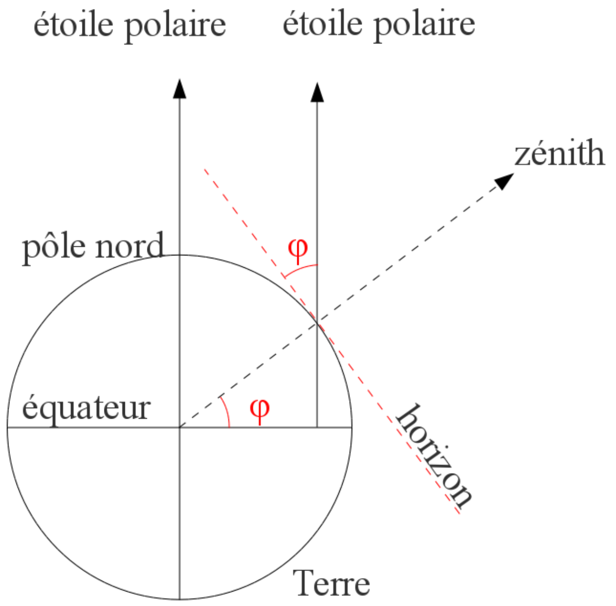
Faire le point en mer aux instruments

Histoire de la longitude

Définition de la Latitude et longitude

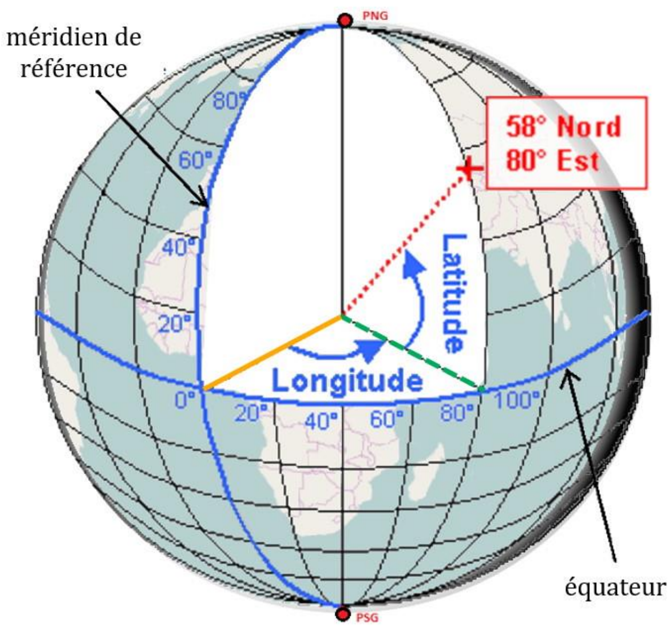
La latitude est la distance angulaire entre le point où l'on se trouve et l'équateur.



Cette distance se mesure en degré depuis l'équateur. Elle va de 0° à 90° Nord ou Sud. 90° aux pôles

Relativement facile à mesurée en particulier grâce à l'étoile polaire au Nord, on peut aussi la déterminer à l'aide de la hauteur du soleil

La longitude est la distance angulaire entre le point où l’on se trouve et le méridien origine de Greenwich



Longitude = (Temps Local - Temps Greenwich) x 15
Temps Local > temps Greenwich → longitude EST
Temps Local < temps Greenwich → longitude Ouest

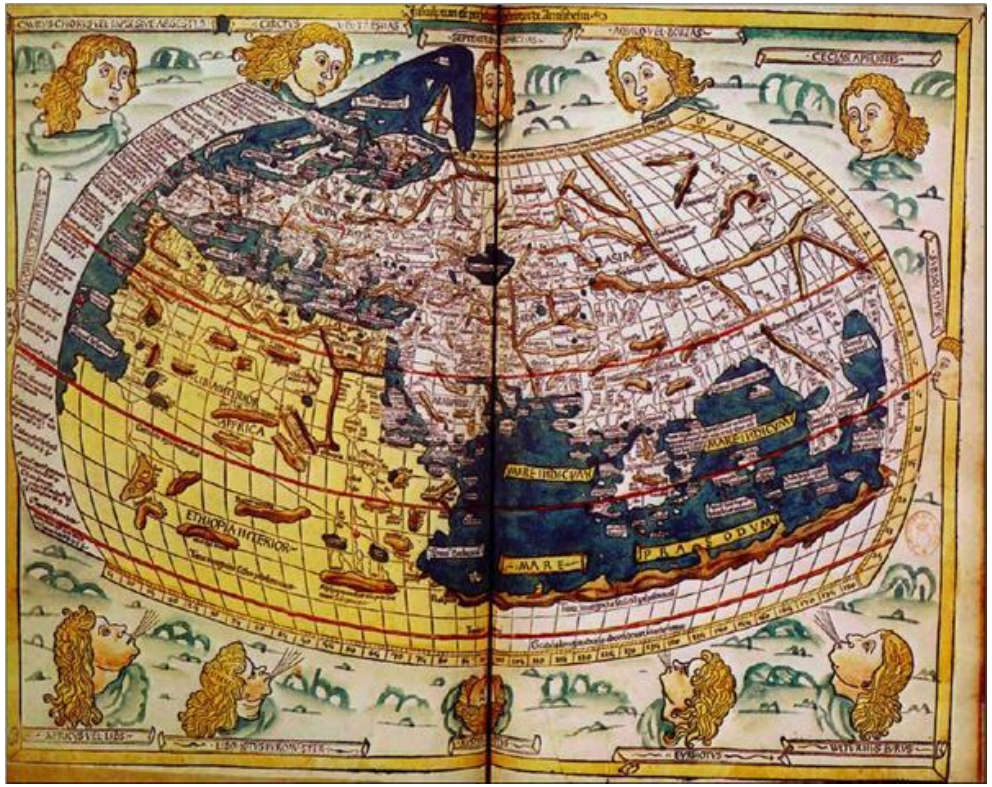
Elle se mesure en degré. Elle est positive à l’Est et négative à l’Ouest. Elle est plus difficile à calculer que la latitude car elle nécessite d’avoir l’heure de Greenwich sur le navire.

La longitude sera la différence entre 2 temps au même instant entre Greenwich et le lieu où l’on se trouve.

Un écart de 1 heure correspond à 15° en longitude

Histoire du méridien 0

Dès que les cartographes ont voulu représenter l'ensemble des régions habitées (l'écoumène), il a fallu trouver un méridien de référence. Ptolémée (2ème siècle) l'a situé sur le point le plus à l'ouest connu à l'époque : l'île de Ferro de l'archipel des Canaries.



Le méridien 0 est à gauche.
Le méridien central est une droite en vraie grandeur.
Les parallèles sont des cercles concentriques en vraie grandeur et les méridiens sont tracés point par point pour respecter l'échelle sur les parallèles.

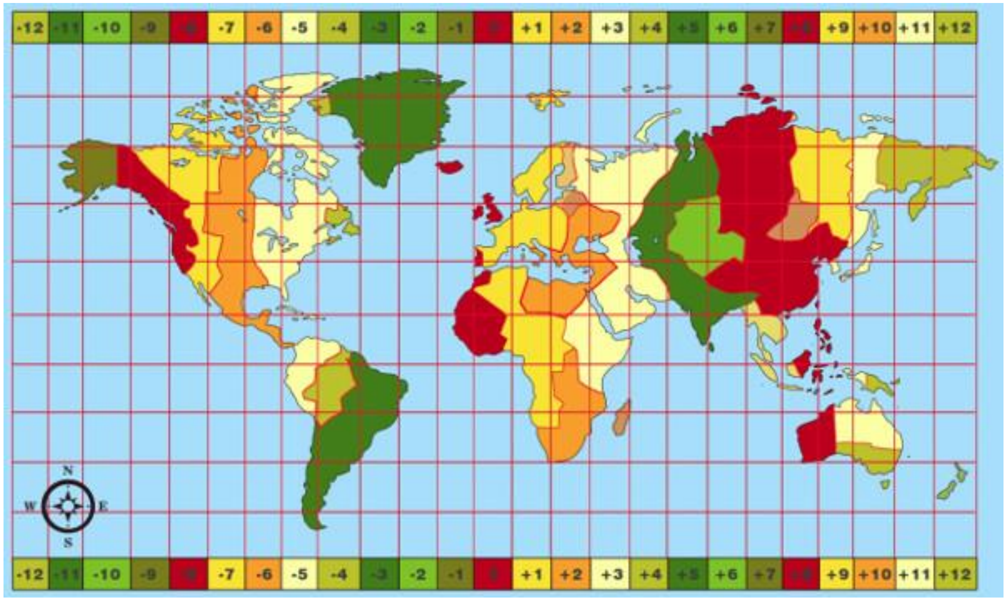
À partir du XVIème siècle, chaque puissance maritime avait son propre méridien. Il sera utilisé en France jusqu'à 1792, ou sera choisi le méridien de Paris

Le méridien de Greenwich

Le méridien de Greenwich comme standard international fut adopté en octobre 1884 à la conférence internationale du méridien de Washington. En contrepartie de l'adoption du méridien de Greenwich, les Britanniques se sont engagés à adopter le système métrique, adhérant à la Convention du Mètre la même année. Promesse non tenue !

Il y a deux raisons pour le choix de ce méridien:

1) Presque toute les marines utilisaient déjà Greenwich
2) C’était très commode pour le découpage du globe en fuseaux horaires



La ligne de changement de date se situe au niveau du détroit de Béring et passe en grande partie sur des océans

Evolution dans la mesure du temps

En 1714 à la suite de l'échouage de la flotte britannique au large des Cornouailles qui fît près de 2000 morts le parlement britannique offre une récompense à qui trouverait une méthode simple de calcul de la longitude.

Sur un voyage de Londres à la Jamaïque le chronomètre H4 de Harrisson n'a que 5 secondes de retard.

En 1759 John Harrisson met au point le chronomètre H4 de 13 cm de diamètre.

En France, Ferdinand Berthoud en 1768, inspiré par les travaux de Harrisson met au point une horloge marine, qui sur 10 mois obtient la même précision. Il devient horloger royal, et reçoit une commande de 20 horloges

L’impact des progrès de la mesure de la longitude sur la cartographie

Avec les progrès de la mesure des coordonnées, une représentation fidèle sur une carte est devenue nécessaire.

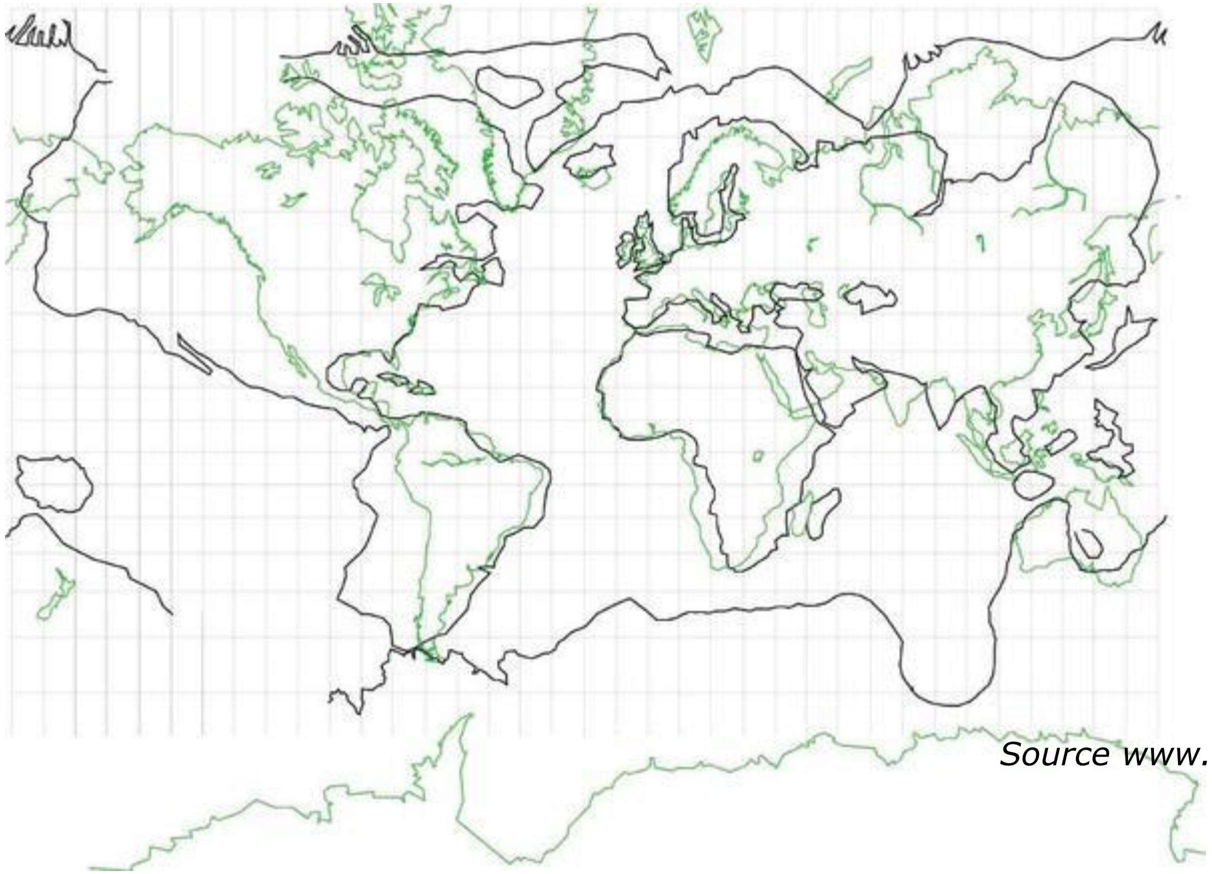
Il fallait trouver une projection qui permettrait de reproduire sur une surface plane une portion de surface de sphère.

Il y avait un choix à faire: respecter les angles (projection conforme) ou respecter les surfaces (projection équivalente).

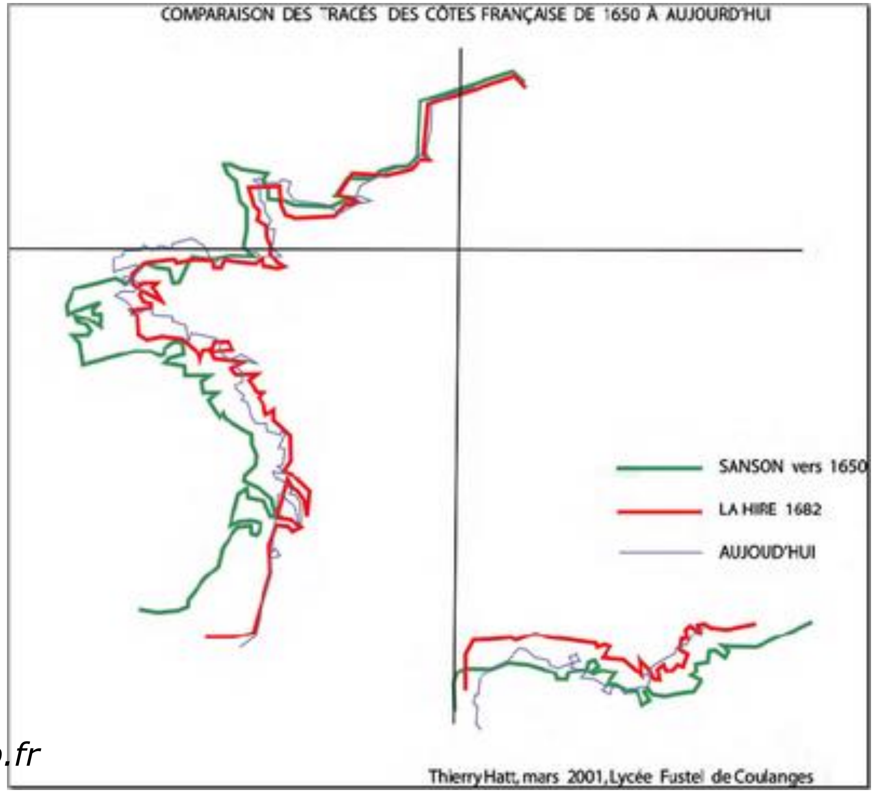
Pour les marins le choix est évident : il faut conserver les angles

En 1569 Gérard Mercator publie sa première mappemonde en 18 feuillets

Evolution de la cartographie



Source www.apmep.fr



Le but de la projection de Mercator est de représenter par des droites les déplacements à cap constant (Respect des angles).

Les erreurs en longitude sont dues aux mesures sur le terrain.

Cette projection est celle des cartes en lignes type « google ».

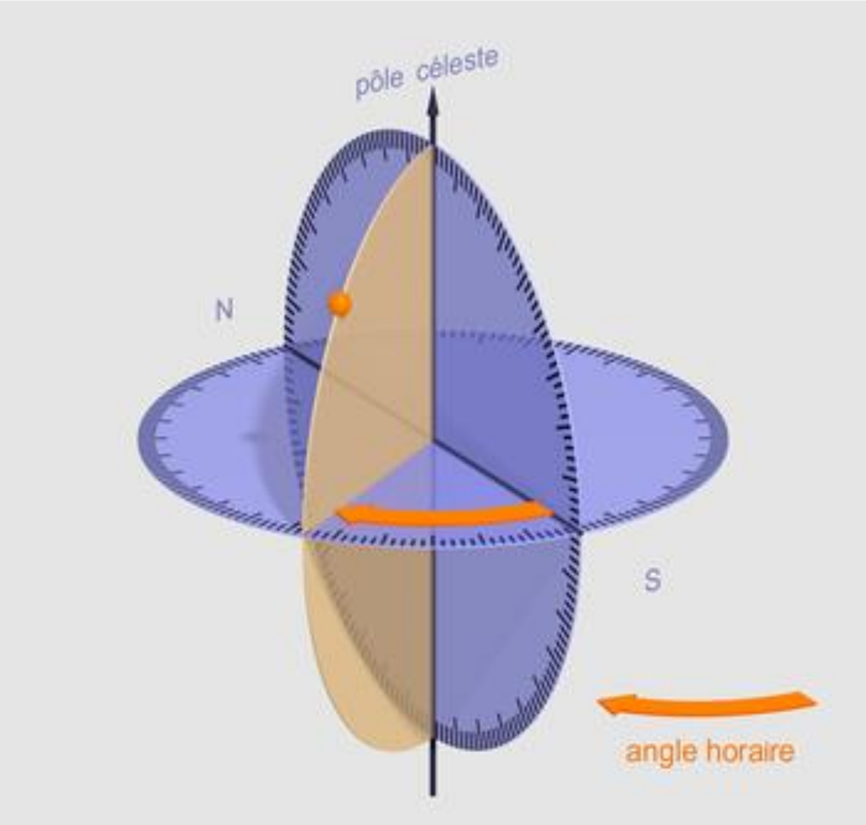
Relèvement des côtes françaises en s'appuyant sur les mouvements des satellites de Jupiter

Les marins utilisent les Angles Horaires

L'Angle Horaire AH est la portion d'arc d'équateur céleste comprise entre le plan du cercle horaire passant par l'astre et le plan du méridien céleste du lieu d'observation.

Angles et temps correspondent à la même chose car: **360° correspondent à 23h56m04s** durée de la révolution sidérale de la terre.

Les tables nautiques donnent les éléments du soleil, de la Lune et de quelques étoiles en angles horaires à Greenwich



Soleil					
Heure U.T.	AHvo		Déclinaison		
h	°	'	°	'	
O	179	12,1	-23	2,4	S
1	194	11,8		2,2	
2	209	11,5		2,0	
3	224	11,2		1,8	
4	239	10,9		1,6	
5	254	10,6		1,4	

Passage au méridien

12 h 3 m 26 s U.T.

Lat.	crépuscule				lever	
	h	*m*	*h*	*m*	*h*	*m*
52° N	6	44	7	28	8	8
50° N	6	39	7	20	7	59
45° N	6	28	7	5	7	38

Point vernal		
Heure U.T.	AHso	
h	°	'
O	100	23,3
1	115	25,8
2	130	28,2
3	145	30,7
4	160	33,2
5	175	35,6

Détermination de la Latitude par la hauteur de la polaire

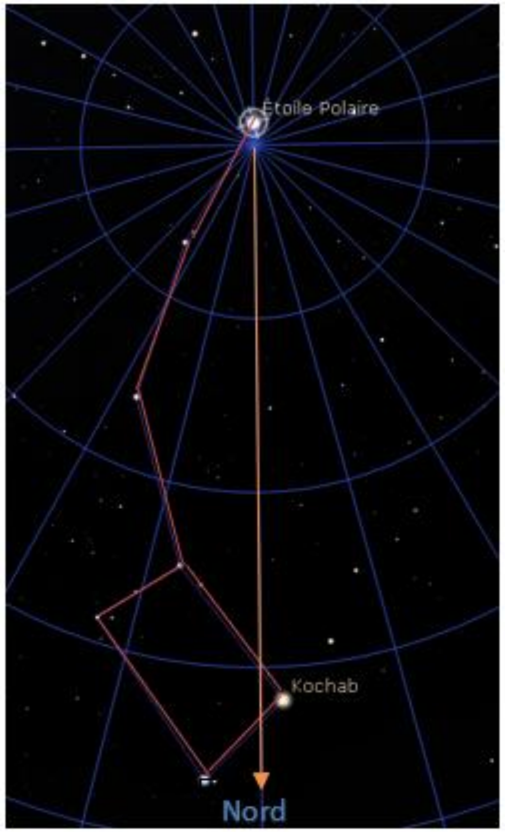
L’étoile polaire n’est pas exactement dans l’axe des pôles

Cette distance évolue au fil du temps en raison des phénomènes de précession des équinoxes et de nutation

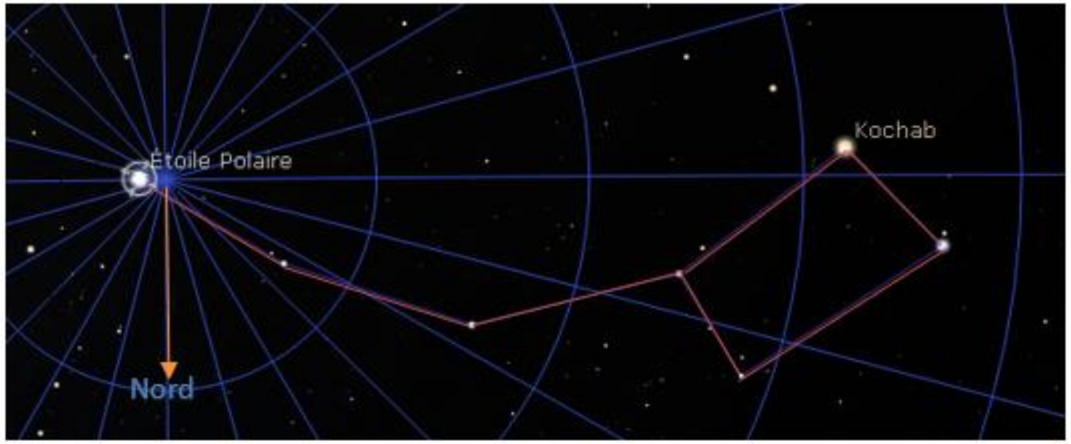
En l’an 1 l’écart était de 11°, en 1500 de 3° 8’, en 1750 de 2° 18’ actuellement l’écart est de 0° 42’. Il sera au minimum en 2100 avec un écart de 0° 27’

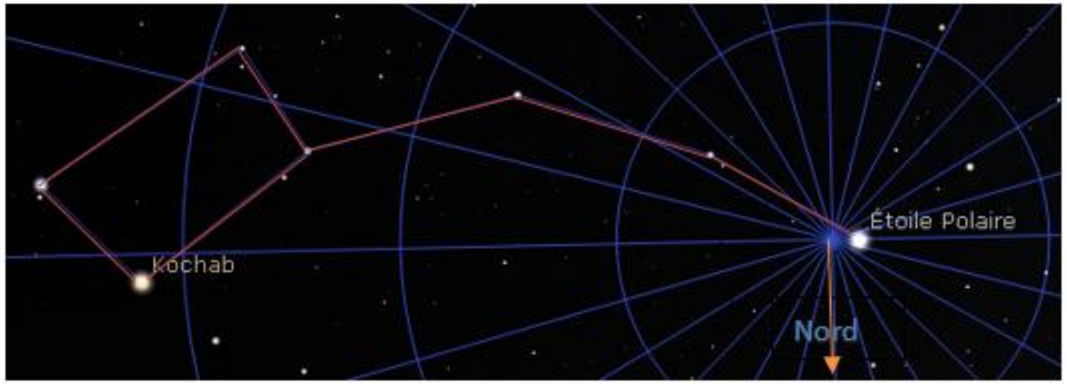
Selon la position de l’étoile polaire par rapport au pôle, il faudra dans le calcul de la latitude ajouter ou soustraire à la hauteur de l’étoile polaire par rapport à l’horizon Nord une quantité inférieure ou égale à cet écart.

Une erreur en latitude de 1 minute d’angle correspond à une erreur d’un mille marin soit 1852m (20000 km/180*60)

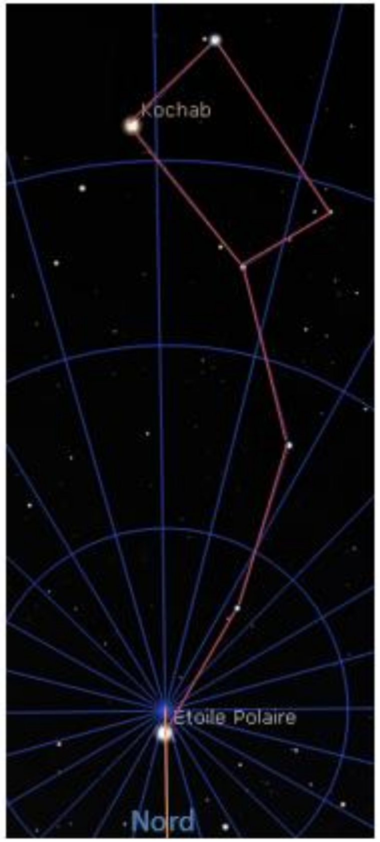


Dans ce cas de figure, il faut soustraire l'écart à la hauteur de la polaire pour connaitre la latitude



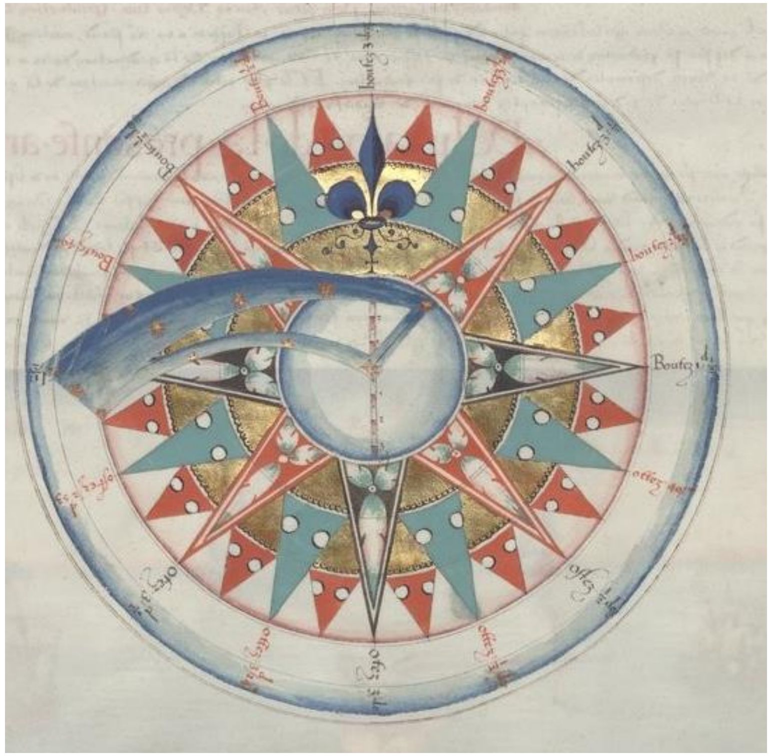


Dans ces 2 cas de figure, la hauteur de la polaire correspond à la latitude



Dans ce cas de figure, il faut ajouter l'écart à la hauteur de la polaire pour connaitre la latitude

Au 15° siècle les marins surveillaient la position de Kochab avec un instrument qui s’appelait une **volvelle**



Volvelle: petit appareil pour déduire l’écart à ajouter ou soustraire à la hauteur pour avoir la latitude (1583)

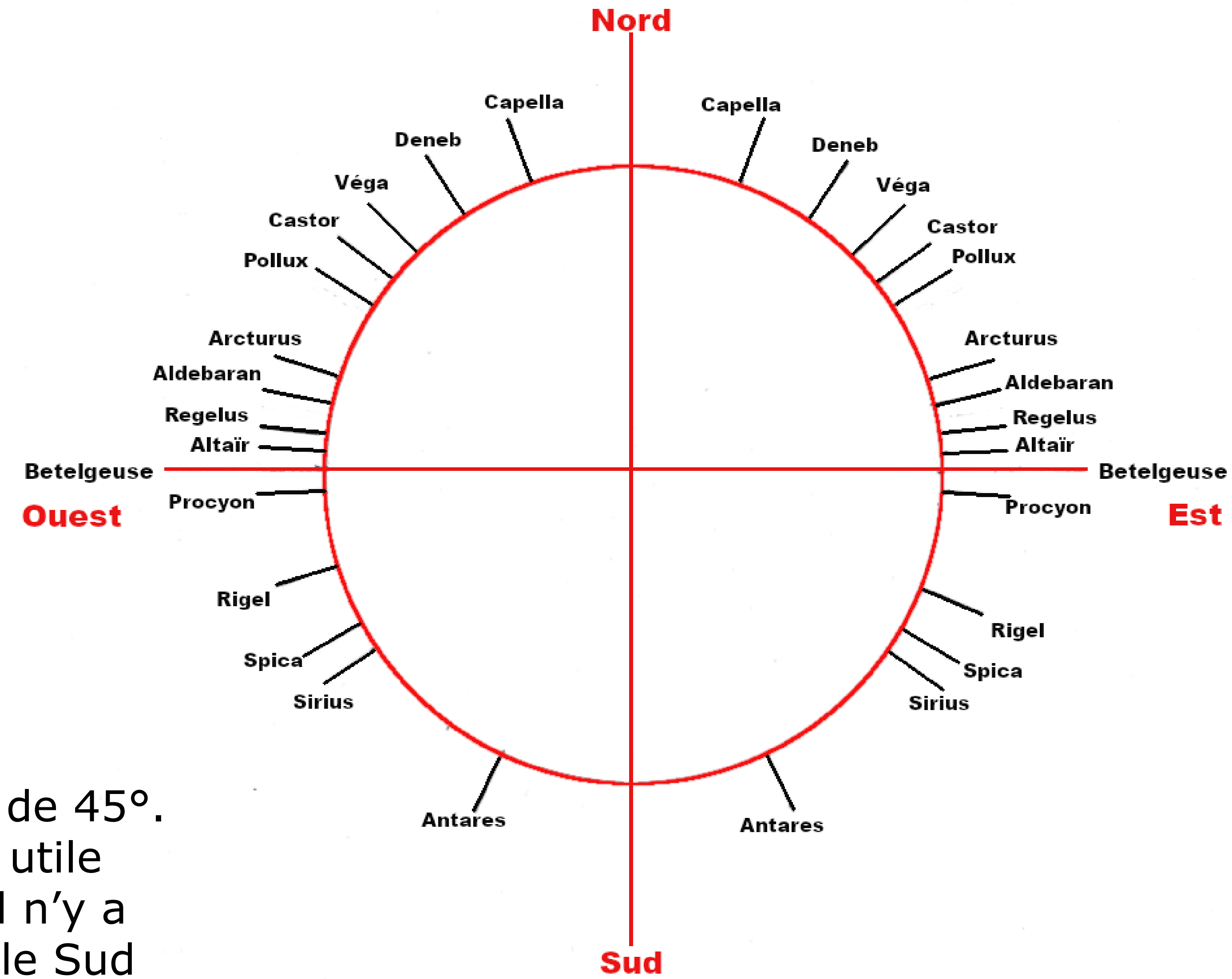
Il très similaire au **nocturlabe** qui permet de connaitre l’heure si on connait la date, ou la date si on connait l’heure

Et dans l'hémisphère Sud…

Dans l'hémisphère sud la **Croix du Sud** est très éloignée du pôle céleste sud. Par chance la direction donnée par l'axe principal de la constellation pointe vers le pôle à moins de 2 degrés.

Pour le calcul de la latitude on procèdera de la même façon mais avec des écarts plus grands. Acrux est à 26 ° 47 ' et Gacrux à 32° 46

Utilisation des levers et couchers des étoiles pour s'orienter



Fait pour une latitude Nord de 45°.
Ce type de cercle était très utile dans l'hémisphère Sud ou il n'y a pas d'étoile marquant le pôle Sud

La navigation à l'estime

Naviguer à l'estime c'est avoir par rapport à une position déjà connue l'idée de la vitesse de déplacement du navire et son cap .

Pour cela dans les navires on notait avec rigueur toutes les demi-heures le cap et la vitesse.

Le cap était mesuré par **le compas**
La vitesse par **le loch**
Un homme enregistrait sur **le renard** les données

Le responsable de la navigation reportait sur la carte le trajet par rapport à la dernière position connue

Le Compas

Il s’agit d’une boussole qui donne la direction Nord Sud.

Monté sur cardan pour absorber les mouvements du navire

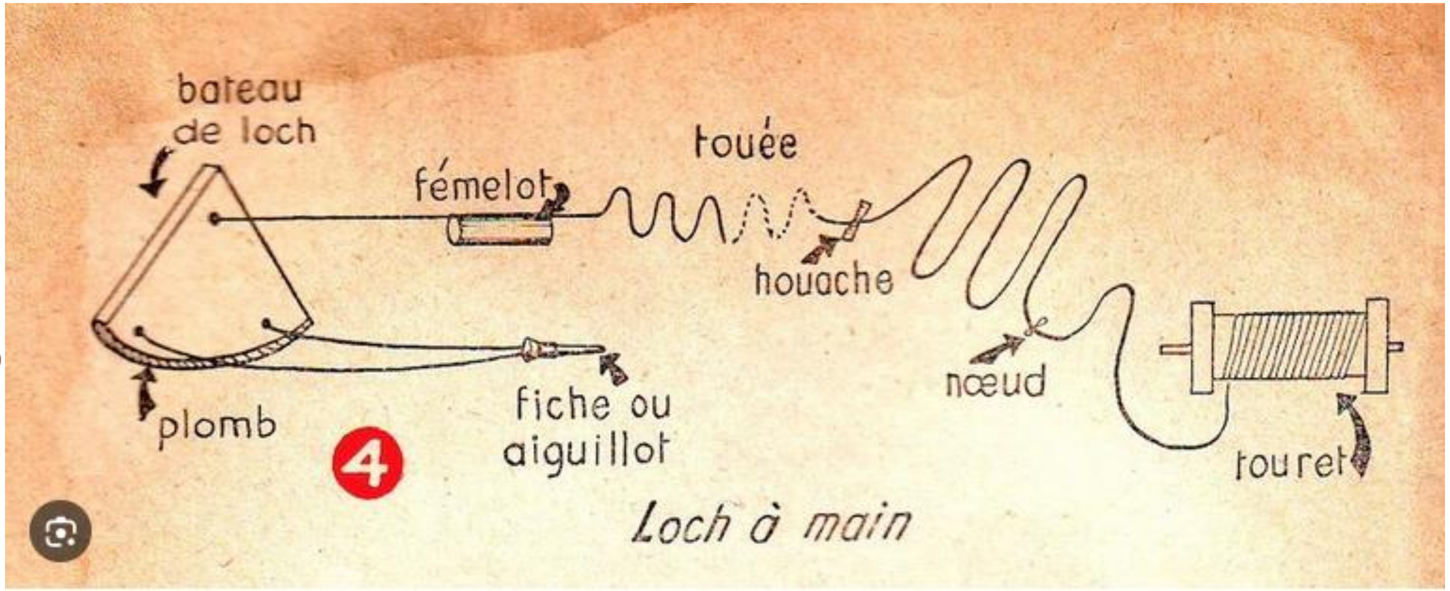
Gradué en 32 rhumbs de 11°15’

Le loch

Triangle de bois lesté relié au navire par une ligne gradué par des nœuds espacés de 14,62m au lieu de 15,43m (1852m x 30/3600) pour compenser les effets de traine derrière le navire

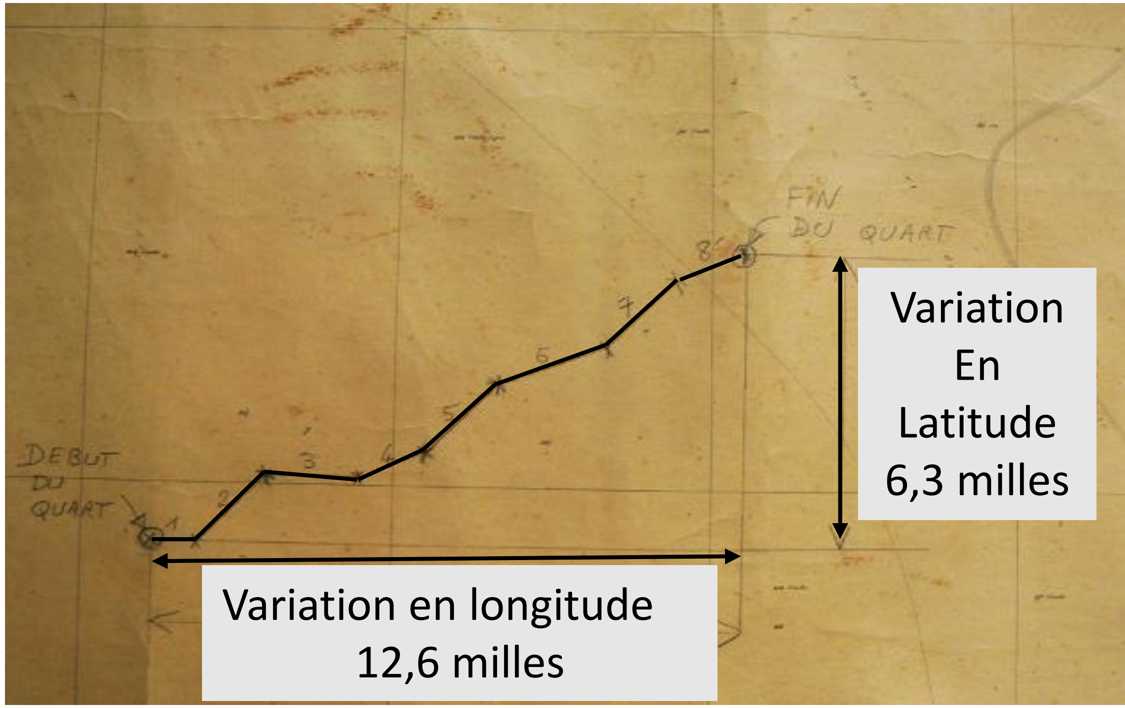
On lançait le loch à l’arrière du navire et on comptait le nombre de nœuds qui passait en 30’’

1 nœud = 1 mille /heure



Utilisation du renard pour mémoriser cap et vitesse

Relevé effectué toutes les demi-heures	Cap	Vitesse en nœud	Distance parcourue en une demi-heure en mille marin
1	E	2	1
2	NE	4	3
3	E	4	2
4	ENE	3	1,5
5	NE	4	2
6	ENE	5	2,5
7	NE	4	2
8	ENE	3	1,5



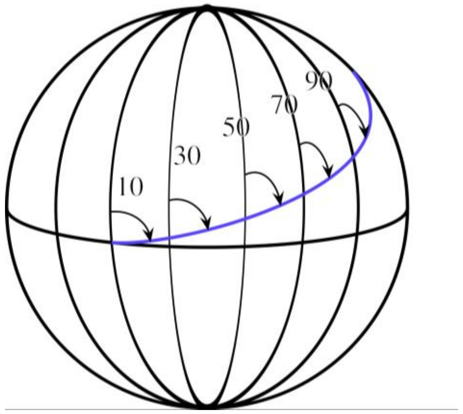
Une remarque : Loxodromie et Orthodromie

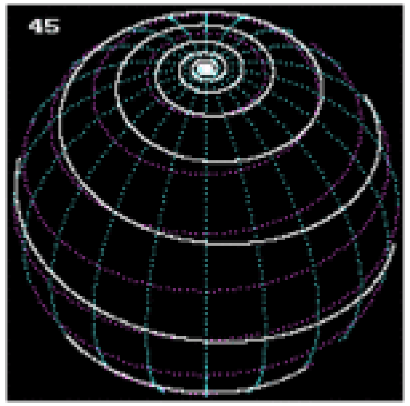
Petites définitions:

La **loxodromie** est une trajectoire qui coupe les méridiens toujours avec le même angle pour aller de A à B.

Sur une carte de Mercator où tous les méridiens sont parallèles, la loxodromie est une ligne droite.

Si on la continue à l'infini, elle fait une spirale allant d'un pôle à l'autre.

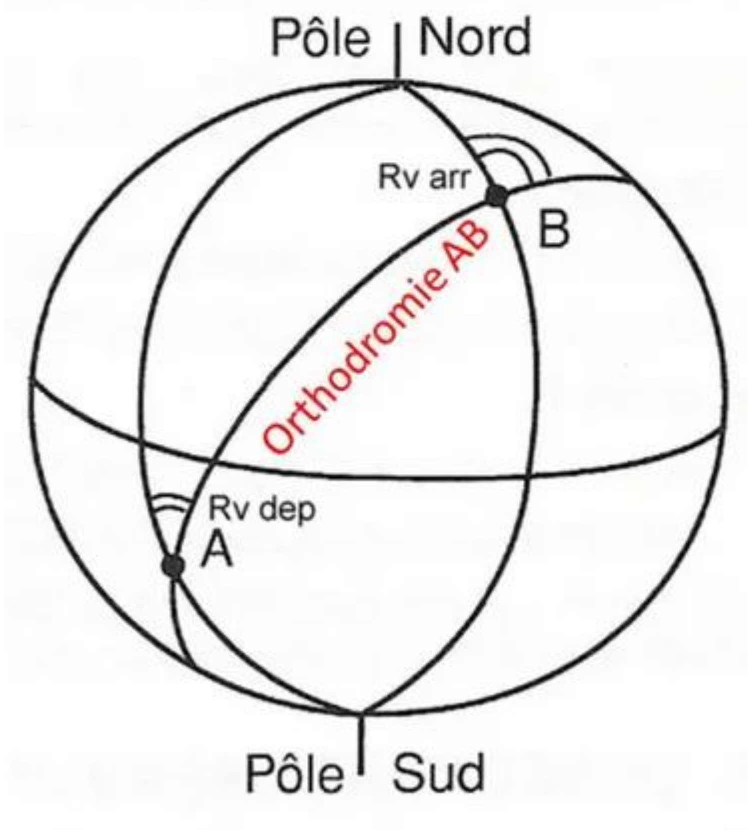




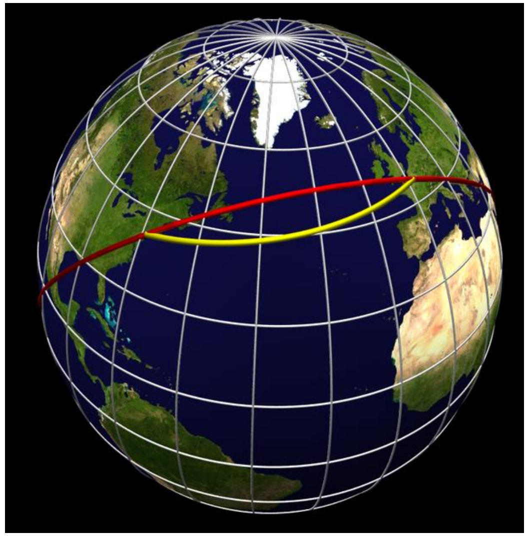
L'**orthodromie** est la trajectoire la plus courte entre 2 points A et B de la surface d'une sphère.

C'est le plus petit des 2 arcs de cercle du grand cercle passant par A et B. **Le grand cercle** est un cercle contenu dans un plan passant par A, B et le centre de la sphère.

La distance orthodromique est toujours plus courte qu'une distance loxodromique



En jaune nous avons loxodromie et en rouge orthodromie sur son grand cercle.
Dans le cas des vols transatlantiques entre Paris et New York, on voit très bien que la route suivie passe beaucoup plus par le nord pour économiser du carburant



Sur une courte distance, on peut confondre orthodromie et loxodromie. La distinction devient importante lors des voyages intercontinentaux, et surtout aux latitudes élevées.
Un voyage entre Paris et New York a une longueur loxodromique de 6 070 km, et le parcours orthodromique permet de gagner 230 km.
Le gain est de 1 600 km entre Paris et Tokyo, pour une longueur orthodromique de 9 700 km environ. (1/6)

Pour les curieux

Imaginer les calculs sans calculette avec les tables trigo et celle de logarithme … Pour faciliter un peu les calculs il existait des tables avec quelques calculs déjà effectués.

La formule de trigonométrie pour calculer la distance orthodromique entre 2 points A et B sur le globe:

$$\cos d = (\sin Lat_A \,.\, \sin Lat_B) + (\cos Lat_A \,.\, \cos Lat_B \,.\, \cos (Long_A - Long_B))$$

La formule trigonométrique pour déterminer l’azimut de l’orthodromie de A vers B en A

$$cotg(Az) = (\sin(Lat_A) \,.\, \cos(Long_B - Long_A) - (\cos(Lat_B) \,.\, \tan(Lat_B)) / \sin(Long_B - Long_A)$$

La mesure de hauteur d'un astre au sextant

Pour voir comment fonctionne un sextant suivre le lien ci-dessous pour en voir une simulation:

https://phyanim.sciences.univ-nantes.fr/Soleil/Lieu/sextantF.php

Pour obtenir une valeur juste de hauteur à partir d'une mesure au sextant il faut procéder à certaines corrections

$$Hv = Hm - d \ \ - R \pm \Delta$$

Hv= hauteur vraie

Hm = Hauteur mesurée

d = correction liée à la hauteur h du sextant par rapport au niveau de l'eau

R = correction liée à la réfraction, directement lié à Hm

Δ = ½ diamètre pour la Lune ou le Soleil à ajouter ou soustraire en fonction du choix fait du bord pour la mesure (environ 16 ')

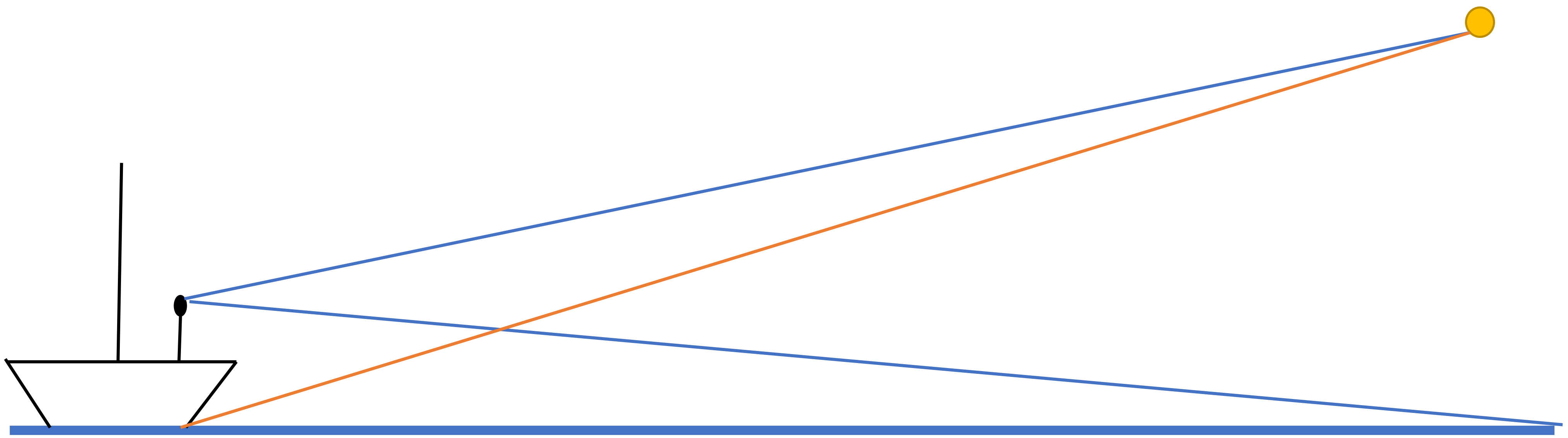
Ec = erreur de collimation (erreur systématique générée par le sextant)

Il existe des abaques pour calculer les différentes corrections

Influence de la hauteur de l’observation

L’angle mesuré est plus grand que la hauteur vraie

Plus l’astre est proche de l’horizon plus l’erreur est grande…

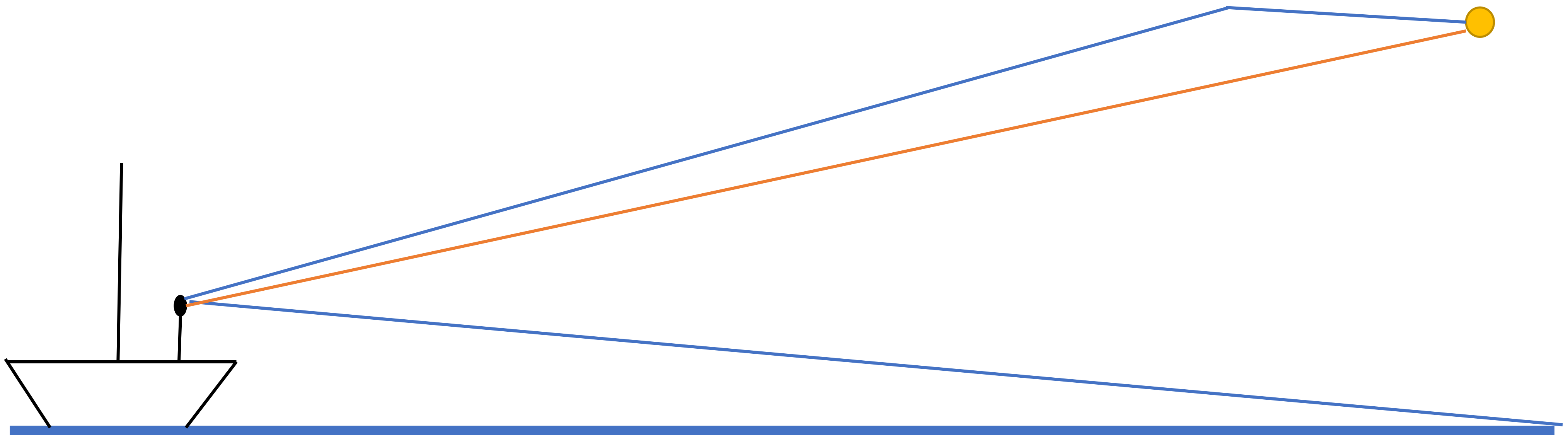


Influence de la réfraction

L’angle mesuré par l’observateur est plus grand que la hauteur vraie

Plus l’astre est proche de l’horizon plus l’erreur est grande

Elle varie aussi en fonction de la pression et de la température



Mesure de la longitude et de la latitude par la méridienne

La technique est très simple mais peu précise pour la longitude car elle implique plusieurs mesures au sextant alors que le bateau se déplace…

Pas de calcul trigonométrique. Elle permet de déterminer la latitude et la longitude. Nécessite d’avoir à bord les éphémérides du Soleil

Le but est de déterminer l’heure de passage au méridien local du Soleil.

Pour cela il faut avoir une idée de la longitude estimée à la mi-journée

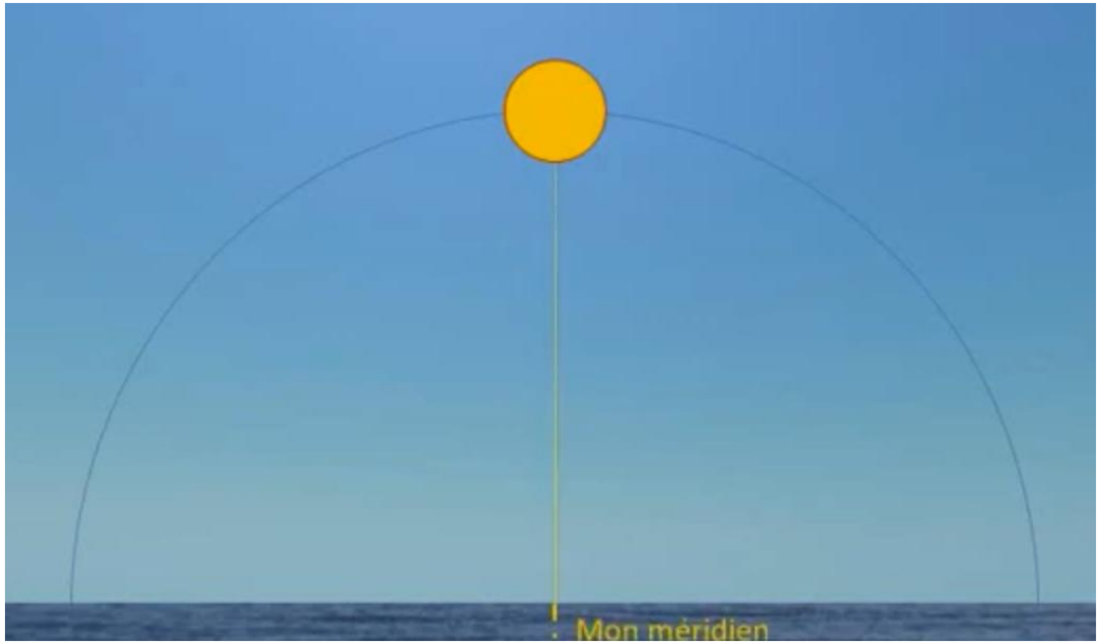
Si on rate le moment des mesures, il faudra attendre le lendemain pour recommencer…

La terre tournant de 15° en 1h, si la longitude estimée est λ, l'heure de passage du soleil au zénith sera décalée de celui de Greenwich de :

$$\Delta T\lambda = -24 \times \lambda / 360$$

Ne pas oublier que les longitudes sont positives à l'EST (d'où le signe -)

Connaissant le temps TU du passage au méridien de Greenwich par les éphémérides, il s'agira d'y ajouter cet écart pour connaitre le moment approximatif de la culmination du soleil au niveau du bateau

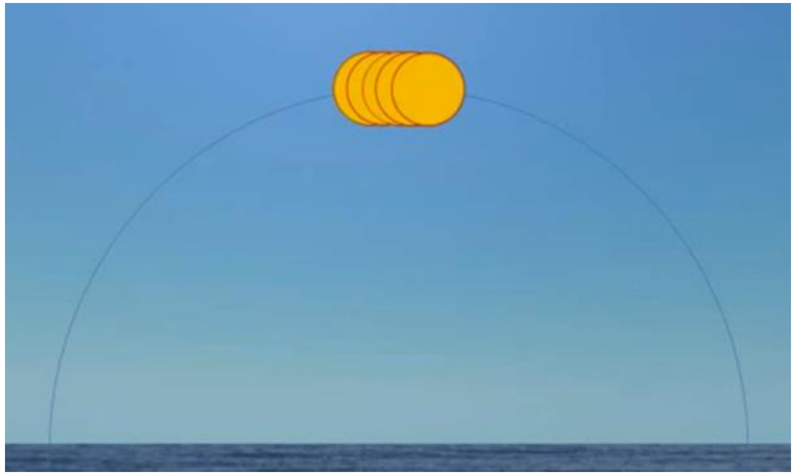


Détermination de la Latitude par la méridienne

Au moment de la culmination le mouvement en hauteur du soleil est très faible. Il sera donc très difficile de repérer exactement ce moment particulier .

Cette méthode a permis au grand voyageur du 15 -ème siècle de traverser les océans à latitude constante et de revenir dans le port du départ.

Elle est toujours utilisée actuellement. On peut l’appliquer avec n’importe quel astre dont on a les éphémérides



La détermination de la Latitude commence 10 minutes avant la culmination par une visée au sextant du soleil.

On suit au sextant la montée du soleil en faisant tangenter le soleil avec l’horizon en faisant une visée toutes les minutes

Quand le soleil commence sa descente on relève la hauteur **Hv** (hauteur vrai) On applique à la mesure les corrections à faire sur la mesure sans oublier le ½ diamètre du soleil. Pas besoin de relever l’heure TU

On suit le soleil de minute en minute
pour repérer la culmination.
On surveille le début de la descente du
soleil dans le sextant

Nous connaissons la hauteur du soleil **D** par rapport à l'équateur terrestre à la date de la mesure par les éphémérides. C'est sa **déclinaison.**

Si la mesure a été faite avec le soleil au Sud : Hémisphère Nord

Si la mesure a été faite avec le soleil au Nord : Hémisphère Sud

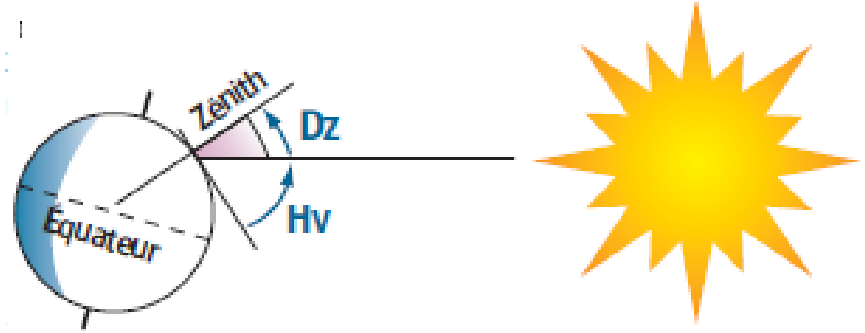
Éphémérides du Soleil 2020

novembre 2020		Déclinaison à 0h U.T.			d	AHv0 à 0h U.T.		D	T.Pass. U.T.			Lever U.T.		Coucher U.T.	
		°	'		'	°	'	°	h	m	s	h	m	h	m
1	D	14	30,2	S	0.8	184	06,4	15.000	11	43	34	06	50	16	36
2	L	14	49,2	S	0.8	184	06,7	15.000	11	43	33	06	52	16	35
3	M	15	08,0	S	0.8	184	06,8	15.000	11	43	33	06	54	16	33
4	M	15	26,5	S	0.8	184	06,7	15.000	11	43	34	06	55	16	31
5	J	15	44,8	S	0.8	184	06,4	15.000	11	43	35	06	57	16	30
6	V	16	02,9	S	0.7	184	05,8	14.999	11	43	38	06	59	16	28
7	S	16	20,6	S	0.7	184	05,1	14.999	11	43	41	07	00	16	27
8	D	16	38,1	S	0.7	184	04,2	14.999	11	43	46	07	02	16	25

La colonne d est la variation horaire de la déclinaison. Utile pour les interpolations

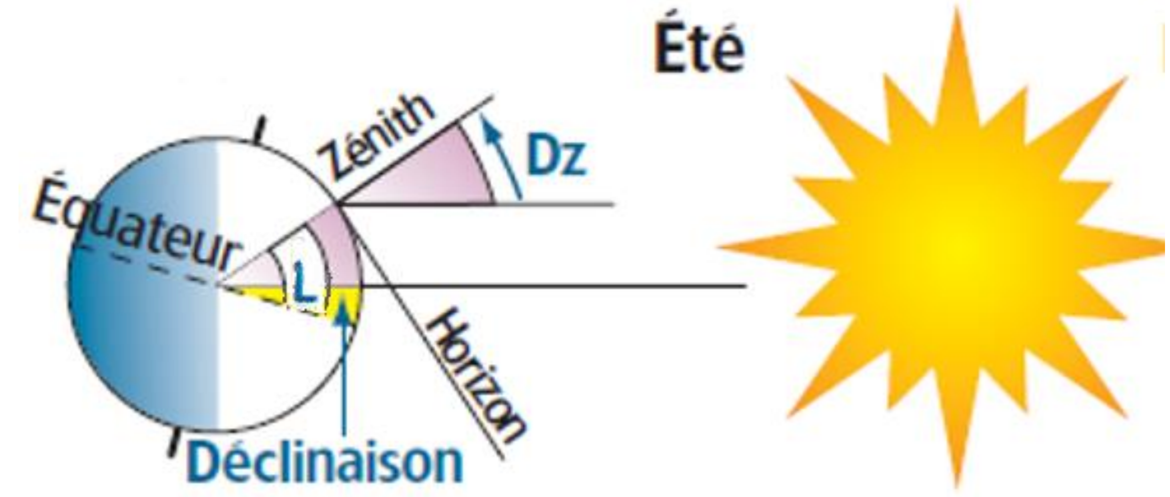
La colonne D est la variation horaire de AHv0

Les heures de levers et couchers sont pour Lat =50° et Long = 0

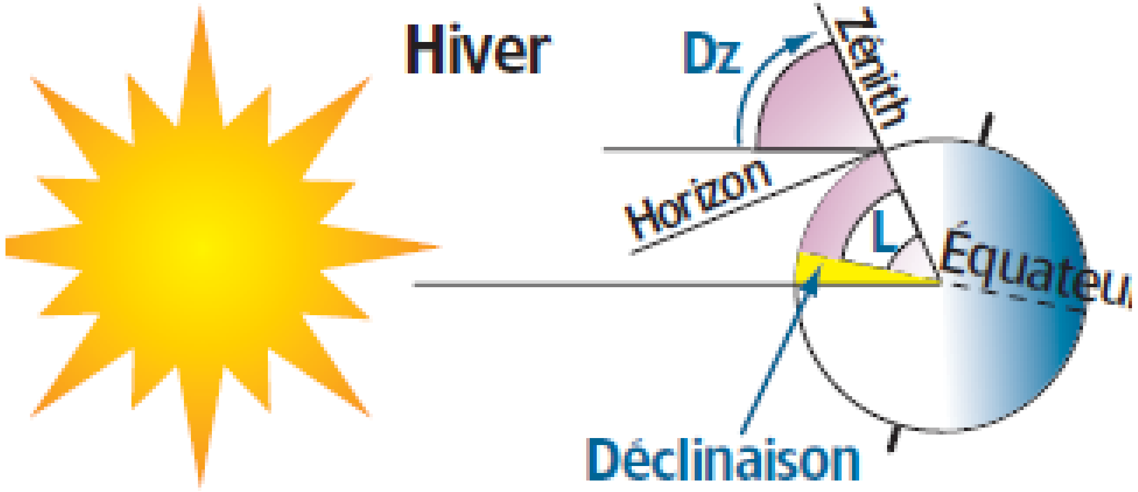


On calcule la distance zénithale **Dz**

Dz = 90° - Hv



Lat = Dz + D
Lat = 90 - Hv + D



Lat = Dz - D
Lat = 90 - Hv - D

Exemple de calcul de la Déclinaison :

Le 04 novembre 2020 à 15 h 35 min 40 s (UTC) en route de Natal (Brésil) vers Dakar (Sénégal)

Les éphémérides indiquent :

Éphémérides du Soleil 2020

novembre 2020		Déclinaison à 0h U.T.		d	AHv0 à 0h U.T.		D	T.Pass. (U.T.)			Lever (U.T.)		Coucher (U.T.)	
		°	'	'	°	'	°	h	m	s	h	m	h	m
1	D	14	30,2 S	0.8	184	06,4	15.000	11	43	34	06	50	16	36
2	L	14	49,2 S	0.8	184	06,7	15.000	11	43	33	06	52	16	35
3	M	15	08,0 S	0.8	184	06,8	15.000	11	43	33	06	54	16	33
4	M	15	26,5 S	0.8	184	06,7	15.000	11	43	34	06	55	16	31

Calcul de la Déclinaison

— Temps écoulé depuis 00 h 00 UTC..................... 15 h 35 min 40 s

soit en décimal 15 heures....................... 15 h

+35/60e d'heure........... + 0,58333... h

+40/3 600e d'heure.... + 0,0111... h

Total :.............................. 15,5944 heures

— Changement de déclinaison en 15,5944 h......... 0,8' x 15,595 = 12,476'

— Déclinaison à 15 h 35 min 40 s.......................... D = Do + ΔD

D = 15° 26,5' + 00°12,476'

D = 15° 38,976' SUD

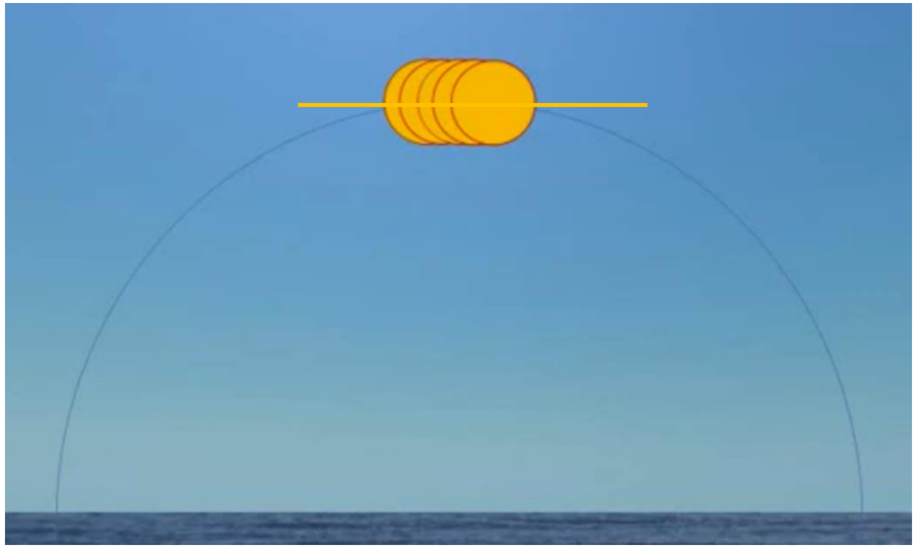
D = - 15,6496' → Sud... donc négative

Détermination de la Longitude par la méridienne.
La méthode suppose d’emporter sur le navire l’heure de Greenwich

Cette méthode n’est pas la plus précise, mais permet de corriger une position évaluée à l’estime avant d’utiliser la méthode de la droite de hauteur

Le but de cette méthode est de déterminer avec précision l’heure de la culmination

La difficulté vient qu’au moment de la culmination la trajectoire du soleil est proche de l’horizontale comme on l’a vu pour la détermination de la latitude



La méthode consiste à faire une mesure 30 mn et/ou 1h avant la culmination et de relevé avec précision l'heure TU ainsi que la hauteur. Pas besoin d'appliquer les corrections habituelles à la mesure de hauteur.

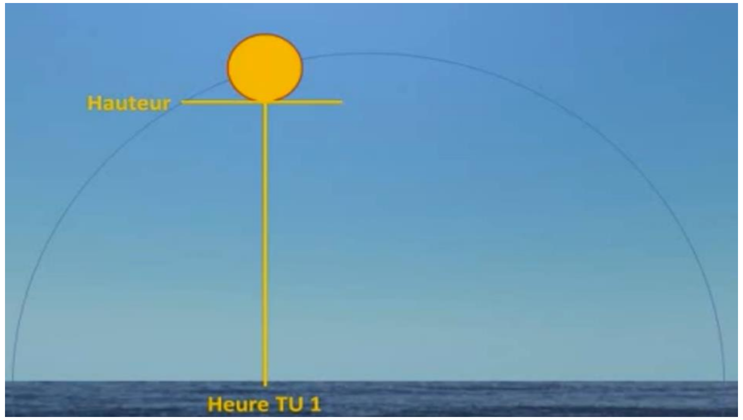
Ensuite après la culmination, surveiller au sextant quand le soleil redescend à la même hauteur et relever avec précision le temps TU.

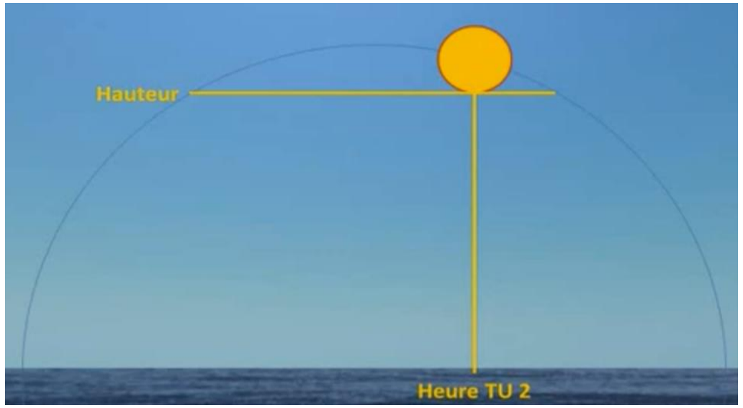
L'heure de la culmination est la moyenne entre les 2 temps. Grace aux éphémérides il est facile de calculer la différence de temps TU entre le temps TU de la culmination sur le navire et celle de la culmination à Greenwich

TU culmination= (TU2 +TU1)/2

ΔTλ= TU culm bateau -TU culm Greenwich *(temps en heure)*

L= 15 x ΔTλ





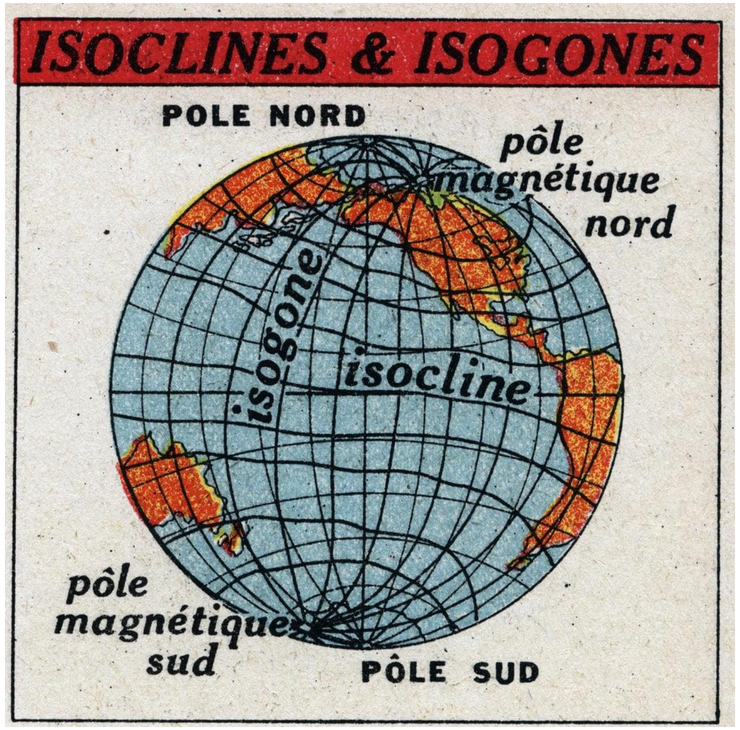
Détermination de la longitude par la déclinaison magnétique

L'astronome Halley (1656 1742) pense pouvoir déterminer la longitude grâce aux lignes isogones.

Ce sont des lignes qui ont la même déclinaison magnétique : angle entre le pôle Nord magnétique et géographique.

Pour cela Halley durant 2 ans de 1698 à 1700 à parcourut l'Atlantique à différente latitude pour tracer sa carte des isogones et y associer des valeurs de longitude.

La méthode trop imprécise sera abandonnée. Il mettra en évidence la dérive du pôle magnétique.



Détermination de la longitude par les satellites de Jupiter

La méthode n'a jamais bien fonctionné en mer en raison des mouvements des navires, mais a servi au cartographe

Il s'agissait de retrouver le temps TU de Greenwich en observant les mouvements des satellites de Jupiter et en ayant à bord les éphémérides de leurs occultations

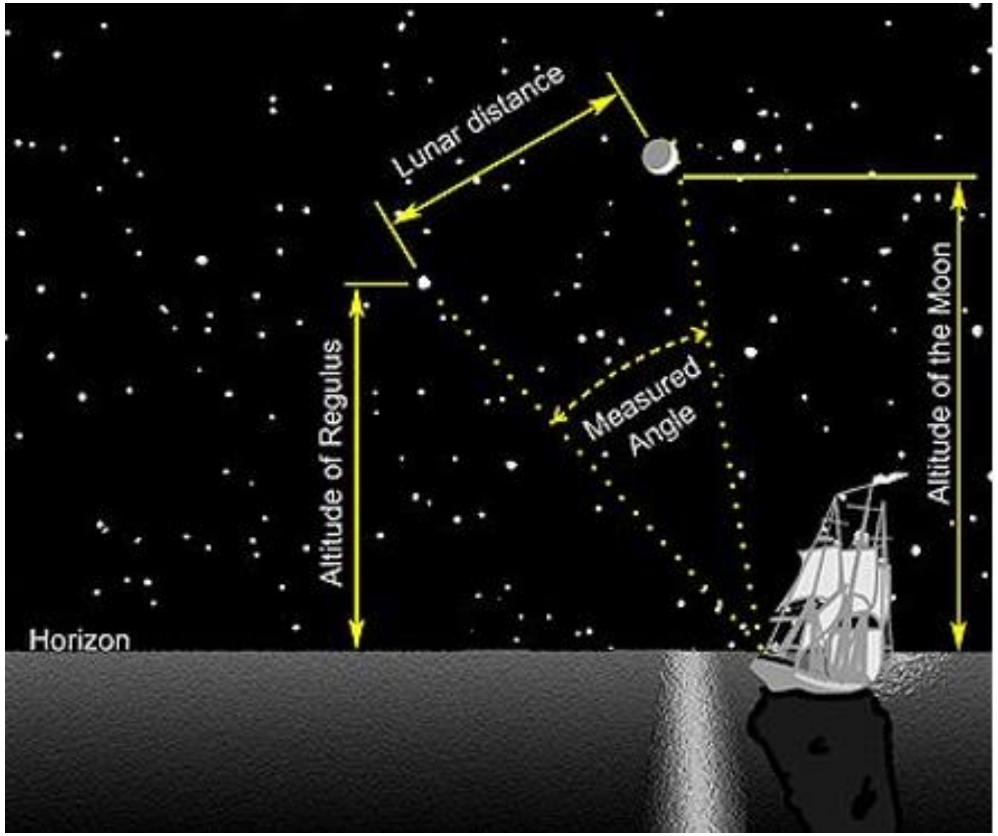
Cassini et Rœmer ont permis dès 1676 d'avoir des éphémérides fiables tenant compte de la vitesse de propagation de la lumière

Cette technique permettait de remettre à l'heure les horloges des navires qui dérivaient progressivement. Les horloges de précisions étaient très chères à cette époque, il valait mieux mettre à l'heure régulièrement l'horloge de bord

Détermination de la longitude par les distances lunaires

Très voisine de la méthode utilisant les satellites de Jupiter, cette méthode a été très utilisée de 1750 à 1850.

La Lune se déplaçant sur le fond d'étoile plus rapidement que les planètes (13,2° par jour soit environ 30' par heure), il suffisait de mesurer la distance lunaire d'une étoile proche de l'écliptique (ou d'une planète ou du soleil) et d'identifier dans les tables de marines l'heure TU de Greenwich correspondant à cet écart.



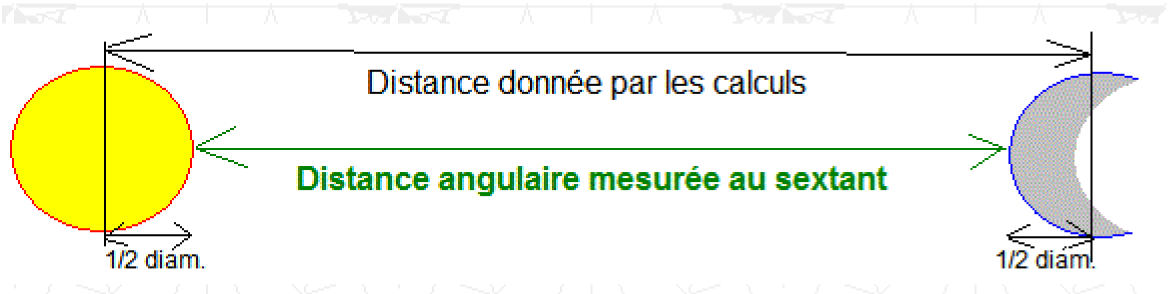
Il fallait dans cette méthode corriger des effets de parallaxes, tenir compte du diamètre lunaire, effectuer des corrections en fonction de la réfraction atmosphérique…

h	Moon (1st Jan)					Lunar Distance (objects with largest hourly LD delta)							
Sun	GHA	ν	Dec	d	HP	-Regulus	-Pollux	-Aldebaran	-Mars	+Jupiter	+Fomalhaut	+Saturn	+Sun
0	68°43.6	13.8′	N12°03.2	13.4′	56.2′	116°30.3	80°02.6	36°42.4	35°34.9	32°27.3	61°25.5	71°13.1	113°21.7
1	83°16.4	13.8′	12°16.6	13.3′	56.2′	115°58.5	79°30.7	36°11.4	35°02.6	32°58.8	61°55.8	71°44.7	113°51.0
2	97°49.2	13.8′	12°29.9	13.2′	56.2′	115°26.8	78°58.9	35°40.4	34°30.4	33°30.3	62°26.0	72°16.3	114°20.2
3	112°22.0	13.8′	12°43.2	13.2′	56.1′	114°55.0	78°27.0	35°09.4	33°58.1	34°01.8	62°56.2	72°47.8	114°49.4
4	126°54.8	13.7′	12°56.3	13.1′	56.1′	114°23.3	77°55.2	34°38.5	33°25.9	34°33.3	63°26.3	73°19.3	115°18.6
5	141°27.5	13.7′	13°09.4	13.0′	56.1′	113°51.6	77°23.4	34°07.7	32°53.7	35°04.7	63°56.5	73°50.7	115°47.7
6	156°00.2	13.7′	N13°22.5	13.0′	56.1′	113°20.0	76°51.7	33°36.9	32°21.6	35°36.1	64°26.7	74°22.2	116°16.8
7	170°32.9	13.6′	13°35.5	12.9′	56.0′	112°48.3	76°20.0	33°06.2	31°49.5	36°07.5	64°56.8	74°53.6	116°45.9
8	185°05.5	13.6′	13°48.4	12.8′	56.0′	112°16.7	75°48.3	32°35.5	31°17.4	36°38.8	65°27.0	75°25.0	117°14.9
9	199°38.2	13.6′	14°01.2	12.8′	56.0′	111°45.2	75°16.6	32°04.9	30°45.3	37°10.2	65°57.1	75°56.4	117°43.9
10	214°10.7	13.6′	14°14.0	12.7′	55.9′	111°13.6	74°45.0	31°34.3	30°13.3	37°41.4	66°27.2	76°27.7	118°12.9
11	228°43.3	13.5′	14°26.6	12.6′	55.9′	110°42.1	74°13.4	31°03.8	29°41.3	38°12.7	66°57.3	76°59.0	118°41.9
12	243°15.8	13.5′	N14°39.3	12.5′	55.9′	110°10.6	73°41.8	30°33.3	29°09.3	38°44.0	67°27.4	77°30.3	119°10.8
13	257°48.3	13.5′	14°51.8	12.5′	55.9′	109°39.1	73°10.2	30°02.9	28°37.3	39°15.2	67°57.4	78°01.5	119°39.7
14	272°20.8	13.4′	15°04.3	12.4′	55.8′	109°07.7	72°38.7	29°32.6	28°05.4	39°46.4	68°27.5	78°32.8	
15	286°53.2	13.4′	15°16.7	12.3′	55.8′	108°36.2	72°07.2	29°02.3	27°33.5	40°17.6	68°57.5	79°04.0	
16	301°25.6	13.4′	15°29.0	12.2′	55.8′	108°04.9	71°35.7	28°32.1	27°01.7	40°48.7	69°27.6	79°35.1	
17	315°58.0	13.3′	15°41.2	12.2′	55.8′	107°33.5	71°04.2	28°02.0	26°29.8	41°19.8	69°57.6	80°06.3	
18	330°30.3	13.3′	N15°53.3	12.1′	55.7′	107°02.1	70°32.8	27°31.9	25°58.0	41°50.9	70°27.6	80°37.4	
19	345°02.6	13.2′	16°05.4	12.0′	55.7′	106°30.8	70°01.4	27°02.0	25°26.2	42°22.0	70°57.5	81°08.5	
20	359°34.8	13.2′	16°17.4	11.9′	55.7′	105°59.5	69°30.0	26°32.0	24°54.5	42°53.0	71°27.5	81°39.6	
21	14°07.0	13.2′	16°29.3	11.8′	55.7′	105°28.2	68°58.7	26°02.2	24°22.7	43°24.1	71°57.5	82°10.6	
22	28°39.2	13.1′	16°41.2	11.7′	55.7′	104°57.0	68°27.3	25°32.4	23°51.0	43°55.1	72°27.4	82°41.7	
23	43°11.3	13.1′	16°52.9	11.7′	55.6′	104°25.8	67°56.0	25°02.8	23°19.3	44°26.0	72°57.3	83°12.7	
1st	SD = 15.3′ Mer. pass. 20:02					Sun SD = 16.3′							

Table donnant les distances de la Lune par heure pour une journée par rapport à divers astres visibles à cette date. Le temps est en TU. Cela permet de calculer les distances avec des étoiles quel que soit l’heure.

La méthode simplifiée:

Il fallait mesurer la distance entre la Lune et un astre dont on connait la distance heure par heure.
Noter le temps où la mesure a été faite.
Il fallait ajouter à la mesure faite au sextant le ½ diamètre de la Lune et celui du Soleil si c’était lui qui avait été pris en mesure .



Ensuite grâce à une règle de trois déterminer l’heure théorique TU où la mesure a été faite, et corriger la pendule du bord en tenant compte de l’heure où nous avions fait la mesure.

En 1905 le BDL a arrêté de publier les distances lunaires car la méthode a été abandonnée.
Elle a été utilisée par La Pérouse et J Cook dans leurs voyages.

Une autre méthode avec les éphémérides de la Lune et d’astres proches de l’écliptique.

Il faut calculer l’écart théorique pour deux heures encadrant le moment de la mesure sur le navire. Ici pour 7h et 9h

Avec la trigonométrie sphérique on peut alors calculer pour les deux heures choisies l’écart entre les 2 astres (calcul d’une orthodromie. Voir plus loin)

On pouvait alors appliquer sur les déclinaisons les erreurs liées à la réfraction atmosphérique.

À 7h on trouvera un écart de 74°47.7’
À 9h on trouvera un écart de 73°42.1’

La Pérouse avait besoin de 4h de calcul difficile pour faire le point avec cette méthode.

U.T.	AHvo	D	AHao	v	D	d
h	° ′	° ′	° ′	′	° ′	′
00	179 49,2	N 8 50,9	256 04,1	8,0	S 14 37,3	6,8
01	194 49,4	8 51,8	270 31,1	8,0	14 30,5	6,8
02	209 49,5	8 52,7	284 58,1	8,0	14 23,7	6,9
03	224 49,7	8 53,6	299 25,1	8,0	14 16,8	7,1
04	239 49,8	8 54,5	313 52,1	8,0	14 09,7	7,1
05	254 50,0	8 55,4	328 19,1	8,0	14 02,6	7,2
06	269 50,2	N 8 56,3	342 46,1	8,0	S 13 55,4	7,3
07	284 50,3	8 57,3	357 13,1	8,0	13 48,1	7,4
08	299 50,5	8 58,2	11 40,1	8,0	13 40,7	7,5
09	314 50,6	8 59,1	26 07,1	8,0	13 33,2	7,6
10	329 50,8	9 00,0	40 34,1	8,0	13 25,6	7,7
11	344 51,0	9 00,9	55 01,1	8,0	13 17,9	7,7
12	359 51,1	N 9 01,8	69 28,1	8,0	S 13 10,2	7,9
13	14 51,3	9 02,7	83 55,1	8,0	13 02,3	7,9
14	29 51,4	9 03,6	98 22,1	8,0	12 54,4	8,1
15	44 51,6	9 04,5	112 49,1	8,1	12 46,3	8,1
16	59 51,8	9 05,4	127 16,2	8,0	12 38,2	8,2
17	74 51,9	9 06,3	141 43,2	8,0	12 30,0	8,3
18	89 52,1	N 9 07,2	156 10,2	8,1	S 12 21,7	8,4
19	104 52,2	9 08,1	170 37,3	8,0	12 13,3	8,4
20	119 52,4	9 09,0	185 04,3	8,0	12 04,9	8,5
21	134 52,5	9 09,9	199 31,3	8,1	11 56,4	8,7
22	149 52,7	9 10,8	213 58,4	8,0	11 47,7	8,7
23	164 52,9	9 11,7	228 25,4	8,1	11 39,0	8,7
24	179 53,0	N 9 12,7	242 52,5	8,0	S 11 30,3	8,9
	1/2 Diam. = 16,0	d = 0,9	1/2 Diam. = 16,1		Age = 23,6	

Exemple à partir des données de la dispositive précédente

Distance lunaire calculée à l'heure ronde inférieure (7h TU) : 74°47.7'

Distance lunaire calculée à l'heure ronde supérieure (9h TU) : 73°42.1'

Distance lunaire mesurée à une heure inconnue (que l'on cherche à déterminer) : 74°12.3’

On voit donc que l'écart entre les 2 distances calculées, mesurées à 2h d'écart est de 74°47.7' – 73°42.1' = 1°5.6’

alors que l'écart entre la distance mesurée et la distance calculée pour 7h est de : 74°47.7' – 74°12.3' = 35.4'

Pour calculer l'heure à laquelle la mesure a été faite, on effectue la règle de trois : 2h / 1°5.6' x 35.4' = 1h 4min 45.37s
La mesure a donc été prise 1h 4min 45.37s après 7h, soit à 8h 4min 45.37s.

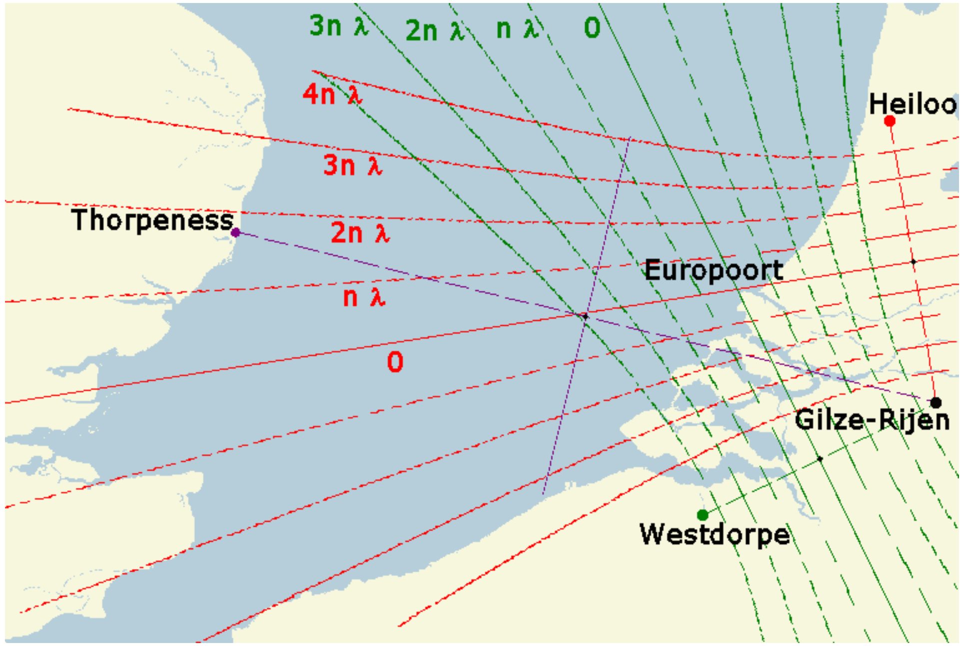
Pour ajuster la montre du bord, il suffit d'ajouter le temps donné par le chronomètre (déclenché à l'instant de la mesure) à ces 8h 4min 45 sec pour avoir l'heure "exacte"...

http://navastro.free.fr/distances_lunaires.htm

Plus tard mais avant le GPS

Dès 1902 la TSF arrive sur les bateaux. En plus des données météo elle permettra d’envoyer des « tops » pour mettre à l’heure les horloges de bord.

La radiogoniométrie permettre de se positionner pour la navigation côtière par rapport à des amers radio.



Exemple du maillage DECCA en mer du Nord.

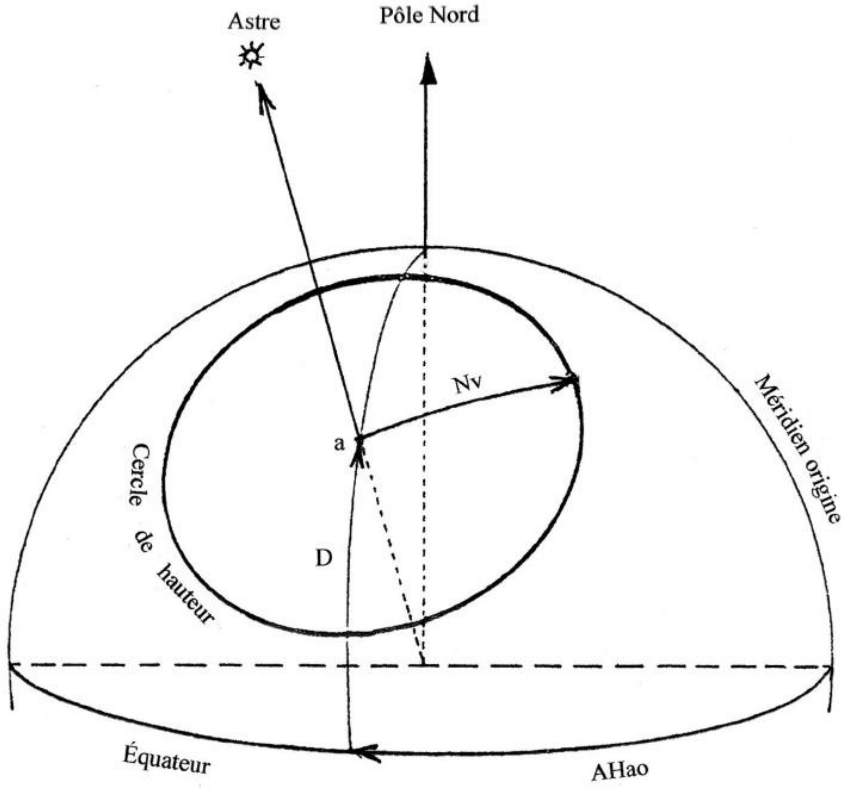
Portée de 400km à 800km dans de bonnes conditions de propagation du signal radio. Fréquence de 100KHz.
Le système a été abandonné en 2000 avec l’arrivée du système satellitaire GPS

Un préliminaire important avant de continuer: Les cônes de hauteur

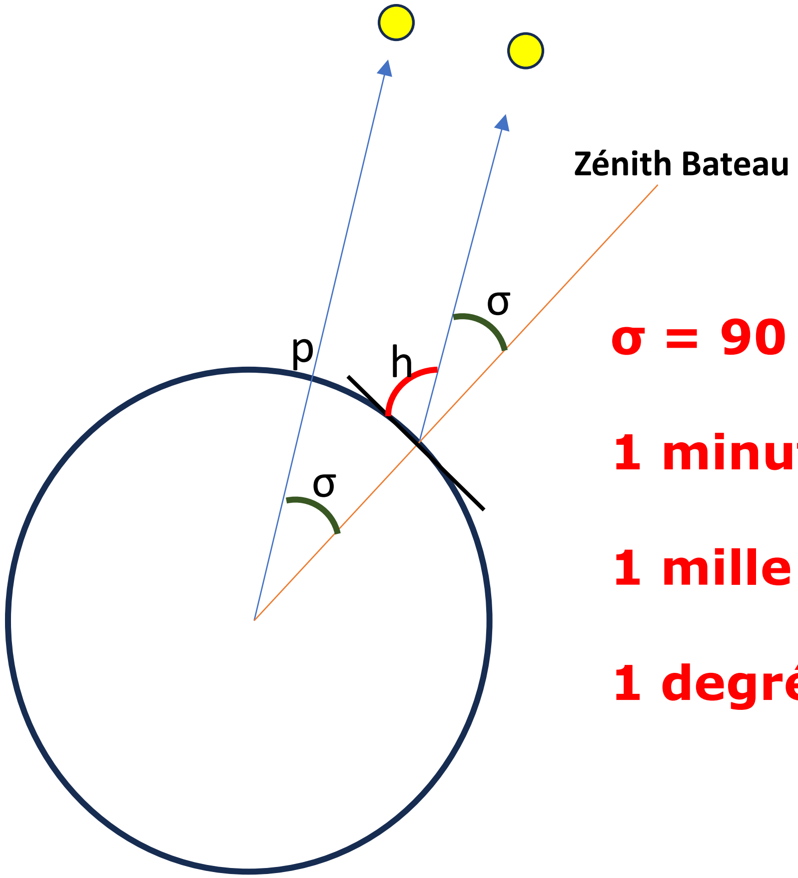
Le point astronomique généralise la méthode de la méridienne, il consiste à déterminer une "droite de hauteur" suivant le principe suivant :

A un instant donné, l'ensemble des points d'où l'on voit le Soleil ou un autre astre sous un angle "h" donné est un grand cercle tracé sur la terre.

Le grand cercle est la base d'un cône dont l'axe va de l'astre au centre de la terre, et dont le rayon est donné par l'ensemble des points qui ont une même mesure de hauteur de l'astre



Détermination de la distance du navire au pied de l'astre dont on connait la hauteur



σ = 90 – h

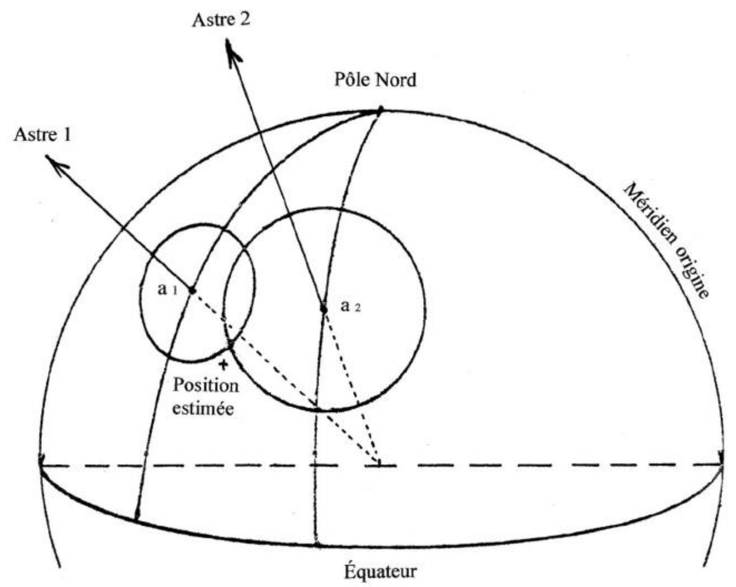
1 minutes d'angle correspond à 1 mille nautique

1 mille nautique = 1852 m

1 degré = 60 milles nautiques = 60 * 1852 m = 111,120 Km

Un exemple : si h= 50° on a σ = 90 – 50 = 40° → 40°= 40 x 60 =2400' → 2400 x 1852 = 4 444,800 Km
Il est possible de faire le calcul à l'envers: connaissant la distance théorique du navire au pied de l'astre, on peut connaitre l'angle sous lequel l'astre se trouve au-dessus de l'horizon du navire.

Théoriquement en effectuent la mesure de hauteur sur 2 astres distincts on devrait se localiser en se rapprochant de la position estimée.



Avec une mesure sur 3 astres, l'ambiguïté serait levée.

Cette méthode est irréalisable car elle nécessiterait des cartes géantes ou des globes énormes.
Il faudrait un globe de presque 7m pour avoir 1 mm qui représenterait 1 mille marin

Principe de la **Droite de Hauteur** pour la détermination de la longitude et de la latitude

Méthode mise au point en 1875 par Marcq Saint Hilaire
(1832 – 1889)

Amiral Saint-Hilaire.

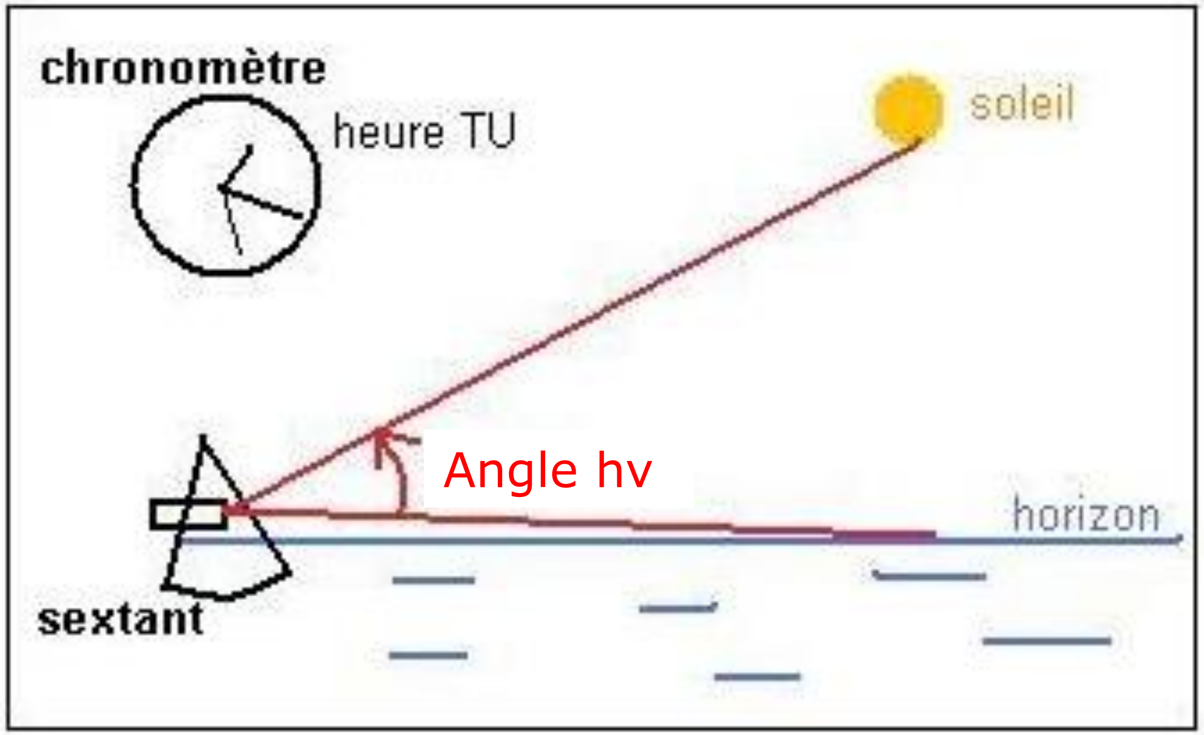
Les prérequis de la méthode

Connaitre sa position estimée **Pe** : longitude estimée φe et latitude estimée λe grâce:

- A la position précédente mesurée
- En tenant compte du déplacement du bateau vitesse et cap (navigation à l'estime)

Connaissance précise de l'heure **TU.** (les horloges de marines de grande précision existaient dans la marine depuis fin du 18 ème siècle)

Etape 1: l'observation



Elle consiste à mesurer avec précision 2 paramètres:

L'angle hv (hauteur vrai) qui est la hauteur de l'astre sur l'horizon corrigé de la hauteur de l'œil, de la réfraction et de l'erreur de collimation (erreur mécanique du sextant.)

Pour la Lune et le soleil ne pas oublier le demi-diamètre !

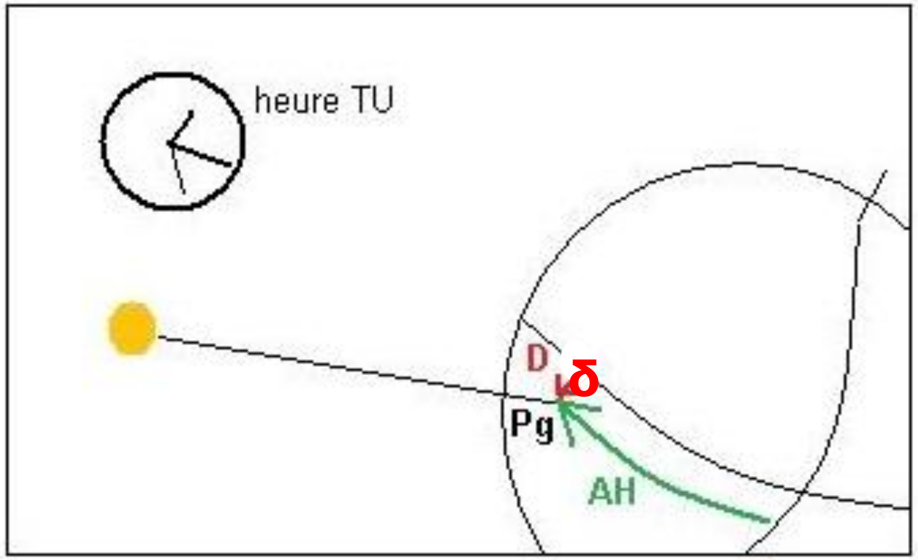
T = L'heure TU précise de l'observation

Etape 2: les calculs

En prenant en compte les données des tables de marines ou éphémérides, on calcule avec précision la position de l’astre pris en mesure .

Cette position donnera la **position Pg** du pied de l’astre sur la surface du globe

La position de Pg est constituée de :
La **déclinaison δ** qui est sa latitude
L’angle horaire H par rapport à Greenwich



Données éphémérides:

AHv0 = angle horaire à Greenwich

D = variation horaire de l'angle horaire

Δ = déclinaison

D = variation horaire de la déclinaison

T = Temps Universel de l'observation

On calcule:

L'angle horaire du pied de l'astre au navire

$$\mathbf{H = AHv0 + D \times T + \lambda e}$$

On calcule la déclinaison du pied de l'astre par rapport à l'équateur terrestre

$$\boldsymbol{\delta = \Delta + d \times T}$$

Exemple d'éphéméride du soleil.
Les tables marines en plus du soleil donnent les données pour la Lune, les planètes visibles à l'œil nu et une trentaine d'étoiles les plus brillantes

Éphémérides du Soleil 2020

novembre 2020		Déclinaison à 0h U.T **Δ**			d	AHv0 à 0h U.T.		D	T.Pass. U.T.			Lever U.T.		Coucher U.T.	
		°	'		'	°	'	°	h	m	s	h	m	h	m
1	D	14	30,2	S	0.8	184	06,4	15.000	11	43	34	06	50	16	36
2	L	14	49,2	S	0.8	184	06,7	15.000	11	43	33	06	52	16	35
3	M	15	08,0	S	0.8	184	06,8	15.000	11	43	33	06	54	16	33
4	M	15	26,5	S	0.8	184	06,7	15.000	11	43	34	06	55	16	31

La prochaine phase des calculs est de calculer la hauteur estimée **he** pour la position estimée.

En effet on a une position estimée du bateau et une position précise du pied de l'astre mesuré.

Il nous faut calculer quelle aurait dû être la hauteur de l'astre au moment de la mesure et la comparer à la mesure **h** faite au sextant.

$$he = asin((\sin \delta \times \sin \varphi e) + (\cos \delta \times \cos \varphi e \times \cos H))$$

δ = Déclinaison pied de l'astre
H = Angle horaire pied de l'astre
φe = Longitude estimée

on calcule la différence **i** entre **h** et **he** .

$$i = h - he$$

i s'appelle l'**intercept**

Si **i > 0** la position vraie du navire est plus près de l'astre que la position estimée

Si **i < 0** la position vraie du navire est plus éloignée de l'astre

Il nous reste à calculer l'azimut du pied de l'astre par rapport au navire dans sa position estimée.

$$Az = acos((\sin \delta - \sin \varphi e \times \sin he) / (\cos \varphi e \times \cos he))$$

δ = Déclinaison pied de l'astre
he = hauteur estimée
φe = Longitude estimée

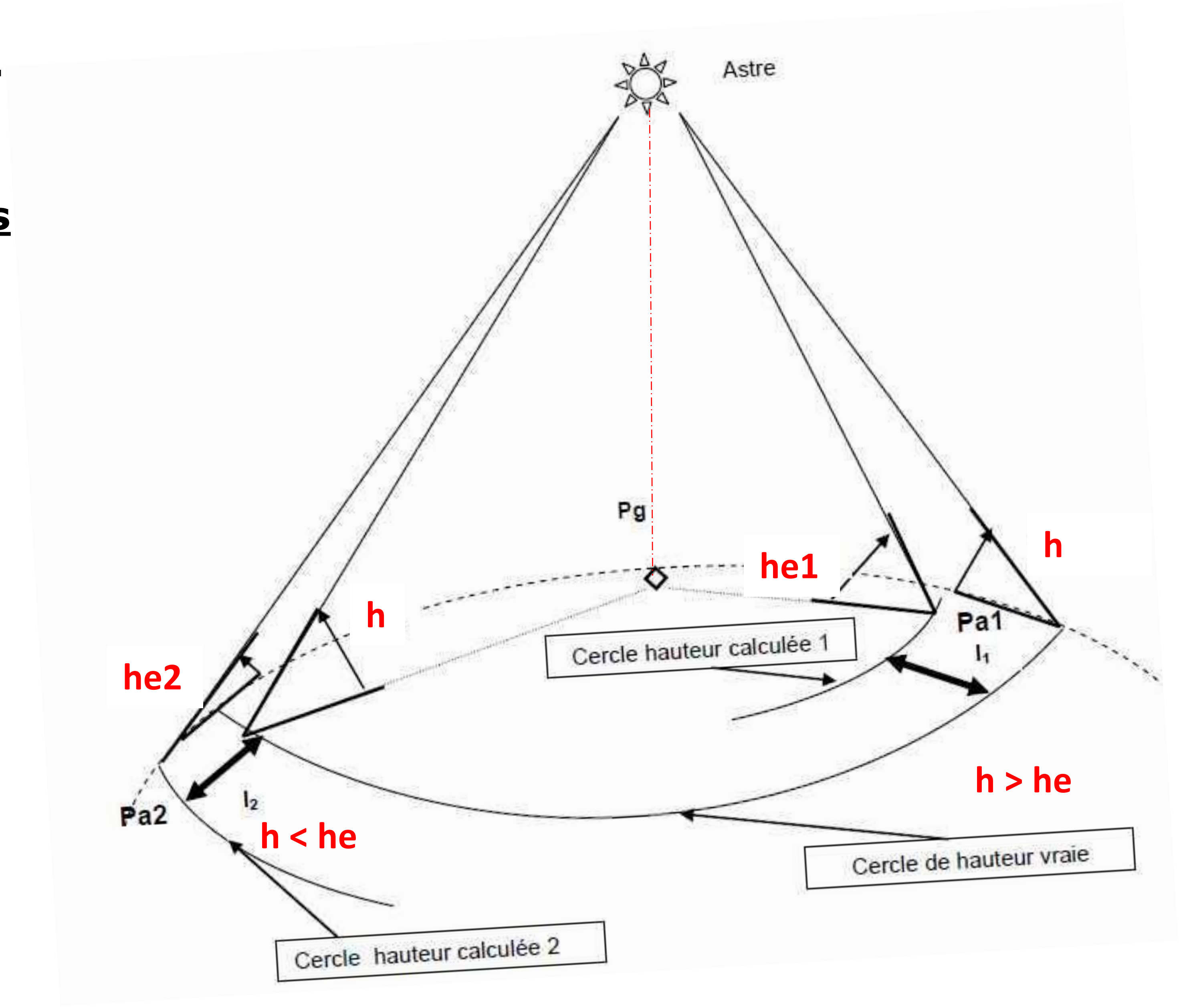
Le bateau est nécessairement sur le cercle correspondant à h

La figure présente les 2 situations possibles :

h > he
Cela implique que le navire est plus proche de Pg que prévu

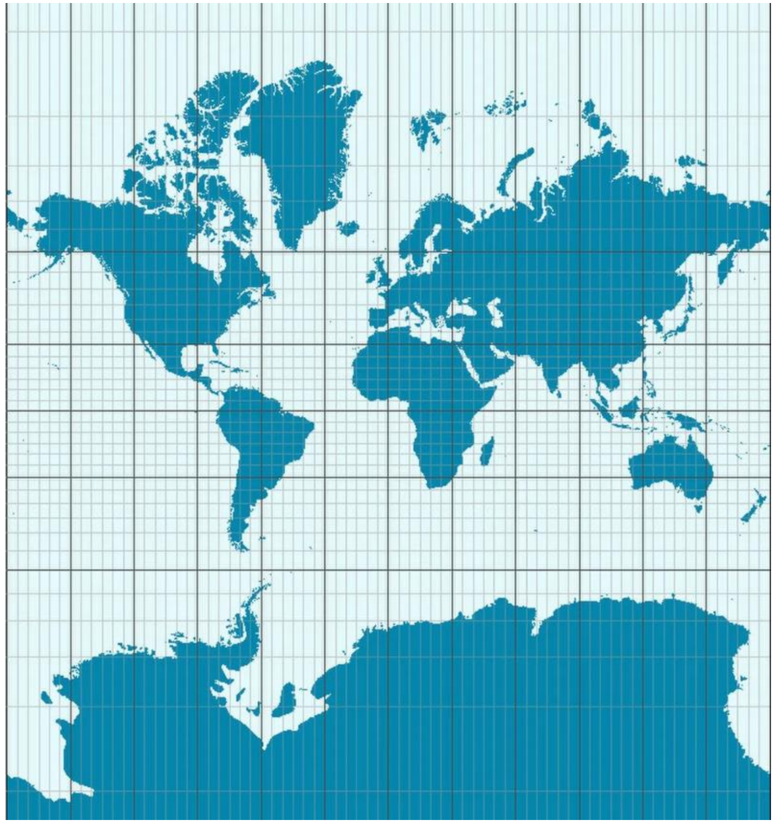
h < he
Cela implique que le navire est plus éloigné de Pg que prévu

La distance entre les 2 cercles de position s'appelle **l'intercept**



Le tracé sur une carte de Mercator

La particularité des cartes de Mercator est que tous les méridiens sont parallèles. Cela génère une déformation des parallèles qui ont sur la carte la même longueur. Leur espacement obéira à un écartement différent selon la latitude.



Sur cette carte les méridiens et les parallèles sont espacés de 30°
Plus on monte en latitude plus les zones de 30° x 30° s'allongent.
Cette déformation est due au fait que plus on s'approche des pôles les parallèles sont courts.
La longueur du parallèle à la latitude φ est plus petite d'un facteur cos(φ).
Parallèle à 45° = 40 000 x cos45° = 40 000 x 0,707 = 28 280 Km mais il fait toujours 360°…

L'intérêt de cette carte est de permettre de suivre une route à cap constant pour aller d'un point A à un point B définie par une droite.

La première difficulté est l’impossibilité d’avoir sur une même carte la position estimée Pe du navire et le point Pg sur une même carte

Pe et Pg peuvent être distants de plusieurs centaines ou milliers de kilomètres.

Plus **h** mesurée au sextant est petite (l’astre proche de l’horizon), plus la distance entre Pe et Pg est grande.

Exemple:

Pour h=30°   on a la distance entre Pe et Pg = 90°-30°= 60° soit 60 x 111,12 ≈ 6667 Km

Sachant que la distance entre Pg et le cercle de centre Pg où se trouve le navire est grande, nous allons considérer un tronçon du cercle **He** comme un tronçon de droite tangent.

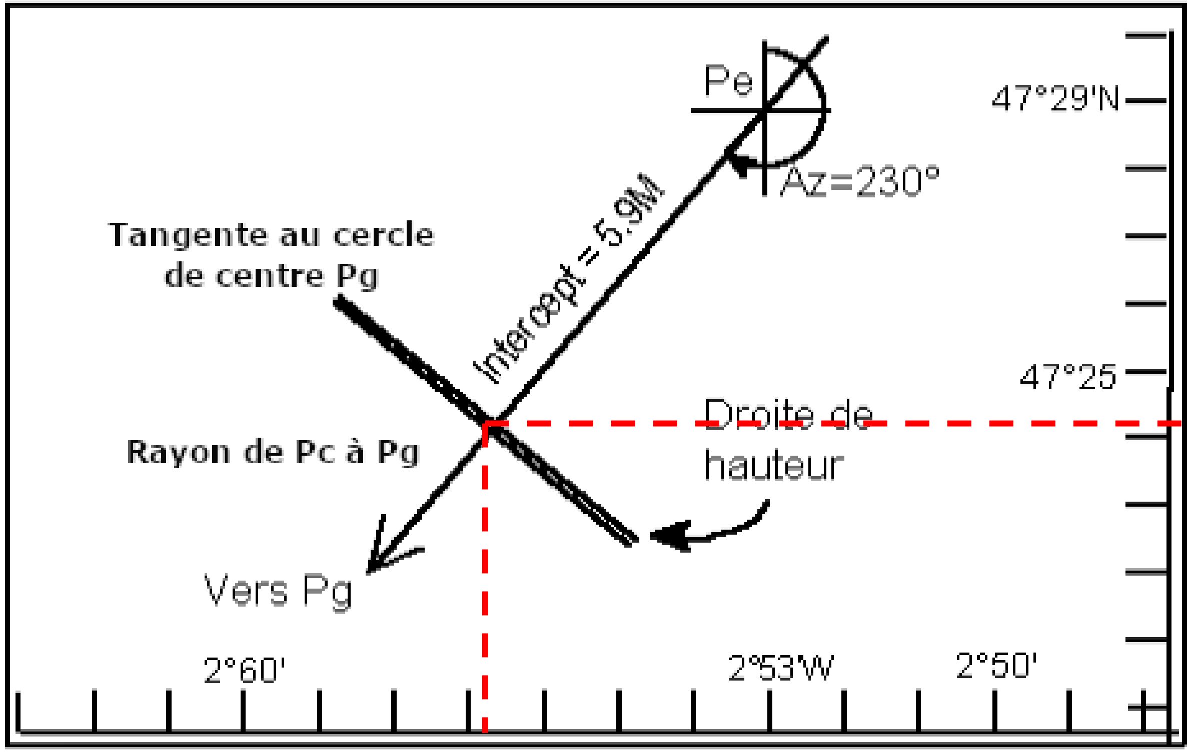
Sur la carte nous allons tracer **Pe**, la droite allant en direction de **Pg** car nous connaissons son azimut et ensuite l'intercept et la tangente au point d'intersection avec le cercle de **he**.

Le bateau sera sur la droite de tangence et très près de l'intersection avec la droite **Pe Pg**

La tangente au cercle de rayon he ou de hauteur vraie s'appelle droite de hauteur.

On peut lire sur la carte les coordonnées du navire :

Latitude = 47° 24,2' Nord
Longitude = 2° 56,8' Ouest



Pour augmenter la précision on fera les calculs en se servant de 2 astres différents.

On reportera sur la même carte les 2 intercepts et les 2 tangentes.

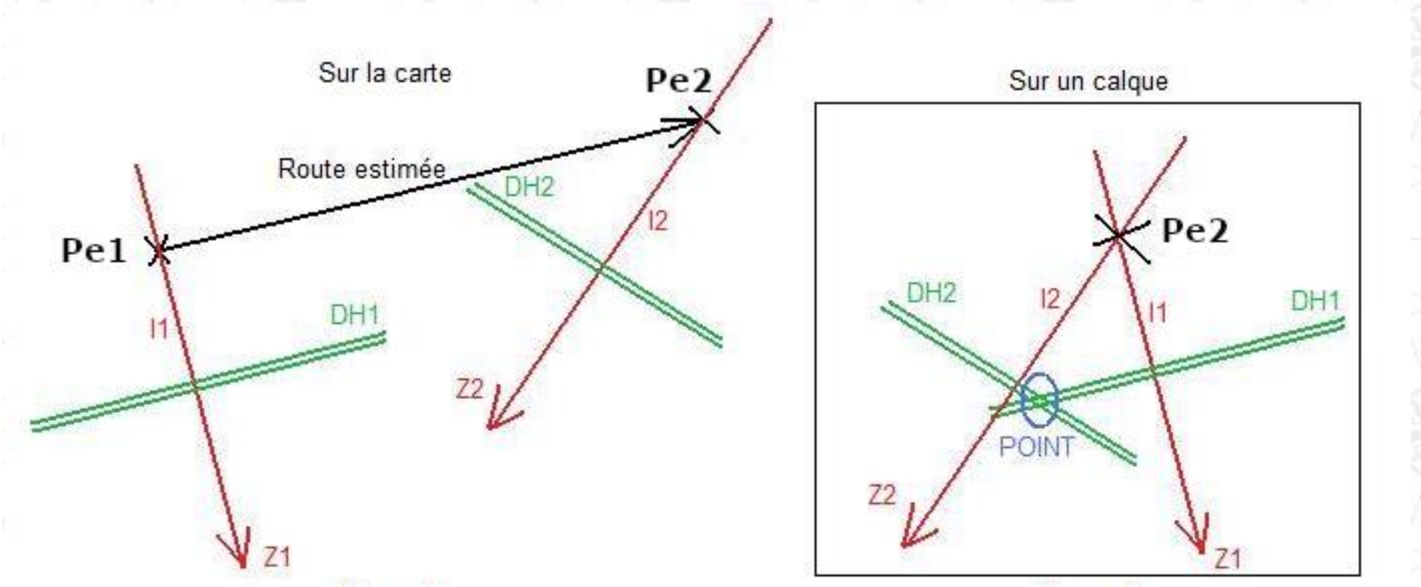
La position du navire sera exactement à l’intersection des 2 tangentes

Lorsque l’on travaille en utilisant 2 astres différents il faudra bien identifier les temps TU des 2 mesures. Reporter sur la même carte les intercepts et les droites de hauteurs.

Si l’intercept est trop grand parce que notre position estimée est trop éloignée de la position réelle, on pourra refaire les calculs en prenant une position estimée du navire plus proche de Pg.

Point fait par 2 mesures à des moments différents

- On fait une première mesure à partir d'une première position estimée Pe1
- On fait ensuite une deuxième mesure à partir d'une position estimée Pe2
- On reporte sur la carte les 2 droites de hauteur
- Par le moyen d'un calque on reporte le graphe de l'intercept de la position Pe1 sur celui de Pe2
- L'intersection des 2 droites de hauteurs donne une très bonne estimation du point au moment où la mesure de Pe2 a été faite.



Cette technique est celle utilisée et enseignée par les écoles de la marine française

Quelques remarques pour finir

Ces méthodes ont été utilisé jusqu'à la mise en service du premier réseau de satellites de navigation Transit en 1967

Beaucoup de variantes de la méthode de Marcq Saint Hilaire existent, mais toutes utilisent le même principe

Les systèmes GPS de positionnement par satellites ont pris la place de la navigation astronomique.

Dans les écoles de marine les méthodes astronomiques reviennent en force dans le cas où un conflit interdirait l'usage des satellites.

Utilisation du logiciel Navastro

http://olravet.fr/navastro.php

Avec les données exemples:

Late =47°25’

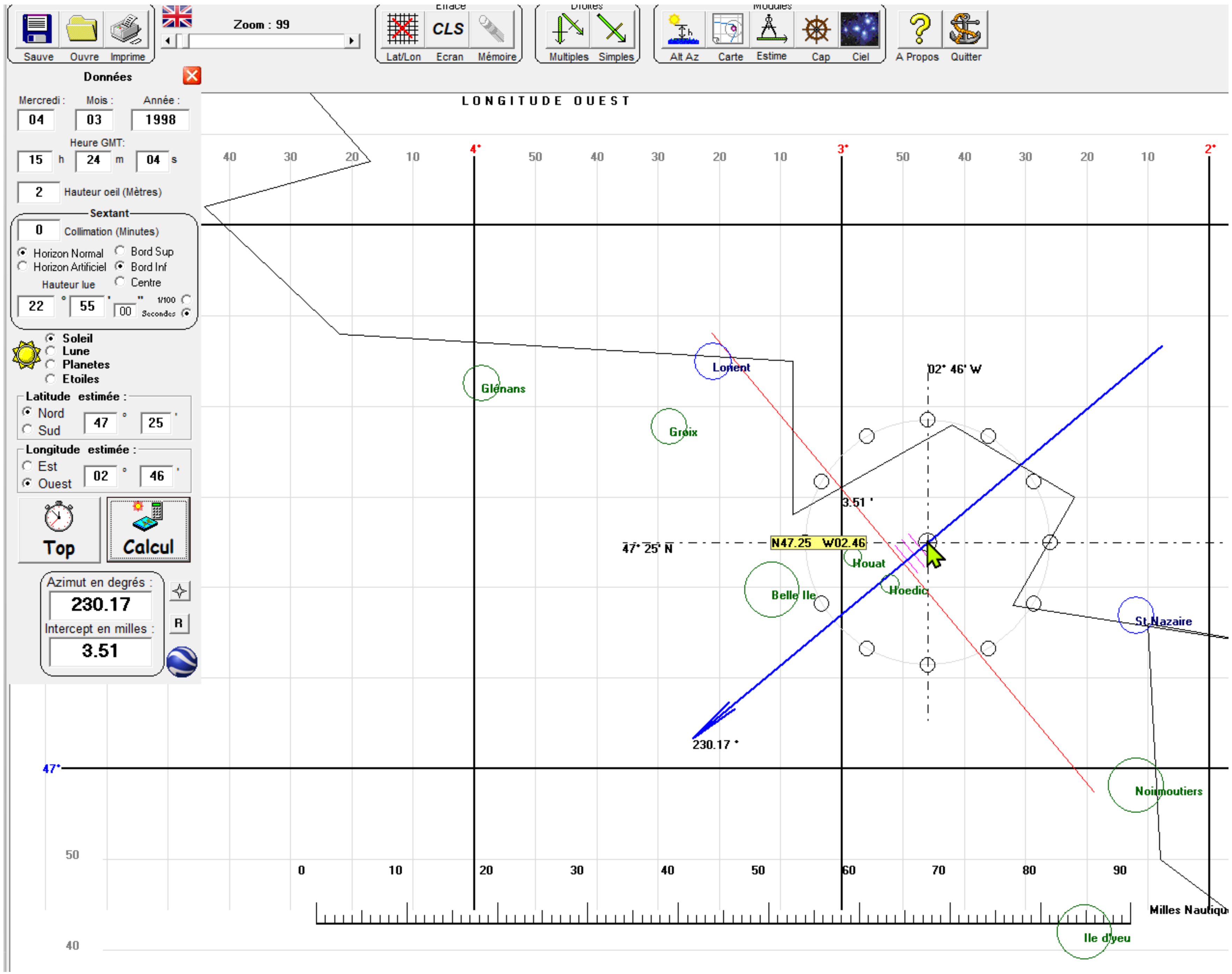
Longe=2°46’

Date: 4/03/1998

Heure: 15h 24’ 04’’

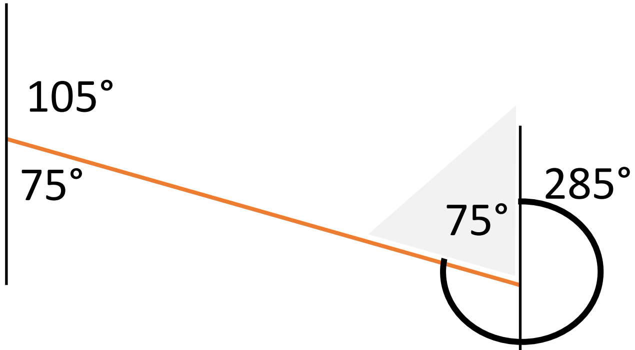
Hauteur des yeux: 2 m

Collimation : 0’ car le sextant est parfaitement réglé



Lien direct de Navastro vers Google Earth

Si on a un amer on pourra trouver exactement le point sur la droite de hauteur où l'on se trouve .
Par exemple:
Le phare du port de Quiberon est à l'azimut 285°



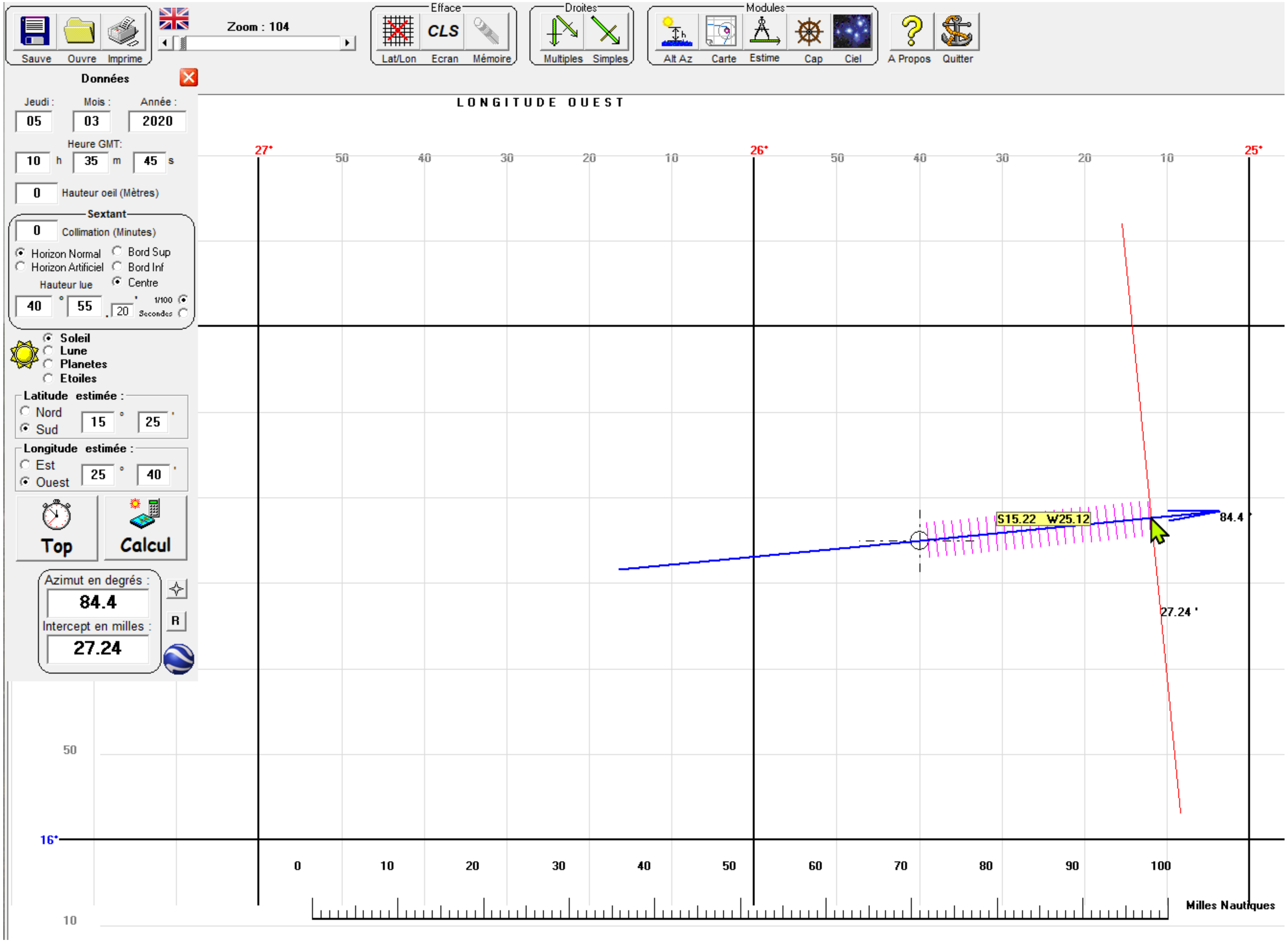
Il suffit depuis Quiberon de tracer sur la carte de Mercator une droite d'azimut 105°.
Le navire est à l'intersection des 2 droites

Autre exemple:

Date 05/03/2020
TU= 10h 35′ 45″

Late = -15°25′ Sud
Longe = -25°40′ Ouest
Hauteur mesurée 40° 55,2′
Aucune correction sextant
Mesure faite au centre du soleil

Azimut est 84,4°
L'intercept de 27.24′
Coordonnées réelles
Lat = 15°22′ Sud
Long = 25° 12′ Ouest



Même situation résolue par le calcul

mars 2020		Déclinaison à 0h U.T.	d	AHv0 à 0h U.T.	D
		° '	'	° '	°
1	D	07 29,5 S	1.0	176 54,8	15.002
2	L	07 06,6 S	1.0	176 57,8	15.002
3	M	06 43,6 S	1.0	177 00,9	15.002
4	M	06 20,5 S	1.0	177 04,2	15.002
5	J	05 57,4 S	1.0	177 07,5	15.002

Observation au sextant du Soleil le 05/03/2020:

h = 40°55,2′ soit 40,92°

T = 10h 35min 45 s UTC soit 10,5958 h

Position estimée:

φe = -15° 25′ = -15,4167°

λe = - 25° 40′ = - 25,6667°

Données des éphémérides:

AHv0 = 177,125°

D = 15,002°/h

Δ = -5,9567°

d = 0,1′/h

1) Calculer l'angle horaire local à T :

H = AHv0 + D x T + λe

= 177,125 + 15,002 x 10,5958 - 25,6667 = 310,4165°

2)Calculer la déclinaison à T :

δ = Δ + d x T

= -5,9567 + 0,1/60 x 10,5958 = -5,9390 °

3) Calculer la hauteur estimée he pour la position estimée

$he = \text{asin}\,((\sin \delta \times \sin \varphi e) + (\cos \delta \times \cos \varphi e \times \cos H))$

$= \text{asin}\,((\sin(-5{,}939) \times \sin(-15{,}4167) + \cos(-5{,}939) \times \cos(-15{,}4167) \times \cos(310{,}4165))$

$= 40{,}4784° = 40°\ 28{,}7'$

4) Calculer l'intercept i

$i = h - he$

$= 40°\ 55{,}2' - 40°\ 28{,}7' = +\ 26{,}5'$

(si i > 0, l'interception se fait vers l'astre)

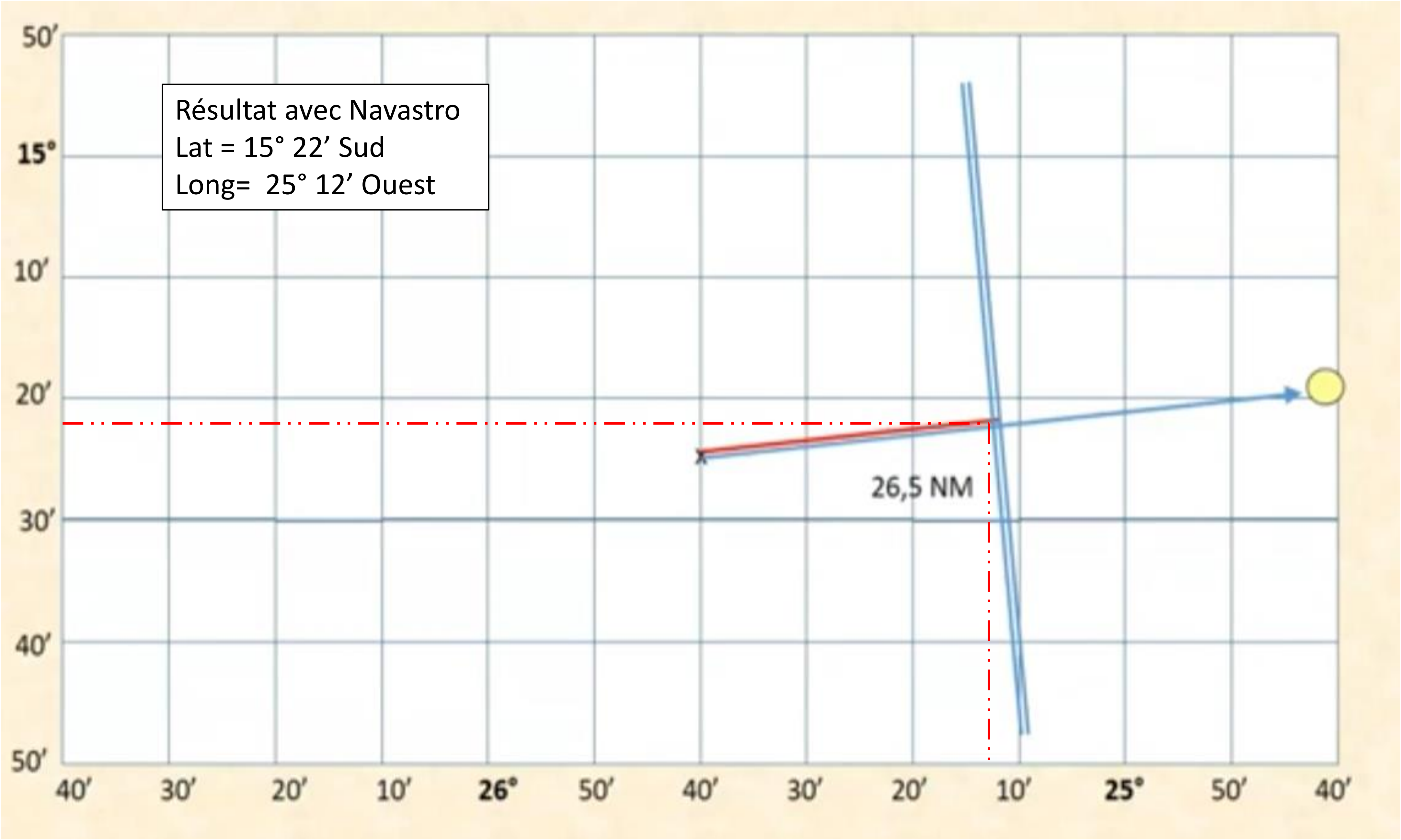
L'interception avec le cercle de hauteur será de 26,5 NM vers le Soleil.

5) Calculer l'azimut Az

$Az = \text{acos}\,((\sin \delta - \sin \varphi e \times \sin he) / (\cos \varphi e \times \cos he))$

$= \text{acos}((\sin(-5{,}939) - \sin(-15{,}4167) \times \sin(40{,}4784)) / (\cos(-15{,}4167) \times \cos(40{,}4784))$

$= 84{,}6°$


Résultat avec Navastro
Lat = 15° 22’ Sud
Long= 25° 12’ Ouest
26,5 NM
50’
15°
10’
20’
30’
40’
50’
40’
30’
20’
10’
26°
50’
40’
30’
20’
10’
25°
50’
40’

Publication de l'IMCCE

Éphémérides nautiques

Ces éphémérides, à l'usage des navigateurs, sont publiées par le Bureau des longitudes depuis 1889.

Elles donnent les déclinaisons et angles horaires de Vénus, Mars, Jupiter et Saturne (heure par heure, au dixième de minute près). Elles donnent aussi les heures de levers et couchers du Soleil et de la Lune pour les latitudes comprises entre 70 degrés Nord et 56 degrés Sud.

Traditionnellement utilisées par les marins pour faire le point en mer, elles sont obligatoires pour les navires professionnels et hautement recommandées pour la plaisance.

- Voir la table des matières

Quelques sources :

Le livre: L'histoire du point astronomique en mer de Jean-José Ségéric

Les sites:

https://abbadia.imcce.fr/doc/abrege-de-navigation-astronomique.pdf

https://navastro.fr et http://navastro.free.fr/index.html

https://www.marinbreton.com/navigation/la-navigation-astronomique

https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Navigation-astronomique.html

https://phyanim.sciences.univ-nantes.fr/Soleil/Lieu/sextantF.php

Des vidéos:

La droite de hauteur:

https://www.youtube.com/watch?v=-u6z-IHpftc

https://www.youtube.com/watch?v=SrzaUm40tBY

https://www.youtube.com/watch?v=uWTZVJzd1X0

La méridienne:

https://www.youtube.com/watch?v=o7kwZDwsWbI

Logiciel Navastro (gratuit): http://olravet.fr/navastro.php

FIN