

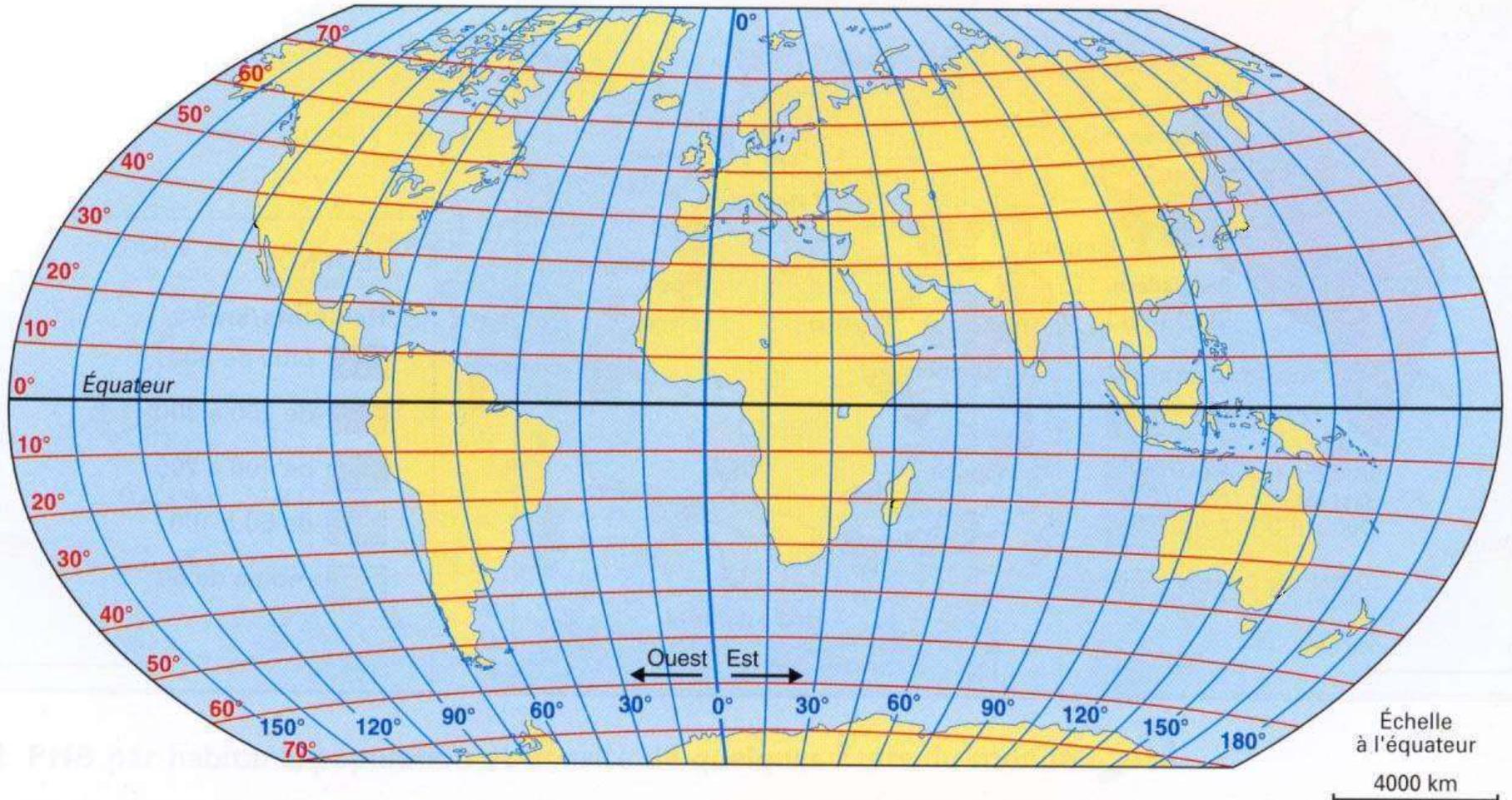


Cartographie, astronomie et navigation

Comment l'astronomie a
cartographié la Terre?

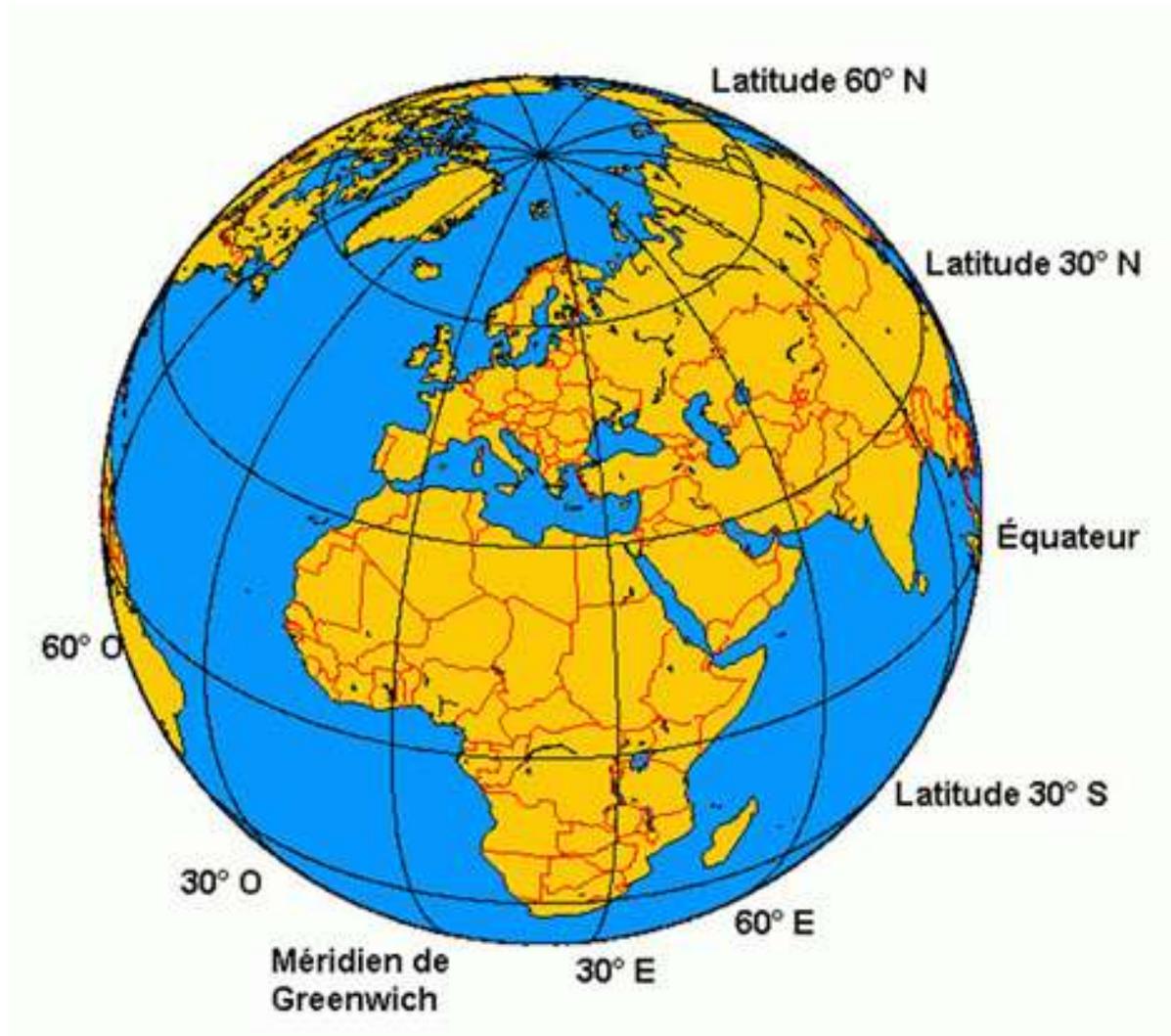
Cours de J.-E. Arlot
SAPCB - juin 2023

Se repérer sur Terre



longitude et latitude

Comment cartographier la Terre?

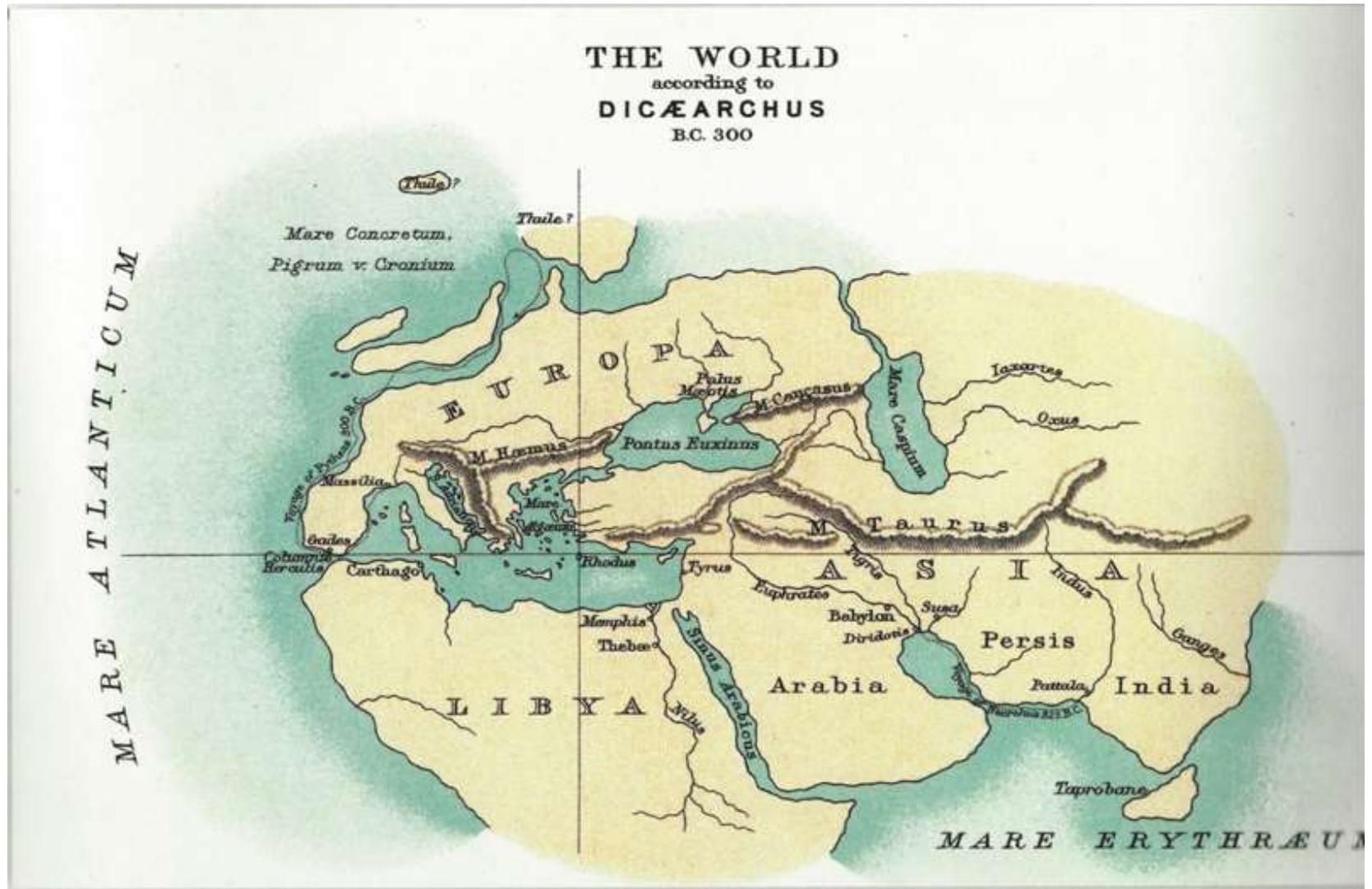


Qu'est-ce qu'une carte?

- Les positions des lieux: en degrés et minutes
- L'échelle des distances: en kilomètres
- La Terre est ronde
- La carte est plate
- Comment concilier ces notions?

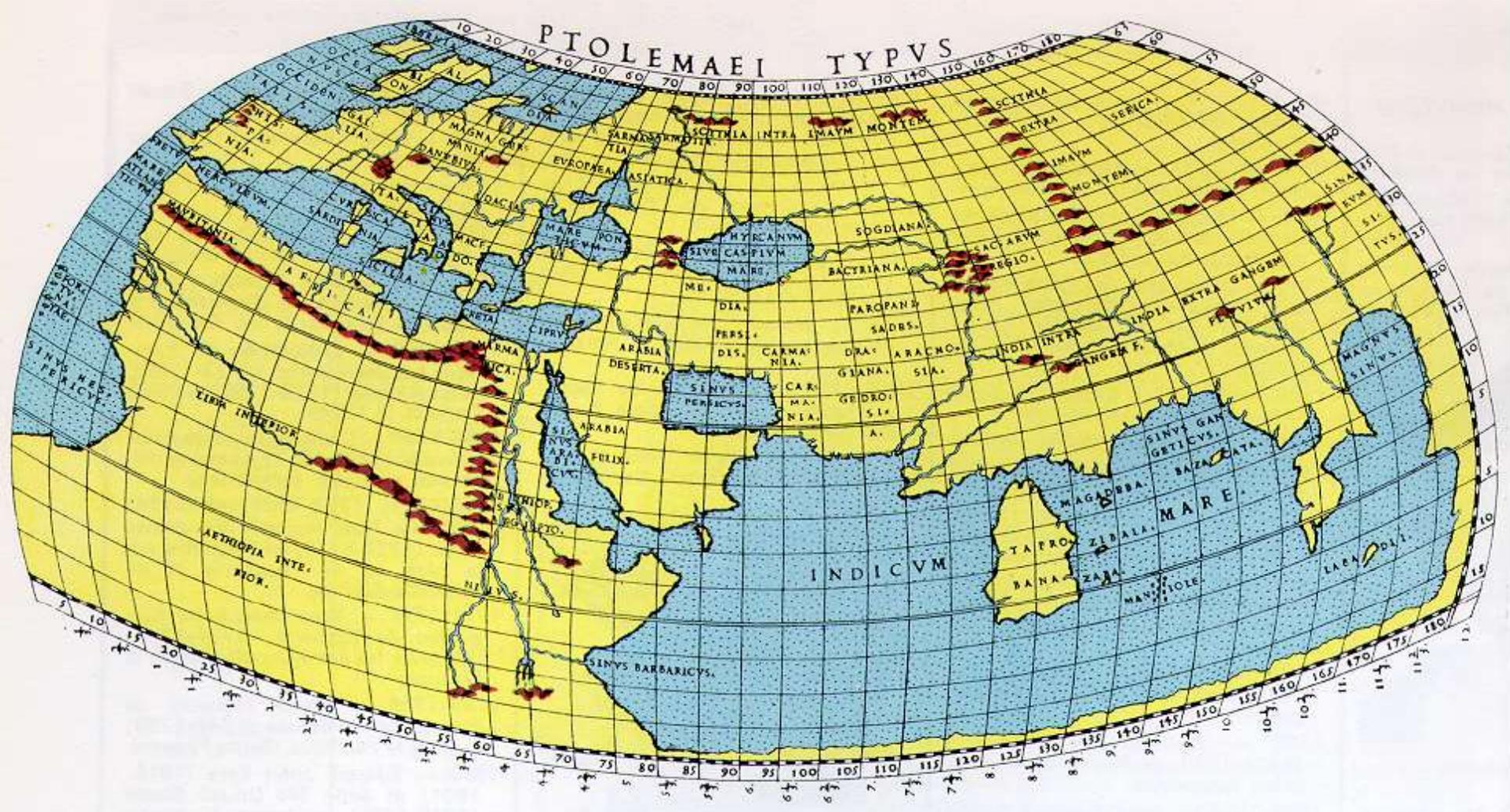


La cartographie en 300 avant J.C.



Compter les pas pour mesurer la Terre: peu précis car cumul des erreurs!

La mappemonde de Ptolémée



La cartographie en 1590

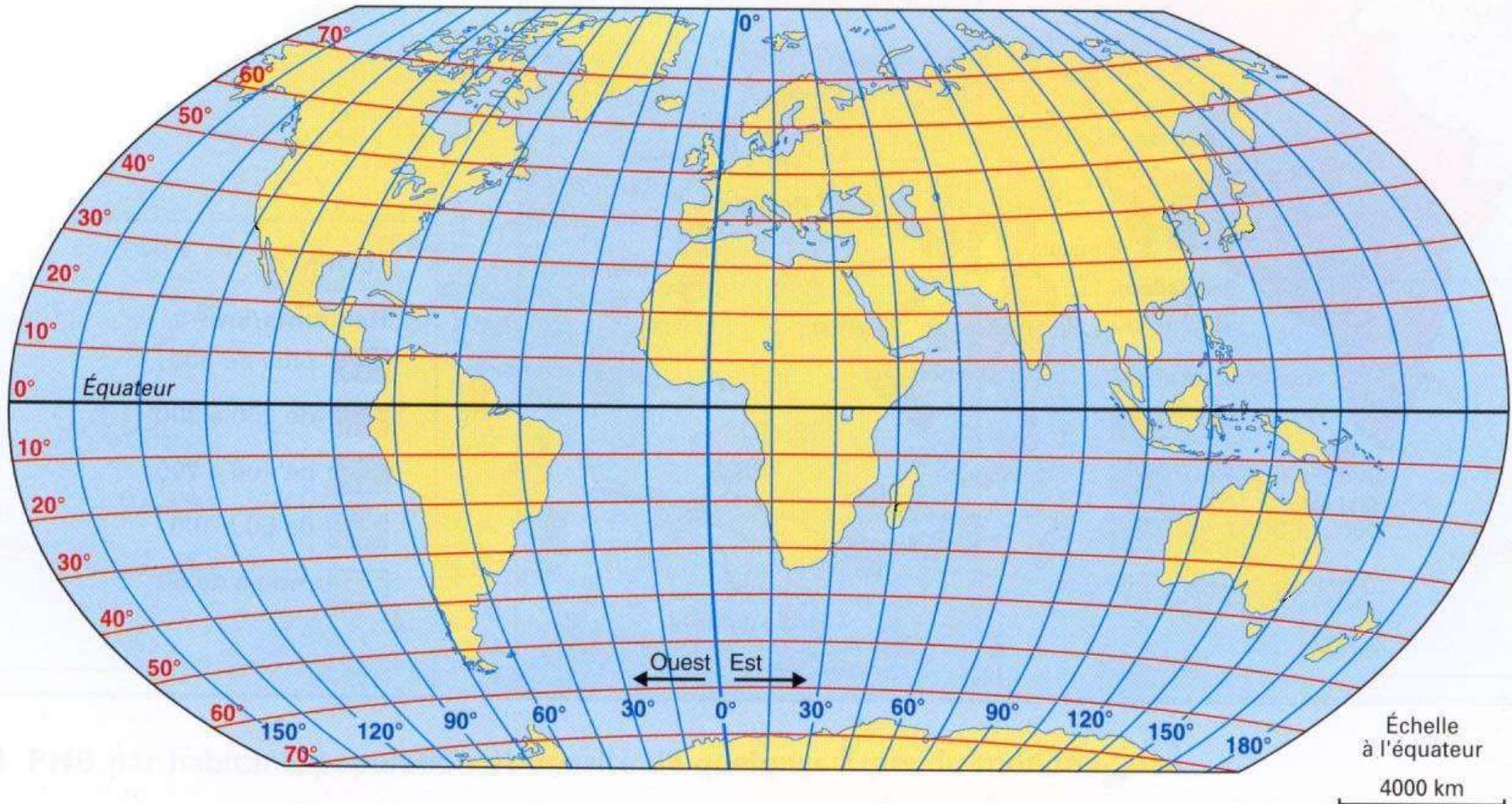


Utiliser les étoiles: quelle correspondance entre le ciel et la Terre?



Faire une carte du ciel, comprendre et mesurer la rotation de la Terre

Faire correspondre le ciel et la Terre



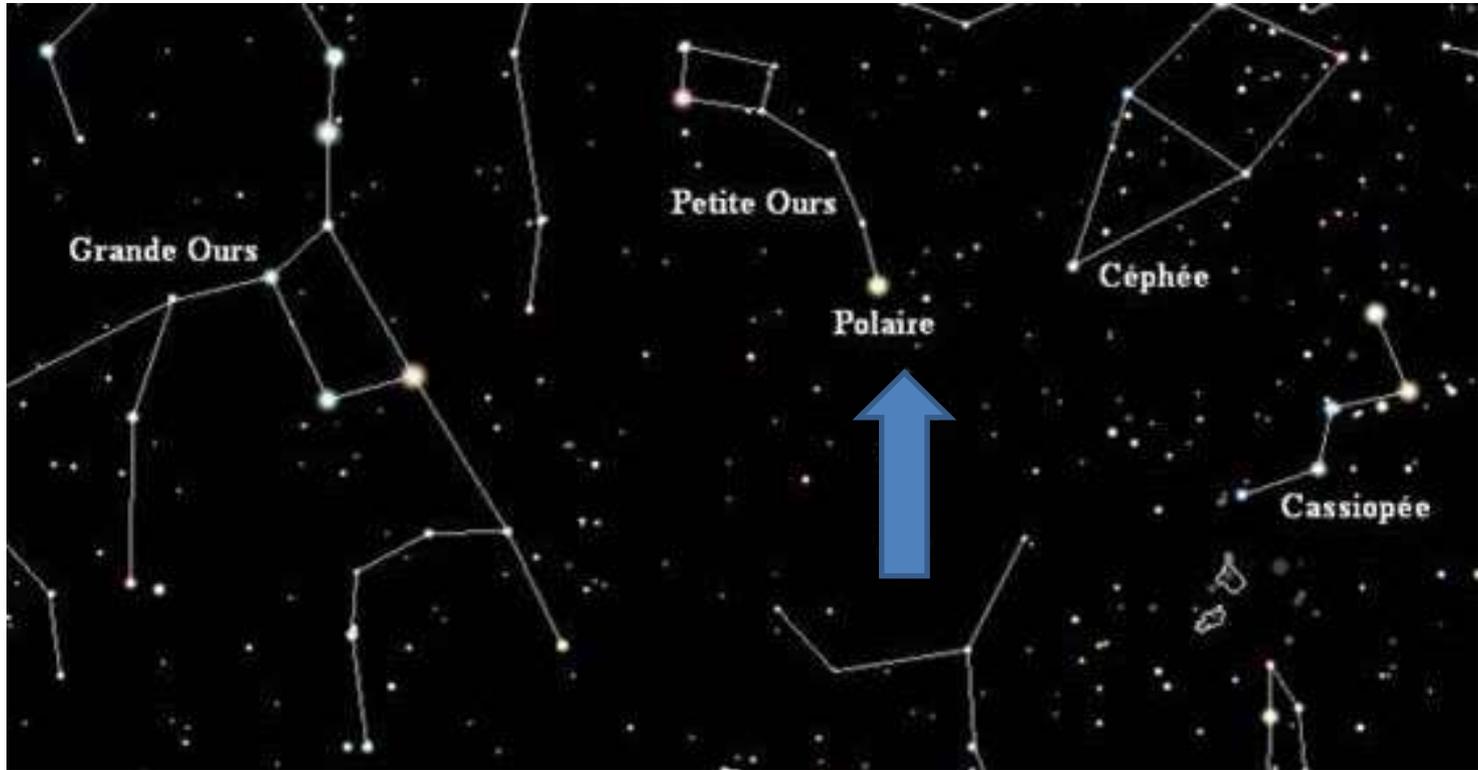
Sphère céleste et sphère terrestre en mouvement

Méridien de référence → **longitude et latitude**

Se situer sur mer: faire le point

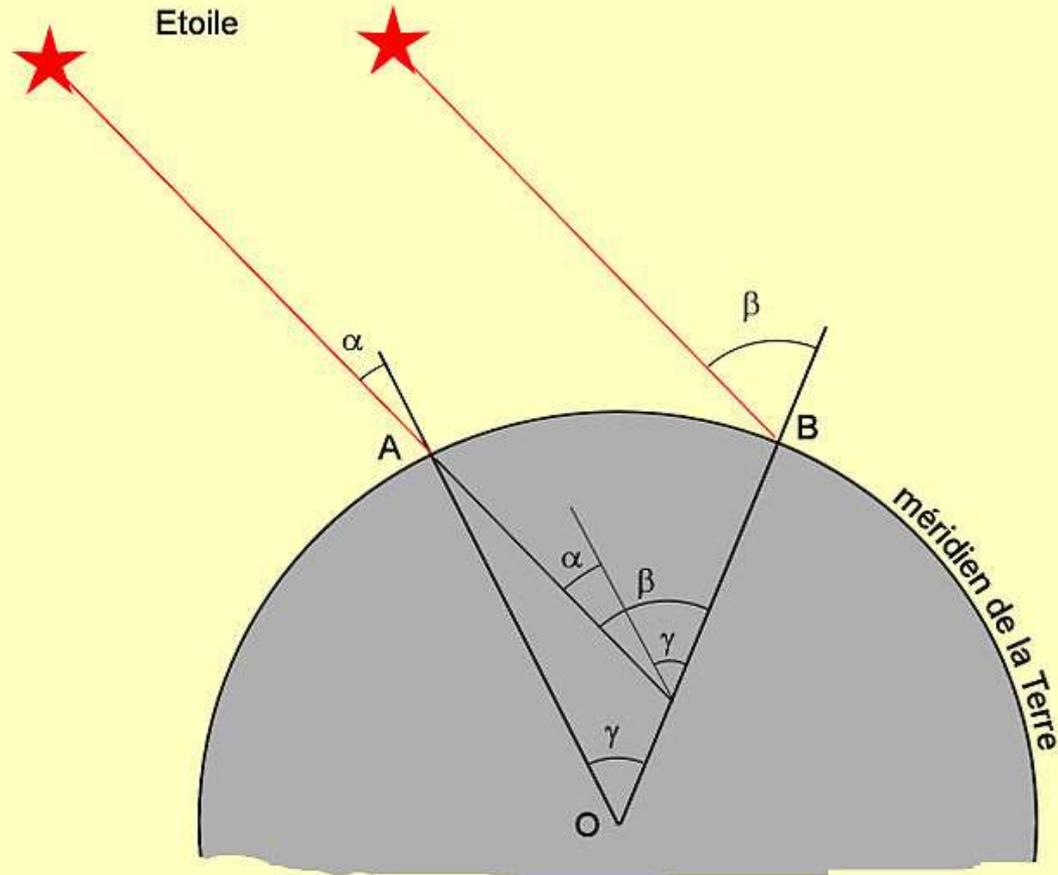
- Les problèmes liés à la navigation:
 - Savoir où on se trouve en mer
 - Savoir tracer sa route à travers l'océan
 - Savoir se situer par rapport à une carte
- Savoir où on se trouve = savoir déterminer sa **longitude et sa latitude** à tout instant

La latitude



La latitude est égale à la hauteur de l'étoile polaire

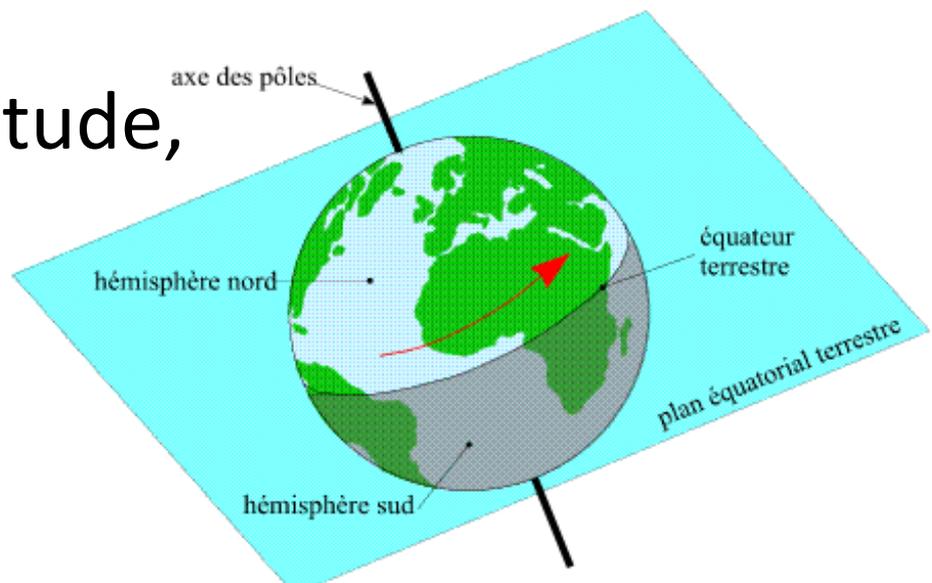
La latitude



- La différence de latitude entre deux lieux peut se mesurer avec n'importe quelle étoile
- Quand l'étoile passe au zénith du lieu la latitude est égale à la déclinaison de l'étoile

Le problème de la longitude

- 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 (de l'orientation de la Terre à un instant donné par rapport à la sphère céleste)
- Une différence de longitude, c'est le temps que met la Terre pour tourner de cet angle.





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

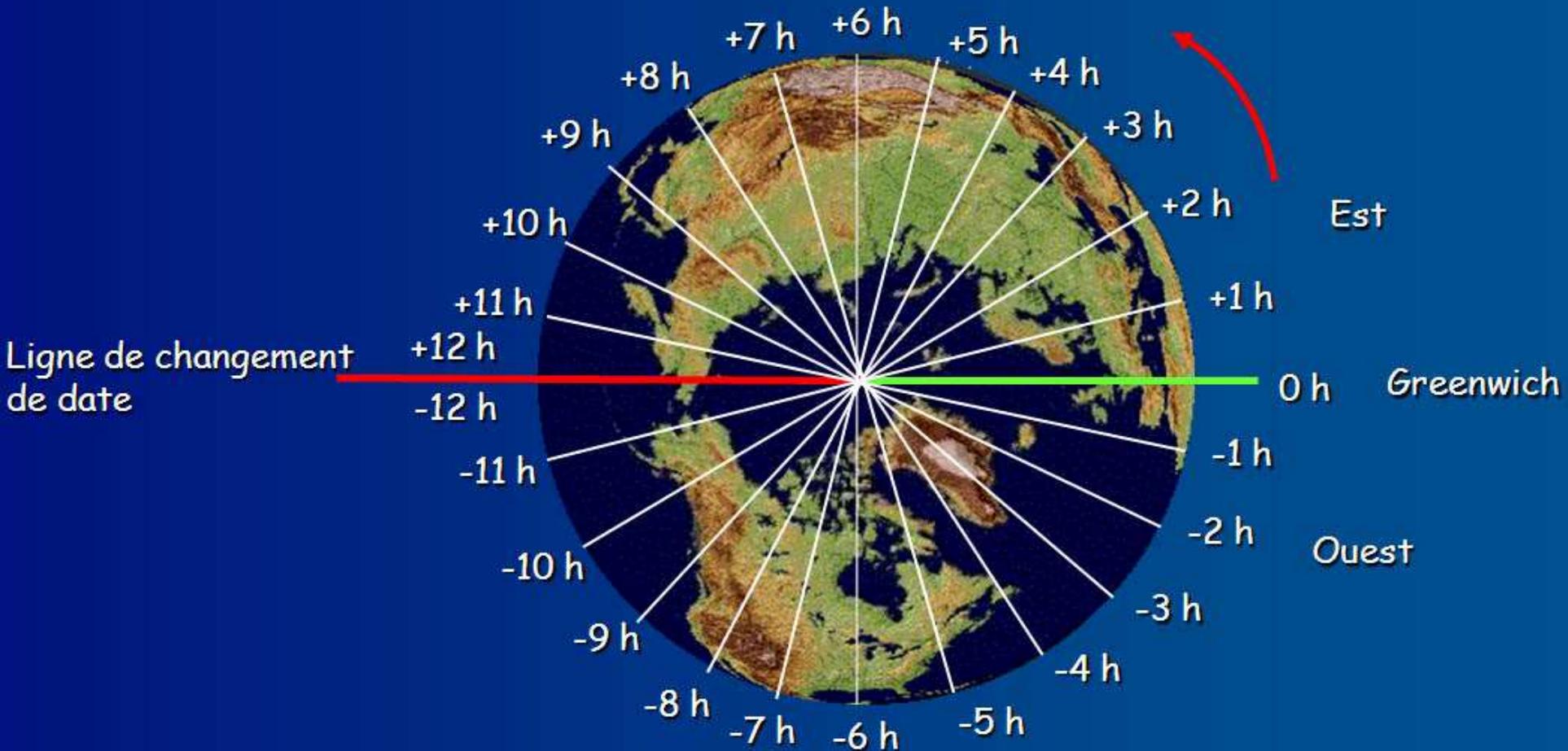
- Le Soleil culmine à midi local
- Le midi local varie d'un lieu à un autre en fonction de la longitude
 - S'il est midi à Paris, il sera plus tard plus à l'est et plus tôt plus à l'ouest
 - La différence, c'est la longitude, c'est proportionnel au temps qu'il faut à la Terre pour tourner et amener le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

Le temps solaire local



- Le cadran solaire donne une heure locale

Le temps solaire local

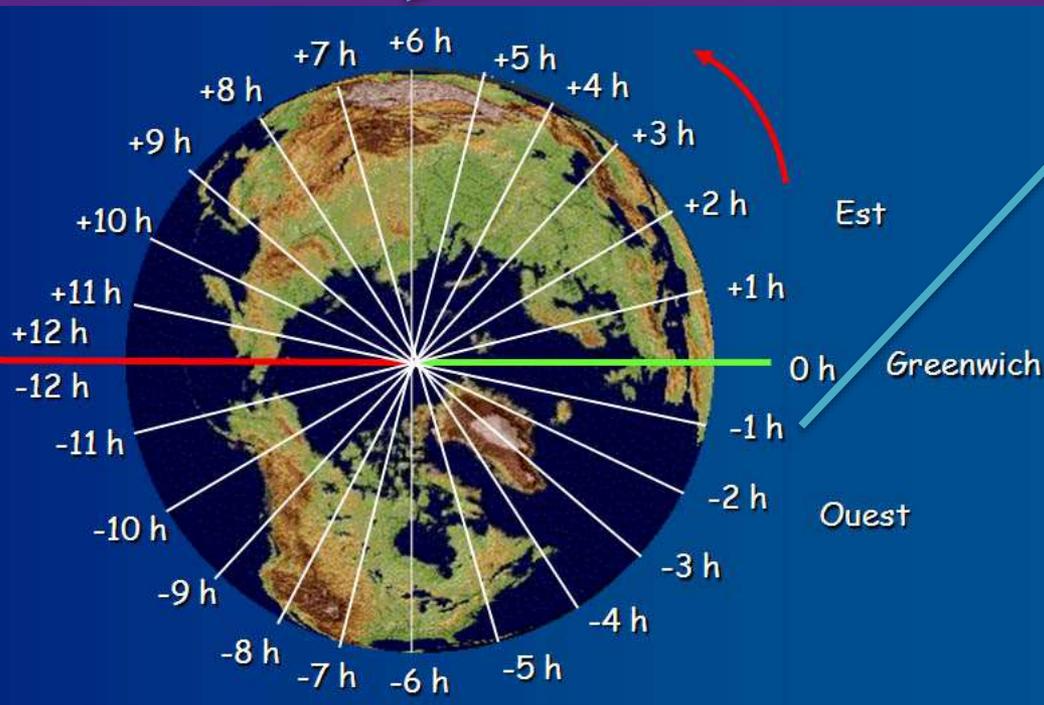


Temps et longitude sont liées

Le problème des longitudes

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

Savoir que l'on est à la même heure!
Et comparer les heures solaires locales



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



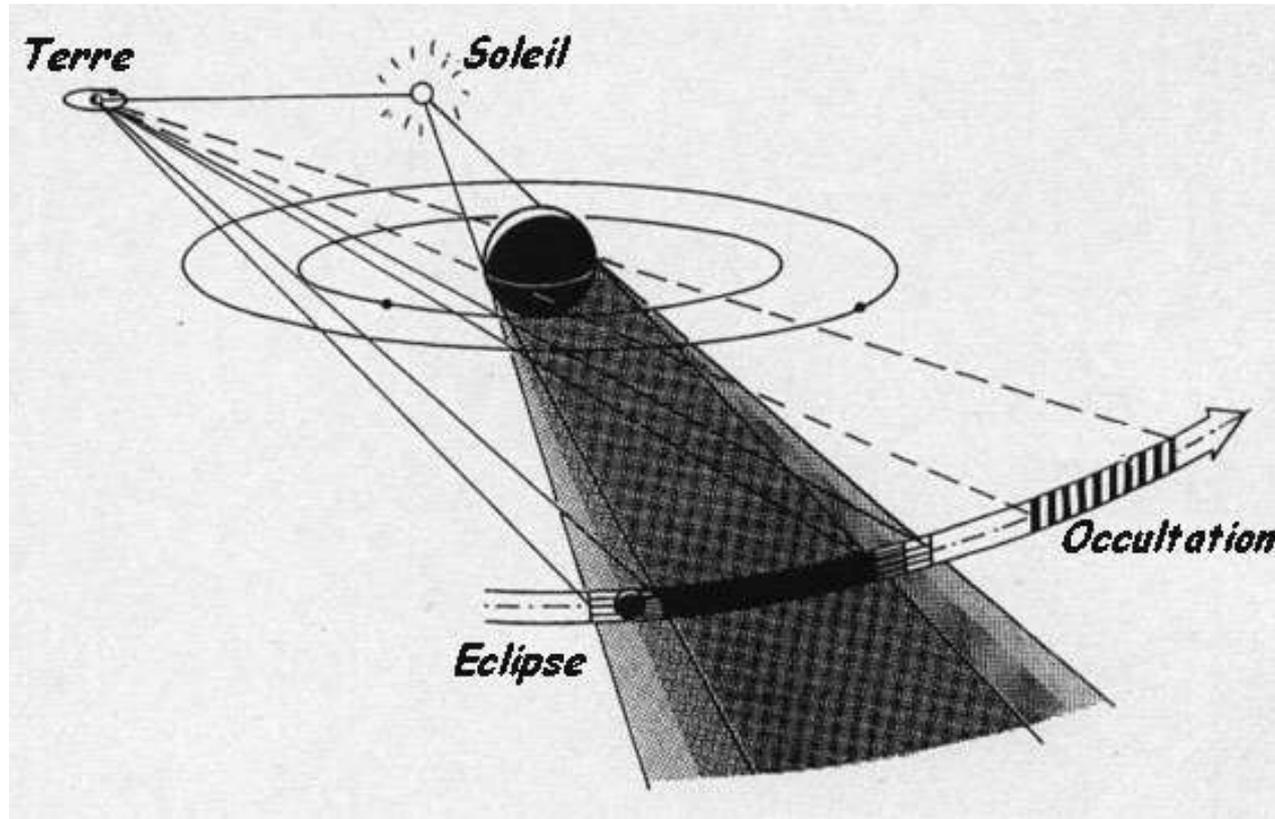
- Une éclipse de Lune facilement observable par tous

Les 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



Plus fréquentes: les éclipses des satellites de Jupiter



- 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)

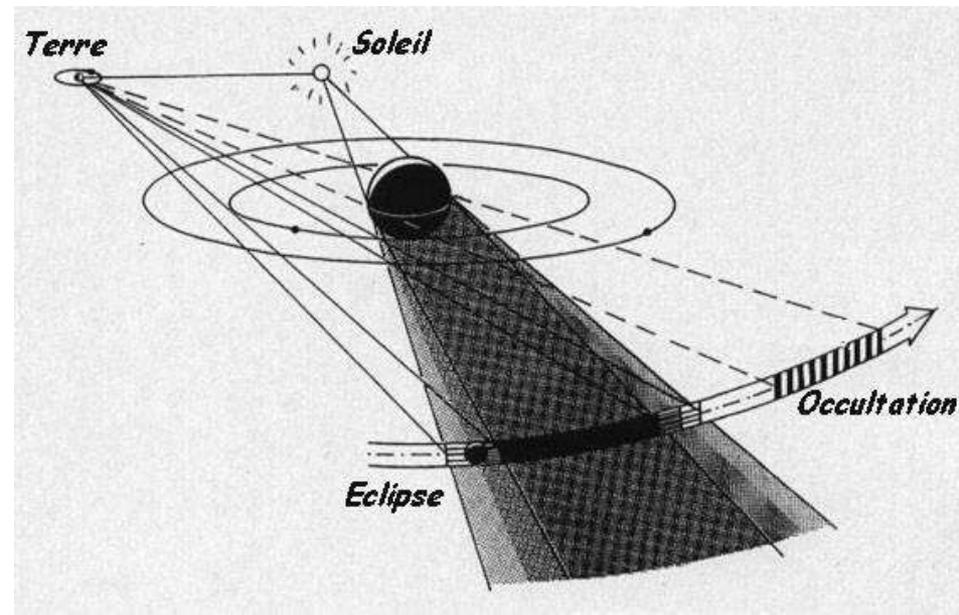








- Galilée entrevoit la possibilité de déterminer les longitudes géographiques grâce aux satellites de Jupiter avant même d'avoir vu une éclipse et essaie de vendre le principe à la cour d'Espagne!
- Les éclipses régulières sont une véritable horloge universelle visible par tous en tous lieux, bien plus intéressantes que les éclipses de Lune rares et imprécises
- Il y a deux utilisations des satellites pour les longitudes:
 - 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 18

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
-------------------------	-------

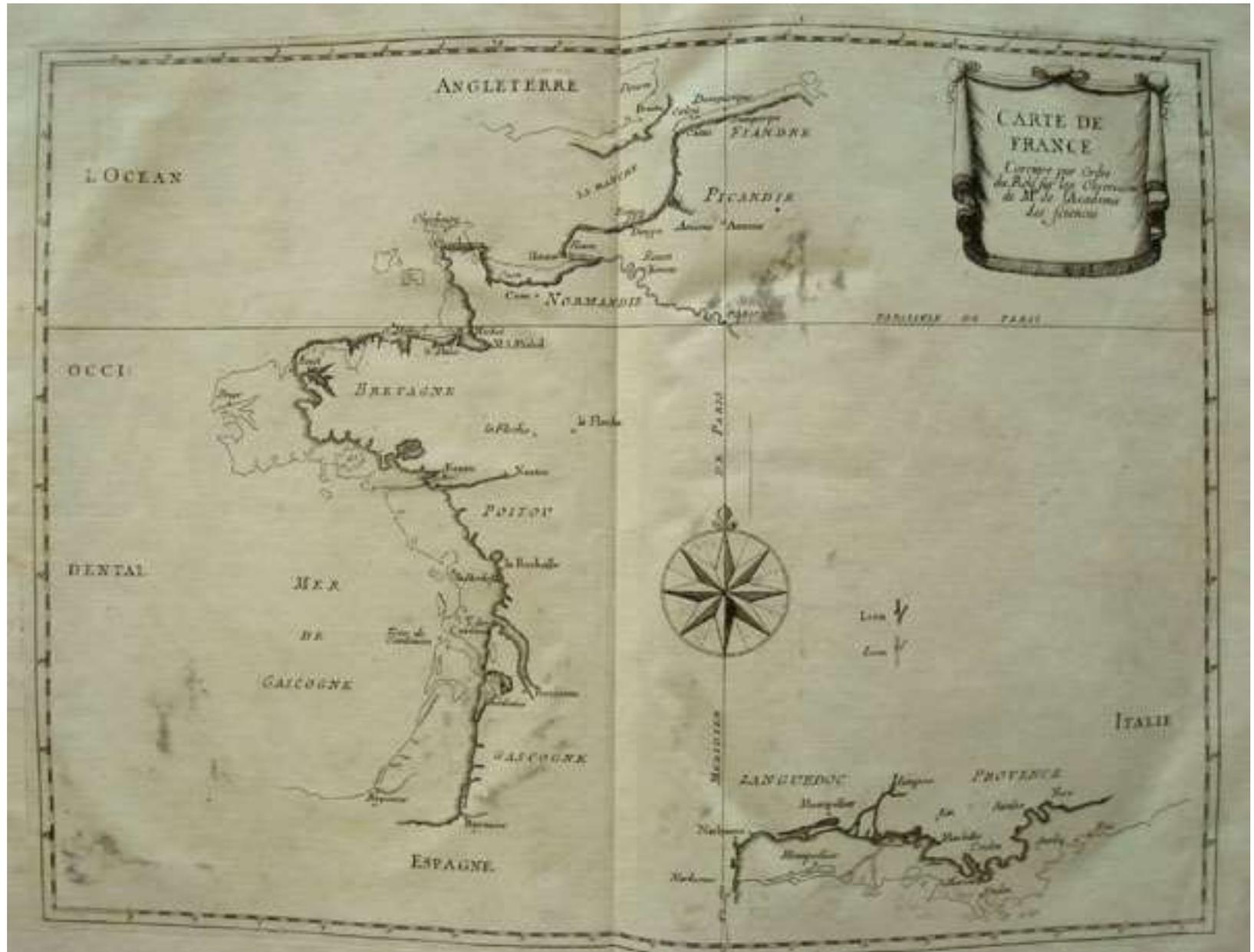
Par celle du 16. Aoust.	35 47
-------------------------	-------

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.

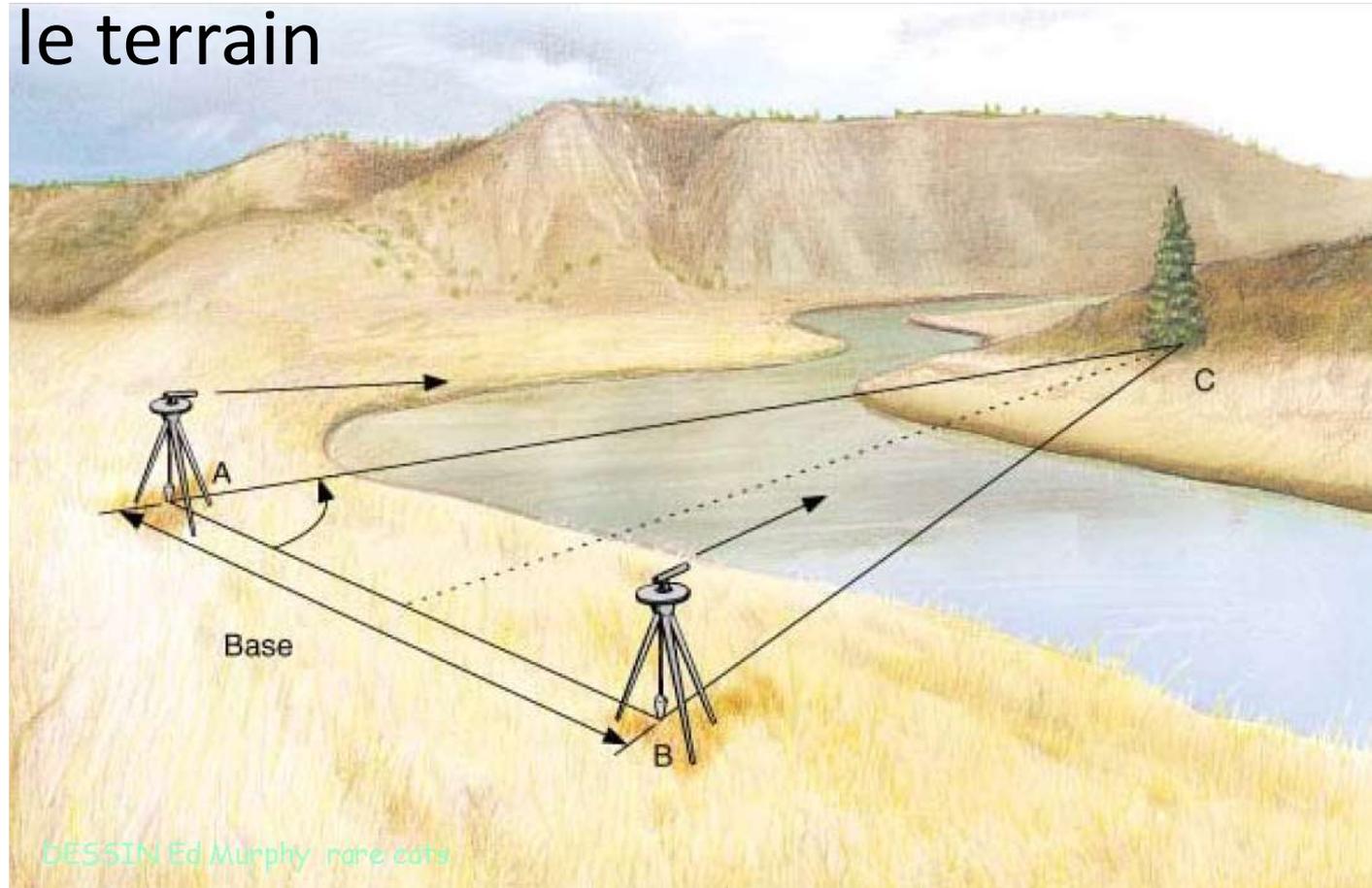
La première carte de France exacte

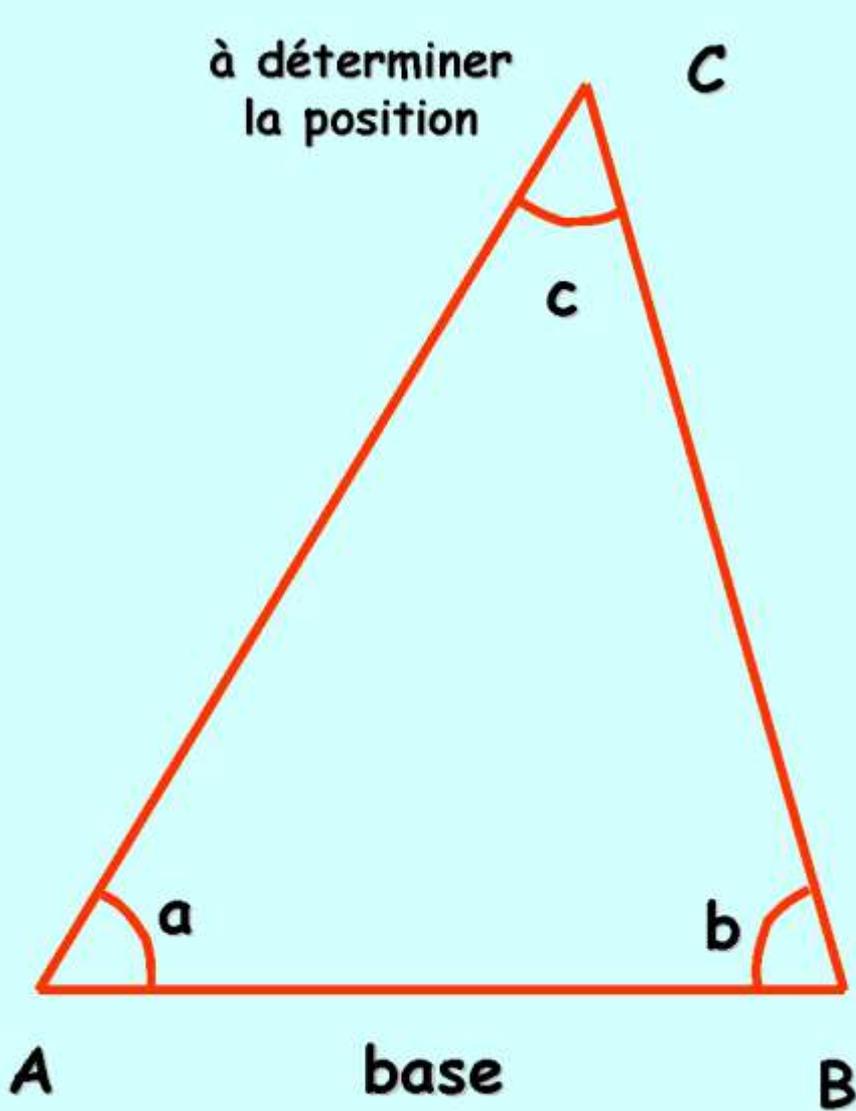


La triangulation

Faire correspondre angles et distances:

- Se rapporter au système de méridiens et parallèles
- Mesurer sur le terrain





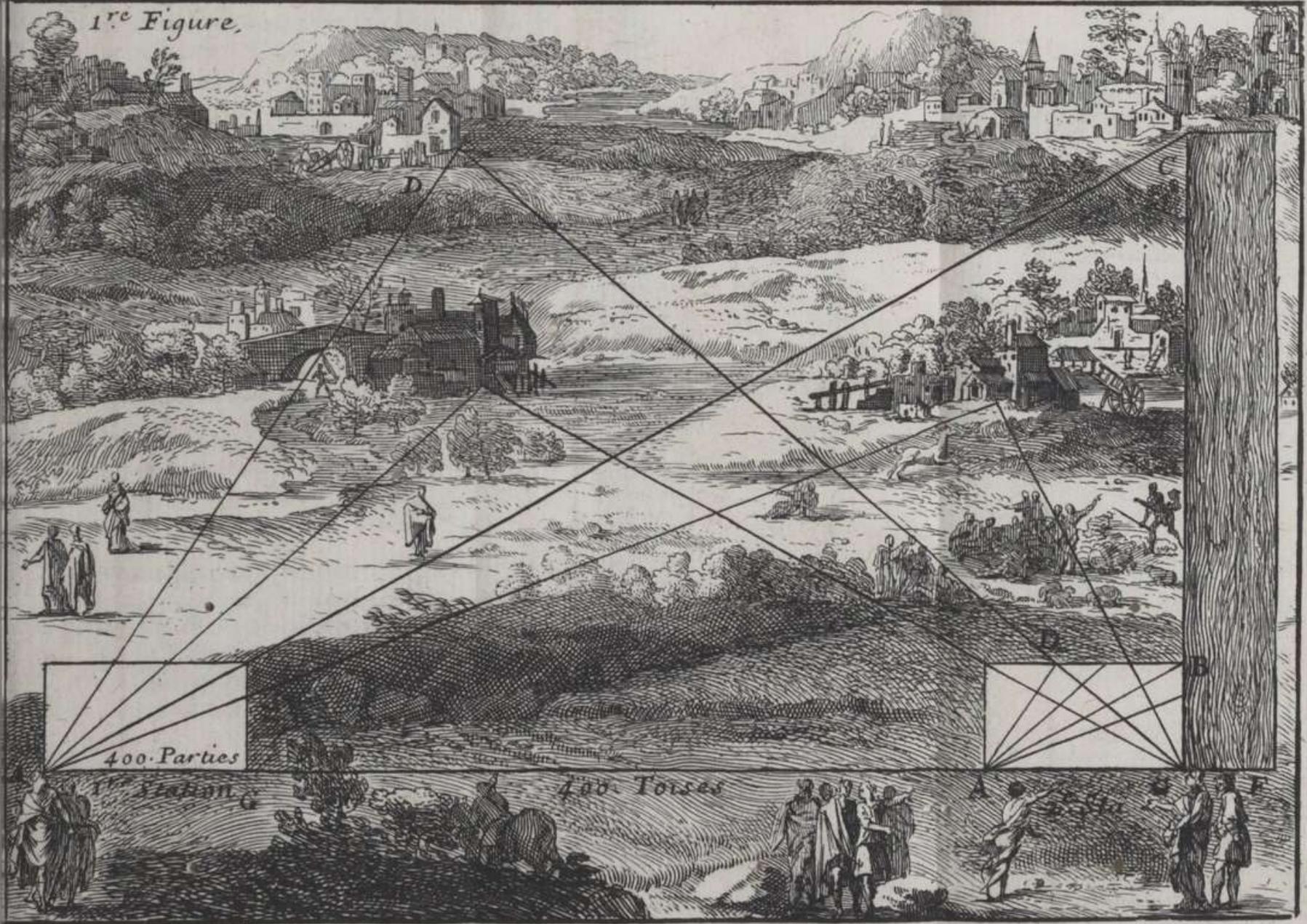
Angles a et b
connus

Distance entre
A et B connue

La Trigo :
détermine la
distance au
point C

$$\frac{\sin a}{BC} = \frac{\sin b}{AC} = \frac{\sin c}{AB}$$

1^{re} Figure,



400. Parties

1^{re} Station

400. Toises

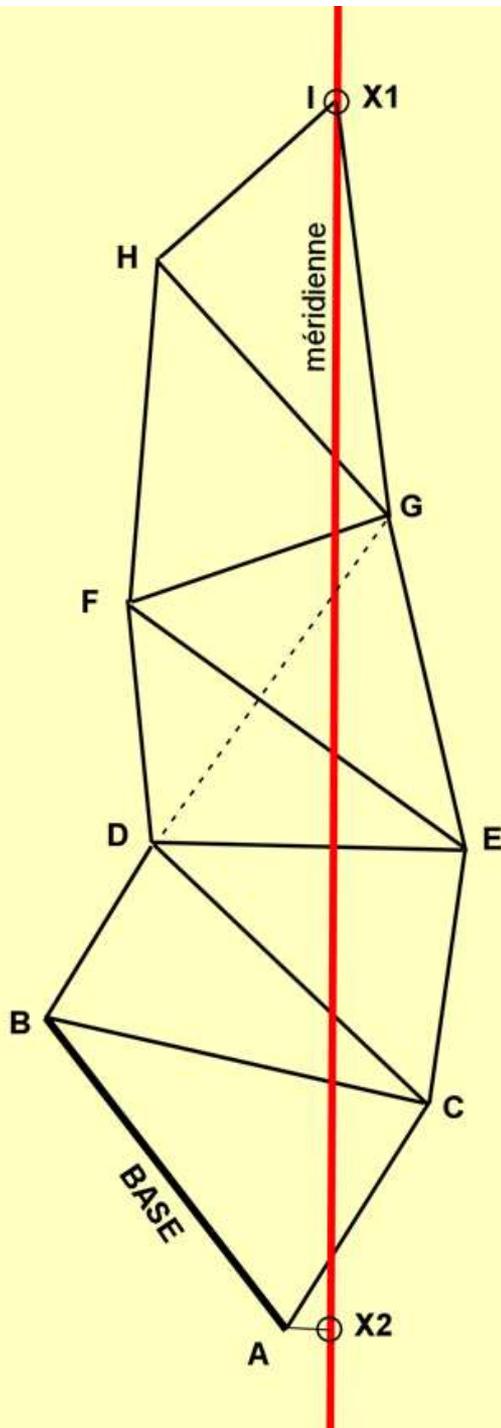
B

D

C

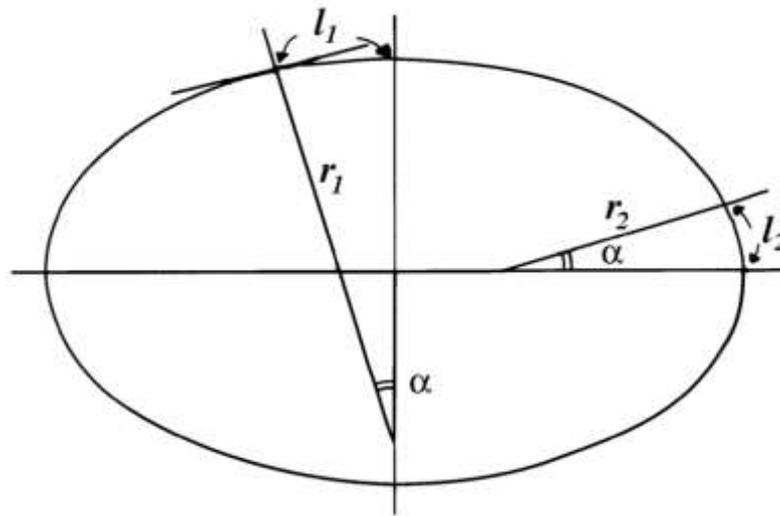
Mesure de la méridienne

- Faire le lien entre les kilomètres sur le terrain et les angles des longitudes/latitudes



Pourquoi mesurer un arc de méridien?

- Pour cartographier le pays (méridienne de Cassini en 1667)
- Pour mesurer l'aplatissement de la Terre (1735)
 - Mesurer un arc à l'équateur
 - Mesurer le même arc au pôle



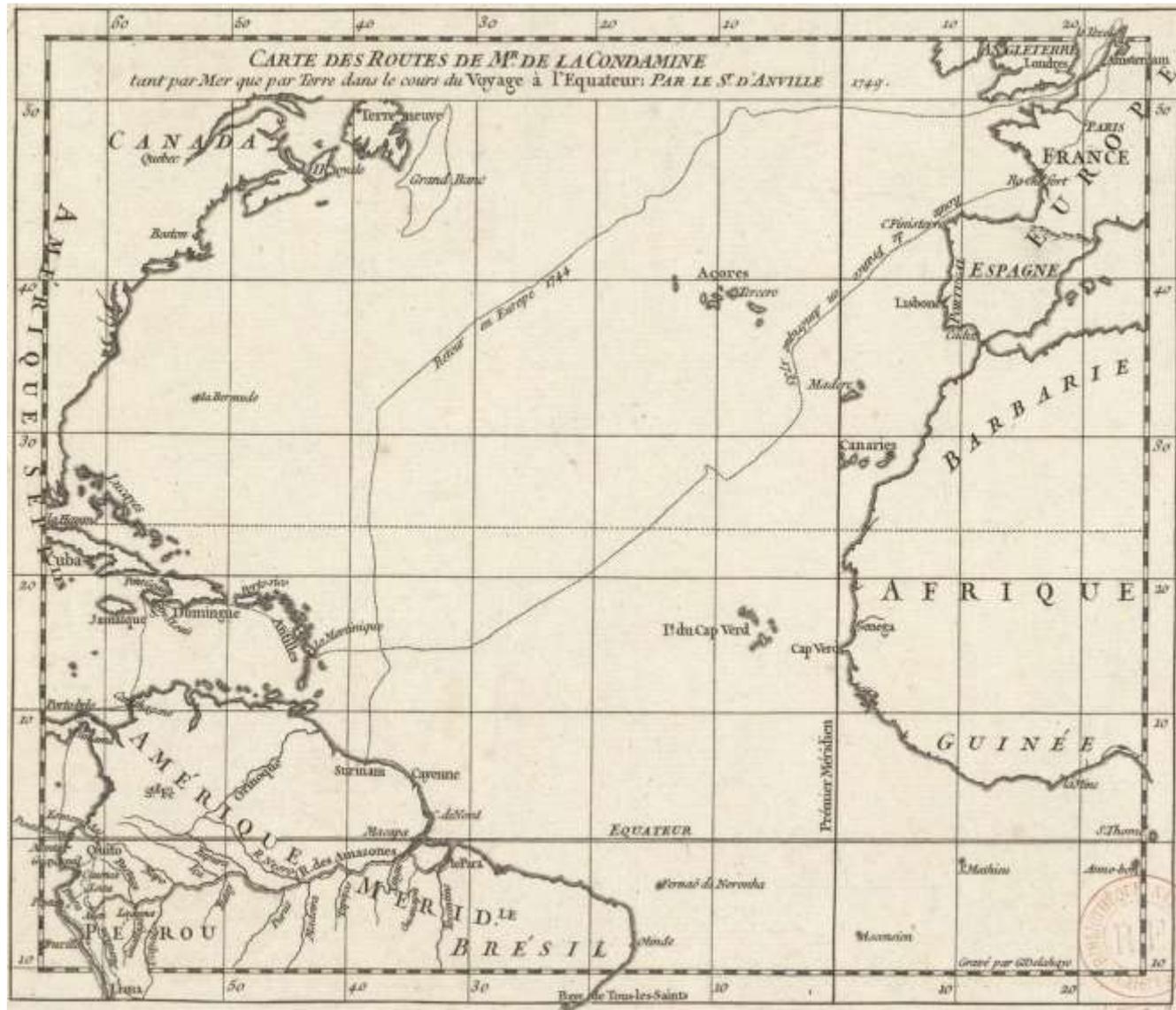
- Définir la longueur du mètre = $1/10\,000\,000$ du quart du méridien (1790)

Des mesures difficiles en 1735

Maupertuis en
Laponie

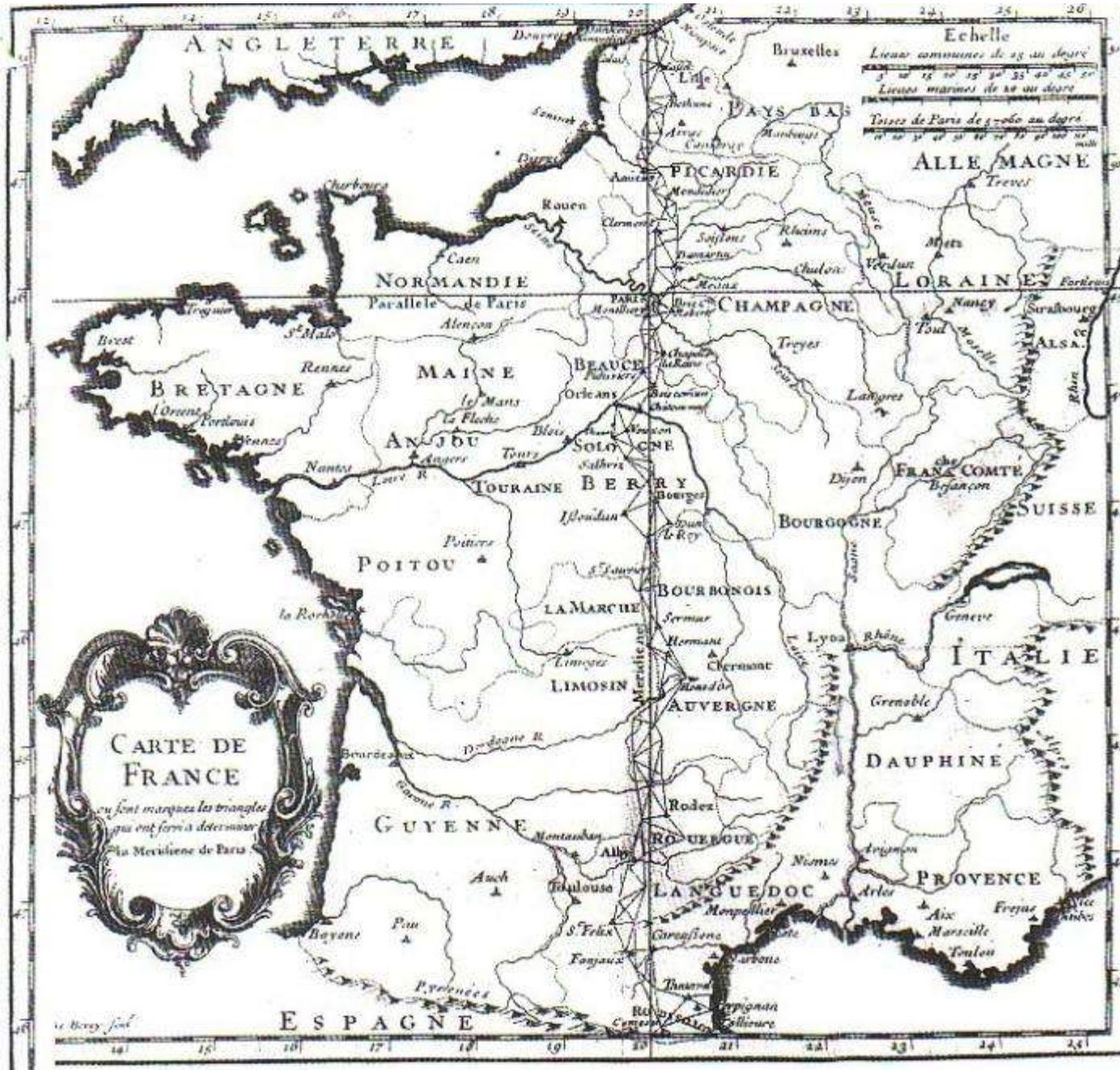
La Condamine à
l'équateur

Zone de mesure



Des mesures difficiles en 1791

- Delambre et Méchain de Dunkerque à Barcelone pour définir le mètre



La carte de l'Europe



Les pays européens vont cartographier leur territoire à partir de la triangulation française.

La carte de l'Europe



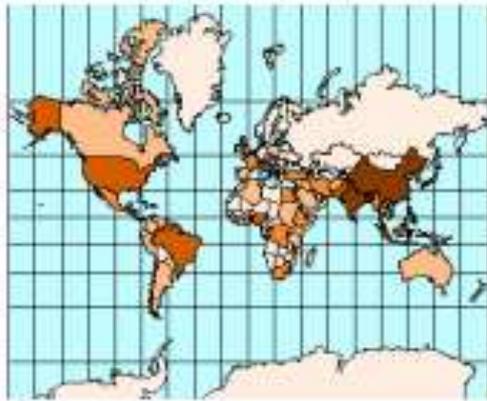
Comment projeter une sphère sur un plan?

Le problème de la projection



Projeter la carte sphérique sur un plan

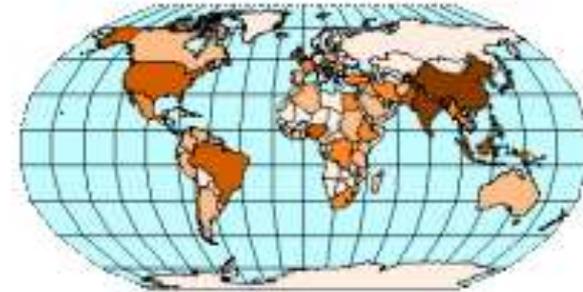
Le problème de la projection



Projection Cylindrique
Exemple : UTM



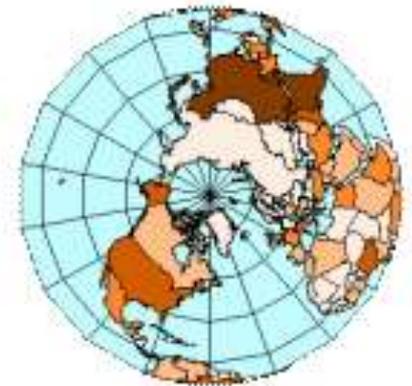
Projection Conique Conforme
Exemple : Lambert II



Projection Pseudo-cylindrique
Exemple : Robinson



Projection Elliptique
Exemple : Mollweide



Projection Azimutale

Le globe terrestre est sphérique et la carte est plate

Les progrès de la cartographie

XVIIIème
siècle



1850



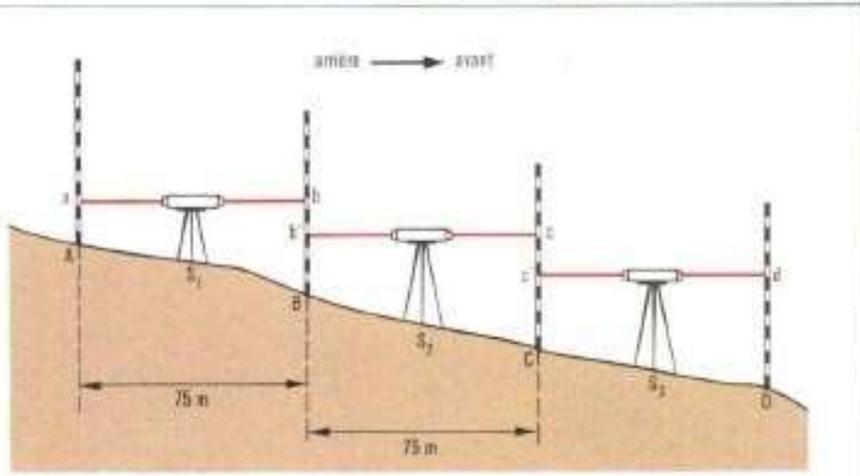
1950



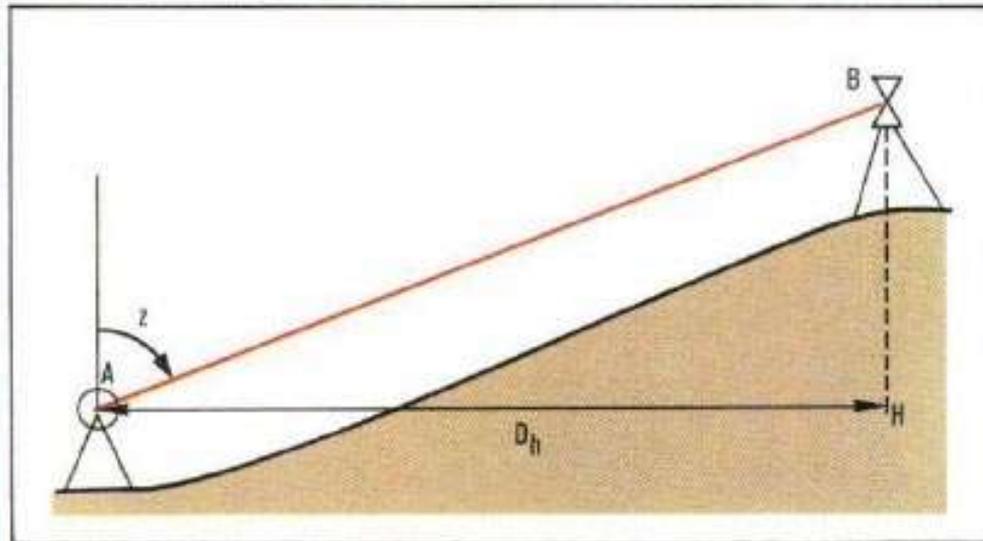
2020



Le problème du nivellement



Mesure de la dénivellée:

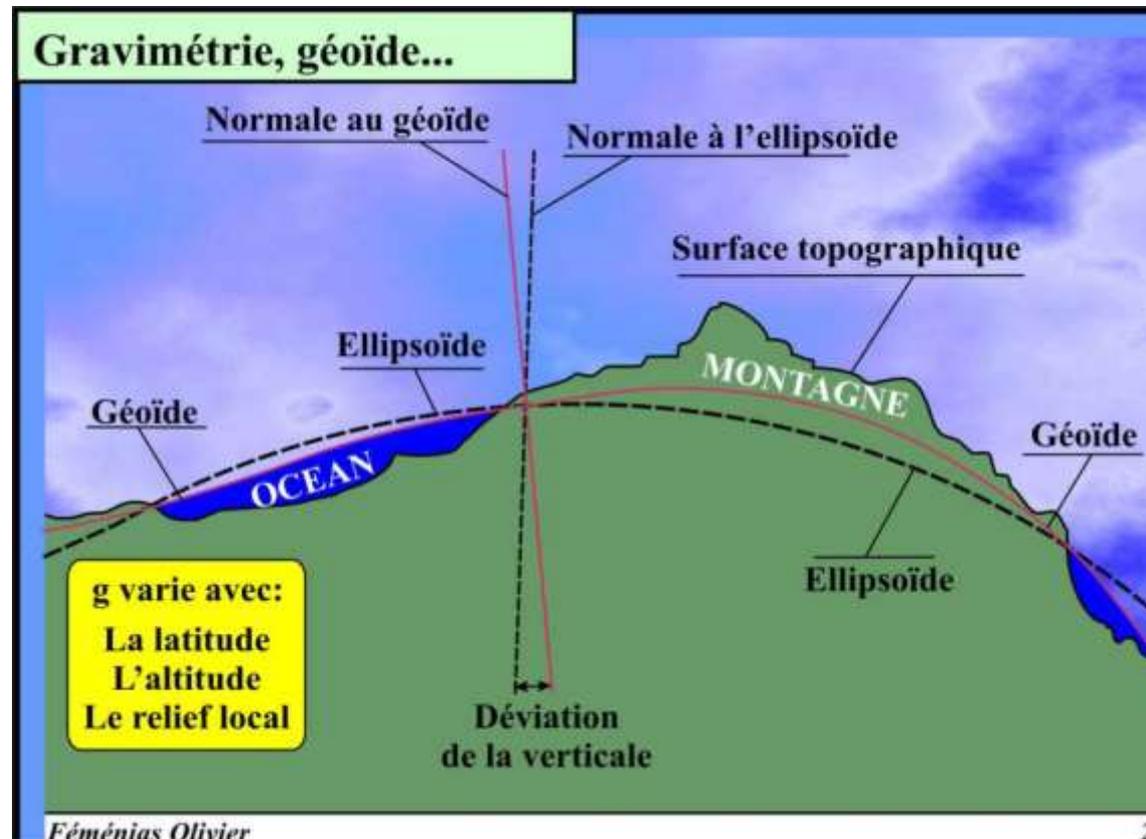
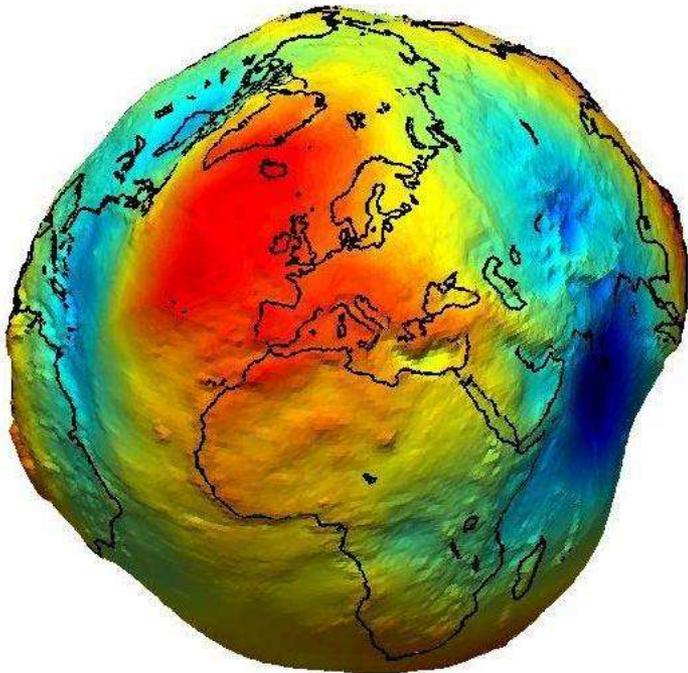


Nivellement géodésique

Il faut déterminer un niveau « zéro »

Le niveau « zéro » des altitudes

- Définir une surface de référence
 - Ce n'est ni une sphère, ni un ellipsoïde
 - C'est le « géoïde » prolongement de la surface moyenne des océans



Unifier les systèmes géodésiques



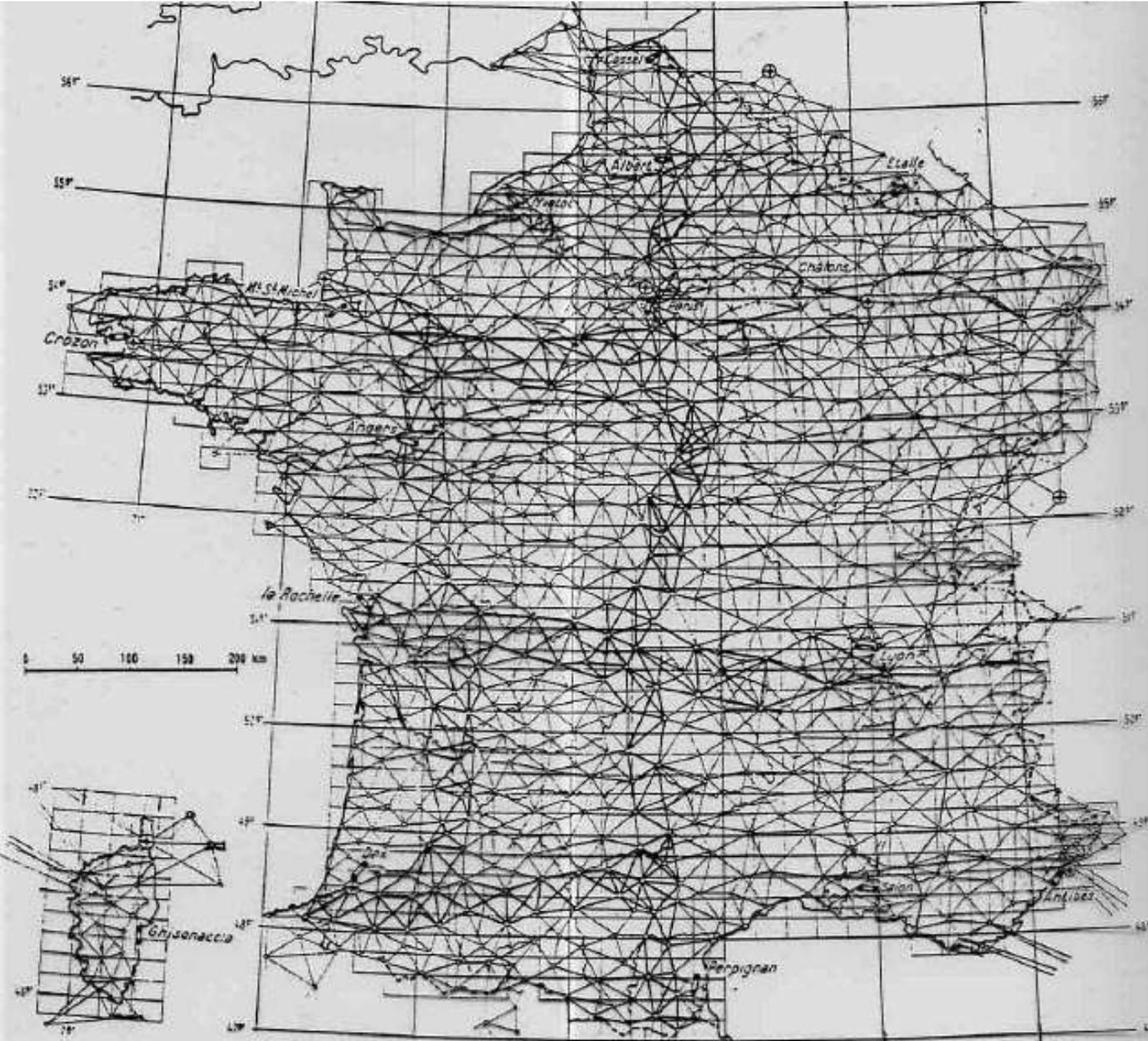
Le pont de Laufenburg (2003) sur le Rhin: une différence de hauteur de 54 cm

← Suisse

Allemagne →

Erreur de conception lors de la construction du pont à Laufenburg (2003) : lors de la construction du pont de l'autre côté du Rhin à Laufenburg, un contrôle a montré qu'une différence de hauteur de 54 centimètres existe entre le pont construit du côté suisse et la chaussée du côté allemand côté. La raison de l'erreur est le fait que les horizons du côté allemand et suisse sont basés sur différents référentiels. L'Allemagne fait référence au niveau de la mer du Nord, la Suisse au le méditerranéen.

Triangulation du territoire



- Le réseau de la « Nouvelle Triangulation Française » (NTF)

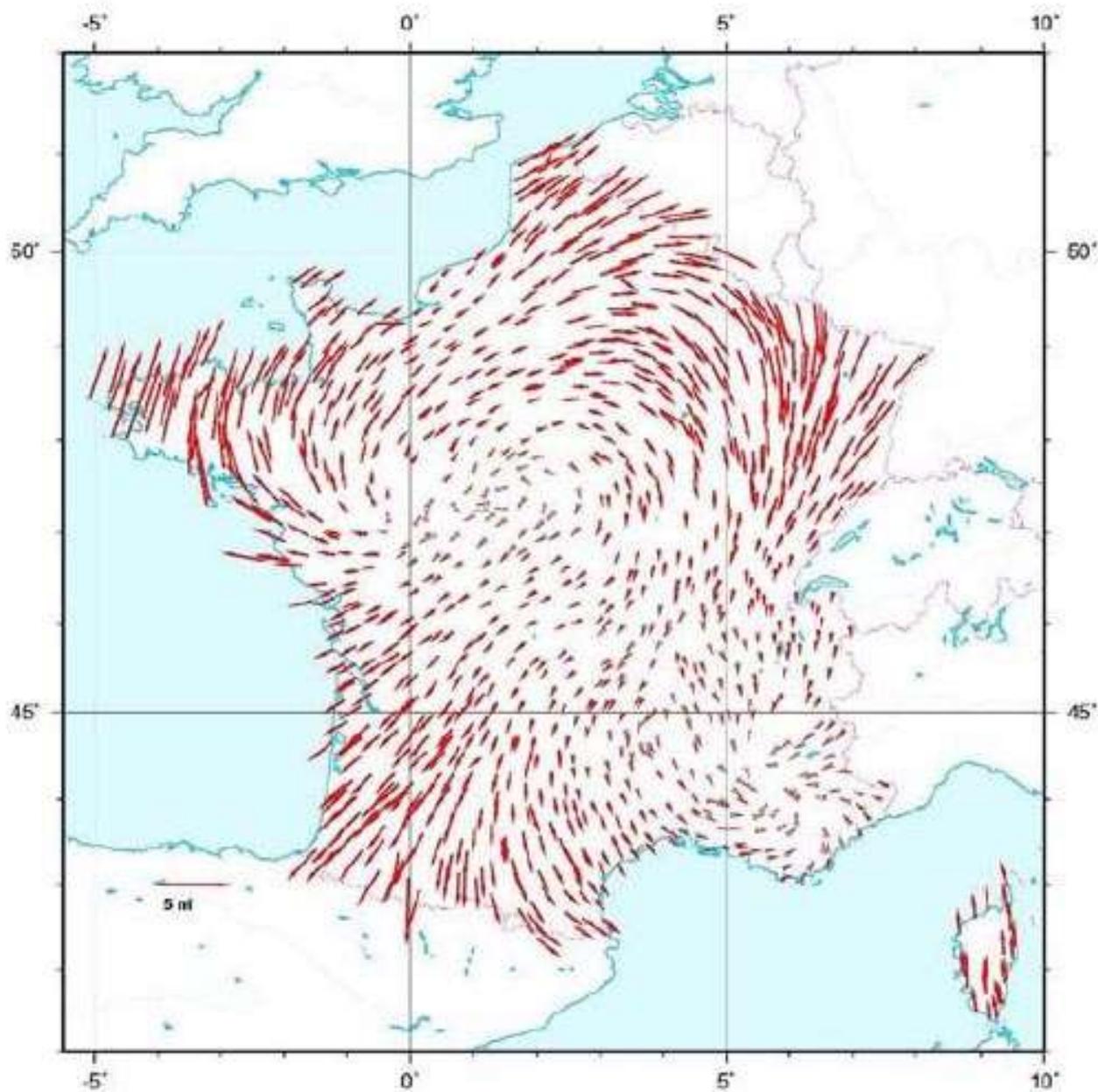
Le réseau géodésique français



- Le réseau géodésique français construit avec les satellites géodésiques à partir de 2001 (RGF93)

NTF --> RGF93

ECARTS A LA TRANSFORMATION STANDARD



L'écart
terrain-
espace

Le repère géodésique RGF93

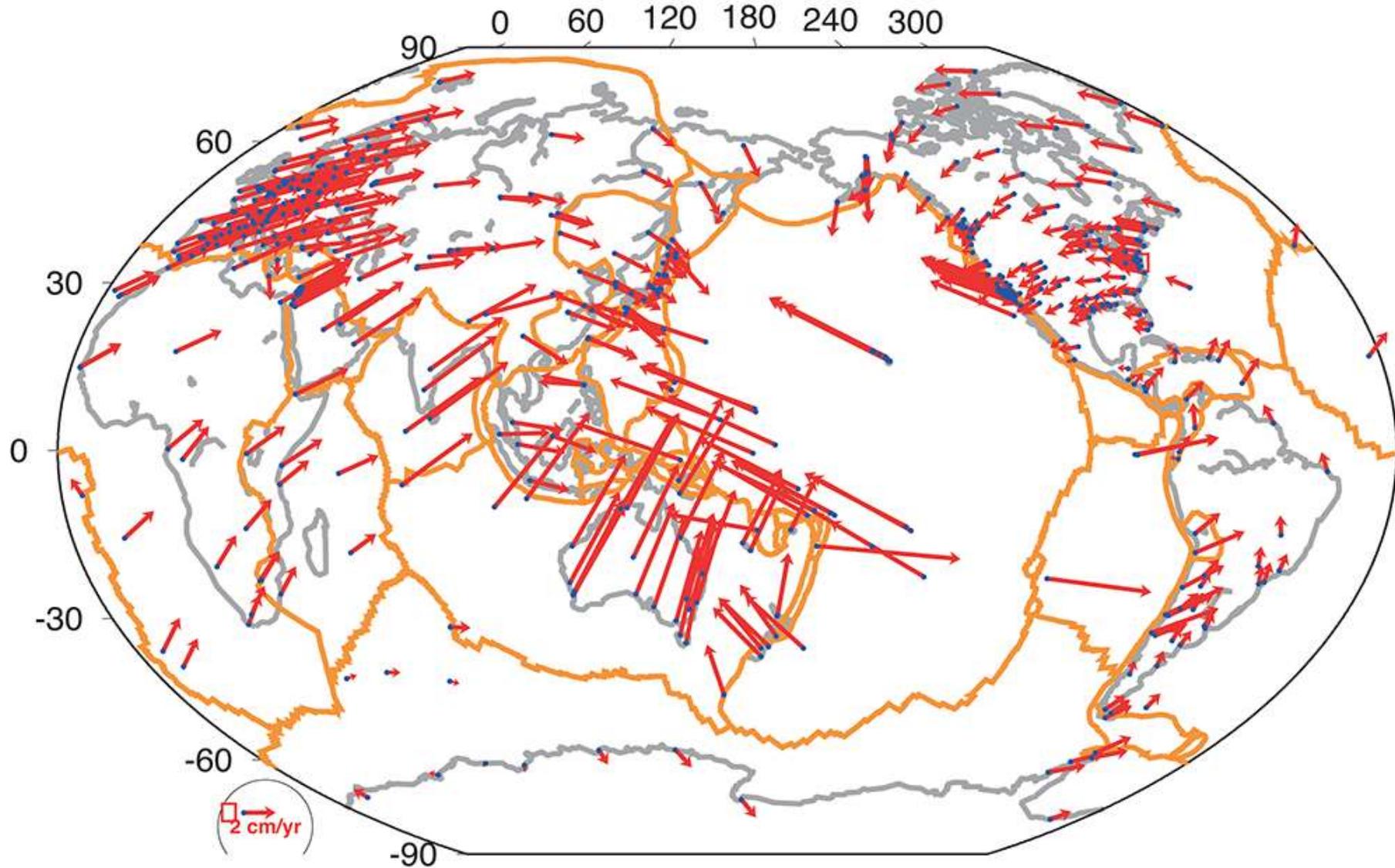
Les coordonnées planimétriques d'un point en RGF93 sont de deux types :

- géographiques : longitude, latitude (λ , ϕ) en unités d'angle ;
- cartésiennes : est, nord (x , y) en unités de longueur.

La précision de ce référentiel est différente selon le plan de mesure :

- 2 cm en planimétrie ;
- 2 à 5 cm en altimétrie.

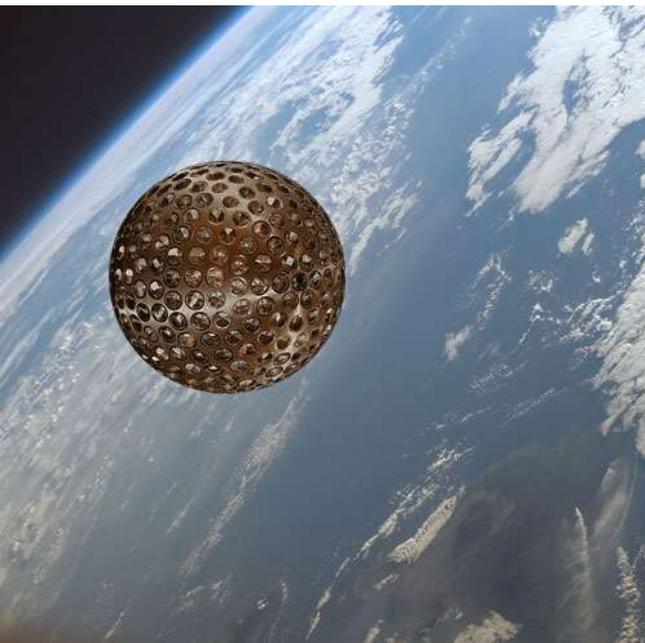
La précision des relevés géodésiques



Mesure de la dérive des continents grâce aux satellites géodésiques



Doris

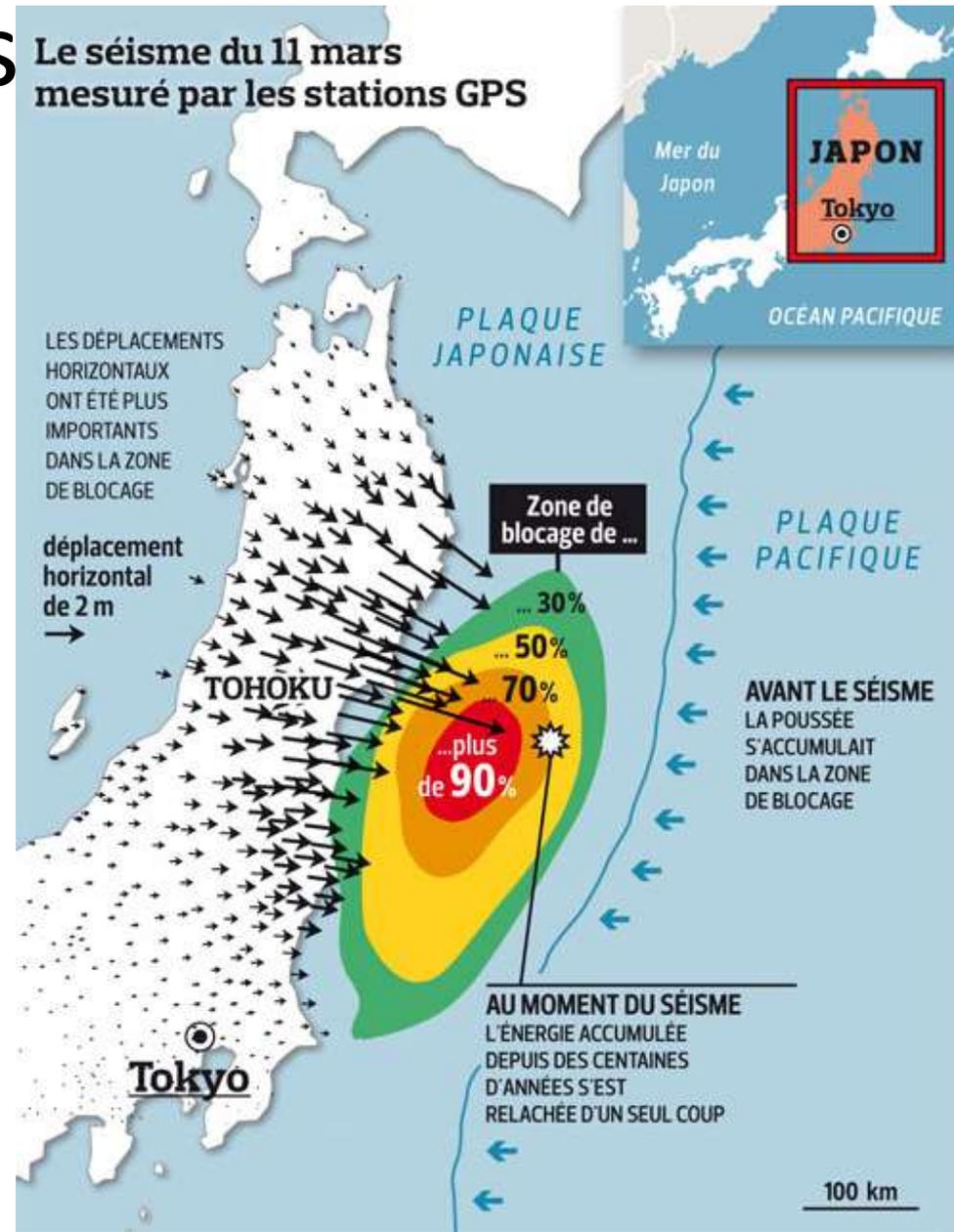


← LAGEOS

La précision des relevés géodésiques

- Le cas du Japon

Les satellites au service de tous → le GPS



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 (d'un « garde-temps »)
 - 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: historique

- 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 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"...

JANVIER 1855.

T. m. de Paris.			T. m. de Paris.				
	Distances.	Dif.		Distances.	Dif.		
* de Pégase O.	1 ^h 0 ^m	87°58'12"	1°23'12"	Saturne O.	2 ^h 0 ^m	22°56'36"	1°29'34"
	3	89.21.24	1.23. 6		3	24. 6.10	1.29.34
	6	90.44.50	1.23. 0		6	25.55.44	1.29.34
	9	92. 7.50	1.22.54		9	27. 5.18	1.29.34
	12	93.50.24	1.22.46		12	28.54.52	1.29.33
	15	94.53.10	1.22.38		15	50. 4.25	1.29.31
	18	96.15.48	1.22.30		18	51.55.56	1.29.29
	21	97.58.18	1.22.23		21	55. 5.25	1.29.27
24	99. 0.41		24	54.52.52			
* du Bélier O.	1 0	44.51.56	1.27.30	Régulus E.	2 0	55.56.40	1.29.40
	3	46.19.26	1.27.32		3	54. 7. 0	1.29.33
	6	47.46.58	1.27.33		6	52.57.27	1.29.26
	9	49.14.51	1.27.34		9	51. 8. 1	1.29.20
	12	50.42. 5	1.27.37		12	49.58.41	1.29.14
	15	52. 9.42	1.27.38		15	48. 9.27	1.29. 8
	18	53.57.20	1.27.38		18	46.40.19	1.29. 1
	21	55. 4.58	1.27.39		21	45.11.18	1.28.55
24	56.52.57		24	45.42.25			
Régulus E.	1 0	67.58. 9	1.30.36	* du Bélier O.	5 0	68.15. 5	1.27.27
	3	66. 7.55	1.30.29		3	69.40.52	1.27.25
	6	64.57. 4	1.30.22		6	71. 7.57	1.27.22
	9	63. 6.42	1.30.15		9	72.55.19	1.27.20
	12	61.56.27	1.30. 7		12	74. 2.59	1.27.19
	15	60. 6.20	1.30. 0		15	75.29.58	1.27.17
	18	58.56.20	1.29.53		18	76.57.15	1.27.14
	21	57. 6.27	1.29.47		21	78.24.29	1.27.11
24	55.56.40		24	79.51.40			
* du Bélier O.	2 0	56.52.57	1.27.38	Alcôbran O.	5 0	57.58.19	1.27.44
	3	58. 0.15	1.27.37		3	59. 6. 5	1.27.45
	6	59.27.52	1.27.36		6	40.55.48	1.27.46
	9	60.55.28	1.27.34		9	42. 1.54	1.27.47
	12	62.25. 2	1.27.33		12	45.29.21	1.27.49
	15	63.50.55	1.27.32		15	44.57.10	1.27.50
	18	65.18. 7	1.27.30		18	46.25. 0	1.27.49
	21	66.45.57	1.27.28		21	47.52.49	1.27.49
24	68.15. 5		24	49.20.58			

La publication des
distances lunaires pour les
marins dans la
« *Connaissance des
temps* »

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

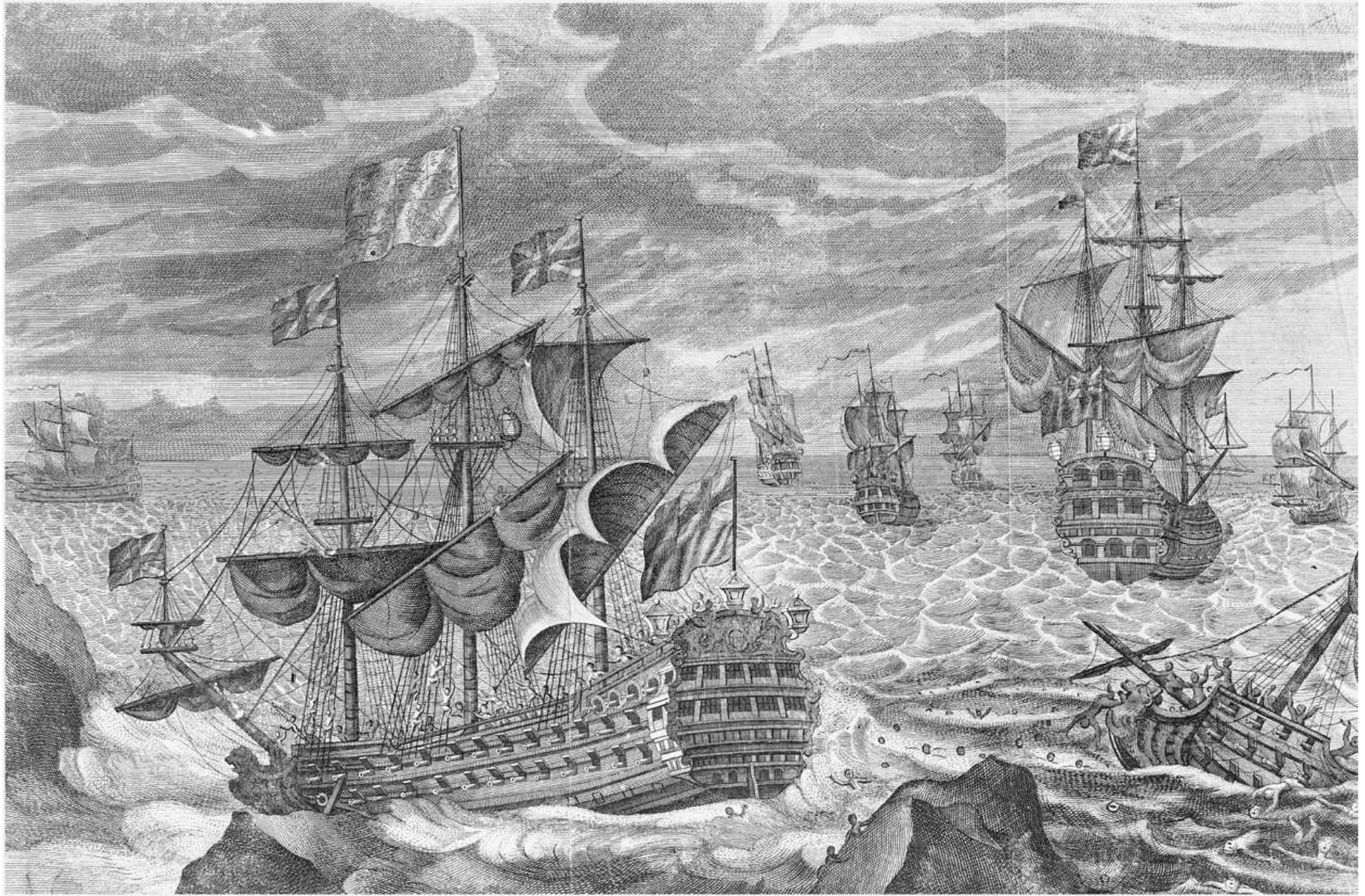


Le désastre naval du 22 octobre 1707: naufrage de la flotte anglaise au large des îles Scilly. Avec quatre vaisseaux de ligne et plus de 1 400 marins perdus en raison du mauvais temps et de l'incapacité des navigateurs d'alors de calculer précisément leur position.

Le naufrage des îles Scilly



Le naufrage des îles Scilly en 1707



Le naufrage des îles Scilly

Ce désastre incite les pouvoirs publics à trouver au plus vite une technique pour faire le point en mer.

→ 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.

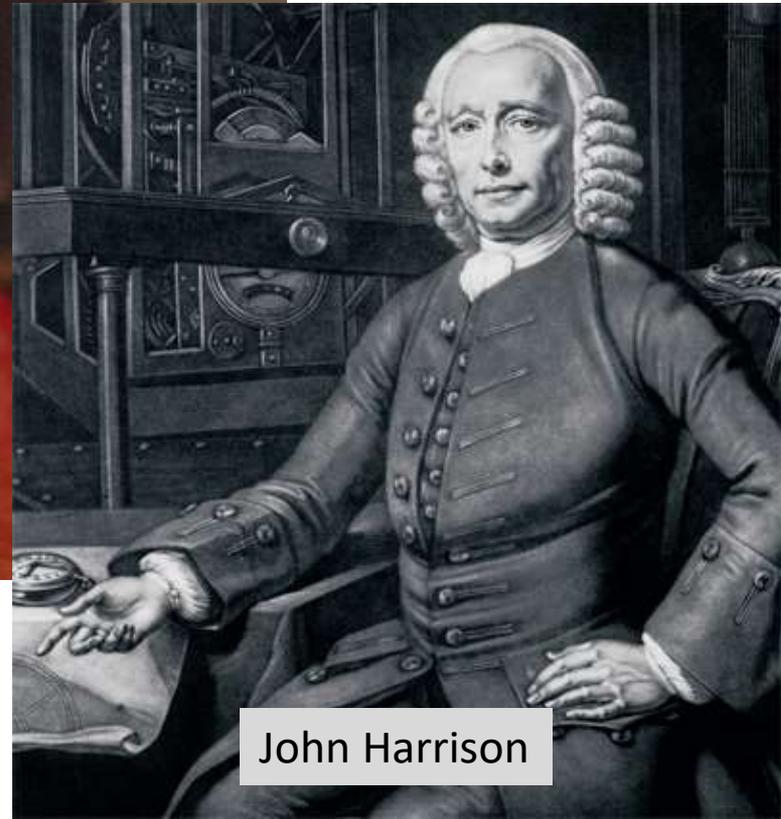
Il faudra attendre 1773 pour obtenir un premier résultat!

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 (carte du ciel à un instant donné)
- 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 débiter 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°

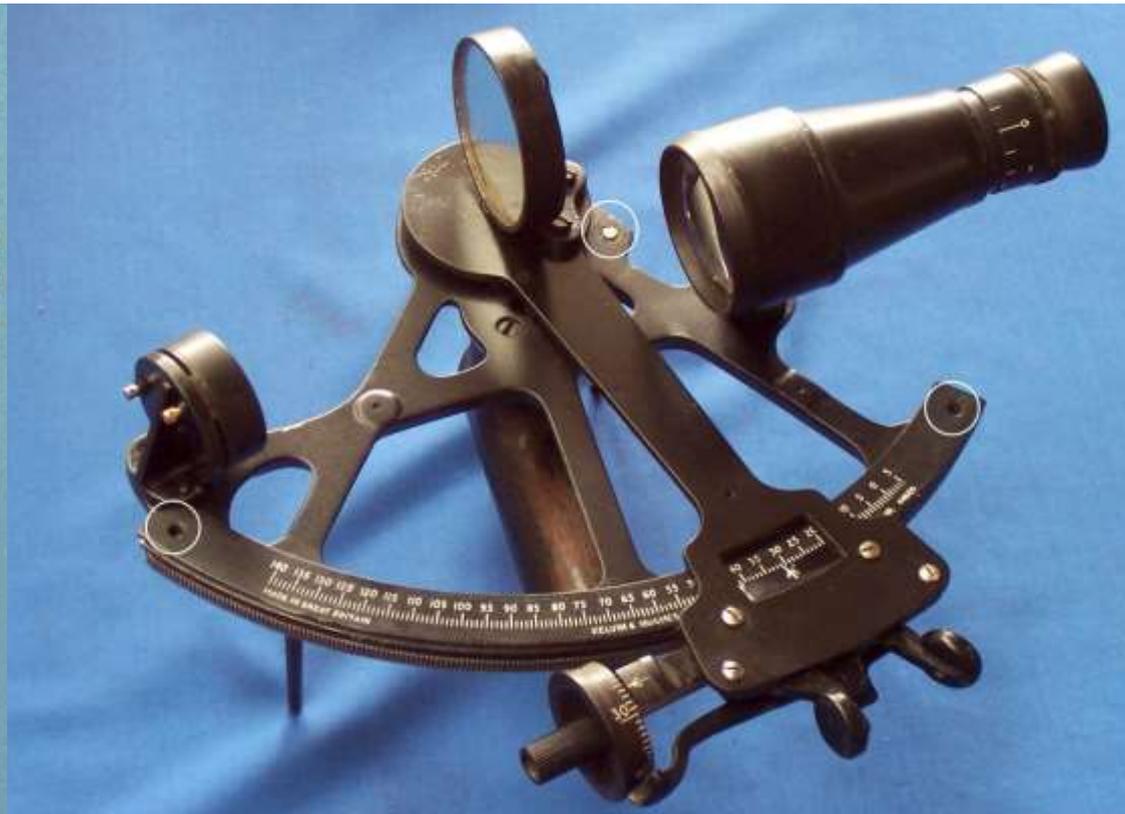
Sextant = $1/6$ de cercle pour mesurer des angles jusqu'à 120°



Le sextant



XVIIIème siècle

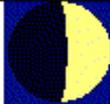


XXIème siècle

La navigation astronomique

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

Les éphémérides

MERCREDI 04 MARS 1998																			
Heure	SOLEIL			LUNE					Lever du Soleil			Coucher du Soleil			LATI-TUDE	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 ['] ^{''}	^o ['] ^{''}	^h ^m	^h ^m	^o	^o	^h ^m	^h ^m	^o	^h ^m ^m	^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	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	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	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	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	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	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	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	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	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	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	58,7	6 06	6 38	99	261	17 47	18 19	50 N	9 59 1,1	0 02 2,0		
11	342 03,0	6 25,2	265 50,7	8,2	15 26,8	6,2	58,6	58,6	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	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	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	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	58,5	5 56	6 18	97	264	18 06	18 28	20 N	10 54 1,4	P.D.C.	-	
16	57 03,6	6 20,4	338 06,7	8,2	15 56,7	5,7	58,5	58,5	5 52	6 13	96	264	18 11	18 32	10 N	11 06 1,4	23 56 1,6		
17	72 03,8	6 19,4	352 33,9	8,2	16 02,3	5,6	58,4	58,4	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	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	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	58,3	5 29	5 53	98	262	18 30	18 55	30 S	11 56 1,7	23 03 1,4		
21	132 04,3	6 15,6	50 22,9	8,3	16 23,9	5,1	58,3	58,3	5 24	5 50	99	262	18 34	18 59	35	12 05 1,8	22 54 1,3		
22	147 04,5	6 14,6	64 50,1	8,3	16 29,1	5,0	58,3	58,3	5 18	5 46	99	261	18 38	19 05	40	12 14 1,8	22 44 1,3		
23	162 04,6	6 13,7	79 17,4	8,3	16 34,1	4,9	58,2	58,2	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	58,2	5 02	5 35	101	259	18 47	19 20	50 S	12 39 1,9	22 18 1,2		
	1/2 Diam.=16,1	d=1,0	1/2 Diam.=16,0						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		MARS		JUPITER		SATURNE		Heure U.T.
		1 A _{Hao}	2 D	A _{Hao}	D	A _{Hao}	D	A _{Hao}	D	
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
 - On ne voit pas l'étoile polaire dans l'hémisphère sud

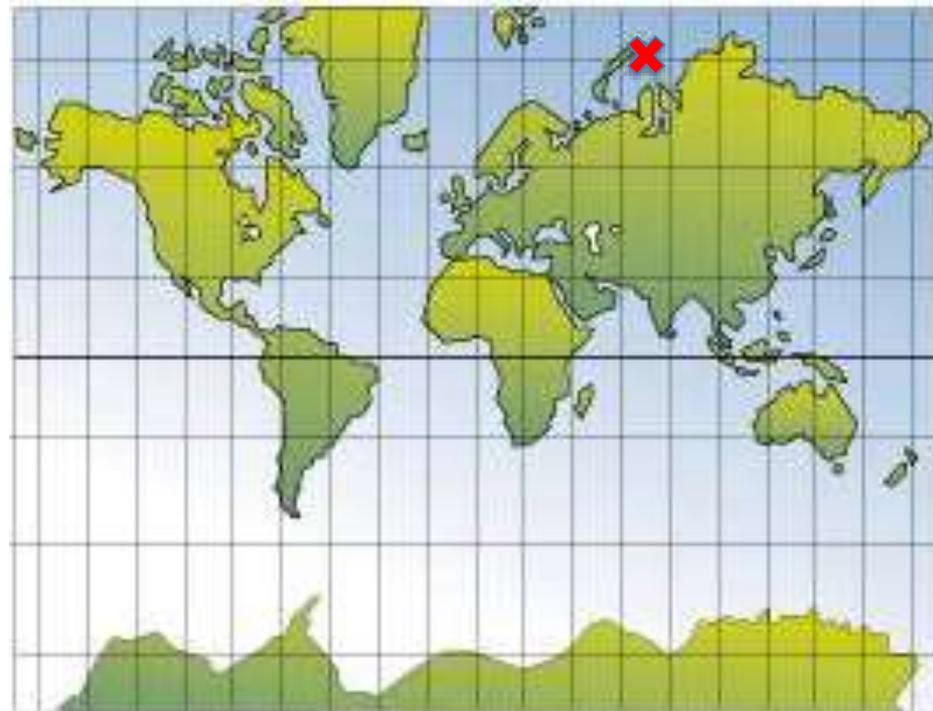
Faire le point en mer

- 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°

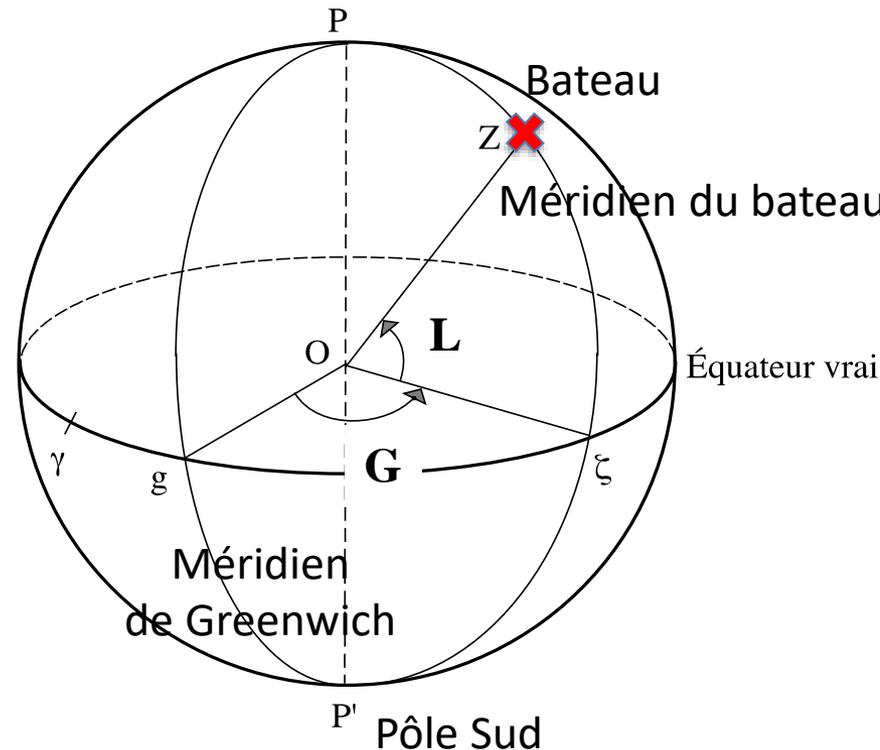
0°

30°

60°

75°

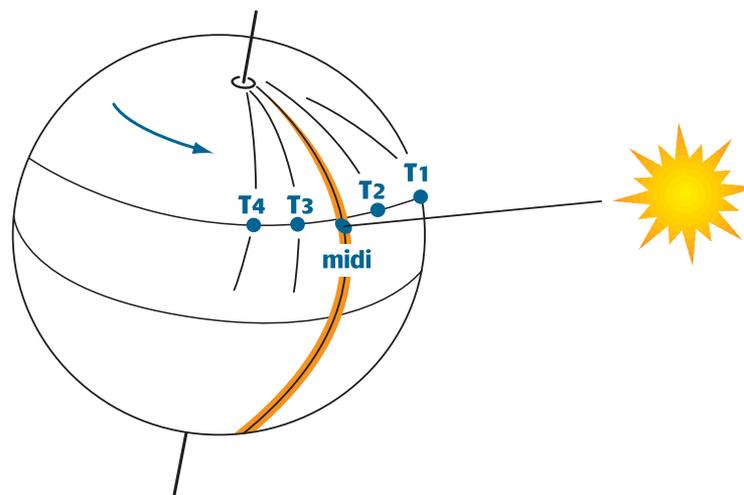
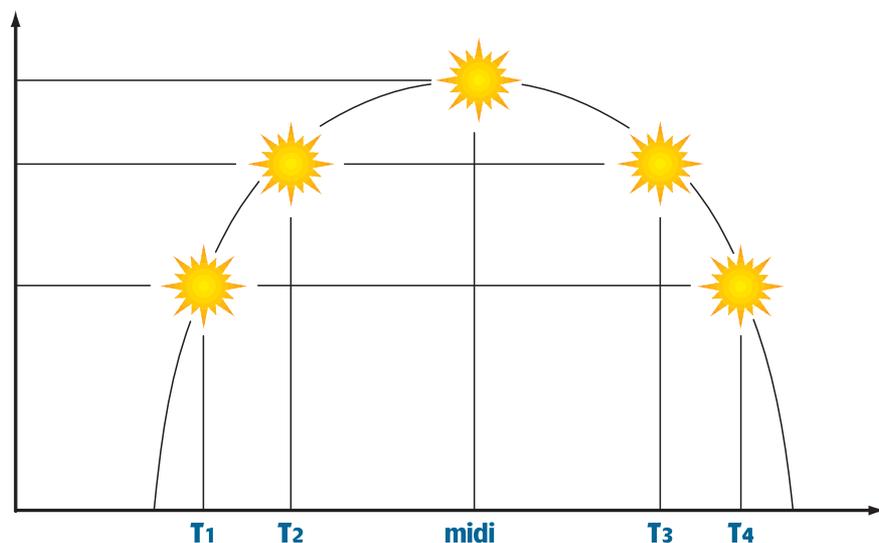
Longitude



Position estimée

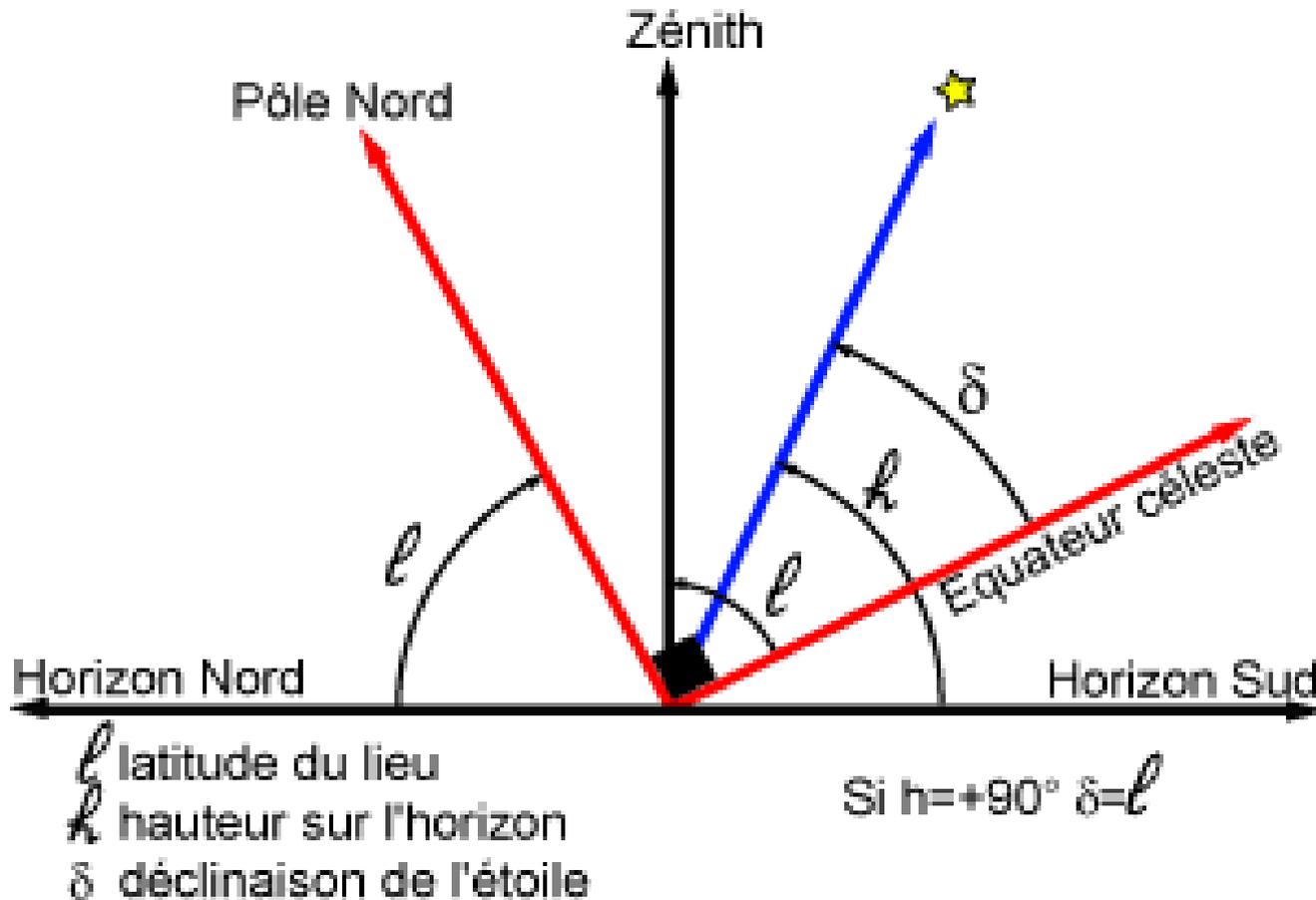
Principe de la mesure de la longitude

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



Midi locale, heure solaire
≠ heure à la montre

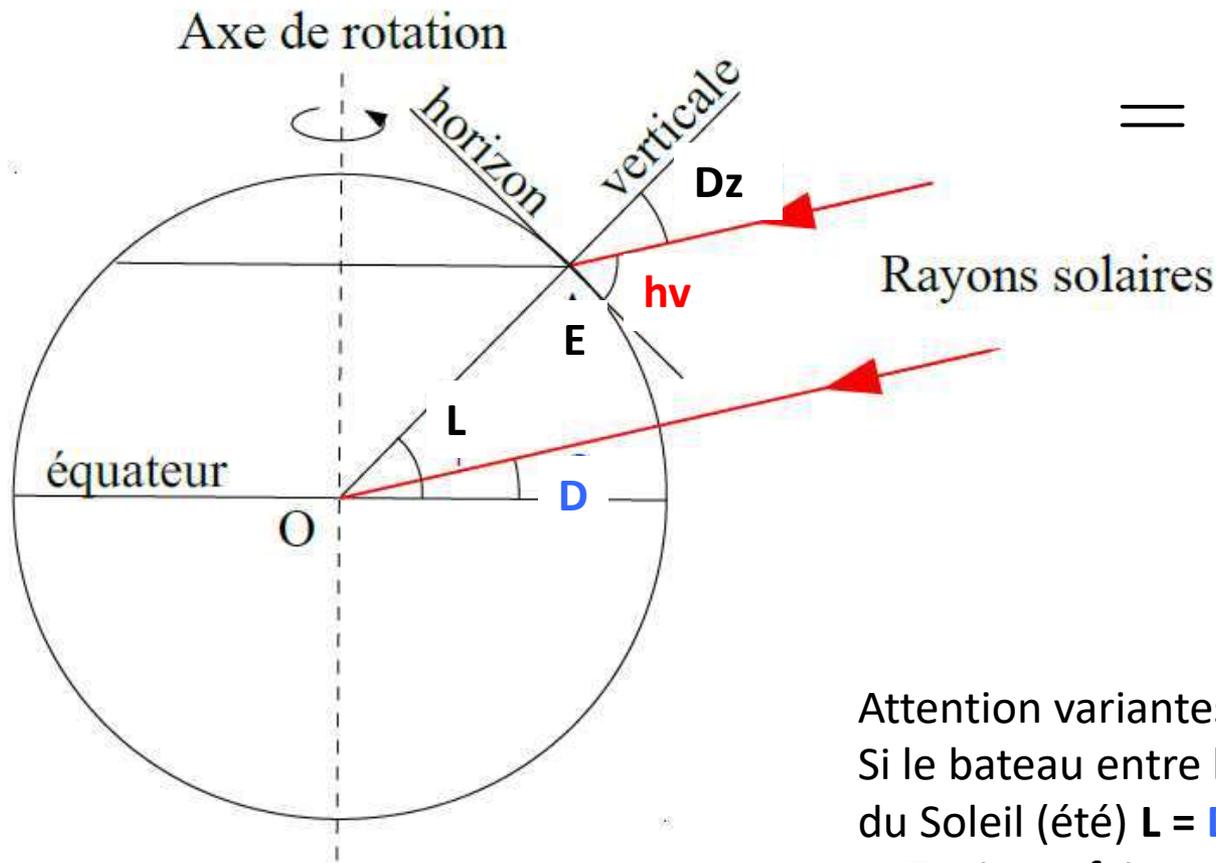
Rappel: l'observation méridienne



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

Mesure de la latitude par la méthode de la méridienne

$$\begin{aligned} L &= Dz + D \\ &= 90 - hv + D \end{aligned}$$



Attention variantes si hiver $L = Dz - D$
Si le bateau entre l'équateur et la déclinaison
du Soleil (été) $L = D - Dz$
-> Toujours faire un dessin pour vérifier
les signes des angles

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
- Donc si on connaît l'heure universelle et la position des étoiles observées, on en déduit sa position à cet instant

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

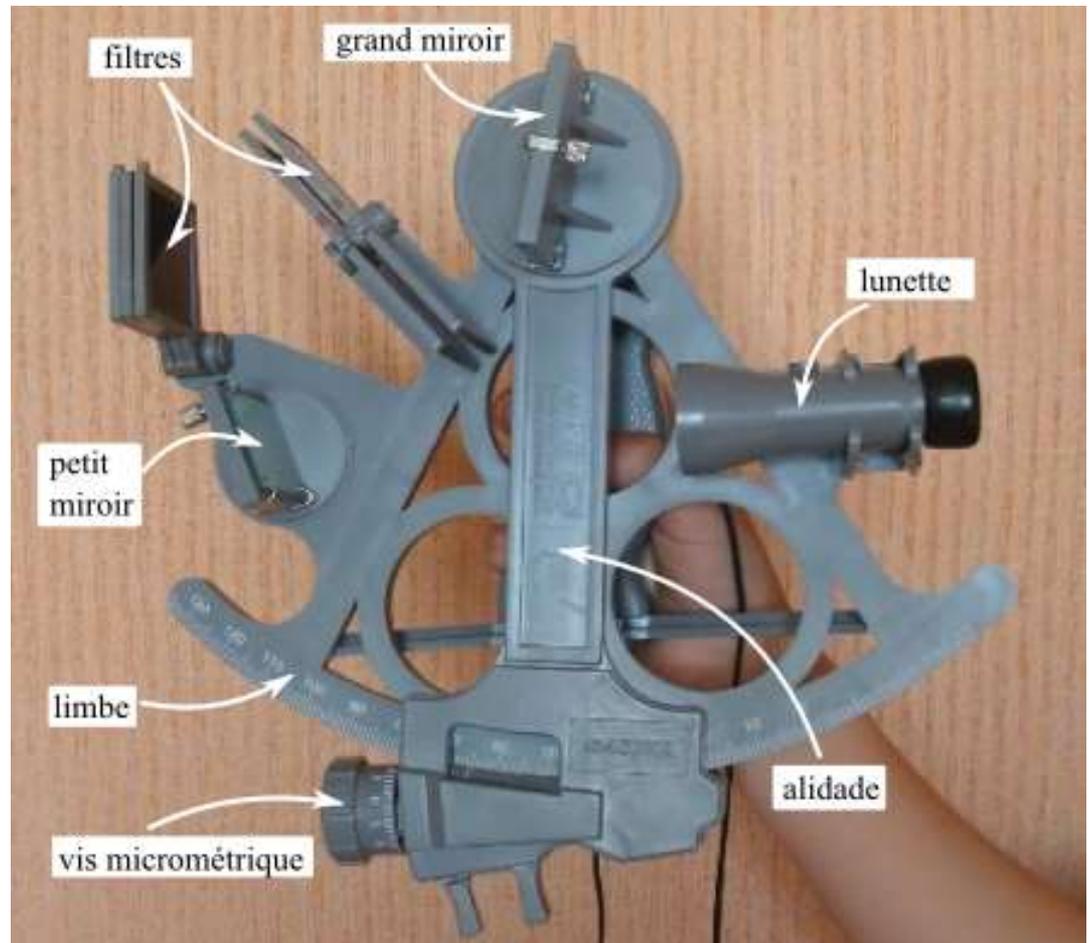


En mesurant la hauteur d'un astre, on situe le navire sur un cercle centré sur le lieu où l'astre est au zénith et donc à l'intersection des cercles.

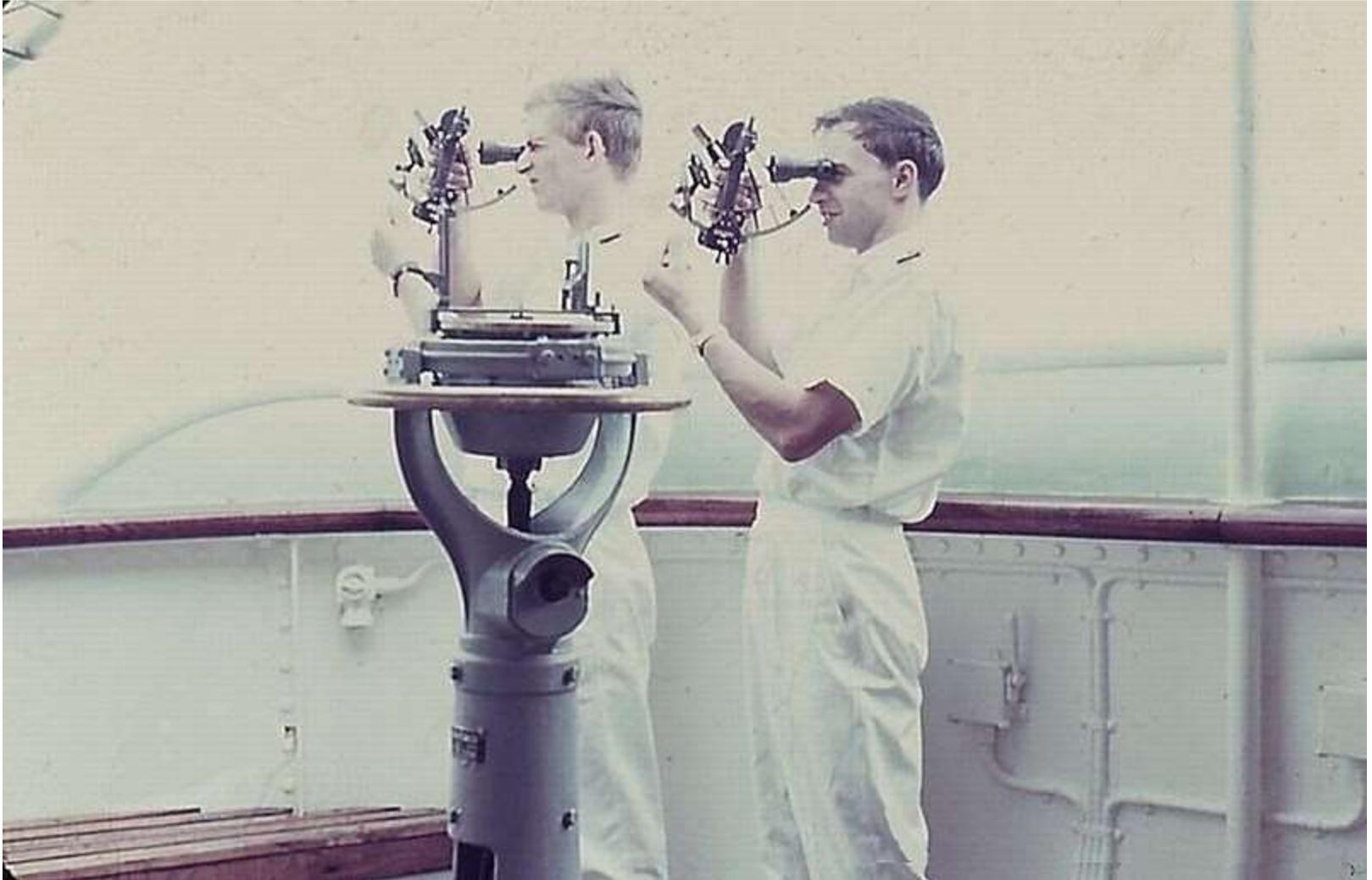
Faire le point en mer

- 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.

Les outils: la montre et le sextant

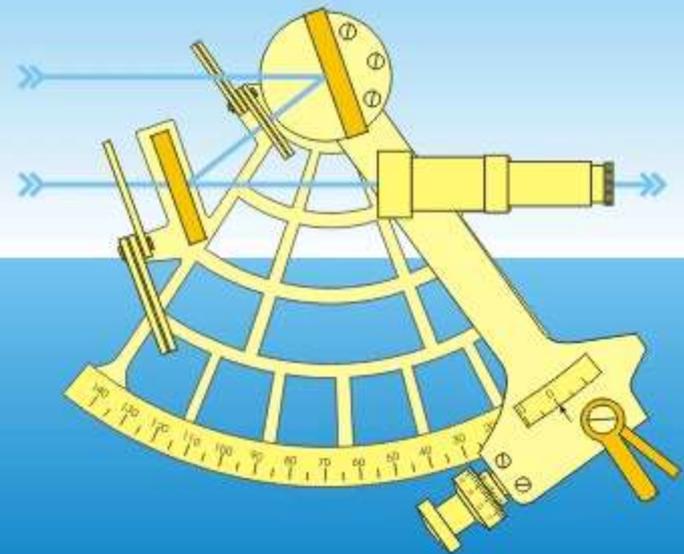
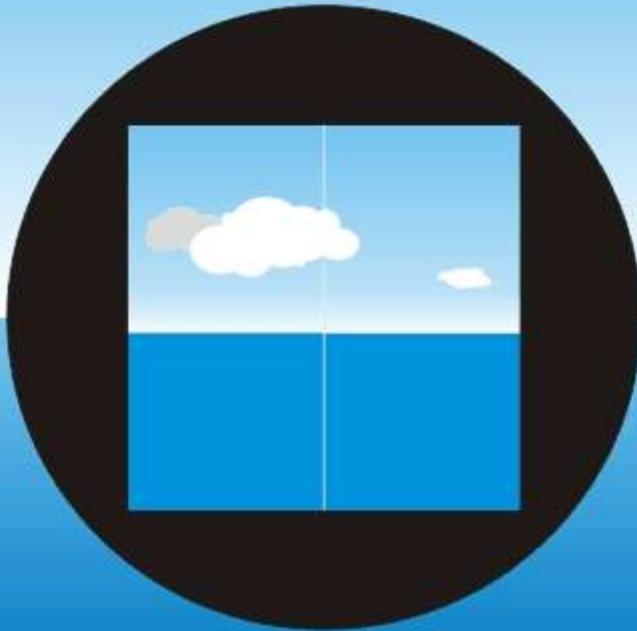


Utilisation du sextant



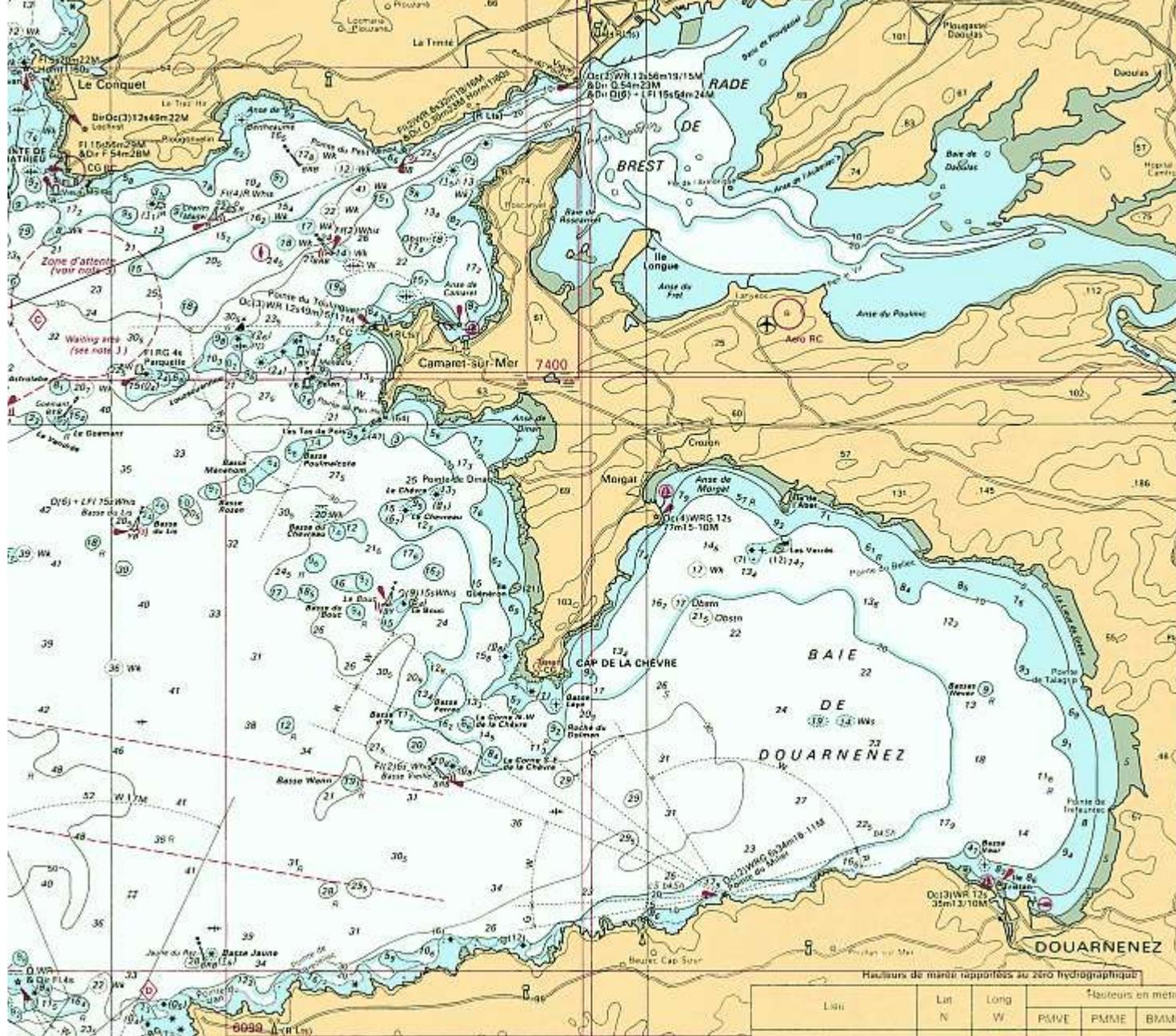
Utilisation du sextant

1 point the sextant to the horizon



Le point en mer

- Le point astronomique est indispensable quand les autres techniques (GPS) sont en panne!
- Le point astronomique est moins précis que le GPS mais suffisant pour ne pas se perdre (précision de 1 à 5 kilomètres) et être en vue des côtes sans se tromper.



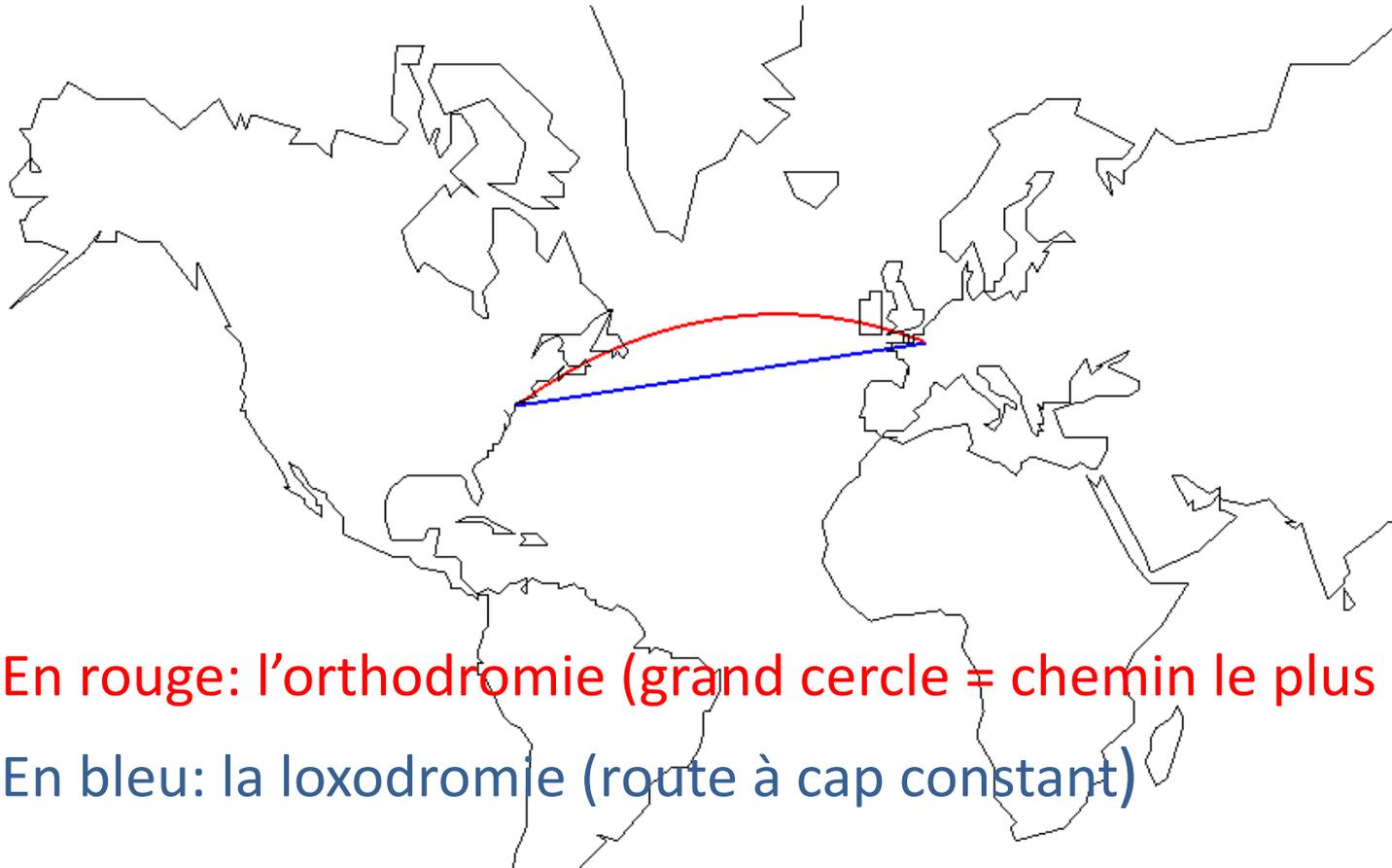
L'arrivée dans la rade de Brest

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

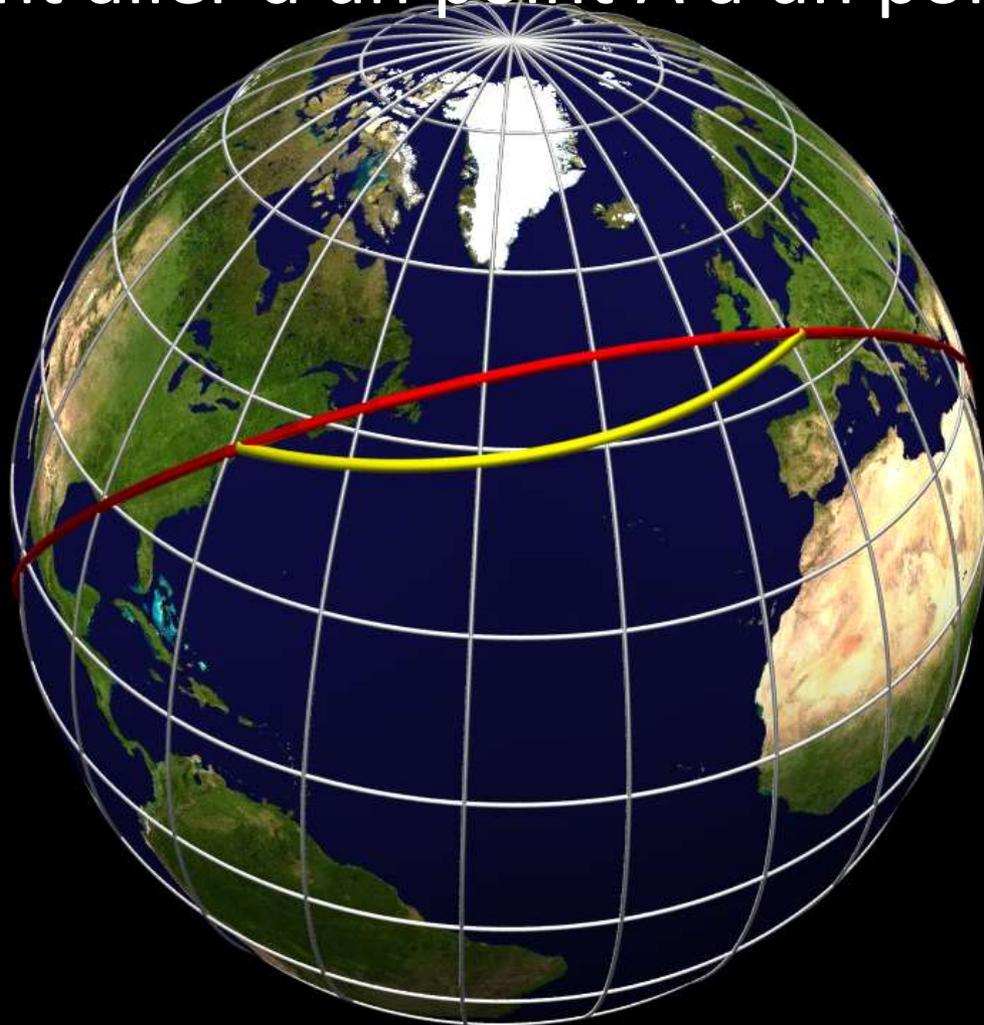
- Comment aller d'un point A à un point B?



- 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?

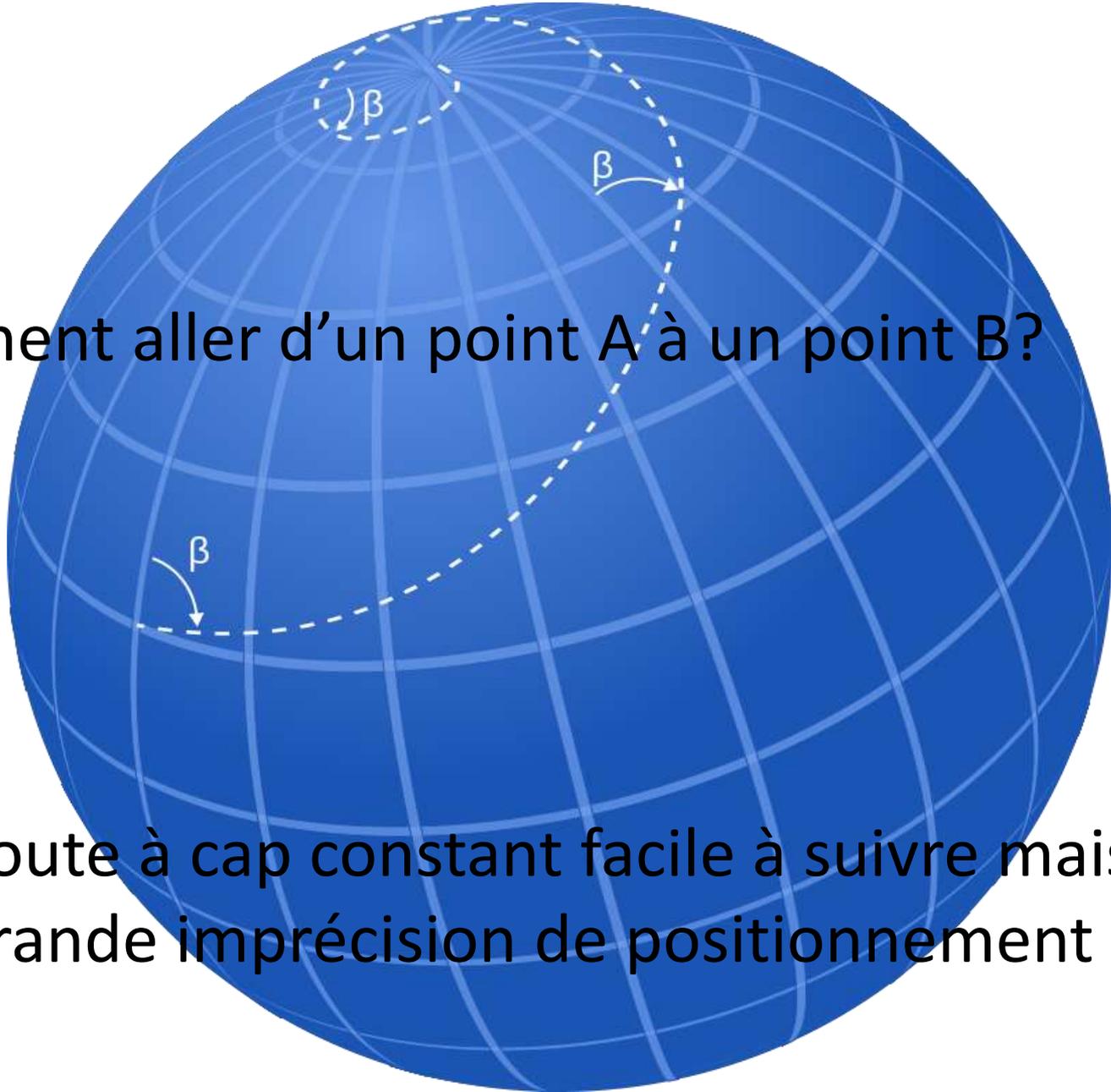


- En rouge: l'orthodromie (grand cercle = chemin le plus court)
- En bleu: la loxodromie (route à cap constant)

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



Les autres techniques de navigation

- Les polynésiens
- Les navigateurs arabes
- Le GPS

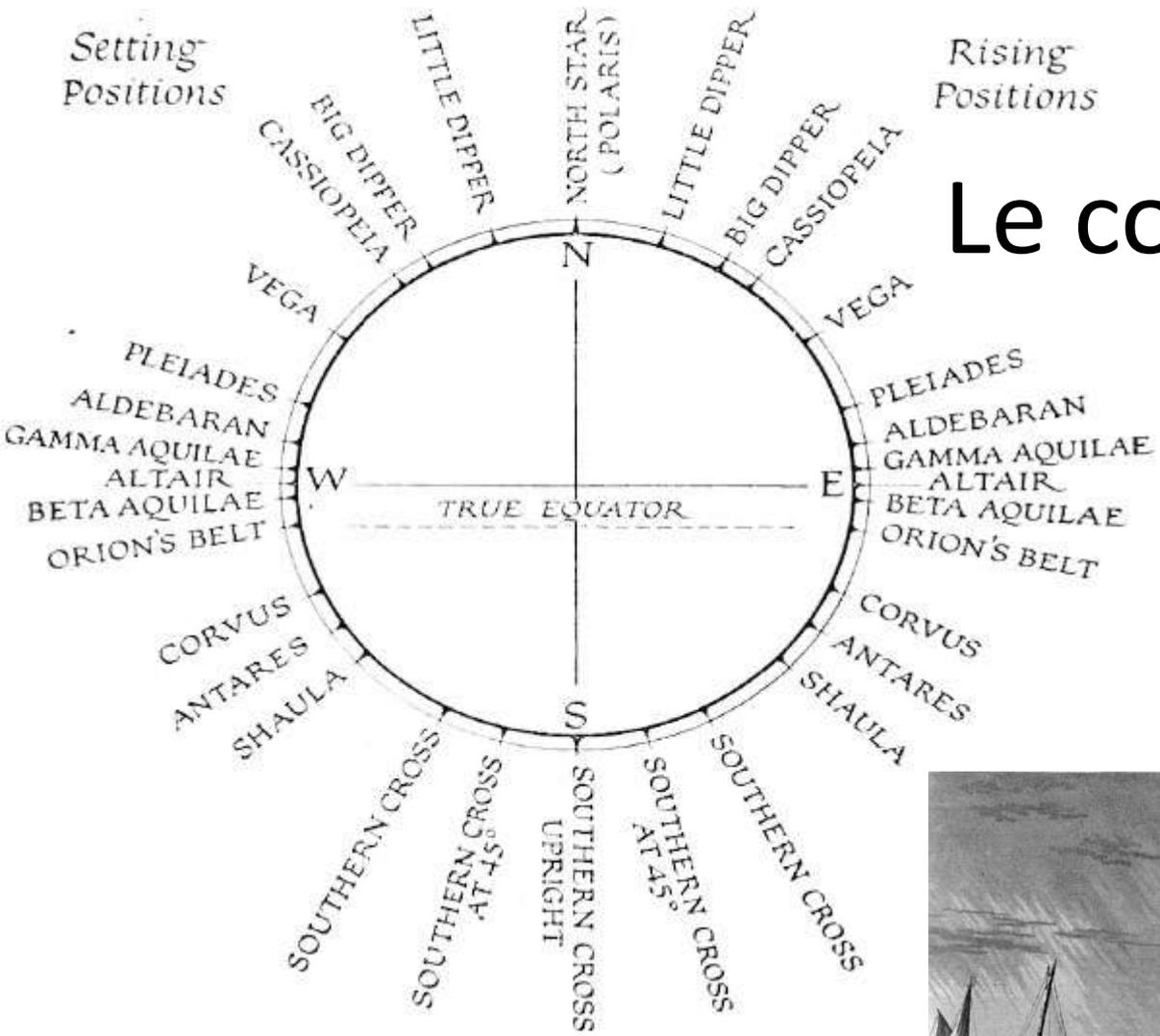
Les polynésiens

- Pas d'instruments de précision
- Étoile polaire invisible à l'équateur
- Ils utilisent:
 - Orientation des vagues (houle)
 - Couleur de la mer (courants)
 - Direction des étoiles au lever et au coucher
 - Passage des étoiles au zénith pour atteindre la latitude voulue (précision 1 degré = 100 km)
- Les îles sont regroupées et détectables à 50 km

Les polynésiens

- Un voyage incertain à travers l'océan Pacifique





Le compas sidéral

- Utiliser les étoiles pour se diriger.





North

South

West

East

KOMOHANA

HAKINA

LA

LA

AINA

NOIO

MANU

NALANI

NA LEO

HAKA

NA LEO

AINA

NOIO

MANU

NALANI

NA LEO

HAKA

HEMA

HAKA

AKAU

NA LEO

MANU

NALANI

NA LEO

HAKA

AKAU

NA LEO

AINA

NOIO

MANU

NALANI

NA LEO

HAKA

HEMA

NA LEO

AINA

NOIO

MANU

NALANI

NA LEO

HAKA

AKAU

NA LEO

AINA

NOIO

MANU

NALANI

NA LEO

HAKA

AKAU

NA LEO

AINA

NOIO

MANU

NALANI

NA LEO

HAKA

AKAU

NA LEO

AINA

NOIO

MANU

NALANI

NA LEO

HAKA

AKAU



NĀ HĪŪ
21 21 19 19

Arcturus
HŌKŪLEĀ

HAWAII

NIHOA

MARSHALLS

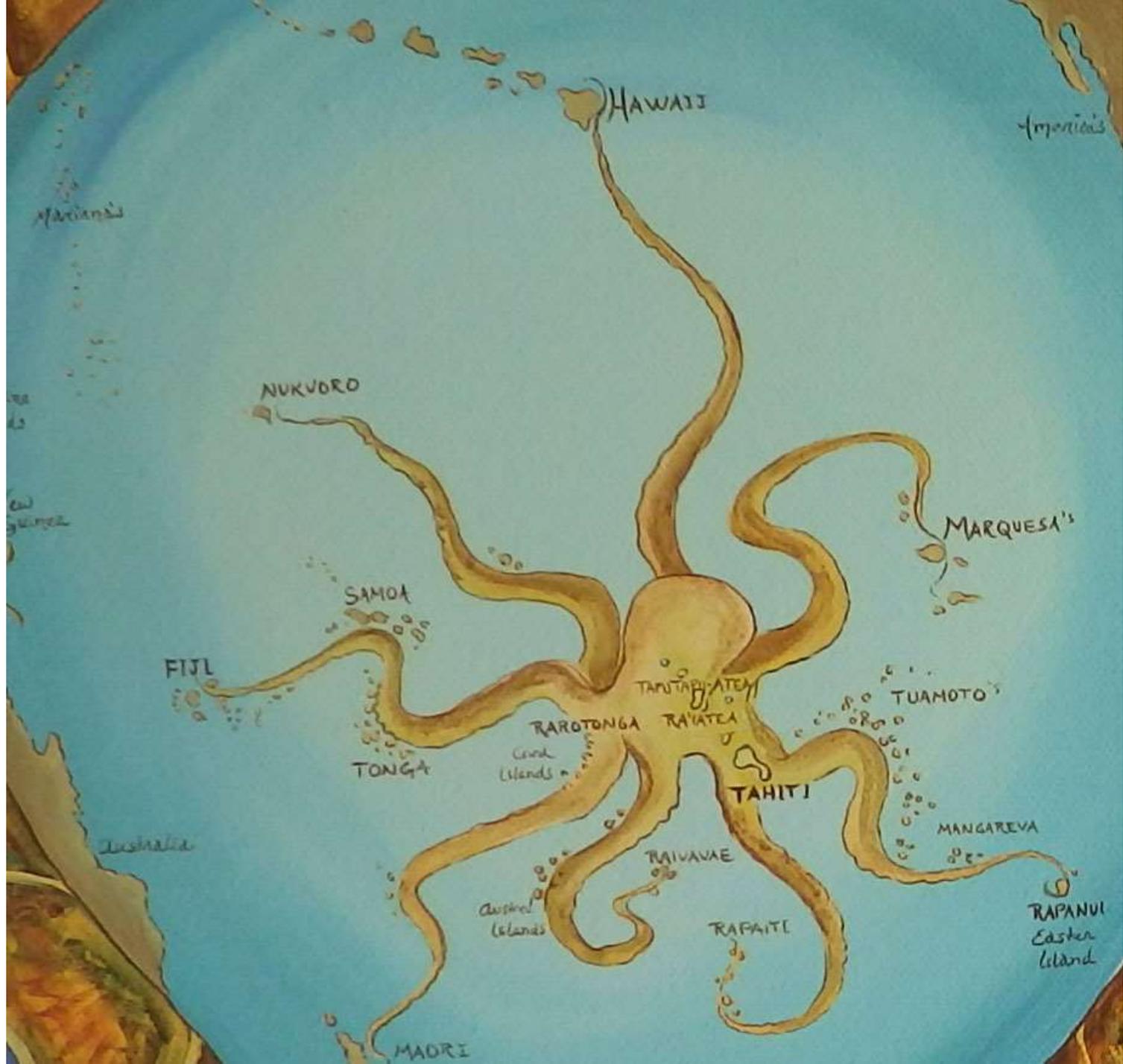
FIIJI

TONGA

TAHITI

NEW ZEALAND

MONŪA



Les polynésiens



Ne pas passer à côté du but à atteindre: courants, animaux, vents pour aider à la navigation

Les navigateurs arabes



Al Idrissi
(1099-1165)



- Au XIème siècle, la navigation côtière est privilégiée

Les navigateurs arabes



Ahmed Ibn Majid
1432-1500



Au XVème siècle, la navigation se fait à l'estime: la latitude est mesurée par l'observation de la hauteur de l'étoile polaire

Aujourd'hui: le GPS

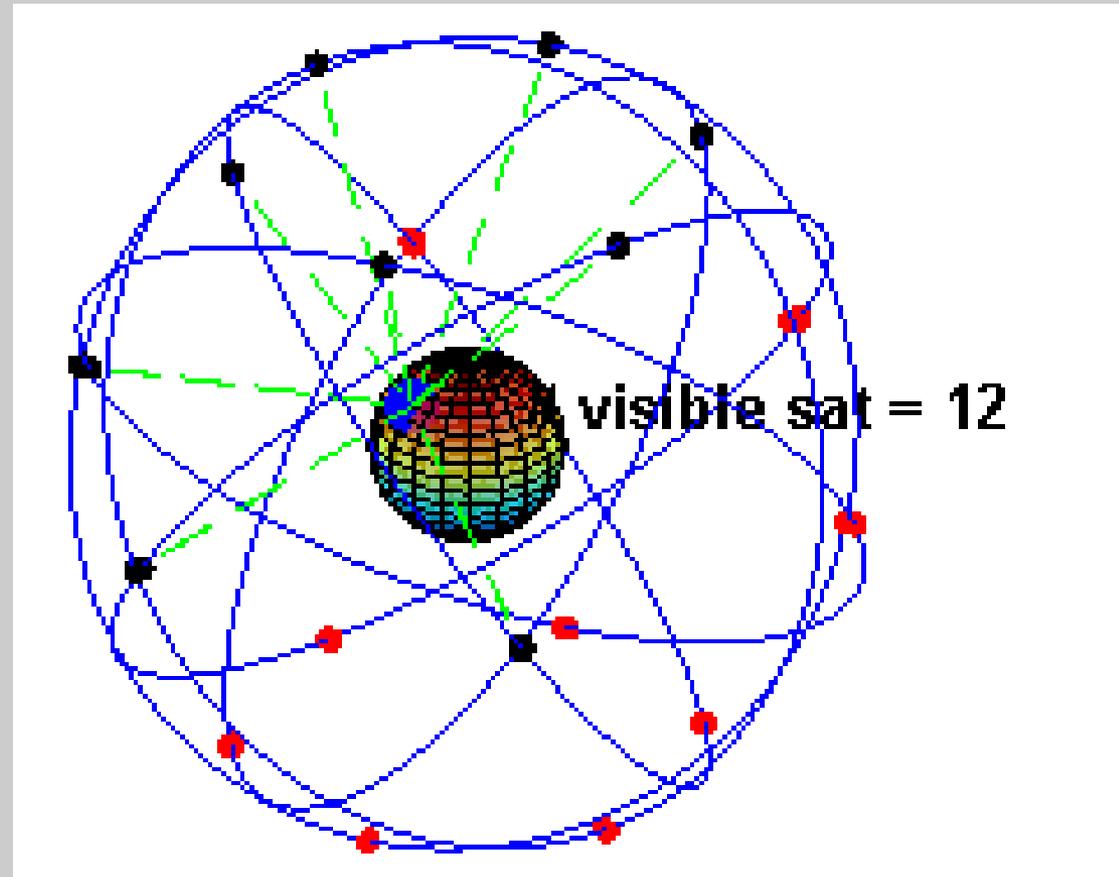


Des satellites pour quoi faire?

Le positionnement

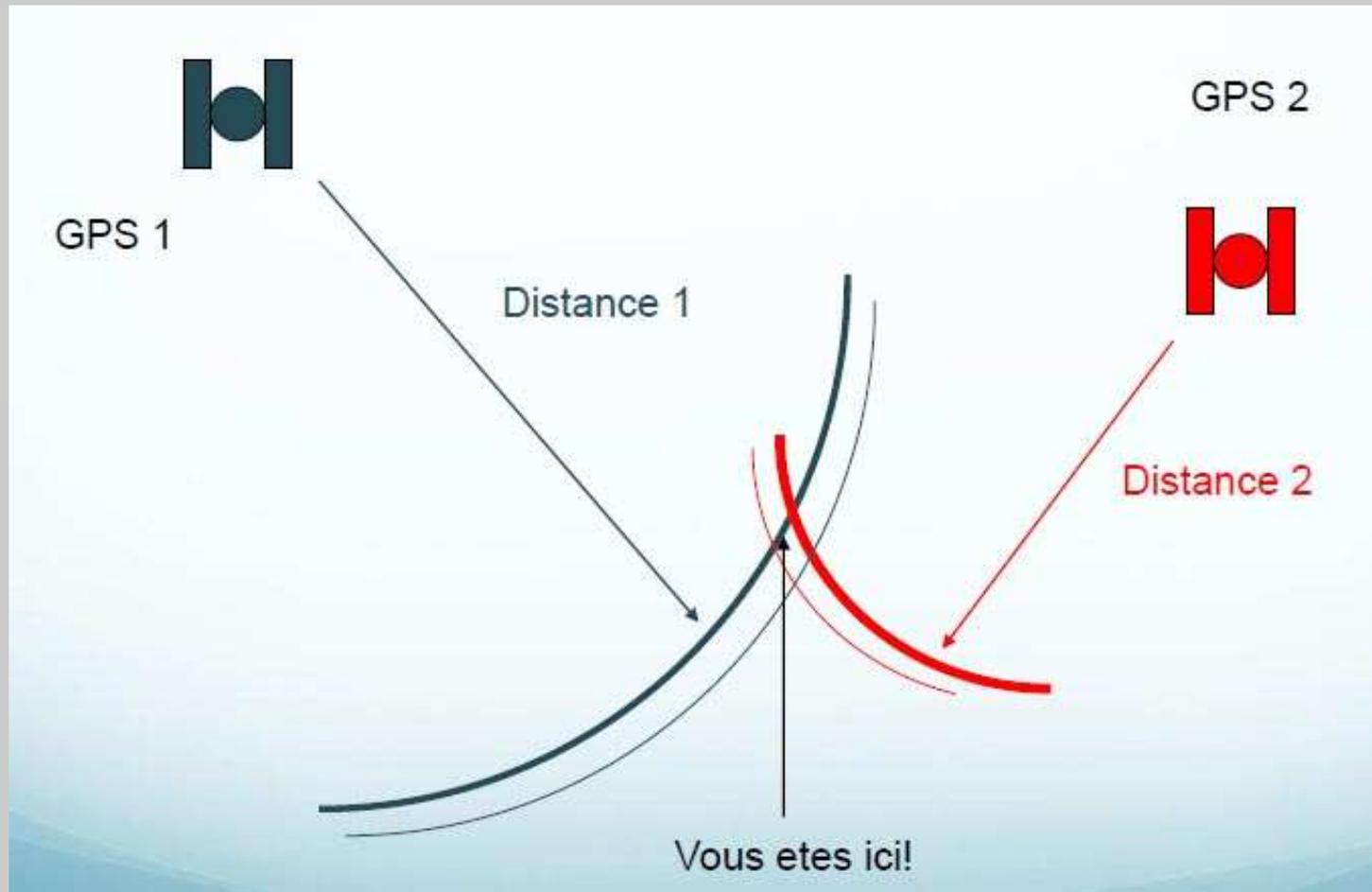
- GNSS: Géolocalisation et Navigation par un Système de Satellites
 - **GPS**: Global Positioning System (USA)
 - GLONASS (Russie)
 - Galileo (Europe)
 - BeiDou (Chine)

Le GPS: comment ça marche?



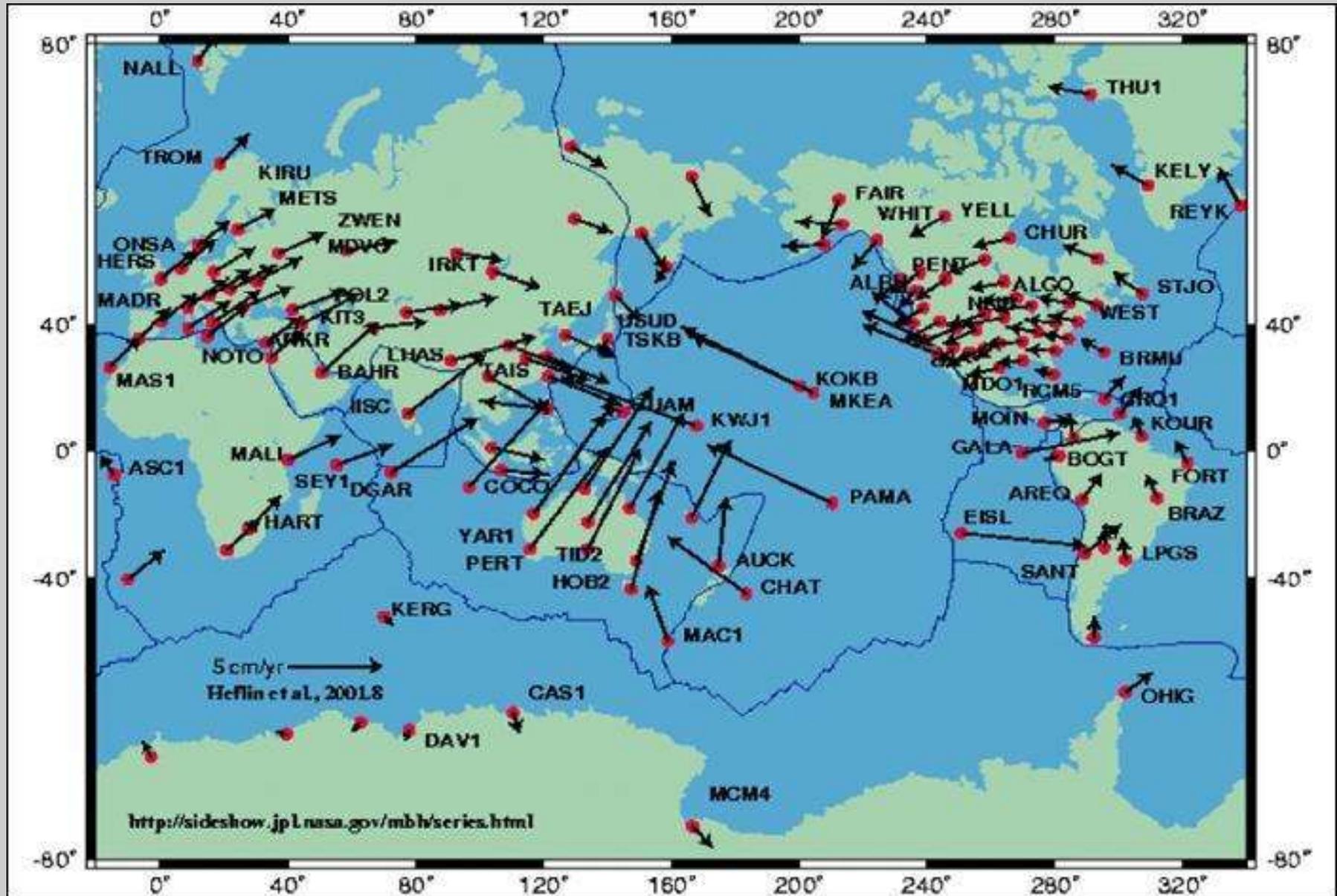
27 satellites à 20 000 km d'altitude

Comment fonctionne le GPS

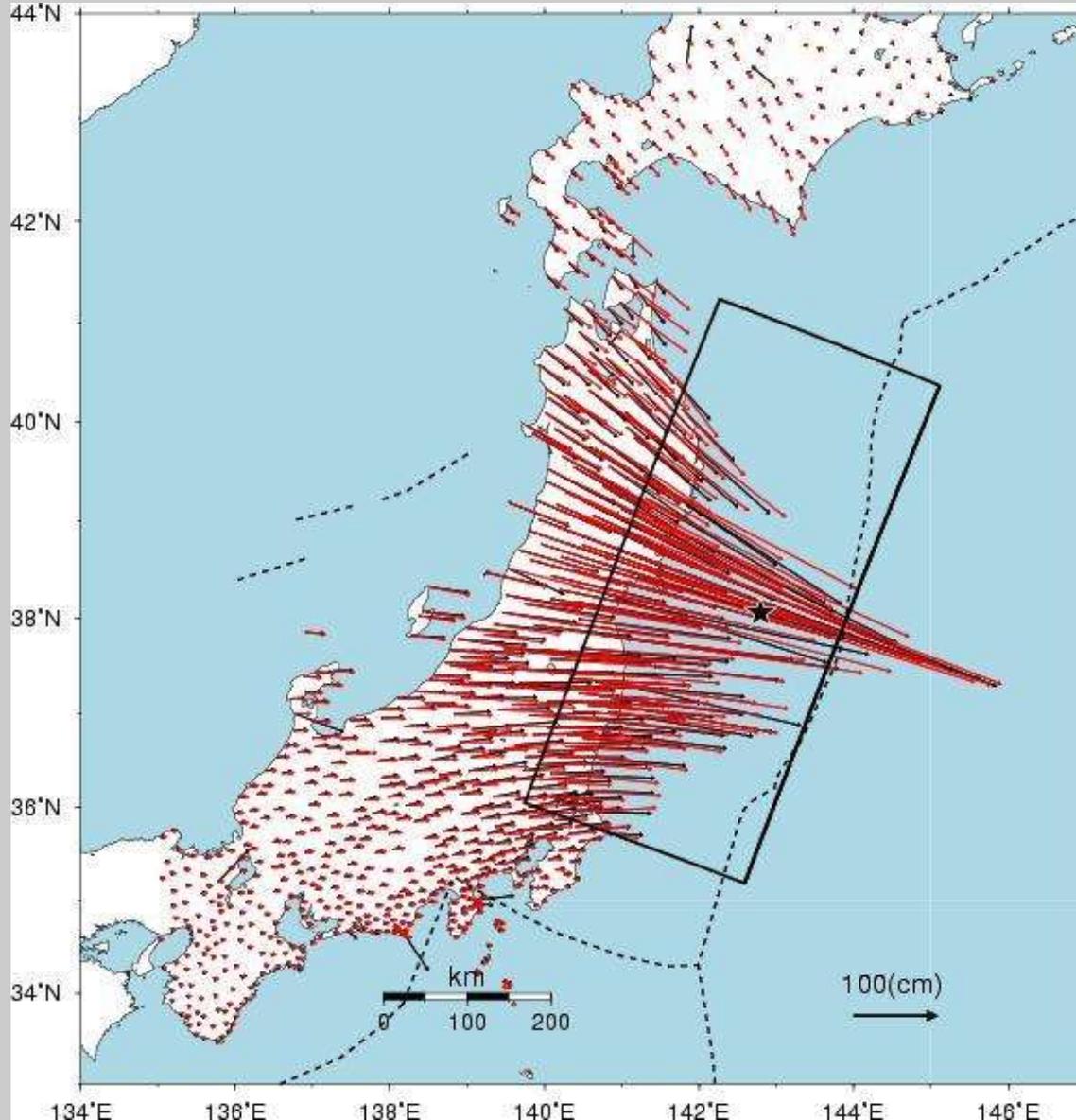


Vous êtes à l'intersection de trois sphères
Précision: 10 mètres à 1 cm

La dérive des continents mesurée par GPS



Déplacement du Japon après le séisme de 2011



La cartographie de l'univers et la navigation spatiale

A deep space photograph showing a vast field of stars. In the center, there is a prominent blue-white star with a bright four-pointed diffraction pattern. To its left, a smaller white star is visible. Further left, a faint, reddish nebula or galaxy core is partially visible. The background is filled with numerous smaller stars of various colors, including white, yellow, and blue.

On passe du 2D au 3D

Ça se complique!

En conclusion

- Pas de cartographie sans astronomie
- Pas de navigation sans astronomie
- La cartographie de l'univers n'en est qu'à ses balbutiements.