



La navigation astronomique

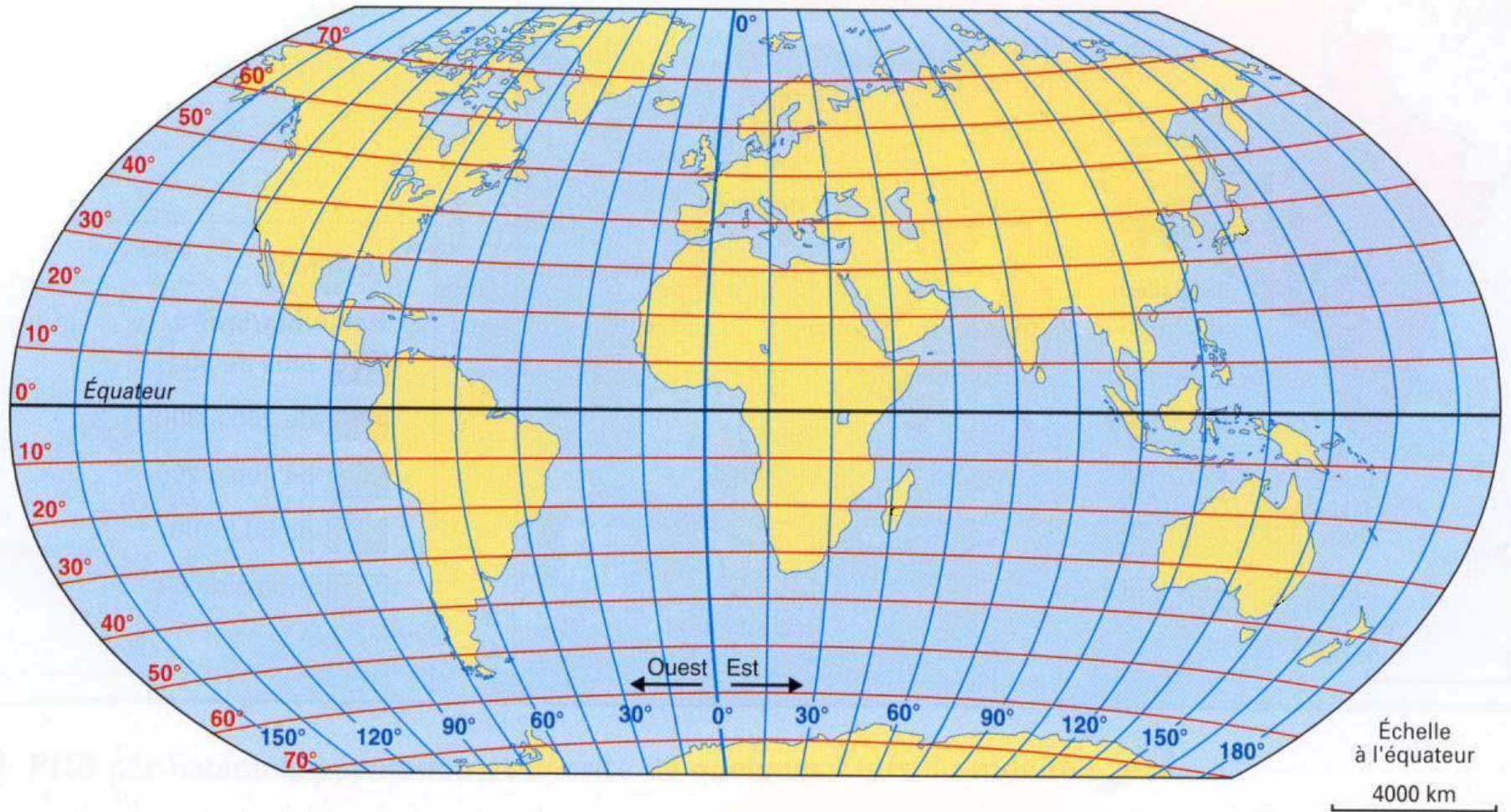
Comment cartographier la Terre à l'aide de l'astrométrie?

J.E. Arlot et N. Rambaux
IMCCE et UPMC

La navigation

- Les problèmes liés à la navigation:
 - Savoir où on se trouve en mer
 - Savoir tracer sa route à travers l'océan
- Savoir où on se trouve = savoir déterminer sa longitude et sa latitude à tout instant

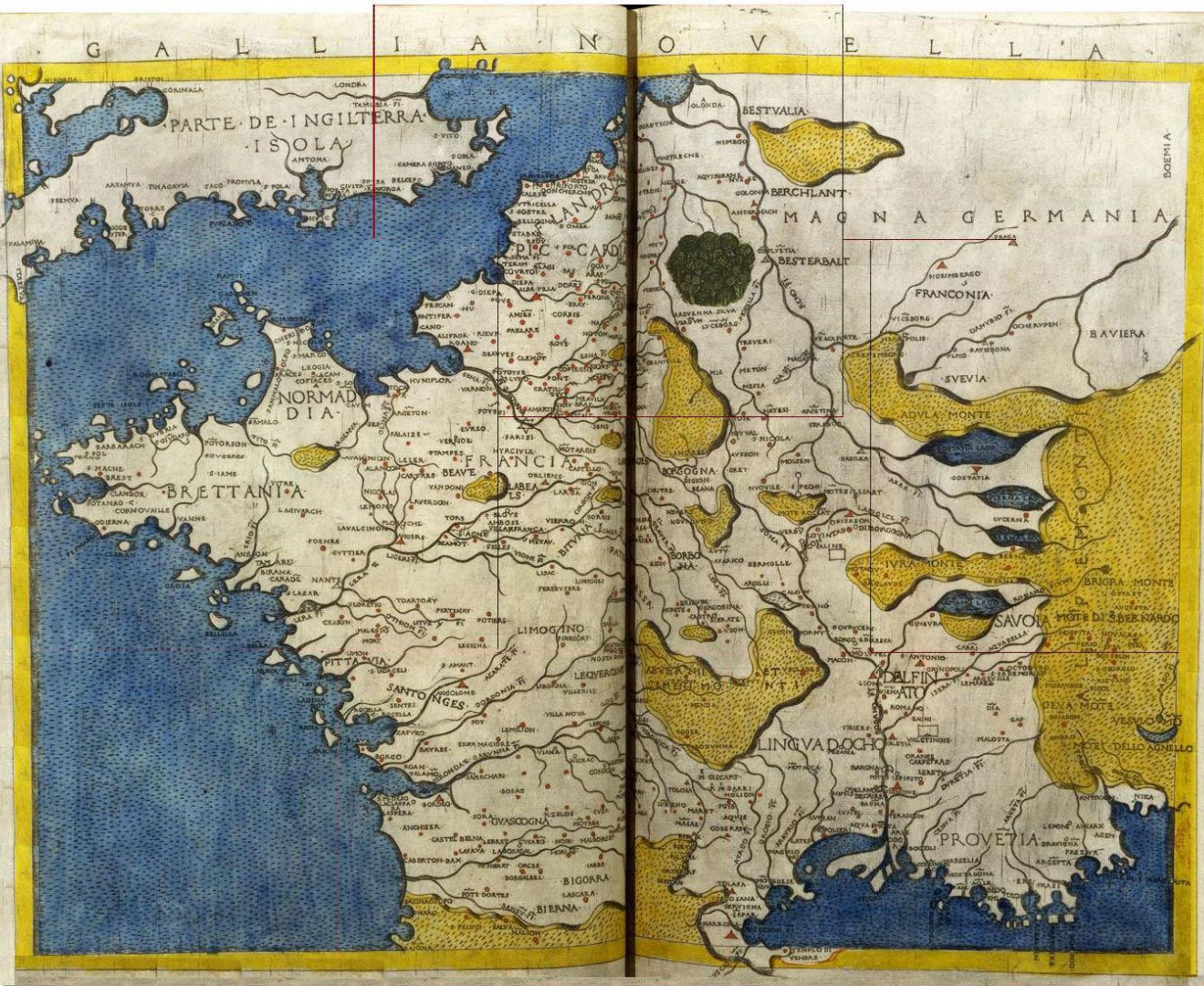
Se repérer sur Terre



longitude et latitude

Le problème de la longitude

- La latitude est simple à déterminer: mesurer la hauteur de l'étoile polaire ou faire une observation de passage d'un astre connu
- La longitude, c'est beaucoup plus compliqué!
- Y-a-t-il une relation entre les étoiles du ciel et les lieux sur Terre?
 - Oui mais elle dépend du temps (d'un temps universel identique pour tous les observateurs-cf. le temps sidéral local des astronomes)



La cartographie est restée très imprécise jusqu'au XVIIème siècle

Le problème de la détermination des longitudes a été résolu par les astronomes: comparer les heures solaires de deux lieux différents

Le problème des longitudes

- Le Soleil culmine à midi local
- Le midi local varie d'un lieu à un autre en fonction de la longitude
 - S'il est midi à Paris, il sera plus tard plus à l'est et plus tôt plus à l'ouest, donc plus tôt à Hendaye
 - La différence, c'est la longitude, c'est proportionnel au temps qu'il faut à la Terre pour tourner et amener le Soleil au point culminant
- Le problème des longitudes se résume à: quel heure est-il à Paris quand il est midi local à Hendaye
- Et donc à disposer d'un temps « universel » accessible en tout lieu

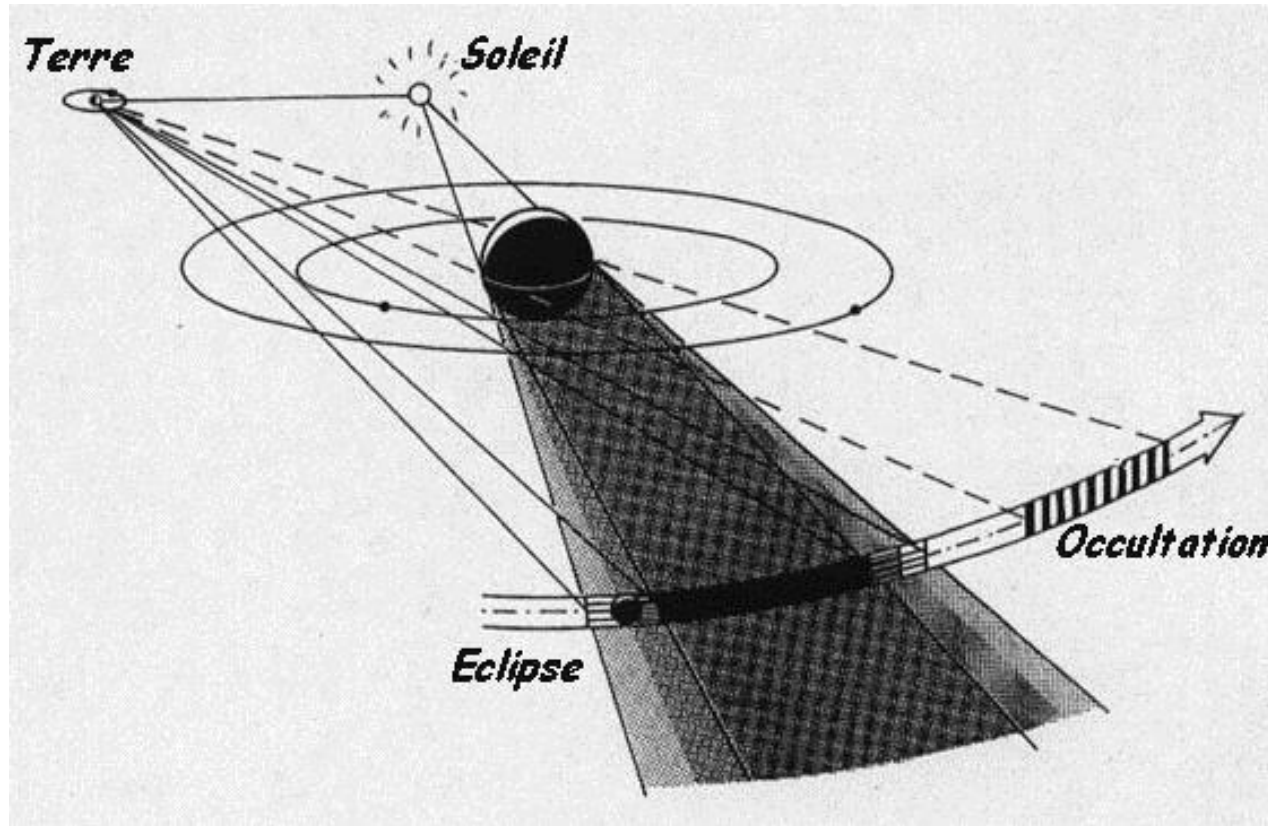
Le problème des longitudes

- Comment disposer d'un temps « universel » accessible partout?
- Comment savoir qu'on est au même instant dans deux lieux éloignés?

Le problème des longitudes

- Pour savoir qu'on est au même instant il suffit de voir le même phénomène astronomique depuis deux lieux différents:
 - Une éclipse de Lune
 - Une éclipse d'un satellite de Jupiter
 - Le passage d'une étoile près de la Lune
- On sait alors que l'on est au même instant

Les éclipses des satellites galiléens



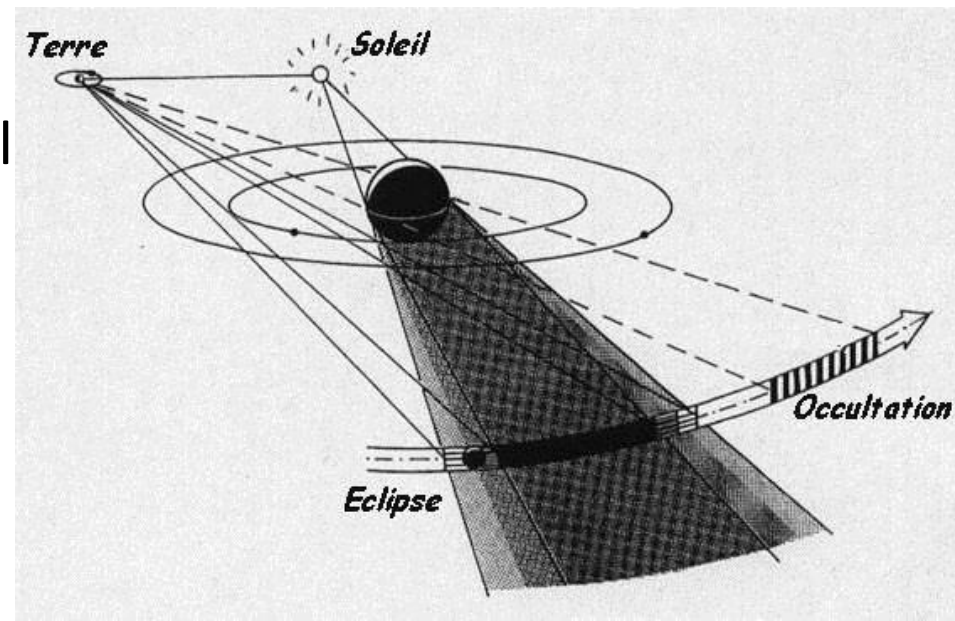
- Les trois premiers satellites sont éclipsés à chaque révolution autour de Jupiter
- La première éclipse est observée par Galilée en 1612
- Les observations du XVII^{ème} siècle sont précises mais mal datées (Temps solaire vrai → TU → TT)







- Galilée entrevoit la possibilité de déterminer les longitudes géographiques grâce aux satellites de Jupiter avant même d'avoir vu une éclipse et essaie de vendre le principe à la cour d'Espagne!
- Les éclipses régulières sont une véritable horloge universelle visible par tous en tous lieux, bien plus intéressantes que les éclipses de Lune rares et imprécises
- Il y a deux utilisations des satellites
 - Le géographe
 - Le voyageur




On trouve par le moyen des immersions & émerfions des satellites de Jupiter, les longitudes géographiques avec beaucoup plus de précision que par les éclipses de Lune.

Pour trouver ces longitudes, on observera en différens lieux de la Terre la même immersion ou la même émerfion, & l'on comparera le temps vrai auquel ces observations ont été faites en divers lieux. La différence en heures, minutes & secondes sera celle des Méridiens, qui sera orientale à l'égard d'un lieu proposé, lorsque l'observation sera arrivée plus tôt en ce lieu, & occidentale lorsqu'elle sera arrivée plus tard. Si l'on réduit ce temps en degrés & minutes par la Table, *page 139*, on aura la différence de longitude en degrés & minutes entre les lieux où les observations auront été faites.

Pour trouver la longitude d'un lieu quelconque de la Terre, il suffit d'observer quelque immersion ou émerfion; on compare le temps vrai de l'observation avec l'heure & la minute de la même immersion ou émerfion calculée pour Paris: la différence des temps réduite en degrés, minutes & secondes sera la différence entre le Méridien de ce lieu & le Méridien de Paris.

Mais on ne doit attendre une précision suffisante de cette dernière méthode, que par rapport au premier satellite de Jupiter, les Éclipses des trois autres Satellites ne pouvant pas encore se prédire avec autant de précision.


OBSERVATIONS
DE QUELQUES ECLIPSES
 DES
SATELLITES DE JUPITER

Faites en même temps en divers lieux l'An 1703.

Immersion du premier Satellite dans l'ombre de Jupiter le 28 Aoust.

A Paris par une Lunete de 18 pieds à	11 ^h 55' 24''
A Bologne en Italie par une Lunete de 10 pieds, Par M. Manfredi.	12 31 28

Difference des Meridiens entre Paris & Bologne.	36
---	----

Immersion du premier Satellite le 28. Aoust.

A Lyon, Par les RR. PP. Taillandier & Combes Jesuites.	12 4 54
A Bologne.	12 31 28

Difference des Meridiens entre Lyon & Bologne.	26 34
--	-------

A Paris.	12 55 24
----------	----------

Difference des Meridiens entre Paris & Lyon.	9 30
--	------

Par les Observations de l'Année 1702. rapportées dans la Connoissance des Temps de la même Année.

Difference des Meridiens entre Paris & Bologne, par l'Observation du 9. Aoust.	37 51
--	-------

Par celle du 13 Aoust.	35 10
------------------------	-------

Par celle du 14. Aoust.	35 43
-------------------------	-------

Par celle du 16. Aoust.	35 47
-------------------------	-------

Par celle du 24. Aoust.	35 34
-------------------------	-------

Par celle de cette Année. 1703.	36 4
---------------------------------	------

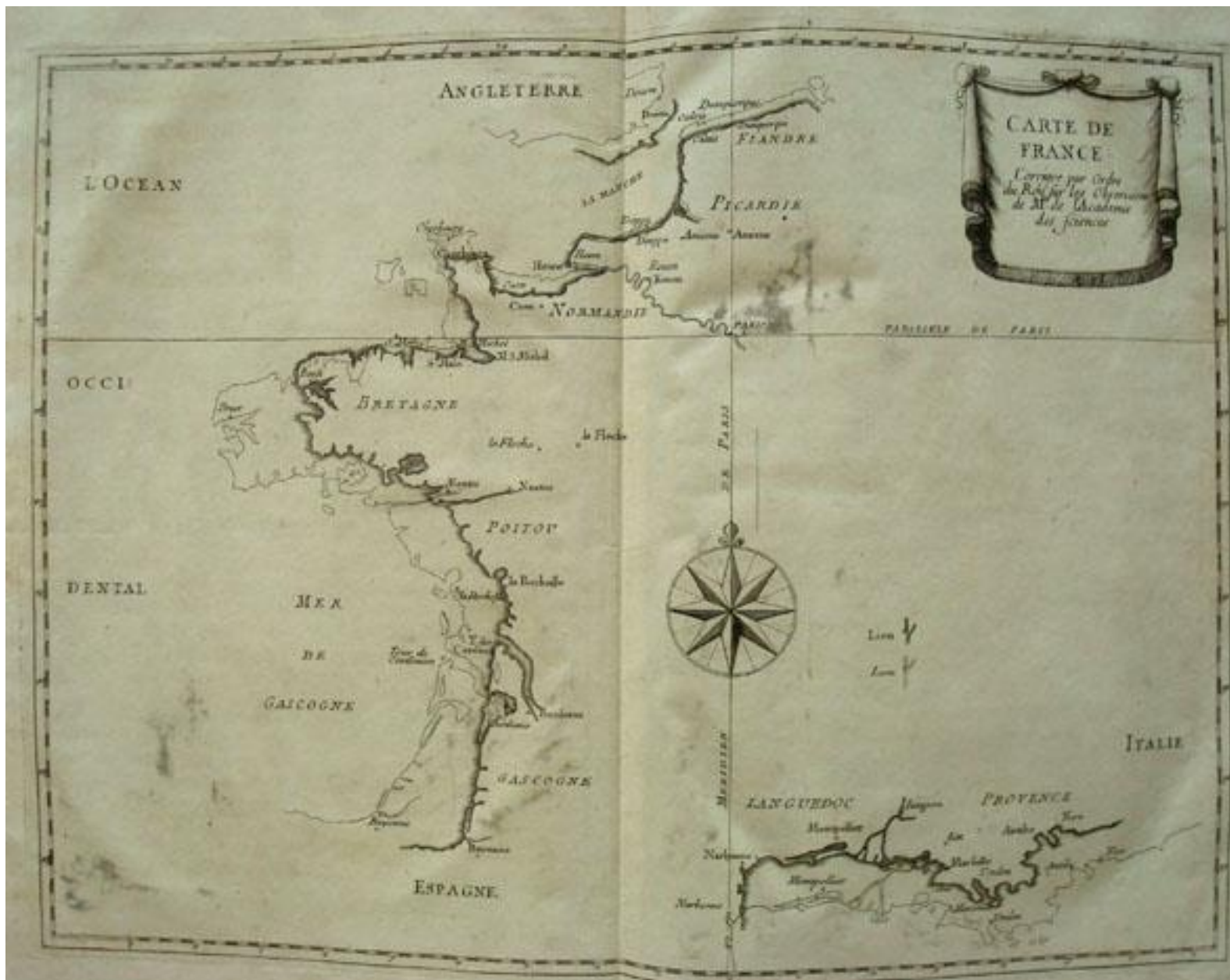
Cette dernière difference est comme moyenne entre les extrêmes tirées des Observations des Années precedentes.

TABLE DES IMMERSIONS
ET DES EMERSIONS
DU PREMIER SATELLITE DE JUPITER,
Pour l'Année 1714.

Janvier.			Fevrier.			Avril.		
Emerions.			Emerions.			Immersions.		
Jou.	He.	Minu.	Jou.	He.	Minu.	Jou.	He.	Minu.
1	5	14 So.	7	9	9 So.	10	5	56 So.
3	11	42 M.	9	3	38 So.	12	0	25 So.
5	6	10 M.	11	10	6 M.	14	6	55 M.
7	0	38 M.	13	4	35 M.	16	1	24 M.
8	7	6 So.	14	11	4 So.	17	7	53 So.
10	1	34 So.	16	5	33 So.	19	2	22 So.
12	8	2 M.	18	0	2 So.	21	8	51 M.
14	2	30 M.	20	6	31 M.	23	3	20 M.
15	8	59 So.	22	1	0 M.	24	9	49 So.
17	3	27 So.	23	7	29 So.	26	4	18 So.
19	9	55 M.				28	10	47 M.
21	4	24 M.				30	5	15 M.
22	10	52 So.						
24	5	20 So.						
26	11	50 M.						
28	6	17 M.						
30	0	46 M.						
31	7	15 So.						
Fevrier.			Mars.			May.		
2	1	43 So.	Le 16 ☽☼⊙ à 5 heures 1 minute du soir.			1	11	44 So.
4	8	12 M.	Depuis la conjonction de Jupiter avec le Soleil jusqu'à son opposition, on a marqué les Immersions du premier Satellite de Jupiter.			3	6	13 So.
6	2	40 M.				5	0	42 So.
						7	7	11 M.
						9	1	39 M.
						10	8	8 So.
						12	2	37 So.
						14	9	5 M.
						16	3	34 M.

May.			Juillet.			Août.		
Immersions.			Immersions.			Immersions.		
Jou.	He.	Minu.	Jou.	He.	Minu.	Jou.	He.	Minu.
17	10	2 So.	1	3	48 M.	19	5	8 So.
19	4	31 So.	2	10	17 So.	21	11	37 M.
21	10	59 M.	4	4	45 So.	23	6	6 M.
23	5	28 M.	6	11	13 M.	25	0	35 M.
24	11	56 So.	8	5	41 M.	26	7	3 So.
26	6	25 So.	10	0	10 M.	28	1	33 So.
28	0	53 So.	11	6	37 So.	30	8	2 M.
30	7	21 M.	13	1	6 So.			
			15	7	34 M.			
			17	2	3 M.			
			18	8	31 So.			
			20	3	0 So.	Septembre.		
			22	9	28 M.	1	2	31 M.
			24	3	57 M.	2	8	59 So.
			25	10	25 So.	4	3	27 So.
			17	4	54 So.	6	9	58 M.
			29	11	22 M.	8	4	28 M.
			31	5	51 M.	9	10	57 So.
Juin.						11	5	26 So.
1	1	49 M.	22	9	28 M.	13	11	56 M.
2	8	18 So.	24	3	57 M.	15	6	25 M.
4	2	46 So.	25	10	25 So.	17	0	54 M.
6	9	14 M.	17	4	54 So.	18	7	24 So.
8	3	42 M.	29	11	22 M.	20	1	53 So.
9	10	11 So.	31	5	51 M.	22	8	22 M.
11	4	39 So.				24	2	51 M.
13	11	7 M.	Août.			25	9	21 So.
15	5	35 M.	2	0	19 M.	27	3	50 So.
17	0	3 M.	3	6	48 So.	29	10	19 M.
18	6	31 So.	5	1	17 So.			
20	1	0 So.	7	7	46 M.			
22	7	30 M.	9	2	14 M.			
24	1	56 M.	10	8	43 So.			
25	8	24 So.	12	3	12 So.			
27	2	52 So.	14	9	41 M.			
29	9	20 M.	16	4	10 M.			
			17	10	39 So.			

- Carte de France de Cassini



Et en mer?



Faire le point en mer

- Plus difficile car le pont d'un bateau ne permet pas des observations astronomiques facile
- Il faut donc:
 - Disposer d'un temps universel
 - Connaître les positions des étoiles pour faire le lien entre les étoiles visibles et la position de l'observateur sur Terre, c'est-à-dire avoir avec soi des éphémérides pré-calculées.

Faire le point en mer

- Impossible d'observer les satellites de Jupiter depuis le pont d'un navire
- Difficile d'attendre la prochaine éclipse de Lune pour savoir où on est!
- ➔ Trouver un phénomène astronomique observable depuis le pont d'un navire.
- ➔ Construire une horloge mécanique qui ne se décale pas trop!

Faire le point en mer

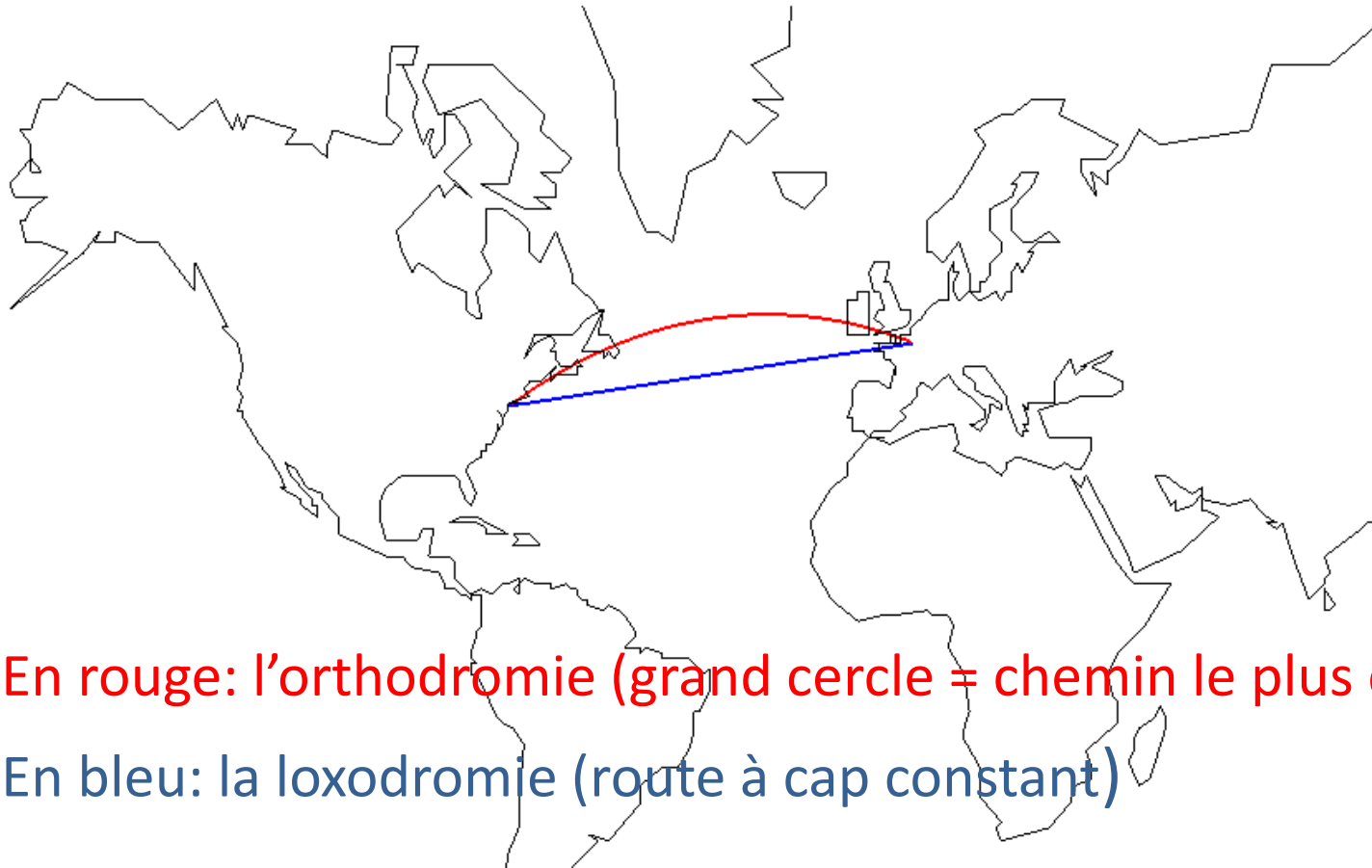
- Astronomiquement, la longitude est égale à la différence des angles horaires d'un même astre dans le lieu où l'on se trouve et sur le méridien d'origine des longitudes.
- L'angle horaire d'un astre dans un lieu à un instant donné est relativement facile à déterminer, même avec des instruments rudimentaires, mais il faut connaître pour ce même instant l'angle horaire au méridien d'origine.

La navigation à l'estime

- Peut-on naviguer sans mesurer sa longitude?
- La navigation à l'estime consiste à déduire la position d'un navire de sa route et de la distance parcourue depuis sa dernière position connue.
- Cette méthode repose sur les instruments mesurant son cap (compas), sa vitesse (loch, tachymètre,...) et le temps (chronomètre, jour).

La navigation à l'estime

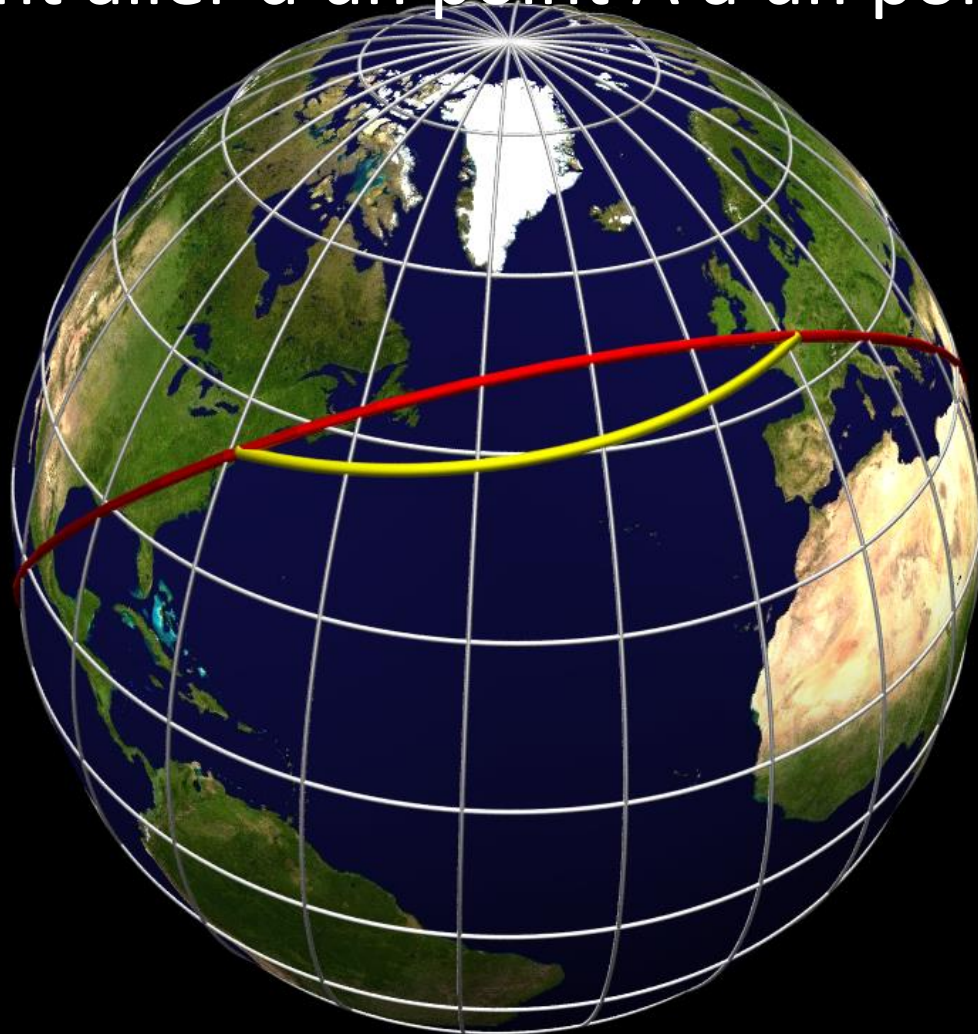
- Comment aller d'un point A à un point B?



- En rouge: l'orthodromie (grand cercle = chemin le plus court)
- En bleu: la loxodromie (route à cap constant)

La navigation à l'estime

- Comment aller d'un point A à un point B?

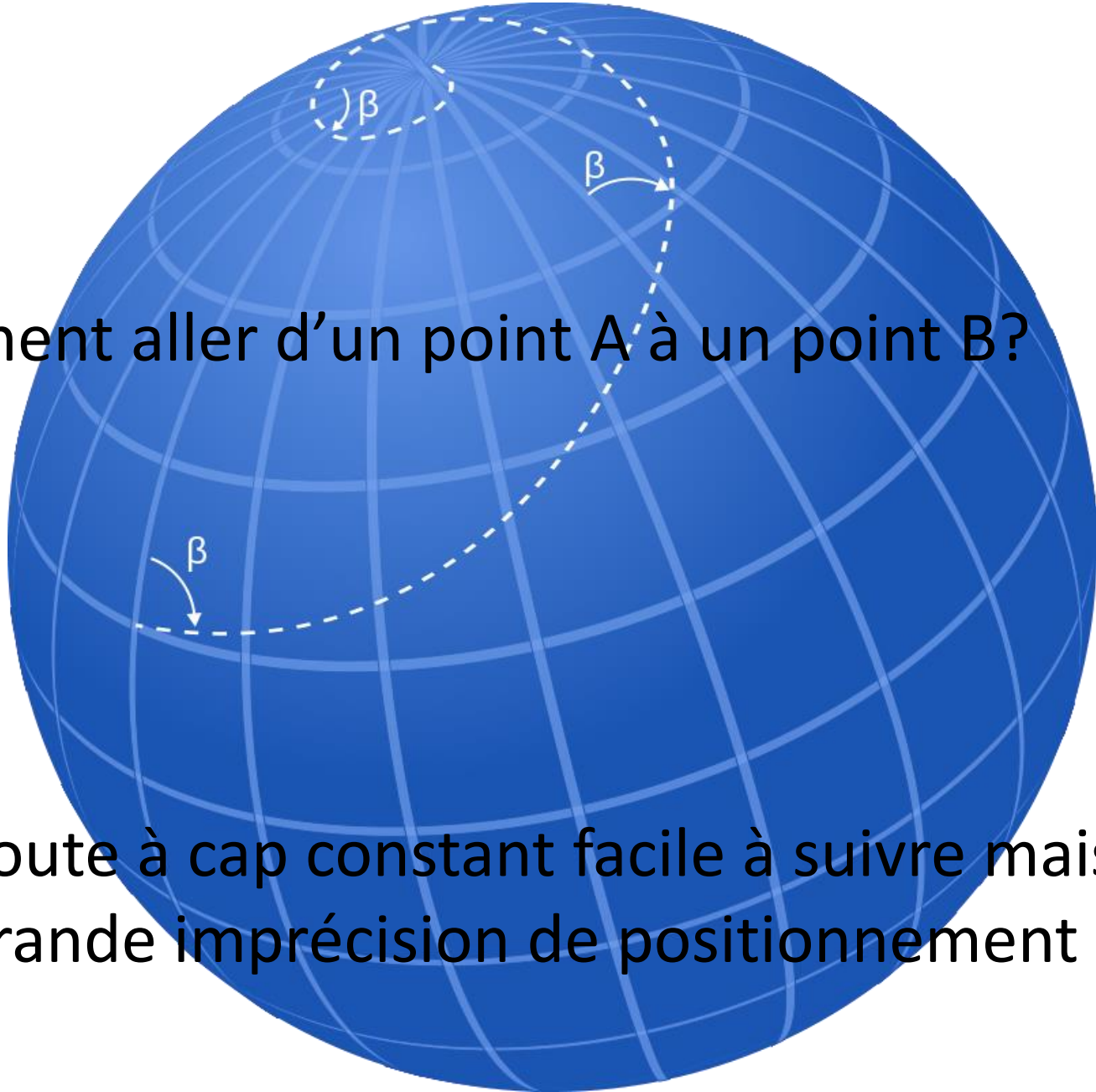


- En rouge: l'orthodromie (grand cercle = chemin le plus court)
- En bleu: la loxodromie (route à cap constant)

La navigation à l'estime

- Comment aller d'un point A à un point B?

- Une route à cap constant facile à suivre mais une grande imprécision de positionnement



La navigation astronomique

Rappel

- Il faut:
 - Disposer d'un temps universel
 - Connaître les positions des étoiles pour faire le lien entre les étoiles visibles et la position de l'observateur sur Terre, c'est-à-dire avoir avec soi des éphémérides pré-calculées.

La navigation astronomique

Pour garder le temps universel avec soi, quels phénomènes prédictibles dans les éphémérides pouvait-on utiliser?

- L'observation d'une éclipse dont les différentes phases sont repérées en heures du méridien de Paris, dans les éphémérides; ce phénomène est trop peu fréquent.
- L'observation d'une occultation d'étoile par La Lune (phénomène rare) ou d'une conjonction étoile/Lune (phénomène imprécis).
- L'utilisation de l'éclairement et de l'obscurcissement des taches de la Lune durant les progrès de la lunaison (imprécis).
- L'observation des éclipses des satellites de Jupiter (phénomène fréquent mais difficile à observer)
- Le mouvement d'une tache de Jupiter dont on avait reconnu qu'elle achevait son tour en neuf heures (phénomène continu mais difficile à observer et imprécis).

La navigation astronomique

- On a donc besoin:
 - **D'un garde-temps fiable**
 - D'une lunette utilisable sur un bateau
 - D'éphémérides précises
- Garde-temps:
 - sabliers de 24 heures
 - clepsydres à eau et à mercure
 - horloges à balancier
 - un phénomène astronomique observable en mer dont on connaît l'heure avec précision

Distances lunaires

- Jusque vers la fin du premier tiers du XIX^e siècle, la méthode des distances lunaires l'a emporté sur la méthode chronométrique car les montres imparfaites demandaient un contrôle permanent par les observations astronomiques. L'observation et le calcul d'une distance lunaire sont des opérations longues et délicates, et la confiance que l'on peut accorder à des résultats obtenus avec des observations médiocres ne peut pas être très grande.
- La méthode n'était pas à n'importe quel moment utilisable puisqu'il était nécessaire que la Lune soit levée et à plus de deux ou trois jours de la nouvelle lune. Dans ces conditions, sur des navires à grande vitesse, la méthode aurait été déficiente.

Distances lunaires

- On utilise le fait que la Lune se déplace très rapidement dans le ciel par rapport aux étoiles, au Soleil et aux planètes.
- La distance entre la Lune et un astre se calcule grâce aux éphémérides pour une date en Temps Universel



Distances lunaires

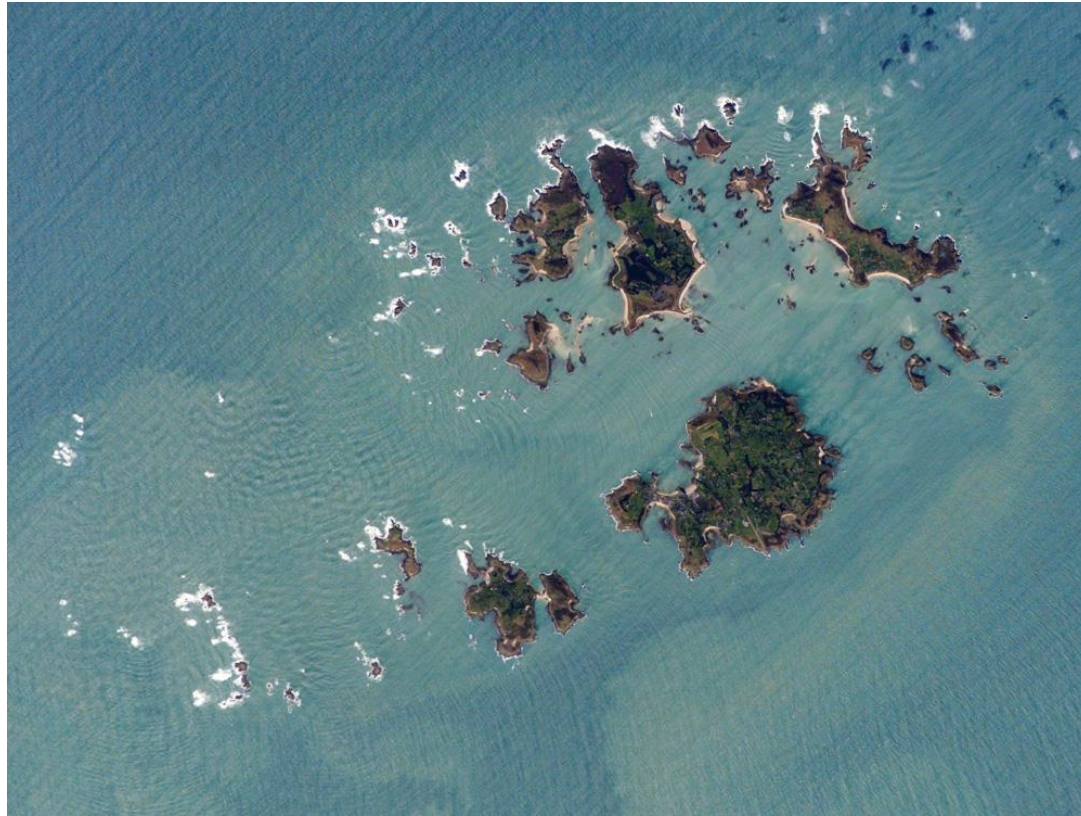
Exemple de calcul:

- Distance lunaire calculée à l'heure ronde inférieure (7h TU) : $74^{\circ}47.7'$
- Distance lunaire calculée à l'heure ronde supérieure (9h TU) : $73^{\circ}42.1'$
- Distance lunaire mesurée à une heure à déterminer : $74^{\circ}12.3'$
- On voit donc que l'écart entre les 2 distances calculées, mesurées à 2h d'écart est de $74^{\circ}47.7' - 73^{\circ}42.1' = 1^{\circ}5.6'$
- alors que l'écart entre la distance mesurée et la distance calculée pour 7h est de : $74^{\circ}47.7' - 74^{\circ}12.3' = 35.4'$
- Pour calculer l'heure à laquelle la mesure a été faite, on effectue la règle de trois :
 $2h / 1^{\circ}5.6' \times 35.4' = 1h\ 4min\ 45.37s$
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"...

La navigation astronomique

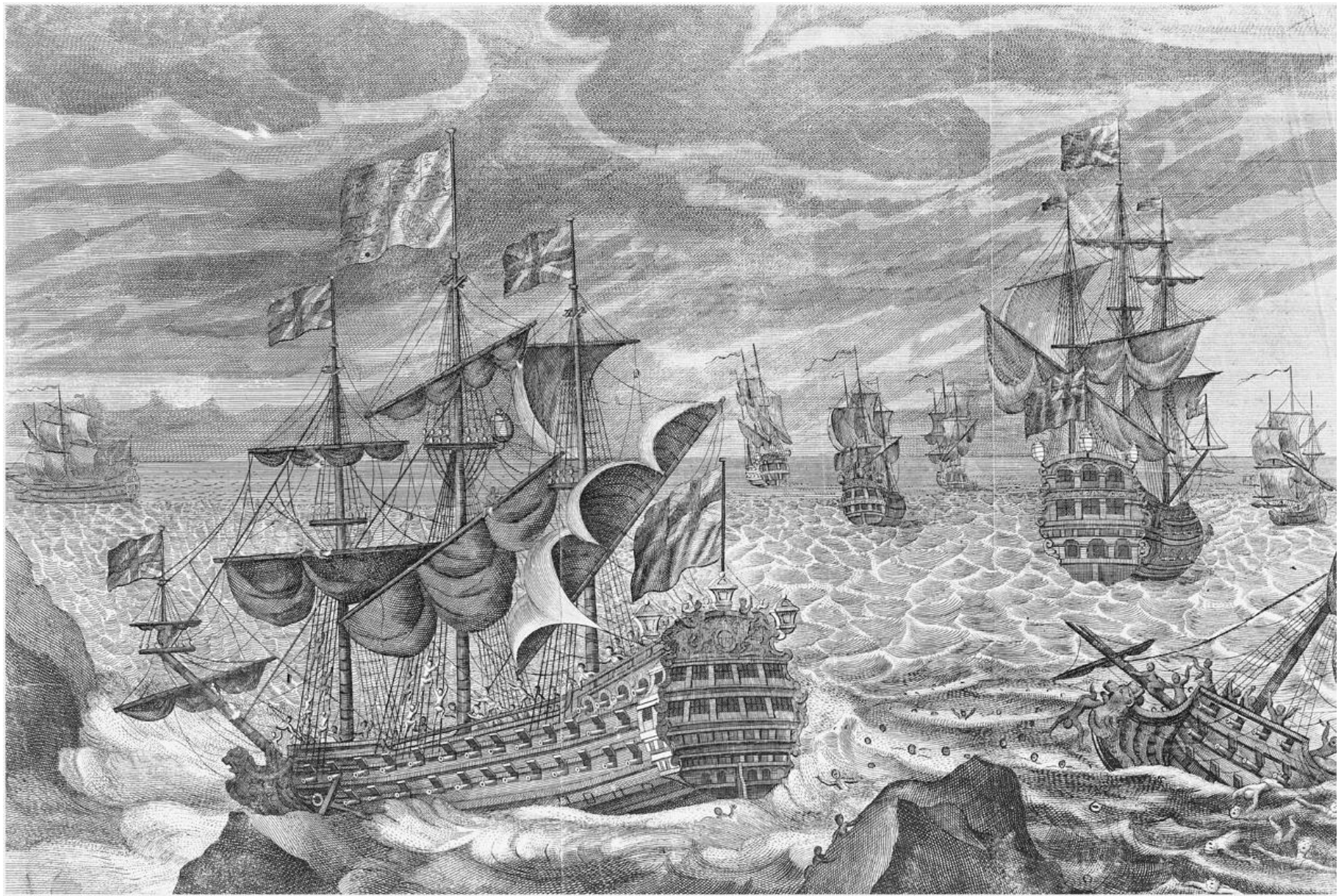
- On a donc besoin:
 - **D'un garde-temps fiable**
 - D'une lunette utilisable sur un bateau
 - D'éphémérides précises
- Garde-temps:
 - Chronomètre + distances lunaires
 - Méthode imprécise
 - ➔ Concours pour la détermination de la longitude (le Parlement britannique vote le *Longitude Act* en 1714, offrant une récompense de 20 000 livres à qui trouverait une solution acceptable au problème de la longitude en mer et créa un « Board of longitudes » dans ce but

Le naufrage des îles Scilly



Le désastre naval du 22 octobre 1707: naufrage de la flotte anglaise au large des îles Scilly. Avec quatre vaisseaux de ligne et plus de 1 400 marins perdus en raison du mauvais temps et de l'incapacité des navigateurs d'alors de calculer précisément leur position.

Le naufrage des îles Scilly



Le naufrage des îles Scilly



La navigation astronomique

- On a donc besoin:
 - **D'un garde-temps fiable**
 - D'une lunette utilisable sur un bateau
 - D'éphémérides précises
- Garde-temps:
 - Chronomètre + distances lunaires
 - Méthode imprécise
 - ➔ Concours pour la détermination de la longitude (le Parlement britannique vote le *Longitude Act* en 1714, offrant une récompense de 20 000 livres à qui trouverait une solution acceptable au problème de la longitude en mer et créa un « Board of longitudes » dans ce but)

Chronomètres

- Horloge d'Harrison gagne le prix en 1773 (précision de 15km là où les distances lunaires donne 50km pour une traversée transatlantique)

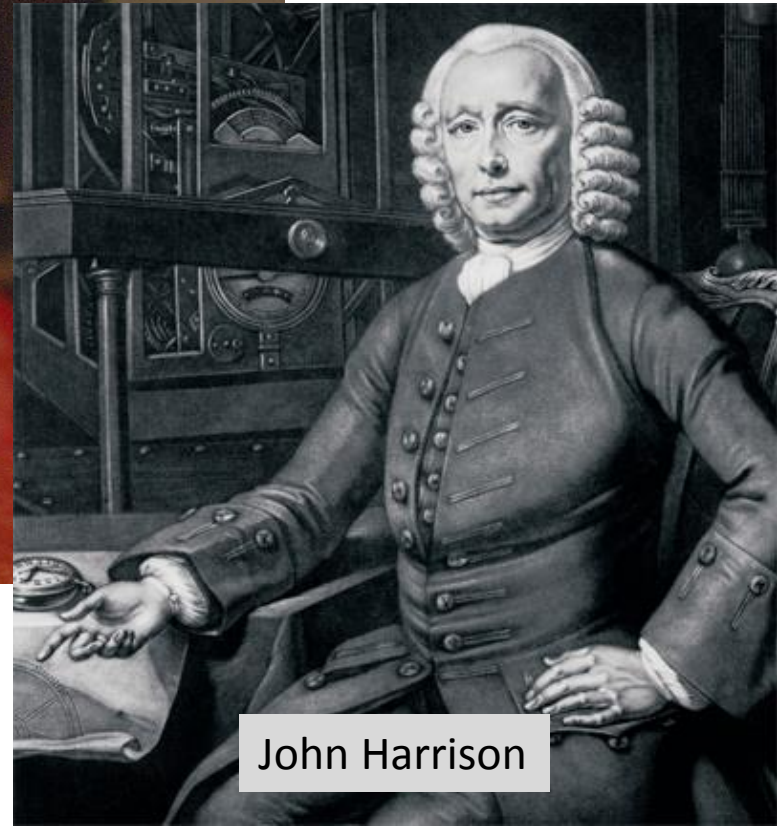


Chronomètres

- Horloge d'Harrison gagne le prix en 1773 (précision de 15km là où les distances lunaires donne 50km pour une traversée transatlantique)



(décalage inférieur à la minute de temps)



John Harrison

La navigation astronomique

- On a donc besoin:
 - D'un garde-temps fiable
 - **D'une lunette utilisable sur un bateau**
 - D'éphémérides précises
- Lunette de mesure
 - l'arbalestrille ou bâton de Jacob →
 - Le « quartier anglais », apparu vers 1600, constituait un notable progrès
 - construction en 1731 de l'octant, à double réflexion, d'Hadley, qui a servi de base aux sextants modernes,
 - Avec la création de l'octant devait débuter l'ère des "distances lunaires", étape importante vers une solution satisfaisante du problème des longitudes
 - Le sextant

Octant = 1/8 de cercle pour mesurer des angles jusqu'à 90°

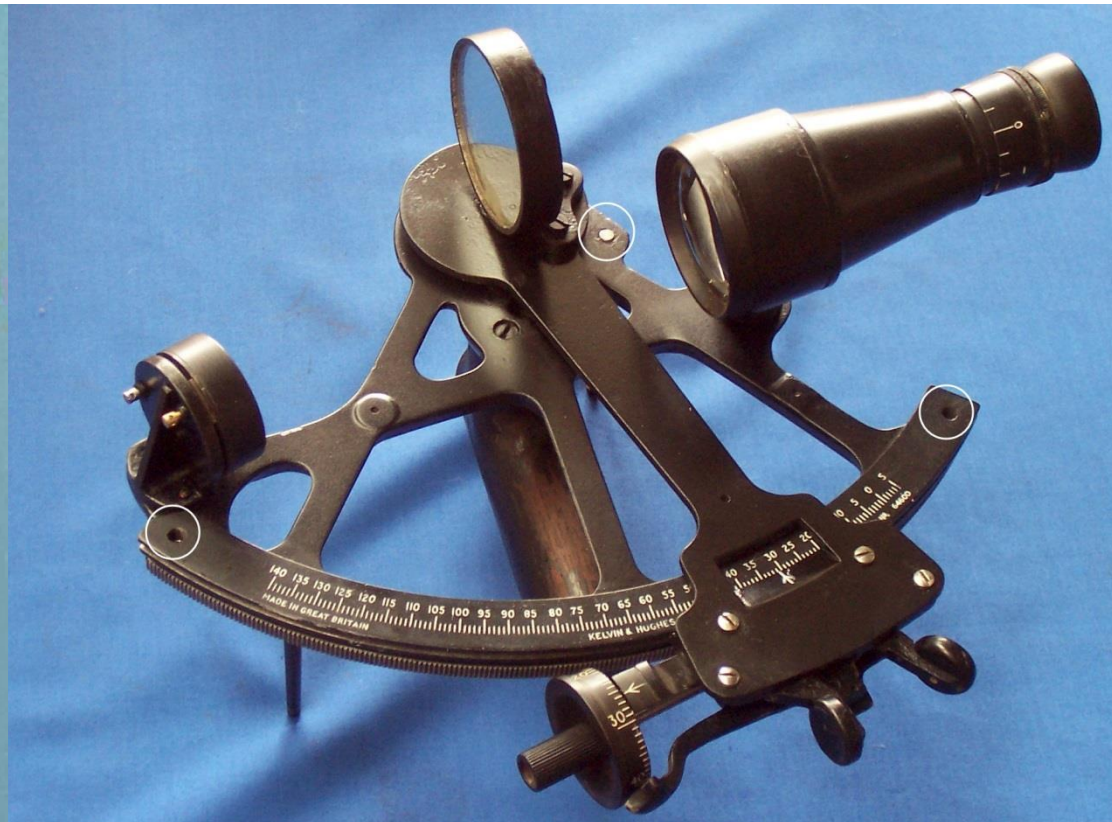
Sextant = 1/6 de cercle pour mesurer des angles jusqu'à 120°



Le sextant



XVIIIème siècle



XXIème siècle

La navigation astronomique

- On a donc besoin:
 - D'un garde-temps fiable
 - D'une lunette utilisable sur un bateau
 - **D'éphémérides précises**
- Ephémérides (nautiques)
 - Positions de:
 - Soleil
 - Lune
 - Planètes
 - étoiles

Les éphémérides

MERCREDI 04 MARS 1998																													
Heure	SOLEIL			LUNE					Lever du Soleil			Coucher du Soleil			LATITUDE	Lever et coucher de Lune													
	U.T.	A ^h vo	D	A ^h ao	v	D	d	π	Début de l'aube	Lever	Z	Z	Coucher	Fin du crépus.		Lever	Var p. 10°	Coucher	Var p. 10°										
^h	^o	ⁱ	^o	ⁱ	^o	ⁱ	ⁱ	ⁱ	^h	^m	^o	^o	^h	^m	^h	^m	^o	^h	^m	^m	^h	^m	^m						
00	177	01,5	S	6	35,8	106	52,1	8,1	N14	12,5	7,2	59,0	6	13	7	14	107	254	17	11	18	13	70 N	8	01	0,2	1	54	3,0
01	192	01,6		6	34,8	121	19,2	8,1	14	19,7	7,1	59,0	6	12	7	08	105	255	17	18	18	14	68	8	24	0,4	1	32	2,7
02	207	01,7		6	33,9	135	46,4	8,1	14	26,9	7,1	58,9	6	11	7	03	104	256	17	23	18	14	66	8	43	0,6	1	14	2,6
03	222	01,9		6	32,9	150	13,5	8,1	14	33,9	7,0	58,9	6	11	6	58	103	257	17	27	18	15	64	8	58	0,7	0	59	2,4
04	237	02,0		6	31,9	164	40,6	8,1	14	40,9	6,9	58,9	6	10	6	54	102	258	17	31	18	16	62 N	9	11	0,8	0	47	2,3
05	252	02,1		6	31,0	179	07,8	8,1	14	47,7	6,8	58,8																	
													6	09	6	51	102	259	17	35	18	16	60 N	9	21	0,9	0	37	2,2
06	267	02,3	S	6	30,0	193	34,9	8,2	N14	54,5	6,7	58,8	6	08	6	48	101	259	17	38	18	17	58	9	31	1,0	0	28	2,2
07	282	02,4		6	29,1	208	02,1	8,2	15	01,2	6,6	58,8	6	08	6	45	100	260	17	40	18	17	56	9	39	1,0	0	21	2,1
08	297	02,5		6	28,1	222	29,2	8,2	15	07,7	6,5	58,7	6	07	6	42	100	260	17	43	18	18	54	9	46	1,0	0	14	2,1
09	312	02,7		6	27,1	236	56,4	8,2	15	14,2	6,4	58,7	6	06	6	40	99	261	17	45	18	19	52 N	9	53	1,1	0	08	2,0
10	327	02,8		6	26,2	251	23,6	8,2	15	20,6	6,3	58,7																	
11	342	03,0		6	25,2	265	50,7	8,2	15	26,8	6,2	58,6	6	06	6	38	99	261	17	47	18	19	50 N	9	59	1,1	0	02	2,0
													6	04	6	33	98	262	17	51	18	21	45	10	12	1,2	P.D.C.	-	
12	357	03,1	S	6	24,3	280	17,9	8,2	N15	33,0	6,1	58,6	6	02	6	30	98	262	17	55	18	22	40	10	23	1,2	P.D.C.	-	
13	12	03,2		6	23,3	294	45,1	8,2	15	39,1	6,0	58,6	6	01	6	26	97	263	17	58	18	24	35	10	32	1,3	P.D.C.	-	
14	27	03,4		6	22,3	309	12,3	8,2	15	45,0	5,9	58,5	5	59	6	23	97	263	18	01	18	25	30 N	10	40	1,3	P.D.C.	-	
15	42	03,5		6	21,4	323	39,5	8,2	15	50,9	5,8	58,5																	
16	57	03,6		6	20,4	338	06,7	8,2	15	56,7	5,7	58,5	5	56	6	18	97	264	18	06	18	28	20 N	10	54	1,4	P.D.C.	-	
17	72	03,8		6	19,4	352	33,9	8,2	16	02,3	5,6	58,4	5	52	6	13	96	264	18	11	18	32	10 N	11	06	1,4	23	56	1,6
													5	48	6	09	96	264	18	15	18	36	0	11	18	1,5	23	44	1,5
18	87	03,9	S	6	18,5	7	01,1	8,2	N16	07,9	5,5	58,4	5	43	6	04	97	263	18	20	18	41	10 S	11	30	1,6	23	31	1,5
19	102	04,0		6	17,5	21	28,4	8,2	16	13,3	5,4	58,4	5	37	5	59	97	263	18	25	18	47	20 S	11	42	1,6	23	18	1,4
20	117	04,2		6	16,5	35	55,6	8,2	16	18,7	5,3	58,3																	
21	132	04,3		6	15,6	50	22,9	8,3	16	23,9	5,1	58,3	5	29	5	53	98	262	18	30	18	55	30 S	11	56	1,7	23	03	1,4
22	147	04,5		6	14,6	64	50,1	8,3	16	29,1	5,0	58,3	5	24	5	50	99	262	18	34	18	59	35	12	05	1,8	22	54	1,3
23	162	04,6		6	13,7	79	17,4	8,3	16	34,1	4,9	58,2	5	18	5	46	99	261	18	38	19	05	40	12	14	1,8	22	44	1,3
													5	11	5	41	100	260	18	42	19	12	45	12	25	1,8	22	32	1,2
24	177	04,7	S	6	12,7	93	44,7	8,3	N16	39,1	4,8	58,2	5	02	5	35	101	259	18	47	19	20	50 S	12	39	1,9	22	18	1,2
													4	58	5	33	102	259	18	50	19	25	52 S	12	45	2,0	22	11	1,2
													4	53	5	30	102	258	18	53	19	29	54	12	52	2,0	22	04	1,1
													4	48	5	27	103	257	18	56	19	34	56 S	13	00	2,0	21	55	1,1

Éphémérides données jour par jour: Soleil, Lune

Les éphémérides

Heure U.T.	Point Vernal A _{Hso}	VENUS 1 A _{Hao} 2 D		MARS A _{Hao} D		JUPITER A _{Hao} D		SATURNE A _{Hao} D		Heure U.T.
00	229 39,7	150 16,8	N 24 21,0	89 26,7	N 17 24,5	232 59,4	S 2 37,0	50 23,6	N 3 02,2	00
01	244 42,2	165 16,0	24 21,3	104 28,1	17 24,1	248 01,4	2 36,8	65 26,1	3 02,2	01
02	259 44,6	180 15,1	24 21,6	119 29,4	17 23,7	263 03,4	2 36,6	80 28,7	3 02,2	02
03	274 47,1	195 14,3	24 21,9	134 30,8	17 23,3	278 05,5	2 36,4	95 31,2	3 02,3	03
04	289 49,6	210 13,5	24 22,2	149 32,1	17 22,9	293 07,5	2 36,3	110 33,7	3 02,3	04
05	304 52,0	225 12,7	24 22,6	164 33,5	17 22,5	308 09,5	2 36,1	125 36,3	3 02,3	05
06	319 54,5	240 11,8	N 24 22,9	179 34,9	N 17 22,1	323 11,6	S 2 35,9	140 38,8	N 3 02,3	06
07	334 57,0	255 11,0	24 23,2	194 36,2	17 21,7	338 13,6	2 35,7	155 41,4	3 02,4	07
08	349 59,4	270 10,2	24 23,5	209 37,6	17 21,3	353 15,6	2 35,5	170 43,9	3 02,4	08
09	5 01,9	285 09,4	24 23,8	224 39,0	17 20,9	8 17,7	2 35,4	185 46,4	3 02,4	09
10	20 04,3	300 08,5	24 24,1	239 40,3	17 20,5	23 19,7	2 35,2	200 49,0	3 02,4	10
11	35 06,8	315 07,7	24 24,4	254 41,7	17 20,1	38 21,8	2 35,0	215 51,5	3 02,5	11
12	50 09,3	330 06,9	N 24 24,7	269 43,0	N 17 19,7	53 23,8	S 2 34,8	230 54,0	N 3 02,5	12
13	65 11,7	345 06,0	24 25,0	284 44,4	17 19,3	68 25,8	2 34,7	245 56,6	3 02,5	13
14	80 14,2	0 05,2	24 25,3	299 45,8	17 18,9	83 27,9	2 34,5	260 59,1	3 02,5	14
15	95 16,7	15 04,4	24 25,6	314 47,1	17 18,5	98 29,9	2 34,3	276 01,7	3 02,6	15
16	110 19,1	30 03,6	24 25,9	329 48,5	17 18,1	113 31,9	2 34,1	291 04,2	3 02,6	16
17	125 21,6	45 02,7	24 26,2	344 49,8	17 17,7	128 34,0	2 34,0	306 06,7	3 02,6	17
18	140 24,1	60 01,9	N 24 26,5	359 51,2	N 17 17,3	143 36,0	S 2 33,8	321 09,3	N 3 02,6	18
19	155 26,5	75 01,1	24 26,8	14 52,6	17 16,9	158 38,1	2 33,6	336 11,8	3 02,6	19
20	170 29,0	90 00,3	24 27,1	29 53,9	17 16,5	173 40,1	2 33,4	351 14,3	3 02,7	20
21	185 31,4	104 59,4	24 27,4	44 55,3	17 16,1	188 42,1	2 33,3	6 16,9	3 02,7	21
22	200 33,9	119 58,6	24 27,7	59 56,6	17 15,7	203 44,2	2 33,1	21 19,4	3 02,7	22
23	215 36,4	134 57,8	24 28,0	74 58,0	17 15,3	218 46,2	2 32,9	36 21,9	3 02,7	23
24	230 38,8	149 56,9	N 24 28,2	89 59,4	N 17 14,9	233 48,3	S 2 32,7	51 24,5	N 3 02,8	24
		3 v=-0,8 mag.=-3,7	4 d=0,3 π = 0,1	v=+1,4 mag.=+1,0	d=0,4 π = 0,1	v=+2,0 mag.=-1,7	d=0,2 π = 0,0	v=+2,5 mag.=+1,1	d=0,0 π = 0,0	

Planètes

Faire le point en mer

- Connaissant le temps universel, comment utiliser le Soleil, la Lune et les étoiles pour trouver sa position?
 - Attendre qu'il soit midi pour connaître sa longitude
 - Mesurer la hauteur de l'étoile polaire pour connaître sa latitude
- Problèmes:
 - Il y a des nuages à midi
 - On ne voit pas l'étoile polaire à midi

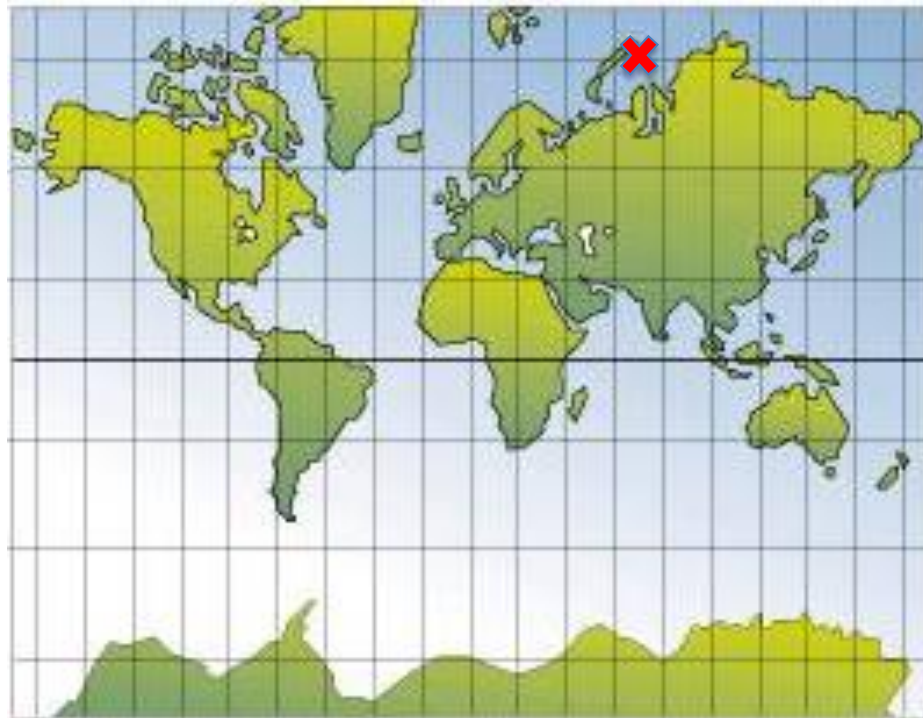
Faire le point en mer

- Il faut utiliser les astres visibles au moment où l'on veut calculer sa position!
 - Le Soleil (de jour)
 - La Lune (de jour et de nuit)
 - Les étoiles (de nuit)
 - Les planètes (de nuit)

La méthode de la méridienne: attendre le passage d'un astre au méridien

Latitude

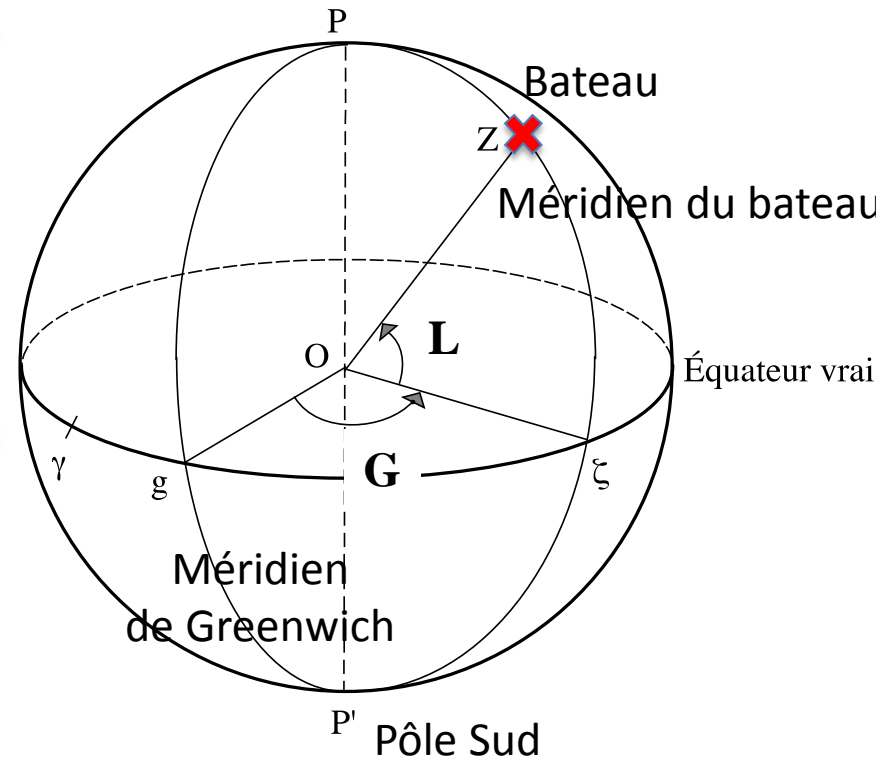
Pôle Nord



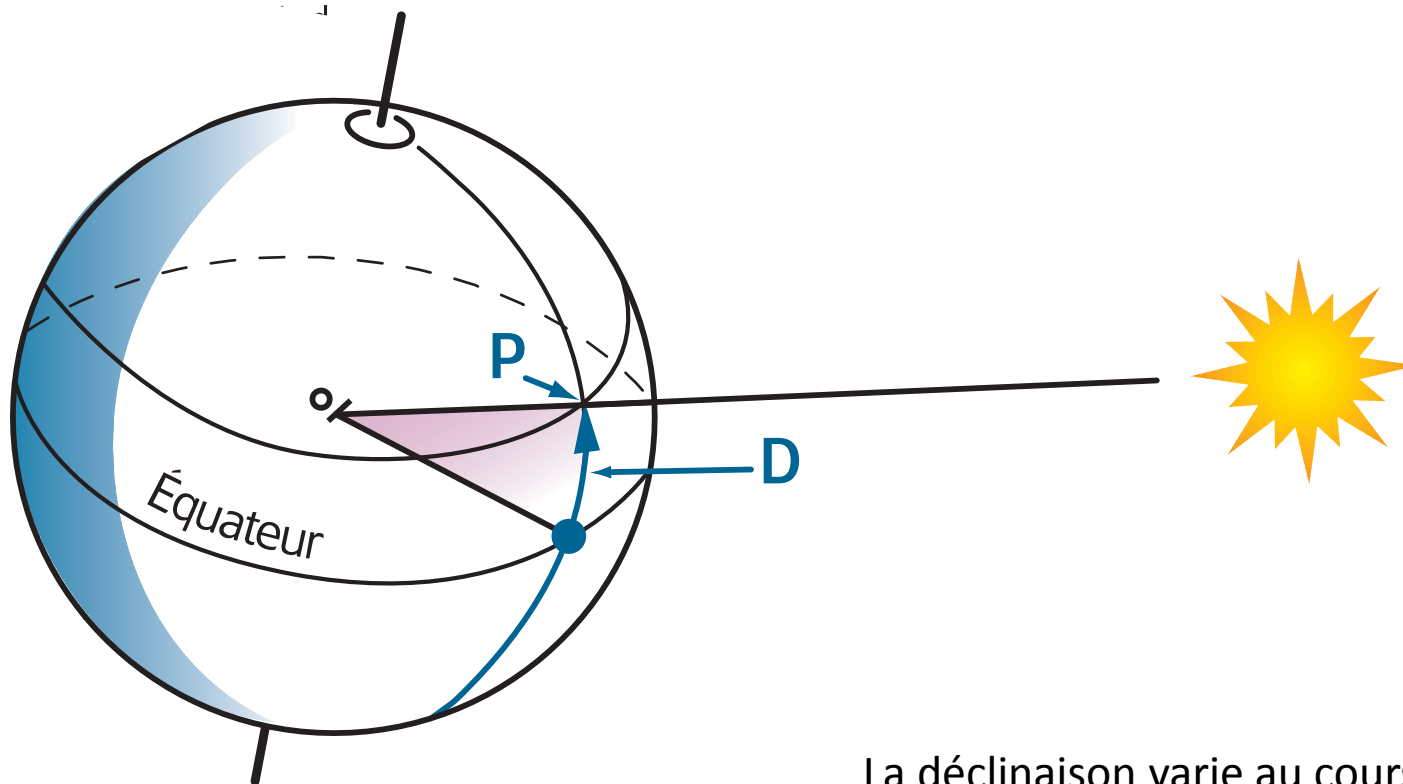
75°
60°
30°
0°
30°
60°
75°

Longitude

Position estimée



Le Soleil ou un autre astre



P est le pied du Soleil
D est la déclinaison

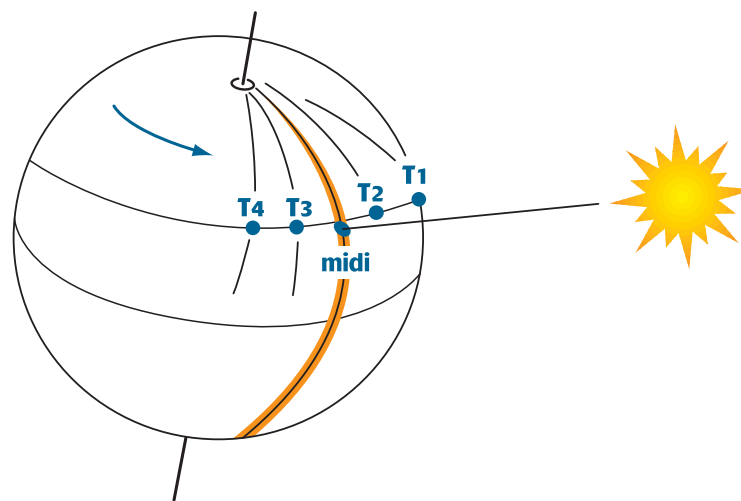
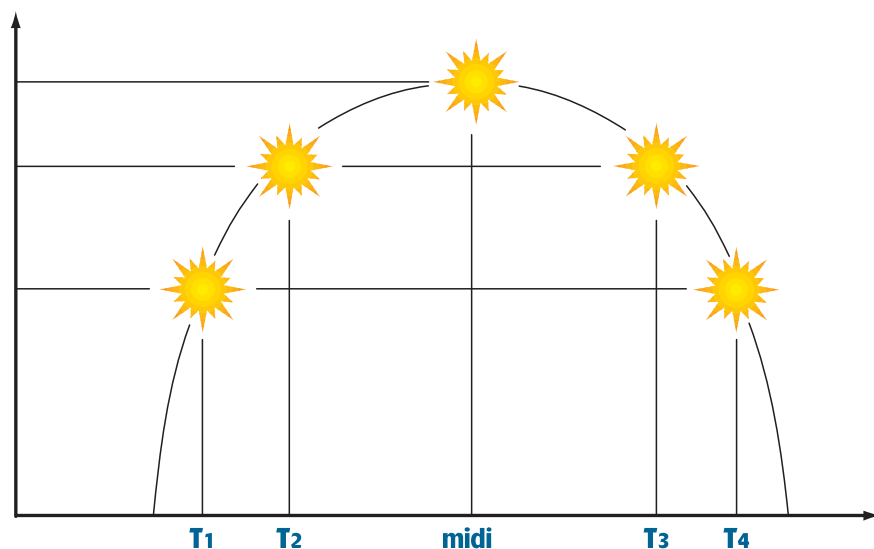
La déclinaison varie au cours de l'année
→ **Ephémérides nautiques**

La longitude du Soleil s'appelle l'angle horaire (liée à la rotation de la Terre).

Tous les rayons du Soleil arrivent parallèlement sur la Terre.

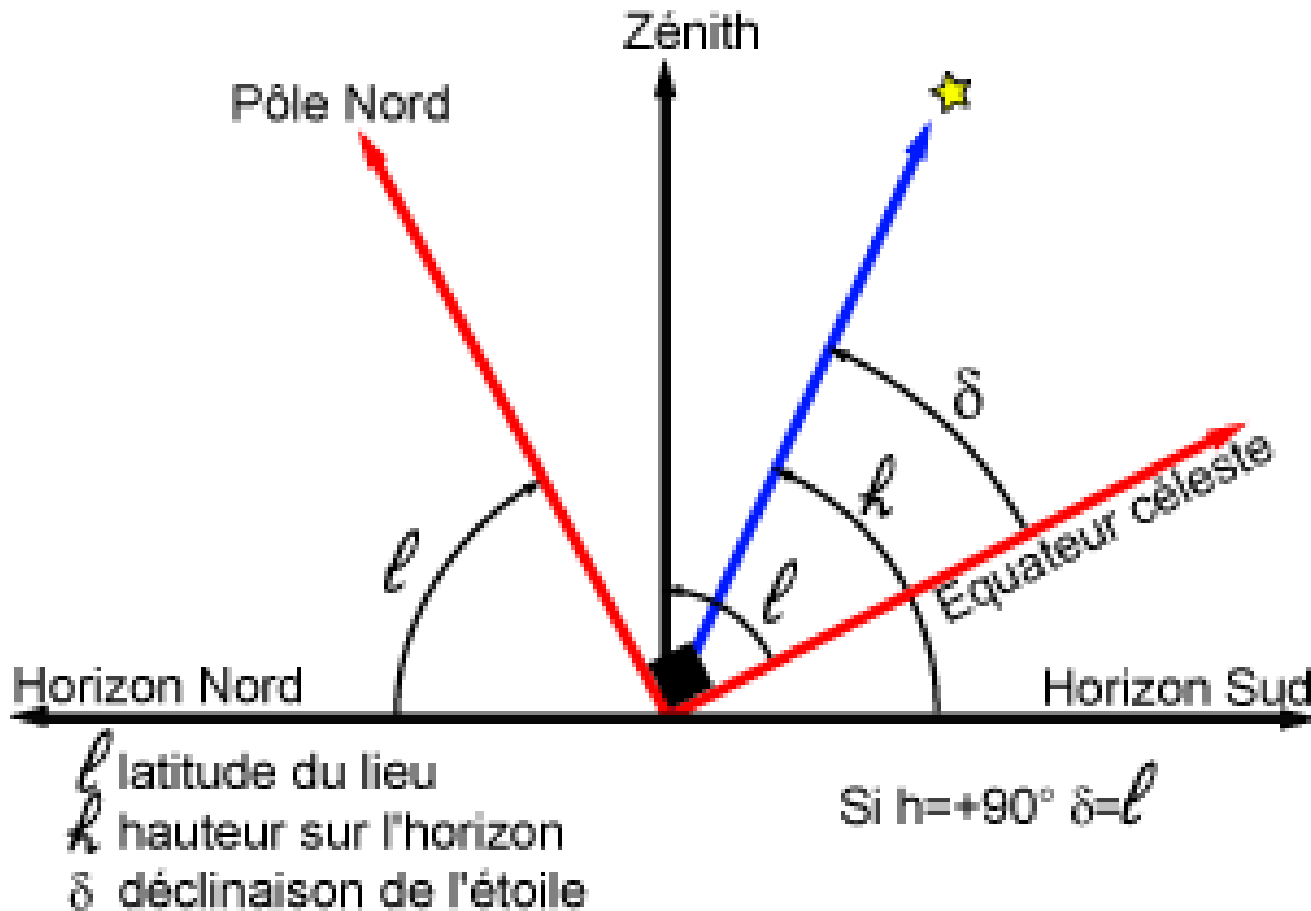
Principe de la mesure de la longitude

- h
- Mesure de l'heure de passage du Soleil dans le méridien en UTC.



Midi locale, heure solaire
≠ heure à la montre

Rappel: l'observation méridienne



- Mesurer la hauteur h au dessus de l'horizon: $\delta = h - 90^\circ + l$
- Noter l'instant du passage: $H = \text{TSL} - \alpha \rightarrow \alpha = \text{TSL}$

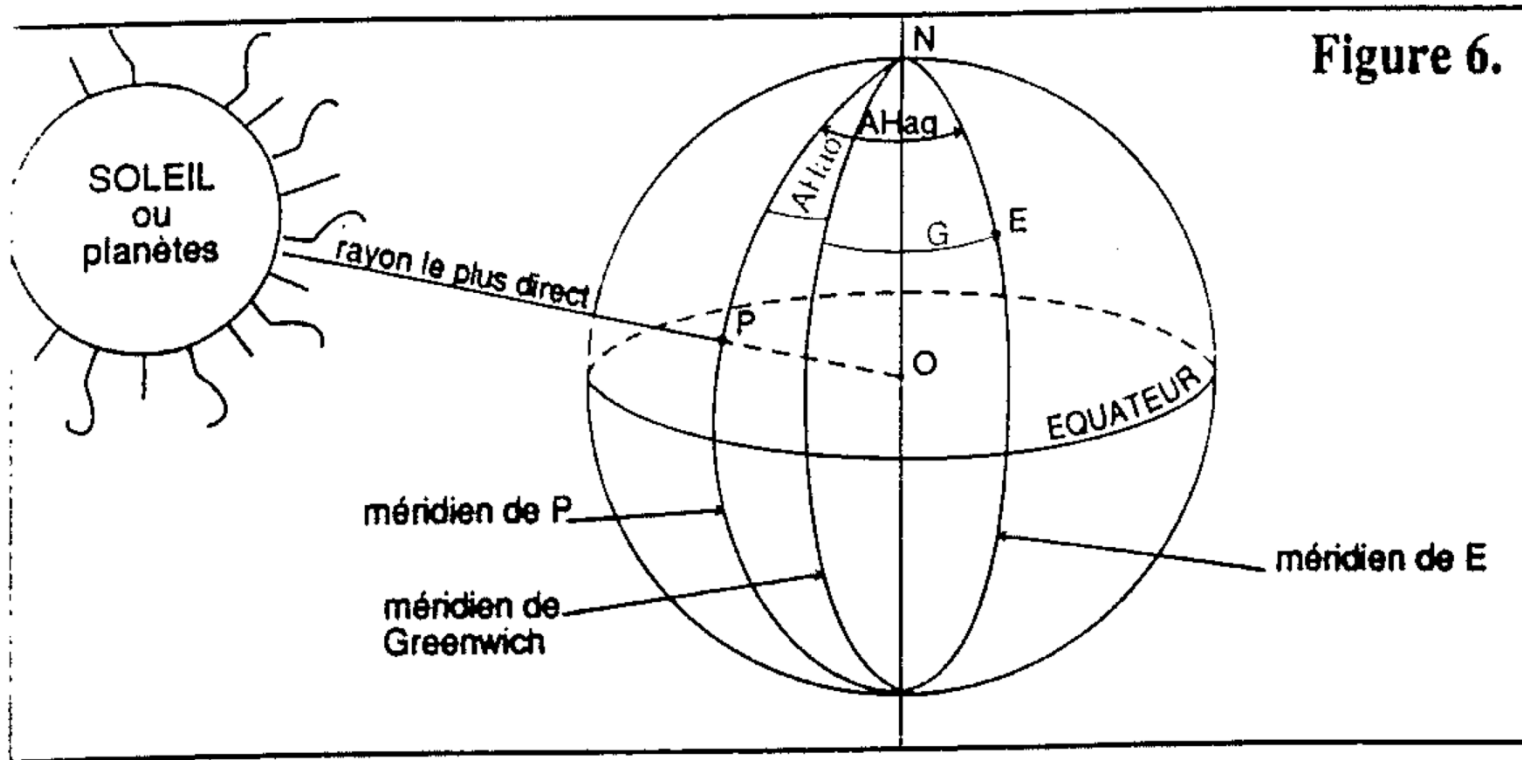
La méthode des hauteurs

- On ne peut pas toujours observer le passage d'un astre au méridien
- On va mesurer les hauteurs au-dessus de l'horizon:
 - Elle dépendent du lieu d'observation

La méthode des hauteurs

- Quand on connaît le temps universel, les éphémérides indiquent la position des astres dans le ciel de l'observateur
- On a ainsi une correspondance entre le ciel et le globe terrestre
- Exemple: à 15h local
 - la hauteur du Soleil est de 45°
 - La hauteur de la Lune est de 70°

Faire le point en mer



- Les éphémérides indiquent le point P de la Terre où le Soleil (ou tout autre corps) est au zénith
- Si on mesure une hauteur h pour cet astre, alors on est sur un cercle centré en P de rayon h
- Avec plusieurs mesures, on trouve sa position

Faire le point en mer



En mesurant la hauteur d'un astre, on situe le navire sur un cercle centré sur le lieu où l'astre est au zénith et donc à l'intersection des cercles.

Faire le point en mer

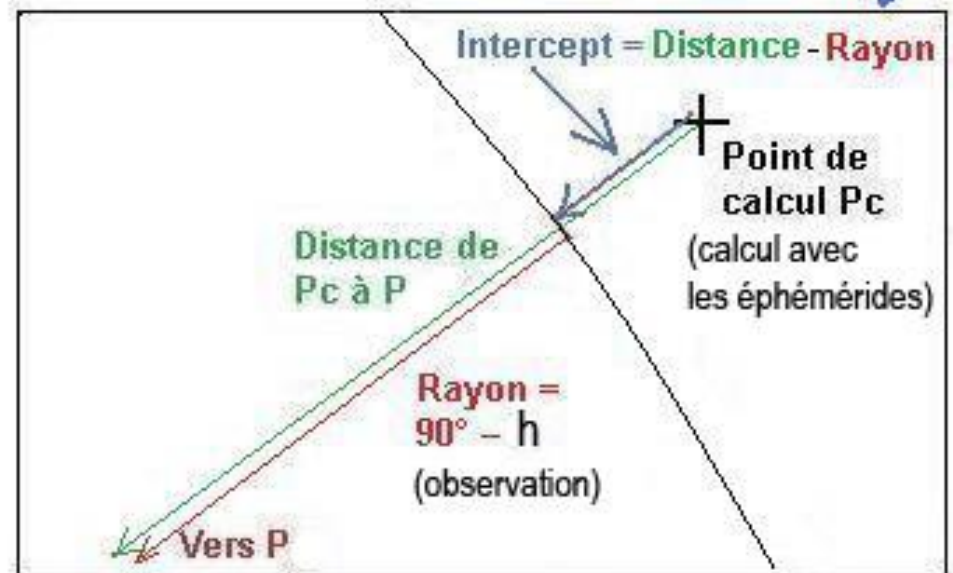
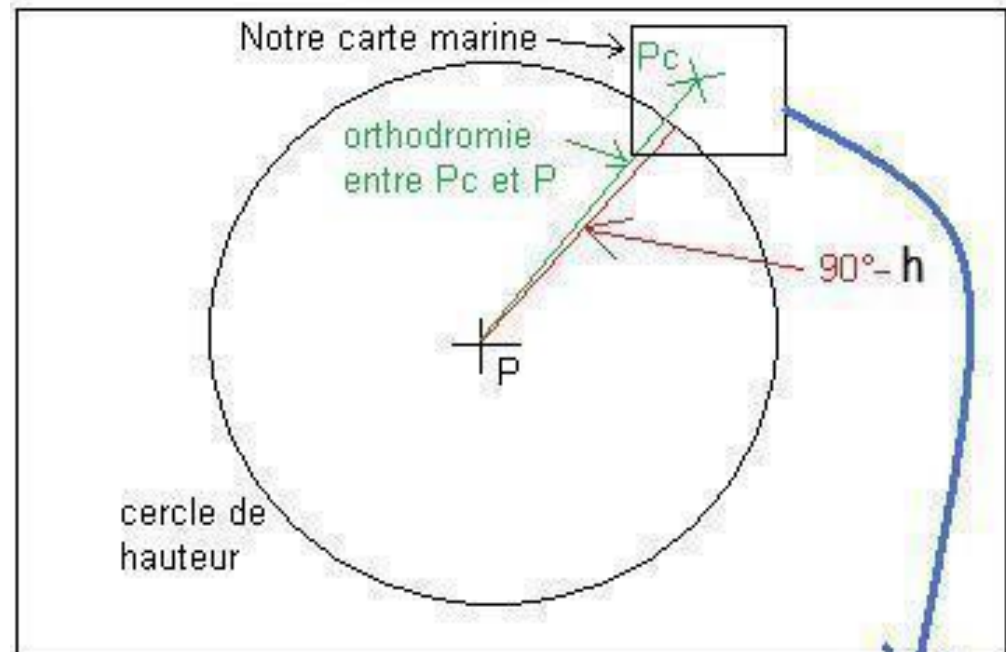
- Pour fixer la position précise, plusieurs observations sont nécessaires ; ce sera, au même instant, la hauteur d'un astre B qui fournira un second cercle de hauteur, puis d'un astre C.
- Notre position est déterminée par l'intersection sur la carte des images des cercles de hauteur. Deux cercles se coupent en deux points mais il ne saurait y avoir ambiguïté sur celui qu'il faut choisir parce que l'on connaît toujours approximativement les coordonnées du navire.

La droite de hauteur

- On a vu que le lieu des points, d'où l'on relève un astre donné à un moment donné à une hauteur donnée est un cercle sur la sphère terrestre. Ce cercle, dit cercle de hauteur, ne peut généralement pas être tracé entièrement pour des raisons matérielles (taille et planéité des cartes utilisées)
- Pour définir une position réelle, il suffit d'en tracer un arc proche de la position estimée de l'observateur. En pratique, cet arc peut être confondu avec sa tangente, à plusieurs conditions : observation de l'astre à une hauteur au-dessus de l'horizon inférieure à 65° et longueur inférieure à 60 milles. Cette portion de tangente est appelée « droite de hauteur ».

Faire le point en mer

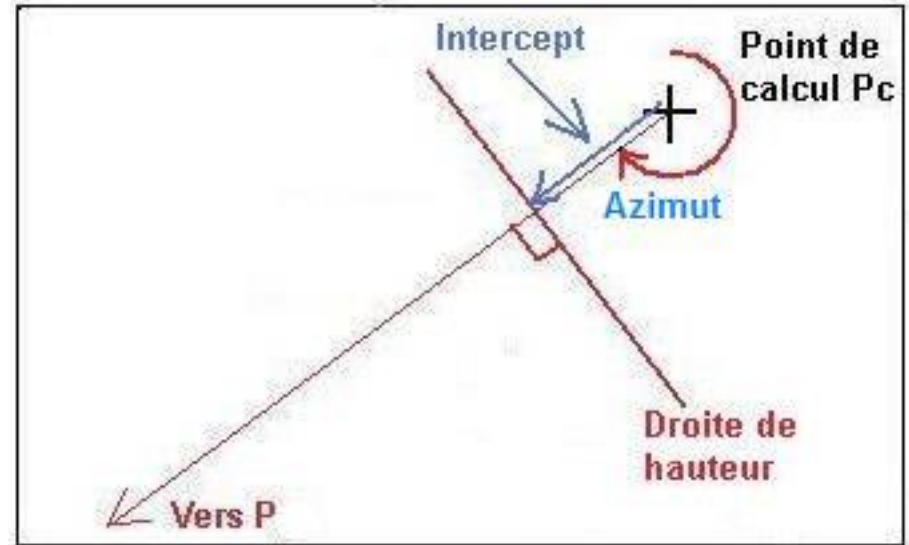
- On sait qu'on est sur le cercle de hauteur qu'il faut tracer sur une carte
- On calcule l'intercept (distance de la position estimée P_c au cercle de hauteur)



Notre carte marine

Faire le point en mer

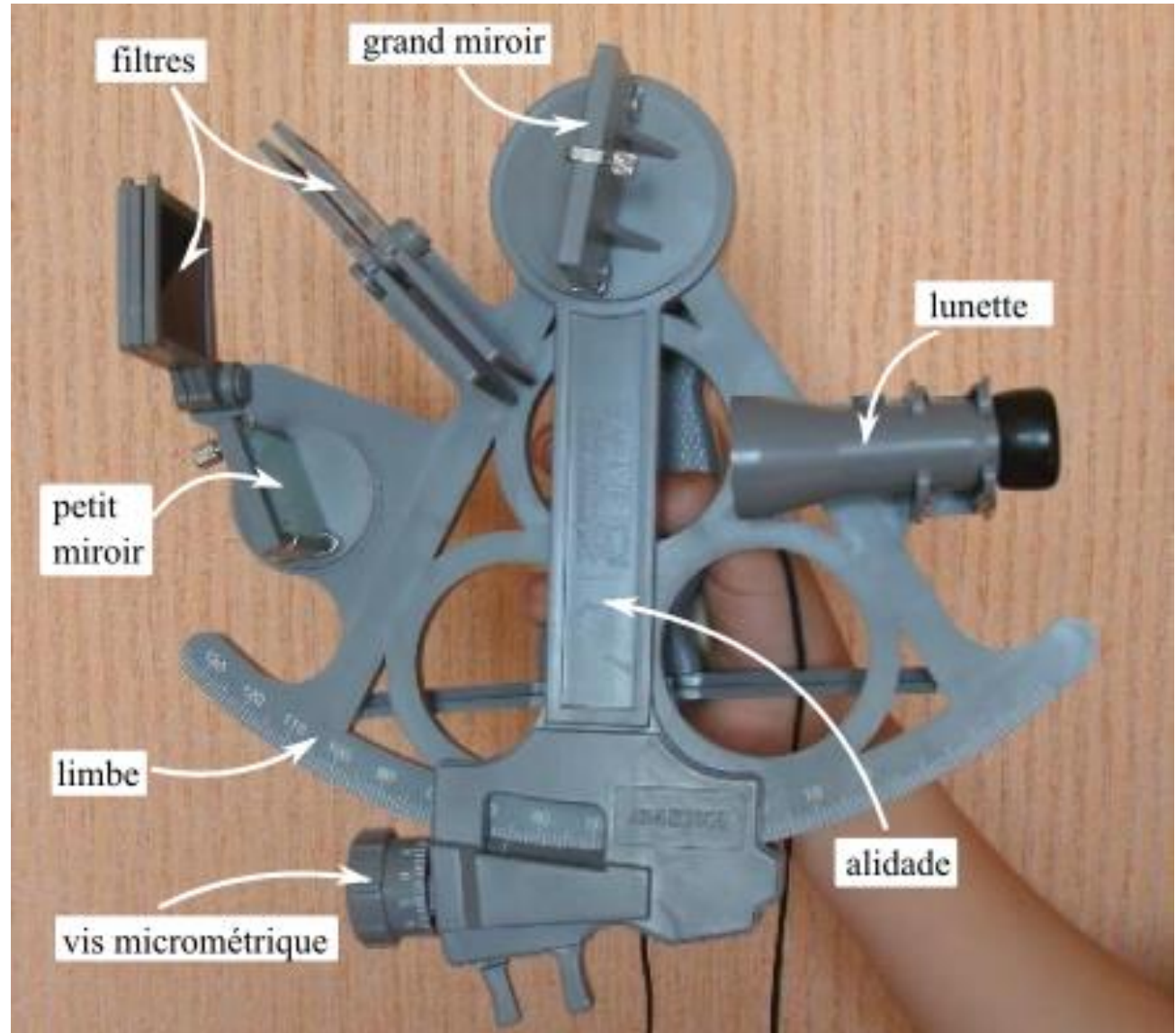
- Les éphémérides permettent aussi de calculer l'azimut du point P (c'est l'azimut de l'astre observé)
- On peut tracer la droite de hauteur
- Il faut plusieurs observations pour avoir plusieurs droites et trouver sa position.



Droite de hauteur

- Si les deux observations ne sont pas simultanées, le point où se trouve le navire lors de la seconde observation est l'intersection de la deuxième droite avec la première transportée parallèlement à elle-même du chemin parcouru par le navire entre les deux observations.
- La droite de hauteur fut « découverte » en 1837 par l'américain Sumner.

Les outils: la montre et le sextant



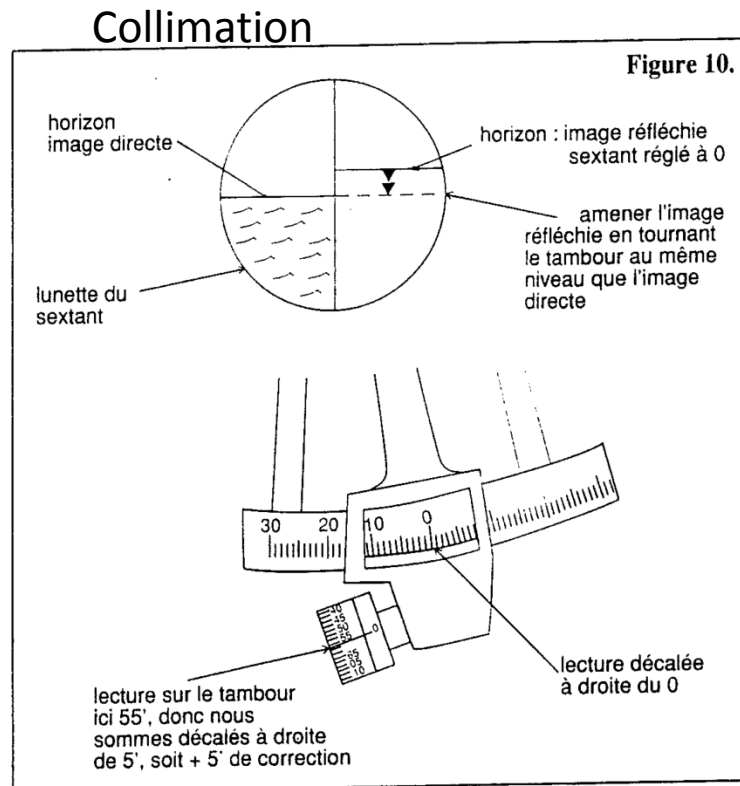
Mesure au sextant

- Principe de la mesure : alidade réglée à 0° , on met **tous** les filtres et on vise le Soleil. On fait coulisser l'alidade afin de faire apparaître l'horizon.
- On tangente le bord inférieur du Soleil par un mouvement d'oscillation.

Voir la vidéo sur youtube « Sextant : comment faire la visée »

Hauteur instrumentale

- Collimation : correction instrumentale
- Correction de l'altitude et de la hauteur
- Correction du bord du Soleil (si bord supérieur) et du mois.
- Correction de réfraction



VII Corrections des hauteurs observées du Soleil.
(- Réfraction moyenne - dépression + parallaxe + demi-diamètre)

PREMIÈRE CORRECTION.

Hauteur observée	ÉLÉVATION DE L'ŒIL												
	0 m	2 m	4 m	6 m	8 m	10 m	12 m	14 m	16 m	18 m	20 m	22 m	24 m
7 00	+ 8,7	+ 6,2	+ 5,1	+ 4,3	+ 3,6	+ 3,0	+ 2,5	+ 2,0	+ 1,5	+ 1,1	+ 0,7	+ 0,3	- 0,1
20	9,0	6,5	5,4	4,6	4,0	3,4	2,8	2,3	1,9	1,4	1,0	0,6	+ 0,2
40	9,3	6,8	5,7	4,9	4,2	3,6	3,1	2,6	2,2	1,7	1,3	0,9	0,5
8 00	9,6	7,1	6,0	5,2	4,5	3,9	3,4	2,9	2,4	2,0	1,6	1,2	0,8
20	9,8	7,3	6,3	5,4	4,8	4,2	3,6	3,1	2,7	2,2	1,8	1,4	1,1
40	10,1	7,5	6,5	5,7	5,0	4,4	3,9	3,4	2,9	2,5	2,1	1,7	1,3
9 00	+ 10,3	+ 7,7	+ 6,7	+ 5,9	+ 5,2	+ 4,6	+ 4,1	+ 3,6	+ 3,1	+ 2,7	+ 2,3	+ 1,9	+ 1,5
20	10,5	7,9	6,9	6,1	5,4	4,8	4,3	3,8	3,3	2,9	2,5	2,1	1,7
40	10,7	8,1	7,1	6,3	5,6	5,0	4,5	4,0	3,5	3,1	2,7	2,3	1,9
10 00	10,8	8,3	7,3	6,5	5,8	5,2	4,7	4,2	3,7	3,3	2,9	2,5	2,1
20	11,0	8,5	7,4	6,6	5,9	5,3	4,8	4,3	3,9	3,4	3,0	2,6	2,3
40	11,2	8,6	7,6	6,8	6,1	5,5	5,0	4,5	4,0	3,6	3,2	2,8	2,4
11 00	+ 11,3	+ 8,8	+ 7,7	+ 6,9	+ 6,3	+ 5,7	+ 5,1	+ 4,6	+ 4,2	+ 3,7	+ 3,3	+ 2,9	+ 2,6
30	11,5	9,0	7,9	7,1	6,5	5,9	5,3	4,8	4,4	3,9	3,5	3,1	2,8
12 00	11,7	9,2	8,1	7,3	6,7	6,1	5,5	5,0	4,6	4,1	3,7	3,3	3,0
30	11,9	9,4	8,3	7,5	6,8	6,2	5,7	5,2	4,8	4,3	3,9	3,5	3,2
13 00	12,0	9,5	8,5	7,7	7,0	6,4	5,9	5,4	4,9	4,5	4,1	3,7	3,3
								5	5,1	4,6	4,2	3,8	3,5

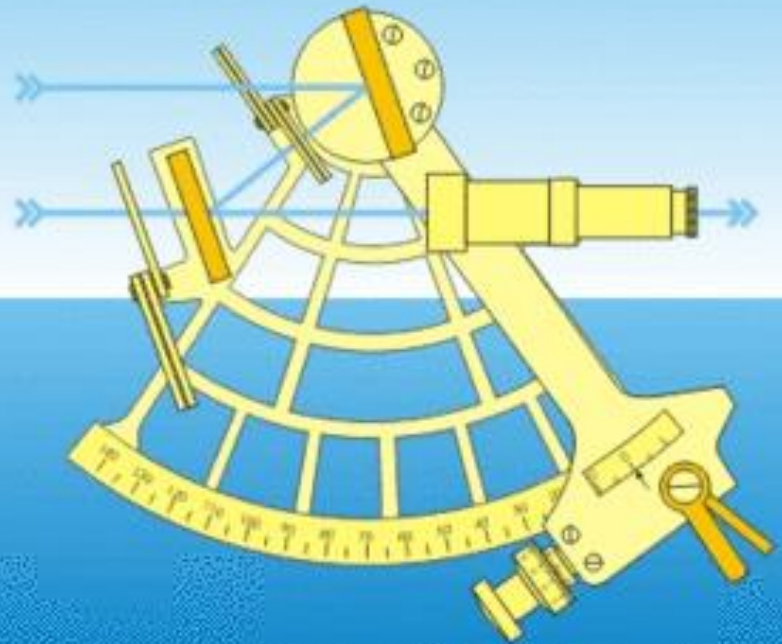
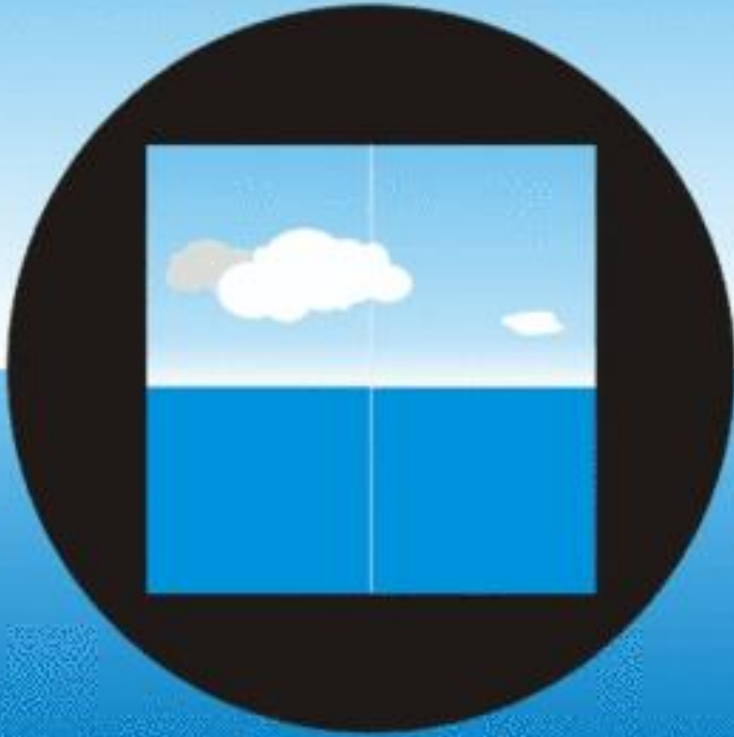
Ephémérides nautiques IMCCE



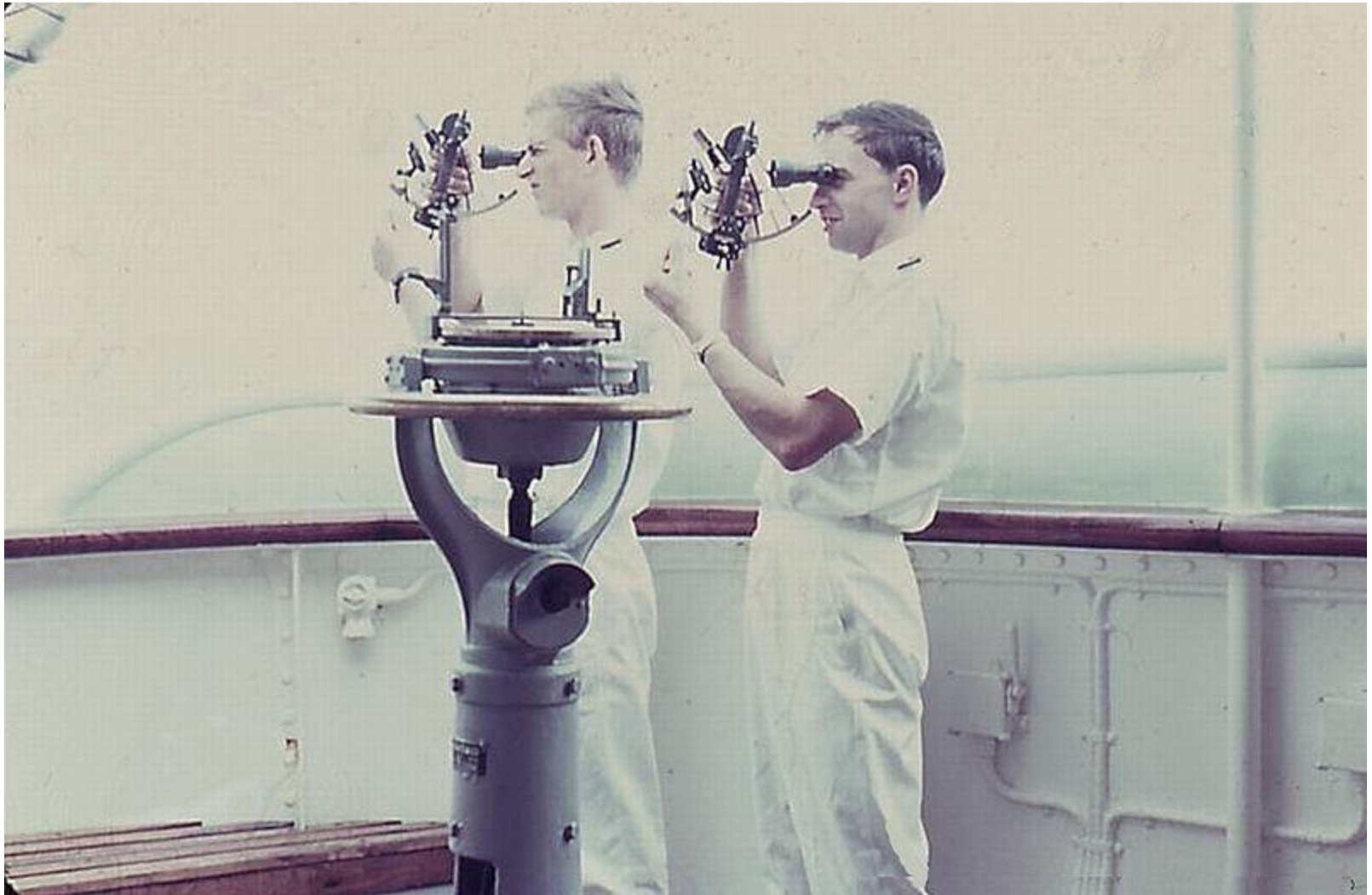
Exemple (Navastro Youtube)
Réglage en zéro.

Utilisation du sextant

1 point the sextant to the horizon



Utilisation du sextant



Les outils: les éphémérides nautiques

Éphémérides du Soleil 2017

Mai		Déclinaison à 00 h UTC en ° ' "	d en '	AHvO à 00 h UTC	V en °	UTC			Juin		Déclinaison à 00 h UTC en ° ' "	d en '	AHvO à 00 h UTC	V en °	UTC		
						T. pass.	Lever	Cou- cher							T. pass.	Lever	Cou- cher
						h min s	h min	h min							h min s	h min	h min
1	L	15 04,0 N	0.8	180 43,1	15.001	11 57 04	4 36	19 19	1	J	22 02,8 N	0.3	180 33,2	14.998	11 57 52	3 56	20 00
2	M	15 22,1 N	0.7	180 44,8		11 56 57	4 35	19 20	2	V	22 10,8 N		180 30,8		11 58 01	3 55	20 01
3	M	15 39,9 N		180 46,4		11 56 51	4 33	19 22	3	S	22 18,4 N		180 28,4		11 58 11	3 54	20 02
4	J	15 57,4 N		180 47,9		11 56 46	4 31	19 23	4	D	22 25,5 N		180 25,9		11 58 21	3 54	20 03
5	V	16 14,6 N		180 49,3		11 56 40	4 29	19 25	5	L	22 32,3 N		180 23,3		11 58 32	3 53	20 04
6	S	16 31,6 N		180 50,5		11 56 36	4 28	19 26	6	M	22 38,7 N		180 20,7		11 58 43	3 53	20 05
7	D	16 48,3 N		180 51,5		11 56 32	4 26	19 28	7	M	22 44,7 N		180 17,9		11 58 54	3 52	20 06
8	L	17 04,7 N		180 52,5		11 56 28	4 24	19 29	8	J	22 50,3 N		180 15,1		11 59 05	3 52	20 07
9	M	17 20,9 N	180 53,3	11 56 26		4 23	19 31	9	V	22 55,5 N	180 12,2		11 59 17		3 52	20 07	
10	M	17 36,7 N	180 53,9	11 56 23		4 21	19 32	10	S	23 00,3 N	180 09,3		11 59 29		3 51	20 08	
11	J	17 52,3 N	180 54,4	11 56 21		4 20	19 34	11	D	23 04,7 N	180 06,3		11 59 41		3 51	20 09	
12	V	18 07,5 N	180 54,8	11 56 20		4 18	19 35	12	L	23 08,7 N	180 03,3		11 59 53		3 51	20 09	
13	S	18 22,5 N	180 55,0	11 56 20		4 17	19 37	13	M	23 12,3 N	180 00,2		12 00 06		3 50	20 10	
14	D	18 37,1 N	180 55,1	11 56 20		4 15	19 38	14	M	23 15,4 N	179 57,0		12 00 18		3 50	20 10	

Précautions

- Effectuer tous les calculs avec 3 ou 4 décimales au moins.
- Pour la méridienne commencer les mesures 30 minutes avant l'heure estimée.
- Attention, l'observation du Soleil est dangereuse

Bon vent!

