l'Institut de Mécanique Céleste et de Calcul des Éphémérides (IMCCE) rattaché au Bureau des Longitudes et à l'Observatoire de Paris [LIV01];
- « Nautical Almanac » de Her Majesty's Nautical Almanac Office (HMNAO) rattaché au United Kingdom Hydrographic Office (UKHO) au Royaume Uni [LIV02];
- « Nautical Almanac » du United States Nautical Almanac Office (USNAO, en collaboration étroite avec le HMNAO) aux États Unis [LIV03].



Éphémérides nautiques - 44 € - 6 "



Nautical Almanac UK - 48 € - 6 "



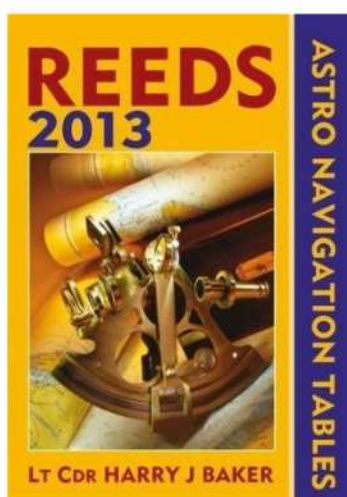
Nautical Almanac US - 30 € - 6 "

D'autres publications privées donnent les mêmes informations avec une précision de 6" dans le meilleur des cas :

- « Almanach du marin breton » par l'association de l'Œuvre du Marin Breton (éphémérides partielles dans les dernières éditions) [LIV04];
- « Reeds astro navigation tables » au Royaume Uni [LIV05];
- « Brown's nautical almanac » au Royaume Uni [LIV06].



Almanach du Marin Breton
24 € - 6 "



Reeds astro navigation tables
53 € - 6 "



Brown's nautical almanac
80 € - 6 "

Les sites internet des organismes officiels diffusent aussi cette information, comme celui de l'IMCCE, permettant de générer gratuitement des éphémérides à une date et pour une durée quelconques avec une précision de 0,001" d'angle [WWW01]. Des sites privés diffusent gratuitement cette information sans aucune garantie de précision.

Mardi 25 décembre 2012

Mercredi 26 décembre 2012

Heure U.T.	SOLEIL	LUNE	Coucher du Soleil	Lever et coucher de la Lune	Heure U.T.	SOLEIL	LUNE	Lever du Soleil	Lever et coucher de la Lune
	Altitude D	Altitude v	Altitude D	Altitude v		Altitude D	Altitude v	Altitude D	Altitude v
00	179 59.4	19 17.5	19 17.5	19 17.5	00	179 52.0	19 17.5	19 17.5	19 17.5
01	179 59.4	19 17.5	19 17.5	19 17.5	01	179 52.0	19 17.5	19 17.5	19 17.5
02	179 59.4	19 17.5	19 17.5	19 17.5	02	179 52.0	19 17.5	19 17.5	19 17.5
03	179 59.4	19 17.5	19 17.5	19 17.5	03	179 52.0	19 17.5	19 17.5	19 17.5
04	179 59.4	19 17.5	19 17.5	19 17.5	04	179 52.0	19 17.5	19 17.5	19 17.5
05	179 59.4	19 17.5	19 17.5	19 17.5	05	179 52.0	19 17.5	19 17.5	19 17.5
06	179 59.4	19 17.5	19 17.5	19 17.5	06	179 52.0	19 17.5	19 17.5	19 17.5
07	179 59.4	19 17.5	19 17.5	19 17.5	07	179 52.0	19 17.5	19 17.5	19 17.5
08	179 59.4	19 17.5	19 17.5	19 17.5	08	179 52.0	19 17.5	19 17.5	19 17.5
09	179 59.4	19 17.5	19 17.5	19 17.5	09	179 52.0	19 17.5	19 17.5	19 17.5
10	179 59.4	19 17.5	19 17.5	19 17.5	10	179 52.0	19 17.5	19 17.5	19 17.5
11	179 59.4	19 17.5	19 17.5	19 17.5	11	179 52.0	19 17.5	19 17.5	19 17.5
12	179 59.4	19 17.5	19 17.5	19 17.5	12	179 52.0	19 17.5	19 17.5	19 17.5
13	179 59.4	19 17.5	19 17.5	19 17.5	13	179 52.0	19 17.5	19 17.5	19 17.5
14	179 59.4	19 17.5	19 17.5	19 17.5	14	179 52.0	19 17.5	19 17.5	19 17.5
15	179 59.4	19 17.5	19 17.5	19 17.5	15	179 52.0	19 17.5	19 17.5	19 17.5
16	179 59.4	19 17.5	19 17.5	19 17.5	16	179 52.0	19 17.5	19 17.5	19 17.5
17	179 59.4	19 17.5	19 17.5	19 17.5	17	179 52.0	19 17.5	19 17.5	19 17.5
18	179 59.4	19 17.5	19 17.5	19 17.5	18	179 52.0	19 17.5	19 17.5	19 17.5
19	179 59.4	19 17.5	19 17.5	19 17.5	19	179 52.0	19 17.5	19 17.5	19 17.5
20	179 59.4	19 17.5	19 17.5	19 17.5	20	179 52.0	19 17.5	19 17.5	19 17.5
21	179 59.4	19 17.5	19 17.5	19 17.5	21	179 52.0	19 17.5	19 17.5	19 17.5
22	179 59.4	19 17.5	19 17.5	19 17.5	22	179 52.0	19 17.5	19 17.5	19 17.5
23	179 59.4	19 17.5	19 17.5	19 17.5	23	179 52.0	19 17.5	19 17.5	19 17.5
24	179 59.4	19 17.5	19 17.5	19 17.5	24	179 52.0	19 17.5	19 17.5	19 17.5

Heure U.T.	SOLEIL	LUNE	Coucher du Soleil	Lever et coucher de la Lune	Heure U.T.	SOLEIL	LUNE	Lever du Soleil	Lever et coucher de la Lune
	Altitude D	Altitude v	Altitude D	Altitude v		Altitude D	Altitude v	Altitude D	Altitude v
00	179 59.4	19 17.5	19 17.5	19 17.5	00	179 52.0	19 17.5	19 17.5	19 17.5
01	179 59.4	19 17.5	19 17.5	19 17.5	01	179 52.0	19 17.5	19 17.5	19 17.5
02	179 59.4	19 17.5	19 17.5	19 17.5	02	179 52.0	19 17.5	19 17.5	19 17.5
03	179 59.4	19 17.5	19 17.5	19 17.5	03	179 52.0	19 17.5	19 17.5	19 17.5
04	179 59.4	19 17.5	19 17.5	19 17.5	04	179 52.0	19 17.5	19 17.5	19 17.5
05	179 59.4	19 17.5	19 17.5	19 17.5	05	179 52.0	19 17.5	19 17.5	19 17.5
06	179 59.4	19 17.5	19 17.5	19 17.5	06	179 52.0	19 17.5	19 17.5	19 17.5
07	179 59.4	19 17.5	19 17.5	19 17.5	07	179 52.0	19 17.5	19 17.5	19 17.5
08	179 59.4	19 17.5	19 17.5	19 17.5	08	179 52.0	19 17.5	19 17.5	19 17.5
09	179 59.4	19 17.5	19 17.5	19 17.5	09	179 52.0	19 17.5	19 17.5	19 17.5
10	179 59.4	19 17.5	19 17.5	19 17.5	10	179 52.0	19 17.5	19 17.5	19 17.5
11	179 59.4	19 17.5	19 17.5	19 17.5	11	179 52.0	19 17.5	19 17.5	19 17.5
12	179 59.4	19 17.5	19 17.5	19 17.5	12	179 52.0	19 17.5	19 17.5	19 17.5
13	179 59.4	19 17.5	19 17.5	19 17.5	13	179 52.0	19 17.5	19 17.5	19 17.5
14	179 59.4	19 17.5	19 17.5	19 17.5	14	179 52.0	19 17.5	19 17.5	19 17.5
15	179 59.4	19 17.5	19 17.5	19 17.5	15	179 52.0	19 17.5	19 17.5	19 17.5
16	179 59.4	19 17.5	19 17.5	19 17.5	16	179 52.0	19 17.5	19 17.5	19 17.5
17	179 59.4	19 17.5	19 17.5	19 17.5	17	179 52.0	19 17.5	19 17.5	19 17.5
18	179 59.4	19 17.5	19 17.5	19 17.5	18	179 52.0	19 17.5	19 17.5	19 17.5
19	179 59.4	19 17.5	19 17.5	19 17.5	19	179 52.0	19 17.5	19 17.5	19 17.5
20	179 59.4	19 17.5	19 17.5	19 17.5	20	179 52.0	19 17.5	19 17.5	19 17.5
21	179 59.4	19 17.5	19 17.5	19 17.5	21	179 52.0	19 17.5	19 17.5	19 17.5
22	179 59.4	19 17.5	19 17.5	19 17.5	22	179 52.0	19 17.5	19 17.5	19 17.5
23	179 59.4	19 17.5	19 17.5	19 17.5	23	179 52.0	19 17.5	19 17.5	19 17.5
24	179 59.4	19 17.5	19 17.5	19 17.5	24	179 52.0	19 17.5	19 17.5	19 17.5

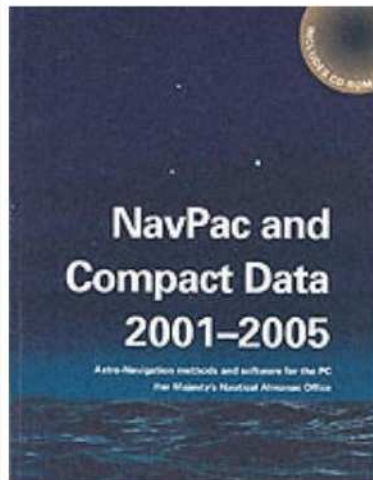
248

2011 DECEMBER 24, 25, 26 (SAT., SUN., MON.)

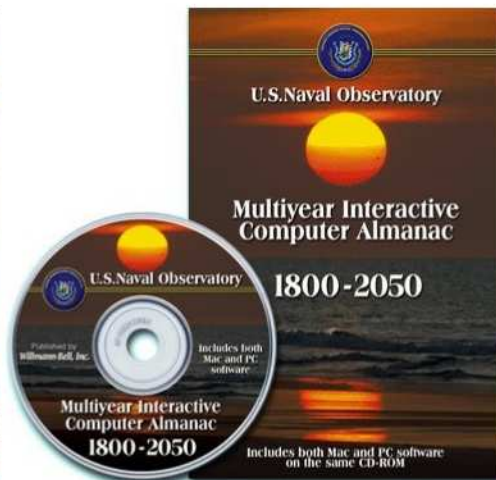
UT	ARIES	VENUS	MARS	JUPITER	SATURN	STARS	UT	ARIES	VENUS	MARS	JUPITER	SATURN	STARS
d h	GHA	GHA	GHA	GHA	GHA	Name	d h	GHA	GHA	GHA	GHA	Name	
24 00	92 10.8	145 24.5	221 02.9	282 12.7	7 17.0	315 18.8	24 00	92 10.8	145 24.5	221 02.9	282 12.7	7 17.0	315 18.8
01	107 13.2	160 23.8	02.2	297 14.4	16.7	78 30.1	01	107 13.2	160 23.8	02.2	297 14.4	16.7	78 30.1
02	112 15.7	175 23.0	01.1	312 16.1	16.5	33 32.6	02	112 15.7	175 23.0	01.1	312 16.1	16.5	33 32.6
03	117 18.1	190 22.1	00.0	327 17.9	16.3	108 35.1	03	117 18.1	190 22.1	00.0	327 17.9	16.3	108 35.1
04	122 20.6	205 21.6	21.0	342 19.6	16.0	123 37.6	04	122 20.6	205 21.6	21.0	342 19.6	16.0	123 37.6
05	127 23.1	220 20.8	20 59.3	357 21.3	15.8	138 40.1	05	127 23.1	220 20.8	20 59.3	357 21.3	15.8	138 40.1
06	132 25.5	235 20.1	20 58.5	372 21.1	15.5	153 42.6	06	132 25.5	235 20.1	20 58.5	372 21.1	15.5	153 42.6
07	137 28.0	250 19.3	20 57.8	387 20.9	15.3	168 45.0	07	137 28.0	250 19.3	20 57.8	387 20.9	15.3	168 45.0
08	142 30.4	265 18.5	20 57.1	402 20.7	15.0	183 47.4	08	142 30.4	265 18.5	20 57.1	402 20.7	15.0	183 47.4
09	147 32.9	280 17.9	20 56.4	417 20.5	14.8	198 49.8	09	147 32.9	280 17.9	20 56.4	417 20.5	14.8	198 49.8
10	152 35.3	295 17.3	20 55.7	432 20.3	14.6	213 52.2	10	152 35.3	295 17.3	20 55.7	432 20.3	14.6	213 52.2
11	157 37.7	310 16.7	20 55.0	447 20.1	14.4	228 54.6	11	157 37.7	310 16.7	20 55.0	447 20.1	14.4	228 54.6
12	162 40.1	325 16.1	20 54.3	462 19.9	14.2	243 57.0	12	162 40.1	325 16.1	20 54.3	462 19.9	14.2	243 57.0
13	167 42.5	340 15.5	20 53.6	477 19.7	14.0	258 59.4	13	167 42.5	340 15.5	20 53.6	477 19.7	14.0	258 59.4
14	172 44.9	355 14.9	20 52.9	492 19.5	13.8	273 61.8	14	172 44.9	355 14.9	20 52.9	492 19.5	13.8	273 61.8
15	177 47.3	370 14.3	20 52.2	507 19.3	13.6	288 64.2	15	177 47.3	370 14.3	20 52.2	507 19.3	13.6	288 64.2
16	182 49.7	385 13.7	20 51.5	522 19.1	13.4	303 66.6	16	182 49.7	385 13.7	20 51.5	522 19.1	13.4	303 66.6
17	187 52.1	400 13.1	20 50.8	537 18.9	13.2	318 69.0	17	187 52.1	400 13.1	20 50.8	537 18.9	13.2	318 69.0
18	192 54.5	415 12.5	20 50.1	552 18.7	13.0	333 71.4	18	192 54.5	415 12.5	20 50.1	552 18.7	13.0	333 71.4
19	197 56.9	430 11.9	20 49.4	567 18.5	12.8	348 73.8	19	197 56.9	430 11.9	20 49.4	567 18.5	12.8	348 73.8
20	202 59.3	445 11.3	20 48.7	582 18.3	12.6	363 76.2	20	202 59.3	445 11.3	20 48.7	582 18.3	12.6	363 76.2
21	207 61.7	460 10.7	20 48.0	597 18.1	12.4	378 78.6	21	207 61.7	460 10.7	20 48.0	597 18.1	12.4	378 78.6
22	212 64.1	475 10.1	20 47.3	612 17.9	12.2	393 81.0	22	212 64.1	475 10.1	20 47.3	612 17.9	12.2	393 81.0
23	217 66.5	490 9.5	20 46.6	627 17.7	12.0	408 83.4	23	217 66.5	490 9.5	20 46.6	627 17.7	12.0	408 83.4
24	222 68.9	505 8.9	20 45.9	642 17.5	11.8	423 85.8	24	222 68.9	505 8.9	20 45.9	642 17.5	11.8	423 85.8
25	227 71.3	520 8.3	20 45.2	657 17.3	11.6	438 88.2	25	227 71.3	520 8.3	20 45.2	657 17.3	11.6	438 88.2
26	232 73.7	535 7.7	20 44.5	672 17.1	11.4	453 90.6	26	232 73.7	535 7.7	20 44.5	672 17.1	11.4	453 90.6
27	237 76.1	550 7.1	20 43.8	687 16.9	11.2	468 93.0	27	237 76.1	550 7.1	20 43.8	687 16.9	11.2	468 93.0
28	242 78.5	565 6.5	20 43.1	702 16.7	11.0	483 95.4	28	242 78.5	565 6.5	20 43.1	702 16.7	11.0	483 95.4
29	247 80.9	580 5.9	20 42.4	717 16.5	10.8	498 97.8	29	247 80.9	580 5.9	20 42.4	717 16.5	10.8	498 97.8
30	252 83.3	595 5.3	20 41.7	732 16.3	10.6	513 100.2	30	252 83.3	595 5.3	20 41.7	732 16.3	10.6	513 100.2
31	257 85.7	610 4.7	20 41.0	747 16.1	10.4	528 102.6	31	257 85.7	610 4.7	20 41.0	747 16.1	10.4	528 102.6
32	262 88.1	625 4.1	20 40.3	762 15.9	10.2	543 105.0	32	262 88.1	625 4.1	20 40.3	762 15.9	10.2	543 105.0
33	267 90.5	640 3.5	20 39.6	777 15.7	10.0	558 107.4	33	267 90.5	640 3.5	20 39.6	777 15.7	10.0	558 107.4
34	272 92.9	655 2.9	20 38.9	792 15.5	9.8	573 109.8	34	272 92.9	655 2.9	20 38.9	792 15.5	9.8	573 109.8
35	277 95.3	670 2.3	20 38.2	807 15.3	9.6	588 112.2	35	277 95.3	670 2.3	20 38.2	807 15.3	9.6	588 112.2
36	282 97.7	685 1.7	20 37.5	822 15.1	9.4	603 114.6	36	282 97.7	685 1.7	20 37.5	822 15.1	9.4	603 114.6
37	287 100.1	700 1.1	20 36.8	837 14.9	9.2	618 117.0	37	287 100.1	700 1.1	20 36.8	837 14.9	9.2	618 117.0
38	292 102.5	715 0.5	20 36.1	852 14.7	9.0	633 119.4	38	292 102.5	715 0.5	20 36.1	852 14.7	9.0	633 119.4
39	297 104.9	730 0.0	20 35.4	867 14.5	8.8	648 121.8	39	297 104.9	730 0.0	20 35.4	867 14.5	8.8	648 121.8
40	302 107.3	745 0.4	20 34.7	882 14.3	8.6	663 124.2	40	302 107.3	745 0.4	20 34.7	882 14.3	8.6	663 124.2
41	307 109.7	760 0.8	20 34.0	897 14.1	8.4	678 126.6	41	307 109.7	760 0.8	20 34.0	897 14.1	8.4	678 126.6
42	312 112.1	775 1.2	20 33.3	912 13.9	8.2	693 129.0	42	312 112.1	775 1.2	20 33.3	912 13.9	8.2	693 129.0
43	317 114.5	790 1.6	20 32.6	927 13.7	8.0	708 131.4	43	317 114.5	790 1.6	20 32.6	927 13.7	8.0	708 131.4
44	322 116.9	805 2.0	20 31.9	942 13.5	7.8	723 133.8	44	322 116.9	805 2.0	20 31.9	942 13.5	7.8	723 133.8
45	327 119.3	820 2.4	20 31.2	957 13.3	7.6	738 136.2	45	327 119.3	820 2.4	20 31.2	957 13.3	7.6	738 136.2
46	332 121.7	835 2.8	20 30.5	972 13.1	7.4	753 138.6	46	332 121.7	835 2.8	20 30.5	972 13.1	7.4	753 138.6
47	337 124.1	850 3.2	20 29.8	987 12.9	7.2	768 141.0	47	337 124.1	850 3.2	20 29.8	987 12.9	7.2	768 141.0
48	342 126.5	865 3.6	20 29.1	1002 12.7	7.0	783 143.4	48	342 126.5	865 3.6	20 29.1	1002 12.7	7.0	783 143.4
49	347 128.9	880 4.0	20 28.4	1017 12.5	6.8	798 145.8	49	347 128.9	880 4.0	20 28.4	1017 12.5	6.8	798 145.8
50	352 131.3	895 4.4	20 27.7	1032 12.3	6.6	813 148.2	50	352 131.3	895 4.4	20 27.7	1032 12.3	6.6	813 148.2
51	357 133.7	910 4.8	20 27.0	1047 12.1	6.4	828 150.6	51	357 133.7	910 4.8	20 27.0	1047 12.1	6.4	828 150.6
52	362 136.1	925 5.2	20 26.3	1062 11.9	6.2	843 153.0	52	362 136.1	925 5.2	20 26.3	1062 11.9	6.2	843 153.0
53	367 138.5	940 5.6	20 25.6	1077 11.7	6.0	858 155.4	53	367 138.5	940 5.6	20 25.6	1077 11.7	6.0	858 155.4
54	372 140.9	955 6.0	20 24.9	1092 11.5	5.8	873 157.8	54	372 140.9	955 6.0	20 24.9	1092 11.5	5.8	873 157.8
55	377 143.3	970 6.4	20 24.2	1107 11.3	5.6	888 160.2	55	377 143.3	970 6.4	20 24.2	1107 11.3	5.6	888 160.2
56	382 145.7	985 6.8	20 23.5	1122 11.1	5.4	903 162.6	56	382 145.7	985 6.8	20 23.5	1122 11.1	5.4	903 162.6
57	387 148.1	1000 7.2	20 22.8	1137 10.9	5.2	918 165.0	57	387 148.1	1000 7.2	20 22.8	1137 10.9	5.2	918 165.0
58	392 150.5	1015 7.6	20 22.1	1152 10.7	5.0	933 167.4	58	392 150.5	1015 7.6	20 22.1	1152 10.7	5.0	933 167.4
59	397 152.9	1030 8.0	20 21.4	1167 10.5	4.8	948 169.8	59	397 152.9	1030 8.0	20 21.4	1167 10.5	4.8	948 169.8
60	402 155.3	1045 8.4	20 20.7	1182 10.3	4.6	963 172.2	60	402 155.3	1045 8.4	20 20.7	1182 10.3	4.6	963 172.2
61	407 157.7	1060 8.8	20 20.0	1197 10.1	4.4	978 174.6	61	407 157.7	1060 8.8	20 20.0	1197 10.1	4.4	978 174.6
62	412 160.1	1075 9.2	20 19.3	1212 9.9	4.2	993 177.0	62	412 160.1	1075 9.2	20 19.3	1212 9.9	4.2	993 177.0
63	417 162.5	1090 9.6	20 18.6	1227 9.7	4.0	1008 179.4	63	417 162.5	1090 9.6	20 18.6	1227 9.7	4.0	1008 179.4
64	422 164.9	1105 10.0	20 17.9	1242 9.5	3.8	1023 181.8	64	422 164.9	1105 10.0	20 17.9	1242 9.5	3.8	1023 181.8
65	427 167.3	1120 10.4	20 17.2	1257 9.3	3.6	1038 184.2	65	427 167.3	1120 10.4	20 17.2	1257 9.3	3.6	1038 184.2
66	432 169.7	1135 10.8	20 16.5	1272 9.1	3.4	1053 186.6	66	432 169.7	1135 10.8	20 16.5	1272 9.1	3.4	1053 186.6
67	437 172.1	1150 11.2	20 15.8	1287 8.9	3.2	1068 189.0	67	437 172.1	1150 11.2	20 15.8	1287 8.9	3.2	1068 189.0
68	442 174.5	1165 11.6	20 15.1	1302 8.7	3.0	1083 191.4	68	442 174.5	1165 11.6	20 15.1	1302 8.7	3.0	1083 191.4
69	447 176.9	1180 12.0	20 14.4	1317 8.5	2.8	1098 193.8	69	447 176.9	1180 12.0	20 14.4	1317 8.5	2.8	1098 193.8
70	452 179.3	1195 12.4	20 13.7	1332 8.3	2.6	1113 196.2	70	452 179.3	1195 12.4	20 13.7	1332 8.3	2.6	1113 196.2
71	457 181.7	1210 12.8	20 13.0	1347 8.1	2.4	1128 198.6	71	457 181.7	1210 12.8	20 13.0			

Des logiciels officiels permettent de générer les mêmes informations :

- « NavPac and Compact Data » du HMNAO, publié tous les 5 ans, version 3.1.9 de 2011 à 2015 inclus mise à jour en mars 2013, annonce une précision de 6 " depuis 2004 et une « précision consistante » depuis 2011 [WWW06] ;
- « Multiyear Interactive Computer Almanac » (MICA), publié par le United States Naval Observatory (USNO) dans la version 2.2.2 de janvier 2012 génère les éphémérides de 1800 à 2050 ; il remplace les logiciels « Floppy Almanac » et « Interactive Computer Ephemeris » (ICE) [WWW04] ;
- « Standards Of Fundamental Astronomy » (SOFA) est un logiciel gratuit de l'International Astronomical Union (IAU) ; version 9 de juillet 2012 ; ce programme étant destiné aux astronomes, sa présentation le rend difficilement exploitable en navigation maritime [WWW05].



NavPac and Compact Data - 71 € - 6 "



Multiyear Interactive Computer Almanac - 23 € - 0,01 "



Standards Of Fundamental Astronomy
gratuit - 0,001 "

Aucun logiciel « officiel » n'est distribué en France par l'IMCCE : un projet est en cours mais aucune date de publication n'est connue [PRV02]. L'École Navale développe aussi un calculateur d'éphémérides, qui est destiné à être intégré au logiciel de carte électronique baptisé SENIN (Système d'Exploitation Navale des Informations Nautiques) : équivalent de l'ECDIS (Electronic Chart Display and Information System) destiné à visualiser des couches d'informations opérationnelles, dites AML (Additional Military Layer). Aucune diffusion publique n'est envisagée [PRV01].

Des logiciels privés permettent aussi de générer les mêmes informations :

- le logiciel gratuit de Jacques TIPHINE « Éphémérides nautiques », version 5.00 de février 2010, calcule les informations de 1900 à 2100 avec la même présentation que l'ouvrage officiel de l'IMCCE mais une précision moins satisfaisante : l'auteur signale une erreur courante inférieure à 20 " et un maximum sur la planète Mars en 2100 de 78 " [WWW02] ;
- le logiciel payant « ASTRONAV » de Navsoft calcule les éphémérides de 9999 AVJC à 9999 APJC avec une présentation proche du « Nautical Almanac » et une précision prétendue de 30 " (ce qui est faux, comme nous le verrons plus bas). Une version gratuite, bloquée sur l'année 2001, est proposée à titre de démonstration. Le site internet propose de télécharger les informations de l'année en cours sous forme de document pdf [WWW03].

Des algorithmes de calcul des éphémérides sont intégrés à des logiciels d'aide à la navigation astronomique. L'information est rarement présentée comme dans les ouvrages ou logiciels cités plus haut (en coordonnées horaires ou équatoriales) mais en carte du ciel visible depuis la position du navire (un clic sur un astre permet d'afficher les coordonnées horizontales) :

La marine de guerre et les garde-côtes américains utilisent le logiciel STELLA de l'USNO (United States Naval Observatory). Le nom est l'acronyme de System To Estimate Latitude and Longitude Astronomically. STELLA est distribué gratuitement mais réservé aux personnes habilitées. Le logiciel peut :

- calculer des éphémérides à la position et à l'heure de l'observation ;
- effectuer les corrections de hauteur ;
- calculer et tracer les droites de hauteur ;
- déterminer la position du navire avec une précision de 1 " ;
- entretenir l'estime ;
- déterminer les heures de lever, coucher, passage au méridien pour tous les astres ;
- mesurer la variation du compas [WWW43].

A titre d'exemple pour la plaisance :

- le logiciel gratuit de Pierre Louis DESCHAMPS « ALMICANTARAT » version 4.0.2 de mai 2008 en français ou anglais, avec un affichage précis à 0,06 " [WWW07] ;
- le logiciel gratuit de Andrés RUIZ « Navigational Algorithms » mis à jour en janvier 2013 en anglais, précis à 0,4 " [WWW09] ;
- le logiciel payant (23 €) « NAVIGATOR » version 5.5 de 2012 en français, anglais, espagnol ou portugais avec un affichage à 6 " près mais pas d'information sur la précision des calculs [WWW08] ;
- le logiciel payant (110 €) « STARPILOT » de 2006 en anglais ou français, précis à 10 " pour la lune et les planètes et 2 " pour le soleil et les étoiles [WWW18].

Les coordonnées calculées dans les éphémérides nautiques, quel que soit le support, papier, logiciel ou site internet, sont issues de modèles décrivant les orbites planétaires dans un système de coordonnées écliptiques (centrées sur le Soleil avec l'écliptique pour plan de base), puis converties en coordonnées horaires ou équatoriales (centrées sur la Terre avec l'équateur pour plan de base). Ces modèles permettent aujourd'hui d'atteindre une précision inférieure à 1 " d'angle mais les documents destinés à la navigation maritime astronomique sont ajustés à une utilisation de secours en cas de panne du GPS.

L'heure utilisée dans les éphémérides est le temps universel. Il est donné à 1 s près (tables d'interpolation générales, table de l'équation du temps) et parfois arrondi à 1 min près (heures de lever et coucher du Soleil et de la Lune).

Les instruments de mesure équipant actuellement les passerelles de navires marchands sont construits pour atteindre une précision de mesure du même ordre de grandeur : 6 " d'angle et 1 s de temps.

JEUDI, 26 DÉCEMBRE 2013

Heure	SCAEL		LUNE		Levier du Soleil		Coucher du Soleil		LATH	Levier et coucher de Lune						
U.T.	A ^h vo	D	A ^h uo	V	D	d	π	Levier	Z	Coucher	Fin de comp	Levier	p	Coucher	p	10 ⁻²
^h	^m	^s	^m	^s	^m	^s	^m	^h	^m	^s	^h	^m	^s	^h	^m	^s
00	179	54.1	523	21.8	266	59.9	130	5	47.3	102	56.4	9	55	SSH	14	07
01	209	53.5	23	21.3	58	57.7	129	5	47.8	102	56.4	9	55	SSH	14	07
02	239	52.9	23	21.5	101	57.1	129	5	48.3	102	56.4	9	55	SSH	14	07
03	269	52.3	23	21.5	130	56.6	128	5	48.8	102	56.4	9	55	SSH	14	07
04	299	51.7	23	21.5	159	56.0	127	5	49.3	102	56.4	9	55	SSH	14	07
05	329	51.1	23	21.4	188	55.4	126	5	49.8	102	56.4	9	55	SSH	14	07
06	359	50.4	23	21.3	217	54.8	125	5	50.3	102	56.4	9	55	SSH	14	07
07	389	50.4	23	21.3	246	54.2	124	5	50.8	102	56.4	9	55	SSH	14	07
08	419	49.7	23	21.2	275	53.6	123	5	51.3	102	56.4	9	55	SSH	14	07
09	449	49.0	23	21.1	304	53.0	122	5	51.8	102	56.4	9	55	SSH	14	07
10	479	48.3	23	21.0	333	52.4	121	5	52.3	102	56.4	9	55	SSH	14	07
11	509	47.6	23	20.9	362	51.8	120	5	52.8	102	56.4	9	55	SSH	14	07
12	539	46.9	23	20.8	391	51.2	119	5	53.3	102	56.4	9	55	SSH	14	07
13	569	46.2	23	20.7	420	50.6	118	5	53.8	102	56.4	9	55	SSH	14	07
14	599	45.5	23	20.6	449	50.0	117	5	54.3	102	56.4	9	55	SSH	14	07
15	629	44.8	23	20.5	478	49.4	116	5	54.8	102	56.4	9	55	SSH	14	07
16	659	44.1	23	20.4	507	48.8	115	5	55.3	102	56.4	9	55	SSH	14	07
17	689	43.4	23	20.3	536	48.2	114	5	55.8	102	56.4	9	55	SSH	14	07
18	719	42.7	23	20.2	565	47.6	113	5	56.3	102	56.4	9	55	SSH	14	07
19	749	42.0	23	20.1	594	47.0	112	5	56.8	102	56.4	9	55	SSH	14	07
20	779	41.3	23	20.0	623	46.4	111	5	57.3	102	56.4	9	55	SSH	14	07
21	809	40.6	23	19.9	652	45.8	110	5	57.8	102	56.4	9	55	SSH	14	07
22	839	39.9	23	19.8	681	45.2	109	5	58.3	102	56.4	9	55	SSH	14	07
23	869	39.2	23	19.7	710	44.6	108	5	58.8	102	56.4	9	55	SSH	14	07
24	899	38.5	23	19.6	739	44.0	107	5	59.3	102	56.4	9	55	SSH	14	07
25	929	37.8	23	19.5	768	43.4	106	5	59.8	102	56.4	9	55	SSH	14	07
26	959	37.1	23	19.4	797	42.8	105	5	60.3	102	56.4	9	55	SSH	14	07
27	989	36.4	23	19.3	826	42.2	104	5	60.8	102	56.4	9	55	SSH	14	07
28	1019	35.7	23	19.2	855	41.6	103	5	61.3	102	56.4	9	55	SSH	14	07
29	1049	35.0	23	19.1	884	41.0	102	5	61.8	102	56.4	9	55	SSH	14	07
30	1079	34.3	23	19.0	913	40.4	101	5	62.3	102	56.4	9	55	SSH	14	07
31	1109	33.6	23	18.9	942	39.8	100	5	62.8	102	56.4	9	55	SSH	14	07
32	1139	32.9	23	18.8	971	39.2	99	5	63.3	102	56.4	9	55	SSH	14	07
33	1169	32.2	23	18.7	1000	38.6	98	5	63.8	102	56.4	9	55	SSH	14	07
34	1199	31.5	23	18.6	1029	38.0	97	5	64.3	102	56.4	9	55	SSH	14	07
35	1229	30.8	23	18.5	1058	37.4	96	5	64.8	102	56.4	9	55	SSH	14	07
36	1259	30.1	23	18.4	1087	36.8	95	5	65.3	102	56.4	9	55	SSH	14	07
37	1289	29.4	23	18.3	1116	36.2	94	5	65.8	102	56.4	9	55	SSH	14	07
38	1319	28.7	23	18.2	1145	35.6	93	5	66.3	102	56.4	9	55	SSH	14	07
39	1349	28.0	23	18.1	1174	35.0	92	5	66.8	102	56.4	9	55	SSH	14	07
40	1379	27.3	23	18.0	1203	34.4	91	5	67.3	102	56.4	9	55	SSH	14	07
41	1409	26.6	23	17.9	1232	33.8	90	5	67.8	102	56.4	9	55	SSH	14	07
42	1439	25.9	23	17.8	1261	33.2	89	5	68.3	102	56.4	9	55	SSH	14	07
43	1469	25.2	23	17.7	1290	32.6	88	5	68.8	102	56.4	9	55	SSH	14	07
44	1499	24.5	23	17.6	1319	32.0	87	5	69.3	102	56.4	9	55	SSH	14	07
45	1529	23.8	23	17.5	1348	31.4	86	5	69.8	102	56.4	9	55	SSH	14	07
46	1559	23.1	23	17.4	1377	30.8	85	5	70.3	102	56.4	9	55	SSH	14	07
47	1589	22.4	23	17.3	1406	30.2	84	5	70.8	102	56.4	9	55	SSH	14	07
48	1619	21.7	23	17.2	1435	29.6	83	5	71.3	102	56.4	9	55	SSH	14	07
49	1649	21.0	23	17.1	1464	29.0	82	5	71.8	102	56.4	9	55	SSH	14	07
50	1679	20.3	23	17.0	1493	28.4	81	5	72.3	102	56.4	9	55	SSH	14	07
51	1709	19.6	23	16.9	1522	27.8	80	5	72.8	102	56.4	9	55	SSH	14	07
52	1739	18.9	23	16.8	1551	27.2	79	5	73.3	102	56.4	9	55	SSH	14	07
53	1769	18.2	23	16.7	1580	26.6	78	5	73.8	102	56.4	9	55	SSH	14	07
54	1799	17.5	23	16.6	1609	26.0	77	5	74.3	102	56.4	9	55	SSH	14	07
55	1829	16.8	23	16.5	1638	25.4	76	5	74.8	102	56.4	9	55	SSH	14	07
56	1859	16.1	23	16.4	1667	24.8	75	5	75.3	102	56.4	9	55	SSH	14	07
57	1889	15.4	23	16.3	1696	24.2	74	5	75.8	102	56.4	9	55	SSH	14	07
58	1919	14.7	23	16.2	1725	23.6	73	5	76.3	102	56.4	9	55	SSH	14	07
59	1949	14.0	23	16.1	1754	23.0	72	5	76.8	102	56.4	9	55	SSH	14	07
60	1979	13.3	23	16.0	1783	22.4	71	5	77.3	102	56.4	9	55	SSH	14	07
61	2009	12.6	23	15.9	1812	21.8	70	5	77.8	102	56.4	9	55	SSH	14	07
62	2039	11.9	23	15.8	1841	21.2	69	5	78.3	102	56.4	9	55	SSH	14	07
63	2069	11.2	23	15.7	1870	20.6	68	5	78.8	102	56.4	9	55	SSH	14	07
64	2099	10.5	23	15.6	1899	20.0	67	5	79.3	102	56.4	9	55	SSH	14	07
65	2129	9.8	23	15.5	1928	19.4	66	5	79.8	102	56.4	9	55	SSH	14	07
66	2159	9.1	23	15.4	1957	18.8	65	5	80.3	102	56.4	9	55	SSH	14	07
67	2189	8.4	23	15.3	1986	18.2	64	5	80.8	102	56.4	9	55	SSH	14	07
68	2219	7.7	23	15.2	2015	17.6	63	5	81.3	102	56.4	9	55	SSH	14	07
69	2249	7.0	23	15.1	2044	17.0	62	5	81.8	102	56.4	9	55	SSH	14	07
70	2279	6.3	23	15.0	2073	16.4	61	5	82.3	102	56.4	9	55	SSH	14	07
71	2309	5.6	23	14.9	2102	15.8	60	5	82.8	102	56.4	9	55	SSH	14	07
72	2339	4.9	23	14.8	2131	15.2	59	5	83.3	102	56.4	9	55	SSH	14	07
73	2369	4.2	23	14.7	2160	14.6	58	5	83.8	102	56.4	9	55	SSH	14	07
74	2399	3.5	23	14.6	2189	14.0	57	5	84.3	102	56.4	9	55	SSH	14	07
75	2429	2.8	23	14.5	2218	13.4	56	5	84.8	102	56.4	9	55	SSH	14	07
76	2459	2.1	23	14.4	2247	12.8	55	5	85.3	102	56.4	9	55	SSH	14	07
77	2489	1.4	23	14.3	2276	12.2	54	5	85.8	102	56.4	9	55	SSH	14	07
78	2519	0.7	23	14.2	2305	11.6	53	5	86.3	102	56.4	9	55	SSH	14	07
79	2549	0.0	23	14.1	2334	11.0	52	5	86.8	102	56.4	9	55	SSH	14	07
80	2579	-0.7	23	14.0	2363	10.4	51	5	87.3	102	56.4	9	55	SSH	14	07
81	2609	-1.4	23	13.9	2392	9.8	50	5	87.8	102	56.4	9	55	SSH	14	07
82	2639	-2.1	23	13.8	2421	9.2	49	5	88.3	102	56.4	9	55	SSH	14	07
83	2669	-2.8	23	13.7	2450	8.6	48	5	88.8	102	56.4	9	55	SSH	14	07
84	2699	-3.5	23	13.6	2479	8.0	47	5	89.3	102	56.4	9	55	SSH	14	07
85	2729	-4.2	23	13.5	2508	7.4	46	5	89.8	102	56.4	9	55	SSH	14	07
86	2759	-4.9	23	13.4	2537	6.8	45	5	90.3	102	56.4	9	55	SSH	14	07
87	2789	-5.6	23	13.3	2566	6.2	44	5	90.8	102	56.4	9	55	SSH	14	07
88	2819	-6.3	23	13.2	2595	5.6	43	5	91.3	102	56.4	9	55	SSH	14	07
89	2849	-7.0	23	13.1	2624	5.0	42									

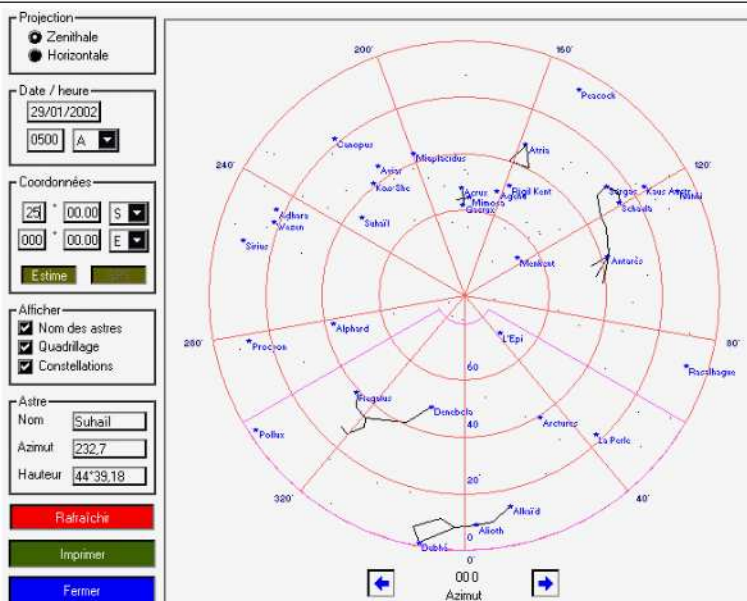
[illegible]

logiciel "Éphémérides nautiques" - gratuit - précision courante meilleure que 20 " avec un maximum de 78 "

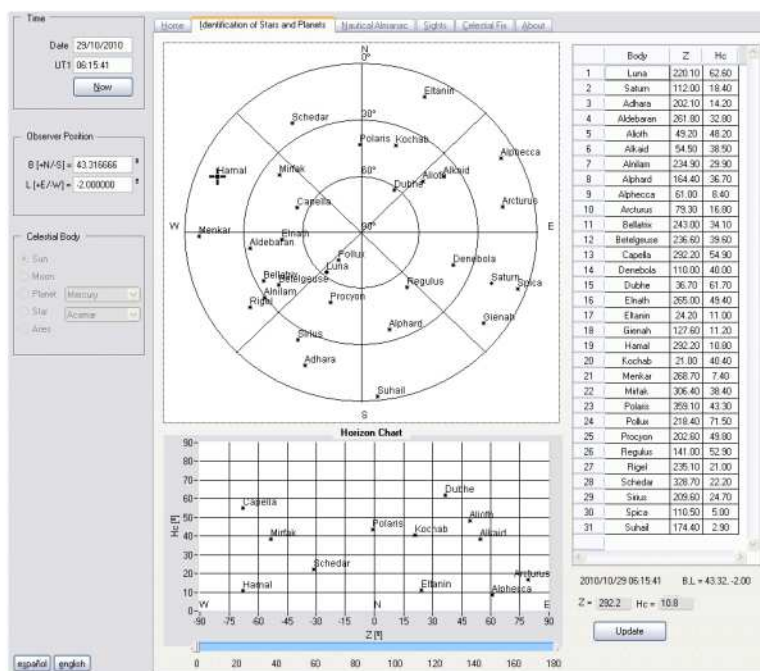
2013 December 24, 25, 26 (Tue, Wed, Thur)

GMT	ARIES		VENUS		MARS		JUPITER		SATURN		+0.6		STARS		SUN		MOON		Twilight		Sunrise		Moonrise		26
	GHA	Dec	GHA	Dec	GHA	Dec	GHA	Dec	GHA	Dec	Name	SHA	Dec	GHA	Dec	HP	Lat	Long	Civil	Nautical	Sunset	24	25		
23	00	00	151°47.6	19°46.7 S	344°32.2	1°19.5 S	204°55.8	15°34.5 S	224°55.8	15°34.5 S	Acamar	171°17.8	40°12.5 N	180°06.9	23°14.5 S	55.0	N 72°	105.7	105.7	-	-	23.49	01.33		
24	01	00	151°47.6	19°46.7 S	344°32.2	1°19.5 S	204°55.8	15°34.5 S	224°55.8	15°34.5 S	Acamar	171°17.8	40°12.5 N	180°06.9	23°14.5 S	55.0	N 70°	105.7	105.7	-	-	23.47	01.34		
02	00	01	151°47.6	19°46.7 S	344°32.2	1°19.5 S	204°55.8	15°34.5 S	224°55.8	15°34.5 S	Acamar	171°17.8	40°12.5 N	180°06.9	23°14.5 S	55.0	N 68°	105.7	105.7	-	-	23.45	01.35		
03	00	02	151°47.6	19°46.7 S	344°32.2	1°19.5 S	204°55.8	15°34.5 S	224°55.8	15°34.5 S	Acamar	171°17.8	40°12.5 N	180°06.9	23°14.5 S	55.0	N 66°	105.7	105.7	-	-	23.43	01.36		
04	00	03	151°47.6	19°46.7 S	344°32.2	1°19.5 S	204°55.8	15°34.5 S	224°55.8	15°34.5 S	Acamar	171°17.8	40°12.5 N	180°06.9	23°14.5 S	55.0	N 64°	105.7	105.7	-	-	23.41	01.37		
05	00	04	151°47.6	19°46.7 S	344°32.2	1°19.5 S	204°55.8	15°34.5 S	224°55.8	15°34.5 S	Acamar	171°17.8	40°12.5 N	180°06.9	23°14.5 S	55.0	N 62°	105.7	105.7	-	-	23.39	01.38		
06	00	05	151°47.6	19°46.7 S	344°32.2	1°19.5 S	204°55.8	15°34.5 S	224°55.8	15°34.5 S	Acamar	171°17.8	40°12.5 N	180°06.9	23°14.5 S	55.0	N 60°	105.7	105.7	-	-	23.37	01.39		
07	00	06	151°47.6	19°46.7 S	344°32.2	1°19.5 S	204°55.8	15°34.5 S	224°55.8	15°34.5 S	Acamar	171°17.8	40°12.5 N	180°06.9	23°14.5 S	55.0	N 58°	105.7	105.7	-	-	23.35	01.40		
08	00	07	151°47.6	19°46.7 S	344°32.2	1°19.5 S	204°55.8	15°34.5 S	224°55.8	15°34.5 S	Acamar	171°17.8	40°12.5 N	180°06.9	23°14.5 S	55.0	N 56°	105.7	105.7	-	-	23.33	01.41		
09	00	08	151°47.6	19°46.7 S	344°32.2	1°19.5 S	204°55.8	15°34.5 S	224°55.8	15°34.5 S	Acamar	171°17.8	40°12.5 N	180°06.9	23°14.5 S	55.0	N 54°	105.7	105.7	-	-	23.31	01.42		
10	00	09	151°47.6	19°46.7 S	344°32.2	1°19.5 S	204°55.8	15°34.5 S	224°55.8	15°34.5 S	Acamar	171°17.8	40°12.5 N	180°06.9	23°14.5 S	55.0	N 52°	105.7	105.7	-	-	23.29	01.43		
11	00	10	151°47.6	19°46.7 S	344°32.2	1°19.5 S	204°55.8	15°34.5 S	224°55.8	15°34.5 S	Acamar	171°17.8	40°12.5 N	180°06.9	23°14.5 S	55.0	N 50°	105.7	105.7	-	-	23.27	01.44		
12	00	11	151°47.6	19°46.7 S	344°32.2	1°19.5 S	204°55.8	15°34.5 S	224°55.8	15°34.5 S	Acamar	171°17.8	40°12.5 N	180°06.9	23°14.5 S	55.0	N 48°	105.7	105.7	-	-	23.25	01.45		
13	00	12	151°47.6	19°46.7 S	344°32.2	1°19.5 S	204°55.8	15°34.5 S	224°55.8	15°34.5 S	Acamar	171°17.8	40°12.5 N	180°06.9	23°14.5 S	55.0	N 46°	105.7	105.7	-	-	23.23	01.46		
14	00	13	151°47.6	19°46.7 S	344°32.2	1°19.5 S	204°55.8	15°34.5 S	224°55.8	15°34.5 S	Acamar	171°17.8	40°12.5 N	180°06.9	23°14.5 S	55.0	N 44°	105.7	105.7	-	-	23.21	01.47		
15	00	14	151°47.6	19°46.7 S	344°32.2	1°19.5 S	204°55.8	15°34.5 S	224°55.8	15°34.5 S	Acamar	171°17.8	40°12.5 N	180°06.9	23°14.5 S	55.0	N 42°	105.7	105.7	-	-	23.19	01.48		
16	00	15	151°47.6	19°46.7 S	344°32.2	1°19.5 S	204°55.8	15°34.5 S	224°55.8	15°34.5 S	Acamar	171°17.8	40°12.5 N	180°06.9	23°14.5 S	55.0	N 40°	105.7	105.7	-	-	23.17	01.49		
17	00	16	151°47.6	19°46.7 S	344°32.2	1°19.5 S	204°55.8	15°34.5 S	224°55.8	15°34.5 S	Acamar	171°17.8	40°12.5 N	180°06.9	23°14.5 S	55.0	N 38°	105.7	105.7	-	-	23.15	01.50		
18	00	17	151°47.6	19°46.7 S	344°32.2	1°19.5 S	204°55.8	15°34.5 S	224°55.8	15°34.5 S	Acamar	171°17.8	40°12.5 N	180°06.9	23°14.5 S	55.0	N 36°	105.7	105.7	-	-	23.13	01.51		
19	00	18	151°47.6	19°46.7 S	344°32.2	1°19.5 S	204°55.8	15°34.5 S	224°55.8	15°34.5 S	Acamar	171°17.8	40°12.5 N	180°06.9	23°14.5 S	55.0	N 34°	105.7	105.7	-	-	23.11	01.52		
20	00	19	151°47.6	19°46.7 S	344°32.2	1°19.5 S	204°55.8	15°34.5 S	224°55.8	15°34.5 S	Acamar	171°17.8	40°12.5 N	180°06.9	23°14.5 S	55.0	N 32°	105.7	105.7	-	-	23.09	01.53		
21	00	20	151°47.6	19°46.7 S	344°32.2	1°19.5 S	204°55.8	15°34.5 S	224°55.8	15°34.5 S	Acamar	171°17.8	40°12.5 N	180°06.9	23°14.5 S	55.0	N 30°	105.7	105.7	-	-	23.07	01.54		
22	00	21	151°47.6	19°46.7 S	344°32.2	1°19.5 S	204°55.8	15°34.5 S	224°55.8	15°34.5 S	Acamar	171°17.8	40°12.5 N	180°06.9	23°14.5 S	55.0	N 28°	105.7	105.7	-	-	23.05	01.55		
23	00	22	151°47.6	19°46.7 S	344°32.2	1°19.5 S	204°55.8	15°34.5 S	224°55.8	15°34.5 S	Acamar	171°17.8	40°12.5 N	180°06.9	23°14.5 S	55.0	N 26°	105.7	105.7	-	-	23.03	01.56		
24	00	23	151°47.6	19°46.7 S	344°32.2	1°19.5 S	204°55.8	15°34.5 S	224°55.8	15°34.5 S	Acamar	171°17.8	40°12.5 N	180°06.9	23°14.5 S	55.0	N 24°	105.7	105.7	-	-	23.01	01.57		
25	00	24	151°47.6	19°46.7 S	344°32.2	1°19.5 S	204°55.8	15°34.5 S	224°55.8	15°34.5 S	Acamar	171°17.8	40°12.5 N	180°06.9	23°14.5 S	55.0	N 22°	105.7	105.7	-	-	22.99	01.58		
26	00	25	151°47.6	19°46.7 S	344°32.2	1°19.5 S	204°55.8	15°34.5 S	224°55.8	15°34.5 S	Acamar	171°17.8	40°12.5 N	180°06.9	23°14.5 S	55.0	N 20°	105.7	105.7	-	-	22.97	01.59		
01	00	00	151°47.6	19°46.7 S	344°32.2	1°19.5 S	204°55.8	15°34.5 S	224°55.8	15°34.5 S	Acamar	171°17.8	40°12.5 N	180°06.9	23°14.5 S	55.0	N 18°	105.7	105.7	-	-	22.95	01.60		
02	00	01	151°47.6	19°46.7 S	344°32.2	1°19.5 S	204°55.8	15°34.5 S	224°55.8	15°34.5 S	Acamar	171°17.8	40°12.5 N	180°06.9	23°14.5 S	55.0	N 16°	105.7	105.7	-	-	22.93	01.61		
03	00	02	151°47.6	19°46.7 S	344°32.2	1°19.5 S	204°55.8	15°34.5 S	224°55.8	15°34.5 S	Acamar	171°17.8	40°12.5 N	180°06.9	23°14.5 S	55.0	N 14°	105.7	105.7	-	-	22.91	01.62		
04	00	03	151°47.6	19°46.7 S	344°32.2	1°19.5 S	204°55.8	15°34.5 S	224°55.8	15°34.5 S	Acamar	171°17.8	40°12.5 N	180°06.9	23°14.5 S	55.0	N 12°	105.7	105.7	-	-	22.89	01.63		
05	00	04	151°47.6	19°46.7 S	344°32.2	1°19.5 S	204°55.8	15°34.5 S	224°55.8	15°34.5 S	Acamar	171°17.8	40°12.5 N	180°06.9	23°14.5 S	55.0	N 10°	105.7	105.7	-	-	22.87	01.64		
06	00	05	151°47.6	19°46.7 S	344°32.2	1°19.5 S	204°55.8	15°34.5 S	224°55.8	15°34.5 S	Acamar	171°17.8	40°12.5 N	180°06.9	23°14.5 S	55.0	N 8°	105.7	105.7	-	-	22.85	01.65		
07	00	06	151°47.6	19°46.7 S	344°32.2	1°19.5 S	204°55.8	15°34.5 S	224°55.8	15°34.5 S	Acamar	171°17.8	40°12.5 N	180°06.9	23°14.5 S	55.0	N 6°	105.7	105.7	-	-	22.83	01.66		
08	00	07	151°47.6	19°46.7 S	344°32.2	1°19.5 S	204°55.8	15°34.5 S	224°55.8	15°34.5 S	Acamar	171°17.8	40°12.5 N	180°06.9	23°14.5 S	55.0	N 4°	105.7	105.7	-	-	22.81	01.67		
09	00	08	151°47.6	19°46.7 S	344°32.2	1°19.5 S	204°55.8	15°34.5 S	224°55.8	15°34.5 S	Acamar	171°17.8	40°12.5 N	180°06.9	23°14.5 S	55.0	N 2°	105.7	105.7	-	-	22.79	01.68		
10	00	09	151°47.6	19°46.7 S	344°32.2	1°19.5 S	204°55.8	15°34.5 S	224°55.8	15°34.5 S	Acamar	171°17.8	40°12.5 N	180°06.9	23°14.5 S	55.0	N 0°	105.7	105.7	-	-	22.77	01.69		
11	00	10	151°47.6	19°46.7 S	344°32.2	1°19.5 S	204°55.8	15°34.5 S	224°55.8	15°34.5 S	Acamar	171°17.8	40°12.5 N	180°06.9	23°14.5 S	55.0	N 350°	105.7	105.7	-	-	22.75	01.70		
12	00	11	151°47.6	19°46.7 S	344°32.2	1°19.5 S	204°55.8	15°34.5 S	224°55.8	15°34.5 S	Acamar	171°17.8	40°12.5 N	180°06.9	23°14.5 S	55.0	N 348°	105.7	105.7	-	-	22.73	01.71		
13	00	12	151°47.6	19°46.7 S	344°32.2	1°19.5 S	204°55.8	15°34.5 S	224°55.8	15°34.5 S	Acamar	171°17.8	40°12.5 N	180°06.9	23°14.5 S	55.0	N 346°	105.7	105.7	-	-	22.71	01.72		
14	00	13	151°47.6	19°46.7 S	344°32.2	1°19.5 S	204°55.8	15°34.5 S	224°55.8	15°34.5 S	Acamar	171°17.8	40°12.5 N	180°06.9	23°14.5 S	55.0	N 344°	105.7	105.7	-	-	22.69	01.73		
15	00	14	151°47.6	19°46.7 S	344°32.2	1°19.5 S	204°55.8	15°34.5 S	224°55.8	15°34.5 S	Acamar	171°17.8	40°12.5 N	180°06.9	23°14.5 S	55.0	N 342°	105.7	105.7	-	-	22.67	01.74		
16	00	15	151°47.6	19°46.7 S	344°32.2	1°19.5 S	204°55.8	15°34.5 S	224°55.8	15°34.5 S	Acamar	171°17.8	40°12.5 N	180°06.9	23°14.5 S	55.0	N 340°	105.7	105.7	-	-	22.65	01.75		
17	00	16	151°47.6	19°46.7 S	344°32.2	1°19.5 S	204°55.8	15°34.5 S	224°55.8	15°34.5 S	Acamar	171°17.8	40°12.5 N	180°06.9	23°14.5 S	55.0	N 338°	105.7	105.7	-	-	22.63	01.76		
18	00	17	151°47.6	19°46.7 S	344°32.2	1°19.5 S	204°55.8	15°34.5 S	224°55.8	15°34.5 S	Acamar	171°17.8	40°12.5 N	180°06.9	23°14.5 S	55.0	N 336°	105.7	105.7	-	-	22.61	01.77		
19	00	18	151°47.6	19°46.7 S	344°32.2	1°19.5 S	204°55.8	15°34.5 S	224°55.8	15°34.5 S	Acamar	171°17.8	40°12.5 N	180°06.9	23°14.5 S	55.0	N 334°	105.7	105.7	-	-	22.59	01.78		
20	00	19	151°47.6	19°46.7 S	344°32.2	1°19.5 S	204°55.8	15°34.5 S	224°55.8	15°34.5 S	Acamar	171°17.8	40°12.5 N	180°06.9	23°14.5 S	55.0	N 332°	105.7	105.7	-	-	22.57	01.79		
21	00	20	151°47.6	19°46.7 S	344°32.2	1°19.5 S	204°55.8	15°34.5 S	2																

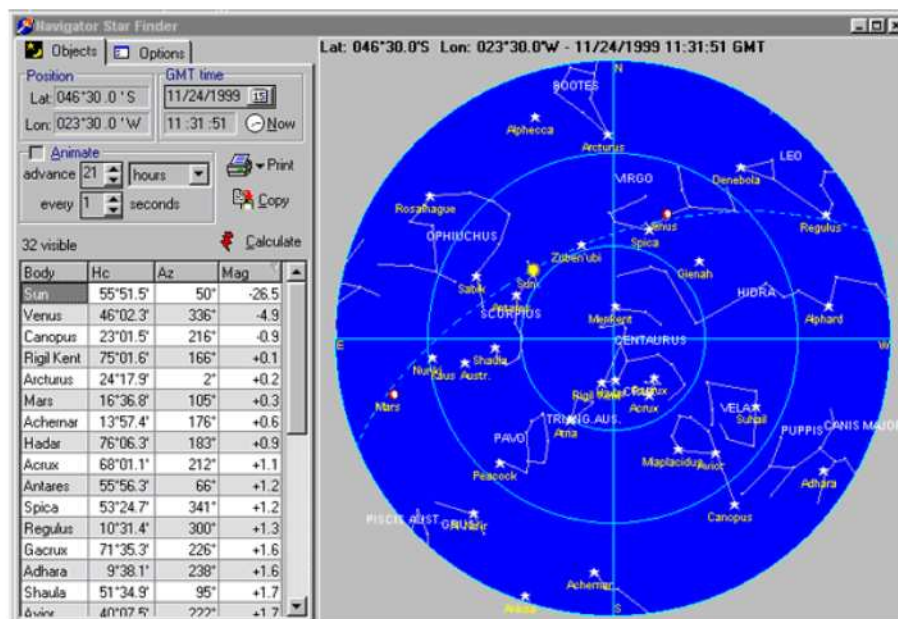
logiciel « Astronav » - 22 € - précision courante de 6 " avec un maximum de 30 "(irréaliste)



logiciel ALMICANTARAT - gratuit - précis à 0,06 "



logiciel Navigational Algorithms - gratuit - précis à 0,4 "



logiciel NAVIGATOR - 23 € - précis à 6 "

• les instruments de la navigation astronomique

Le sextant qui équipe actuellement les passerelles des navires de commerce permet de mesurer la hauteur d'un astre au-dessus de l'horizon avec une hauteur de 10 ". Les lentilles utilisées étant de faible dimension, elles rendent invisible les astres faiblement perceptibles à l'œil nu : astre de forte magnitude, ciel peu contrasté en raison de la pollution lumineuse par la lumière artificielle (feu de pont) ou naturelle (Soleil proche sous l'horizon).



sextant ASTRA IIIB 340 Professional
795 € - précis à 15 " près



sextant CASSEN & PLATH CPsailing
750 € - précis à 10 " près



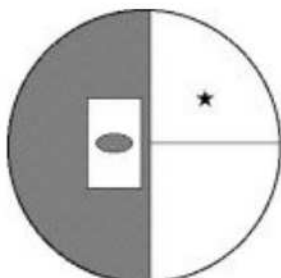
sextant TAMAYA Jupiter - 1150 €
précis à 10 " près

L'horizon visuel est parfois invisible : masqué par la brume ou un nuage, absence de lumière solaire sous l'horizon ou lunaire dans le ciel. Il est alors possible d'utiliser un horizon artificiel (il faut alors considérer que l'œil de l'observateur est à 0 m au-dessus de l'eau pour le calcul de la dépression de l'horizon) :

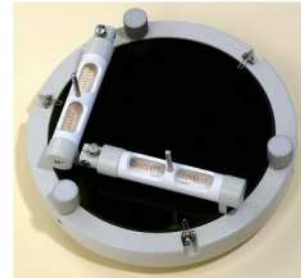
- avec niveau à bulle ; en raison de sa précision médiocre, cet outil a été utilisé dans l'aviation jusqu'au années 1980 ; la marine militaire allemande l'exploite encore [WW13] ;
- avec un miroir horizontal : on mesure l'angle entre l'astre et son image réfléchie, l'angle ainsi trouvé correspond au double de sa hauteur. Ces outils (surface d'un liquide au repos, miroir réglé avec des niveaux à bulle) sont inexploitable en mer en raison des mouvements du navire (roulis et tangage).



horizon artificiel PLATH par niveau à bulle
750 € - précis à 120 " près



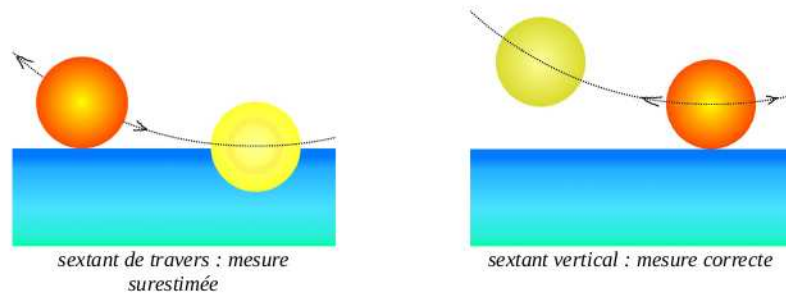
horizon artificiel DAVIS par surface
liquide - 30 € - précision inchangée



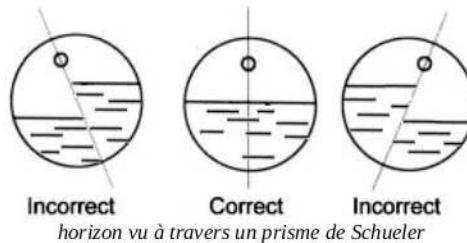
horizon artificiel FREIBERGER par
miroir - 495 € - précision inchangée

Pour une mesure précise de la hauteur de l'astre, le sextant doit être parfaitement perpendiculaire à l'horizon :

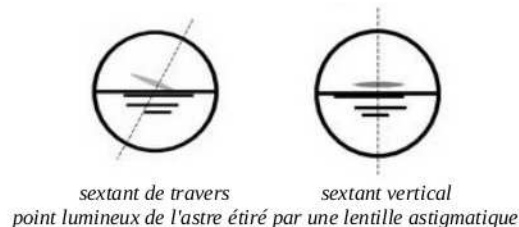
- la méthode empirique pour s'en assurer est de balancer le sextant autour de son axe œil-horizon en vérifiant que l'image de l'astre décrit un arc de cercle qui est bien tangent à l'horizon ;



- on peut aussi ajouter sur l'optique du sextant un prisme de Schueller qui divise l'horizon en deux lignes : le sextant est vertical lorsque les deux horizons sont confondus ;



- une lentille astigmatique peut être ajoutée pour étirer horizontalement le point lumineux de l'astre (difficile à utiliser avec la lune ou le soleil) : le sextant est bien vertical lorsque le trait lumineux de l'astre est parallèle avec l'horizon.



Le chronomètre (ou horloge, garde-temps) utilisé pour les observations astronomiques doit être régulièrement surveillé par comparaison avec un autre moyen de mesurer le temps : la « marche » (décalage éventuel) est notée sur un « cahier de surveillance des chronomètres » et prise en compte pour corriger l'heure d'observation d'un astre au sextant. La précision recherchée est de l'ordre de la seconde car la comparaison est effectuée à l'œil en corrélant l'affichage de l'horloge et celle de l'appareil servant « d'étalon ». Ces références de mesure du temps ont une précision souvent bien meilleure.

A l'heure actuelle, les horloges de marine, fonctionnent à quartz pour une dérive de l'ordre de 10 secondes par an (au lieu de 30 secondes par an avec les horloges mécaniques). Pour conserver ces performances, le quartz est à haute fréquence (4,19 MHz au lieu de 32,768 KHz pour les montres de poignet) et stabilisé en température. La batterie tient environ un an et pendant son remplacement, une batterie de secours permet de fonctionner quelques heures. L'aiguille des secondes avance par pas de 1 s ou 0,5 s.



chronomètre SEIKO QM11 – 1 650 €
dérive < 8 s / an à 20 °C



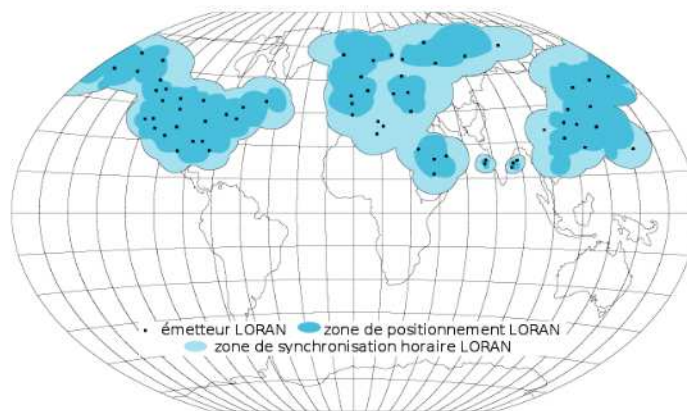
chronomètre CASSEN & PLATH – 2 000 €
dérive < 3,65 s / an à 20 °C



chronomètre MUHLE - 2 000 €
dérive < 3,65 s / an à 22 °C

Le temps de référence pour la navigation astronomique est le temps universel (TU) utilisé dans les éphémérides nautiques. Cette information est reçue à bord par plusieurs moyens :

- heure du lever ou du coucher du soleil ou de la lune calculé dans les éphémérides par une interpolation sur la latitude et un décalage selon la longitude du navire. L'heure est arrondie à la minute la plus proche pour un observateur au ras de l'eau mais aucune correction n'est donnée pour un observateur à une altitude différente : en pratique cette précision est de l'ordre de la minute ;
- synchronisation avec un serveur de temps par internet avec le réseau NTP (Net Time Protocol) diffusant UTC (Temps Universel Coordonné : $-0,9 \text{ s} < \text{UT} - \text{UTC} < +0,9 \text{ s}$) à 0,01 s près ;
- tops horaires radio émis par des stations terrestres (France-Inter sur 162 Khz à Allouis, DCF77 sur 77,5 Khz à Francfort, etc) et exploités par un récepteur dédié. La portée des grandes ondes est d'environ 2000 Km et la précision de 0,001 s. Une horloge atomique sert à diffuser le temps UTC. Des émetteurs comparables existent dans de nombreux pays mais ne couvrent pas totalement les océans ;
- le National Institute of Standards and Technology (NIST) des États Unis émet sur 468 MHz à partir des satellites environnementaux à orbite géosynchrone, dont trois couvrent l'hémisphère occidental. La synchronisation sur UTC avec une précision de 0,001 s nécessite un récepteur dédié coûtant 4 600 € et, sauf besoin particulier, aucun navire de commerce n'est équipé ;
- les émetteurs LORAN C sont destinés au positionnement des navires mais leur signal permet aussi une synchronisation avec le temps UTC. La précision se dégrade lorsque l'on s'éloigne de l'émetteur : de 10^{-7} s à 100 Km jusqu'à 10^{-5} s à 2 000 Km [WWW14]. Les émetteurs LORAN coûtant très cher, leur avenir n'est pas garanti. La portée moyenne du LORAN (environ 1 000 M) ne permet pas de couvrir totalement les océans ;



couverture des émetteurs LORAN C

- le récepteur GPS est synchronisé sur l'heure UTC (après recalage de l'heure de la constellation GPS par une correction UTC diffusée par chaque satellite) avec une précision de 10^{-9} s et une couverture mondiale. Entre chaque synchronisation, le récepteur GPS utilise une horloge à quartz pour mesurer le temps.

OBSERVATOIRE DE PARIS LABORATOIRE NATIONAL DE METROLOGIE LNE-SYRTE			Bulletin H 546
TABLEAU 1 - MESURES DE TEMPS RAPPORTEES A UTC(OP) MESURES DE PHASE DU LORAN-C			
Date	Date	UTC(OP) - SIGNAL à 9h30 UTC	MESURES DU TEMPS GPS à 14h UTC UTC(OP)-GPS
2013	MJD	LESSAY 6731	-16 s +
juin		ns	ns
1	56444	170	-9
2	56445	140	-6
3	56446	122	-8
4	56447	129	-11
5	56448	128	-8
L'incertitude sur les mesures UTC(OP)- TGPS est de 3,7 ns			
L'incertitude sur les mesures UTC(OP)- LESSAY est de 10,0 ns			
TABLEAU 2 - MESURES DE TEMPS ET DE FREQUENCE RAPPORTEES AU TA(F) TEMPS ATOMIQUE FRANCAIS			
Date	Date	TA(F)-UTC(OP) à 0h UTC	FREQUENCE DE FRANCE-INTER (FI) (f-fo)/fo (FI - TA(F)) Moyenne à 0h UTC
2013	MJD	35 s +	*E-13
juin		ns	
1	56444	-167607	(*)Voir NOTES
2	56445	-167607	(*)Voir NOTES
3	56446	-167608	0
4	56447	-167607	0
5	56448	-167607	0
L'incertitude sur les mesures TA(F) - UTC(OP) est de 2,6 ns			
L'incertitude sur (f-fo)/fo (FI - TA(F)) est de 3,0*E-13			
NOTES : LORAN-C CHAINE FRANÇAISE, LESSAY (6731): Pas de désynchronisation de l'émission supérieure à +/- 500 ns (1) Mesure Loran-C de LESSAY L55F effectuée à 15h11 UTC pour le JJM : 56454 (2) Mesure Loran-C de LESSAY L55F effectuée à 15h07 UTC pour le JJM : 56455			

extraits du bulletin H diffusé mensuellement sur le site internet du SYRTE en juillet 2013
rendant compte des écarts de temps avec UTC mesurés sur le GPS, LORAN C et France Inter

La calculatrice ou l'ordinateur utilisé pour les calculs effectuent les opérations en binaire. La manipulation en binaire de grands nombre entiers et/ou avec une longue partie décimale nécessite d'utiliser un nombre de bit d'autant plus important que la précision souhaitée est exigeante. Par ailleurs, pour utiliser le moins de place possible dans la mémoire et le processeur, c'est le nombre à virgule flottante qui est utilisé. Les nombres décimaux sont alors convertis en trois parties :

- le signe + ou – sur 1 bit ;
- la mantisse (avec la virgule juste après le premier chiffre) sur plusieurs bits ;
- l'exposant (nombre entier) sur plusieurs bits.

Ainsi $1234,56789 = + 1,23456789 \times 10^3$ où la mantisse est 1,23456789 et l'exposant 3.

Le nombre de bit utilisé par la calculatrice pour le codage de la mantisse et celui de l'exposant fixe la limite du plus grand nombre possible pour les calculs :

- avec 3 bits on peut coder $2^3 = 8$ exposants : par exemple - 3, - 2, - 1, 0, 1, 2, 3, 4 ;
- avec 32 bits (1 bit de signe, 8 pour l'exposant et 23 pour la mantisse) on peut calculer des nombres entre $\pm 1,17549435 \times 10^{-38}$ et $\pm 3,40282346 \times 10^{38}$ (simple précision de la norme IEEE754 destinée aux ordinateurs) [WWW15] ;
- avec 43 bits (1 bit de signe, 8 pour l'exposant et 34 pour la mantisse) on peut calculer tous les nombres dans la plage $\pm 1 \times 10^{-99}$ à $\pm 9,999999999 \times 10^{99}$ et théoriquement davantage (cas de la CASIO FX92 College 2D) [WWW16].

La conversion des nombres décimaux (en base 10) vers des nombres binaire (en base 2) « à virgule flottante » crée des « trous » : certains nombres décimaux avec une partie décimale de quelques chiffres n'ont pas de valeur exacte correspondante en binaire « flottant », sauf à utiliser un nombre de bits très grand voire infini. C'est la valeur « flottante » la plus proche qui est alors utilisée. A l'inverse certains binaires « flottants » n'ont pas de valeur exacte correspondante en décimal. De même, c'est la valeur décimale la plus proche qui est utilisée. A titre d'exemple, MICROSOFT met en garde contre les erreurs possibles sur les versions de EXCEL jusqu'à 2010 [WWW17] :

Nombres binaires répétitifs et calculs dont les résultats sont proches de zéro

Un autre problème lié au stockage des nombres à virgule flottante au format binaire est que certains nombres, qui sont finis et non répétitifs en base décimale, deviennent des nombres infinis et répétitifs en base binaire. L'exemple le plus connu de ce problème est la valeur 0,1 et ses variantes. Bien que ces nombres puissent être représentés parfaitement en base décimale, le même nombre en format binaire devient le nombre binaire répétitif suivant lorsqu'il est stocké dans la mantisse :
000110011001100110011 (etc.)

La spécification IEEE 754 ne contient pas de disposition spéciale pour un nombre spécifique ; elle stocke ce qu'elle peut dans la mantisse et tronque le reste. Ceci résulte en une erreur d'environ $-2,8E-17$, ou 0,000000000000000028, lors du stockage.

Même les fractions décimales courantes, telles que le nombre décimal 0,0001, ne peuvent pas être représentées exactement en format binaire. (0,0001 est une fraction répétitive binaire avec une période de 104 bits). Ceci est similaire à la raison pour laquelle la fraction $1/3$ ne peut pas être représentée exactement en base décimale (nombre décimal répétitif 0,3333333333333333333).

Ceci explique pourquoi le simple exemple suivant dans Microsoft Visual Basic pour Applications

```
Sub Main()  
    MySum = 0  
    For I% = 1 To 10000  
        MySum = MySum + 0.0001  
    Next I%  
    Debug.Print MySum  
End Sub
```

imprimera 0,9999999999999996 comme sortie. La petite erreur de représentation de 0,0001 en base binaire est propagée dans la somme.

« L'arithmétique en virgule flottante peut fournir des résultats incorrects dans Excel » par MICROSOFT [WWW17]

Les opérations mathématiques sont effectuées par la calculatrice à l'aide d'algorithmes dont la programmation est adaptée à la précision recherchée. Mais certains algorithmes nécessitent des calculs consécutifs générant à chaque étape une imprécision croissante : l'erreur finale sur le résultat augmente avec le nombre d'étapes.

Par ailleurs certaines opérations sont « évanescentes » : le résultat se rapproche si près de zéro que la calculatrice risque d'arrondir à zéro. La division par zéro génère alors une erreur et bloque la suite des calculs. De même un grand nombre sera assimilé à l'infini s'il dépasse la capacité de codage de la calculatrice.

Dans le cas d'un algorithme programmé sur une calculatrice programmable ou d'un logiciel installé sur un ordinateur, l'utilisateur doit s'assurer que les nombres, les opérations et le nombre d'itérations ont été dimensionnés de manière à respecter la précision souhaitée. Pour programmer le logiciel ASTROLAB v3 destiné à calculer la position du navire à partir de deux hauteurs d'astres, M. Yves ROBIN-JOUAN a visé un environnement minimal (simple calculatrice programmable en BASIC) mais une précision de $0,001^\circ = 0,06'$. Pour y parvenir, il a choisi des nombres codés sur 16 bits en double précision (donc deux « mots » de 16 bits pour coder une valeur décimale) [LIV07] (page 135). Dans le cas des logiciels gratuits ou commerciaux, cette information est rarement accessible à l'utilisateur.

■ Plages, nombre de chiffres et précision des calculs

La plage de calcul, le nombre de chiffres utilisés pour les calculs internes et la précision des calculs dépendent du type de calcul que vous effectuez.

Plage et précision des calculs

Plage de calcul	$\pm 1 \times 10^{-99}$ à $\pm 9,999999999 \times 10^{99}$ ou 0
Nombre de chiffres pour le calcul interne	15 chiffres
Précision	En règle générale, ± 1 au 10^{e} chiffre pour un seul calcul. La précision pour l'affichage exponentiel est de ± 1 au chiffre le moins significatif. Les erreurs sont cumulées dans le cas de calculs consécutifs.

- La précision est en principe comme indiqué dans « Plage et précision des calculs » ci-dessus.
- Les fonctions de types $^x(x^y)$, $x\sqrt[y]{y}$, $\sqrt[3]{y}$, $x!$ exigent des calculs internes consécutifs, qui peuvent entraîner une accumulation des erreurs résultant de chaque calcul.
- L'erreur est cumulée et tend à être très grande en certains points et au point d'inflexion d'une fonction.

mode d'emploi de la CASIO FX92 College 2D : plage des nombres calculables et précision des résultats [WWW16]

En passerelle, les calculatrices utilisées sont optimisées pour satisfaire aisément la précision requise pour les calculs d'un point à 0,1 M (soit 0,1 ') près voire même à 1 m (soit 0,03 ") près. Pour les logiciels, on peut raisonnablement considérer que la précision des résultats est indiquée par leur affichage : « 48 ° 21,359 ' N » est une latitude calculée à 0,001 ' près.

Le compas couramment utilisé est le compas gyroscopique dont la précision imposée par l'OMI est de d'environ $\pm 0,5^\circ$ sur le cap du navire [OMI01]. S'il s'agit du compas magnétique, la précision est de ± 1 à $\pm 5^\circ$ selon la rigueur avec laquelle la courbe de déviation a été mise à jour par l'équipage : considéré comme un instrument de secours, la surveillance du compas magnétique est parfois négligée jusqu'à la panne du compas gyroscopique.

Le loch électromagnétique ou Doppler a une précision de $\pm 0,2$ nds environ sur la vitesse longitudinale du navire.

Loch et compas sont exploités dans la construction graphique du point astronomique ou le calcul automatique de la position estimée du navire. Leur contribution à l'erreur finale augmente avec le temps et la vitesse :

- 1h de transit à $V = 10$ nds avec une erreur $\Delta C = 0,5^\circ$ de cap et $\Delta V = 0,2$ nd de vitesse entraîne une erreur de positionnement de 0,21821 M = 404 m ;
- 1h de transit à $V = 20$ nds avec une erreur $\Delta C = 0,5^\circ$ de cap et $\Delta V = 0,2$ nds de vitesse entraîne une erreur de positionnement de 0,26545 M = 492 m

Pour un point de nuit lorsque plusieurs astres sont visibles simultanément, les observations nécessitent moins de dix minutes, soit une erreur respectivement (avec les exemples de calcul d'erreur ci-dessus) de 67 m et 82 m. Pour un point de jour lorsque le Soleil est le leur astre visible, les observations peuvent nécessiter 6 heures, soit une erreur respectivement (avec les exemples de calcul d'erreur ci-dessus) de 2 425 m et 2 950 m.

Ces résultats nécessitent trois remarques :

- en réalité les erreurs ci-dessus pour le compas et le loch donnent un intervalle où les mesures oscillent autour de la valeur réelle. : l'erreur moyenne sur une heure de transit est souvent plus faible. Un ordinateur intégrant les valeurs instantanées du loch et du compas calculerait la position du navire avec une erreur plus faible ;
- la formule ci-dessus correspond à l'erreur d'une position calculée sans exploiter les informations apportées par l'observation des astres ;
- d'autres paramètres peuvent dégrader l'erreur : le compas gyroscopique est perturbé par le roulis, le tangage, les girations rapides ou de grande amplitude, son erreur augmente avec la latitude ; les lochs sont perturbés par le mauvais temps (variation de vitesse dans les vagues, pilonnement, écoulements turbulents près de la base électromagnétique ou acoustique).

• les méthodes de calcul du point astronomique

Même s'il existe sur les passerelles de navires marchands des logiciels d'aide au calcul du point astronomique, la navigation astronomique est utilisée principalement en situation de secours. Même si cette situation n'est pas clairement définie, il est d'usage d'envisager une panne durable des satellites GPS et une absence d'alimentation électrique. Ces conditions limitent les méthodes envisageables à :

- des documents sur papier ;
- des calculs à l'aide de table, abaques ou instruments rudimentaires (règle à calcul) ;
- des tracés avec les instruments classiques : compas traceur ou à pointe sèche, règle de CRAS ou autre règle-rapporteur.

La méthode des droites de hauteurs est la plus répandue mais il existe d'autres techniques pertinentes mais pas ou peu exploitées.

La droite de hauteur (ébauchée par C SUMMER en 1837 puis théorisée par A MARCQ SAINT-HILAIRE en 1875) est calculée pour chaque astre ; les azimuts et intercepts sont ensuite tracés sur la carte où la position du navire est lue graphiquement.

Les calculs sont faisables sur une calculatrice scientifique ou traités à l'aide de tables numériques dédiées :

- tables DIEUMEGARD et BATAILLE en France (tables 900) ;
- sight reduction tables du Nautical Almanac au Royaume Uni ;
- sight reduction tables HO229 aux États-Unis.

En raison de sa simplicité de compréhension et de réalisation, c'est la méthode la plus adaptée à l'usage de la navigation astronomique comme moyen de positionnement de secours au large (si le GPS ne fonctionnait plus durablement). Cette méthode nécessite de connaître approximativement la position du navire. Une estimation de l'erreur est donnée par la formule suivante dans le cas du tracé des droites de hauteur sur la carte :

$$\epsilon = \epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3$$

- ϵ est l'erreur de la méthode en milles, à laquelle s'ajoutent les erreurs de mesure (sextant, habileté de l'observateur), de position des astres (identification par l'observateur, heure lue sur l'horloge, éphémérides nautiques) et de calcul (pour une calculatrice : négligeable comparée aux précédentes erreurs) ;

$$\epsilon_1 = \frac{m^2}{2 \cdot 3438} \cdot (\tan H_v - \tan \varphi \cdot \cos Z)$$

$$\epsilon_2 = \frac{m}{3438} \cdot i \cdot \tan \varphi \cdot \sin Z$$

$$\epsilon_3 = \frac{m}{149}$$

- ϵ_1 due à l'assimilation du cercle de hauteur à une droite de hauteur ;
- ϵ_2 due à l'assimilation du vertical de l'astre (arc de grand cercle ou orthodromie) à une loxodromie (arc de petit cercle) ;
- ϵ_3 due à la différence entre le modèle sphérique de la Terre et la réalité plus proche d'un ellipsoïde d'aplatissement 1/298,25722356 (ellipsoïde WGS84).

avec m la distance entre le point déterminatif d'un astre et le point astronomique, en M
 i l'intercept : distance entre point estimé du navire et droite de hauteur d'un astre, en M
 H_v la hauteur vraie de l'astre, en °
 Z l'azimut de l'astre, en °
 φ la latitude du navire, en °

Pour une latitude $60^\circ S < \varphi < 60^\circ N$ et un triangle restreint entre les trois droites de hauteur (soit $m < 30 M$) l'erreur théorique de cette méthode n'excède pas 1 M. Les logiciels permettant de lire les coordonnées du point astronomique en traçant les courbes de hauteur sur un canevas de Mercator éliminent les erreurs ϵ_1 et ϵ_2 . Ce type de logiciel pourrait aisément prendre en compte l'aplatissement terrestre pour tracer le canevas de Mercator et ainsi éliminer l'erreur ϵ_3 mais aucun n'évoque cette précaution dans sa notice.

Les tables HO249 « sight reduction tables for air navigation » aux États-Unis sont une adaptation de la méthode des droites de hauteur pour la navigation aérienne de nuit. Ces tables peuvent être téléchargées gratuitement [WWW19] et sont publiées en trois volumes :

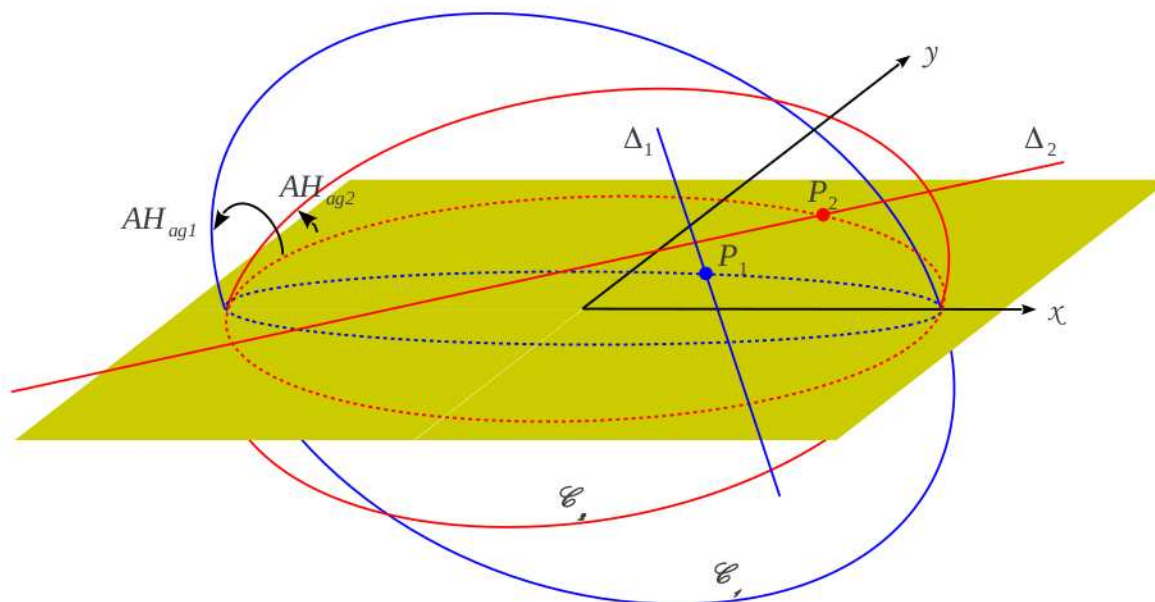
- volume 1, valable pour 5 ans, pour faire le point avec les principales étoiles ;
- volume 2, permanent, pour faire le point avec le soleil, la lune et les principaux astres compris entre les latitudes 40 Nord et 40 Sud ;
- volume 3, permanent, pour faire le point avec le soleil, la lune et les principaux astres compris entre les latitudes 39° Nord et 89° Nord, ainsi qu'entre les latitudes 39° Sud et 89° Sud.

Le volume 1 est utilisé par les marins en raison de la simplicité des calculs (seulement des additions) et de l'absence d'autre ouvrage nécessaire (inutile d'avoir en plus des éphémérides). Une table permet le calcul de l'angle horaire sidéral sur une période de cinq ans. Selon le ciel visible à la position estimée du navire à la date choisie, le volume 1 baptisé « selected stars » propose sept étoiles sélectionnées selon :

- leur forte luminosité ;
- leur hauteur $12^\circ \leq H \leq 69^\circ$;
- leur répartition en azimut sur l'horizon : les trois étoiles donnant des intersections optimales de droites de hauteur sont indiquées avec un losange (azimuts espacés d'environ $60^\circ \pm 180^\circ$).

La précision des tables du volume 1 est de 0,5' sur la hauteur et de 0,5° sur l'azimut mais la précision du point final, après observations, calculs et tracés, est d'environ 2 M dans les conditions optimales d'utilisation.

Méthode de M. P SEMIROT [WWW20] qui utilise exclusivement des étoiles, comme les tables HO249. Le principe est de travailler avec les éphémérides nautiques et un instrument permettant de visualiser la projection de deux cercles concentriques sur un plan (en jaune) contenant un repère orthonormé dont l'origine est le centre des cercles.



projection des cercles d'étoiles dans le plan de la position de l'observateur selon la méthode de P SEMIROT [WWW20]

Les deux cercles sont solidaires et séparés d'un angle $AH_{ag1} - AH_{ag2}$ correspondant à la différence d'angle horaire (ou d'ascension verse) entre les deux étoiles observées. La projection de chaque cercle sur le plan donne une ellipse de demi grand axe est égal à 1 et de demi petit axe à $\cos AH_{ag}$.

Cette ellipse représente graphiquement le changement de variables ci-contre :

$$\begin{cases} x = \sin \varphi \\ y = \cos \varphi \cdot \cos AH_{ag} \end{cases}$$

Chaque droite Δ a pour équation dans le repère (x, y) :

$$x \cdot \sin D + y \cdot \cos D = \sin H$$

où H est la hauteur observée d'une étoile. La droite Δ représente graphiquement la relation fondamentale de la navigation astronomique :

$$\sin \varphi \cdot \sin D + \cos \varphi \cdot \cos AH_{ag} \cdot \cos D = \sin H$$

La droite Δ coupe l'ellipse associée en un point P. Les deux étoiles permettent de construire un système de deux équations dont les inconnues sont $\sin \varphi$, $\cos \varphi$, $\cos AH_{ag1}$ et $\cos AH_{ag2}$. La résolution graphique de ce système consiste à faire tourner les deux cercles (liés mécaniquement) autour de l'axe des abscisses jusqu'à trouver une droite $(P_1 P_2)$ parallèle à l'axe des ordonnées. Alors $x_{P1} = x_{P2} = \sin \varphi$. On en déduit φ la latitude du navire puis $\cos \varphi$ et enfin $\cos AH_{ag1}$ dont on extrait AH_{ag1} puis G la longitude du navire.

Cette méthode de résolution mécanique est d'autant moins précise que l'instrument utilisé est de taille réduite : entre 1' et 1° selon le soin apporté à la fabrication de cet instrument. Elle montre cependant qu'il existe des astuces géométriques ou des abaques pour résoudre un problème dont les équations analytiques requièrent des tables volumineuses ou une calculatrice.

Une méthode rudimentaire pourrait être adaptée aux situations de secours pour déterminer la latitude et la longitude avec peu de moyens (un sextant, une montre à l'heure TU - à défaut UTC, un document d'une soixantaine de pages, un crayon, une carte de toute la traversée) et des connaissances élémentaires (calcul mental, bases de l'astronomie).

La latitude du navire peut être mesurée dans l'hémisphère Nord avec l'étoile Polaire : en considérant $\varphi = H_v$ le marin commet une erreur inférieure à 43' (ordre de grandeur valable pour le siècle à venir). Six pages de tableaux donnant des valeurs à additionner suffisent pour atteindre une précision de 1' :

- une page de correction des hauteurs (on préférera la présentation pragmatique du Nautical Almanac) ;
- deux pages de la table 4 des HO249 donnant l'angle horaire sidéral à Greenwich pour une période de 9 ans ;
- une pages des tables 6 (et 7 pour l'azimut) de l'étoile polaire des HO249 donnant pour neuf ans la correction Q : $\varphi = H_v + Q$.

La latitude peut aussi être mesurée dans les deux hémisphères en observant la méridienne d'un astre quelconque. A cet instant $\varphi = D \pm (90 - H_v)$ où D est la déclinaison de l'astre, $\pm$ est le signe de la différence $(\varphi_e - D)$ avec φ_e une valeur approximative de la latitude du navire (avant la panne du GPS ou l'abandon du navire). Les informations nécessaires seraient :

- trois pages avec les cartes du ciel : deux polaires et une équatoriale comme sur les éphémérides ;
- quatre pages d'un catalogue donnant la déclinaison D et l'ascension verse AV_a à 0,1' près, pour l'année en cours, des étoiles choisies parmi les plus brillante et pour leur répartition sur toute la sphère céleste ;
- douze pages donnant la déclinaison du Soleil heure par heure à 0,1' près pour l'année en cours.

La lune et les planètes ne sont pas indispensables car il y a toujours d'autres astres visibles pour s'en passer : le Soleil le jour, les étoiles brillantes la nuit. L'heure de passage au méridien de Greenwich peut être donnée pour le Soleil et le point vernal pour chaque jour de l'année sur deux pages. Connaissant l'ascension versée AV_a à 0,1 ' près des étoiles dans un catalogue (cité plus haut et évalué à deux pages) et la longitude approximative du navire G_e , on peut calculer l'heure TU de la méridienne :

- pour le Soleil : $T_{\text{méridienne à } G_e} = T_{\text{méridienne à Greenwich}} + \frac{G_e}{15^\circ/h}$;
- pour les autres étoiles : $T_{\text{méridienne à } G_e} = T_{\text{méridienne sidérale à Greenwich}} + \frac{G_e - AV_a}{15^\circ/h}$.

Ces formules ne tiennent pas compte du déplacement du navire : pour un navire en route à l'Ouest $R_f = 270^\circ$ à la vitesse $V_f = 20 \text{ nds}$ sur le parallèle $\varphi_e = 60^\circ N$ l'erreur sur l'heure est de 10 minutes si le chef de quart prépare son observation quatre heures plus tôt. Si l'astre est observé avec cette erreur d'heure, la conséquence sur la latitude peut atteindre $2,5^\circ$ (cas de l'astre passant au zénith) ! Cette erreur est inférieure à 1 ' pour un astre de hauteur faible $H_v < 20^\circ$. Si le chef de quart n'a pas de calculatrice, on pourra prévoir trois pages de conversion des degrés d'angle en minutes et secondes de temps pour permettre la division dans les formules précédentes.

Pour plus de précision avec le Soleil, si le chef de quart dispose d'une calculatrice, il peut effectuer plusieurs itérations :

- calcul de la longitude estimée G_e' à l'instant $T_{\text{méridienne à } G_e}$ avec $G_e' = G_e - \frac{\Delta t \cdot V_f \cdot \sin R_f}{60 \cdot \cos \varphi_e}$
où $\Delta t = T_{\text{méridienne à } G_e} - T_{\text{point estimé à } G_e}$ en heures
- calcul de la nouvelle heure de la méridienne avec G_e' et les formules ci-dessus.

Si le Soleil est loin du zénith ($H_v < 70^\circ$), l'erreur sur l'heure après trois itérations entraîne une erreur sur la latitude finale pour le navire (en route à l'Ouest $R_f = 270^\circ$ à la vitesse $V_f = 20 \text{ nds}$ sur le parallèle $\varphi_e = 60^\circ N$) inférieure à 1 '.

Pour les autres étoiles, avec une calculatrice, l'heure précise peut être obtenue par la méthode suivante :

- calcul de l'angle horaire local de l'étoile avec le catalogue (réduit à quarante étoiles sur deux pages) :
 $AH_{ag} = AH_{so} + AV_a - G_e$

Si l'astre est à l'Ouest ($AH_{ag} \leq 180^\circ$) la méridienne est déjà passée. Sinon, on peut continuer le calcul :

- calcul de l'angle au pôle : $P = 360^\circ - AH_{ag}$
- calcul de la vitesse γ de rapprochement des méridiens de l'étoile et du navire :

$$\gamma = 15^\circ/\text{heure} + \frac{V_f \cdot \sin R_f}{60 \cdot \cos \varphi_e}$$

- calcul de l'heure de la méridienne : $T_{\text{méridienne}} = T_{\text{point estimé à } G_e} + \frac{P}{\gamma}$

La longitude peut être déduite d'une observation circum-méridienne :

- mesurer la hauteur d'un astre pendant un intervalle d'environ quarante minutes, centré sur l'heure approximative de la méridienne (calculée plus haut) ;
- représenter les résultats sur un graphique de la hauteur en fonction de l'heure d'observation ;
- relier par une courbe à main levée les points ainsi obtenus ;
- le maximum de la courbe a pour coordonnées $T_{\text{culmination}}$ et $H_{v \text{ max}}$.

L'heure de la culmination $T_{\text{culmination}}$ (hauteur maximum atteinte par l'astre dans sa course diurne) est confondue avec l'heure de la méridienne $T_{\text{méridienne}}$ (passage de l'astre au méridien du navire) sauf pour le Soleil, la Lune et les planètes. En négligeant cette différence pour le Soleil, on commet une erreur sur la déclinaison (et donc sur la latitude) inférieure à 0,3 '.

- la latitude est calculée par $\varphi = D \pm (90 - H_{vmax})$;
- la longitude est $G = 15^\circ/h \cdot (T_{culmination} - T_{mériidienne \text{ à Greenwich}})$.

Une montre à l'heure TU – à défaut UTC – permet ainsi de déduire la longitude. Réciproquement la connaissance de la longitude du navire permet de recalibrer la montre sur l'heure TU.

L'heure TU est indispensable pour connaître la longitude. Si la montre est décalée, on peut exploiter les heures de lever et de coucher du Soleil durant l'année en cours pour des latitudes couvrant la zone de navigation du navire ($56^\circ S \leq \varphi \leq 70^\circ N$ pour les éphémérides nautiques françaises, $60^\circ S \leq \varphi \leq 72^\circ N$ pour le nautical almanac). Les heures et azimuts du Soleil au lever et au coucher tiennent sur dix-huit pages. Il faudra plusieurs hypothèses et observations pour faire converger le point et l'heure vers une solution cohérente. La précision sur l'heure atteindra difficilement 1 s. L'azimut du Soleil au lever et au coucher peut être utilisé pour mesurer la déviation du compas.

Le légendaire commandant Guillaume, qui a inspiré le film du « Crabe Tambour », est resté plusieurs jours à la dérive en subissant une tempête tropicale en mer de Chine. Lorsque le calme est revenu, avec un sextant, des éphémérides et une montre qui n'était plus remontée depuis plusieurs jours, il a ainsi retrouvé sa position, recalé sa montre et compensé son compas magnétique.

Un abrégé des éphémérides nautiques ainsi adapté à une navigation astronomique de secours et accessible à des marins de niveau scolaire basique pourrait être complété par :

- cinq pages d'explications et formules de navigation ;
- une page des distances parcourues selon la vitesse et le temps de 0 à 60 minutes ;
- dix pages d'aide au calcul avec des cases à remplir, les formules et pages à utiliser.

Le document contient ainsi un total de 60 pages.

A2 ALTITUDE CORRECTION TABLES 10°-90°—SUN, STARS, PLANETS

OCT.—MAR. SUN			APR.—SEPT.			STARS AND PLANETS				DIP							
App. Alt.	Lower Limb	Upper Limb	App. Alt.	Lower Limb	Upper Limb	App Alt.	Corr ⁿ	App. Alt.	Additional Corr ⁿ	Ht. of Eye	Corr ⁿ	Ht. of Eye	Ht. of Eye	Corr ⁿ			
°	'		°	'		°	'	2006						m	'		
9 33	+10.8	-21.5	9 39	+10.6	-21.2	9 55	-5.3	VENUS						2.4	-2.8	8.0	1.0 - 1.8
9 45	+10.9	-21.4	9 50	+10.7	-21.1	10 07	-5.2	Jan. 1-Feb. 3						2.6	-2.9	8.6	1.5 - 2.2
9 56	+11.0	-21.3	10 02	+10.8	-21.0	10 20	-5.1	°						2.8	-3.0	9.2	2.0 - 2.5
10 08	+11.1	-21.2	10 14	+10.9	-20.9	10 32	-5.0	0 +0.5						3.0	-3.1	9.8	2.5 - 2.8
10 20	+11.2	-21.1	10 27	+11.0	-20.8	10 46	-4.9	26 +0.4						3.2	-3.2	10.5	3.0 - 3.0
10 33	+11.3	-21.0	10 40	+11.1	-20.7	10 59	-4.8	46 +0.3						3.4	-3.3	11.2	See table ←
10 46	+11.4	-20.9	10 53	+11.2	-20.6	11 14	-4.7	60 +0.2						3.6	-3.4	11.9	
11 00	+11.5	-20.8	11 07	+11.3	-20.5	11 29	-4.6	73 +0.1						3.8	-3.4	12.6	m 20 - 7.9 22 - 8.3 24 - 8.6 26 - 9.0 28 - 9.3 30 - 9.6 32 - 10.0 34 - 10.3 36 - 10.6 38 - 10.8
11 15	+11.6	-20.7	11 22	+11.4	-20.4	11 44	-4.5	84						4.0	-3.5	13.3	
11 30	+11.7	-20.6	11 37	+11.5	-20.3	12 00	-4.4	Feb. 4-Feb. 18						4.3	-3.6	14.1	
11 45	+11.8	-20.5	12 01	+11.6	-20.2	12 17	-4.3	°						4.5	-3.7	14.9	
12 01	+11.9	-20.4	12 10	+11.7	-20.1	12 35	-4.2	29 +0.4						4.7	-3.8	15.7	
12 18	+12.0	-20.3	12 27	+11.8	-20.0	12 53	-4.1	51 +0.3						5.0	-3.9	16.5	
12 36	+12.1	-20.2	12 45	+11.9	-19.9	13 12	-4.0	68 +0.2						5.2	-4.0	17.4	
12 54	+12.2	-20.1	13 04	+12.0	-19.8	13 32	-3.9	83 +0.1						5.5	-4.1	18.3	
13 14	+12.3	-20.0	13 24	+12.1	-19.7	13 53	-3.8	Feb. 19-Mar. 13						5.8	-4.2	19.1	
13 34	+12.4	-19.9	13 44	+12.2	-19.6	14 16	-3.7	°						6.1	-4.3	20.1	
13 55	+12.5	-19.8	14 06	+12.3	-19.5	14 39	-3.6	34 +0.3						6.3	-4.4	21.0	
14 17	+12.6	-19.7	14 29	+12.4	-19.4	15 03	-3.5	60 +0.2						6.6	-4.5	22.0	
14 41	+12.7	-19.6	14 53	+12.5	-19.3	15 29	-3.4	80 +0.1						6.9	-4.6	22.9	
15 05	+12.8	-19.5	15 18	+12.6	-19.2	15 56	-3.3	Mar. 14-May 2						7.2	-4.7	23.9	
15 31	+12.9	-19.4	15 45	+12.7	-19.1	16 25	-3.2	°						7.5	-4.8	24.9	
15 59	+13.0	-19.3	16 13	+12.8	-19.0	16 55	-3.1	41 +0.2						7.9	-4.9	26.0	
16 27	+13.1	-19.2	16 43	+12.9	-18.9	17 27	-3.0	76 +0.1						8.2	-5.0	27.1	
16 58	+13.2	-19.1	17 14	+13.0	-18.8	18 01	-2.9	May 3-Dec. 31						8.5	-5.1	28.1	
17 30	+13.3	-19.0	17 47	+13.1	-18.7	18 37	-2.8	°						8.8	-5.2	29.2	
18 05	+13.4	-18.9	18 23	+13.2	-18.6	19 16	-2.7	0 +0.1						9.2	-5.3	30.4	
18 41	+13.5	-18.8	19 00	+13.3	-18.5	19 56	-2.6	60						9.5	-5.4	31.5	
19 20	+13.6	-18.7	19 41	+13.4	-18.4	20 40	-2.5	MARS						9.9	-5.5	32.7	
20 02	+13.7	-18.6	20 24	+13.5	-18.3	21 27	-2.4	Jan. 1-Jan. 23						10.3	-5.6	33.9	
20 46	+13.8	-18.5	21 10	+13.6	-18.2	22 17	-2.3	°						10.6	-5.7	35.1	
21 34	+13.9	-18.4	21 59	+13.7	-18.1	23 11	-2.2	0 +0.2						11.0	-5.8	36.3	
22 25	+14.0	-18.3	22 52	+13.8	-18.0	24 09	-2.1	41 +0.1						11.4	-5.9	37.6	
23 20	+14.1	-18.2	23 49	+13.9	-17.9	25 12	-2.0	76						11.8	-6.0	38.9	
24 20	+14.2	-18.1	24 51	+14.0	-17.8	26 20	-1.9	Jan. 24-Dec. 31						12.2	-6.1	40.1	
25 24	+14.3	-18.0	25 58	+14.1	-17.7	27 34	-1.8	°						12.6	-6.2	41.5	
26 34	+14.4	-17.9	27 11	+14.2	-17.6	28 54	-1.7	0 +0.1						13.0	-6.3	42.8	
27 50	+14.5	-17.8	28 31	+14.3	-17.5	30 22	-1.6	°						13.4	-6.4	44.2	
29 13	+14.6	-17.7	29 58	+14.4	-17.4	31 58	-1.5	60						13.8	-6.5	45.5	
30 44	+14.7	-17.6	31 33	+14.5	-17.3	33 43	-1.4							14.2	-6.6	46.9	
32 24	+14.8	-17.5	33 18	+14.6	-17.2	35 38	-1.3							14.7	-6.7	48.4	
34 15	+14.9	-17.4	35 15	+14.7	-17.1	37 45	-1.2							15.1	-6.8	49.8	
36 17	+15.0	-17.3	37 24	+14.8	-17.0	40 06	-1.1							15.5	-6.9	51.3	
38 34	+15.1	-17.2	39 48	+14.9	-16.9	42 42	-1.0							16.0	-7.0	52.8	
41 06	+15.2	-17.1	42 28	+15.0	-16.8	45 34	-0.9							16.5	-7.1	54.3	
43 56	+15.3	-17.0	45 29	+15.1	-16.7	48 45	-0.8							16.9	-7.2	55.8	
47 07	+15.4	-16.9	48 52	+15.2	-16.6	52 16	-0.7							17.4	-7.3	57.4	
50 43	+15.5	-16.8	52 41	+15.3	-16.5	56 09	-0.6							17.9	-7.4	58.9	
54 46	+15.6	-16.7	56 59	+15.4	-16.4	60 26	-0.5							18.4	-7.5	60.5	
59 21	+15.7	-16.6	61 50	+15.5	-16.3	65 06	-0.4							18.8	-7.6	62.1	
64 28	+15.8	-16.5	67 15	+15.6	-16.2	70 09	-0.3							19.3	-7.7	63.8	
70 10	+15.9	-16.4	73 14	+15.7	-16.1	75 32	-0.2							19.8	-7.8	65.4	
76 24	+16.0	-16.3	79 42	+15.8	-16.0	81 12	-0.1							20.4	-7.9	67.1	
83 05	+16.1	-16.2	86 31	+15.9	-15.9	87 03	0.0							20.9	-8.0	68.8	
90 00			90 00			90 00								21.4	-8.1	70.5	130 - 11.1 135 - 11.3 140 - 11.5 145 - 11.7 150 - 11.9 155 - 12.1

App. Alt. = Apparent altitude = Sextant altitude corrected for index error and dip.

correction des hauteurs observées (Sextant altitude) de la dépression de l'horizon (dip)
puis de la réfraction (+ parallaxe et demi-diamètre du Soleil) pour les astres entre 10° et 90° (nautical almanac)

TABLE 4 — GHA Υ FOR THE YEARS 2006-2014a. GHA Υ AT 00^h ON THE FIRST DAY OF EACH MONTH

Year	Jan. 1	Feb. 1	Mar. 1	Apr. 1	May 1	June 1	July 1	Aug. 1	Sept. 1	Oct. 1	Nov. 1	Dec. 1
	$\circ$ $\prime$	$\circ$ $\prime$	$\circ$ $\prime$	$\circ$ $\prime$	$\circ$ $\prime$	$\circ$ $\prime$	$\circ$ $\prime$	$\circ$ $\prime$	$\circ$ $\prime$	$\circ$ $\prime$	$\circ$ $\prime$	$\circ$ $\prime$
2006	100 30	131 04	158 40	189 13	218 47	249 20	278 55	309 28	340 01	009 35	040 09	069 43
2007	100 16	130 49	158 25	188 59	218 33	249 06	278 40	309 14	339 47	009 21	039 54	069 29
2008	100 02	130 35	159 10	189 44	219 18	249 51	279 25	309 59	340 32	010 06	040 39	070 13
2009	100 47	131 20	158 56	189 29	219 03	249 37	279 11	309 44	340 18	009 52	040 25	069 59
2010	100 33	131 06	158 42	189 15	219 49	249 22	278 57	309 30	340 03	009 37	040 11	069 45
2011	100 18	130 52	158 27	189 01	218 35	249 08	278 42	309 16	339 49	009 23	039 56	069 31
2012	100 04	130 37	159 12	189 45	219 20	249 53	279 27	310 00	340 34	010 08	040 41	070 15
2013	100 49	131 22	158 58	189 31	219 05	249 39	279 13	309 46	340 19	009 53	040 27	070 01
2014	100 34	131 08	158 43	189 17	218 51	249 24	278 58	309 32	340 05	009 39	040 12	069 47

b. INCREMENT OF GHA Υ FOR DAYS AND HOURS

Day	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
h	$\circ$ $\prime$	$\circ$ $\prime$	$\circ$ $\prime$	$\circ$ $\prime$	$\circ$ $\prime$	$\circ$ $\prime$	$\circ$ $\prime$	$\circ$ $\prime$	$\circ$ $\prime$	$\circ$ $\prime$	$\circ$ $\prime$	$\circ$ $\prime$	$\circ$ $\prime$	$\circ$ $\prime$	$\circ$ $\prime$	$\circ$ $\prime$
00	0 00	0 59	1 58	2 57	3 57	4 56	5 55	6 54	7 53	8 52	9 51	10 51	11 50	12 49	13 48	14 47
01	15 02	16 02	17 01	18 00	18 59	19 58	20 57	21 56	22 55	23 55	24 54	25 53	26 52	27 51	28 50	29 50
02	30 05	31 04	32 03	33 02	34 01	35 01	36 00	36 59	37 58	38 57	39 56	40 55	41 55	42 54	43 53	44 52
03	45 07	46 07	47 06	48 05	49 04	50 03	51 02	52 01	53 01	54 00	54 59	55 58	56 57	57 56	58 55	59 54
04	60 10	61 09	62 08	63 07	64 06	65 06	66 05	67 04	68 03	69 02	70 01	71 00	72 00	72 59	73 58	74 57
05	75 12	76 11	77 11	78 10	79 09	80 08	81 07	82 06	83 05	84 05	85 04	86 03	87 02	88 01	89 00	89 59
06	90 15	91 14	92 13	93 12	94 11	95 10	96 10	97 09	98 08	99 07	100 06	101 05	102 04	103 04	104 03	105 02
07	105 17	106 16	107 16	108 15	109 14	110 13	111 12	112 11	113 10	114 09	115 09	116 08	117 07	118 06	119 05	120 04
08	120 20	121 19	122 18	123 17	124 16	125 15	126 15	127 14	128 13	129 12	130 11	131 10	132 09	133 09	134 08	135 07
09	135 22	136 21	137 20	138 20	139 19	140 18	141 17	142 16	143 15	144 14	145 14	146 13	147 12	148 11	149 10	150 09
10	150 25	151 24	152 23	153 22	154 21	155 20	156 19	157 19	158 18	159 17	160 16	161 15	162 14	163 13	164 13	165 12
11	165 27	166 26	167 25	168 25	169 24	170 23	171 22	172 21	173 20	174 19	175 18	176 18	177 17	178 16	179 15	180 14
12	180 30	181 29	182 28	183 27	184 26	185 25	186 24	187 24	188 23	189 22	190 21	191 20	192 19	193 18	194 18	195 17
13	195 32	196 31	197 30	198 29	199 29	200 28	201 27	202 26	203 25	204 24	205 23	206 23	207 22	208 21	209 20	210 19
14	210 34	211 34	212 33	213 32	214 31	215 30	216 29	217 28	218 28	219 27	220 26	221 25	222 24	223 23	224 22	225 22
15	225 37	226 36	227 35	228 34	229 34	230 33	231 32	232 31	233 30	234 29	235 28	236 27	237 27	238 26	239 25	240 24
16	240 39	241 39	242 38	243 37	244 36	245 35	246 34	247 33	248 33	249 32	250 31	251 30	252 29	253 28	254 27	255 27
17	255 42	256 41	257 40	258 39	259 38	260 38	261 37	262 36	263 35	264 34	265 33	266 32	267 32	268 31	269 30	270 29
18	270 44	271 43	272 43	273 42	274 41	275 40	276 39	277 38	278 37	279 37	280 36	281 35	282 34	283 33	284 32	285 31
19	285 47	286 46	287 45	288 44	289 43	290 43	291 42	292 41	293 40	294 39	295 38	296 37	297 36	298 36	299 35	300 34
20	300 49	301 48	302 48	303 47	304 46	305 45	306 44	307 43	308 42	309 42	310 41	311 40	312 39	313 38	314 37	315 36
21	315 52	316 51	317 50	318 49	319 48	320 47	321 47	322 46	323 45	324 44	325 43	326 42	327 41	328 41	329 40	330 39
22	330 54	331 53	332 52	333 52	334 51	335 50	336 49	337 48	338 47	339 46	340 46	341 45	342 44	343 43	344 42	345 41
23	345 57	346 56	347 55	348 54	349 53	350 52	351 52	352 51	353 50	354 49	355 48	356 47	357 46	358 45	359 45	0 44
Day	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
h	$\circ$ $\prime$	$\circ$ $\prime$	$\circ$ $\prime$	$\circ$ $\prime$	$\circ$ $\prime$	$\circ$ $\prime$	$\circ$ $\prime$	$\circ$ $\prime$	$\circ$ $\prime$	$\circ$ $\prime$	$\circ$ $\prime$	$\circ$ $\prime$	$\circ$ $\prime$	$\circ$ $\prime$	$\circ$ $\prime$	$\circ$ $\prime$
00	15 46	16 45	17 44	18 44	19 43	20 42	21 41	22 40	23 39	24 38	25 38	26 37	27 36	28 35	29 34	30 33
01	30 49	31 48	32 47	33 46	34 45	35 44	36 44	37 43	38 42	39 41	40 40	41 39	42 38	43 37	44 37	45 36
02	45 51	46 50	47 49	48 49	49 48	50 47	51 46	52 45	53 44	54 43	55 43	56 42	57 41	58 40	59 39	60 38
03	60 54	61 53	62 52	63 51	64 50	65 49	66 48	67 48	68 47	69 46	70 45	71 44	72 43	73 42	74 42	75 41
04	75 56	76 55	77 54	78 53	79 53	80 52	81 51	82 50	83 49	84 48	85 47	86 47	87 46	88 45	89 44	90 43
05	90 59	91 58	92 57	93 56	94 55	95 54	96 53	97 53	98 52	99 51	100 50	101 49	102 48	103 47	104 46	105 46
06	106 01	107 00	107 59	108 58	109 58	110 57	111 56	112 55	113 54	114 53	115 52	116 52	117 51	118 50	119 49	120 48
07	121 03	122 03	123 02	124 01	125 00	125 59	126 58	127 57	128 57	129 56	130 55	131 54	132 53	133 52	134 51	135 51
08	136 06	137 05	138 04	139 03	140 02	141 02	142 01	143 00	143 59	144 58	145 57	146 56	147 56	148 55	149 54	150 53
09	151 08	152 08	153 07	154 06	155 05	156 04	157 03	158 02	159 02	160 01	161 00	161 59	162 58	163 57	164 56	165 55
10	166 11	167 10	168 09	169 08	170 07	171 07	172 06	173 05	174 04	175 03	176 02	177 01	178 01	179 00	179 59	180 58
11	181 13	182 12	183 12	184 11	185 10	186 09	187 08	188 07	189 06	190 06	191 05	192 04	193 03	194 02	195 01	196 00
12	196 16	197 15	198 14	199 13	200 12	201 11	202 11	203 10	204 09	205 08	206 07	207 06	208 05	209 05	210 04	211 03
13	211 18	212 17	213 17	214 16	215 15	216 14	217 13	218 12	219 11	220 11	221 10	222 09	223 08	224 07	225 06	226 05
14	226 21	227 20	228 19	229 18	230 17	231 16	232 16	233 15	234 14	235 13	236 12	237 11	238 10	239 10	240 09	241 08
15	241 23	242 22	243 21	244 21	245 20	246 19	247 18	248 17	249 16	250 15	251 15	252 14	253 13	254 12	255 11	256 10
16	256 26	257 25	258 24	259 23	260 22	261 21	262 20	263 20	264 19	265 18	266 17	267 16	268 15	269 14	270 14	271 13
17	271 28	272 27	273 26	274 26	275 25	276 24	277 23	278 22	279 21	280 20	281 19	282 19	283 18	284 17	285 16	286 15
18	286 31	287 30	288 29	289 28	290 27	291 26	292 25	293 25	294 24	295 23	296 22	297 21	298 20	299 19	300 19	301 18
19	301 33	302 32	303 31	304 30	305 30	306 29	307 28	308 27	309 26	310 25	311 24	312 24	313 23	314 22	315 21	316 20
20	316 36	317 35	318 34	319 33	320 32	321 31	322 30	323 29	324 29	325 28	326 27	327 26	328 25	329 24	330 23	331 23
21	331 38	332 37	333 36	334 35	335 35	336 34	337 33	338 32	339 31	340 30	341 29	342 28	343 28	344 27	345 26	346 25
22	346 40	347 40	348 39	349 38	350 37	351 36	352 35	353 34	354 34	355 33	356 32	357 31	358 30	359 29	0 28	1 28
23	1 43	2 42	3 41	4 40	5 39	6 39	7 38	8 37	9 36	10 35	11 34	12 33	13 33	14 32	15 31	16 30

table 4 des HO249 permettant le calcul de AH_{∞} pour une période de cinq ans : première partie donnant les arguments a et b

TABLE 4 — GHA γ FOR THE YEARS 2006-2014c. INCREMENT OF GHA γ FOR MINUTES AND SECONDS

	00 ^s	04 ^s	08 ^s	12 ^s	16 ^s	20 ^s	24 ^s	28 ^s		32 ^s	36 ^s	40 ^s	44 ^s	48 ^s	52 ^s	56 ^s	60 ^s	
m	o	r	o	r	o	r	o	r	m	o	r	o	r	o	r	o	r	m
00	0 00	0 01	0 02	0 03	0 04	0 05	0 06	0 07	00	0 08	0 09	0 10	0 11	0 12	0 13	0 14	0 15	00
01	0 15	0 16	0 17	0 18	0 19	0 20	0 21	0 22	01	0 23	0 24	0 25	0 26	0 27	0 28	0 29	0 30	01
02	0 30	0 31	0 32	0 33	0 34	0 35	0 36	0 37	02	0 38	0 39	0 40	0 41	0 42	0 43	0 44	0 45	02
03	0 45	0 46	0 47	0 48	0 49	0 50	0 51	0 52	03	0 53	0 54	0 55	0 56	0 57	0 58	0 59	1 00	03
04	1 00	1 01	1 02	1 03	1 04	1 05	1 06	1 07	04	1 08	1 09	1 10	1 11	1 12	1 13	1 14	1 15	04
05	1 15	1 16	1 17	1 18	1 19	1 20	1 21	1 22	05	1 23	1 24	1 25	1 26	1 27	1 28	1 29	1 30	05
06	1 30	1 31	1 32	1 33	1 34	1 35	1 36	1 37	06	1 38	1 39	1 40	1 41	1 42	1 43	1 44	1 45	06
07	1 45	1 46	1 47	1 48	1 49	1 50	1 51	1 52	07	1 53	1 54	1 55	1 56	1 57	1 58	1 59	2 00	07
08	2 00	2 01	2 02	2 03	2 04	2 05	2 06	2 07	08	2 08	2 09	2 10	2 11	2 12	2 13	2 14	2 15	08
09	2 15	2 16	2 17	2 18	2 19	2 20	2 21	2 22	09	2 23	2 24	2 25	2 26	2 27	2 28	2 29	2 30	09
10	2 30	2 31	2 32	2 33	2 34	2 35	2 36	2 37	10	2 38	2 39	2 40	2 41	2 42	2 43	2 44	2 45	10
11	2 45	2 46	2 47	2 48	2 49	2 50	2 51	2 52	11	2 53	2 54	2 55	2 56	2 57	2 58	2 59	3 00	11
12	3 00	3 01	3 02	3 03	3 04	3 05	3 06	3 07	12	3 08	3 09	3 10	3 11	3 12	3 13	3 14	3 15	12
13	3 16	3 17	3 18	3 19	3 20	3 21	3 22	3 23	13	3 24	3 25	3 26	3 27	3 28	3 29	3 30	3 31	13
14	3 31	3 32	3 33	3 34	3 35	3 36	3 37	3 38	14	3 39	3 40	3 41	3 42	3 43	3 44	3 45	3 46	14
15	3 46	3 47	3 48	3 49	3 50	3 51	3 52	3 53	15	3 54	3 55	3 56	3 57	3 58	3 59	4 00	4 01	15
16	4 01	4 02	4 03	4 04	4 05	4 06	4 07	4 08	16	4 09	4 10	4 11	4 12	4 13	4 14	4 15	4 16	16
17	4 16	4 17	4 18	4 19	4 20	4 21	4 22	4 23	17	4 24	4 25	4 26	4 27	4 28	4 29	4 30	4 31	17
18	4 31	4 32	4 33	4 34	4 35	4 36	4 37	4 38	18	4 39	4 40	4 41	4 42	4 43	4 44	4 45	4 46	18
19	4 46	4 47	4 48	4 49	4 50	4 51	4 52	4 53	19	4 54	4 55	4 56	4 57	4 58	4 59	5 00	5 01	19
20	5 01	5 02	5 03	5 04	5 05	5 06	5 07	5 08	20	5 09	5 10	5 11	5 12	5 13	5 14	5 15	5 16	20
21	5 16	5 17	5 18	5 19	5 20	5 21	5 22	5 23	21	5 24	5 25	5 26	5 27	5 28	5 29	5 30	5 31	21
22	5 31	5 32	5 33	5 34	5 35	5 36	5 37	5 38	22	5 39	5 40	5 41	5 42	5 43	5 44	5 45	5 46	22
23	5 46	5 47	5 48	5 49	5 50	5 51	5 52	5 53	23	5 54	5 55	5 56	5 57	5 58	5 59	6 00	6 01	23
24	6 01	6 02	6 03	6 04	6 05	6 06	6 07	6 08	24	6 09	6 10	6 11	6 12	6 13	6 14	6 15	6 16	24
25	6 16	6 17	6 18	6 19	6 20	6 21	6 22	6 23	25	6 24	6 25	6 26	6 27	6 28	6 29	6 30	6 31	25
26	6 31	6 32	6 33	6 34	6 35	6 36	6 37	6 38	26	6 39	6 40	6 41	6 42	6 43	6 44	6 45	6 46	26
27	6 46	6 47	6 48	6 49	6 50	6 51	6 52	6 53	27	6 54	6 55	6 56	6 57	6 58	6 59	7 00	7 01	27
28	7 01	7 02	7 03	7 04	7 05	7 06	7 07	7 08	28	7 09	7 10	7 11	7 12	7 13	7 14	7 15	7 16	28
29	7 16	7 17	7 18	7 19	7 20	7 21	7 22	7 23	29	7 24	7 25	7 26	7 27	7 28	7 29	7 30	7 31	29
30	7 31	7 32	7 33	7 34	7 35	7 36	7 37	7 38	30	7 39	7 40	7 41	7 42	7 43	7 44	7 45	7 46	30
31	7 46	7 47	7 48	7 49	7 50	7 51	7 52	7 53	31	7 54	7 55	7 56	7 57	7 58	7 59	8 00	8 01	31
32	8 01	8 02	8 03	8 04	8 05	8 06	8 07	8 08	32	8 09	8 10	8 11	8 12	8 13	8 14	8 15	8 16	32
33	8 16	8 17	8 18	8 19	8 20	8 21	8 22	8 23	33	8 24	8 25	8 26	8 27	8 28	8 29	8 30	8 31	33
34	8 31	8 32	8 33	8 34	8 35	8 36	8 37	8 38	34	8 39	8 40	8 41	8 42	8 43	8 44	8 45	8 46	34
35	8 46	8 47	8 48	8 49	8 50	8 51	8 52	8 53	35	8 54	8 55	8 56	8 57	8 58	8 59	9 00	9 01	35
36	9 01	9 02	9 03	9 04	9 05	9 06	9 07	9 08	36	9 10	9 11	9 12	9 13	9 14	9 15	9 16	9 17	36
37	9 17	9 18	9 19	9 20	9 21	9 22	9 23	9 24	37	9 25	9 26	9 27	9 28	9 29	9 30	9 31	9 32	37
38	9 32	9 33	9 34	9 35	9 36	9 37	9 38	9 39	38	9 40	9 41	9 42	9 43	9 44	9 45	9 46	9 47	38
39	9 47	9 48	9 49	9 50	9 51	9 52	9 53	9 54	39	9 55	9 56	9 57	9 58	9 59	10 00	10 01	10 02	39
40	10 02	10 03	10 04	10 05	10 06	10 07	10 08	10 09	40	10 10	10 11	10 12	10 13	10 14	10 15	10 16	10 17	40
41	10 17	10 18	10 19	10 20	10 21	10 22	10 23	10 24	41	10 25	10 26	10 27	10 28	10 29	10 30	10 31	10 32	41
42	10 32	10 33	10 34	10 35	10 36	10 37	10 38	10 39	42	10 40	10 41	10 42	10 43	10 44	10 45	10 46	10 47	42
43	10 47	10 48	10 49	10 50	10 51	10 52	10 53	10 54	43	10 55	10 56	10 57	10 58	10 59	11 00	11 01	11 02	43
44	11 02	11 03	11 04	11 05	11 06	11 07	11 08	11 09	44	11 10	11 11	11 12	11 13	11 14	11 15	11 16	11 17	44
45	11 17	11 18	11 19	11 20	11 21	11 22	11 23	11 24	45	11 25	11 26	11 27	11 28	11 29	11 30	11 31	11 32	45
46	11 32	11 33	11 34	11 35	11 36	11 37	11 38	11 39	46	11 40	11 41	11 42	11 43	11 44	11 45	11 46	11 47	46
47	11 47	11 48	11 49	11 50	11 51	11 52	11 53	11 54	47	11 55	11 56	11 57	11 58	11 59	12 00	12 01	12 02	47
48	12 02	12 03	12 04	12 05	12 06	12 07	12 08	12 09	48	12 10	12 11	12 12	12 13	12 14	12 15	12 16	12 17	48
49	12 17	12 18	12 19	12 20	12 21	12 22	12 23	12 24	49	12 25	12 26	12 27	12 28	12 29	12 30	12 31	12 32	49
50	12 32	12 33	12 34	12 35	12 36	12 37	12 38	12 39	50	12 40	12 41	12 42	12 43	12 44	12 45	12 46	12 47	50
51	12 47	12 48	12 49	12 50	12 51	12 52	12 53	12 54	51	12 55	12 56	12 57	12 58	12 59	13 00	13 01	13 02	51
52	13 02	13 03	13 04	13 05	13 06	13 07	13 08	13 09	52	13 10	13 11	13 12	13 13	13 14	13 15	13 16	13 17	52
53	13 17	13 18	13 19	13 20	13 21	13 22	13 23	13 24	53	13 25	13 26	13 27	13 28	13 29	13 30	13 31	13 32	53
54	13 32	13 33	13 34	13 35	13 36	13 37	13 38	13 39	54	13 40	13 41	13 42	13 43	13 44	13 45	13 46	13 47	54
55	13 47	13 48	13 49	13 50	13 51	13 52	13 53	13 54	55	13 55	13 56	13 57	13 58	13 59	14 00	14 01	14 02	55
56	14 02	14 03	14 04	14 05	14 06	14 07	14 08	14 09	56	14 10	14 11	14 12	14 13	14 14	14 15	14 16	14 17	56
57	14 17	14 18	14 19	14 20	14 21	14 22	14 23	14 24	57	14 25	14 26	14 27	14 28	14 29	14 30	14 31	14 32	57
58	14 32	14 33	14 34	14 35	14 36	14 37	14 38	14 39	58	14 40	14 41	14 42	14 43	14 44	14 45	14 46	14 47	58
59	14 47	14 48	14 49	14 50	14 51	14 52	14 53	14 54	59	14 55	14 56	14 57	14 58	14 59	15 00	15 01	15 02	59

Example. The value of GHA γ for 2012 August 17 at 05^h 11^m 41^s UT is (a) 310° 00' + (b) 090° 59' + (c) 002° 55' = 043° 54'.

table 4 des HO249 permettant le calcul de AH_{30} pour une période de cinq ans : seconde et dernière partie donnant l'argument c

TABLE 6 — CORRECTION (Q) FOR *POLARIS*

LHA Y	Q	LHA Y	Q	LHA Y	Q	LHA Y	Q	LHA Y	Q	LHA Y	Q	LHA Y	Q
359 01	-31	87 17	-28	123 10	-5	155 56	+18	209 49	+41	284 52	+18	317 47	-5
1 06	-32	89 10	-27	124 34	-4	157 29	+19	232 32	+40	286 25	+17	319 11	-6
3 18	-33	90 59	-26	125 58	-3	159 03	+20	238 15	+39	287 56	+16	320 35	-7
5 35	-34	92 46	-25	127 21	-2	160 39	+21	242 31	+38	289 27	+15	321 59	-8
8 01	-35	94 30	-24	128 44	-1	162 16	+22	246 05	+37	290 56	+14	323 24	-9
10 38	-36	96 12	-23	130 08	0	163 54	+23	249 14	+36	292 25	+13	324 49	-10
13 27	-37	97 52	-22	131 32	+1	165 35	+24	252 05	+35	293 53	+12	326 15	-11
16 33	-38	99 30	-21	132 55	+2	167 17	+25	254 42	+34	295 20	+11	327 41	-12
20 05	-39	101 07	-20	134 19	+3	169 02	+26	257 10	+33	296 46	+10	329 08	-13
24 18	-40	102 41	-19	135 42	+4	170 50	+27	259 29	+32	298 12	+9	330 35	-14
29 57	-41	104 15	-18	137 06	+5	172 40	+28	261 41	+31	299 38	+8	332 04	-15
52 24	-40	105 47	-17	138 30	+6	174 34	+29	263 48	+30	301 03	+7	333 33	-16
58 03	-39	107 18	-16	139 54	+7	176 32	+30	265 49	+29	302 27	+6	335 03	-17
62 16	-38	108 48	-15	141 18	+8	178 33	+31	267 47	+28	303 51	+5	336 34	-18
65 48	-37	110 17	-14	142 43	+9	180 40	+32	269 41	+27	305 15	+4	338 06	-19
68 54	-36	111 46	-13	144 09	+10	182 52	+33	271 31	+26	306 39	+3	339 40	-20
71 43	-35	113 13	-12	145 35	+11	185 11	+34	273 19	+25	308 02	+2	341 14	-21
74 20	-34	114 40	-11	147 01	+12	187 39	+35	275 04	+24	309 26	+1	342 51	-22
76 46	-33	116 06	-10	148 28	+13	190 16	+36	276 46	+23	310 49	0	344 29	-23
79 03	-32	117 32	-9	149 56	+14	193 07	+37	278 27	+22	312 13	-1	346 09	-24
81 15	-31	118 57	-8	151 25	+15	196 16	+38	280 05	+21	313 37	-2	347 51	-25
83 20	-30	120 22	-7	152 54	+16	199 50	+39	281 42	+20	315 00	-3	349 35	-26
85 21	-29	121 46	-6	154 25	+17	204 06	+40	283 18	+19	316 23	-4	351 22	-27
87 17		123 10		155 56		209 49		284 52		317 47		353 11	

The above table, which does *not* include refraction, gives the quantity *Q* to be applied to the corrected sextant altitude of *Polaris* to give the latitude of the observer. In critical cases ascend.

Polaris: Mag. 2.1, SHA 318° 49', Dec N 89° 18.7'

TABLE 7 — AZIMUTH OF *POLARIS*

LHA Y	Latitude							LHA Y	Latitude						
	0°	30°	50°	55°	60°	65°	70°		0°	30°	50°	55°	60°	65°	70°
0	0.5	0.5	0.7	0.8	0.9	1.1	1.4	180	359.5	359.5	359.3	359.2	359.1	358.9	358.7
10	0.4	0.4	0.6	0.6	0.7	0.9	1.1	190	359.6	359.6	359.5	359.4	359.3	359.2	359.0
20	0.2	0.3	0.4	0.4	0.5	0.6	0.7	200	359.8	359.7	359.6	359.6	359.5	359.4	359.3
30	0.1	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.4	210	359.9	359.8	359.8	359.8	359.7	359.7	359.6
40	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	220	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
50	359.9	359.9	359.8	359.8	359.8	359.7	359.7	230	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3
60	359.8	359.7	359.6	359.6	359.5	359.5	359.3	240	0.2	0.3	0.3	0.4	0.4	0.5	0.6
70	359.7	359.6	359.5	359.4	359.3	359.2	359.0	250	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
80	359.6	359.5	359.3	359.2	359.1	359.0	358.7	260	0.4	0.5	0.7	0.7	0.8	1.0	1.2
90	359.5	359.4	359.2	359.1	358.9	358.8	358.5	270	0.5	0.6	0.8	0.9	1.0	1.2	1.5
100	359.4	359.3	359.1	359.0	358.8	358.6	358.2	280	0.6	0.7	0.9	1.0	1.2	1.4	1.7
110	359.4	359.3	359.0	358.9	358.7	358.5	358.1	290	0.6	0.7	1.0	1.1	1.3	1.5	1.9
120	359.3	359.2	358.9	358.8	358.6	358.4	358.0	300	0.7	0.8	1.0	1.2	1.3	1.6	2.0
130	359.3	359.2	358.9	358.8	358.6	358.4	358.0	310	0.7	0.8	1.1	1.2	1.4	1.6	2.0
140	359.3	359.2	358.9	358.8	358.6	358.4	358.0	320	0.7	0.8	1.1	1.2	1.4	1.6	2.0
150	359.3	359.2	359.0	358.9	358.7	358.5	358.1	330	0.7	0.8	1.0	1.1	1.3	1.6	1.9
160	359.4	359.3	359.1	359.0	358.8	358.6	358.3	340	0.6	0.7	0.9	1.1	1.2	1.4	1.8
170	359.5	359.4	359.2	359.1	358.9	358.8	358.5	350	0.5	0.6	0.8	0.9	1.1	1.3	1.6
180	359.5	359.5	359.3	359.2	359.1	358.9	358.7	360	0.5	0.5	0.7	0.8	0.9	1.1	1.4

When Cassiopeia is left (right), *Polaris* is west (east).

table 6 des HO249 permettant le calcul de la latitude du navire en observant la Polaire
et table 7 de l'azimut de la Polaire, valables neufs ans

273

Irregular variable; 2006 mag. 2-1

[illegible]

D'autres méthodes de calcul du point astronomique sont mise en œuvre actuellement mais elle nécessitent une calculatrice programmable ou un logiciel sur un ordinateur. L'automatisation de ces calculs donne un résultat immédiat, épargne les constructions graphiques et améliore la précision. L'utilisation des logiciels de navigation astronomiques reste marginale dans la marine marchande car cette technique reste, pour beaucoup de marins, au rang poussiéreux des vieux instruments de secours comme le compas magnétique.

b) La réglementation

L'OMI cite les mots « sextant » ou « navigation astronomique » en décrivant les compétences requises pour un officier de pont sur les navires de jauge brute supérieure à 500 tonneaux : les buts recherchés sont de déterminer la position du navire et de mesurer la variation du compas. L'officier doit maîtriser l'utilisation des « cartes marines, éphémérides nautiques, feuilles de pointage, chronomètre, sextant et calculatrice ». Aucune méthode de calcul n'est imposée. Le recours aux éphémérides sous forme numérique et aux logiciels n'est qu'une option. Aucun seuil de précision n'est fixé mais seulement « une erreur acceptable dans la limite imposée par les instruments et les méthodes employées ». La connaissance de navigation astronomique n'est pas exigée pour les marins navigant près des côtes.

Convention Standards of Training, Certification and Watchkeeping (STCW)

CHAPTER II

Guidance regarding the master and the deck department

Section B-II/1

[...]

Near-coastal voyages

7 The following subjects may be omitted from those listed in column 2 of table A-II/1 for issue of restricted certificates for service on near-coastal voyages, bearing in mind the safety of all ships which may be operating in the same waters :

1. **celestial navigation** ;

[...]

Training in celestial navigation

19 The following areas summarize the recommended training in **celestial navigation** :

2. correctly adjust **sextant** for adjustable errors ;
3. determine corrected reading of the **sextant altitude** of celestial bodies ;
4. accurate **sight reduction** computation, using a preferred method ;
5. calculate the **time of meridian altitude of the sun** ;
6. calculate **latitude by Polaris or by meridian altitude of the sun** ;
7. accurate plotting of position line(s) and position fixing ;
8. determine time of visible **rising/setting sun** by a preferred method ;
9. identify and select the most suitable **celestial bodies** in the twilight period ;
10. determine compass error by azimuth or by amplitude, using a preferred method ;
11. **nautical astronomy** as required to support the required competence in paragraphs 19.1 to 19.9 above.

20 Training in **celestial navigation** may include the use of electronic **nautical almanac and celestial navigation calculation software**.

S'il est obligatoire de savoir utiliser un sextant, il n'est pas nécessaire d'en posséder un à bord. Aucune convention (même la SOLAS : Safety Of Life at Sea) ou résolution de l'OMI n'impose explicitement d'avoir à bord un sextant et des éphémérides. Aucune performance minimum du sextant n'est fixée. Cette absence de texte officiel de l'OMI sur l'équipement astronomique doit être interprétée à la lumière du rôle de cette organisation : sa vocation est de donner les grands principes mondiaux pour la formation des marins, pour la sécurité dans la construction des navires et l'exécution du quart, etc mais elle laisse à chaque nation le soin de préciser la mise en œuvre de ces principes.

L'agence européenne pour la sécurité maritime (AESM ou EMSA pour European Maritime Safety Agency), opérationnelle depuis 2003, n'a pas vocation à s'immiscer dans les techniques de navigation. Son but est de fédérer les moyens de lutte contre les accidents maritimes et la pollution, de faciliter les indemnisations en cas de catastrophe, etc mais l'Europe n'impose rien dans l'équipement des navires marchands en matière de navigation astronomique.

La France copie les standards de la convention STCW pour la formation des marins. L'équipement obligatoire des navires de jauge brute supérieure à 500 tonneaux est décrit en détail par la division 221. Les Affaires Maritimes française y font la synthèse de la convention SOLAS et des arrêtés nationaux la complétant.

Division 221, chapitre V (sécurité de la navigation)

article 27 (cartes marines et publications nautiques : arrêtés des 10/06/03, 01/12/03 et 27/04/06)

[...]

1. Les navires qui s'éloignent de plus de 20 milles de la terre la plus proche doivent posséder les documents nautiques, instruments nautiques et matériels divers suivants :

[...]

<i>Instrument ou document</i>	<i>Commentaire</i>
- Éphémérides nautiques. - Tables pour le calcul du point astronomique. - Tables d'azimut	A bord des navires s'éloignant de plus de 200 milles d'un port.
2 montres d'habitacle, ou 1 centrale horaire avec réseau de distribution d'heure.	Une fixée sur la passerelle et une dans la machine
1 sextant avec ses accessoires.	A bord des navires s'éloignant de plus de 200 milles d'un port

Ce texte fixe une limite à 200 M des côtes entre navigation côtière et hauturière, alors que l'OMI n'introduisait qu'une distinction sémantique. En deçà de cette limite, le sextant et les éphémérides ne sont pas obligatoires pour les navires français. Pour les cartes et instructions nautiques, la division 221 précise qu'elles peuvent être sous forme papier ou numérique, compatible avec les mises à jour diffusées par le SHOM ; en revanche pour les éphémérides nautiques, aucun support n'est recommandé ou interdit, ni aucun éditeur officiel ou national.

Les autres nations procèdent de la même manière : lors des inspections de navire par les garde-côtes américains, seuls les équipements cités dans la convention SOLAS sont contrôlés. Quelques inspecteurs prennent l'initiative de demander les derniers points astronomiques effectués mais ne vérifient pas leur cohérence [PRV05]. Les textes réglementaires décrivant des inspections par les garde-côtes des États Unis ne citent jamais le sextant, les éphémérides ou la navigation astronomique [WW21].

Les sociétés de classification comme le Bureau Veritas (BV) ou Lloyd's Register (LR) sont des organisations privées qui établissent et appliquent des normes et standards techniques concernant :

- les projets de construction navale ;
- l'inspection des navires avant et après réparations ;
- périodiquement pendant toute la durée d'exploitation du navire.

En pratique ces sociétés s'appuient sur les réglementations de l'OMI et du pays en matière d'équipement pour la navigation astronomique [PRV04].

Les vetteurs sont des inspecteurs privés mandatés principalement par les compagnies pétrolières pour examiner les défauts du navire de charge, ceux de l'équipage et ceux du management technique et commercial afin de déterminer les risques encourus par l'expédition maritime. Ces compagnies pétrolières sont regroupées en association pour organiser ce contrôle et harmoniser les procédures. L'OCIMF (Oil Companies International Marine Forum) publie un formulaire d'inspection du navire, baptisé VIQ (Vessel Inspection Questionnaire), où la navigation astronomique est mentionnée [WWW22]. La formulation n'impose pas davantage de méthode ou de précision que la convention STCW.

Vessel Inspection Questionnaires – 15/01/2012 edition
OCIMF (Oil Companies International Marine Forum)

[...]

4.18 Are regular **gyro and magnetic compass errors** being taken and are they being recorded ?

Magnetic and gyro compass errors should be checked and recorded each watch, where possible, using either azimuth or transit bearings. A record of magnetic and gyro compass courses to steer and compass errors should be maintained and kept available to the helmsman (BPG 4.6.3).

Note: The error of the gyro should be determined by external observations – **celestial** bearings, transits etc.

[...]

4.31 Was **position fixing** satisfactory throughout the previous voyage and the frequency of plotted fixes in accordance with the passage plan ?

Good navigational practice demands that the officer of the watch :

- Understands the capabilities and limitations of the navigational aids and systems being used and continually monitors their performance ;
- Uses the echo sounder to monitor changes in water depth ;
- Uses dead reckoning techniques to check position fixes ;
- Cross-checks position-fixes using independent sources of information: this is particularly important when electronic position-fixing systems, such as GPS are used as the primary means of fixing the position of the ship ;
- Uses visual navigation aids to support electronic position-fixing methods, i.e. landmarks in coastal areas and **celestial navigation** in open waters ;

[...]

L'IMCA (International Marine Contractors Association) regroupe les compagnies maritimes opérant dans les travaux offshore et sous-marins, notamment avec les navire équipés pour le positionnement dynamique. Cette association publie un guide d'inspection des navires destiné à s'assurer que la sécurité des personnes et de l'environnement ne sont pas menacées : compétence de l'équipage, performance du matériel, etc. Ce guide est appelé Common Marine Inspection Document (CMID) et ne contient aucune exigence en matière de navigation astronomique [WWW23].

Les P&I (Protection and Indemnity) sont des assurances maritimes couvrant les risques du navire et de sa cargaison. Elles sont organisées comme une mutuelle dont les membres sont les compagnies maritimes. Comme les vetteurs, elles effectuent des inspections de navire mais n'ont pas d'exigence particulières en navigation astronomique. En effet cette technique n'est pas à l'origine des accidents maritimes produits depuis plusieurs décennies.

Les différents inspecteurs ci-dessus sont parfois d'anciens marins ayant connu l'arrivée du GPS sur les passerelles de navires marchands. Certains d'entre eux, nostalgiques ou passionnés de navigation astronomique, prennent l'initiative de demander à l'équipage le relevé des dernières points astronomiques, le cahier de surveillance des chronomètres ou les mesures de variations des compas effectuées à l'aide des astres. Cependant aucune remarque dans ce domaine n'a empêché un navire de naviguer [PRV05]. Les inspecteurs plus jeunes, mandatés par des compagnies privées ou par l'état, ont peu ou pas d'expérience maritime : il devient rarissime qu'ils prennent le temps et le soin de contrôler les observations astronomiques effectuées par l'équipage.

c) La pratique

Hormis les navires pétroliers où les vetteurs exigent des observations astronomiques (comme un indicateur des compétences générales des officiers de quart en passerelle), la pratique de cette technique reste isolée :

- le commandant nostalgique du sextant ou méfiant du GPS, qui contraint ses officiers à s'entraîner ;
- le lieutenant passionné d'astronomie ;
- l'élève qui tente de mettre en pratique les exercices imposés par son programme de formation...

Les inspecteurs de navire, qui demandent à voir le sextant du bord, rapportent combien l'équipage est parfois gêné de ne pas savoir où est rangé l'instrument !

L'heure est souvent lue sur la montre de l'observateur, l'ordinateur de la passerelle ou l'écran du récepteur GPS. Dans le meilleur de ces cas, la montre de l'observateur et l'ordinateur ont été recalés sur l'heure UTC du récepteur GPS à la seconde près. Mais si le marin ne s'entraîne pas à pratiquer la navigation astronomique avec son chronomètre de marine, il risque de commettre des erreurs de position et de direction en cas de panne durable du GPS. D'autre part, entre l'heure UTC du récepteur GPS et l'heure UT des éphémérides il peut y avoir jusqu'à 0,9 s d'écart, soit 13,5 " d'erreur supplémentaire sur la longitude et environ 400 m sur la position.

Les calculs sont souvent effectués par un logiciel d'aide à la navigation astronomique :

- calcul automatique d'éphémérides ;
- aide à l'identification des astres dans le ciel ;
- lissage d'une série de hauteurs sur le même astre pour éliminer les erreurs de l'observateur ;
- enregistrement de la table d'excentricité de chaque sextant ;
- calcul automatique des corrections de hauteur selon la hauteur de la passerelle ;
- calcul des azimuts et intercepts pour chaque droite de hauteur ;
- tracé et calcul automatique du point, etc.

Si la raison d'être de l'astronomie est d'offrir une alternative au positionnement au large en cas de panne durable du GPS ou d'abandon du navire, il serait souhaitable de s'entraîner dans des conditions similaires :

- l'ordinateur et son alimentation électrique seront-ils disponibles à bord des canots ou radeaux de sauvetage ?
- la calculatrice résistera-t-elle à l'humidité, voire à l'immersion ?
- et pour aller plus loin, la procédure d'abandon prévoit-elle d'emporter des tables de calcul du point, une règle à calcul ou des abaques... des feuilles de papier et crayons ?

La formation des marins hauturiers en navigation astronomique en 2013 semble donc motivée par la nécessité d'avoir un moyen de positionnement redondant avec le GPS mais la mise en œuvre réglementaire et pratique dépasse rarement le stade de la bonne intention. Certes la probabilité d'une panne durable du GPS est quasi-nulle. Certes l'avarie électrique durable à bord et l'absence de récepteurs GPS autonomes en énergie sont peu probables. Certes un navire marchand ou ses radeaux sans moyen de positionnement au large à 1 M près ont peu de conséquences, d'autant plus que le SMDSM (Système Mondial de Détresse et de Sauvetage en Mer) offre la possibilité de signaler à la terre la position des sinistrés (par relais des coordonnées GPS calculées par leur balise ou par mesures de l'effet Doppler-Fizeau avec les satellites défilants). Certes d'autres constellations de satellites de positionnement sont en cours de déploiement (GLONASS, GALILEO). En attendant, on accepte tacitement de pourvoir se retrouver au large sans moyen de positionnement.

L'aviation civile a utilisé la navigation astronomique jusqu'aux années 1990 : les pilotes étaient formés à l'observation des astres, au calcul du point et au suivi de caps à l'aide des astres. Les avions étaient équipés d'un « skydome » ou d'un sextant périscopique avec horizon artificiel et stabilisation pas gyroscope. La documentation embarquée comportait des éphémérides et des tables de corrections de hauteur selon l'altitude de vol et la température mais aussi selon la latitude et la vitesse (correction de Coriolis). Entre deux points astronomiques, le cap et la position était fourni par une centrale inertielle.

Après quelques années d'essai du GPS, l'aviation civile mondiale a délibérément abandonné la navigation astronomique. Pour les longs trajets où aucune tour de contrôle ne peut surveiller et guider le pilote, la position et le cap sont mesurés à l'aide du GPS. Une centrale inertielle surveille les éventuels écarts brutaux de position GPS et prend le relais en cas de perte du signal.

La précision du GPS en mode différentiel a tant séduit l'aviation civile que c'est devenu une alternative aux instruments d'aide à l'atterrissage (ILS : Instrument Landing System) pour les vols sans visibilité (IFR : Instrument Flight Rules). Certains aéroports modernes n'ont pas ou plus d'ILS, préférant exploiter une balise différentielle beaucoup moins onéreuse à l'achat et à l'entretien.

L'aviation civile soutient lourdement le projet GALILEO dans lequel elle voit une alternative indispensable au GPS et plus crédible que l'astronomie.

d) La concurrence du GPS et de l'ECDIS

La précision du GPS et l'automatisation du calcul de la position du navire ont séduit les marins. Après quelques années de cohabitation avec la navigation astronomique au large et avec les observations d'amers terrestre (relèvement compas et distance radar, voire lignes de sondes) le long des côtes, le GPS s'est imposé. Accessible à peu de frais à un marin peu instruit des mathématiques et de l'astronomie, le positionnement par GPS apporte un sentiment de sécurité en raison de sa fiabilité incontestable. Autrefois on était sûr à 100 % d'être à moins d'1 M du point porté sur la carte, maintenant on est sûr à 95 % d'être à moins de 10 mètres de la position calculée par le GPS, sûr à 99,9 % d'être à 15 m, mais jamais sûr à 100 % d'être à moins d'1 M. Avec un à dix points calculés par seconde (selon le nombre de satellites visibles), le risque semble écarté de commettre une erreur avec le GPS.

La disponibilité du GPS est imparfaite (répartition géométrique des satellites dans le ciel dégradant la précision, tempêtes solaires perturbant l'ionosphère et donc la trajectoire des signaux satellites, indisponibilité d'un satellite, sensibilité au brouillage...) mais reste meilleure que les astres observés au sextant (horizon masqué par la brume ou invisible par nuit noire, nuage devant le soleil, observation impossible par fort vent ou mouvements du navire). L'automatisation des mesures et du calcul du point par le récepteur GPS libère un temps précieux pour le chef de quart, permettant de lui confier de nouvelles tâches (l'arrivée du GPS à bord coïncide avec la disparition des officiers-radio) et, finalement, de réduire des effectifs en passerelle.

Les signaux GPS permettent de connaître l'heure UTC avec une précision meilleurs que l'horloge à quartz, de mesurer la vitesse du navire avec l'effet Doppler-Fizeau, de connaître le cap et les attitudes du navire (gîte, assiette) par mesure du déphasage entre deux antennes proches... La précision des informations et le faible coût (achat et installation) convaincront-ils l'OMI d'abandonner l'horloge autonome, le loch et le compas gyroscopique sur les navires marchands ?

La carte électronique (ECDIS pour Electronic Chart Display Information System) a porté le coup final à la navigation traditionnelle. Après deux décennies de cohabitation avec la carte papier, l'ECDIS est en train de s'imposer exclusivement parmi les compétences des jeunes marins. Comme pour l'astronomie, la navigation par relevés d'amer et distances radar est de moins en moins pratiquée. L'expérience, indispensable à la précision de ces techniques traditionnelles, s'étiole... justifiant d'autant plus l'utilisation de l'ECDIS.

Parmi les normes de l'ECDIS, il est prévu que les relèvements d'amer au compas et les droites de hauteur puissent être tracées sur la carte électronique. Mais ces fonctions sont si complexes à réaliser avec une souris (en attendant une intégration des capteurs correspondant) qu'elles sont rarement utilisées... justifiant d'autant plus l'utilisation du GPS.

En résumé, la navigation astronomique en 2013 est considérée comme un moyen de positionnement de secours pour le cas très improbable d'une panne durable du GPS (constellation des satellites ou du récepteur, voire brouillage) ou une avarie majeure à bord. Les documents et instruments dédiés à la navigation astronomiques sont optimisés pour un compromis entre précision du point final d'environ 1 M et simplicité d'exécution avec des moyens rudimentaires. Ainsi la faible occurrence des situations où la navigation astronomie deviendrait indispensable justifie la médiocre précision recherchée ; la médiocre précision et la complexité de la navigation astronomique justifient de la ranger parmi les moyens de secours, non loin des objets décoratifs ou des souvenirs. Avec cet état d'esprit et les performances croissantes des constellations de satellites de positionnement, la marine marchande prend le même chemin, tacitement mais inéluctablement, que l'aviation civile.

L'avenir de la navigation astronomique sur les navires de commerce semble donc très incertain.

2. AMÉLIORATION DE LA NAVIGATION ASTRONOMIQUE

Pour redonner de l'intérêt à la navigation astronomique, il faudrait qu'elle rattrape son principal concurrent, le GPS et ses cousins GLONASS, GALILEO en matière de :

- précision du point final, par exemple entre 10 et 100 mètres au large ;
- facilité d'observation par le chef de quart, voire automatisation ;
- rapidité d'exécution du calcul du point ;
- liaison numérique avec la carte électronique pour afficher la position calculée ;
- fréquence des points par une observation continue des astres ou une estime très précise entre deux points observés.

La navigation astronomique pourrait même séduire si elle pouvait permettre :

- un calcul du point en trois dimensions ;
- un calcul de DOP et un rayon du cercle d'erreur ;
- une hybridation avec les autres observations : relèvement compas, distance radar, hauteur et/ou distance d'un satellite artificiel (GPS, télécommunications, observation) ;
- une mesure de vitesse du navire sur les trois axes ;
- la détermination du cap et des attitudes du navire ;
- le recalage des horloges.

Cette technique a déjà des avantages sur son concurrent :

- les astres naturels ne sont contrôlés par aucune nation ou compagnie privée ;
- contrairement au GPS, dont le récent détournement du yacht «White Roses of Drachs » a prouvé la possibilité de leurrage [WWW81], aucun brouillage d'origine humaine ne peut interrompre durablement le « service » stellaire ;
- le coût financier pour la maintenance des astres est nul ;
- l'abonnement au service de la meilleure précision possible est gratuit ;
- le DOP du point GPS est fixé par la disposition des quelques satellites visibles alors que celui d'un point astronomique peut être aisément réduit par le choix judicieux d'étoiles parmi les nombreuses visibles ;
- la précision du point GPS a une limite théorique de 6,5 m (en accès publique) au large alors que la limite de précision du point astronomique est repoussée par les continuels progrès technologiques ;
- la théorie du point astronomique en trois dimensions peut être élargie à un observateur dans l'espace, tandis que le GPS ne fonctionne qu'au voisinage de la Terre.

Dans cette seconde partie nous chercherons les informations et technologies existant en 2013 qui permettraient d'atteindre le maximum des objectifs ci-dessus. La cible de cette étude restant le navire de commerce, nous tiendrons compte du coût des solutions envisagées ou du délai nécessaire pour que les technologies deviennent suffisamment performantes et abordables.

a) Les éphémérides nautiques

Une précision de 100 m sur le point final impose que l'information à la base du calcul soit d'une précision égale ou meilleure. Puisque 1 M = 1852 m représente (au plus) 1 ' de coordonnée géographique (latitude ou longitude), 100 m représentent $1' \cdot \frac{100\text{ m}}{1852\text{ m}} = 0,053996' = 3,2397'' = 15,706 \cdot 10^{-6} \text{ rad}$ et 10 m correspondent à 0,3 " = 1,6 μrad .

Peut-on générer des éphémérides nautiques avec une précision d'environ 3 " à 0,3 " ?

Les éphémérides nautiques sont calculées à l'aide de modèles décrivant le mouvement des planètes autour du Soleil (repère héliocentrique). Les modèles dynamiques reposent sur les lois physiques exprimées dans un système d'équations différentielles. Leur résolution nécessite une intégration et la connaissance d'une situation initiale. Ces dernières décennies, la puissance croissante des ordinateurs a facilité les calculs et, avec l'amélioration des instruments d'observation spatiale, permis de déterminer les constantes d'intégration en mesurant le système solaire.

Les principaux modèles planétaires récents sont développés en France, en Russie et aux États Unis par des astronomes qui collaborent au sein de l'Union Astronomique Internationale (UAI) :

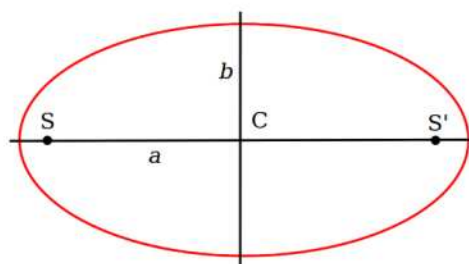
- VSOP détaillé ci-dessous ;
- INPOP (Intégration Numérique Planétaire de l'Observatoire de Paris) modèle dynamique de l'éphéméride planétaire et lunaire exploitant la télémétrie laser avec la Lune, actuellement dans sa version 10, de l'IMCCE ;
- EPM (Ephemerides of the Planets and the Moon) développées en 2009 à l'IAA RAS (Institute of Applied Astronomy Russian Academy of Sciences) ;
- DE406 éphémérides planétaires (et LE406 pour la Lune), valables du 23/02/-3000 au 06/05/3000, développées par le Jet Propulsion Laboratory (JPL) fondé par la NASA (National Aeronautics and Space Administration) et le CALTECH (CALifornia institute of TECHnology) en Californie.

Le modèle planétaire VSOP (variations séculaires des orbites planétaires) est basé sur les travaux de P. BRETAGNON et G. FRANCOU [WWW10] :

- 1982 calcul des éléments orbitaux des planètes le 1^{er} janvier 2000 à 12h TT (appelé à l'instant J2000) où $TT = TAI + 32,184 \text{ s}$ avec TT le temps terrestre, TAI le temps Atomique international et un écart en seconde, qui croît de manière irrégulière en raison du ralentissement de la rotation terrestre ; cette première version permet le calcul des positions des planètes du 28/03/1599 au 02/01/2050 ;
- 1987 calcul directe de la position des planètes en coordonnées écliptiques héliocentriques (longitude l , latitude b et rayon vecteur r) et meilleure précision des éléments orbitaux ; pour les dates du 21/12/1549 au 30/01/2350 ;
- 2000 amélioration de la précision d'un facteur 100 à 1000 ;
- 2002 ajout de corrections diverses (perturbations lunaires, relativité), amélioration de la précision d'un facteur 10 ;
- 2004 prise en compte des perturbations produites par la ceinture d'astéroïdes (située entre les orbites de Mars et Jupiter), par l'aplatissement du Soleil, et par Pluton.
- 2013 amélioration de la précision, calculs étendus du 16/08/-4501 au 09/03/4500.

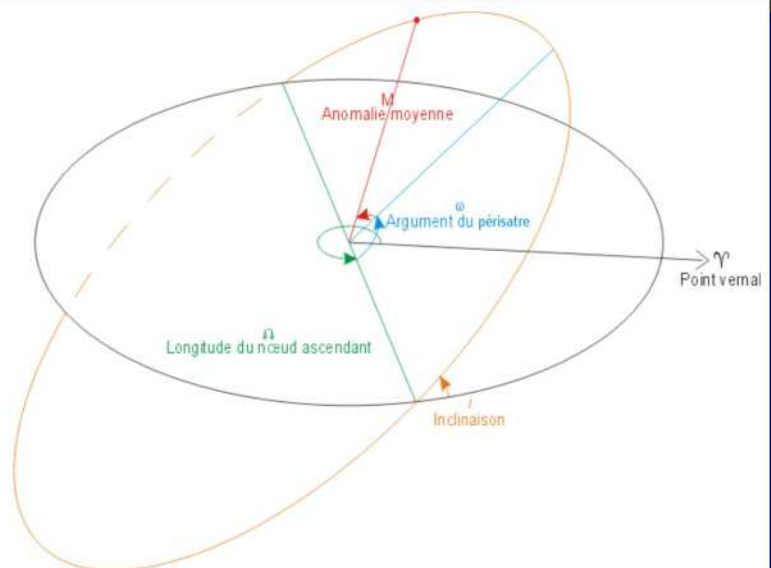
Les éléments orbitaux représentent la situation initiale nécessaire au calcul d'intégration [WWW11] :

- demi-grand axe a
- excentricité $e = \frac{SC}{a}$ avec
S et S' les foyers de l'ellipse



éléments orbitaux permettant de prédire la position d'une planète (wikipedia)

- inclinaison i du plan contenant l'orbite de la planète au-dessus du plan de l'écliptique (= plan de l'orbite terrestre)
- longitude du nœud ascendant Ω
- argument du périastre ω
- instant de passage au périastre τ appelé aussi anomalie moyenne M



éléments orbitaux permettant de prédire la position d'une planète (wikipedia)

Dans le passé et le futur la précision des positions prédites dépend des astres :

- Mercure, Venus, le barycentre Terre-Lune et Mars sont calculées avec une précision de 1 " de 4000 ans avant et après J2000 (1^{er} janvier 2000 à 12h TT), soit de 2000 AVJC à 6000 APJC ;
- Jupiter et Saturne sont calculées avec une précision de 1 " de plus de 2000 ans avant et après J2000 ;
- Uranus et Neptune sont calculées avec une précision de 1 " de plus de 6000 ans avant et après J2000.

Au XXI^{ème} siècle, la précision avec laquelle on peut positionner une planète ou un satellite de planète est donnée dans le tableau ci-contre [WWW12] :

astre	précision angulaire
Mercure	0,014 "
Vénus	0,002 "
Terre-Lune	0,018 "
Mars	0,264 "
Jupiter	0,038 "
Saturne	0,224 "
Uranus	0,042 "
Neptune	0,055 "
Pluton	0,737 "

précision des coordonnées de planètes calculées avec les théories INPOP10 et VSOP2013 entre 10/12/1499 et le 28/01/3000

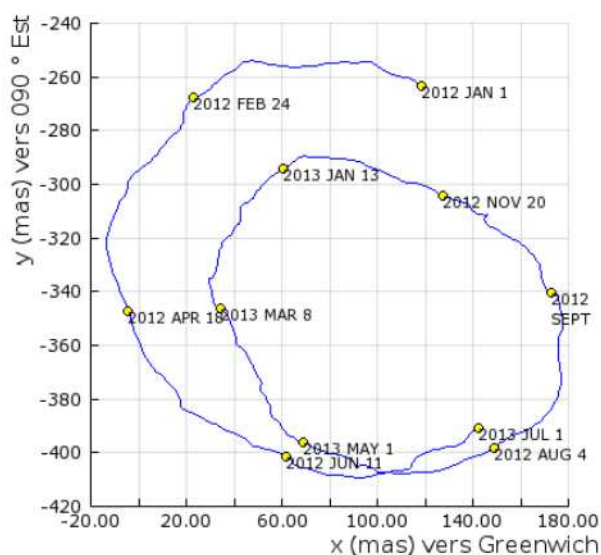
Le barycentre Terre-Lune traité par les modèle planétaires nécessite un autre modèle de la trajectoire de la Lune autour de la Terre afin de déterminer la position du point origine du repère géocentrique. Le modèle français INPOP10 exploitant la télémétrie laser sur la Lune (ou le modèle américain LE406) fournissent la position relative de la Lune et de la Terre avec une précision de 0,018 ".

L'axe de rotation terrestre sert de troisième axe dans le système des coordonnées géocentriques, les deux premiers étant dans le plan équatorial. Or l'axe de rotation terrestre est soumis à des mouvements périodiques de précession et de nutation. La précession dite « des équinoxes » signifie que la droite d'intersection des plans de l'écliptique (= orbite terrestre) et de l'équateur effectue une rotation de 360 ° en 25 700 ans. Ce phénomène est comparable à une toupie dont l'axe de rotation tourne en décrivant un cône autour de la verticale. La nutation est une oscillation de l'axe de rotation terrestre due à l'attraction gravitationnelle avec la Lune. Celle-ci décrit une trajectoire elliptique dont le grand axe décrit une rotation de 360 °. La nutation se traduit par une oscillation supplémentaire de l'axe de rotation de la Terre (autour de l'axe moyen qui précessionne en 25 700 ans), d'environ 17,2 " avec une période de 18,6 ans.

Le point vernal, donnant la direction du premier axe des coordonnées géocentriques, est situé sur la droite d'intersection des plans de l'écliptique et de l'équateur. Il est donc mobile et son mouvement, lié à celui de l'axe de rotation terrestre, est irrégulier. Pour éviter les problèmes créés par un repère mobile, les astronomes utilisent :

- un repère appelé J2000 avec le point vernal à la date du 1er janvier 2000 à 12h00 TT : ce sont les coordonnées « moyennes J2000 », servant de référence pour les catalogues d'étoiles ;
- un repère avec le point vernal du jour de l'observation : ce sont les coordonnées "vraies de la date", qui nécessitent une correction pour revenir au repère J2000 ;
- un repère avec un point vernal moyen pour une période (en général 50 ans) où seule la précession est prise en compte : ce sont les coordonnées « moyennes » de l'époque en cours [WWW43].

Les corrections à apporter pour passer du point vernal d'une époque à celui d'une autre période sont déterminées par l'International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS). Situé à l'observatoire de Paris, ce service combine les données d'un réseau de surveillance mondial (satellites GPS, étoiles lointaines) pour mesurer la position de l'axe de rotation terrestre avec une précision de 0,001 ". A la date du 1er août 2013 à 00h00 UTC, les coordonnées du pôle Nord sont $x = 0,17149$ " et $y = 0,36045$ " par rapport à un point origine ($x = y = 0$ ") où était le pôle Nord le 1er janvier 2000 à 12H00 TT. La précision de ces valeurs est de 0,05 " [WWW44]. L'IERS chargé de diffuser le système de référence astronomique internationale (ICRS International Celestial Reference System) a une précision de 0,01 " sur la position du point vernal [WWW49].

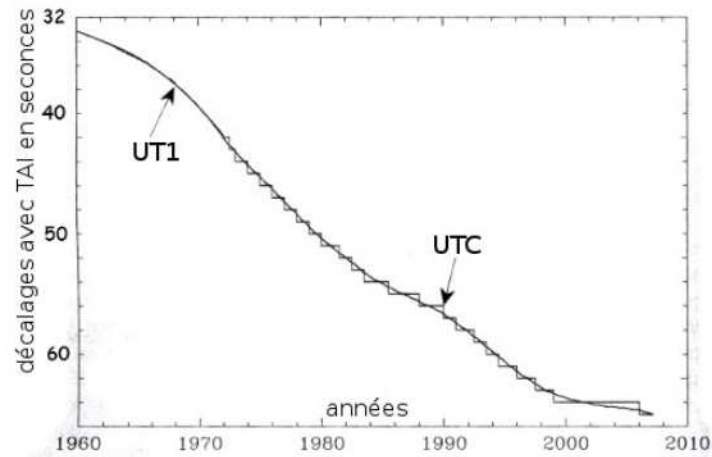


déplacements du pôle Nord de janvier 2012 à juillet 2013
1 mas = 0,001 " (= 3,09 cm à la surface terrestre) [WWW44]

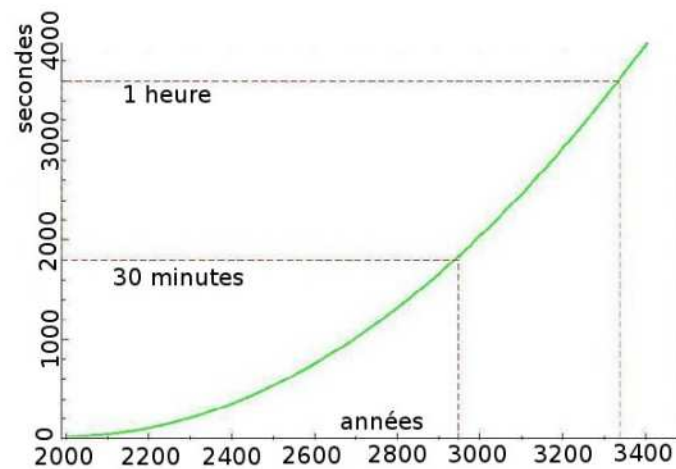
Le temps universel TU est l'angle mesuré dans le plan de l'équateur entre le méridien de Greenwich et une direction fixe dans l'univers. Le mouvement de la rotation terrestre est perturbé par des interactions avec la Lune et le Soleil, les variations du régime des vents et des variations de courants à l'intérieur du noyau de la Terre dont la science actuelle ne sait pas prédire les influences. Ainsi, un tour de la Terre sur elle-même en août est plus court d'une à deux millisecondes qu'un tour en février [WWW46]. La définition théorique de UT ne permet pas de le mesurer en « temps réel » alors on s'en approche avec UT1, le temps universel non uniforme, connu à posteriori par des observations de :

- la Lune et des satellites artificiels par télémétrie laser ;
- quasars extra-galactiques par interférométrie à très longue base ;
- la Terre depuis des satellites GPS, DORIS [WWW47].

Le temps atomique TAI (temps atomique international, moyennant a posteriori les mesures de plusieurs horloges atomiques dans le monde) est compté depuis 1955 et synchronisé sur l'instant du 01/07/1958 à 00h00 UT1. La précision presque parfaite du temps atomique fait apparaître un décalage croissant avec le temps universel. Ainsi est apparu le temps universel coordonné (UTC) : il est mesuré à court terme par des horloges à quartz ou atomiques et recalé sur le temps universel lorsque l'écart $UT1 - UTC$ approche de $\pm 0,9$ s. Ces recalages d'un temps atomique « trop régulier » sur le temps « observé » dans l'univers sont la conséquence du ralentissement de la rotation terrestre.



évolution du décalage entre TAI, UTC et UT1 de 1960 à 2010 [WWW43]



prévision du décalage entre TT et UTC
avec une durée du jour augmentant de 2 ms par siècle [WWW43]

Ce ralentissement est irrégulier : une seconde intercalaire par an de 1972 à 1983 mais une seule en sept ans de 1999 à 2006. Aucune seconde intercalaire ne sera ajoutée en 2013, d'après le bulletin C publié tous les six mois par l'IERS [WWW45].

01/07/12	35	01/07/83	22
01/01/09	34	01/07/82	21
01/01/06	33	01/07/81	20
01/01/99	32	01/01/80	19
01/07/97	31	01/01/79	18
01/01/96	30	01/01/78	17
01/07/94	29	01/01/77	16
01/07/93	28	01/01/76	15
01/07/92	27	01/01/75	14
01/01/91	26	01/01/74	13
01/01/90	25	01/01/73	12
01/01/88	24	01/07/72	11
01/07/85	23	01/01/72	10

secondes intercalaires [WWW29]

Le temps terrestre TT est un temps atomique dont l'origine est décalée du TAI avec l'écart $UT1 - TAI$ mesuré le 1er janvier 2000 à 12H00 TT : $TT = TAI + 32,184$ s. Ainsi TT et UTC sont séparés d'un nombre entier de secondes (+3 s en 2013). Le temps universel UT1 présente des irrégularités un million de fois plus grandes que celle du temps (atomique) terrestre TT. Ce dernier est donc l'échelle de temps choisie pour calculer les coordonnées des astres et générer des éphémérides.

La rotation terrestre s'effectue à $15^\circ/\text{heure}$ donc $15''/\text{s}$. Une erreur d'horloge de 1 s entraîne donc une erreur de position de $15'' = 0,25' = 0,25M = 0,25 \cdot 1852M = 463m$. Un logiciel de navigation astronomique doit donc être mis à jour du décalage $UT1 - UTC$ avec une précision de 0,216 s pour une précision de 3 " (à 100 m près) ou 0,022 s pour une précision de 0,3 " (à 10 m près). Le décalage $UT1 - UTC$ est mis à jour quotidiennement sur le site internet de l'IERS avec une précision de 0,001 ms : le 1er août 2013 à 00h00 UTC ce décalage est de 50,848 ms [WWW44].

Les étoiles sont fixes (vue de la Terre et à une échelle de temps humaine). Leur position dans un repère héliocentrique est donnée par des catalogues avec une précision meilleure que 0,1 " :

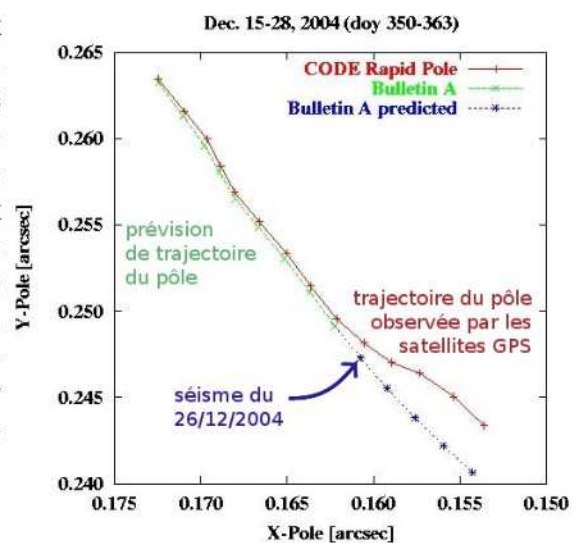
- le catalogue Tycho-2 donne les coordonnées, le mouvement propre (déplacement sur la voute céleste) et la magnitude des 2 539 913 d'étoiles les plus brillantes (magnitude $\leq 11,3$), mesurées lors de la mission spatiale européenne Hipparcos et publiées en 2000 ; sa précision est de 0,03 " ;
- le catalogue 2MASS (Two Micron All Sky Survey) est un projet réunissant le Jet Propulsion Laboratory (JPL), la NASA et d'autres institutions américaines : le ciel été intégralement scanné dans les bandes infrarouges J (centrée sur $1,25 \mu\text{m}$), H ($1,65 \mu\text{m}$) et K ($2,17 \mu\text{m}$) jusqu'à une magnitude respectivement de 15,0, 14,3 et 13,5 ; sa précision est de 0,08 " [WWW48].

En s'appuyant sur un modèle planétaire plus précis que 0,1 " près comme ceux cités plus haut, on peut donc prédire la position des étoiles à mieux que 0,3 " près dans un repère géocentrique et sur une période de plusieurs années.

Les coordonnées géocentriques des astres sont calculées à l'aide de formules de changement de repère en trois dimensions. Ces formules ne posent pas de difficultés de calcul, elles sont diffusées et mises en œuvre gratuitement par l'International Astronomical Union (IAU) sur son site internet ou par son logiciel SOFA présenté plus haut [WWW05].

Les éphémérides nautiques françaises sont publiées annuellement avec une précision de 0,1 ' pour laquelle le modèle planétaire VSOP87 est très largement suffisant. Pour les besoins de l'exploration spatiale, on est amené à construire des éphémérides de dernière minute ultra précises mais se dégradant très rapidement dans le temps. Pour un logiciel de navigation astronomique à 3 " (précision du point à 100 m près), les modèles actuels sont suffisants. Pour une précision de 0,3 " (point précis à 10 m près), on évitera d'observer Mars et Saturne (et Pluton) dont l'erreur sur les coordonnées s'ajoute à celle des modèles planétaires et dépasse 0,3 ".

Des événements imprévisibles peuvent modifier la réalité, malgré tous les moyens d'observation et de calculs de prévision des coordonnées des astres. Un séisme de forte magnitude peut modifier la trajectoire de l'axe de rotation terrestre de quelques secondes d'angle et changer la durée du jour concerné de quelques micro-secondes. La position des pôles sur la croûte terrestre ne change pas mais leur direction dans l'espace est perturbée. Les valeurs angulaires ci-dessous sont contestées car il est difficile d'établir un lien de cause à effet, mise à part la date, entre séisme et décalage des pôles [LIV09].



déplacement de l'axe de rotation terrestre suite au séisme du 26/12/2004 au large de Sumatra: une croix par jour [WWW37]

date	26/12/04	27/02/10	11/03/11
lieu	au large de Sumatra	Chili	au large du Japon
magnitude	9,1	8,8	9
décalage angulaire de l'axe de rotation terrestre	0,00232 "	0,00267 "	0,0055 "
décalage linéaire de l'axe de rotation terrestre	7 cm	8 cm	17 cm
modification de la durée du jour du séisme	- 6,8 μ s	- 1,26 μ s	- 1,8 μ s

influence des séismes récents sur l'axe de rotation terrestre (espace) et la rotation terrestre (temps) mesurée par le Jet Propulsion Laboratory (NASA) [WWW38]

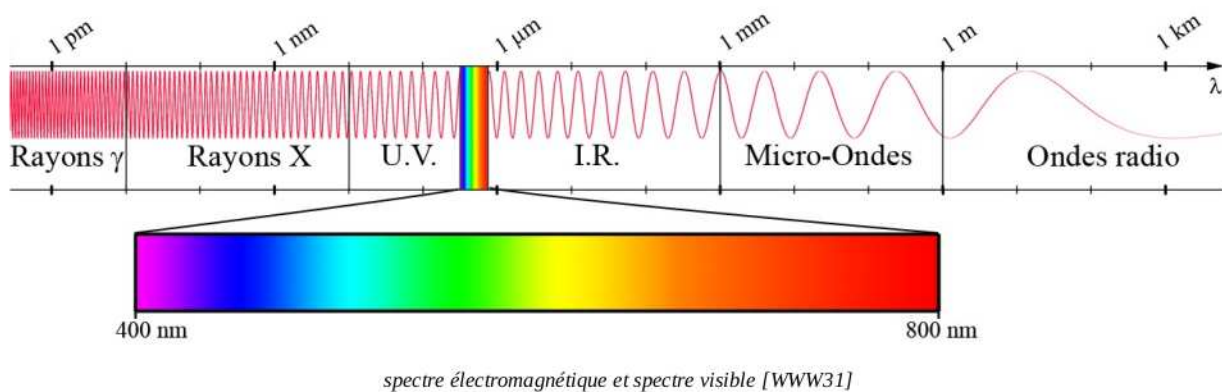
Un logiciel de navigation astronomique destiné à effectuer un point précis devra donc être mis à jour régulièrement des éventuelles perturbations des éphémérides et / ou du temps causées par des événements sismiques (voire nucléaires).

b) Les instruments de visée

L'œil humain est un capteur merveilleux qu'aucune caméra ne peut imiter par sa capacité d'adaptation aux variations de lumière ou aux distances de cinq centimètres à l'infini. Le cerveau humain est très performant pour identifier les étoiles d'une constellation, choisir les astres les mieux répartis dans le ciel pour améliorer la précision du point astronomique, stabiliser la direction où l'œil regarde malgré les mouvements du navire... Mais même avec la mécanique d'un sextant précis ou les lentilles d'un télescope, l'observateur humain arrivera difficilement à atteindre la précision requise pour un point astronomique à 100 m près ou à 10 m près.

La sensibilité de l'œil est insuffisante pour voir les étoiles de magnitude supérieure à 3,3. Les lentilles du sextant absorbent un peu d'énergie lumineuse, limitant les observations à des astres de magnitude inférieure à 2,9 environ (selon l'acuité visuelle du chef de quart et le contraste lors de l'observation). Le jour aucune étoile n'est visible, contraignant à attendre que le Soleil change franchement d'azimut pour l'observer plusieurs fois.

La lumière « visible » n'est pas la seule émise par les astres : leur rayonnement infrarouge est perceptible à la surface terrestre.

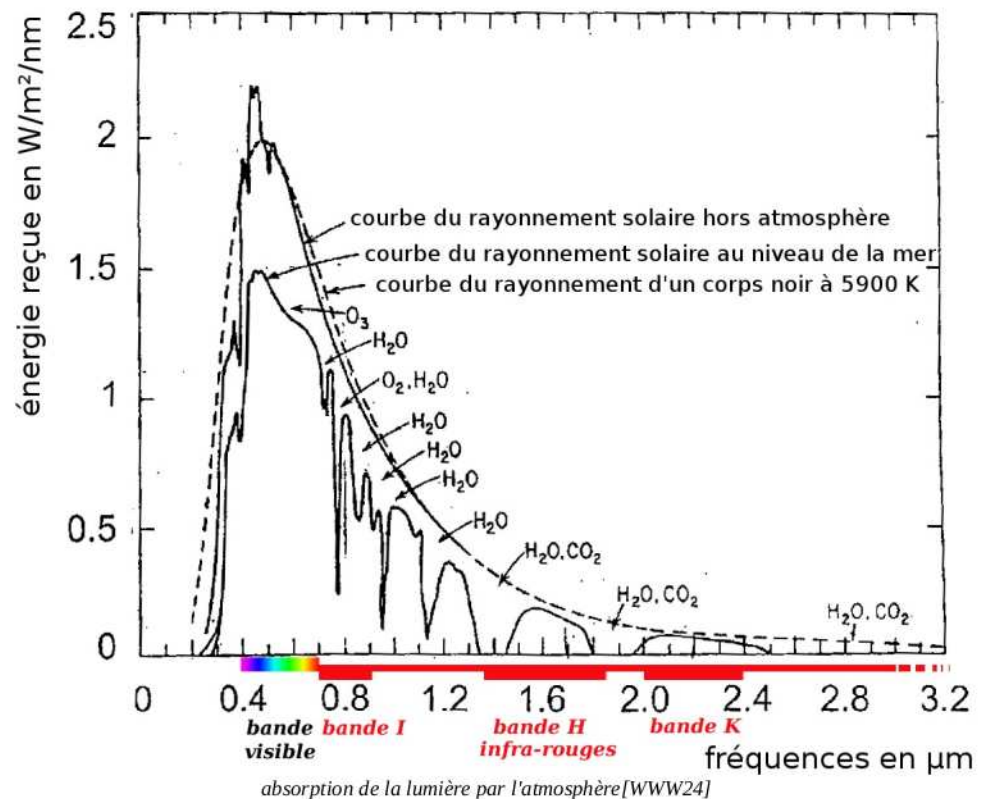


La poussière interstellaire absorbe de la lumière en proportion plus importante pour les faibles longueurs d'onde (ultraviolet, bleu) que pour les longues (rouge, infra rouge).



*nébuleuse d'Orion vue en visible et en proche infrarouge (bande I)
par le télescope spatial Hubble - NASA*

L'atmosphère absorbe inégalement la lumière solaire selon les longueurs d'onde, laissant des « fenêtres », ou bandes, où la lumière est peu atténuée et d'autres bandes où l'énergie perçue à la surface terrestre est très faible. Dans un brevet déposé aux États Unis par la société TREX, une étude comparative des observations en lumière visible et en infrarouge détaille les avantages de ces derniers [WWW24].



La diffusion de la lumière solaire par l'atmosphère (la couleur bleue du ciel) rend les étoiles invisibles à l'œil le jour car le « bruit » résultant est supérieur à la lumière d'une étoile. Or en infrarouge, ce bruit de diffusion est plus faible : 6 fois plus faible en bande H et 18 fois plus faible en bande K que dans la bande I appelée aussi « proche infrarouge ». En lumière visible, ce bruit est 5 à 20 fois plus fort que dans les bandes infrarouges.

L'opacité de l'atmosphère due aux fumées, à la brume ou aux nuages est moins forte pour les longueurs d'onde infrarouge. Il en résulte que la « perméabilité » de l'atmosphère est 20 à 30 % supérieure en infrarouge.

Les turbulences créées par l'évaporation, dans les premières dizaines de mètre d'altitude au-dessus de la mer, donnent un aspect scintillant aux étoiles et un contour flou sur une caméra ou une appareil photo. Ce phénomène est plus faible en infrarouge qu'en visible, il est 2,2 fois plus faible en bande H et 3,2 fois plus faible en bande K qu'en bande I. Une image du ciel prise depuis un navire sera donc moins floue en infrarouge : le point obtenu sera plus petit (en nombre de pixels) et intense (en nombre de photons reçus).

Trois types de bruit perturbent un capteur d'images numériques du ciel :

- un bruit propre au capteur : lorsqu'il transforme l'énergie des photons en électrons, un bruit propre au capteur peut activer de manière aléatoire un pixel sur certains clichés. Ce phénomène est dû au bruit de la chaîne de lecture et d'amplification de la caméra ;
- un bruit thermique appelé aussi photonique : l'agitation des électrons due à la chaleur crée un voile sur l'image ; une pause trop longue peut produire une image blanche ;
- un bruit de diffusion atmosphérique cité plus haut : la diffusion des photons dans l'atmosphère en dévie certains vers le capteur, activant des pixels alors qu'aucune source de lumière n'est présente dans la direction correspondante dans le ciel.

Les capteurs infrarouge ont une sensibilité supérieure à ceux du visible ou du proche infrarouge car les bandes H ou K sont plus larges que le spectre visible ou la bande I. Le nombre d'électrons qu'ils peuvent décharger lors d'une stimulation photonique est 50 fois plus grand en bande H et 200 fois plus grand en bande K que dans la bande I. Pour voir une étoile brillante de jour avec une caméra performante, il faut :

- environ 3,5 s en lumière visible ;
- seulement 0,2 s à 0,03 s en infrarouge avec une optique de grande ouverture (20 cm de diamètre) ;
- 0,001 s en infrarouge avec un télescope.

Le bruit perturbe d'autant plus l'image finale que le temps d'exposition est long.

Le rapport signal sur bruit (Signal to Noise Ratio SNR) d'une image est calculé avec la formule suivante :

$$SNR = \frac{N_s}{\sqrt{N_s + 4 \cdot (n_p + n_T + n_A)}}$$

N_s le nombre total de photo-électrons détectés et créant le signal

n_p le nombre total de photo-électrons de bruit propre du capteur

n_T le nombre total de photo-électrons de bruit thermique

n_A le nombre total de photo-électrons de bruit atmosphérique

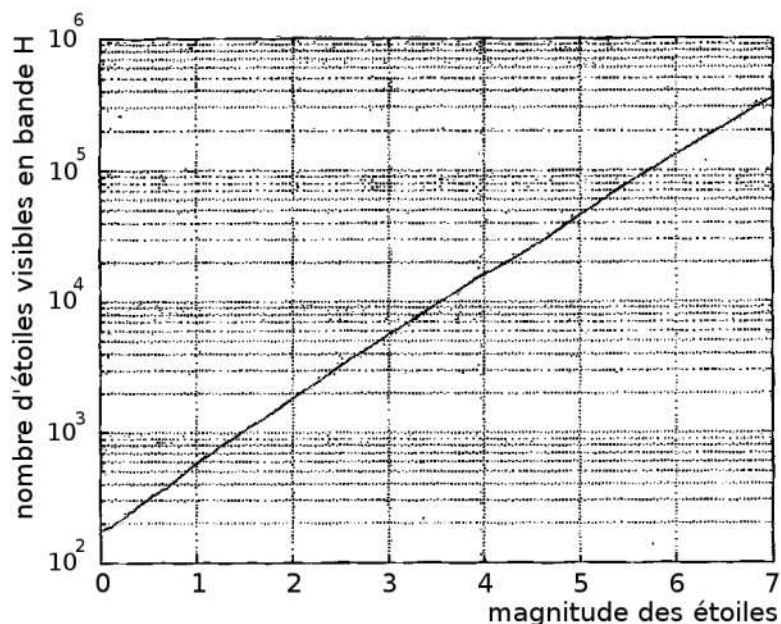
Ce rapport sert à fixer un seuil en deçà duquel l'image ne peut pas être exploitée, faute de contraste pour y distinguer la tache correspondant à une étoile. Dans le brevet de la société TREX comme dans les clichés du catalogue d'étoiles 2MASS, ce seuil est fixé 10 [WWW48]. Pour parvenir à des images de rapport SNR supérieur, un algorithme additionne pour chaque pixel le nombre de photons reçus sur plusieurs images successives (environ 20 images). Si on note N_I le nombre d'images additionnées, le nombre total de photons reçus par un pixel varie proportionnellement à :

- N_I pour les pixels recevant la lumière de l'étoile ;
- $\sqrt{N_I}$ pour les pixels correspondants au bruit naturel ou artificiel.

Les taches lumineuses ne correspondant pas à une étoile sont ainsi détectées et éliminées.

Les bruits perturbent d'autant plus l'image finale que le temps d'exposition est long. Une caméra en lumière visible ne permettra pas d'exploiter les étoiles durant la journée en raison d'un rapport signal sur bruit trop faible (et d'un temps de calcul incompatible avec la vitesse du navire). Une caméra infrarouge donnera une image exploitable et permettra d'envisager un calcul du point astronomique avec un intervalle de quelques secondes ou dizaines de secondes.

Le nombre d'étoiles perceptibles en infrarouge est bien supérieur à celui du spectre visible. Cette différence est due aux avantages cités plus haut des capteurs et de la propagation des infrarouges dans l'espace et l'atmosphère. La courbe suivante montre le nombre d'étoiles visibles en infrarouge (bande H) selon la magnitude limite.



nombre d'étoiles perceptibles en bande H selon la magnitude limite de la caméra [WW24]

astre	magnitude apparente en lumière visible
Soleil	-26,8
pleine Lune	-12,92 à -2,50
Satellite Iridium	-9,5
Diffusion du ciel	-6,5
Vénus	-4,89 à -3,82
Jupiter	-2,94 à -2,61
Mars	-2,91 à +1,84
Mercure	-2,45 à +5,73
Sirius (étoile la plus brillante)	-1,47 à +1,47
Canopus (seconde étoile la plus brillante)	-0,72
Saturne	-0,49 à +1,47
Étoile Polaire	1,98
Uranus	+5,32 à +5,95
Cérès (astéroïde entre Mars et Jupiter, rayon de 490 Km)	6,64
Iris (astéroïde entre Mars et Jupiter, rayon de 200 Km)	6,75
Astéroïde de 100 Km de rayon (entre Mars et Jupiter)	+7,0 à +7,5
Neptune	+7,78 à +8,02
Pluton	+13,65 à + 16,30
Astéroïdes de la ceinture de Kuiper	$\geq + 15$

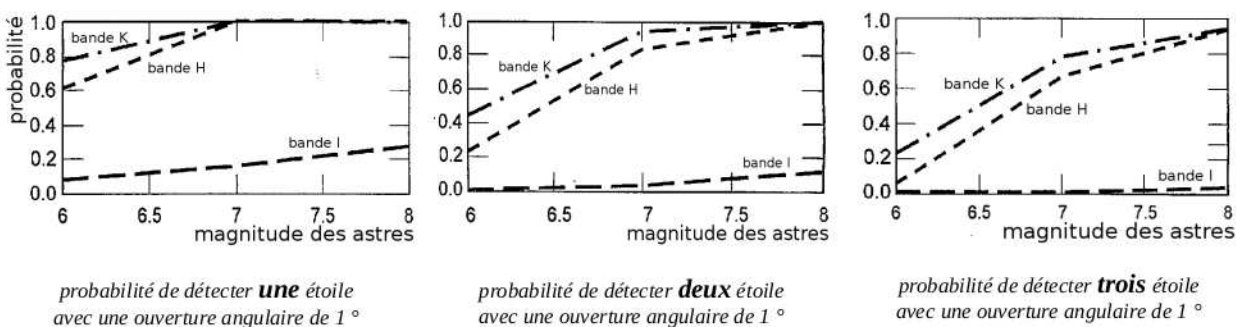
Magnitudes des astres [WW39]

Le catalogue des étoiles exploitables selon la bande de longueurs d'ondes utilisées contient donc :

- 81 étoiles en lumière visible à l'œil (étoiles de magnitude $\leq 2,9$ données dans les Éphémérides Nautiques françaises, 173 étoiles de magnitude $\leq 3,3$ dans le Nautical Almanac) ;
- 300 étoiles en bande I (magnitude limite de 3,3) ;
- 8 000 étoiles en bande H ou K (magnitude limite de 3,3).

Le champ de vision utilisé par l'observateur avec le sextant est maximal : sur la moitié de la voûte céleste, le chef de quart choisit à l'œil (ou sur une carte du ciel en coordonnées horizontales générée par un logiciel) l'astre qu'il va utiliser. Puis il réduit son champ de vision à environ 10° en regardant dans le sextant. L'astre ayant été choisi au préalable et le sextant ayant été pointé à la main dans sa direction, il est aussitôt identifié dans ce champ restreint : par commodité les marins utilisent les astres les plus brillants.

Une caméra a un champ de vision très réduit, même en l'équipant d'une optique à zoom variable. Dans le brevet TREX les caméras visent une région du ciel au hasard et un algorithme d'analyse de l'image cherche ensuite à identifier une ou plusieurs étoiles observées dans ce champ de vision. Pour s'assurer que le nombre suffisant d'étoiles est perçu dans le champ restreint de la caméra, l'étude citée dans le brevet TREX a mesuré la probabilité de trouver une, deux ou trois étoiles dans un champ de vision de $1^\circ \times 1^\circ$ avec des caméras en bandes I, H et K selon la magnitude des étoiles :



La répartition des étoiles dans le ciel n'est pas homogène. L'étude a mesuré le nombre minimum d'étoiles visibles en infrarouge (magnitude ≤ 7 en bandes H et K) dans un champ de vision de $5^\circ \times 5^\circ$:

- 30 à 40 étoiles partout dans le ciel ;
- 300 à 400 étoiles dans la Voie Lactée (c'est à dire le plan de notre galaxie).

En posant le problème à l'envers, le champ de vision minimum pour observer au moins une étoile est :

- $7,7^\circ \times 7,7^\circ$ en bande I (magnitude $\leq 3,3$) ;
- $0,86^\circ \times 0,86^\circ$ en bande H (magnitude $\leq 6,8$) ;
- $1,3^\circ \times 1,3^\circ$ en bande K (magnitude $\leq 5,8$).

L'identification des astres mesurés au sextant est effectuée avant l'observation par le chef de quart à l'aide de sa connaissance personnelle des constellations (ou d'une carte du ciel) et selon les éventuels masques (nuages, coucher ou lever de Soleil saturant une partie du ciel).

Dans le brevet TREX basé sur des caméras, c'est un algorithme qui exploite la position approximative du ciel visé et la magnitude des étoiles mesurée par les capteurs infrarouge. Ces paramètres sont comparés avec un catalogue d'étoiles donnant la position et la magnitude des étoiles visibles en infrarouge. Ce système nécessite trois conditions :

- avoir des étoiles perceptibles dans le champ de vision de la caméra ;
- connaître approximativement la direction où vise la caméra (azimut et site) ;
- ne pas être masqué par un nuage ou saturé par le Soleil.

La première condition a été traitée plus haut en bandes I, H et K . En lumière visible elle est remplie seulement si le champ de vision est très large ($\geq 15^\circ \times 15^\circ$), ce qui est incompatible avec un rapport signal sur bruit exploitable par un logiciel, à moins de se limiter à des observations de nuit.

La seconde condition requiert de connaître les attitudes du navire (cap, gîte, assiette) et l'orientation de la caméra par rapport au navire. La mesure des attitudes est traité dans la partie suivante (référence horizontale). Dans le brevet TREX une première version du capteur utilise trois caméra liées rigidement au navire : leur axe est pointé à 45° au-dessus de l'assiette 0° (en supposant que le navire ne subit aucune déformation de sa structure à cause de la houle, de la dilatation thermique ou des opérations successives de chargement et déchargement) aux gisements 000° , tribord 120° et bâbord 120° . Une seconde version du capteur envisage une caméra mobile dont le moteur de pointage est précis à $1''$ près.

La troisième condition est satisfaite par l'ajout d'une caméra en lumière visible avec un champ de vision de $180^\circ \times 180^\circ$ pour repérer la position du Soleil et des éventuels nuages. Dans le brevet TREX, la seconde version du capteur permet ainsi d'orienter la caméra directement vers une région du ciel dégagée.

Une troisième version du capteur procède comme le chef de quart : connaissant les attitudes du navire, les régions dégagées du ciel à l'aide d'une caméra de grand champ, et les étoiles observables à la position (approximative) du navire et à l'heure de la mesure, l'algorithme choisit une étoile brillante (c'est à dire de faible magnitude) et la caméra infrarouge est pointée dans sa direction . La caméra est équipée d'un télescope pour recevoir davantage de photons et son champ de vision est de $3' 12'' \times 2' 33''$. Cette version permet de calculer un point toutes 10 secondes environ contre 5 minutes pour les pointages « au hasard ».

La reconnaissance des constellations permet aussi d'identifier les étoiles. La société STARNAV, située en Normandie, a déposé un brevet pour un système baptisé Vister destiné à mesurer les attitudes du navire et sa position à partir d'observations de jour comme de nuit. La précision théorique des visées est de $10''$ et le système complet pourrait être commercialisé à moins de 10 000 €. Peu d'informations sont disponibles sur internet et les essais du prototype sont prévus à la fin de l'année 2013 pour mesurer la précision du point final. Cette société est spécialisée dans l'analyse d'images, la reconnaissance des formes et des mouvements. Son premier produit a été un logiciel capable de reconnaître les mouvements d'une personne face à une caméra [WWW27]. Une autre application du logiciel sert à reconnaître les mouvements de la pupille d'un observateur pour orienter une caméra (ou un radar pour la conduite de tir d'artillerie ou d'un missile) [WWW26].

Il semblerait qu'un algorithme analyse la disposition des étoiles aperçues lors d'un balayage du ciel par la caméra en bande I et exploite cette information en plus de la magnitude pour la comparaison avec un catalogue d'étoile de magnitudes ≤ 6 [PRV06].



viseur stellaire Vister de STARNAV [WWW28]

Le regard critique du chef de quart n'est pas mis à contribution dans les produits actuels ou en développement pour observer le ciel avec une caméra et en déduire la position du navire. Le regard habitué d'un chef de quart permettrait d'identifier des astres sur un écran offrant alternativement une vision large du ciel pour repérer les constellations et une vision étroite pour indiquer à l'ordinateur le point lumineux à étudier. Le raisonnement humain et l'expérience du marin navigant aux astres permettraient d'analyser des images de faible signal sur bruit et ainsi de repousser les limites de fonctionnement lors des conditions météo défavorables.

Malheureusement l'intervention humaine ralentirait le calcul du point et accaparerait le chef de quart comme lors d'un point en vue des côtes lorsqu'il relève trois amers au compas. Or la navigation sur ECDIS et GPS a donné l'habitude aux marins d'avoir un système de positionnement quasi continu (1 point ou plus par seconde) et sans intervention humaine. L'évolution du radar montre que le marin s'est laissé séduire par l'automatisme : en remplaçant les « écrans en vidéo brute » par des écrans en vidéo synthétique, les chefs de quart ont perdu l'expérience pour interpréter la taille d'un navire par la puissance de son écho, le déplacement relatif d'un écho par la rémanence du tube cathodique laissant une « trace d'escargot ». Ces informations sont si utiles qu'elles sont désormais calculées par l'ordinateur et rendus par des palettes de couleur ou l'ajout de points dans le sillage des échos.

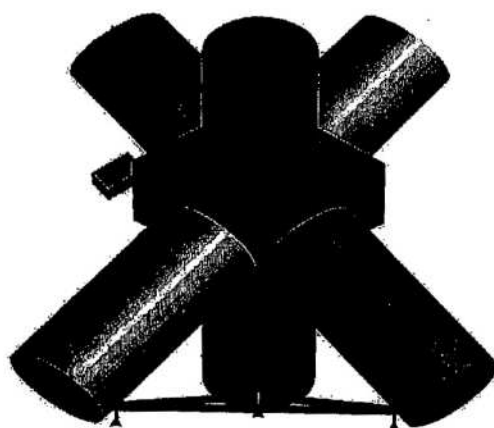
Il serait donc souhaitable qu'un système automatique de navigation astronomique pour les navires marchands permettent aussi au marin de visualiser les images captées par la caméra pour :

- entretenir l'expérience astronomique du marin (reconnaissance des constellations et des étoiles) ;
- permettre son intervention quand les conditions météo déroutent les algorithmes d'analyse d'image ;
- exploiter les avantages de la caméra et du logiciel (zoom, stabilisation, poursuite, vision nocturne, infrarouge) pour l'anticollision, la manœuvre d'homme à la mer, la mesure de relèvements, l'observation des abords du navire dans les zones de piraterie.

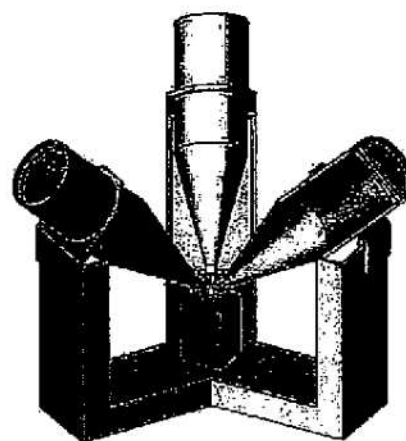
Le nombre minimum d'observations pour déterminer la position (latitude et longitude) du navire est de deux, sous réserves que les étoiles ou planètes soient convenablement choisies (écart d'azimuts $\geq 30^\circ \pm 180^\circ$ et hauteurs $\geq 10^\circ$). Le sextant ne pouvant mesurer la hauteur que d'un seul astre à la fois, il doit répéter l'opération.

Si l'observation est réalisée avec une caméra, le faible champ de vision ne permet pas d'exploiter plus d'une étoile : un champ de vision de $10^\circ \times 10^\circ$ limite l'écart d'azimut à environ 10° . Si les azimuts sont trop proches, les lignes de position (lieux possibles de position pour l'observateur, déduits d'une observation) sont presque confondues et le point final est situé dans un triangle de plusieurs milles de côté : l'erreur est inacceptable.

Dans le brevet TREX, la version 1 du capteur utilise simultanément trois caméras en bande H. Une caméra fixée dans l'axe du navire et les deux autres à 120° ; les «trois caméras sont orientées à 45° au-dessus de l'assiette $0,0^\circ$ du navire. Le système complet fait 1 m^3 et pèse 27,2 Kg. Son prix est estimé à 100 000 € pour un point à 30 m près toutes les 5 minutes.



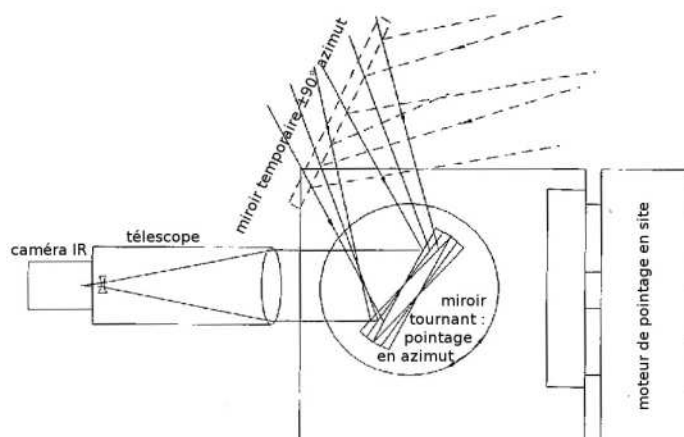
Daytime Stellar Imager de TREX version 1
27,2 Kg – 1 m³ [WWW24]



Daytime Stellar Imager de TREX version 2
dimensions inconnues [WWW24]

La version 2 du capteur a une seule caméra en bande H et un prisme pyramidale concentrant les faisceaux de 3 télescopes. Ces télescopes font un écart d'azimut de 120 ° et sont orientées à 45 ° au-dessus de l'assiette 0,0 ° du navire. Aucune masse ou dimension n'est disponible et le prix est estimé à 60 000 €.

La version 3 du capteur exploite une seule caméra en bande H avec télescope et effectue les observations l'une après l'autre à l'aide de deux moteurs de pointage, en azimut et en site, précis à 1 " près. La caméra et son télescope sont fixes, les moteurs de pointage entraînent un miroir sur deux axes pour balayer le ciel. Un miroir temporaire peut être placé dans la ligne de visée pour modifier sa direction de 90°. Ceci permet d'observer une seconde région du ciel sans déplacer les moteurs de pointage et offre un écart d'azimut satisfaisant pour un point. Une variante intermédiaire a été envisagée avec deux caméras orientées à 90 ° à la place du miroir tournant et un miroir temporaire par caméra, permettant d'effectuer deux observations simultanées et quatre dans un délai à peine supérieur..



Daytime Stellar Imager de TREX version 3
masse inconnue – 200 x 150 x 120 mm [WWW24]

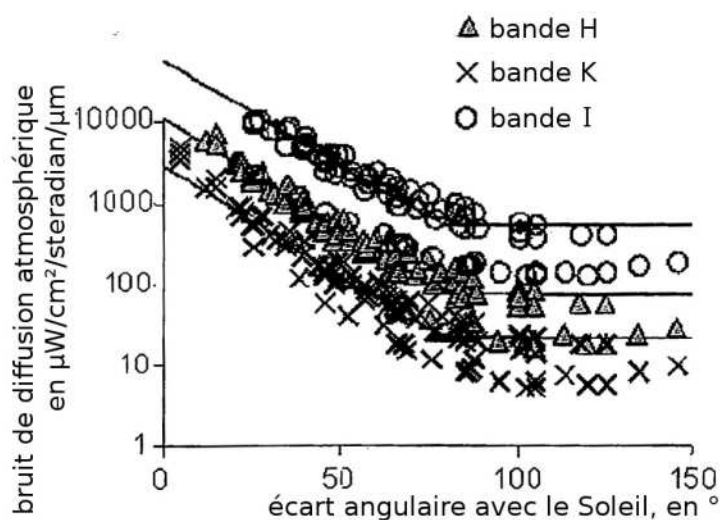
Le viseur stellaire Vister de STARNAV peut être orienté vers le ciel à la main ou par un moteur de pointage sans soucis de précision : à l'aide d'un inclinomètre, l'algorithme de traitement de l'image mesure les attitudes de la caméra et ses mouvements puis déduit la région du ciel capturée. Si le balayage du ciel par la caméra parcourt un intervalle d'azimut suffisant, un point précis peut être calculé.

La société SOWILO s'est associée à STARNAV pour développer un « sextant électronique » baptisé G-stell, destiné à déterminer le cap et la position du navire dans le secteur de la plaisance [PRV08]. La précision théorique du point est de 1 M, la moitié de l'erreur (30 ") venant de la visée. Le système est en cours de validation à l'été 2013 et devrait être commercialisé à 1 500 €. L'appareil utilise une caméra dans le spectre visible pour observer les astres et des accéléromètres pour mesurer l'orientation de la caméra. Le capteur ressemble à une lampe torche reliée à un ordinateur (liaison USB, Blue Tooth ou wifi), il est tenu à la main par le skipper et orienté vers le ciel. Le logiciel installé sur l'ordinateur signale s'il faut décaler le capteur vers une autre région du ciel pour effectuer les mesures suivantes ou pour trouver davantage d'astres exploitables.



« sextant électronique » G-stell de SOWILO
dimensions et masse comparables à une lampe torche [PRV08]

La saturation de l'image par le Soleil est due à sa puissance gigantesque en comparaison des puissances mesurées sur les autres étoiles. Une partie de ce rayonnement est réfléchi et réfracté sur le tube et les lentilles optiques entourant le capteur d'image. Pour s'en affranchir, il faut viser une région du ciel éloignée de la direction du Soleil. La courbe ci-dessous montre qu'un écart angulaire de 80 ° ou plus est suffisant pour éliminer la saturation solaire du capteur infrarouge. A moins de 80 ° la caméra fournit une image dont le rapport signal sur bruit diminue lorsqu'on s'approche du Soleil.



bruit infrarouge selon l'écart angulaire avec le Soleil [WW24]

Le bruit propre des caméras infrarouge est réduit par un refroidissement des capteurs optiques. Sans cet équipement, la sensibilité de la caméra reste médiocre. Le dispositif de refroidissement augmente le prix de la caméra de 20% et nécessite un remplacement du compresseur de réfrigération tous les deux ans. Dans de nombreux pays, la commercialisation des caméras infrarouge de haute sensibilité, surtout dans les bandes H et K, est réservée à un usage militaire ou très réglementé pour le marché civil. Le brevet TREX cité plus haut est destiné à équiper des avions ou navires militaires et des missiles américains.

Caméra infrarouge bandes I-J	Caméra infrarouge refroidie bandes H-K-L	Caméra infrarouge refroidie bande N
marque FLIR modèle SC2500 capteur InGaAs Indium Arsenide Galium réfrigération optionnelle définition 320x256 longueurs d'onde 0,9-1,7 μm nombre d'images 1 Hz à 340 Hz prix 23 000 € [WWW50] [WWW51]	marque FLIR modèle SC6100 capteur InSb Indium Antimonide réfrigéré définition 640x512 longueurs d'onde 1,5-5,0 μm nombre d'images 0,001 Hz à 126 Hz prix 73 500 € [WWW50] [WWW52]	marque FLIR modèle A6155sc capteur à microbolomètre non refroidi définition 640x480 longueurs d'onde 7,5-14,0 μm nombre d'images 50 Hz prix 18 000 € [WWW50] [WWW53]
		

L'infrarouge permet donc de voir de nombreuses étoiles le jour sans nuage, l'horizon par nuit claire et le disque solaire à travers des nuages épais. Cependant il ne permet pas d'observer les étoiles à travers des nuages épais ou de fortes précipitations. En lumière visible comme en infrarouge, il peut donc y avoir des conditions météo empêchant d'effectuer un point observé à l'aide des astres. Si, durant quelques heures, le GPS n'est pas disponible et les astres visibles sont trop peu nombreux, il faut un autre moyen de positionnement. La navigation astronomique ne peut renforcer son intérêt si elle n'est pas associée avec un moyen de navigation assurant une continuité durant ces faibles intervalles de temps.

La navigation inertielle permet de calculer la position du navire à partir des mesures d'accélération linéaires et des vitesses angulaires du navire. Cette technique nécessite :

- trois accéléromètres (ou pendules) soit un sur chaque axe des trois dimensions de l'espace ;
- trois gyroscopes soit un sur chaque axe ;
- un premier calcul intégral pour en déduire la vitesse linéaire du navire dans l'espace ;
- un second calcul intégral pour en déduire la position du navire dans l'espace et ses attitudes relatives (cap, gîte et assiette) ;
- des constantes d'intégrations : vitesse linéaire dans l'espace, position et attitudes.

Le calcul intégral de la navigation inertielle est bien maîtrisé mais la précision de la navigation inertielle est très dépendante du temps passé sans recalage (mesure de nouvelles constantes d'intégration) et de la sensibilité des capteurs (biais des accéléromètres et dérive des gyroscopes) :

- l'aviation civile exploite cette technique en cas de panne du GPS durant quelques minutes ou dizaines de minutes ;
- les sous-marins nucléaires utilisent la navigation inertielle sans recalage pendant plusieurs jours à l'aide de centrales inertielles ultra précises. Pour la France elles sont produites par la société SAGEM et coûtent plusieurs centaines de milliers d'euros [PRV07].

La marine marchande ayant une moindre exigence de précision et pouvant tolérer quelques heures sans recalage de la navigation inertielle pourrait exploiter ce moyen de positionnement « en secours de l'astronomie » avec des capteurs dont le prix est inférieur à celui du compas

gyroscopique actuellement imposé par l'OMI. Le prix aussi des centrales inertielles est actuellement élevé car ce marché reste limité : si tous les navires de commerce remplaçaient leur compas gyroscopique (mesurant seulement le cap du navire, à 30 ' près !) par une centrale inertielle, son prix serait divisé environ par trois. Les récentes technologies de gyroscopes (à résonance vibratoire, laser à effet SAGNAC, MEMS Micro Electro Mechanical Sensor ou MOEMS Micro Optical Electro Mechanical Sensor) et d'accéléromètres (à résonance vibratoire) améliorent leurs performances et diminuent leurs coût, taille et consommation.

Compas gyroscopique aux normes OMI	Centrale inertielle pour aviation civile	Centrale inertielle pour navire hydrographique BH BORDA, Marine Nationale
marque SIMRAD modèle GC80 gyroscopie à masse tournante précision $0,1^\circ / \cos \varphi$ et par roulis / tangage $0,4^\circ / \cos \varphi$ vitesse max 50 nds latitude max 70° N/S 16 400 € [WWW54] [WWW55] 	marque ADVANCED NAVIGATION modèle Spatial Fog navigation satellite et inertielle précision sur 3 axes $0,02^\circ$ dérive inertielle $0,05^\circ/\text{heure}$ 27 000 € [WWW56] [WWW57] 	marque APPLANIX modèle POS/MV 320 version 5 navigation satellite et inertielle précision sur 3 axes $0,02^\circ$ dérive inertielle sur le cap $1^\circ/\text{heure}$ 100 000 € [PRV11] [WWW25] 

En résumé, pour améliorer la précision de la navigation astronomique, l'observation directe par l'œil humain avec un sextant doit être remplacée par une caméra capable d'exploiter les avantages du rayonnement infrarouge. Pour fournir un point sans interruption, la navigation astronomique gagne à échanger des informations avec la navigation inertielle.

Quelle que soit la bande utilisée, visible ou infrarouge, le calcul du point astronomique repose sur des mesures de hauteur entre la ligne de visée de l'astre et l'horizontale locale. Le sextant permet de voir simultanément l'horizon visuel et l'astre visé. Une caméra de faible ouverture ne peut pas observer un astre à 60° de hauteur et voir simultanément l'horizon visuel. Il faut donc fournir une référence d'horizon au capteur pour mesurer une hauteur.

c) La référence horizontale

L'horizon naturel observé en haute mer semble une ligne parfaite séparant la mer du ciel. Mais cette référence est perturbée par la hauteur de l'observateur au-dessus de l'eau et la réfraction des rayons lumineux dans l'atmosphère. Il existe des modèles de propagations de la lumière permettant de corriger ces perturbations selon le rayon terrestre, la température et la pression de l'air. Cependant ces caractéristiques ne sont pas constantes sur la trajectoire des rayons lumineux dans l'atmosphère : au lever du Soleil, l'air est plus chaud sur l'horizon à l'Est du navire que sur l'horizon côté Ouest. La météo peut aussi modifier la pression et la température de manière hétérogène. Malgré les calculs précis proposés par les modèles, il demeure une erreur possible de l'ordre de 30 ".

L'horizon peut être masqué par des nuages, des précipitations ou la brume. Il peut être invisible la nuit si la lune est trop bas sous l'horizon pour que sa lumière soit diffusée par l'atmosphère. Si la navigation astronomique prétend être un moyen de positionnement précis et continu, elle ne peut pas reposer sur une référence soumise aux caprices de la météo.

La navigation inertielle fournit en permanence les attitudes du navire. Elle peut donc servir de référence pour mesurer le plan de l'horizon à la position du navire ou sa perpendiculaire : la direction verticale. Les centrales inertielles commercialisées actuellement sont pour la majorité construites pour être recalées par les informations GPS : position et vitesse. Pour les applications militaires, certaines peuvent exploiter des observations astronomiques :

- mesure d'azimut sur un astre pour recaler le cap ;
- mesure de hauteurs d'astres au-dessus de l'horizon pour un point astronomique et un recalage de la position ;
- mesures d'orientation de paires d'étoiles pour recaler les attitudes absolues (repère géocentrique).

Ces recalages astraux ne sont pas confidentiels mais nécessitent un système de visée stellaire dont le prix reste dissuasif tant que le GPS et ses équivalents russe ou européen peuvent assurer ce service gratuitement. Seuls les militaires, même américains, sont soucieux d'avoir un moyen de recalage des centrales inertielles précis indépendant des satellites et y consacrent les budgets nécessaires.

Les attitudes mesurées par la centrale inertielle sont absolues (dans un repère géocentrique). Pour en déduire les attitudes relatives (donc la verticale locale) le calculateur a besoin de connaître la position approximative du navire... que l'on cherche justement à déterminer. A moins d'envisager des centrales inertielles de très haute précision, donc très onéreuses, il faut envisager un autre moyen pour connaître la verticale locale.

La mesure de déphasage des signaux GPS reçus par trois antennes séparées de quelques dizaines de centimètres permet de calculer les attitudes relatives du navire (cap, gîte, assiette). Dans une version simplifiée des équipements fournissent seulement le cap et sont appelés « compas satellitaires ». Les attitudes fournies par les produits actuels ont une précision de l'ordre de 0,3° insuffisante pour les besoins d'une observation astronomique à 100 m près (3 ") voire 10 m près (0,3 "). Pour améliorer la précision de ce type de capteur, il faudrait utiliser des satellites dont la fréquence d'émission est basse et une antenne à bord du navire d'une envergure égale à la longueur d'onde. Malheureusement les basses fréquences ne se propagent mal dans l'atmosphère et leur émission nécessiterait une énergie démesurée en comparaison des ressources disponibles sur un satellite.

Compas satellitaire 1 axe (non agréé par l'OMI)	Compas satellitaire 3 axes (non agréé par l'OMI)	Compas satellitaire 3 axes (non agréé par l'OMI)
marque RAYTHEON modèle HS70 antenne 1,2 m x 7 cm précision sur le cap 0,5 ° giration max 25 °/s estimé à 1 500 € [WWW60]	marque SIMRAD modèle HS70 antenne 16 x 42 cm inclut deux accéléromètre et un gyroscope précision sur le cap 0,75 ° précision sur gîte / assiette 1,5 ° giration max 90 °/s 1 700 € [WWW59]	marque FURUNO modèle SC110 diamètre de l'antenne tripode 86 cm précision sur le cap 0,3 ° précision sur gîte / assiette 1 ° giration max 45 °/s 7 500 € [WWW58]
		

Le procédé peut être théoriquement adapté à n'importe quel satellite dont la position et la fréquence d'émission sont connues avec précision. Cependant le soucis d'avoir un moyen de navigation indépendant du GPS ne se satisferait pas d'un moyen reposant sur des satellites artificiels, contrôlés par une autre nation ou une société privée.

La gravimétrie consiste à mesurer la direction et l'intensité du champ de pesanteur terrestre. Par définition cette direction correspond à la verticale locale. La gravimétrie est utilisée par les sous-marins nucléaires lanceurs d'engins (SNLE) français pour comparer la mesure à bord du sous-marin et celle d'une « carte » du vecteur pesanteur en fonction des lieux. Le résultat ne donne pas une position mais est intégré dans le recalage de la centrale inertielle de navigation. Cette « carte » est affinée en récoltant des mesures gravimétriques le long des trajectoires de navires équipés de gravimètres comme les navires MARION DUFRESNE (IPEV Institut polaire français Paul Émile VICTOR), D'ENTRECASTEAUX (SHOM), BEAUTEMPS-BEAUPRÉ (SHOM & IFREMER), POURQUOI (IFREMER & SHOM) ou ATALANTE (IFREMER).

Le gravimètre embarqué est un capteur d'accélération installé sur une plate-forme stabilisée située au point le plus calme du navire. Une centrale inertielle est donc indispensable pour compenser les mouvements du navire. Le coût d'un gravimètre (plusieurs dizaines de milliers d'euros) et de la centrale inertielle de navigation est incompatible avec les contraintes commerciales d'une compagnie maritime. D'autre part, la centrale inertielle de navigation fournissant déjà une référence horizontale, il serait d'absurde d'y ajouter un capteur onéreux.

L'inclinomètre mesure la direction du vecteur pesanteur mais pas son intensité. Cet appareil fonctionne comme un accéléromètre et fournit l'inclinaison du navire sur deux axes : gîte et assiette. C'est la version numérique et précise du niveau à bulle. Le coût, la taille et l'erreur de l'inclinomètre ont beaucoup baissé en raison des progrès technologiques récents et de son utilisation croissante dans les appareils domestiques : appareils photo, téléphones portables « smartphone », capteurs d'automates industrielles, sismographes, etc.

Inclinomètre	Inclinomètre utilisé sur le Daytime Stellar Imager de TREX en 2007	Inclinomètre 3 axes
marque JEWEL INSTRUMENTS modèle LCSO dimensions 4 x 4,3 x 9,3 cm mesure de verticale sur 2 axes précision 1 " à 30 Hz supporte 1 500 g durant 0,005 s 1 250 € (actuel) [WWW63]	marque JEWEL INSTRUMENTS modèle LCF 196 longueur 24 cm diamètre 2,3 cm mesure de verticale sur 2 axes précision 0,62 " à 30 Hz (3 μ m) supporte 500 g durant 0,001 s 1 850 € (actuel) [WWW61]	marque JEWEL INSTRUMENTS modèle LCF 3000 dimensions 7 x 7,3 x 8,2 cm mesure de verticale sur 3 axes précision 0,21 " à 30 Hz (1 μ m) supporte 1 000 g durant 0,001 s 2 800 € [WWW62]
		

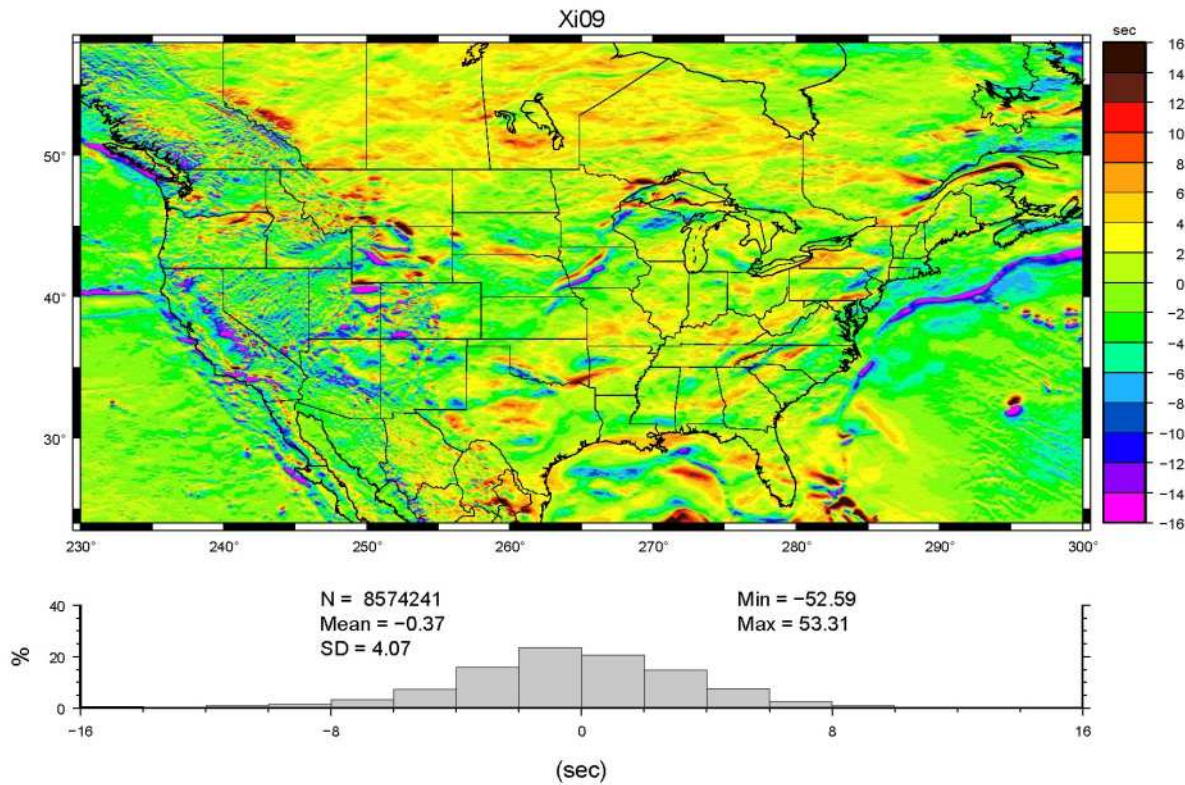
Les produits Daytime Stellar Imager (TREX), Vister (STARNAV) ou le sextant électronique G-stell exploitent cet appareil pour mesurer la verticale locale : l'inclinomètre est situé à l'intérieur du capteur optique.

Si l'inclinomètre est fixé à un support mobile, les mouvements du support créent des accélérations perturbatrices. Pour corriger l'influence des mouvements du navire, un capteur supplémentaire doit mesurer ses accélérations rectilignes et ses rotations. Les accélérations rectilignes sont mesurables par des accéléromètres placés sur les deux axes perpendiculaires à l'inclinomètre. Les rotations du navire peuvent être mesurées par :

- des gyroscopes sur trois axes (appelés centrale de cap et d'attitude) ;
- l'analyse des mouvements de l'image captée par une caméra fixe à bord.

L'aplatissement terrestre est faible mais pas nul, causant une différence entre la surface sphère servant à modéliser la Terre et celle d'un ellipsoïde utilisé pour la fabrication des cartes ou le calcul du point par un récepteur GPS. Le plan horizontal à la position du navire est le plan tangent à la surface terrestre. La verticale locale, perpendiculaire au plan horizontal, passe par le centre de la sphère. Sur un ellipsoïde, la verticale locale ne passe pas par son centre sauf si le navire est aux pôles ou à l'équateur. L'erreur de verticale entre la sphère (aplatissement nul) et un ellipsoïde d'aplatissement 1/298 (système géodésique WGS84 utilisé par le GPS et GLONASS) atteint un maximum de 11,56 ' à la latitude 45 ° N/S [LIV07].

La surface terrestre n'est pas exactement confondue avec un ellipsoïde : le géoïde est la surface composée des points d'égale pesanteur et correspondant à la surface océanique (indépendamment des perturbations liées à la météo et aux marées). Entre le géoïde et l'ellipsoïde WGS84 la déviation de la verticale atteint un maximum de 100 " sur le massif de l'Himalaya. En France cette déviation n'excède pas 15 " [WWW64] et elle n'est pas négligeable en mer. La carte ci-dessous montre la déviation mesurée aux États Unis : dans la partie maritime elle varie de - 16 " à + 6 "



déviation de la verticale entre géoïde et ellipsoïde WGS84 en 2009 [WWV65]

La verticale sur un point du géoïde est mesurée par un inclinomètre, un gravimètre ou sur l'horizon naturel. Les autres moyens, navigation inertielle et mesure de déphasage des signaux satellite, donnent une verticale sur un point du modèle terrestre utilisé : il s'agit en général de l'ellipsoïde WGS84.

En résumé, l'instrument le plus adapté à une mesure de verticale (ou d'horizontale) précise pour la marine marchande est l'inclinomètre en raison de son prix. Sa précision nécessite une correction inertielle des perturbations dues aux mouvements du navire.

d) La mesure du temps

L'horloge utilisée pour calculer les éphémérides des astres ou pour dater les mesures de hauteur doit avoir une précision de 0,2 s pour une précision finale du point de 3 " (à 100 m près), ou 0,02 s pour une précision finale du point de 0,3 " (à 100 m près). Pour y parvenir, il faut deux conditions :

- un recalage de l'horloge sur le temps de référence ;
- une dérive de l'horloge entre deux recalages garantissant un écart inférieur à la précision ci-dessus.

Le temps de référence utilisé pour les calculs d'éphémérides est le temps terrestre TT : son origine est l'instant J2000 le 1^{er} janvier 2000 à 12h00 TT et son unité la seconde mesurée par une horloge atomique (dérive de $20 \cdot 10^{-9}$ s par an). Pour recaler l'origine du temps mesuré par l'horloge du bord sur celle du temps de référence, il faut une observation astronomique ou la réception d'un top horaire.

Le temps UTC est le seul top horaire disponible au large : il est accessible à l'aide d'un récepteur GPS (à 10^{-9} s près) ou d'une liaison internet par satellite (à 10^{-2} s près avec le protocole informatique NTP). Le décalage entre le TT et UTC est un nombre entier de secondes intercalaires dont l'ajout est prévu six mois à l'avance par l'IERS [WWW45].

Le décalage entre le temps terrestre (des modèles planétaires servant au calcul d'éphémérides) et le temps universel (UT1 de la rotation terrestre) ne doit pas être pris en compte pour recaler l'horloge du bord (il varie irrégulièrement et en permanence) mais par le logiciel de calcul des éphémérides lors du passage en coordonnées géocentriques (dites équatoriales). Cet écart est mis à jour quotidiennement sur le site internet de l'IERS avec une précision de 0,001 ms [WWW44]. Au large, il faut donc une liaison internet par satellite pour recaler l'horloge du bord sur le temps universel coordonné UTC puis sur TT et UT1.

La dérive d'une horloge atomique est (presque) nulle mais le prix d'un tel instrument est inaccessible pour un navire marchand. Les oscillateurs exploitant plusieurs quartz mesurent le temps avec une dérive de 72 ms par an (hors recalage sur une source extérieure) et synchronisent des capteurs et calculateurs numériques.

Horloge à un quartz	Horloge à plusieurs quartz	Horloge atomique
marque GORGY TIMING modèle RADIO TIMING GTC synchronisation par ondes radio ou câble téléphonique oscillateur à quartz dérive 1 s /jour sans synchronisation précision 1.10^{-6} s 500 € [WWW69] [WWW70]	marque ACQUISYS modèle NTA100-GM récepteur GPS intégré oscillateurs à quartz dérive 2.10^{-8} s /jour sans GPS précision $0,1.10^{-6}$ s serveur 1 300 € carte 985 € [WWW68]	marque SYMMETRICOM modèle SA31m horloge atomique au rubidium dimensions 5,1 x 5,1 x 1,8 cm précision 50.10^{-12} s à 25 °C et 1.10^{-9} s de -10° à 75 °C 1 150 € [WWW66] [WWW67]
		

L'angle horaire d'un astre « fixe » (Soleil et autres étoiles) fait le lien entre sa coordonnée sur l'équateur et le temps qui passe. L'origine de l'angle horaire sur l'équateur est un méridien :

- le méridien de Greenwich : on note AH_{ao} l'angle horaire de l'astre au méridien origine, ou GHA en anglais pour Greenwich Hour Angle ;
- le méridien du navire : on note AH_{ag} l'angle horaire de l'astre au méridien local, ou LHA en anglais pour Local Hour Angle ;
- le méridien céleste du point vernal (= sidéral) : on note AV_a l'ascension verse de l'astre (ou angle horaire de l'astre depuis le point vernal), ou SHA en anglais pour Sideral Hour Angle.

L'angle horaire du Soleil permet de mesurer le temps solaire. Cette échelle de temps est irrégulière car la distance Terre-Soleil change au cours de l'année et la Terre tourne autour du Soleil en décrivant une ellipse en même temps qu'elle tourne sur elle-même à une vitesse décroissante. La correction à apporter pour obtenir le temps universel est appelée équation du temps et peut être calculée par les éphémérides. L'observation consiste à comparer l'heure de l'horloge du système avec l'heure prévue du passage du Soleil au méridien local selon la longitude exacte du navire et l'équation du temps. La différence est l'avance (ou le retard) de l'horloge.

Il est donc possible de mesurer le temps universel. La précision du résultat dépend de celle de l'instrument utilisé et de l'équation du temps calculée : dans notre cas, la correspondance entre temps et angle est la suivante:

$$15^{\circ}/h \approx \frac{3''}{0,2s} \approx \frac{0,3''}{0,02s}$$

Les observatoires chargés de mesurer le décalage entre UT1 et UTC procèdent de la même manière avec des étoiles très lointaines (pulsars extragalactiques dont le mouvement apparent est quasi nul) pour que la correction à apporter au temps sidéral ainsi mesuré soit la plus faible possible. Certaines étoiles extragalactiques sont visibles et donc utilisables avec l'instrument de visée : le cœur de la galaxie d'Andromède apparaît comme une étoile de magnitude 3,4, située à 2,54 millions d'années-lumière du Soleil (notre galaxie la Voie Lactée mesure 100 000 années lumières de diamètre).

e) La stabilisation de la visée

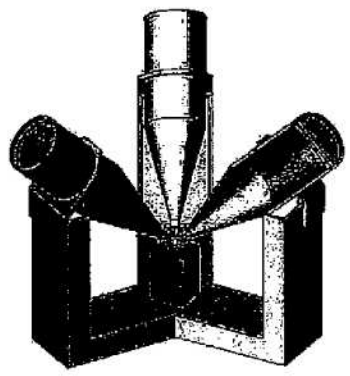
Les mouvements du navire perturbent la ligne de visée entre le navire et l'astre. Dans le cas du sextant, c'est l'équilibre du chef de quart qui stabilise l'instrument contre les vibrations ou les oscillations de roulis, tangage et lacet. L'équilibre du marin exploite un capteur interne, l'oreille interne, et un capteur externe, la vision. La vision est plus sensible pour réagir à une faible inclinaison du corps qui menace l'équilibre. La vision est aussi plus précise pour estimer l'angle ou la rotation subie par le corps. Pour s'en convaincre, il suffit d'essayer de se tenir debout sur un pied avec les yeux fermés : l'équilibre est plus difficile à garder qu'avec les yeux ouverts.

La stabilisation des antennes satellite installées à bord des navires est assurée par des moteurs de pointage en azimuth et en site commandés par une centrale inertielle intégrée au dôme de l'antenne. La précision de la visée suffit car l'antenne émet dans un cône dont l'ouverture compense l'erreur de pointage.

Antenne TV stabilisée	Antenne satellite stabilisée	Miroir stabilisée
Marque INTELLIAN modèle I9W (TV par satellite) stabilisation autonome sur 2 axes hauteur de $+ 5^{\circ}$ à $+ 90^{\circ}$ gisement $\pm 340^{\circ}$ roulis/tangage max $25^{\circ}/15^{\circ}$ poids total 55 Kg 14 900 € [WW72]	Marque INTELLIAN modèle IV60G (mini VSAT) stabilisation autonome sur 3 axes précision du pointage $0,2^{\circ}$ hauteur de $- 10^{\circ}$ à $+ 100^{\circ}$ gisement illimité giration max $12^{\circ}/s$ roulis/tangage/lacet max $25^{\circ}/15^{\circ}/8^{\circ}$ poids total 60 Kg 22 370 € [WW71]	marque AEROTECH modèle AOM360D-40 motorisation dur 2 axes précision du pointage $1''$ hauteur et gisements illimités vitesse de rotation $300^{\circ}/s$ prix inconnu estimé à 60 000 € [WW73]
		

Une stabilisation précise à $3''$ ou $0,3''$ près nécessiterait une centrale inertielle et des moteurs de pointage très onéreux comparé aux budgets d'équipement des navires de commerce. Ce prix pourrait être sensiblement diminué en remplaçant la centrale inertielle par un autre capteur d'attitudes.

Le viseur stellaire (startracker) est un système construit à l'origine pour mesurer les attitudes absolues des satellites dans un repère géocentrique (par exemple J2000 : avec l'axe (xx') pointant vers le point vernal à l'instant J2000, l'axe (yy') dans le plan équatorial à 90° de (xx') , et (zz') vers le pôle Nord) et corriger l'orientation de leurs antennes de communication. Il consiste à comparer les distances angulaires mesurées entre deux (ou plus) paires d'étoiles figurant dans un catalogue donnant leur position sur la sphère céleste (ascension droite et déclinaison) et leur magnitude. Le résultat du calcul donne les attitudes sous forme d'un quaternion (objet mathématique à quatre dimensions comparable aux nombres complexes pour deux dimensions) dans un repère géocentrique.

Viseur stellaire pour engin terrestre	Viseur stellaire pour avion ou navire de guerre	Viseur stellaire pour satellite
marque STARNAV modèle Vister 1 seule caméra en visible et proche infrarouge, sans réfrigération caméra, optique, unité de traitement de l'image et d'interface attitudes à 10 " près en x et y (1 σ) et 50 " près en z (=cap, à 1 σ) étoiles perçues de magnitude < 6 dimensions 110 x 80 x 30 mm 560 g avec l'optique 3 000 € (attitudes seulement) 10 000 € (attitudes + point) [WWW28] 	marque TREX modèle Daytime Stellar Imager version 2 1 caméra en bande I réfrigérée 3 télescopes Ø 100 mm et un prisme étoiles perçues de magnitude < 6,8 capteur orientable en azimut et en site attitudes à 0,5 " près prix estimé à 60 000 € [WWW24] 	marque BALL AEROSPACE & TECHNOLOGIES CORPORATION modèle HAST High Accuracy Star Tracker 2 caméras à 90 ° saturé par Soleil, Terre ou Lune champ de vision 8,8 ° x 8,8 ° étoiles visées et mises à jour en 1 s : 11 étoiles - magnitude ≤ 5,5 à 56 Hz 16 étoiles - magnitude ≤ 6,9 à 20 Hz disponibilité ≥ 94 % durant 7 ans attitudes à 0,1 " près (1 σ) prix estimé à 100 000 € [WWW74] 

Un viseur stellaire (équivalent des yeux du chef de quart) à bord du navire a besoin d'un inclinomètre (équivalent de l'équilibre du chef de quart) pour déterminer ses propres attitudes relatives (cap de la caméra, gîte de la caméra, assiette de la caméra). Dès lors, il peut en déduire sa position (et donc celle du navire) de deux manières :

- en comparant la verticale locale aux attitudes absolues dans le repère géocentrique J2000 ;
- en mesurant des hauteurs d'astre sur l'horizontale locale (plus exactement des distances zénithales sous la verticale locale) et calculant un point astronomique classique.

La caméra du viseur stellaire peut aussi servir à mesurer les rotations du navire sur les trois axes de la caméra : le traitement des images successives permet d'analyser des mouvements du ciel et d'en déduire les changements d'attitudes relatives. Cette information est exploitée pour corriger l'inclinomètre des perturbations dues aux mouvements du navire.

Pour connaître les attitudes relatives du navire, il faut pouvoir déterminer le gisement (angle entre l'axe longitudinal du navire et la direction visée) et le site (angle entre le plan des axes longitudinal+latéral du navire et la direction visée) de la caméra :

- caméra fixe sur le navire ;
- ou angles mesurables à l'aide des moteurs de pointage en gisement et en site.

La fréquence avec laquelle sont mesurées les attitudes du navire doit être suffisamment élevée pour ne pas être perturbée par les mouvements du navire. Le Daytime Stellar Imager que la société TREX a adapté aux avions et missiles capte les images du ciel à 1 000 Hz. A une fréquence de 30 Hz les images du ciel obtenues depuis un avion de chasse sont floues en raison du déplacement de la tache lumineuse de chaque astre sur le capteur. Pour les navires de plaisance (projet G-stell) ou les véhicules terrestres (projet VISTER) la fréquence d'image est d'environ 30 Hz. Cet ordre de grandeur est donc adapté aux navires de commerce.

Les vibrations du capteur et les mouvements du navire (lents et de faible amplitude) peuvent être stabilisés à l'aide d'un pendule (masse suspendue au capteur) et/ou d'un gyroscope. Cette technique s'écarte lentement de la position initiale en raison des couples parasites sur le capteur mais reste exploitable sur un intervalle d'environ 1 s séparant les observations de la caméra dans plusieurs directions.

Ce principe est utilisé sur des zooms d'appareil photo où une lentille est liée à un gyroscope et suspendue avec deux degrés de liberté. On peut constater le bénéfice de cet équipement sur une vidéo où la société FLIR compare une vidéo infrarouge avec et sans cette stabilisation sur un petit navire en mouvements [WWW75].

Le traitement des images permet de compenser des vibrations du capteur ou de faibles mouvements du navire en suivant plusieurs taches brillantes servant de repère sur les images successives. C'est la technique utilisée sur les satellites d'observation où les caméras sont soumises :

- aux vibrations du satellite ;
- au balayage latéral pour couvrir un champ plus large que celui de la caméra.

Un traitement est effectué à terre pour éliminer le flou des vibrations à l'aide de modèles de « bruit de mouvements du satellite » puis « recoller » les images comme un puzzle dont les pièces se recouvrent partiellement. En tenant compte de l'heure des prises de vue et des positions successives du satellite sur sa trajectoire, on peut ainsi reconstituer une image de toute la surface terrestre.

f) La réfraction atmosphérique

L'altitude de l'observateur au-dessus de la mer modifie la hauteur de l'horizon : un avion à haute altitude voit l'horizon naturel à plusieurs degrés sous l'horizon artificiel. La correction à apporter est appelée la « dépression de l'horizon » et peut être calculée précisément avec la formule $d = 1,93 \cdot (1 - \gamma) \sqrt{h}$ où d est en minutes d'angle, l'altitude h en mètres et γ dépend de l'humidité : (air sec) $0,04 \leq \gamma \leq 0,16$ (air humide). La dépression de l'horizon est donc corrigée avec précision, ce qui n'est pas le cas de la réfraction.

L'atmosphère terrestre doit être traversée par la lumière stellaire avant d'arriver dans le capteur d'image. Sa forme (presque) sphérique lui donne les propriétés d'une lentille optique. Les variations de température et de pression entre la haute atmosphère et la surface maritime font varier les indices de réfraction. La hauteur mesurée avec un sextant ou une caméra doit donc être corrigée de cette perturbation. Des modèles mêlant lois de l'optique et formules empiriques proposent de calculer cette correction en intégrant des paramètres plus ou moins nombreux. L'hétérogénéité de l'atmosphère le long de la trajectoire lumineuse oblige à choisir des profils de variation des paramètres. Malgré la précision apparente des calculs, il reste une part d'incertitude sur les conditions météo lors de l'observation, notamment près de l'horizon.

Les paramètres du calcul et les hypothèses pour ces modèles de réfraction sont les suivants :

- la réfraction latérale (modifiant l'azimut) est supposée négligeable ;
- la composition chimique de l'atmosphère, hors humidité, est supposée stable dans le temps : les variations séculaires et périodiques de pression partielle de dioxyde de carbone CO_2 ont un effet négligeable ;
- la hauteur observée H_o de l'astre est le principal paramètre influençant la réfraction et varie en sens contraire ;
- la température varie en sens contraire ;
- la pression varie dans le même sens que la réfraction ;
- l'humidité ;
- la longueur d'onde varie en sens contraire ;
- la latitude modifie la réfraction pour les astres proches de l'horizon ($H_o \leq 20^\circ$) ;
- l'altitude modifie la réfraction pour les astres proches de l'horizon ($H_o \leq 10^\circ$).

Le modèle de réfraction utilisé par l'IMCCE pour les éphémérides nautiques a été détaillé dans une publication de 1998 [LIV08]. Les formules suivantes permettent de calcul de la réfraction pour la lumière visible avec une précision de 0,01 " pour les hauteurs $H_o \geq 30^\circ$ et 0,05 " pour les hauteurs $30^\circ \geq H_o \geq 20^\circ$. En deçà, la précision du modèle devient moins bonne et plus incertaine :

$$R = R_0 \cdot \frac{P}{P_0} \cdot \frac{1,0552126}{1 + 0,00368084 \cdot T} \cdot A \cdot B \cdot \left(0,98282 + \frac{0,005981}{\lambda^2} \right) \cdot C \cdot \left(1 - 0,152 \cdot 10^{-5} \cdot f - 0,55 \cdot 10^{-9} \cdot f^2 \right) \cdot D \cdot (1 + E) \cdot H$$

avec les paramètres et unités suivantes :

R la réfraction en secondes d'angle (")

P la pression en Pascal (Pa)

$$P_0 = 101325 \text{ Pa}$$

T la température en degrés Celsius (°C)

$$T_0 = 15^\circ \text{C} = 288,16 \text{ K}$$

λ la longueur d'onde en micromètres (μm)

$$\lambda_0 = 0,590 \mu\text{m}$$

f la pression de vapeur en Pascal (Pa)

$$f_0 = 0 \text{ Pa}$$

et les formules de calcul pour les variables :

- la réfraction moyenne R_0

$$R_0 = 57,085 \cdot \tan(90 - H_0) - 0,0666 \cdot \tan^3(90 - H_0) \text{ pour } H_0 \geq 20^\circ$$

R_0 donné par une table pour $H_0 \leq 20^\circ$

- une seconde variable de la température

$$A = 1 - \left(0,003592 \cdot (T - 15) - 0,0000055 \cdot (t - 7,5)^2 \right) \cdot f(H_0) \text{ si } H_0 \geq 20^\circ$$

$f(H_0)$ donné par la table ci-contre pour $H_0 \geq 20^\circ$

A donné par une table pour $H_0 \leq 20^\circ$

- une seconde variable de la pression

$$B = 1 + \left(0,9430 \cdot 10^{-5} \cdot (P - P_0) - 0,78 \cdot 10^{-10} \cdot (P - P_0)^2 \right) \cdot g(H_0) \text{ si } H_0 \geq 20^\circ$$

$g(H_0)$ donné par la table ci-contre pour $H_0 \geq 20^\circ$

B donné par une table pour $H_0 \leq 20^\circ$

- un second facteur chromatique (= selon la longueur d'onde)

$$C = 1 \text{ si } H_0 \geq 06^\circ$$

C donné par une table pour $H_0 \leq 05^\circ$

- un second facteur d'humidité

$$D = 1 \text{ si } H_0 \geq 20^\circ$$

D donné par une table pour $H_0 \leq 20^\circ$

- un facteur de latitude φ du navire

$$E = 0 \text{ si } H_0 \geq 20^\circ$$

E donné par une table pour $H_0 \leq 20^\circ$

- un facteur d'altitude h de l'observateur

$$H = 1 \text{ si } H_0 \geq 10^\circ$$

H donné par une table pour $H_0 \leq 10^\circ$

H_0	$f(H_0)$	$g(H_0)$
90 °	0	0,0004
80 °	0	0,0004
70 °	0	0,0004
60 °	0	0,0005
55 °	0	0,0005
50 °	0,0002	0,0005
45 °	0,0006	0,00055
40 °	0,0012	0,0006
35 °	0,0021	0,0007
30 °	0,0034	0,0008
25 °	0,0056	0,0010
20 °	0,0097	0,0013

influence de la température et de la pression sur la réfraction [LIV08]

90- H_0	Réfraction R_0
°	"
70 0	2 35,471
70 10	2 36,866
70 20	2 38,281
70 30	2 39,720
70 40	2 41,183
70 50	2 42,667
71 0	2 44,176
71 10	2 45,710
71 20	2 47,271
71 30	2 48,857
71 40	2 50,471
71 50	2 52,112
89 0	23 29,419
89 10	24 44,568
89 20	26 6,318
89 30	27 35,427
89 40	29 12,790
89 50	30 59,345
90 0	32 57,971

réfraction moyenne R_0 pour les hauteurs

$H_0 \leq 20^\circ$ (extraits) [LIV08]

90-H ₀		A			
°	'	t = -30°	t = -10°	t = 10°	t = 30°
0	0	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000
10	0	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000
20	0	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000
30	0	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000
40	0	1.00003	1.00002	1.00000	0.99999
45	0	1.00010	1.00005	1.00001	0.99997
50	0	1.00020	1.00011	1.00002	0.99994
55	0	1.00036	1.00019	1.00004	0.99989
60	0	1.00058	1.00031	1.00006	0.99983
65	0	1.00096	1.00051	1.00010	0.99970
70	0	1.00162	1.00088	1.00017	0.99949
71	0	1.00181	1.00099	1.00019	0.99942
72	0	1.00205	1.00111	1.00022	0.99935
73	0	1.00232	1.00126	1.00025	0.99927
74	0	1.00263	1.00144	1.00028	0.99916
89	0	1.14647	1.07660	1.01454	0.95833
89	10	1.16484	1.08563	1.01617	0.95388
89	20	1.18675	1.09623	1.01805	0.94878
89	30	1.21316	1.10876	1.02025	0.94289
89	40	1.24550	1.12374	1.02283	0.93609
89	50	1.28567	1.14184	1.02588	0.92814
90	0	1.37050	1.17963	1.03230	0.91170

facteur de température A (extraits) [LIV08]

90-H ₀		B			
°	'	p = 50000	p = 70000	p = 90000	p = 110000
0	0	0.99979	0.99989	0.99995	1.00003
10	0	0.99979	0.99989	0.99995	1.00003
20	0	0.99979	0.99989	0.99995	1.00003
30	0	0.99979	0.99988	0.99995	1.00004
40	0	0.99979	0.99985	0.99994	1.00004
50	0	0.99972	0.99982	0.99993	1.00005
60	0	0.99958	0.99974	0.99991	1.00007
65	0	0.99951	0.99967	0.99988	1.00009
70	0	0.99929	0.99956	0.99985	1.00012
71	0	0.99922	0.99952	0.99983	1.00013
72	0	0.99915	0.99948	0.99981	1.00015
73	0	0.99908	0.99945	0.99980	1.00016
74	0	0.99901	0.99937	0.99977	1.00017
87	0	0.98807	0.99267	0.99733	1.00207
87	15	0.98695	0.99197	0.99707	1.00227
87	30	0.98570	0.99120	0.99679	1.00248
87	45	0.98430	0.99032	0.99646	1.00274
88	0	0.98278	0.98937	0.99611	1.00302
88	15	0.98097	0.98824	0.99570	1.00334
88	30	0.97897	0.98696	0.99522	1.00371
88	45	0.97662	0.98553	0.99469	1.00414
89	0	0.97400	0.98390	0.99407	1.00463
89	15	0.97105	0.98197	0.99336	1.00519
89	30	0.96755	0.97979	0.99255	1.00584
89	45	0.96360	0.97730	0.99160	1.00660
90	0	0.95925	0.97452	0.99061	1.00753

facteur de pression B (extraits) [LIV08]

C				C			
nm	90-H ₀ = 85°	90-H ₀ = 88°	90-H ₀ = 90°	nm	90-H ₀ = 85°	90-H ₀ = 88°	90-H ₀ = 90°
400	1.00025	1.00071	1.00168	560	1.00002	1.00003	1.00023
420	1.00021	1.00058	1.00143	580	1.00000	1.00001	1.00007
440	1.00018	1.00048	1.00110	600	0.99999	0.99998	0.99995
460	1.00014	1.00039	1.00092	620	0.99998	0.99996	0.99988
480	1.00011	1.00030	1.00074	640	0.99997	0.99992	0.99982
500	1.00008	1.00023	1.00058	660	0.99997	0.99988	0.99977
520	1.00005	1.00016	1.00046	680	0.99996	0.99986	0.99962
540	1.00003	1.00010	1.00032	700	0.99995	0.99984	0.99968

facteur chromatique C selon la longueur d'onde, pour les hauteurs $H_0 \leq 05^\circ$ [LIV08]

f	D				
Pa	$90-H_0 = 70^\circ$	$90-H_0 = 80^\circ$	$90-H_0 = 85^\circ$	$90-H_0 = 88^\circ$	$90-H_0 = 90^\circ$
0	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000
200	1.00000	1.99999	0.99997	1.99989	0.99959
400	1.00000	0.99998	0.99994	0.99975	0.99906
600	0.99999	0.99996	0.99987	0.99959	0.99843
800	0.99999	0.99994	0.99982	0.99942	0.99774
1000	0.99998	0.99992	0.99976	0.99922	0.99675
1200	0.99998	0.99991	0.99970	0.99901	0.99588
1400	0.99997	0.99989	0.99965	0.99878	0.99491
1600	0.99997	0.99988	0.99958	0.99855	0.99383
1800	0.99996	0.99986	0.99950	0.99825	0.99254
2000	0.99996	0.99985	0.99941	0.99797	0.99125
2200	0.99995	0.99981	0.99931	0.99765	0.98989
2400	0.99995	0.99978	0.99922	0.99731	0.98830
2600	0.99994	0.99975	0.99912	0.99696	0.98662
2800	0.99994	0.99971	0.99901	0.99659	0.98487
3000	0.99993	0.99967	0.99889	0.99618	0.98308
3200	0.99992	0.99964	0.99878	0.99576	0.98110
3400	0.99991	0.99960	0.99866	0.99533	0.97905
3600	0.99990	0.99956	0.99854	0.99487	0.97686

facteur d'humidité C selon la pression de vapeur f , pour les hauteurs $H_0 \leq 20^\circ$ [LIV08]

φ	$10^5 \cdot E$								
$^\circ$	$90-H_0=70^\circ$	$90-H_0=80^\circ$	$90-H_0=82^\circ$	$90-H_0=84^\circ$	$90-H_0=86^\circ$	$90-H_0=87^\circ$	$90-H_0=88^\circ$	$90-H_0=89^\circ$	$90-H_0=90^\circ$
0°	-6	-23	-32	-53	-90	-124	-175	-255	-400
10°	-5	-21	-30	-48	-85	-115	-163	-240	-378
20°	-4	-16	-25	-39	-69	-94	-132	-195	-313
30°	-2	-11	-18	-25	-46	-62	-88	-129	-210
40°	0	-2	-5	-9	-16	-22	-32	-48	-87
50°	0	2	4	7	13	19	25	37	58
60°	2	9	14	23	41	58	83	120	182
70°	4	16	23	37	65	90	129	186	283

facteur de latitude $(1+E)$ selon la latitude du navire φ , pour les hauteurs $H_0 \leq 20^\circ$ [LIV08]

h	H			
m	$90-H_0 = 80^\circ$	$90-H_0 = 85^\circ$	$90-H_0 = 88^\circ$	$90-H_0 = 90^\circ$
0	1.00000	1.00000	1.00000	1.00000
500	0.99998	0.99952	0.99608	0.9727
1000	0.99996	0.99905	0.99218	0.9460
1500	0.99994	0.99857	0.98835	0.9198
2000	0.99992	0.99815	0.98453	0.8942
2500	0.99990	0.99772	0.98083	0.8693
3000	0.99988	0.99730	0.97720	0.8449
3500	0.99986	0.99688	0.97368	0.8209
4000	0.99984	0.99651	0.97023	0.7979
4500	0.99983	0.99619	0.96700	0.7751
5000	0.99981	0.99587	0.96387	0.7532

facteur d'altitude H selon la hauteur de l'observateur, pour les hauteurs $H_0 \leq 10^\circ$ [LIV08]

La réfraction en infrarouge (bande I) peut être calculée avec ce modèle avec une précision de 0,1 " pour des hauteurs $H_o \geq 20^\circ$. Pour les bandes H et K, les constantes doivent être adaptées pour garder la même précision. La largeur du spectre infrarouge, ou d'une seule bande, exploitée par une caméra entraîne une variation de longueur d'onde plus importante qu'en lumière visible. Puisque la réfraction change avec la longueur d'onde, la tache de lumière est légèrement diffusée sur le capteur : l'image est floue. Pour améliorer le rapport signal sur bruit, il est donc préférable d'observer les astres brillants.

Le logiciel MODTRAN, actuellement dans sa version 5.2.2, est développé par l'Air Force Research Laboratory (AFRL) des États Unis pour modéliser la trajectoire et la vitesse des ondes électromagnétiques dans l'atmosphère naturelle ou polluée (nuages chimiques de pollution, fumée volcanique ou d'incendie). Il adapte les prédictions à des bandes de longueur d'onde très étroites pour davantage de précision. Il est distribué sur internet au prix de 1 000 € plus 230 € de mises à jour annuelle. Sa précision est meilleure que 0,1 ".

En résumé, le calcul de la réfraction atmosphérique est entaché d'une erreur dont l'ordre de grandeur, avec les logiciels actuels, est négligeable en comparaison de la précision recherchée sur le point final. Ce calcul précis nécessite cependant que les paramètres météo soient entrés dans le logiciel : température, pression, humidité et longueur d'onde (et latitude + altitude pour les astres proches de l'horizon $H_o \leq 20^\circ$). Par précaution, on évitera les astres proches de l'horizon $H_o \leq 20^\circ$.

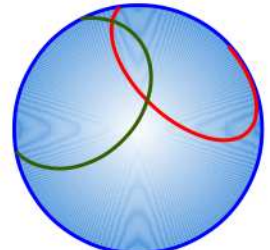
g) La détermination du point

Le calcul de la position du navire avec une précision de 3 ", voire de 0,3 ", et une fréquence d'environ un point par seconde nécessite un logiciel. Il existe plusieurs méthodes basées sur des propriétés géométriques et / ou des simplifications analytiques. Quelques unes sont citées à titre d'exemple et pour montrer leur intérêt.

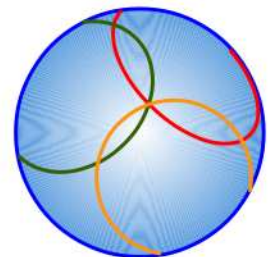
Le calcul de l'intersection des cercles de hauteur utilise les coordonnées en trois dimensions pour chercher le point situé simultanément sur :

- la sphère terrestre ;
- les cercles de hauteur correspondant à chaque astre observé.

Deux astres observés conduisent à deux points d'intersection possibles (éventuellement proches ou confondus pour deux astres dont les azimuts sont égaux à 180 ° près). La connaissance approximative de la position du navire permet de lever le doute entre les deux solutions possibles.



2 observations $\Rightarrow$ 2 points

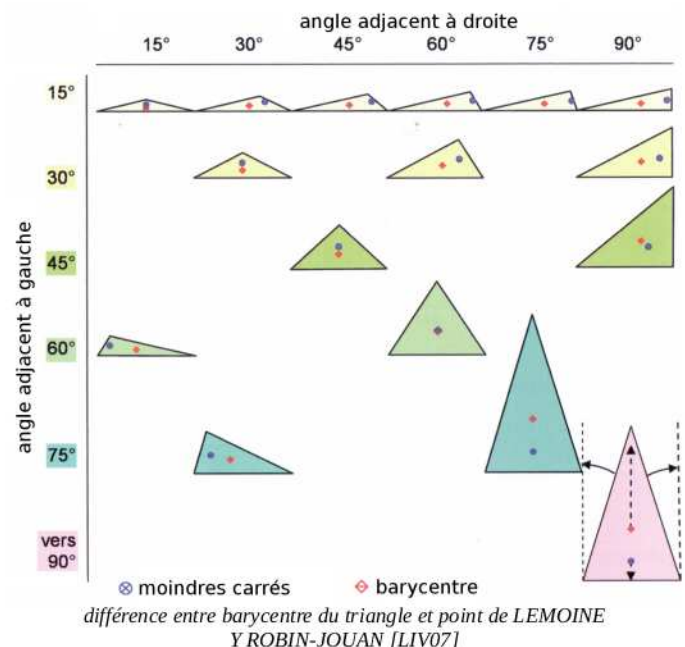


3 observations $\Rightarrow$ 1 point

Trois astres observés conduisent théoriquement à un seul point d'intersection possible. En pratique l'équation en trois dimensions d'un petit cercle (cercle dont le centre est différent du centre de la Terre) n'existe pas en coordonnées polaires ou cartésiennes, obligeant à des complications analytiques (système d'équations définissant l'intersection d'un plan et d'une sphère, paramétrage, résolution du système difficile à linéariser en raison des coordonnées au carré, etc). D'autre part l'intersection cherchée est souvent un triangle (dont les côtés sont des arcs de cercles de hauteurs) et aucun point ne se situe simultanément sur les trois cercles.

Le point le plus probable est situé à la distance minimum des trois côtés et appelé point de LEMOINE, qui peut être calculé par voie analytique ou trouvé en quelques itérations par la méthode des moindres carrés à l'aide d'un ordinateur.

Dans sa version actuelle, le module de navigation astronomique de SENIN (ECDIS produit par EADS et SODENA pour la MARINE NATIONALE) simplifie le problème en calculant les droites de hauteur depuis un point estimé et cherche la position du navire dans le triangle d'intersection des droites. La recherche consiste à prendre le barycentre du triangle au lieu du point de LEMOINE [PRV03]. Or ces deux méthodes peuvent donner des points différents : le schéma ci-contre montre la différence dans un triangle à base horizontale selon les angles des sommets de droite et de gauche.



La méthode des grands cercles consiste à trouver les grands cercles (cercles dont le centre est confondu avec celui de la Terre) passant par les intersections des cercles de hauteur pris deux à deux. Le calcul est simplifié en utilisant les coordonnées cartésiennes avec l'origine au centre de la Terre : le grand cercle étant l'intersection de la sphère terrestre et d'un plan, la méthode consiste à trouver les plans passant par le centre de la Terre et par les intersections des cercles de hauteur pris deux à deux.

L'équation d'un plan passant par le centre de la Terre en coordonnées cartésiennes est de la forme $a \cdot x + b \cdot y + c \cdot z = 0$ où les nombres a , b et c sont les coordonnées d'un vecteur $\vec{n}$ normal à ce plan.

Deux observations permettent de déterminer un plan mais pas la position du navire (il y a deux solutions possibles). Trois observations (ou plus) permettent de trouver au moins deux plans. Leur intersection est une droite dont un vecteur directeur $\vec{u}$ est perpendiculaire aux deux vecteurs normaux $\vec{n}_1$ et $\vec{n}_2$ des plans.

Cette droite passe par le centre de la Terre et par deux points à la surface terrestre dont l'un est la position du navire. Comme ces points sont diamétralement opposés, il est aisé de sélectionner celui qui correspond à la position du navire.

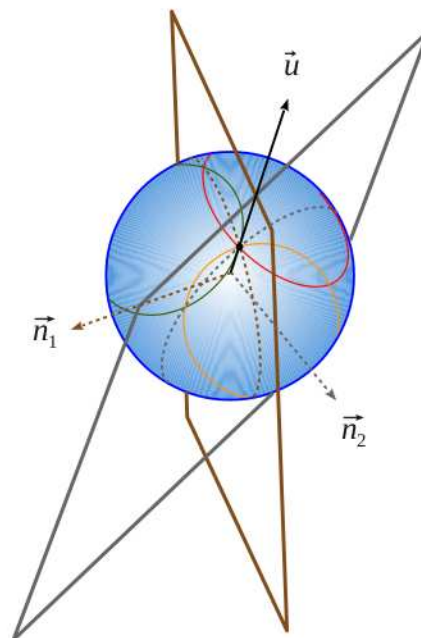
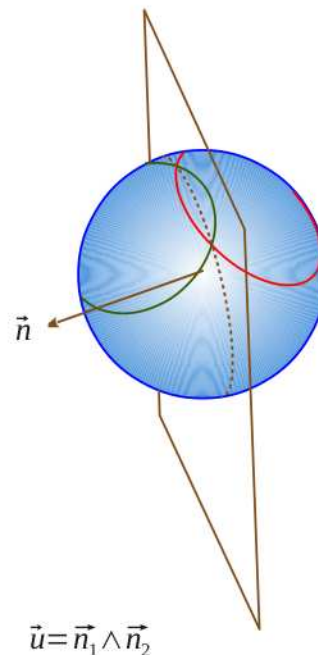
Cette méthode ne fonctionne pas pour trois astres situés dans le même plan que le centre de la Terre : les plans des grands cercles sont alors confondus, les vecteurs $\vec{n}_1$ et $\vec{n}_2$ sont parallèles et leur produit vectoriel devient nul. Il n'est pas possible de trouver une unique droite d'intersection des plans et la position du navire reste indéterminée. On appelle singularité les situations géométriques conduisant un calcul dans une impasse : dans le cas des astres coplanaires avec la Terre, la méthode de MARCQ SAINT HILAIRE permet de trouver la position du navire mais pas celle des grands cercles.

D'autre part, l'explication ci-dessus a ignoré un troisième plan et son vecteur $\vec{n}_3$. Il est donc possible de déterminer aussi la position du navire avec une droite intersection des plans 1 et 3 ou une autre avec les plans 2 et 3. En pratique les trois solutions trouvées sont rarement confondues ; on peut alors :

- chercher le point de LEMOINE ;
- et/ou pondérer les solutions selon la hauteur des astres utilisés (pénaliser les astres proches de l'horizon en raison des fortes déviations de la lumière dans l'atmosphère, ceux proches du zénith car leur cercle de hauteur est réduit) ou selon la précision des éphémérides (meilleure pour le Soleil et les étoiles que pour les planètes), etc...

Si on observe quatre astres, le nombre de plans passe à six. Avec cinq astres on obtient dix plans. Avec six astres on obtient quinze plans... Le nombre de droites, et donc de solutions, est quinze pour quatre astres, quarante-cinq pour cinq astres, cent-cinq solutions pour six astres, etc... (le nombre de solutions suit la même loi en fonction du nombre de plans).

Augmenter le nombre d'observations apporte de l'information et améliore la précision du point final mais la complexité des calculs croît si rapidement que la résolution du problème, même avec un ordinateur, devient rapidement problématique.



avec $n \geq 3$ astres on obtient :

$$\frac{n \cdot (n-1)}{2} \text{ plans d'intersections et } \frac{1}{8} \cdot n \cdot (n-1) \cdot (n^2 - n - 2) \text{ solutions}$$

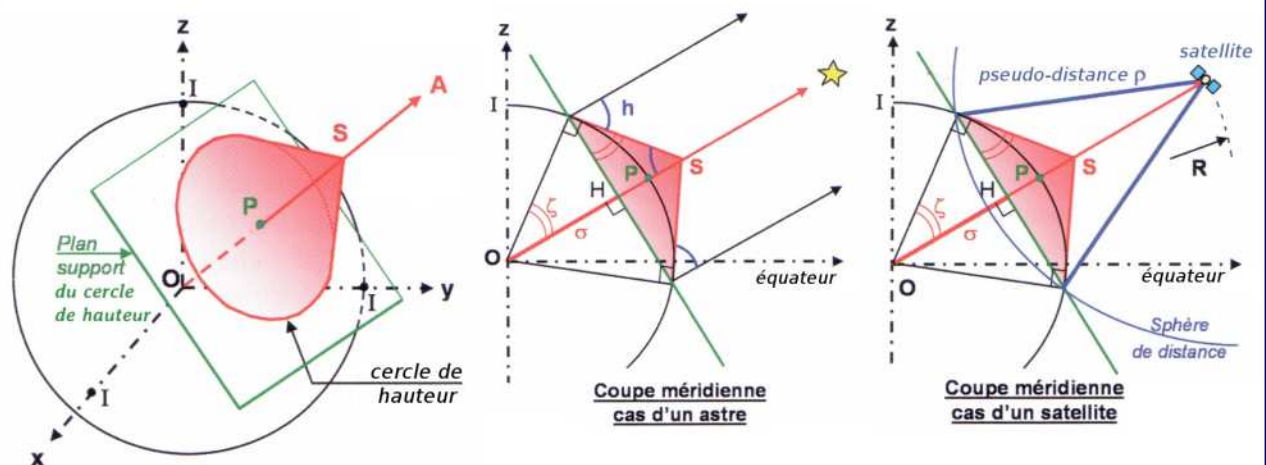
C'est la méthode initialement mise en œuvre dans le logiciel ALMICANTARAT [WWW07] avant que l'auteur développe une méthode personnelle baptisée ASTRID, pour « calcul du point ASTro par application de la méthode des moindres carrés à un espace TRIDimensionnel, [...] et la dépose sous enveloppe SOLEAU à l'Institut National de la Propriété Industrielle (INPI).

La méthode du plan des sommets, formulée par Y ROBIN JOUAN dans les années 1990 et décrite dans son ouvrage « Navigation aux astres et aux satellites » paru en février 2013 [LIV07], a l'originalité d'être initialement exploitée pour le calcul de la position par mesure des signaux des satellites GPS. Elle s'applique aux observations astronomiques et peut même traiter les relèvements sur un amer ou les distances mesurées au radar. Elle utilise une propriété géométrique des « sommets », points associés à chaque astre observé ou satellite mesuré, situés dans le même plan : l'horizon de l'observateur, tangent à la sphère terrestre à la position du navire.

En mesurant la hauteur d'un astre au-dessus de l'horizon, on en déduit que le navire est situé sur un cercle de hauteur contenant tous les points de la surface terrestre depuis lesquels ce même astre est observé au même instant avec la même hauteur au-dessus de l'horizon local. Dans le cas d'une mesure de pseudo-distance entre l'observateur et un satellite GPS (notée ρ sur le schéma), ce cercle est l'intersection de la sphère terrestre et de la sphère centrée sur le satellite et de rayon égal à la pseudo-distance.

Ce cercle de hauteur est l'intersection de la sphère terrestre et d'un cône dont l'axe passe par l'astre (ou le satellite) et le centre de la Terre :

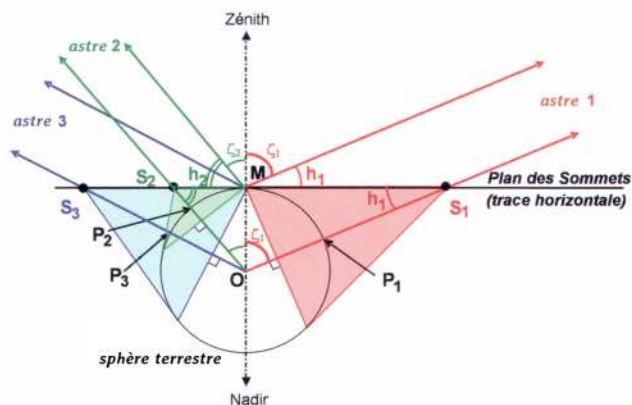
- si on choisit comme sommet de ce cône le point S situé sur le plan de l'horizon de l'observateur, alors la demi-ouverture au sommet de ce cône est égale à la hauteur de l'astre (notée h sur le schéma) ;
- si on choisit comme sommet de ce cône le centre O de la Terre, alors la demi-ouverture au sommet de ce cône est égale au complément de la hauteur de l'astre appelé aussi distance zénithale (notée $\zeta = 90 - h$ sur le schéma).



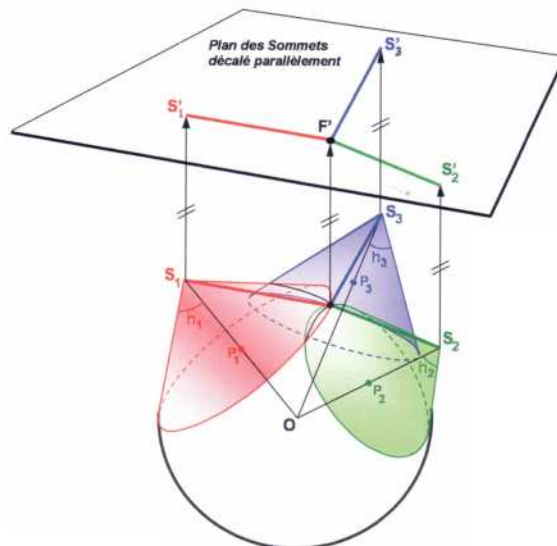
sommet S du cône associé à l'observation d'un astre ou d'un satellite [LIV07]

Les coordonnées sphériques de S sont la distance OS, l'angle horaire de l'astre AH_{ao} et la déclinaison de l'astre D . La distance OS peut être calculée : $OS = \frac{I}{\sin h}$ où I est le rayon terrestre.

A partir de trois observations ou plus (hauteur d'astre ou mesure de pseudo-distance avec un satellite GPS) ou plus, on peut calculer l'équation du plan des sommets : en coordonnées cartésiennes elle est de la forme $a \cdot x + b \cdot y + c \cdot z = 0$ où les nombres a, b et c sont les coordonnées d'un vecteur $\vec{n}$ normal à ce plan. Le vecteur $\vec{n}$ permet de déduire la position du navire (notée M sur le schéma) à l'intersection de la surface terrestre et de l'axe passant par le centre orienté par le vecteur $\vec{n}$.



plan des sommets pour deux et trois observations [LIV07]



Les calculs intermédiaires sont réalisés en coordonnées cartésiennes et la détermination du vecteur normal $\vec{n}$ repose sur une inversion de matrice à 3 colonnes et autant de lignes que d'observations. Des algorithmes de recherche des moindres carrés sont exploités pour faire converger les calculs vers la solution. Un indicateur de précision DOP (Dilution Of Precision) est calculé pour rendre compte de la répartition géométrique des astres observés dans le ciel : son interprétation est identique à celle du DOP du GPS. Un rayon d'erreur est aussi calculé à 95 % (soit 2σ) comme pour le GPS.

Avec les astres ou satellites le point est calculé en trois dimensions. Un cercle de distance mesurée entre le navire et un amer terrestre (radar ou télémètre laser) est interprété comme un cercle à la surface de la sphère terrestre : un sommet peut donc lui être associé comme pour un astre ou un satellite. Un relèvement sur un amer terrestre est interprété comme un plan [PRV09] :

- passant par l'amer et le centre de la Terre ;
- faisant un angle égal au relèvement avec le méridien de l'amer.

Cette méthode a été programmée par son inventeur dans le logiciel ASTROLAB dont la version 3 est distribuée avec l'ouvrage présentant la méthode. Cette version 3 est destinée à tenir sur une calculatrice programmable en BASIC dans 256 Ko de mémoire et calcule le point astronomique :

- avec trois observations ou plus ;
- avec un générateur d'éphémérides mis à jour en 2011 ;
- avec l'heure de l'ordinateur (à mettre à jour par les soins de l'utilisateur) ;
- avec calcul des corrections de hauteur ;
- avec une précision de $0,001^\circ$ soit $3,6''$ pour les calculs intermédiaires et $0,1' = 6''$ pour l'affichage ;
- avec deux solutions si seulement deux astres sont observés ;
- avec un calcul de DOP et une alarme en cas de résultat ≥ 12 ;
- avec un calcul d'écart-type sur la distance (rayon d'erreur) ;
- sans traitement des singularités (cas particuliers où le plan des sommets se réduit à une droite ou pour des astres coplanaires) ;
- sans mise à jour par internet (constantes pour le calcul des éphémérides, top horaire, secondes intercalaires) ;
- sans prise en compte de l'aplatissement terrestre ;
- sans hybridation avec les pseudo-distances de satellites, relèvements ou distances d'amers terrestres.

Un logiciel plus perfectionné est en cours de qualification et destinée à tourner sur le logiciel libre Scilab :

- avec une hybridation des mesures de pseudo-distances de satellites du type GPS et des hauteurs d'astres ;
- avec un traitement des singularités et rejet de certaines observations qui augmenteraient le DOP ;
- avec une prise en compte de l'aplatissement terrestre ;
- avec d'autres fonctions et améliorations dont les détails ne sont pas encore publiés.

Une version 5 d'ASTROLAB sera directement déduite et les résultats seront publiés.

L'avantage de cette méthode est de permettre le calcul d'un point mêlant des observations autrefois concurrentes (astres et satellites) ou exclusives (navigation côtière ou au large) tout en offrant des indicateurs auxquels le GPS a habitué le marin : indicateur DOP, cercle d'erreur à 95 %.

Les attitudes absolues du navire mesurées avec un viseur stellaire ne permettent pas d'en déduire une position du navire dans l'espace car il manque une troisième dimension : la distance. Pour les étoiles, cette distance est infinie en comparaison de la précision recherchée sur le point. Pour les planètes et leurs satellites suffisamment éclairés par le Soleil, ces distances peuvent être mesurées avec une précision plusieurs dizaines de kilomètres. Un calcul de position dans l'espace à partir de distances angulaires entre planètes ou satellites artificiels est théoriquement envisageable mais sa précision de plusieurs kilomètres lui enlève tout intérêt pour la navigation maritime.

La position du navire peut être déduite de la comparaison de la direction mesurée par l'inclinomètre avec les attitudes absolues mesurées par le viseur stellaire : l'inclinomètre donne la direction et le sens du vecteur $\vec{n}$ normal de la méthode du plan des sommets. Connaissant l'angle de rotation terrestre avec l'horloge et les éphémérides, on peut donc calculer la latitude et la longitude du navire.

L'altitude du navire ne peut pas être déduite à ce stade. En revanche, on peut calculer la hauteur de plusieurs astres depuis la position exacte du navire à une altitude estimée. L'erreur avec l'altitude réelle devrait créer un biais constant entre hauteurs calculées et hauteurs observées, correspondant à la différence de dépression de l'horizon. Une précision de 1 " sur cette erreur de dépression permet de retrouver la différence d'altitude à 5 cm près.

Les attitudes relatives du navire peuvent être déduites des attitudes absolues et de la direction de l'inclinomètre. On peut donc aussi exploiter la méthode du plan des sommets avec les observations de plusieurs astres pour confirmer le point trouvé par le viseur stellaire et retrouver l'altitude du navire.

Les sondes interplanétaires peuvent théoriquement mesurer leur position dans l'espace en observant les étoiles à travers les ceinture d'astéroïdes : la ceinture principale située entre les orbites de Mars et Jupiter (520 000 objets répertoriés par le Minor Planet Center, organisme dépendant de l'International Astronomical Union), les astéroïdes « troyens » tournant sur l'orbite de Jupiter (5 000 objets), la ceinture de Kuiper au-delà de l'orbite de Mercure (1230 objets) [WWW31]. L'inversion de l'effet de parallaxe fournit la position de la sonde. C'est un système d'autonavigation qui ne me semble pas avoir été adopté définitivement par les opérateurs spatiaux et donc qui nécessite d'être amélioré [PRV02].

Par le même principe, l'observation des planètes sur la voute céleste peut théoriquement permettre de déduire le déplacement de l'observateur dans l'espace, donc de calculer sa route-fond et sa vitesse-fond. Étant donné les performances d'une caméra capable d'observer les astéroïdes depuis la surface terrestre, cette technique, si elle est maîtrisée un jour, est trop onéreuse pour la marine marchande.

astre	précision en distance
Lune	15 m
Mars	60 km
Vénus	70 km
Soleil	220 km
Mercure	440 km
Jupiter	1 500 km
Saturne	5 400 km
Uranus	6 550 km
Pluton	20 000 km
Neptune	20 000 km

précision en distance des positions prédites par le modèle VSOP 87 pour les planètes et leurs satellites [WWW01]

L'aplatissement terrestre doit être pris en compte dans le calcul de la position car la direction verticale locale mesurée par l'inclinomètre ne passe pas par le centre de la Terre. L'erreur de position entre un modèle sphérique et un modèle en ellipsoïde peut atteindre 11,5 M [LIV07]. L'International Astronomical Union (IAU) propose des algorithmes pour prendre en compte ce paramètre avec ellipsoïde WGS 84 et les met en œuvre dans son logiciel SOFA [WWW05]. Certains logiciels comme STELLA de la marine américaine prennent en compte cette aplatissement pour corriger la position du navire mais ne détaillent pas comment. D'autre comme ASTROLAB v3.1 de M. Y ROBIN JOUAN précisent qu'ils utilisent un modèle sphérique. La plupart des logiciels n'en parlent même pas. Pour une précision finale de 3 " voire 0,3 " sur la position du navire, ce paramètre doit être pris en compte.

En résumé, les algorithmes permettant de déterminer la position du navire à partir d'observations astronomiques précises avec viseur stellaire et inclinomètre. La méthode du plan des sommets de M. Y ROBIN-JOUAN présente les avantages de pouvoir hybrider des mesures de hauteur d'astre, de pseudo-distances sur des satellites artificiels, de distance avec un amer côtier au radar (ou télémètre laser) et des relèvements d'amers avec un compas. En outre, son implémentation dans le logiciel ASTROLAB v3.1 fournit un indicateur de dilution de la précision (DOP) et un cercle d'erreur probable à 95 % (2σ). La navigation astronomique renforcée par les logiciels peut donc offrir une alternative crédible au GPS sans bouleverser les habitudes prises avec la carte électronique.

h) Des réalisations existantes

Le Daytime Stellar Imager de la société américaine TREX, présenté plus haut en plusieurs versions, est fabriqué pour des clients militaires : le besoin d'un système de positionnement insensible aux pannes et au brouillage impose un coût incompatible avec le budget d'équipement d'un navire marchand.

Fixé au navire et fonctionnant sans intervention humaine, le système rencontre des difficultés technologiques avec l'environnement marin : salinité et humidité.

Depuis les années 1950, la défense américaine mène un programme de recherche baptisé Automated Celestial Navigation System (ACNS) dont la société TREX est aujourd'hui un des principaux partenaires [WWW32] [WWW33].

fabricant	TREX
modèle	Daytime Stellar Imager V3
année	2007
prix	estimé à 100 000 €
précision	30 m
fréquence	1 point toutes les 10 s
capteur	1 caméra en bande H
lentille extérieure	10 cm
champ de vision	3' 12" x 2' 33'
pointage	2 moteurs de pointage à 1 "
horloge	carte IRIG à 1 ms
verticale	inclinomètre 2 axes à 0,21 "

fabricant	STARNAV
modèle	VISPER
année	2014 ?
prix	estimé à 10 000 €
précision	0,5 M ?
fréquence	10 points par secondes ?
capteur	1 caméra en bande I
lentille extérieure	environ 8 cm
champ de vision	?
pointage	2 moteurs de pointage à 1' ?
horloge	carte IRIG à 1 ms ?
verticale	inclinomètre 2 axes à 0,5' ?

Le viseur stellaire Vister de la société normande STARNAV, présenté plus haut, est destiné initialement à la mesure des attitudes relatives d'un véhicule ou d'un instrument de visée. Ce projet baptisé MIRIADE (militarization of attitude measurement deduced from the stars) est mené avec la Direction Générale de l'armement (DGA) [WW34].

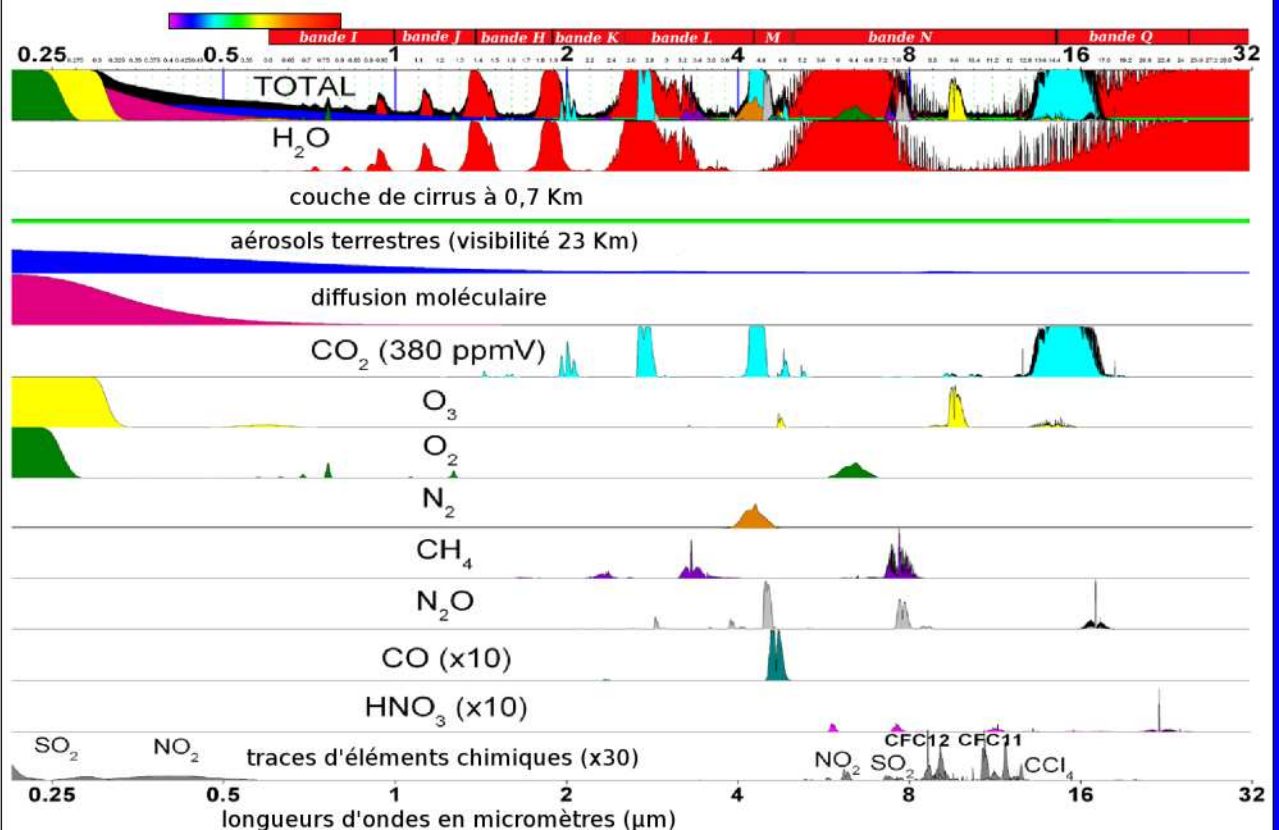
Une seconde phase du projet prévoit de calculer la position du véhicule à 0,5 M près [PRV06]. Les essais du premier projet sont prévus fin 2013 et les détails du second ne sont pas encore arrêtés. A priori aucune mesure inertielle n'est prévue pour entretenir le point entre deux observations.

Le sextant électronique G-stell de la société SOWILO, associée à STARNAV, est basé sur le même principe que Vister mais se contente de moindres performances pour un point à 1 M près et un prix de 1 500 € visant la clientèle de la plaisance. Le point est effectué à l'initiative du chef de quart et nécessite son intervention pour tenir la caméra à la main en direction du ciel.

La caméra stabilisée est un produit déjà commercialisée pour surveiller les abords du navire de commerce en zone de piraterie, améliorer l'anticollision ou chercher un homme à la mer. Une console de visualisation permet au chef de quart d'orienter la visée en azimuth et en site.

La stabilisation peut être inexistante (l'image bouge avec le navire), grossière (un gyroscope ou un pendule compense partiellement les mouvements du navire) ou optimale (correction des attitudes par une centrale inertielle). Pour les applications militaires, l'objectif désigné par l'opérateur est poursuivi par l'ordinateur en exploitant le contraste vidéo : la stabilisation est alors basée sur les attitudes du navire et les mouvements de l'objectif.

Le spectre de lumière exploité est une bande choisie parmi les longueurs d'onde visible ou une partie des infrarouges selon les « fenêtres » que l'atmosphère laisse pénétrer jusqu'à la surface terrestre.



courbe de l'absorption et de la diffusion atmosphérique selon les longueurs d'onde [WW30]

Caméra non stabilisée	Caméra stabilisée par un gyroscope sur l'optique	Caméra stabilisée par une centrale inertielle
marque FLIR modèle M324L caméra infrarouge à microbolomètres résolution 320 x 240 et caméra couleur en visible résolution 768 x 494 champ de vision 24 ° x 19 ° zoom électronique x2 axe de visée fixe 25 images par seconde 13 145 € [WWW76]	marque FLIR modèle M618CS caméra infrarouge à microbolomètres résolution 640 x 480 et caméra couleur en visible orientable en gisement résolution 530 x 530 champ de vision 18 ° x 14 ° zoom électronique x2 et x4 zoom optique x36 axe de visée gyro-stabilisé 25 images par seconde 34 495 € [WWW77]	marque SAGEM modèle VIGY Observer 2 caméras infrarouge capteurs à microbolomètres 3 – 5 μm refroidi 9 ° x 6,75 ° et zoom x3 8 – 12 μm – 7,6 ° x 5,7 ° 1 caméra en visible 40° - zoom x16 1 télémètre laser gisement illimité hauteur de – 24 ° à + 55 ° 120 000 € [WWW78] [PRV10]
		

Les produits actuels les plus performants sont souvent des adaptations des modèles destinés aux clients militaires. Les contraintes de résistance (chocs mécaniques, impulsion électromagnétique, basse consommation, longue durée de vie, etc) les rendent onéreux. Parmi les producteurs consultés, aucun n'a envisagé d'ajouter à ses caméras stabilisées une fonction de navigation céleste.

L'alidade électronique est un capteur orienté par le chef de quart vers un amers dont il souhaite mesurer le relèvement. La direction de référence peut être donnée par un compas magnétique, un répéteur de compas électronique, gyroscopique, satellitaire ou stellaire. Le relèvement mesuré est plus précis qu'une lecture à l'œil et peut être transmise numériquement à la carte électronique pour faciliter le tracé du point.

La reconnaissance des amers peut être effectuée par le chef de quart en vision directe ou sur une image issue d'une caméra équipée d'un zoom variable, en lumière visible, infrarouge ou vision nocturne (amplification de la lumière visible). La console de visualisation pourrait superposer à l'image du paysage nautique diverses informations :

- relèvement de la direction visée ;
- hauteur de la direction visée ;
- photo de l'amer visé ;
- caractéristiques des feux ;
- côte en réalité virtuelle ;
- astres et constellations dans le champ visible ;
- informations AIS du navire proche de la direction visée ;
- extrait de l'ECDIS entre le navire et la côte dans la direction visée ;
- relèvement(s) déjà tracé(s) pour le point en cours ;
- une cible pour désigner un point lumineux à suivre automatiquement ;

- la tache illuminée par un tir laser ;
- etc.

La reconnaissance des amers peut être automatisée à l'aide du traitement de l'image dans des limites de visibilité et de mouvements d'image dépendant des performances du système.



vue d'artiste de l'alidade électronique [WW79]

En décembre 2009, le centre américain des systèmes de combat naval et spatial (SPAWAR : Space and Naval Warfare) a confié à la société URSANAV la production d'une alidade électronique pour les navires de surface. L'appareil, baptisé « e-pelorus » ou transmetteur de cap vrai (TBT True Bearing Transmitter), exploite le cap gyroscopique, y ajoute le gisement de la direction visée par l'opérateur et l'heure. L'information est envoyée à l'ECDIS au format NMEA et la précision est de $0,05^\circ$ (en plus de l'erreur liée au compas gyroscopique). Les informations sont rares sur internet au sujet du e-pelorus, cependant cet appareil ne semble pas destiné à la navigation astronomique dans sa version actuelle.



*alidade électronique e-pelorus de URSANAV
relèvement à $0,05^\circ$ près [WW80]*

Le télémètre laser peut être ajouté pour mesurer la distance entre le navire et l'amer mais aussi pour améliorer l'identification des amers : une tourelle située 1 M plus loin que celle que l'on pense viser est sans doute un autre amer que celui recherché. Dans le cadre de l'amélioration de la navigation par l'assistance numérique (ou e-navigation), l'OMI et des industriels étudient la possibilité d'implanter des mires laser améliorant la réflexion du télémètre et augmentant la précision de la visée. Un maillage de quelques mires le long des accès aux ports permettrait ainsi une navigation côtière par relèvements et distances avec une précision centimétrique (en trois dimensions et trois attitudes relatives) peu sensible aux conditions climatiques. Une application du laser pour le positionnement relatif (par rapport à une plateforme pétrolière équipée de mires) et les attitudes relatives (cap, roulis, tangage) est déjà exploitée sur les navires en « positionnement dynamique ».

L'« altcular », système décrit par le commandant Sems AKTUG dans un article paru depuis juin 2013 sur différents média [WWW35] [WWW36], est un système utilisant des accéléromètres et gyroscopes MEMS (Micro Electro Mechanical Systems, comme sur les smartphones) pour mesurer la hauteur et l'azimut d'une paire de jumelles. Le chef de quart y observe un astre et appuie sur un bouton pour transmettre par liaison Bluetooth les deux informations à l'ECDIS. Un module ajouté à l'ECDIS y assure l'identification de l'astre et le tracé des droites de hauteur. Le temps utilisé est celui de l'ECDIS, recalé sur le temps diffusé par le GPS. Aucune amplification de lumière n'est prévue. Un lissage des mesures successives du même astre est envisagé pour améliorer la précision.

Aucune image, précision, prix ou fabricant n'est publié : cet appareil ne semble pas avoir dépassé le stade de l'imagination de son auteur.

En résumé, les connaissances théoriques et la technologie actuelle offrent les outils suffisants pour envisager une navigation astronomique précise et financièrement adaptée au budget d'équipement d'un navire marchand. Cependant, parmi les systèmes existant ou en cours de développement, aucun ne correspond au besoin spécifique de la marine marchande.

3. UN INSTRUMENT POUR LA MARINE MARCHANDE

Faute de trouver l'instrument rêvé, dressons le portrait d'une solution possible avant d'envisager les contraintes qui freinent sa réalisation industrielle.

a) Un cahier des charges

Le capteur d'image comprendrait deux caméras et un télémètre laser rassemblés sur une tourelle implantée au-dessus de la passerelle :

- une caméra en lumière visible ;
- une caméra en infrarouge dans une bande de longueur d'onde correspondant à une des « fenêtres » laissées ouvertes par l'atmosphère.

Pour limiter le coût des caméras, la première n'amplifie pas la lumière pour la vision nocturne et la seconde n'est pas refroidie. Cependant, si le prix de ces options ou les progrès technologiques le permettent dans un futur proche, cette plus-value de performance serait bienvenue. De même, les longueurs d'onde infrarouge élevées sont plus efficaces pour observer des astres de faibles magnitude et améliorer la portée en veille nautique (bande L ou N).

L'optique en amont des caméras comprendrait :

- un diamètre et un grossissement suffisant pour voir en infrarouge des étoiles de magnitude ≤ 3 le jour à une distance angulaire du Soleil $\geq 65^\circ$;
- deux zooms : un grand angle (environ 20°) pour reconnaître des constellations ou la silhouette de la côte, un angle réduit (environ 3°) pour effectuer la mesure de hauteur sur des astres, de relèvement ou de distance (télémètre laser) sur un amer ou un navire lointains ;
- un filtre pour observer le Soleil sans saturer les capteurs ;
- un masque pour protéger les capteurs infrarouge dans les directions proches du Soleil ;
- un jet d'eau douce et essuie-glace pour nettoyer l'optique extérieure des embruns et taches de saumure.

L'instrument de mesure comprendrait :

- un inclinomètre à deux axes, fixe par rapport aux caméras, avec une précision de 1 " ou mieux ;
- un moteur de pointage à deux axes permettant un balayage de 450° en gisement (de -225° à $+225^\circ$ de l'axe du navire) et de 150° en site (de -80° à $+120^\circ$) environ ;
- une mesure d'angle entre caméra et navire à $0,5^\circ$ près par les moteurs de pointage pour les attitudes relatives du navire (cap, gîte et assiette) ;
- une centrale de calculs inertiels (deux accéléromètres en plus de l'inclinomètre ; les gyroscopes remplacés par le traitement vidéo pour mesurer les rotations du navire) permettant de :
 - compenser l'influence des mouvements du navire perturbant l'inclinomètre ;
 - calculer les attitudes relatives et les déplacements du navire entre les observations de deux astres en vue du calcul du point astronomique ;
 - calculer la position du navire lorsque le ciel est masqué, avec une dérive $\leq 1 \text{ M/heure}$;
 - se recalculer à l'aide des attitudes absolues mesurées par le viseur stellaire ;
- une horloge à quartz précise à 1 ms pouvant se recalculer sur le top horaire du GPS (ou équivalent), de l'internet (protocole NTP) ou d'un service de temps par ondes radio près des côtes (LORAN C, France Inter, observation astronomique) ;
- capteur de température, pression et humidité.

Le calculateur comprendrait :

- un générateur d'éphémérides avec une précision meilleure que 0,1 " ;
- une mise à jour par internet du décalage UT1-UTC avec une précision de 1 ms (serveur du SYRTE SYstème de Référence de Temps et d'Espace) et des paramètres d'éphémérides (serveurs de l'IERS International Earth Rotation and Reference Systems Service, et de l'IMCCE Institut de Mécanique Céleste et de Calcul des Éphémérides) ;
- calcul des corrections de hauteur (dépression de l'horizon, réfraction atmosphérique) intégrant la longueur d'onde, la température, la pression et l'humidité pour une précision de 0,1 " sur les hauteurs $H_0 \geq 20^\circ$;
- un calcul des attitudes absolues à 0,1 " près en mode « viseur stellaire » ;
- un calcul de la position du navire à 10 m près exploitant l'inclinomètre en mode « viseur stellaire » ;
- un calcul de la position du navire à 10 m près exploitant la hauteur d'astre, la pseudo-distance sur un satellite de positionnement, le relèvement sur un amer identifié (latitude, longitude, altitude), la distance laser (ou distance radar, transmise par radar ou ECDIS) sur amer identifié à l'aide de la méthode du plan des sommets ;
- un calcul inertiel de la position du navire en l'absence d'observation durant plus de 5 secondes (masque du ciel par la météo, utilisation des caméras pour la veille) ;
- une pondération des lignes de position selon leur précision et leur configuration géométrique pour privilégier un indice DOP (Dilution Of Precision) minimum et un accès à ces informations par le chef de quart ;
- un calcul de DOP et de rayon d'erreur à 68 % (1σ) et à 95 % (2σ) du point observé (amers côtiers, astres et/ou satellites) ;
- calcul du rayon d'erreur du point inertiel ;
- une connexion avec l'ECDIS pour :
 - transmettre la position astronomique ou inertielle (utilisable comme moyen principal de positionnement) ;
 - afficher sur l'ECDIS les cercles de hauteur avec le nom de l'astre et l'heure d'observation, les relèvements et distances (laser) en cours d'observation en vue de déterminer un point « en vue des côtes »
 - recevoir les coordonnées et caractéristiques des amers situés à proximité du navire ;
 - recevoir les coordonnées et caractéristiques reçues par l'AIS ;
- une possibilité de recalage de l'heure par observation méridienne sur une étoile lointaine lorsque les conditions sont optimales (nuit très sombre, ciel dégagé, hauteur $H_0 \geq 20^\circ$).

Le traitement de la vidéo permettrait :

- d'adapter le contraste à l'image captée ;
- d'observer les étoiles automatiquement dès que le système n'est pas utilisé pour la veille nautique ;
- de poursuivre automatiquement un point lumineux ou une forme désignée par le chef de quart ;
- d'utiliser la caméra la plus contrastée, avec le zoom le plus adapté, indépendamment de l'image et du zoom choisis par le chef de quart ;
- de redresser l'image :
 - en cas de dépassement du site 120° , effectuer une rotation de $\pm 180^\circ$ de gisement ;
 - en cas de dépassement des gisements $\pm 200^\circ$, effectuer une rotation de $\pm 360^\circ$ de gisement ;
- en cours de poursuite d'un amer, tente de reconnaître l'image pour reprendre la visée :
 - après un redressement de l'image
 - en cas de perte de la cible la cible à une hauteur $H_0 \leq -5^\circ$ durant quelques secondes : un homme à la mer ou un petit navire disparaît périodiquement entre deux vagues.

L'écran de contrôle afficherait :

- en grand angle, le rectangle d'image accessible par le zoom maximum ;
- une cible permettant d'orienter les caméras lorsqu'elle approche des bords de l'image et de désigner un point lumineux ou une forme à poursuivre par l'ordinateur ;
- une tache où rebondit le tir laser (diamètre selon le zoom) ;
- les informations d'azimut, de hauteur (et distance pendant les tirs laser) ;
- les informations de gisement et de site, avec une mise en évidence en cas de dépassement des gisements $\pm 200^\circ$;
- un cadre dans le coin de l'écran ou en superposition de l'image avec des informations sur les amers :
 - photo de l'amer visé ;
 - caractéristiques des feux ;
 - côte en réalité virtuelle ;
 - astres et constellations dans le champ visible ;
 - informations AIS du navire proche de la direction visée ;
 - extrait de l'ECDIS entre le navire et la côte dans la direction visée ;
 - relèvement(s) déjà tracé(s) pour le point en cours ;
 - miniature de l'image disponible sur l'autre caméra avec l'autre zoom ;
- des menus d'accès aux informations de fonctionnement :
 - température, pression, humidité ;
 - latitude, longitude, altitude, DOP, rayon d'erreur et heure du dernier point ;
 - temps écoulé depuis le dernier point, erreur estimée de la position en mode inertiel ;
 - mesure de biais sur un tour d'horizon ;
 - mesure de biais sur un point à bord du navire (par exemple tache rouge sur une grue ou la plage avant du navire) ;
 - mesure de biais en observant un astre passant au zénith ;
 - mesure de variation des compas reliés à l'ECDIS ;
 - diagnostique et rapport d'incident ;
 - historiques des données ;
 - commentaires sur les observations en cours en mode automatique : astre, méridienne, etc ;
 - réglages d'alarmes, par exemple de temps écoulé depuis le dernier point à cause d'une poursuite optique maintenue pendant manœuvre anticollision ;
 - envoi d'un compte-rendu de sécurité au SHOM, par exemple pour signaler une bouée absente ou très décalée de sa position sur la carte [PRV10] ;
 - etc.

Dans une première version, un système calibré pour un point à 100 m près permet de choisir des composants moins onéreux : la majeure partie du coût de fabrication est déterminée par la caméra. Dans une seconde version, une précision de 10 m pourrait bénéficier des derniers progrès technologique, des baisses de prix des composants à performances égales et de l'expérience de la première version : industrialisation, exploitation sur une flotte conséquente de navires.

Dans une version ultérieure, lorsque la technologie sera miniaturisée et les prix plus réduits, l'écran de contrôle pourrait être remplacé par des lunettes du type Google et la manette de pointage par un guidage oculaire comme les casques des pilotes d'hélicoptère de combat.



lunettes Google : emprise réduite sur le champ de vision et défilement des informations [WWW40]



*viseur de casque TopOwl de Thales [WWW41]:
superposition d'informations alphanumériques
sur la vision directe, de l'image en vision nocturne,
suivi des mouvements de pupilles pour désigner un objectif*

b) Un prix maximum

Un ordre de grandeur de prix est donné par les appareils « concurrents » du système optronique de navigation astronomique et côtière :

- le compas gyroscopique aux normes OMI coûte environ 10 000 € et ne fournit que le cap du navire ;
- un radar de navigation maritime coûte de 10 000 € à 20 000 € ;
- le sextant coûte environ 800 € ;
- l'OMI étudie la possibilité d'imposer une caméra de vision nocturne ou en infrarouge pour surveiller les abords des navires traversant des zones de piraterie et détecter les petites embarcations invisibles au radar. Cet équipement coûterait environ 5 000 € dans sa version minimale en 2013 ;
- le positionnement par satellite pourrait avoir un coût supérieur au seul récepteur dans l'avenir : chaque année la défense américaine s'inquiète du coût de maintenance du système GPS et de sa vulnérabilité aux pannes ou brouillage. La constellation européenne des satellites GALILEO a prévu de facturer le service de positionnement précis.

Un viseur stellaire destiné à la navigation astro-côtière, permettant la veille anticollision et les mesures d'attitude pourrait avantageusement remplacer tous ces appareils. Cependant les dernières obligations formulées par l'OMI privilégie la redondance des appareils, préférant à ajouter de nouveaux équipements à la liste existante au lieu d'en remplacer.

La production en grande échelle d'un système optronique de navigation astro-côtière permettrait de réduire les coûts :

- ces appareils sont actuellement produits en petites séries pour des besoins militaires ou scientifiques, ce qui augmente le coût unitaire des frais de recherche et développement ;
- les produits actuels sont majoritairement adaptés aux contraintes militaires de haute précision et grande robustesse mécanique. Les versions proposées au secteur civil sont souvent des modèles militaires simplifiés qui restent chers ;
- les industriels capables de produire le système décrit plus haut ne sont pas convaincus qu'ils trouveront assez de clients pour amortir les frais de développement avec un prix de vente comparable au compas gyroscopique. Les navires équipés de compas gyroscopique par obligation de l'OMI sont environ 4 000 ;
- un tel équipement pourrait concurrencer, voire remplacer, la centrale inertielle des avions de ligne qui sert actuellement de secours en cas de panne du GPS.

c) La réglementation

L'OMI est un levier formidable pour les fabricants d'équipements nautiques. Ces dernières années de nombreux navires se sont équipés d'alarme « homme mort », de boîte noire (VDR ou Voyage Data Recorder), d'émetteur-récepteur AIS (Automatic Identification System), de cartes électroniques et logiciels normalisés ECDIS... mais ont attendu le plus longtemps possible que l'OMI en fasse obligation. D'autres équipements sont apparus sur les passerelles sans attendre l'OMI en raison de leur réelle plus-value pour améliorer la sécurité ou simplifier la navigation : radar, récepteur GPS, compas électronique ou satellitaire.

Comme l'aviation civile, le transport maritime a pris l'option du « tout GPS ». L'aviation civile se rassure en espérant que GALILEO viendra rapidement seconder le GPS. Pour dissiper les inquiétudes en cas de panne ou de brouillage du système GPS, l'OMI a entretenu le souci d'avoir un système secondaire de positionnement sans choisir de solution satisfaisante :

- la navigation côtière par relèvements gyroscopiques et distances radar souffre d'un manque d'expérience et le trafic des ports européens serait fortement handicapé si la précision du GPS se dégradait ;
- le LORAN C a une couverture de plus en plus réduite à mesure que les nations renoncent à l'entretien très coûteux de leur émetteur ;
- l'estime au large peut être entretenue par le calculateur de l'ECDIS mais la pratique de cette technique a disparu : les écarts avec le GPS sont très rarement exploités par le chef de quart pour interpréter les courants ou la dérive due au vent ;
- l'astronomie au large est rarement pratiquée dans une réelle indépendance du GPS : le manque de pratique à bord en fait une technique redoutable de complexité et peu crédible en matière de précision.

En attendant GALILEO, les industriels et assureurs auraient avantage à faire du lobbying auprès de l'OMI pour imposer aux navires équipés selon la convention SOLAS un système optronique de navigation astro-côtière, de mesure d'attitudes et de veille nautique.

La législation nationale française est rarement parmi les précurseurs pour imposer un nouveau matériel à bord s'il n'y a pas un lien direct avec la sécurité des personnes ou de l'environnement. Toute perspective de dépense obligée par le pavillon français mais non imposée par l'OMI pourrait tenter certains armateurs de choisir un pavillon étranger.

Pourtant en période de crise économique et d'interventionnisme du gouvernement dans l'industrie, on pourrait imaginer que la conjoncture favorise la création de nouveaux besoins. A l'issue du « Grenelle de la mer » est né le CORICAN (Conseil d'Orientation de la Recherche et de l'Innovation pour la Construction et les Activités Navales), regroupant l'ensemble des représentants de la filière navale française : acteurs publics (Etat, collectivités locales), ONG, syndicats, entreprises [WW42]. Ce lieu d'interaction entre ministère chargé des transports et industriels peut être l'incubateur d'une législation imposant un nouveau système répondant aux nouveaux besoins.

La loi française handicape actuellement la commercialisation des caméras infrarouge de grande performance en raison des applications terroristes possibles (autoguidage de missile artisanal). Les conditions de dérogations pourraient être assouplies afin d'ouvrir aux industriels français la porte d'un marché déjà bien valorisé par les concurrents étrangers.

Les commandants et chef de quart gagneraient à réclamer à leur compagnie et à utiliser à bord un système apportant plusieurs avantages :

- positionnement automatique et continu du navire avec une haute précision (environ 10 mètres) à 95 % du temps ou précision moyenne (environ 100 m en cas de masque par la météo) ;
- veille nautique améliorée par l'infrarouge ;
- intervention possible du chef de quart pour les observations astronomiques afin de

- s'entraîner ;
- mesures améliorées de relèvements et distances par le chef de quart en vue des côtes ;
- facilité et rapidité du point astronomique ou en vue des côtes sur l'ECDIS.

La pratique de l'astronomie et de la navigation en vue des côtes serait facilitée et plus « ludique », permettant d'acquérir cette expérience indispensable pour le jour où seuls le compas magnétique et le sextant fonctionnent.

En résumé, la navigation astronomique aura un avenir à bord des navires marchands si :

- les marins daignent lever leurs instruments modernes vers le ciel pour y trouver les informations propres à élaborer leur position et leur route ;
- les industriels daignent ajouter à leurs logiciels des algorithmes que leurs capteurs sont déjà capables de renseigner ;
- le législateur, l'assureur et le commerçant daignent se contenter des repères que la nature a donnés aux marins pour naviguer.

CONCLUSION

Les progrès des secteurs spatiaux et militaires en matière d'observation des astres pour le positionnement pourraient bénéficier aux domaines maritime et aéronautique. Les principaux obstacles sont financiers et réglementaires. Si un industriel ose adapter les équipements nautiques des navires marchands à une navigation astronomique et côtière automatisée, il permettra aux marins d'entretenir l'expérience des techniques dites « de secours ». Car l'observation au sextant et le point par relèvement et distances demeurent efficaces quand tous les systèmes modernes sont en panne ; mais leur pratique nécessite une expérience longue à acquérir.

Avec le sextant et les éphémérides nautiques sur papier, l'avenir de la navigation astronomique est limité à celui des moyens de secours, comme le compas magnétique classique ou le sondeur à main. Avec des capteurs modernes et l'aide de l'ordinateur, la navigation astronomique peut rivaliser avec le GPS et envisager un bel avenir dans la marine marchande.

Bibliographie

- LIV01: IMCCE, Éphémérides nautiques, 2013
LIV02: HMNAO, Nautical Almanac, 2013
LIV03: USNAO, Nautical Almanac, 2013
LIV04: Marin Breton, Almanach du Marin Breton, 2013
LIV05: Lt Cdr Harry J Baker, Reeds astro navigation tables, 2013
LIV06: , Brown's nautical almanac, 2013
LIV07: Yves ROBIN-JOUAN, Navigation aux astres et aux satellites par la méthode du plan des sommets, Marines Éditions, Copyright INFOMER 2012, ISBN 978-2-35743-088-4, 2013
LIV08: IMCCE Institut de Mécanique Céleste et de Calcul des Éphémérides, Introduction aux éphémérides astronomiques, supplément explicatif à la Connaissance des temps, 1998
LIV09: Christian BIZOUARD, Interprétation géophysique du mouvement du pôle, 2012
OMI01: OMI, résolution A529 - standard de précision du gyro-compas, 15/11/1979
PRV01: officier navigation de l'École Navale, , 2013
PRV02: William THUILLOT de l'IMCCE, correspondance électronique, 2013
PRV03: Pierre-Louis DESCHAMPS, correspondance électronique privée, 2013
PRV04: Jean-Baptiste GARREAU, expert au Bureau Veritas, correspondance privée, 2013
PRV05: Cyrille DEHLER, professeur en réglementation maritime, échanges privés, 2013
PRV06: Georges LAMY au ROUSSEAU, conversation privée avec le directeur de STARNAV, 2013
PRV07: Officier entraînement de sous-marins de la MARINE NATIONALE, échanges privés avec un officier opération de SNA, 2013
PRV08: Franck POLIDOR, échanges privés avec l'inventeur du sextant électronique G-stell, 2013
PRV09: Yves ROBIN JOUAN, échanges privés avec l'auteur de la méthode du plan des sommets sur ses derniers développements et dont il se réserve le droit de publication indépendamment de l'ENSM ou de l'IGEM, 1er semestre 2013
PRV10: Éric PRANG, échanges privés avec le directeur de la e-navigation chez SAFRAN, 2013
PRV11: Ronan CREAC'H, échanges privés avec l'ingénieur hydrographe du bâtiment hydrographique BORDA,
WWW01: IMCCE, , http://www.imcce.fr/fr/ephemerides/generateur_ephemerides.php,
WWW02: Jacques TIPHINE, , 2010http://www.stw.fr/download/ephemerides_nautiques.zip,
WWW03: Navsoft, , 2013<http://navsoft.com/downloads.html>,
WWW04: US Naval Observatory, , http://www.willbell.com/almanacs/almanac_mica.htm,
WWW05: International Astronomical Union, logiciel Standards Of Fundamental Astronomy, <http://www.iausofa.org/>,
WWW06: HMNAO, , <http://astro.ukho.gov.uk/nao/publicat/ncd.html>,
WWW07: Pierre Louis DESCHAMPS, logiciel d'aide à la navigation astronomique ALMICANTARAT, 2008<http://www.almicantarat.com/index.htm>,
WWW08: 2012, , <http://www.tecepe.com.br/nav/purchase.htm>,
WWW09: Andrés RUIZ, , 2013<https://sites.google.com/site/navigationalgorithms/software>,
WWW10: wikipedia, modèle planétaire VSOP, http://fr.wikipedia.org/wiki/Variations_s%C3%A9culaires_des_orbitales_plan%C3%A9taires,
WWW11: wikipedia, éléments orbitaux, http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89l%C3%A9ments_orbitaux#.C3.89l%C3%A9ments_orbitaux,
WWW12: IMCCE, précision des théories planétaires, <ftp://ftp.imcce.fr/pub/ephem/planets/vsop2013/ephemerides/README.pdf>,
WWW13: NAVASTRO, horizon artificiel à bulle PLATH approuvé par la marine allemande, <http://navastro.fr/index.html?p219.html>,
WWW14: RFC1305, Protocole de l'heure du réseau (NTP), 1992<http://abcdrfc.free.fr/rfc->

- vf/pdf/rfc1305.pdf,
- WWW15: wikipedia, norme Iee754, http://fr.wikipedia.org/wiki/IEEE_754,
- WWW16: CASIO, mode d'emploi de la calculatrice FX92 College 2D, http://www.support.casio-europe.com/fr/download/manuals/calc/fx-92_College_2D_Fr.pdf,
- WWW17: MICROSOFT, L'arithmétique en virgule flottante peut fournir des résultats incorrects dans Excel, <http://support.microsoft.com/kb/78113/fr>,
- WWW18: NAVASTRO, logiciel d'aide au point astronomique STARPILOT, 2006<http://navastro.fr/newsletter2.htm>,
- WWW19: US National Geospatial-Intelligence Agency, site de téléchargement des tables HO249, http://msi.nga.mil/NGAPortal/MSI.portal?_nfpb=true&_pageLabel=msi_portal_page_62&pubCode=0012,
- WWW20: Pierre SEMIROT, Nouvelle méthode de calcul du point pour la navigation astronomique aérienne et nautique, 1961<http://adsabs.harvard.edu/full/1961JO.....44....1S>,
- WWW21: US Coast Guard, textes règlementaires fixant les inspections de navires par les garde-côtes des États Unis, <http://www.uscg.mil/hq/cg5/nvic/Navigation.asp>,
- WWW22: OCIMF - Oil Companies International Marine Forum, questionnaire de vetting par les compagnies pétrolières, 15 janvier 2012<http://www.ocimf.com/mf.ashx?id=2a1f4491-2f26-4d4d-9a41-b3f6d31b407e>,
- WWW23: INCA - International Marine Contractors Association, Common Marine Inspection Document, mars 2009http://www.maritimesafetyinternational.com/MSI/IMCA_Audits_for_Small_Commercial_Vessels_files/IMCAM149.pdf,
- WWW24: TREX Enterprises Corporation, brevet TREX Daytime Stellar Imager, 15 février 2007<http://www.google.com/patents/US7447591>,
- WWW25: APPPLANIX, spécifications de la centrale inertielle POS/MV 320, 2013http://www.applanix.com/media/downloads/products/specs/posmv320_specifications.pdf,
- WWW26: CALVADOS STRATEGIE, STARNAV a la tête dans les étoiles, http://actus.calvados-strategie.com/aeronautique---starnav-a-la-tete-dans-les-etoiles_calvados-12421.html,
- WWW27: Chambre de Commerce et d'Industrie de Normandie, projets de la société STARNAV, 2013http://www.cci-international-normandie.com/revue/HS_normandie-international_23.pdf,
- WWW28: STARNAV, fiche descriptive du viseur stellaire VISTER de STARNAV, 2013<http://www.starnav.fr/upload/fichier/VISTER.pdf>,
- WWW29: SYRTE SYstème de Référence de Temps et d'Espace, Différences TAI-UTC depuis le 01-01-1972, 2013<http://syrte.obspm.fr/tfc/temps/sauts-heure.php>,
- WWW30: AFRL Air Force Research Laboratory, présentation du logiciel MODTRAN5 sur la propagation des ondes dans l'atmosphère et les nuages chimiques, 2010http://www.google.fr/url?sa=t&rct=j&q=modtran%205%20refraction&source=web&cd=3&ved=0CD0QFjAC&url=http%3A%2F%2Fhyspirl.jpl.nasa.gov%2Fdownloads%2F2010_Workshop%2Fday3%2Fday3_14_BerkA_HyspIRIworkshop2010.pdf&ei=q532UcemNueY1AXOg4HoAQ&usg=AFQjCNEAh_LojPoSPL1zvponMmC_6HjN0w&bvm=bv.49784469,d.d2k&cad=rja,
- WWW31: Wikipedia, article sur les astéroïdes, <https://fr.wikipedia.org/wiki/Ast%C3%A9ro%C3%AFde>,
- WWW32: Lieutenant Diallo Wallace, projet daytime startracker, 2004<http://www.navysbirprogram.com/NavySearch/Award/award.aspx?pk=dc8cfe1a-dc31-46e7-96d4-e01d4f6df668>,
- WWW33: Houle, Robert E. Menzel, Donald H. Robb, Edward J. , Automatic celestial navigation control system , 1960<http://www.freepatentsonline.com/2930545.pdf>,
- WWW34: R BOUTEAU, projet MIRIADE (militarization of attitude measurement deduced from the stars),

- 2009<http://www.esigelec.fr/en/content/download/2171/17792/file/MIRIADE.pdf>,
- WWW35: Sems AKTUG, université Piri Reis d'Istanbul, l'altcular, le remplaçant du sextant, http://www.themarinewaves.com/journal/waves_106.pdf,
- WWW36: Sems AKTUG, université Piri Reis d'Istanbul, l'altcular, remplaçant du sextant, <http://fer3.com/arc/m2.aspx/Do-We-Still-Need-Use-Sextants-semsaktug-mar-2013-g23143>,
- WWW37: Institut national des sciences de l'Univers (INSU) du CNRS, Pourquoi un séisme peut avoir une petite influence sur la rotation de la Terre, <http://www.insu.cnrs.fr/terre-solide/catastrophes-et-risques/seismes/pourquoi-un-seisme-peut-avoir-une-petite-influence-sur->,
- WWW38: Alan Buis, JPL, NASA, Japan Quake May Have Shortened Earth Days, Moved Axis, 2011<http://www.jpl.nasa.gov/news/news.php?release=2011-080>,
- WWW39: wikipedia, magnitude apparente des astres, https://en.wikipedia.org/wiki/Apparent_magnitude,
- WWW40: Google, présentation des lunettes Google, 2013http://www.youtube.com/watch?v=4EvNxWhskf8&feature=player_embedded&t=0,
- WWW41: Optronique & Défense , Le viseur de casque TopOwl, 2012<http://optronique.net/defense/systeme/avionique/viseur-casque-topowl-thales-test-a400m>,
- WWW42: ministère du développement durable, CORICAN (Conseil d'Orientation de la Recherche et de l'Innovation pour la Construction et les Activités Navales), <http://www.corican.fr/le-corican/le-corican.html>,
- WWW43: IMCCE, rotation et révolution terrestre, les échelles de temps, Croissance de TT-UTC dans l'avenirCrédit: D. Gambis/SYRTE ,
- WWW44: IERS International Earth Rotation and Reference Systems Service, déplacements du pôle Nord de janvier 2012 à mai 2013, <http://hpiers.obspm.fr/eop-pc/>,
- WWW45: IERS, bulletin C annonçant les ajouts de secondes intercalaires, <ftp://hpiers.obspm.fr/iers/bul/bulc/bulletinc.dat>,
- WWW46: IERS International Earth Rotation and Reference Systems Service, temps atomique et secondes intercalaires, http://hpiers.obspm.fr/eop-pc/earthor/utc/leapsecond_fr.htm,
- WWW47: SYRTE SYstème de Référence de Temps et d'Espace, rotation terrestre, <http://syrte.obspm.fr/astro/rotation.php>,
- WWW48: Infrared Processing and Analysis Center (IPAC), catalogue d'étoiles 2MASS, <http://www.ipac.caltech.edu/2mass/overview/about2mass.html>,
- WWW49: IERS International Earth Rotation and Reference Systems Service, IRCS International Celestial Reference System, http://www.iers.org/nn_10968/IRS/EN/DataProducts/ICRS/icrs.html?__nnn=true,
- WWW50: distributeur camera infrarouge FLIR, tarifs des caméras infrarouge FLIR, http://www.allbusinessmachines.com/wp-content/uploads/2012/01/TXMAS-Published-11_66020-FLIR-Products-2012_03.pdf,
- WWW51: catalogue des caméras infrarouges FLIR, spécifications de la caméra FLIR SC2500, <http://www.flir.com/thermography/americas/us/view/?id=46798&collectionid=521&col=45868>,
- WWW52: catalogue des caméras infrarouges FLIR, spécifications de la caméra FLIR SC26100, <http://www.flir.com/thermography/americas/us/view/?id=44791&collectionid=506&col=44798>,
- WWW53: catalogue des caméras infrarouges FLIR, spécifications de la caméra FLIR A655sc, <http://www.flir.com/thermography/americas/us/view/?id=46802&collectionid=522&col=45854>,
- WWW54: distributeur WMJMarine, prix du compas gyroscopique SIMRAD GC80, <http://www.wmjmarine.com/gc80ex.html>,
- WWW55: SIMRAD, spécifications du compas gyroscopique GC80, http://www.nuovamarea.com/files/product%20manuals/Simrad/GC-80/GC80_85%20Compact%20Gyro.pdf,

- WWW56: Damien DOUCCHAMPS, tarif de centrales inertielles pour l'aviation civile, <http://damien.douxchamps.net/research/imu/>,
- WWW57: ADVANCED NAVIGATION, spécifications de la centrale de navigation intégrée SPATIAL FOG, <http://www.advancednavigation.com.au/product/spatial-fog#specifications>,
- WWW58: distributeur WMJ Marine, prix et spécification du compas satellitaire FURUNO SC110, <http://www.wmjmarine.com/c11811.html>,
- WWW59: distributeur WMJ Marine, prix et spécifications du compas satellitaire SIMMRAD HS70, <http://www.wmjmarine.com/000-10453-001.html>,
- WWW60: distributeur High Sea Support, spécifications du compas satellitaire RAYTHEON Standard 21, http://www.hss-panama.com/marine_products/gps_compass/,
- WWW61: distributeur INSTRUMART, prix et spécifications de l'inclinomètre JEWELL INSTRUMENTS LCF-196, <http://www.instrumart.com/products/39438/jewell-instruments-lcf-196-series-inclinometer>,
- WWW62: distributeur INSTRUMART, prix et spécifications de l'inclinomètre JEWELL INSTRUMENTS LCF-3000, <http://www.instrumart.com/products/39437/jewell-instruments-lcf-3000-series-inclinometer>,
- WWW63: distributeur INSTRUMART, prix et spécifications de l'inclinomètre JEWELL INSTRUMENTS LSO, <http://www.instrumart.com/products/39418/jewell-instruments-lso-series-inclinometer>,
- WWW64: Olivier MARTIN, Mesure de la déviation de la verticale par des observations astronomiques, Bulletin d'information scientifique et technique de l'IGN n° 75, 2006,
- WWW65: USNOAA National Oceanic and Atmospheric Administration, déviation de la verticale aux États Unis, 2009 <https://www.ngs.noaa.gov/GEOID/DEFLEC09/>,
- WWW66: SYMMETRICOM, spécifications de l'horloge atomique miniature SA.31m, 2013 <http://www.symmetricom.com/products/quantum-atomic-oscillators/miniature-atomic-clock-mac/SA.31m-SA.33m-SA.35m/>,
- WWW67: Laurent Sacco, Futura-Sciences, La plus petite horloge atomique commercialisée ne pèse que 35 grammes, <http://www.futura-sciences.com/magazines/matiere/infos/actu/d/physique-plus-petite-horloge-atomique-commercialisee-ne-pese-35-grammes-30124/>,
- WWW68: distributeur ACQUIDIRECT, prix et spécifications du serveur de temps ACQUISYS NTA100-GM, <http://www.acquidirect.fr/nta100-serveur-faible-avec-p-8.html>,
- WWW69: GORGY TIMING, spécifications du synchronisateur GTC, <http://www.gorgy-timing.fr/site/modedemploi/MDE-Radio-Timing-GTC-3080.pdf>,
- WWW70: distributeur CANFORD, prix du synchronisateur GORGY TIMING GTC, http://www.canford.fr/Products/58-609_GORGY-HORLOGE-QUARTZ-LEDI-6-60S-affichage-secondes,
- WWW71: distributeur FURUNO, spécifications et prix de l'antenne stabilisée VSAT INTELLIAN IV60G, <http://www.furuno.fr/Produit.php?&Page=Produits&Famille=13003&Produit=IV60G>,
- WWW72: distributeur FURUNO, prix et spécifications de l'antenne TV stabilisée INTELLIAN I9W, <http://www.furuno.fr/Produit.php?&Page=Produits&Famille=12002&Produit=I9W>,
- WWW73: AEROTECH, spécifications du miroir motorisé AEROTECH AOM360D-40, <http://209.166.187.227/products/optmnts/aom360specs.html>,
- WWW74: BALL AEROSPACE & TECHNOLOGIES CORPORATION, spécifications du viseur stellaire High Accuracy Star Tracker, <http://www.ballaerospace.com/page.jsp?page=37&mediaID=221>,
- WWW75: FLIR, vidéo comparant des images avec et sans stabilisation par gyroscope, http://www.youtube.com/watch?feature=player_embedded&v=HikNvVJ22OA,
- WWW76: distributeur FURUNO, prix et spécifications de la caméra FLIR M324L, <http://www.furuno.fr/Produit.php?&Page=Produits&Famille=12004&Produit=M324L>,
- WWW77: distributeur FURUNO, prix et spécifications de la caméra FLIR M618CS,

[http://www.furuno.fr/Produit.php?
&Page=Produits&Famille=12004&Produit=M618CS,](http://www.furuno.fr/Produit.php?&Page=Produits&Famille=12004&Produit=M618CS)
WWW78: SAGEM, spécifications de la caméra SAGEM VIGY Observer, [http://www.sagem-
ds.com/spip.php?rubrique354&lang=fr,](http://www.sagem-ds.com/spip.php?rubrique354&lang=fr)
WWW79: David J PATRAIKO, Nautical Institute, Engaging the navigator,
2008[http://www.loran.org/Meetings/Meeting2008/Presentation
%20pdfs/6A1_PATRAIKO.pdf,](http://www.loran.org/Meetings/Meeting2008/Presentation%20pdfs/6A1_PATRAIKO.pdf)
WWW80: revue NAVIGATION NEWS, The Development of the e-Pelorus, avril
2012[http://www.ursanav.com/sites/default/files/pdfs/news/nav-news-mar-apr-2012.pdf,](http://www.ursanav.com/sites/default/files/pdfs/news/nav-news-mar-apr-2012.pdf)
WWW81: Sandra Zaragoza, UT Austin Researchers Successfully Spoof an \$80 million Yacht at
Sea, 29/07/2013[http://www.utexas.edu/news/2013/07/29/ut-austin-researchers-
successfully-spoof-an-80-million-yacht-at-sea/,](http://www.utexas.edu/news/2013/07/29/ut-austin-researchers-successfully-spoof-an-80-million-yacht-at-sea/)