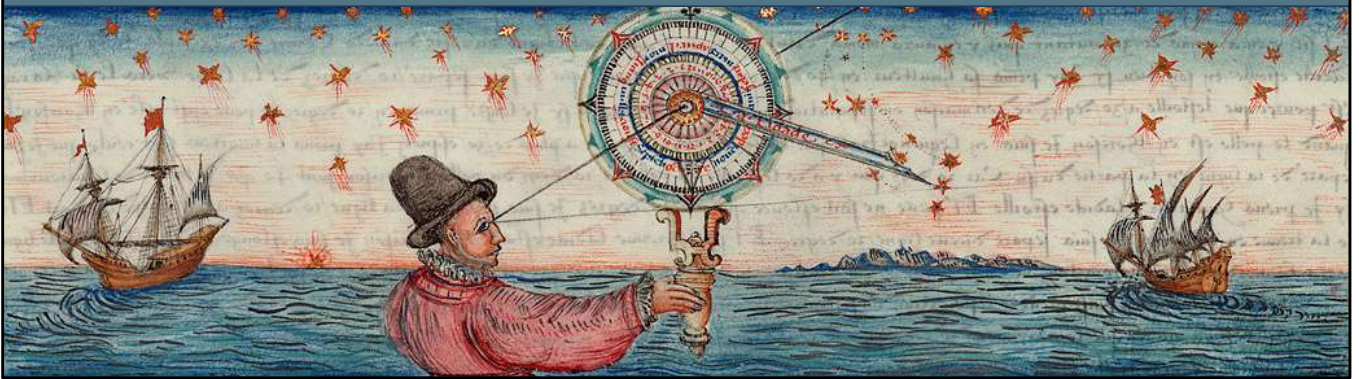


Römer et la vitesse de la lumière



Manuel de navigation – Fabrication et usage du nocturlabe –
Jacques de Vaulx – premières œuvres – 1583

Il ne semble pas que l'on se soit posé la question concernant la vitesse de la lumière avant la fin du XVIe ou le début du XVIIe. A cette époque, apparaissent deux écoles. L'une affirme que la lumière se propage avec une vitesse infinie et à laquelle se rallient Kepler et Descartes. L'autre attribue à la lumière une vitesse finie et dont Galilée se fait le champion. Quoi qu'il en soit, ces propositions ne reposent que sur « l'intime conviction ».

DISCORSI
E
DIMOSTRAZIONI

MATEMATICHE,
intorno à due nuoue scienze

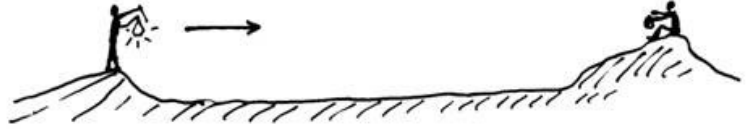
Attenenti alla
MECANICA & i MOVIMENTI LOCALI;
del Signor

GALILEO GALILEI LINCEO,
Filosofo e Matematico primario del Serenissimo
Grand Duca di Toscana.

Con una Appendice del centro di gravità à d'alcuni Solidi,



IN LEIDA,
Appresso gli Elfevirii. M. D. C. XXXVIII.



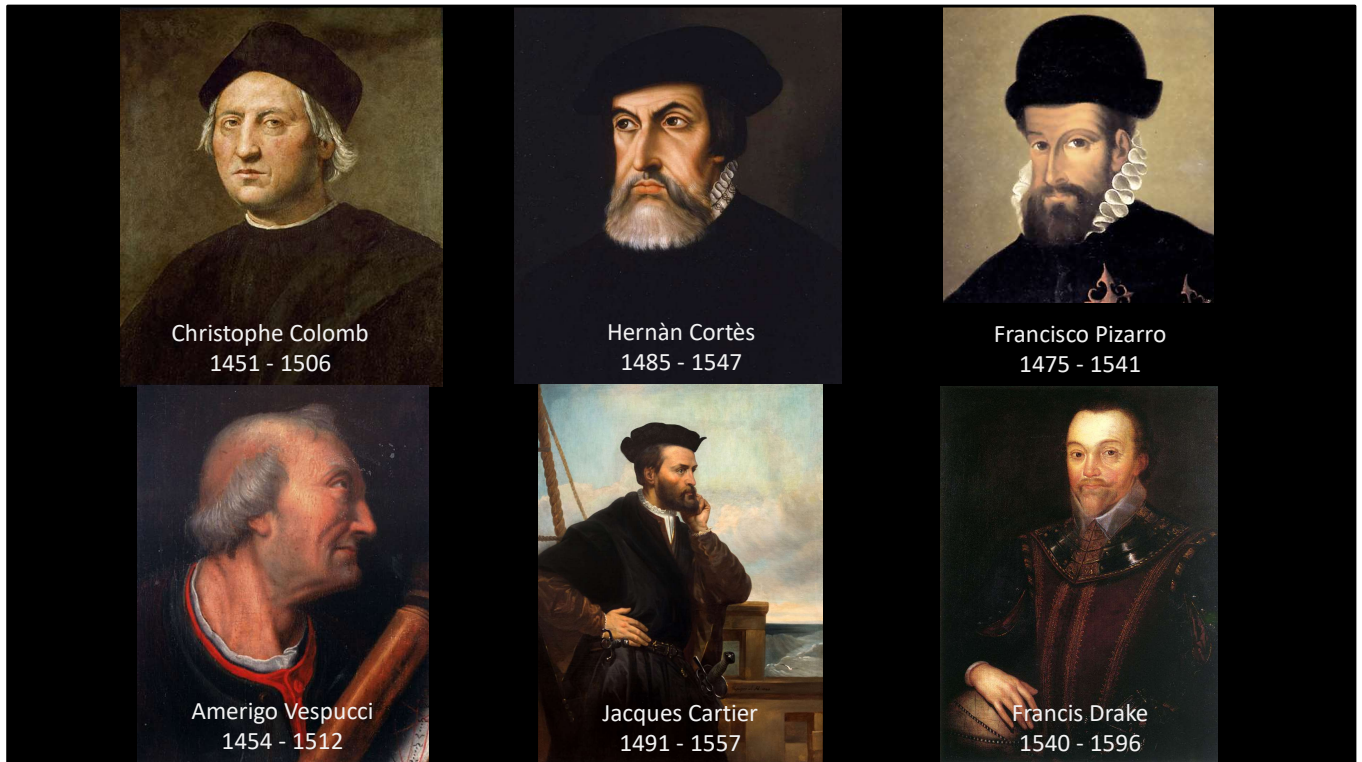
Sagredo — *L'expérience me semble aussi sûre qu'ingénieuse dans sa conception. Mais dites-moi, quelles conclusions en avez-vous retirées ?*

Salviati — *A vrai dire, je ne l'ai expérimenté que sur de petites distances, c'est-à-dire moins d'un mille, de quoi je n'ai pas pu m'assurer si vraiment l'apparition de la lumière opposée soit instantanée mais bien, si pas instantanée, très rapide, et disons quasi-instantanée...*

C'est Galilée qui, le premier a tenté une expérience pour la mesurer. Il la décrit dans son ouvrage de 1638 « Discours sur deux sciences nouvelles » L'expérience est extrêmement simple.



Ce n'est pas un amour débordant pour la science qui a conduit à la première détermination de la vitesse de la lumière mais la volonté de quelques puissances de construire un empire colonial. L'histoire commence à la toute fin du XVe siècle quand les galions espagnols puis portugais partent vers l'ouest et découvrent le nouveau monde

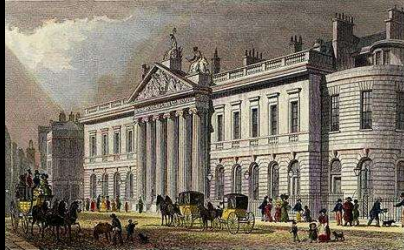


Après Christophe Colomb, les espagnols Cortes et Pizarro, l'italien Amerigo Vespucci pour le compte des portugais, le français Jacques Cartier, l'anglais Francis Drake ... (pour n'en citer que quelques uns) partent à la découverte du nouveau monde

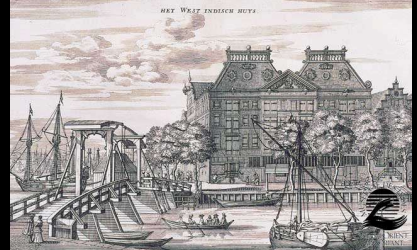
Compagnies commerciales des Indes



Néerlandaise



Britannique



Française

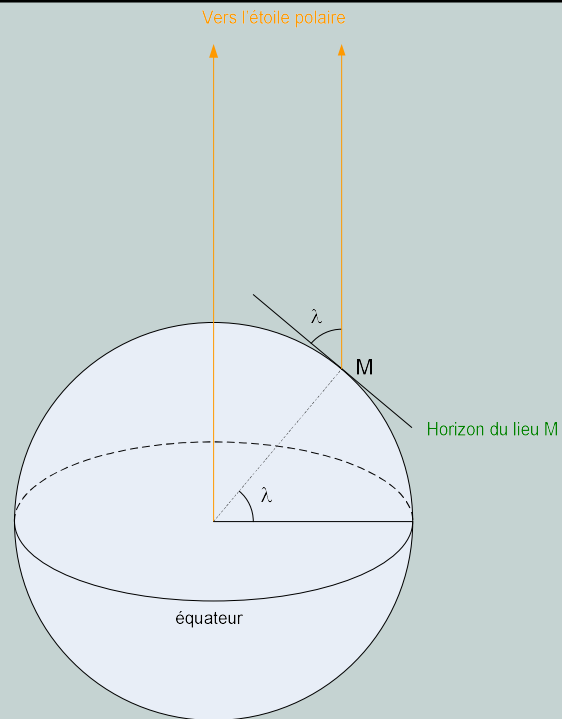


Au début du XVII^e siècle les compagnies néerlandaise, britannique et française des indes, sous la tutelle de leurs chefs d'états, organisent le commerce avec le nouveau monde. Leurs flottes commencent à sillonner les océans,



Mais la carte du nouveau monde est bien mal connue. Cette carte de Martin Waldseemüller de 1507 montre qu'il est indispensable de l'améliorer. Il faut trouver des méthodes fiables pour mesurer latitude et longitude

Détermination de la latitude



La latitude d'un lieu est très simple à mesurer. Il suffit par exemple de mesurer la hauteur de l'étoile polaire au dessus de l'horizon

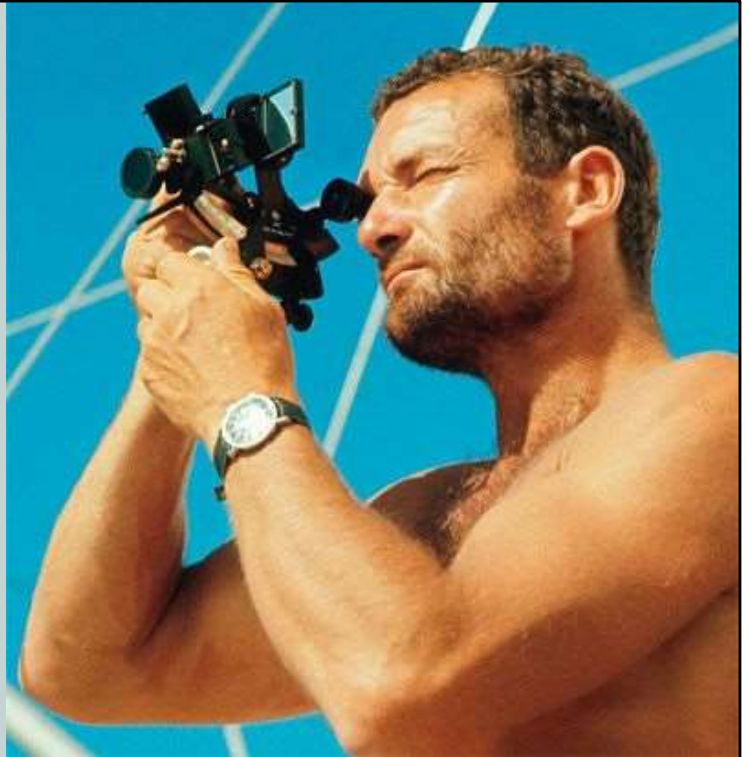
Détermination de la longitude

360° en 24 heures

15° en 1 heure

15' en 1 minute

15'' en 1 seconde



Mais pour la longitude c'est plus difficile si on ne dispose pas d'un GPS ! Comment faisait-on ?

Il suffit de régler sa montre avant de partir sur l'heure du méridien de Greenwich

Lorsqu'on est en mer, on cherche par exemple à observer le soleil au moment où il est le plus haut ; c'est midi solaire du lieu où on se trouve.

Si la montre indique alors 14 h, c'est qu'on est à 30° à l'ouest de Greenwich. La longitude est de 30° W.

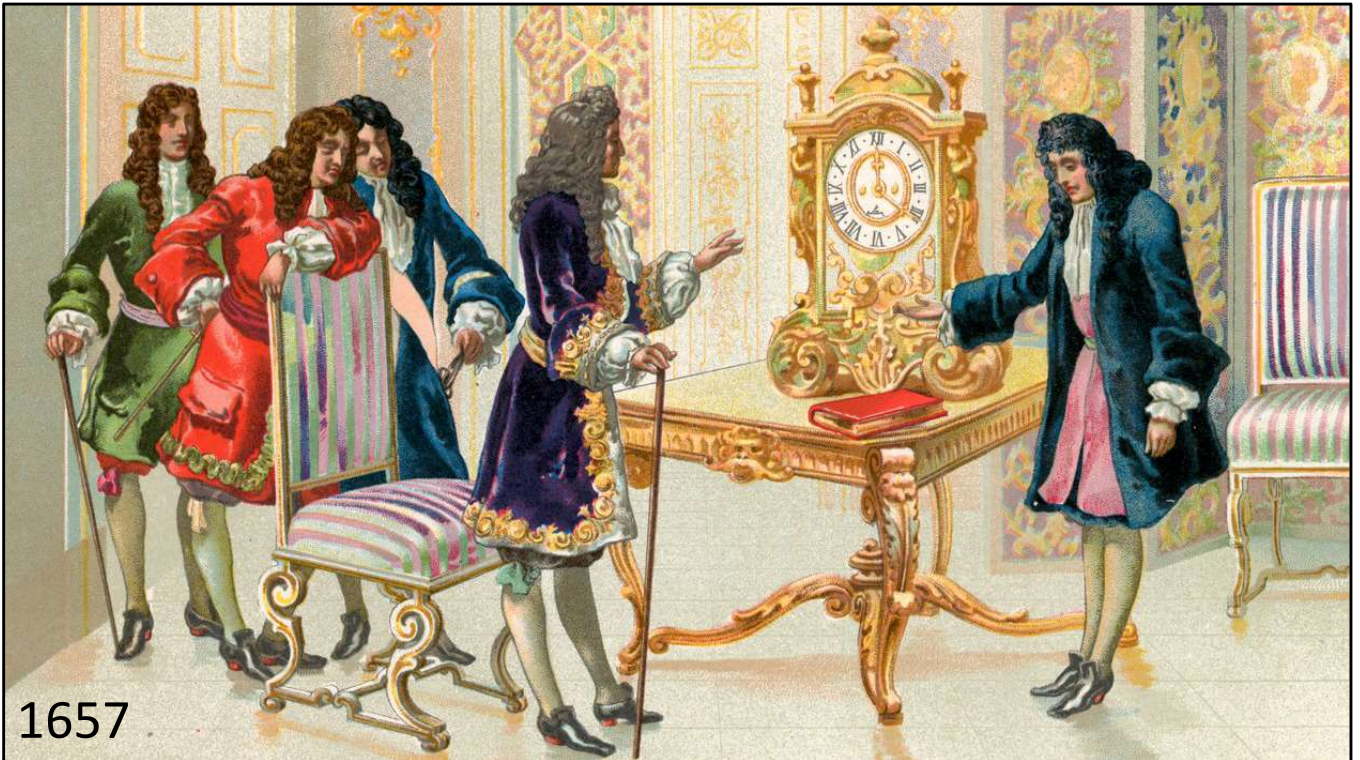
En effet, la sphère céleste tourne de 360° en 24 h et donc de 15°/heure, 15'/min, 15''/s

La mesure d'une longitude nécessite

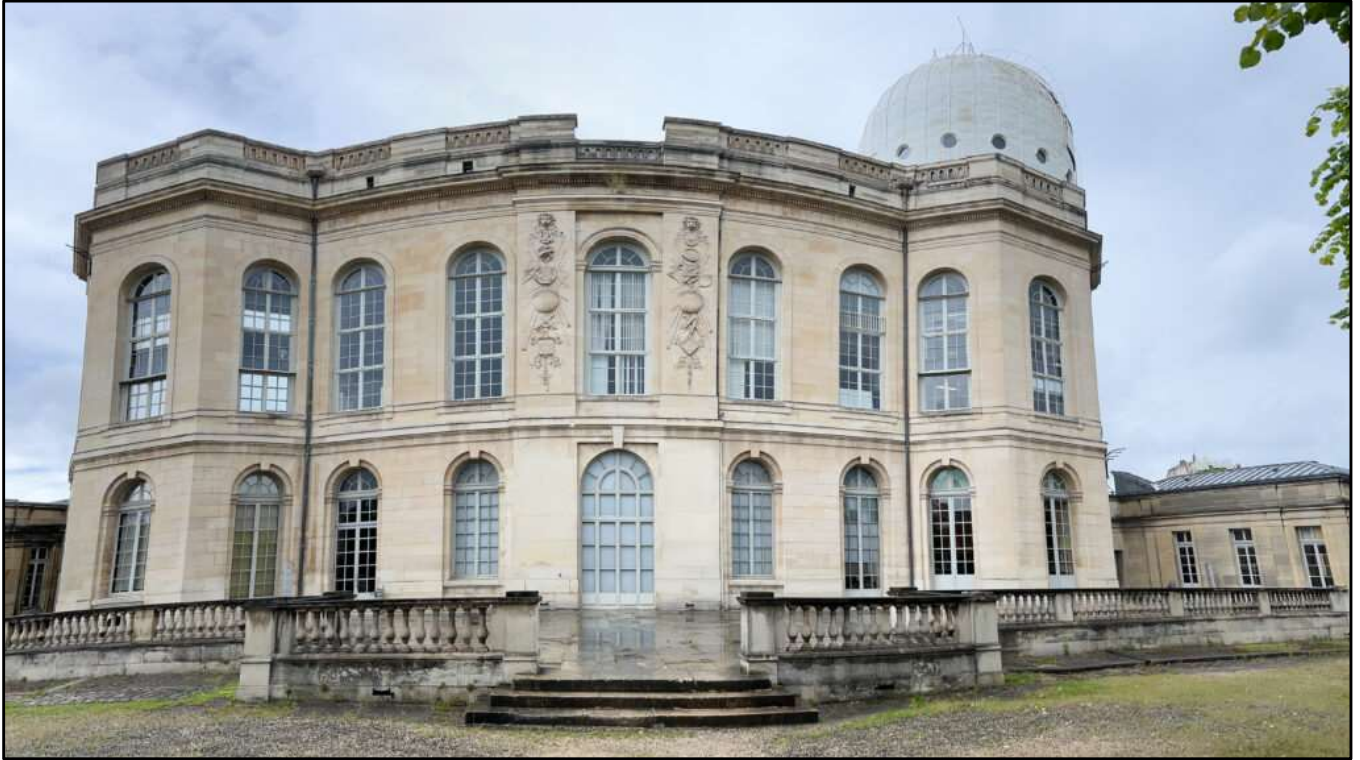
- garde temps
et
- observation astronomique

Il est donc nécessaire de posséder un garde temps (montre) et de pouvoir faire des observations astronomiques (sextant).

Ce sont les instruments (sextant et montre) utilisés par Éric Tabarli.



Les premières horloges datent de la deuxième moitié du XVII^e siècle. On voit ici Christiaan Huygens en 1657 présenter son horloge à pendule au roi Louis XIV



Afin de pouvoir réaliser les observations astronomiques nécessaires à la navigation, Louis XIV et son ministre Colbert décident la construction de l'observatoire de Paris qui fut terminé en 1671 et nomment comme directeur l'astronome italien Jean-Dominique Cassini,

Le décalage horaire entre Paris
et Cayenne est de

$$5\text{h } 15\text{min } 40\text{s} - 1\text{h } 47\text{min } 12\text{s}$$
$$= 3\text{h } 28\text{min } 28\text{s}$$

et le décalage en longitude

$$3 \times 15^\circ + 28 \times 15' + 28 \times 15''$$
$$= 52^\circ 07' \text{ Ouest}$$

Cassini à Paris à 5 h 15 min 40 s

Le 7 Novembre 1672

Richer à Cayenne à 1 h 47 min 12 s

Les premières mesures de longitude ne tardent pas.

Jean-Dominique Cassini envoie Jean Richer à Cayenne. Chacun est équipé d'une horloge à pendule calée sur le Soleil du lieu où il se trouve.

Ils observent l'éclipse de Lune du 7 Novembre 1672 et mesurent l'heure du début de l'éclipse

Le décalage horaire entre Paris et Uraniborg est de
 $20\text{h } 14\text{min } 28\text{s} - 20\text{h } 11\text{min } 38\text{s} = 2\text{min } 50\text{s}$
 et le décalage en longitude
 $2 \times 15' + 50 \times 15'' = 42' 30'' \text{ Est}$

Picard et Romer à Uraniborg à 20h 14min 28s

Le 18 Septembre 1671
 Le 23 Octobre 1671

Cassini à Paris à 20h 11min 38s

Carte de l'Europe BLAEU 1630

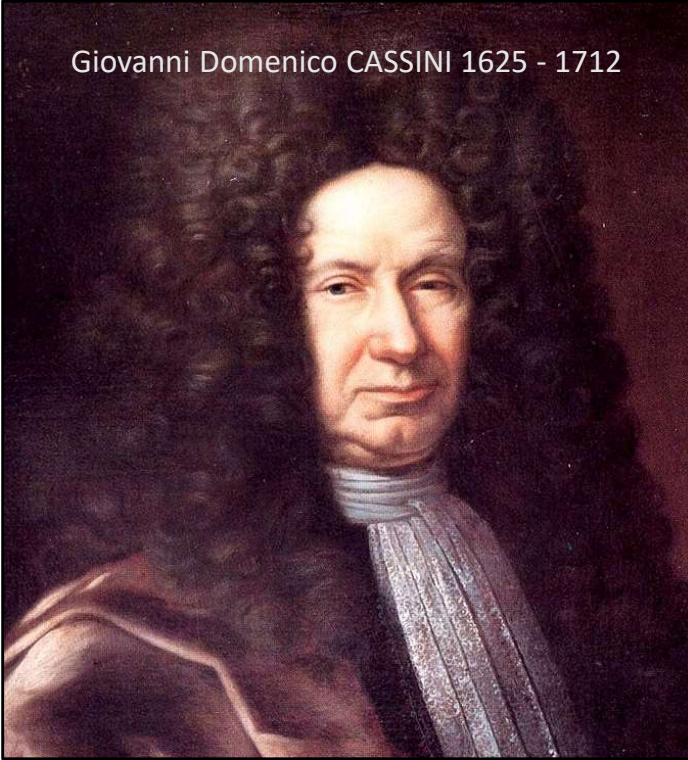
En 1671 aussi, Jean-Dominique Cassini envoie l'abbé Jean Picard à Copenhague retrouver les traces de Tycho Brahe. Il rencontre Erasme Bartholin professeur de Mathématiques et de médecine qui lui confie tous les manuscrits de Tycho Brahe qu'il détient afin de les faire publier en France. Picard a aussi la mission de mesurer les coordonnées géographiques de l'ancien observatoire de Tycho Brahe situé sur l'île de Hvene à 10 lieues de Copenhague. Bartholin conseille à Picard de se faire aider par un jeune astronome encore étudiant du nom de Ole Christensen Römer. Picard et Römer embarquent pour l'île de Hvene. Le 18 septembre 1671 est prévue une éclipse totale de Lune. Mais la mesure sera manquée pour cause de mauvais temps. Il a donc l'idée d'utiliser les phénomènes des satellites de Jupiter beaucoup plus fréquents. Les éclipse de Io se reproduisent toutes les 42 heures environ.



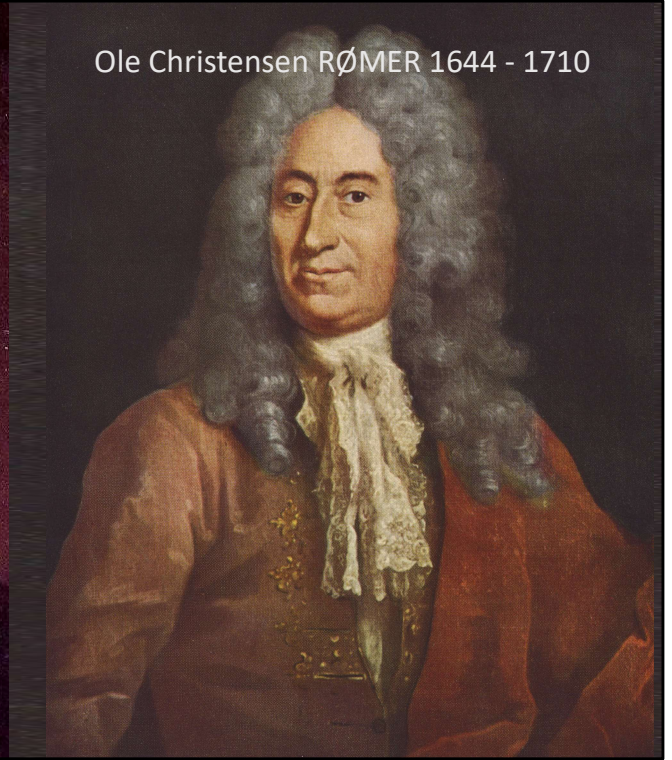
Mais les méthodes utilisées à Cayenne ou sur l'île de Hvene ne sont pas applicables en mer car les horloges du XVII^e siècle ne sont pas transportables en bateau !

Jean-Dominique Cassini a l'idée d'observer depuis Paris et pendant de nombreux jours les heures des éclipses de Io afin de pouvoir ensuite prédire les instants où elles se reproduiront. Io tourne autour de Jupiter comme les aiguilles d'une horloge visible de la moitié de la Terre.

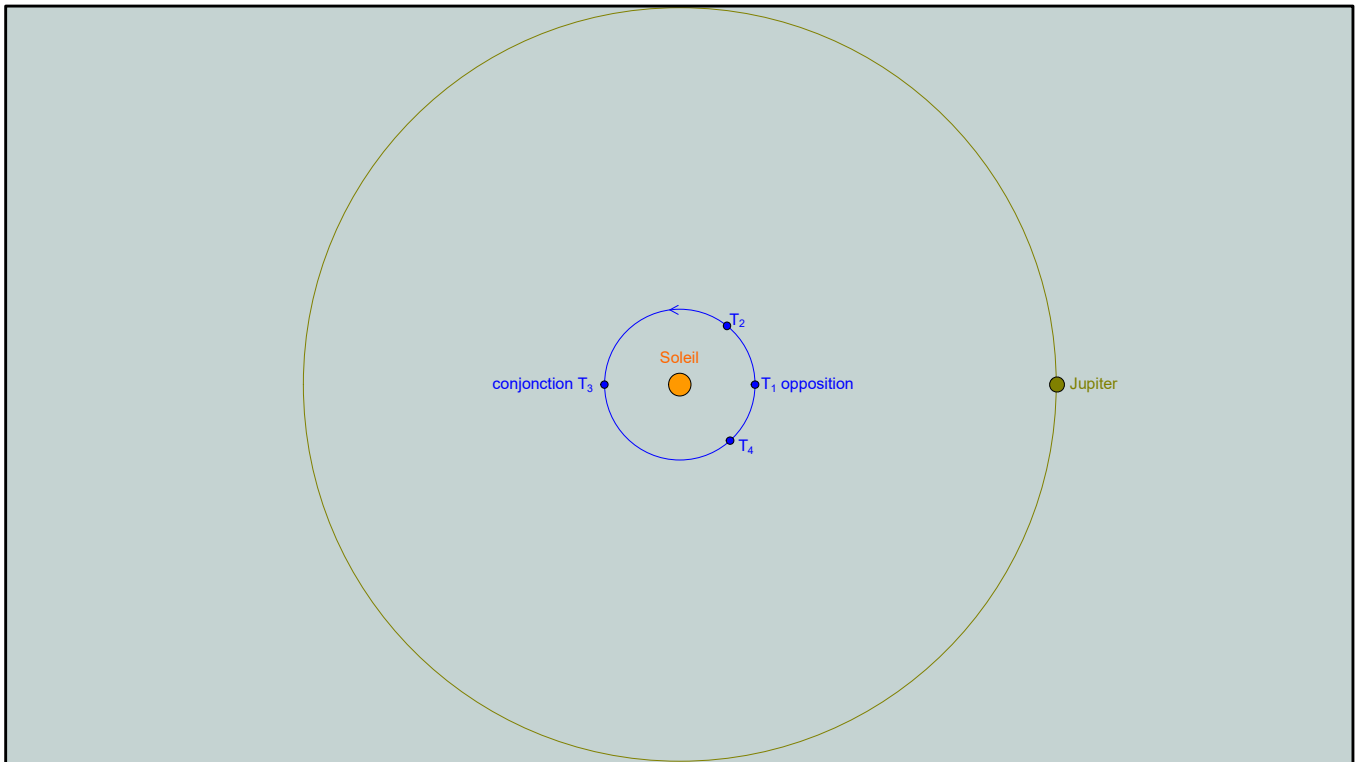
Giovanni Domenico CASSINI 1625 - 1712



Ole Christensen RØMER 1644 - 1710



C'est alors que Jean Picard rentre de l'île de Hvene accompagné de Ole Romer qu'il recommande à Cassini.
Romer sera chargé d'établir les éphémérides de Io.



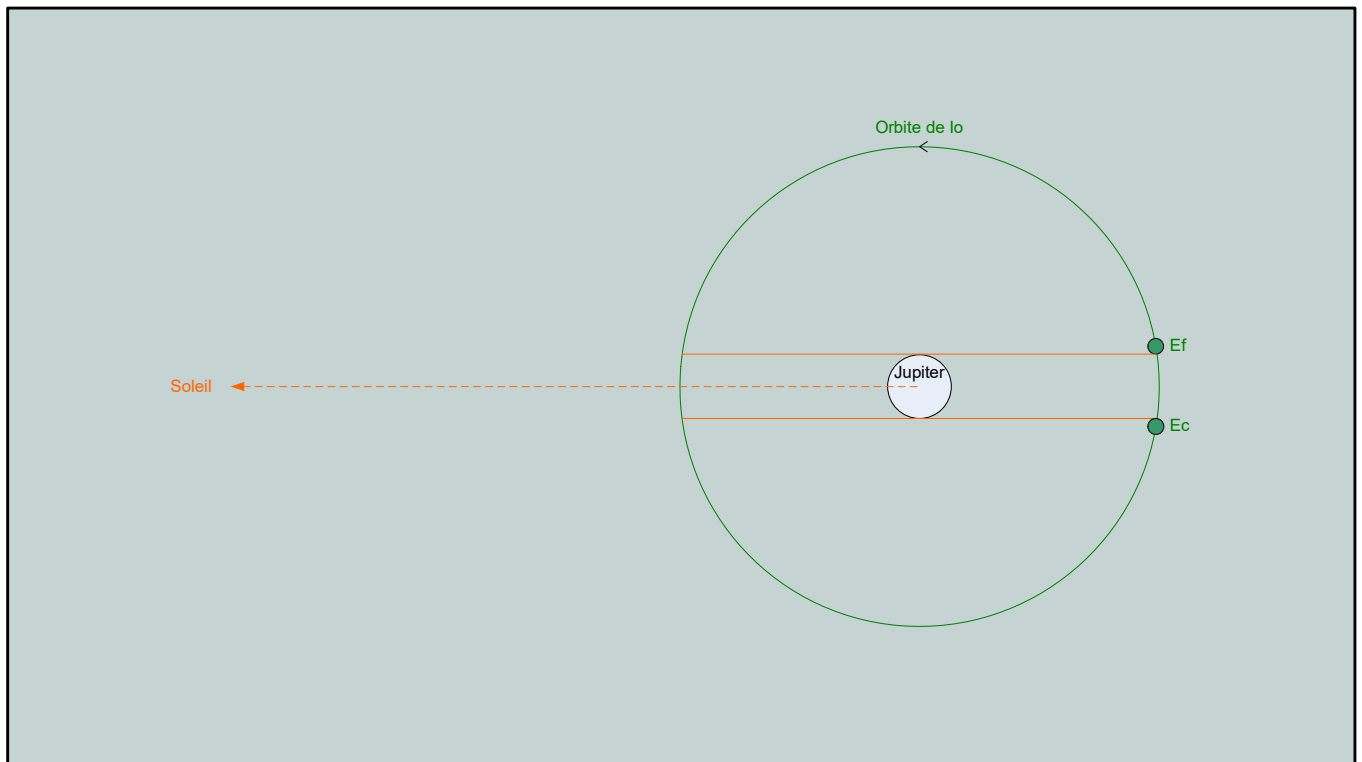
Mais regardons pourquoi elles se produisent et dans quelles conditions elles sont visibles

La Terre fait un tour du Soleil en un an tandis que Jupiter met 11,86 ans. Leurs orbites sont pratiquement coplanaires.

A certains moments, les directions Terre- Soleil et Terre - Jupiter sont opposées ; on dit que Jupiter et le Soleil sont en opposition. Jupiter passe alors au méridien à minuit et est visible toute la nuit.

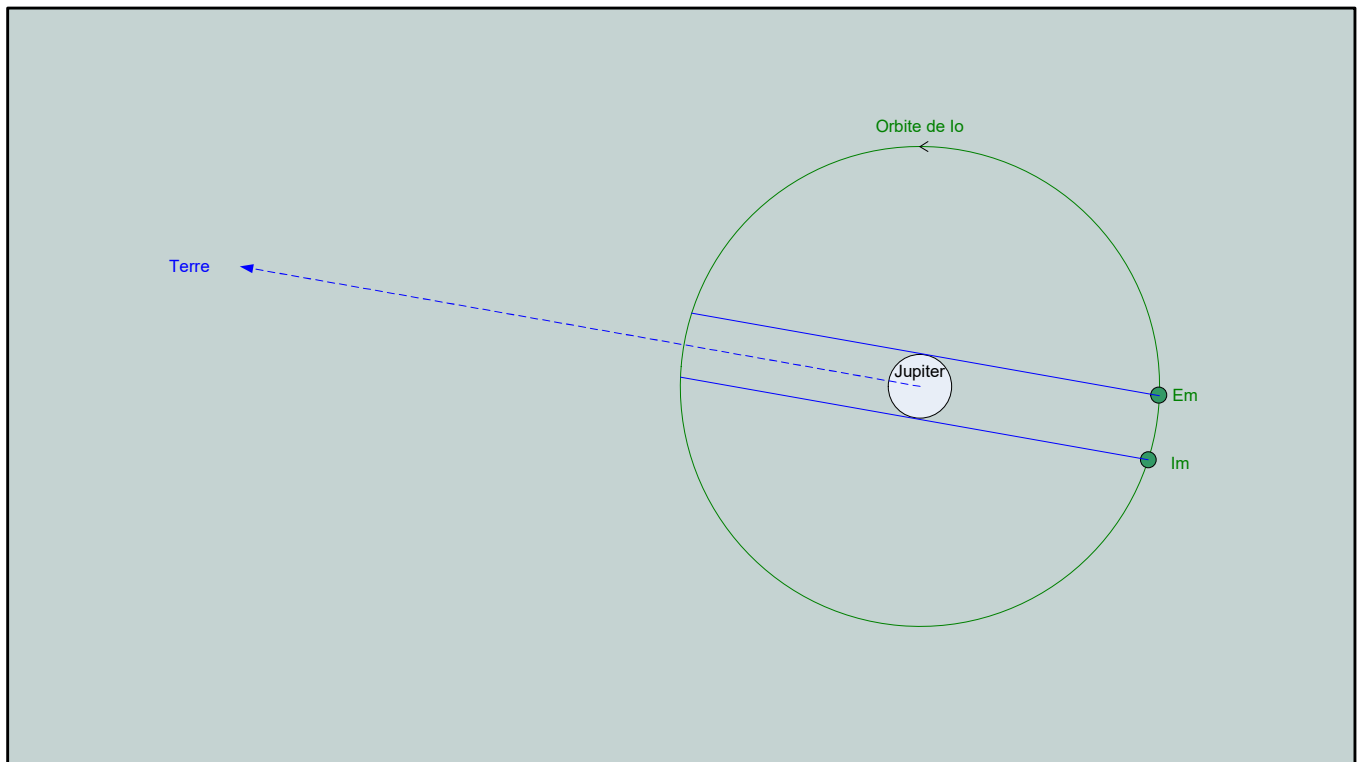
A d'autres moments, les directions Terre- Soleil et Terre - Jupiter sont identiques ; on dit que Jupiter et le Soleil sont en conjonction. Jupiter passe au méridien à midi et n'est levé que le jour donc invisible.

Deux oppositions successives de Jupiter et du Soleil sont séparées de 399 jours soit environ 1 an et un mois. Il en est de même des conjonctions.

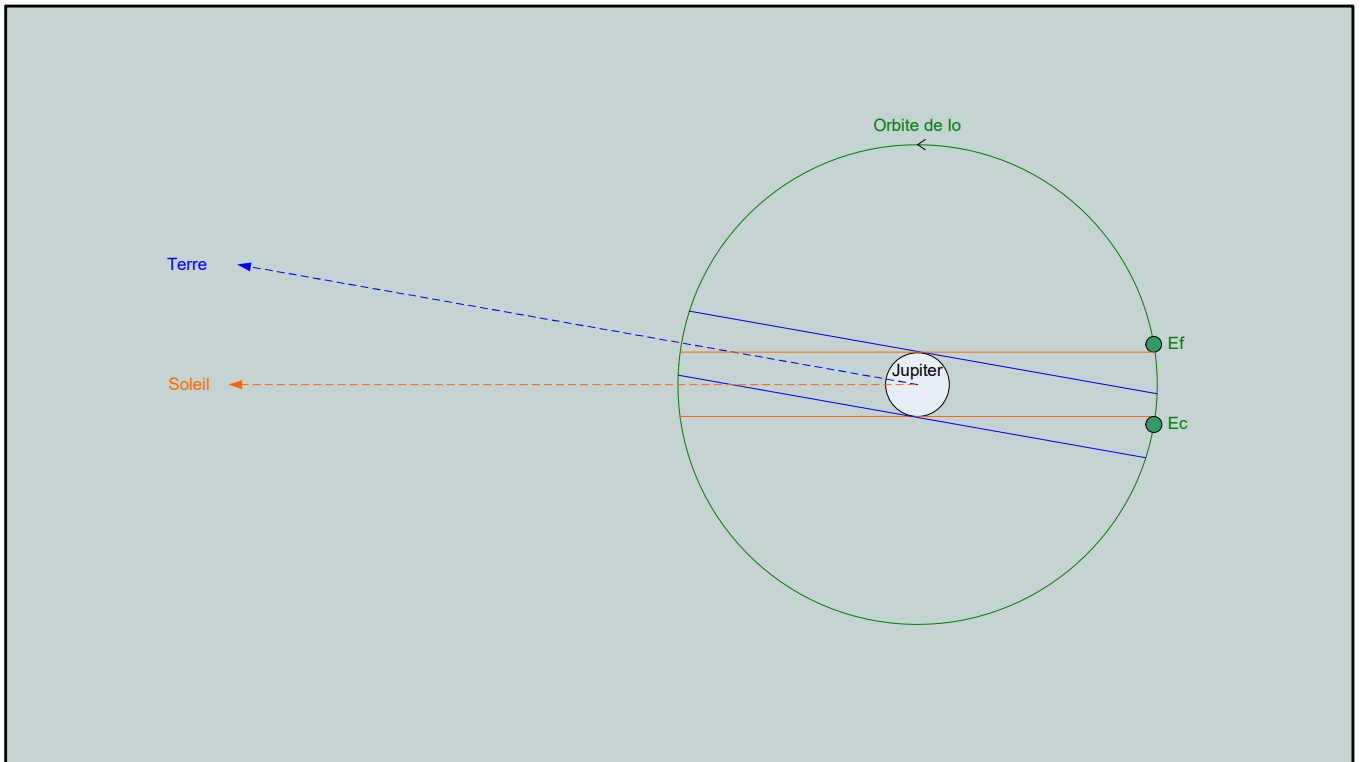


Précisons les positions du Soleil, de Jupiter et de Io au moment d'une éclipse de Io.

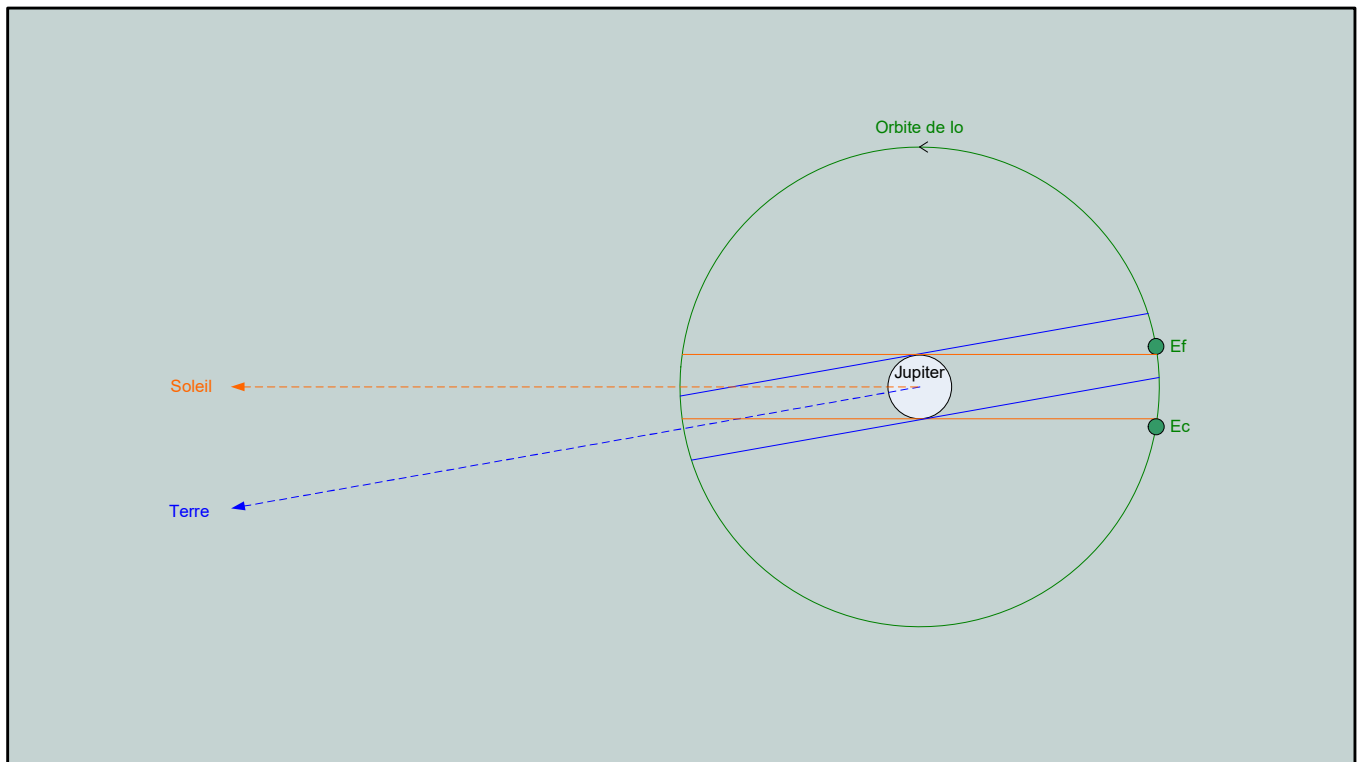
Ec est le point où l'éclipse du soleil par Jupiter commence ; Ef est le point où l'éclipse du Soleil par Jupiter se termine. Lorsque Io se trouve entre Ec et Ef, il n'est plus éclairé par le Soleil ; Io est dans l'ombre



Vu depuis la Terre, lorsque Io est entre Im (immersion) et Em (émersion), Io est caché par Jupiter Jupiter



Ici, lorsque l'éclipse sur Io commence, vue de la Terre T2 (entre opposition et conjonction), Io est caché par Jupiter et donc non visible. Au contraire, la fin de l'éclipse est visible depuis la terre

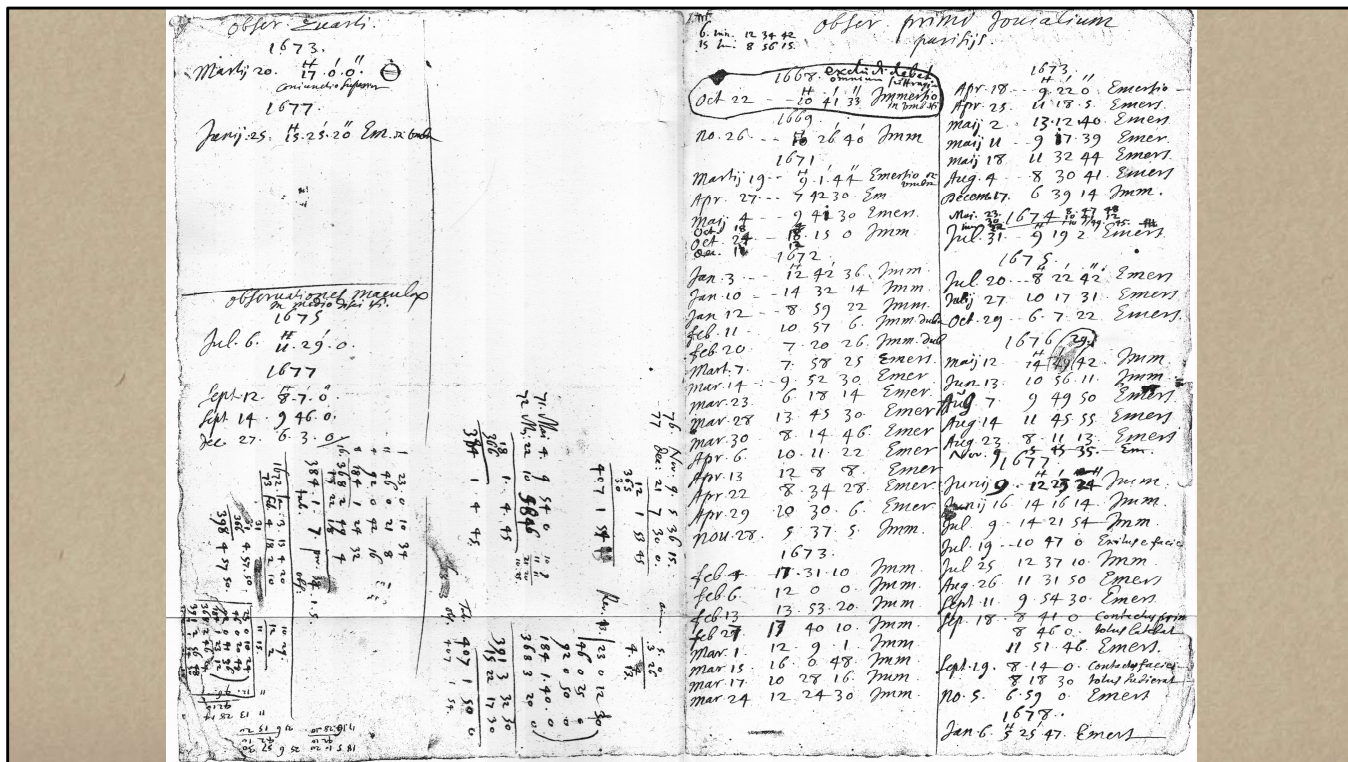


Ici, lorsque l'éclipse sur Io commence, vue de la Terre T4 (entre conjonction et opposition), Io est visible. Au contraire, à la fin de l'éclipse vue depuis la terre, Io est caché par Jupiter

Entre l'opposition et la conjonction de Jupiter,
on peut voir depuis la Terre la fin des éclipses de Io

Entre la conjonction et l'opposition,
on peut voir le début des éclipses de Io

Plusieurs semaines avant et après la conjonction, les observations
de Jupiter, trop proche du soleil, ne sont pas possibles



Notes prises par Romer

Römer détermine donc avec patience et précisions les dates des commencements ou des fins d'éclipse et établit des éphémérides



Les marins, munis de ces éphémérides pourront observer ces éclipses et savoir quelle est l'heure de Paris au moment où elles se produisent. Ils détermineront aussi l'heure locale grâce aux étoiles et en déduiront leur longitude par rapport à Paris.

Mais pour observer un début ou une fin d'éclipse d'un satellite, il faut suivre très attentivement Jupiter dans le champ de la lunette. L'œil de l'observateur ne doit quasiment pas quitter l'oculaire pendant une bonne dizaine de minutes, puis ensuite être capable de juger pendant une minute si effectivement le phénomène se produit. Une telle démarche rendait évidemment la méthode impraticable en mer à cause des mouvements du navire. C'est la raison pour laquelle seule la cartographie terrestre a pu en tirer parti.

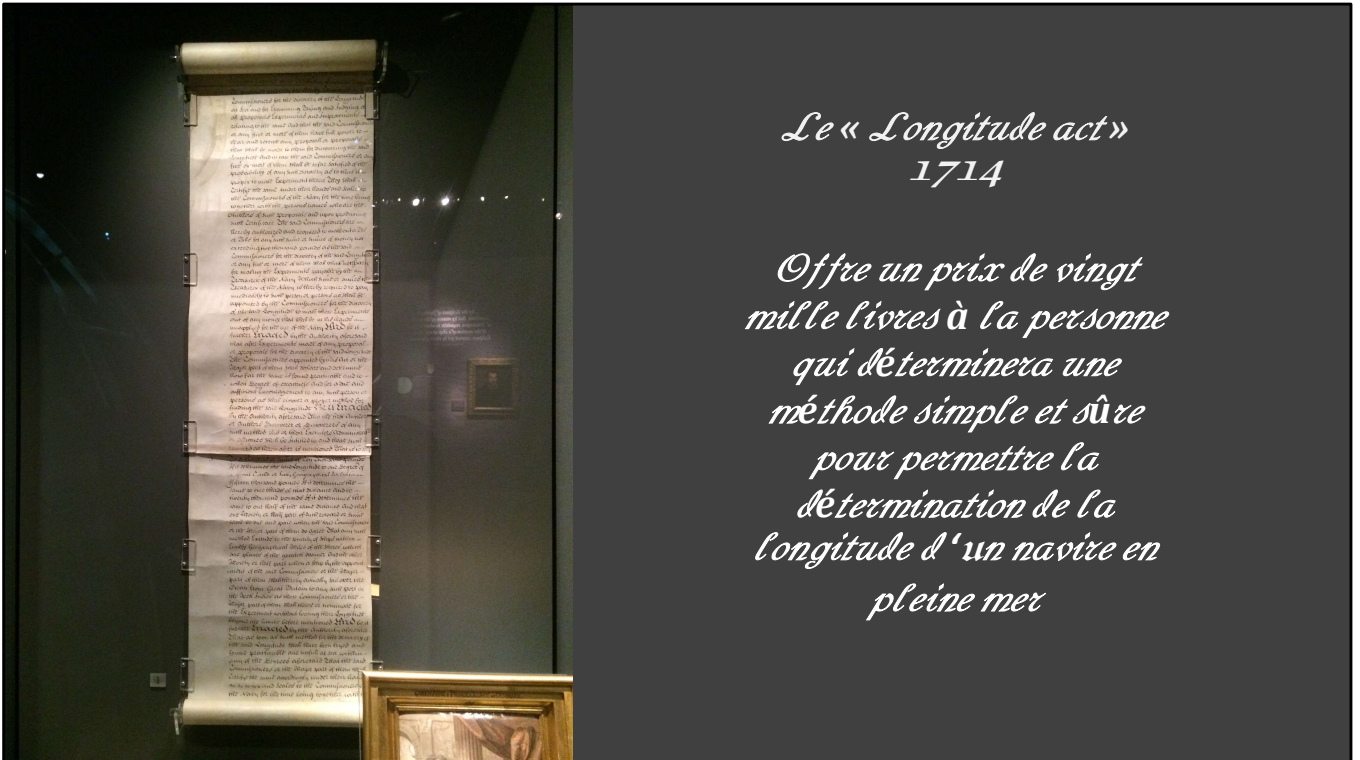


22 Octobre 1707

désastre naval des îles Sorlingues

4 vaisseaux britanniques sombrent
avec 2000 marins à bord

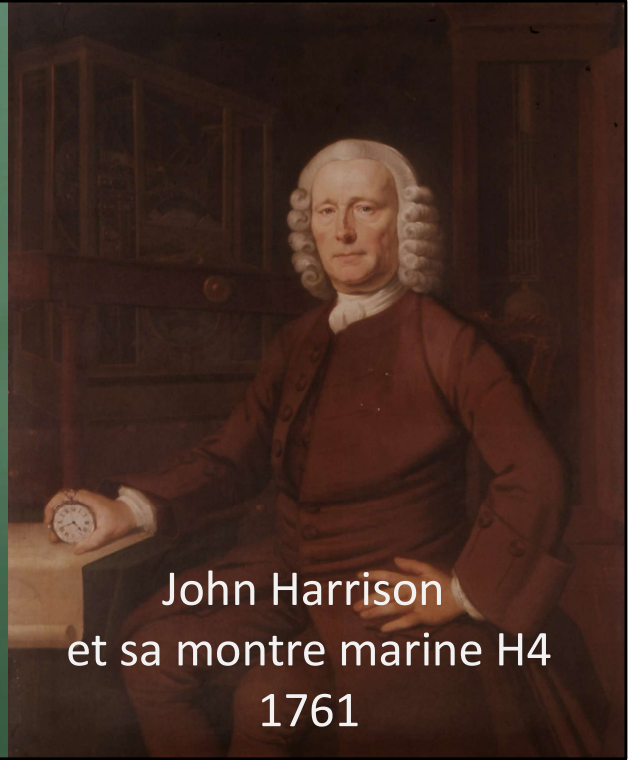
Et les pertes de bateaux et de leurs équipages continuèrent...
Un exemple célèbre est le désastre des îles Sorlingues du 22
Octobre 1707. A la suite d'une erreur de mesure de longitude 4
navires de la flotte britannique qui naviguaient par temps de
brouillard au nord des îles Scilly s'échouent et plus de deux mille
hommes dont l'amiral Shovell qui dirigeait la flotte périrent noyés



*Le « Longitude act »
1714*

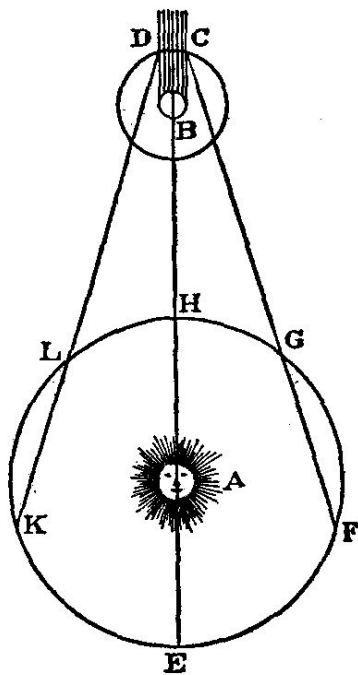
*Offre un prix de vingt
mille livres à la personne
qui déterminera une
méthode simple et sûre
pour permettre la
détermination de la
longitude d'un navire en
pleine mer*

Cet accident, conjugué à la volonté britannique de suprématie maritime, est à l'origine du « prix de la longitude » qui en 1714 promet 20 000 livres à qui résoudrait ce problème à un demi degré près, soit environ cinquante kilomètres. Celui qui atteindrait une précision inférieure à 40 minutes ne recevrait que 15 000 livres et pour moins d'un degré d'erreur, 10 000 livres



John Harrison
et sa montre marine H4
1761

Pendant de longues décennies, plusieurs personnes tentent de remporter le prix. Harrison s'efforce de construire une horloge de précision capable de garder l'heure du port d'origine. Une erreur de 4 secondes sur le temps occasionne une erreur de 1 minute de longitude soit plus d'un km. Il commence en 1730 à construire plusieurs chronomètres de marine et atteint finalement en 1761 la précision inférieure au demi-degré nécessaire pour remporter le prix. En 1772 sa dernière montre H5 a une précision de $1/3$ s par jour



« Soit A le Soleil, B Jupiter, C le premier satellite qui entre dans l'ombre de Jupiter pour sortir en D, et soit E, F, G, H, K, L, la Terre placée à diverses distances de Jupiter.

Or supposé que la Terre étant en L vers la seconde quadrature de Jupiter, ait vu le premier satellite, lors de son émergence ou sortie de l'ombre en D ; et qu'ensuite, environ 42 heures et demie après, savoir après une révolution de ce satellite, la Terre se trouvant en K, le voit de retour en D ; il est manifeste que si la lumière demande du temps pour traverser l'intervalle LK, le satellite sera vu plus tard de retour en D, qu'il n'aurait été si la Terre était demeurée en L ; de sorte que la révolution de ce satellite, ainsi observé par les émergences, sera retardée d'autant de temps que la lumière en aura employé à passer de L en K. et qu'au contraire dans l'autre quadrature FG, où la terre en s'approchant, va au devant de la lumière, les révolutions des immersions paraîtront autant raccourcies, que celles des émergences avaient parues allongées. »

Extrait du rapport de Römer, dans le journal des sçavans du Lundy 7 Décembre 1676 (page 234)

Mais si les observations de Romer n'ont pas vraiment servi à la navigation, elles ont servi à la physique !

Il examine de près les mesures qu'il a faites et constate une inégalité entre les périodes de Io avant et après l'opposition.

Nous allons essayer de refaire le raisonnement de Römer sur des mesures récentes :

Opposition de Mars

le 8 Mars 2016

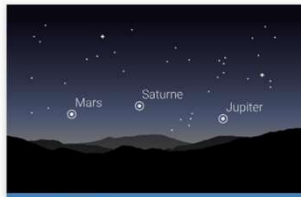
Jupiter et le Soleil étaient en opposition le 8 Mars 2016



ÉPHÉMÉRIDES

Visibilité des astres

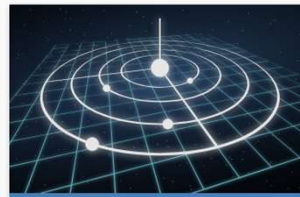
Calcul des instants de lever, de passage au méridien et de coucher du Soleil, de la Lune et des planètes.



ÉPHÉMÉRIDES

Observation des planètes

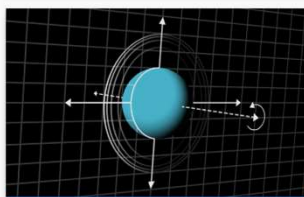
Calcul des éphémérides utiles à l'observation du Soleil et des corps du Système solaire depuis la Terre.



ÉPHÉMÉRIDES

Éphémérides de position

Calcul des éphémérides de position du Soleil et des corps du Système solaire.



ÉPHÉMÉRIDES

Éphémérides physiques

Calcul des éphémérides physiques des corps du Système solaire.



PHÉNOMÈNES

Éclipses de Lune

Calcul des prédictions des éclipses de Lune.



PHÉNOMÈNES

Phénomènes de satellites

Calcul des prédictions des phénomènes de satellites naturels de Jupiter, Saturne et Uranus.

Le site de l'Institut de mécanique céleste et calcul des éphémérides nous donne les heures des éclipses de Io au cours des mois qui précèdent et suivent cette opposition

 Système planétaire : Jupiter ▼

 Époque : 2016-03-06 / +4 / 1 jour / UTC ^

Date

✓ Jour julien ou date au format AAAA-MM-JJ entre 1650-01-02 et 2142-01-01

Échelle de temps

UTC TT

Nombre de dates

✓ Nombre de dates limité à 365

 Lieu d'observation : Latrape (43.247867°, 1.282405°) (Adresse) ^

Adresse Coordonnées Code observatoire

✓ Adresse postale du territoire français

 Options : IMCCE - SAI ▼

CALCULER

Phénomènes													EXPORTER
Date de début (UTC)	Durée (min)	Corps A	Type	Corps B	I	Δf (%)	D (r)	S (°)	H (°)	H 0 (°)	Phase C (°)	e C (°)	
2016-03-06T01:52:14.162	8.92		ÉC.D	503	0	0.15	25.21	46.8	-45.1	139.3	137.2		
2016-03-06T04:34:19.017	3.93		ÉC.D	502	0	0.08	23.98	22.4	-20.0	140.8	138.7		
2016-03-06T05:21:08.293	9.3		OC.F	503	0	0	21.87	13.5	-11.1	141.2	139.2		
2016-03-06T05:57:12.909	3.61	501	OM.D		0	0.05	23.27	7.4	-5.0	141.5	139.4		
2016-03-06T06:00:43.607	3.63	501	PA.D		0	0	22.16	6.8	-4.4	141.6	139.5		
2016-03-06T07:25:07.284	3.98		OC.F	502	0	0	22.07	-8.5	10.7	142.3	140.1		
2016-03-06T08:12:37.989	3.61	501	OM.F		0	-0.04	21.36	-16.5	18.7	142.8	140.4		
2016-03-06T08:15:09.953	3.63	501	PA.F		0	0	22.16	-17.0	19.1	142.8	140.4		
2016-03-07T03:09:44.272	3.64		ÉC.D	501	0	0.03	22.88	36.0	-34.2	153.2	152.2		
2016-03-07T05:27:43.420	3.66		OC.F	501	0	0	22.16	12.0	-10.1	154.5	153.5		
2016-03-07T23:07:05.064	4.01	502	OM.D		0	0.03	22.71	50.4	-49.6	164.5	163.7		
2016-03-07T23:09:39.040	4.06	502	PA.D		0	0	22.08	50.6	-49.8	164.5	163.7		
2016-03-08T00:25:39.198	3.61	501	OM.D		0	0.01	22.46	52.5	-51.2	165.2	164.7		
2016-03-08T00:26:35.027	3.63	501	PA.D		0	0	22.17	52.5	-51.2	165.2	164.7		
2016-03-08T01:55:03.420	4.06	502	PA.F		0	0	22.07	45.8	-44.3	166.1	165.8		
2016-03-08T01:55:32.020	4.01	502	OM.F		0	0	22.18	45.8	-44.3	166.1	165.8		
2016-03-08T02:41:02.835	3.63	501	PA.F		0	0	22.17	39.7	-38.2	166.5	166.4		
2016-03-08T02:41:03.545	3.61	501	OM.F		0	0	22.17	39.7	-38.2	166.5	166.4		
2016-03-08T21:38:03.661	3.66		OC.D	501	0	0	22.17	40.8	-39.6	177.5	177.0		
2016-03-08T23:55:01.266	3.64		ÉC.F	501	0	0.02	22.55	52.7	-51.1	178.8	178.5		
2016-03-09T11:30:28.175	15.87		ÉC.D	504	0	0.05	22.2	-40.4	42.1	174.3	173.3		

1^e début d'éclipse avant l'opposition

7 Mars 2016 à 03h 09min 44s

1^e fin d'éclipse après l'opposition

8 Mars 2016 à 23h 55min 01s

Phénomènes												
Date de début (UTC)	Durée (min)	Corps A	Type	Corps B	I	Δf (Hz)	D (r)	S (°)	H (°)	H θ (°)	Phase ε (°)	ε ε (°)
2015-08-26T08:23:09.041	3.6	501	PAD		0	0	15.4	33.7	33.8		46.9	132.4
2015-08-26T08:23:48.001	3.6	501	OM.D		0	-0.01	15.26	33.9	33.9		46.9	132.4
2015-08-26T10:41:29.021	3.6	501	PA.F		0	0	15.4	53.9	53.5		45.7	134.1
2015-08-26T10:41:48.155	3.6	501	OM.F		0	0	15.47	53.9	53.5		45.6	134.1
2015-08-27T05:37:03.643	3.57		É.C.D	501	0	0	15.46	4.3	3.8		35.3	144.1
2015-08-27T06:57:28.231	3.88		É.C.D	502	0	0.01	15.52	18.9	18.4		34.5	145.0
2015-08-27T07:54:42.557	3.57		OC.F	501	0	0	15.4	29.2	28.6		34.0	145.7
2015-08-27T09:53:25.099	3.87		OC.F	502	0	0	15.4	48.5	47.7		32.9	147.2
2015-08-28T02:52:27.920	3.6	501	OM.D		0	0.02	15.65	-22.0	-23.2		23.3	156.6
2015-08-28T02:53:35.426	3.6	501	PAD		0	0	15.4	-21.9	-23.1		23.3	156.6
2015-08-28T05:10:27.339	3.6	501	OM.F		0	-0.02	15.08	0.1	-1.2		22.0	157.9
2015-08-28T05:11:53.995	3.6	501	PA.F		0	0	15.4	0.3	-0.9		22.0	157.9
2015-08-29T00:05:30.776	3.57		É.C.D	501	0	0.03	15.85	-35.7	-37.1		11.2	169.8
2015-08-29T01:30:58.526	3.8	502	OM.D		0	0.05	16.12	-31.1	-32.8		10.4	170.4
2015-08-29T01:35:02.045	3.8	502	PAD		0	0	15.4	-30.7	-32.4		10.4	170.4
2015-08-29T02:24:53.203	3.57		OC.F	501	0	0	15.4	-25.3	-27.1		9.9	170.8
2015-08-29T04:21:55.831	3.8	502	OM.F		0	-0.05	14.55	-7.8	-9.7		8.8	171.7
2015-08-29T04:26:42.087	3.8	502	PA.F		0	0	15.4	-7.0	-8.9		8.8	171.8
2015-08-29T04:44:07.800	8.26	503	OM.D		0	0.08	16.56	-3.6	-5.5		8.6	172.0
2015-08-29T04:52:37.490	8.21	503	PAD		0	0	15.38	-2.1	-4.1		8.5	172.0
2015-08-29T08:18:24.112	8.26	503	OM.F		0	-0.1	13.88	34.8	32.8		6.6	174.1
2015-08-29T08:29:16.333	8.21	503	PA.F		0	0	15.38	36.6	34.6		6.5	174.3
2015 08 29T21:18:44.168	10.91	504	OM.D		0	0.15	17.61	26.7	27.2		2.6	175.5
2015-08-29T21:21:00.527	3.6	501	OM.D		0	0.04	16.04	-26.5	-27.1		2.6	175.5
2015-08-29T21:23:54.398	3.6	501	PAD		0	0	15.4	-26.8	-27.4		2.7	175.5
2015-08-29T21:42:17.176	10.59	504	PAD		0	0	15.27	-29.3	-30.0		2.8	175.3
2015-08-29T23:38:58.996	3.6	501	OM.F		0	-0.05	14.7	-35.9	-37.4		3.6	174.5
2015-08-29T23:42:11.364	3.6	501	PA.F		0	0	15.4	-35.9	-37.5		3.6	174.5

110^e début d'éclipse avant l'opposition

27 Août 2015 à 05h 37min 4s

Phénomènes												EXPORTER
Date de début (UTC)	Durée (min)	Corps A	Type	Corps B	I	Δf (%)	D (r)	S (°)	H (°)	H φ (°)	Phase ε (°)	e ε (°)
2016-09-15T03:48:00.737	3.67	501	P.A.D		0	0	15.25	-26.4	-19.3	21.9	148.7	
2016-09-15T03:59:30.062	3.69	501	O.M.D		0	-0.16	12.79	-24.6	-17.3	21.8	148.8	
2016-09-15T06:03:26.076	3.67	501	P.A.F		0	0	15.26	-2.8	4.7	20.6	150.1	
2016-09-15T06:13:55.789	3.69	501	O.M.F		0	0.15	17.5	-0.9	6.6	20.5	150.2	
2016-09-15T12:44:03.959	9.55		O.C.D	503	0	0	15.03	46.8	47.4	16.9	155.0	
2016-09-15T16:28:29.358	10.1		É.C.F	503	0	0.3	19.64	19.6	15.6	14.9	157.4	
2016-09-15T21:02:21.960	4.07	502	P.A.D		0	0	15.17	-28.2	-31.0	12.4	159.7	
2016-09-15T21:24:14.047	4.15	502	O.M.D		0	-0.23	11.61	-31.5	-34.0	12.1	159.9	
2016-09-15T23:43:04.914	4.07	502	P.A.F		0	0	15.16	-45.6	-44.2	10.9	160.9	
2016-09-16T00:01:25.494	4.15	502	O.M.F		0	0.2	18.24	-46.1	-44.1	10.7	161.0	
2016-09-16T01:07:18.268	3.65		O.C.D	501	0	0	15.25	-45.0	-40.9	10.1	161.5	
2016-09-16T03:31:27.188	3.67		É.C.F	501	0	0.13	17.29	-28.6	-22.2	8.7	162.6	
2016-09-16T22:18:20.822	3.67	501	P.A.D		0	0	15.24	-39.1	-40.3	2.2	174.6	
2016-09-16T22:28:04.438	3.7	501	O.M.D		0	-0.14	13.16	-40.2	-41.2	2.3	174.7	
2016-09-17T00:33:44.391	3.67	501	P.A.F		0	0	15.25	-46.2	-43.4	3.4	175.6	
2016-09-17T00:42:29.780	3.7	501	O.M.F		0	0.12	17.12	-46.0	-42.9	3.5	175.7	
2016-09-17T15:27:21.952	4.15		O.C.D	502	0	0	15.16	29.0	26.1	11.8	174.4	
2016-09-17T18:25:48.553	4.23		É.C.F	502	0	0.16	17.68	-2.2	-5.8	13.5	172.4	
2016-09-17T19:37:30.563	3.65		O.C.D	501	0	0	15.24	-15.1	-18.3	14.2	171.7	
2016-09-17T21:59:52.993	3.67		É.C.F	501	0	0.11	16.91	-37.3	-38.9	15.6	170.5	
2016-09-18T01:47:02.902	27.24	504	P.A.D		0	0	14.43	-40.3	-36.2	17.9	168.8	
2016-09-18T03:31:59.992	27.22	504	P.A.F		0	0	14.43	-25.8	-20.6	18.9	168.0	
2016-09-18T16:48:45.568	3.67	501	P.A.D		0	0	15.24	14.8	11.6	26.4	159.0	
2016-09-18T16:56:43.170	3.7	501	O.M.D		0	-0.11	13.54	13.4	10.1	26.5	158.9	
2016-09-18T19:04:07.522	3.67	501	P.A.F		0	0	15.24	-9.7	-12.9	27.7	157.5	
2016-09-18T19:11:08.262	3.7	501	O.M.F		0	0.1	16.74	-11.0	-14.1	27.8	157.4	

110° fin d'éclipse après l'opposition
17 Septembre 2016 à 21h 59min 53s

Intervalle de temps entre le 110^e et le 1^e début d'éclipse :

27 Août 2015 à 05h 37min 4s – 07 Mars 2016 à 03h 09min 44s

$\Delta_1 = 192 \text{ jours } 21\text{h } 32\text{min } 41\text{s}$

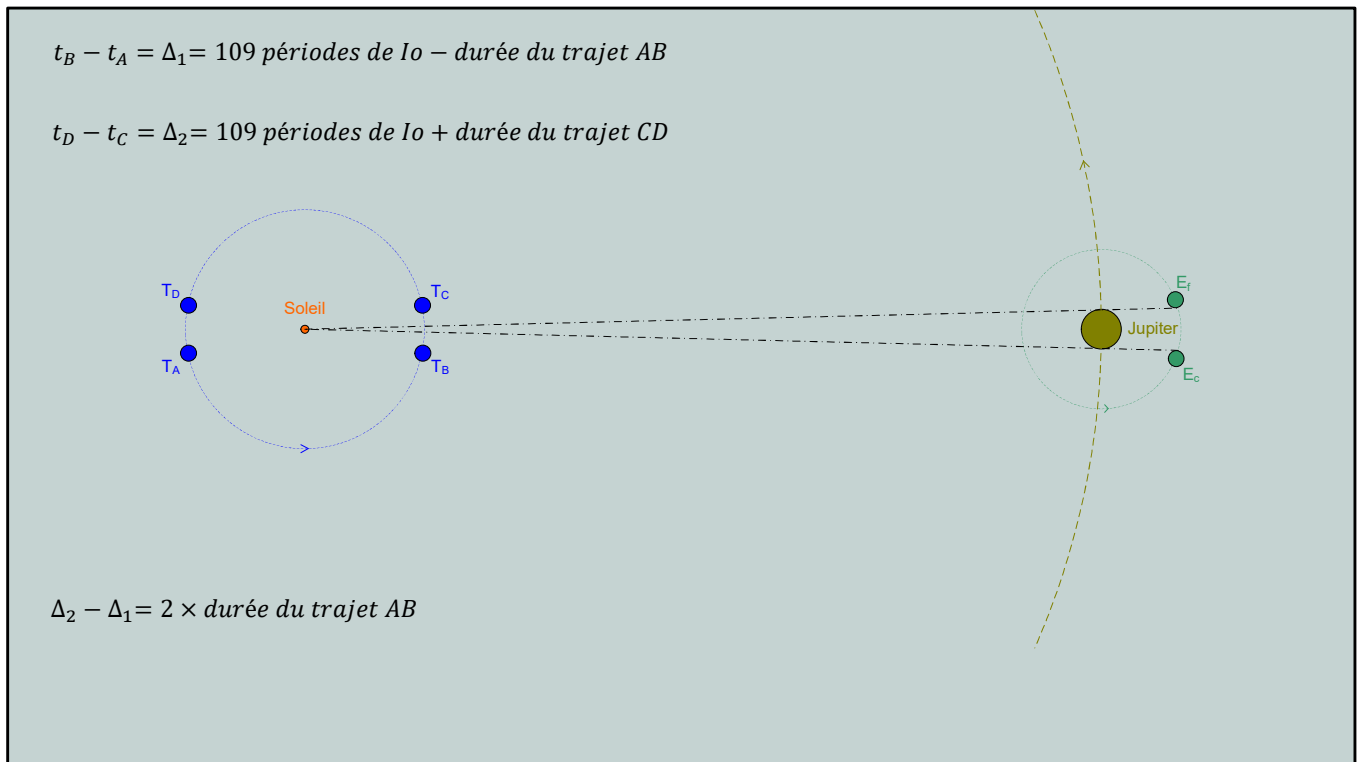
$$\Delta_2 - \Delta_1 = 32 \text{ min } 11\text{s}$$

Intervalle de temps entre la 1^e et la 110^e fin d'éclipse :

8 Mars 2016 à 23h 55min 1s – 17 Septembre 2016 à 21h 59min 53s

$\Delta_2 = 192 \text{ jours } 22\text{h } 04\text{min } 52\text{s}$

On constate, comme Römer, que $\Delta_1 < \Delta_2$



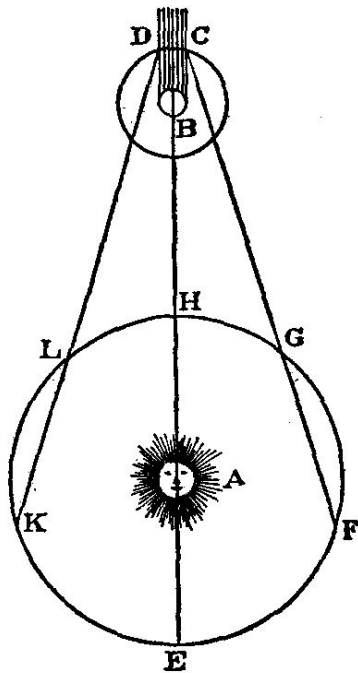
Si la Terre avait été fixe en A (ou n'importe où) au lieu de se déplacer de A à B, l'intervalle de temps aurait été exactement de 109 périodes de Io. Mais la Terre est allée vers le signal émis et le signal a été reçu un peu plus tôt, le temps Δ_1 que la lumière met pour aller de A à B

De même, si la Terre avait été immobile en C au lieu de se déplacer de C à D, l'intervalle de temps aurait été exactement de 109 périodes de Io. Mais la Terre s'est éloignée de Io et le signal a été reçu plus tard, le temps Δ_2 que la lumière met pour aller de C à D

Les distances AB et CD étant très voisines du diamètre de l'orbite terrestre, la lumière met 32 minutes à parcourir 2 fois le diamètre de l'orbite terrestre soit 600 millions de kilomètres soit 311 000 km/s

Pourquoi avoir choisi l'année 2016 ? Simplement par ce que cette

année là, ça marche bien ! En effet, notre raisonnement n'est correct que si l'on suppose les orbites des planètes coplanaires, circulaires et donc uniformes, ce qui n'est pas le cas. L'excentricité de l'orbite de Jupiter est relativement forte et sa distance au Soleil peut varier de 75 000 000 km entre le périhélie et l'aphélie. Si, entre t_A et t_D la distance Soleil Jupiter a augmenté on trouvera plus que 33 minutes tandis qu'on trouvera moins si elle a diminué. Certaines années le cumul de ces suppositions amène à des estimations de c très éloignées de la réalité.



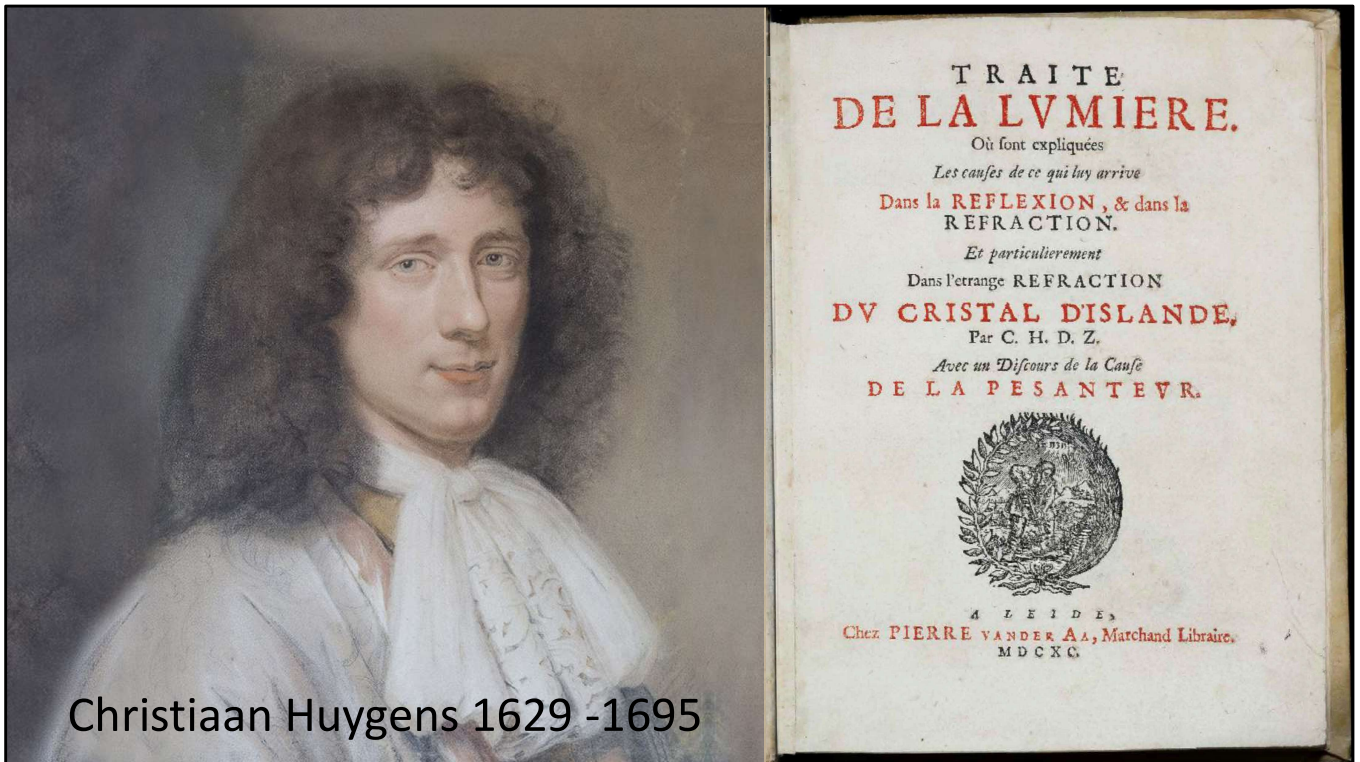
« Soit A le Soleil, B Jupiter, C le premier satellite qui entre dans l'ombre de Jupiter pour sortir en D, et soit E, F, G, H, K, L, la Terre placée à diverses distances de Jupiter.

Or supposé que la Terre étant en L vers la seconde quadrature de Jupiter, ait vu le premier satellite, lors de son émersion ou sortie de l'ombre en D ; et qu'ensuite, environ 42 heures et demie après, savoir après une révolution de ce satellite, la Terre se trouvant en K, le voit de retour en D ; il est manifeste que si la lumière demande du temps pour traverser l'intervalle LK, le satellite sera vu plus tard de retour en D, qu'il n'aurait été si la Terre était demeurée en L ; de sorte que la révolution de ce satellite, ainsi observé par les émersions, sera retardée d'autant de temps que la lumière en aura employé à passer de L en K. et qu'au contraire dans l'autre quadrature FG, où la terre en s'approchant, va au devant de la lumière, les révolutions des immersions paraîtront autant raccourcies, que celles des émersions avaient paruées allongées. »

Extrait du rapport de Römer, dans le journal des sçavans du Lundy 7 Décembre 1676 (page 234)

Römer n'a jamais donné une valeur à la vitesse de la lumière ; en 1676, il a seulement écrit qu'une vitesse finie de la lumière permettait d'interpréter ses mesures.

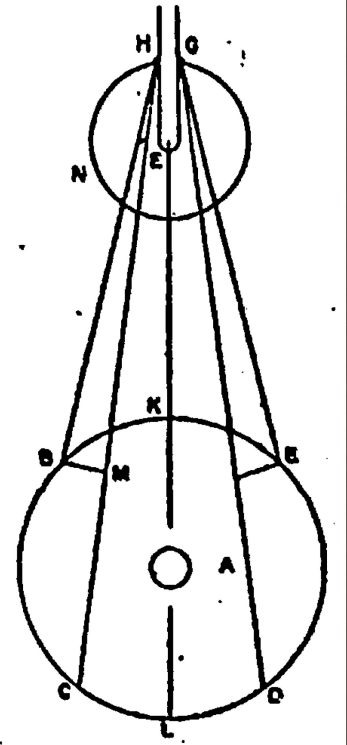
En 1681, après la révocation de l'édit de Nantes qui inquiéta les protestants, Römer rentre au Danemark et arrête ses travaux. Et malheureusement, presque tous ses écrits furent détruits lors d'un incendie en 1728.



C'est son ami Huygens qui quelques années plus tard fit vraiment le calcul à partir des résultats de Römer. Dans son « traité de la lumière » il explique qu'il a l'intime conviction que la lumière a une vitesse finie et

Mais ce que je n'employais que comme une hypothèse a reçu depuis peu grande apparence d'une vérité constante, par l'ingénieuse démonstration de M. Røemer que je vais rapporter ici, en attendant qu'il donne lui-même tout ce qui doit servir à la confirmer. Elle est fondée, de même que la précé-

Or par quantité d'observations de ces éclipses, faites pendant dix ans consécutifs, ces différences se sont trouvées très considérables, comme de dix minutes et davantage, et l'on en a conclu que pour traverser tout le diamètre de l'orbe annuel KL, qui est le double de la distance d'ici au Soleil, la lumière a besoin d'environ 22 minutes de temps.



que Römer en a fait une ingénieuse démonstration !

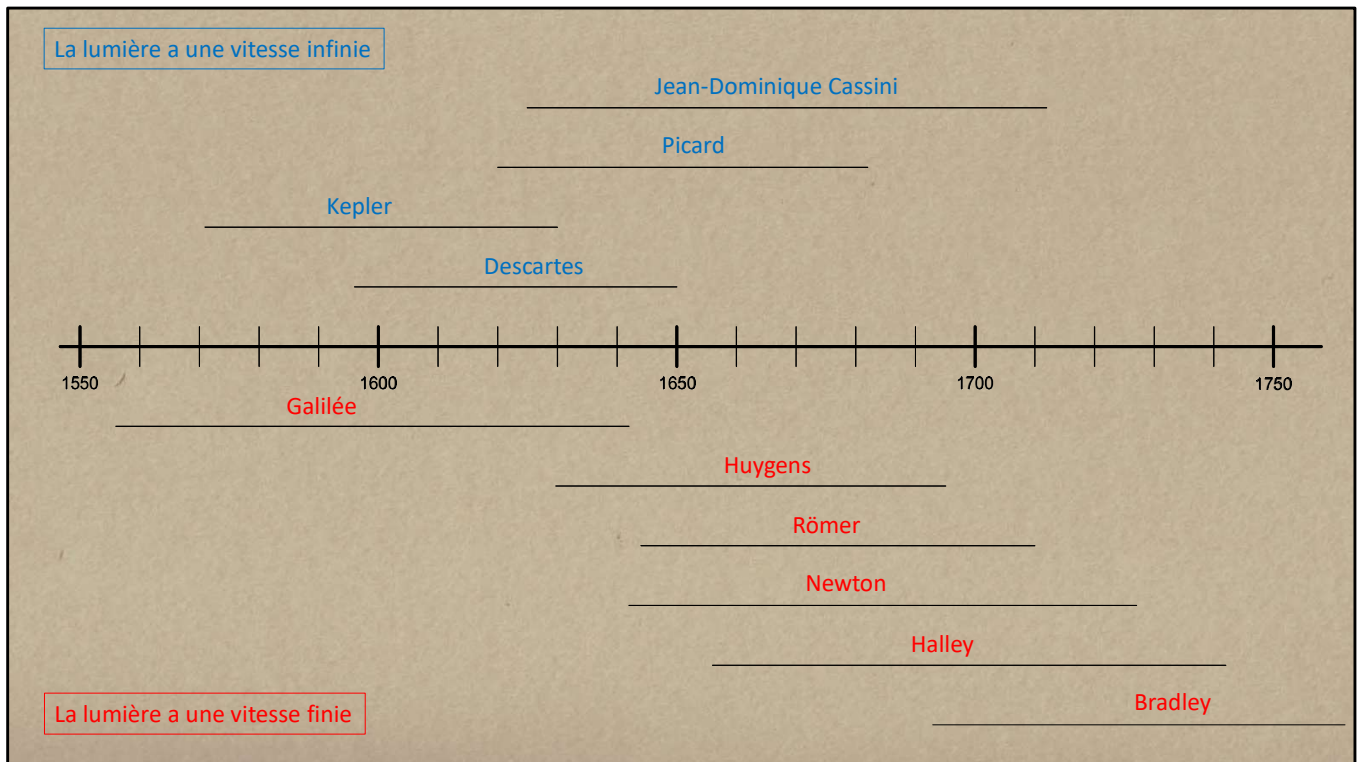
Les mesures de Römer permettent de conclure que la lumière met 22 minutes à parcourir le diamètre de l'orbite terrestre

Que si l'on considère la vaste étendue du diamètre KL, qui selon moi est de quelques 24 mille diamètres de la Terre, l'on connaîtra l'extrême vitesse de la lumière. Car, supposé que KL ne soit que de 22 mille de ces diamètres, il paraît qu'étant passés en 22 minutes, car cela fait mille diamètres en une minute et $16 \frac{2}{3}$ diamètres dans une seconde

Et parcourt donc 1000 diamètres terrestres en 1 minutes.

Compte tenu du diamètre de la Terre qui est de 13 000 km on obtient une vitesse de la lumière de 220 000 km/s

Römer n'a jamais fait ce calcul mais Huygens l'a fait à partir des mesures de Römer et en suivant son raisonnement



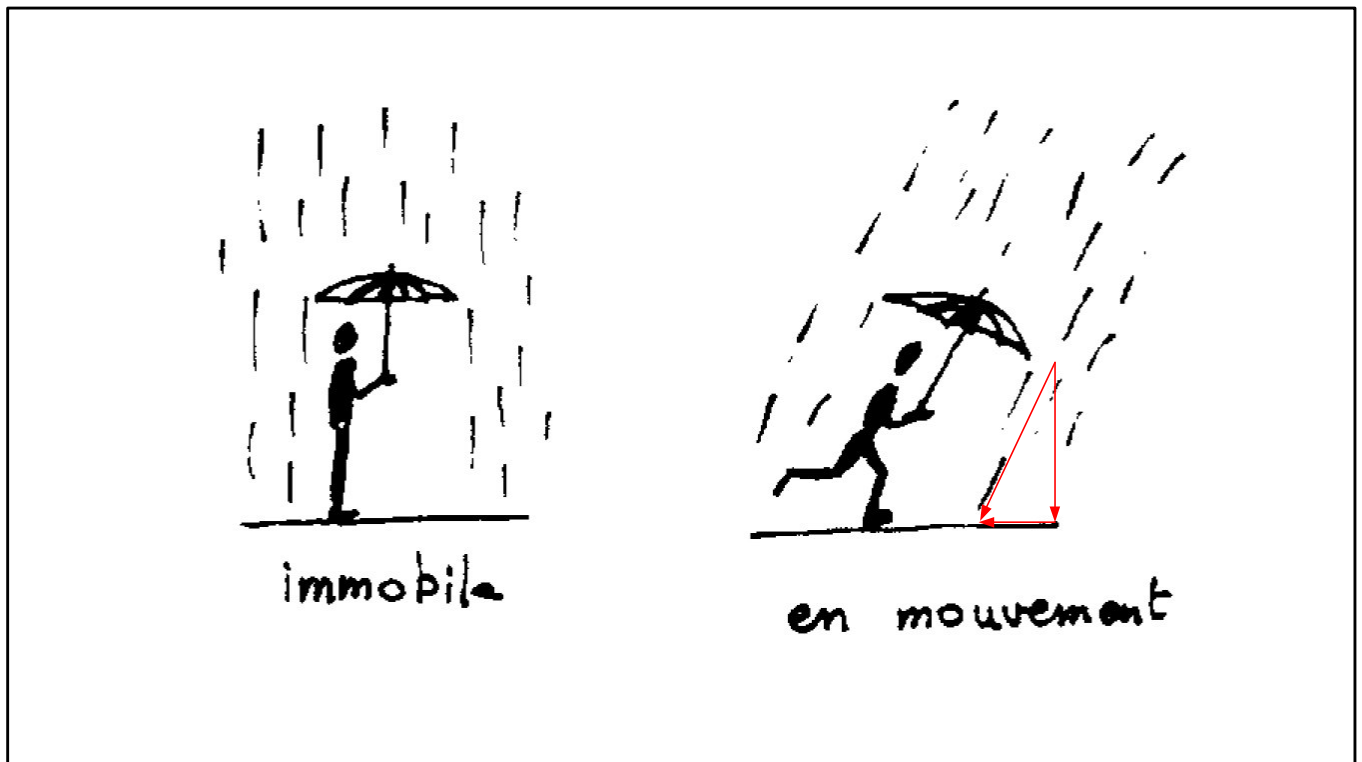
Au XVII siècle subsistaient des partisans d'une propagation instantanée de la lumière (Kepler et Descartes mais aussi le collègue de Römer Jean Picard et son chef Jean-Dominique Cassini)

Mais Römer reçu outre le soutien de Huygens, ceux de Newton et Halley puis de l'astronome britannique Bradley, directeur de l'observatoire de Greenwich qui confirmera sa découverte.

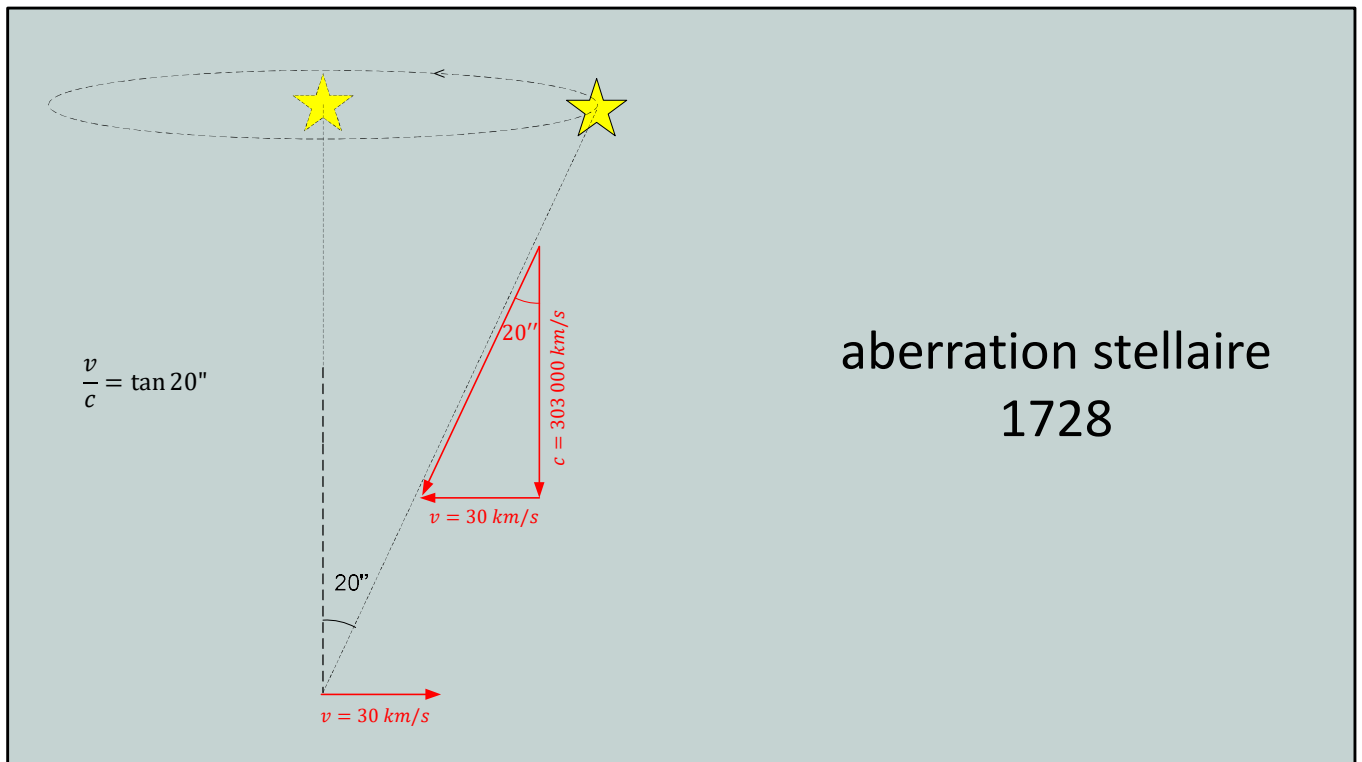


James Bradley
1693 – 1762

Plusieurs astronomes dont Picard et Halley tentaient de déterminer des distances stellaires par la méthode des parallaxes. Mais ils constataient que ces soi-disant parallaxes stellaires étaient toutes égales. Bradley repris leurs mesures et confirma que toutes les étoiles décrivaient sur la voute céleste et au cours d'une année une petite ellipse de 20 '' de demi-grand axe angulaire. Etant convaincu que toutes les étoiles ne sont pas à la même distance de la Terre, il en déduit qu'il ne s'agit pas d'un phénomène de parallaxe.

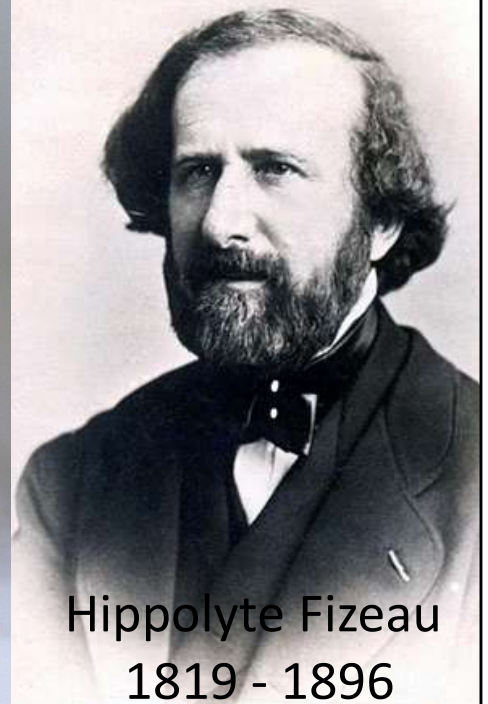


Et il interprète cette observation de la façon suivante :
Lorsqu'il pleut et que la pluie tombe verticalement pour un observateur immobile, elle semble tomber à l'oblique pour un marcheur et toujours venir vers lui
La vitesse de la pluie par rapport au marcheur est égale à la vitesse de la pluie par rapport au sol plus la vitesse du sol par rapport au marcheur (opposé de la vitesse du marcheur par rapport au sol).



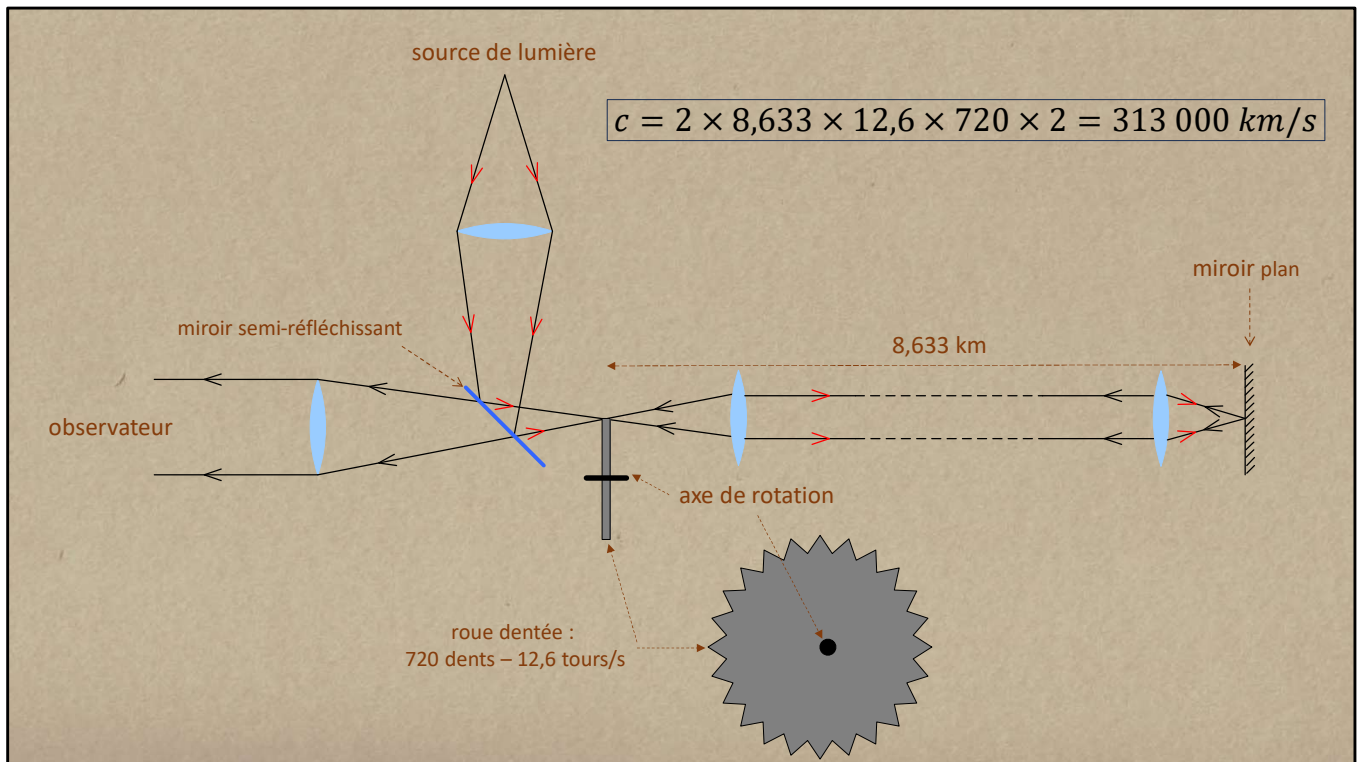
De même, la vitesse de la lumière par rapport à un observateur terrestre est égale à la vitesse de la lumière par rapport au Soleil plus la vitesse du Soleil par rapport à la Terre (opposée de la vitesse de la Terre par rapport au Soleil). Or la Terre décrit un cercle de 150 millions de km en 1 an soit 30 km/s. Ce phénomène fût interprété par Bradley en 1728. Le rayon de l'orbite terrestre était alors connu. Ce qui lui permit de calculer $c=303\,000\text{ km/s}$.

Expérience de la roue dentée 1849



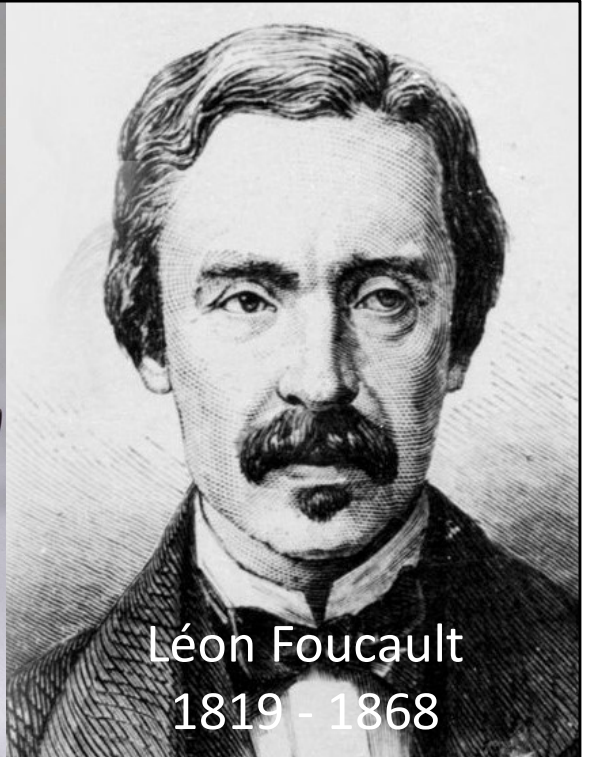
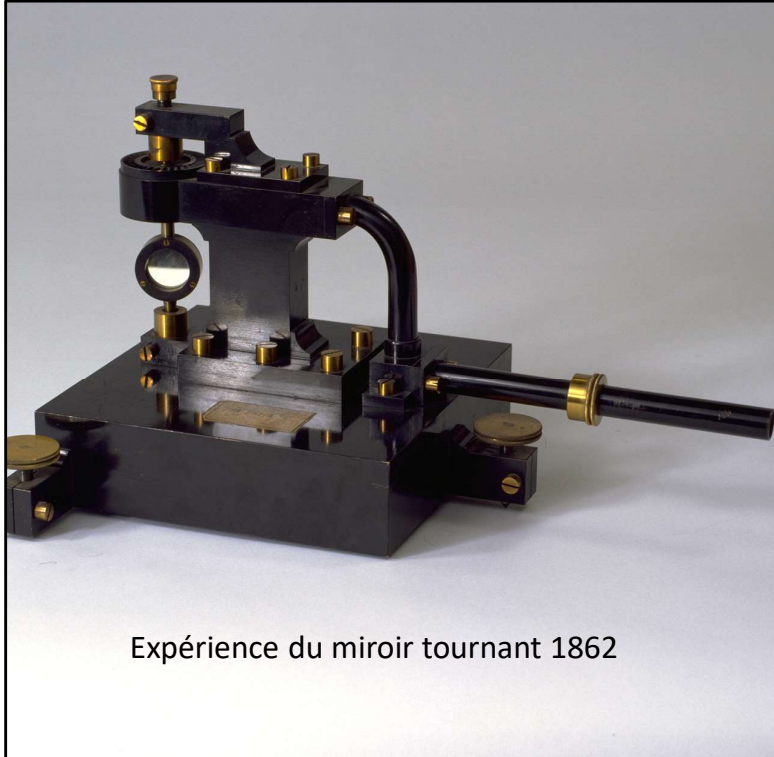
Hippolyte Fizeau
1819 - 1896

Et pendant plus d'un siècle aucune autre détermination de la vitesse de la lumière ne fût réalisée.
A partir du XIX siècle on utilisera des dispositifs terrestres.
D'abord Hippolyte Fizeau, physicien et astronome, élève d'Arago avec son expérience de la roue dentée

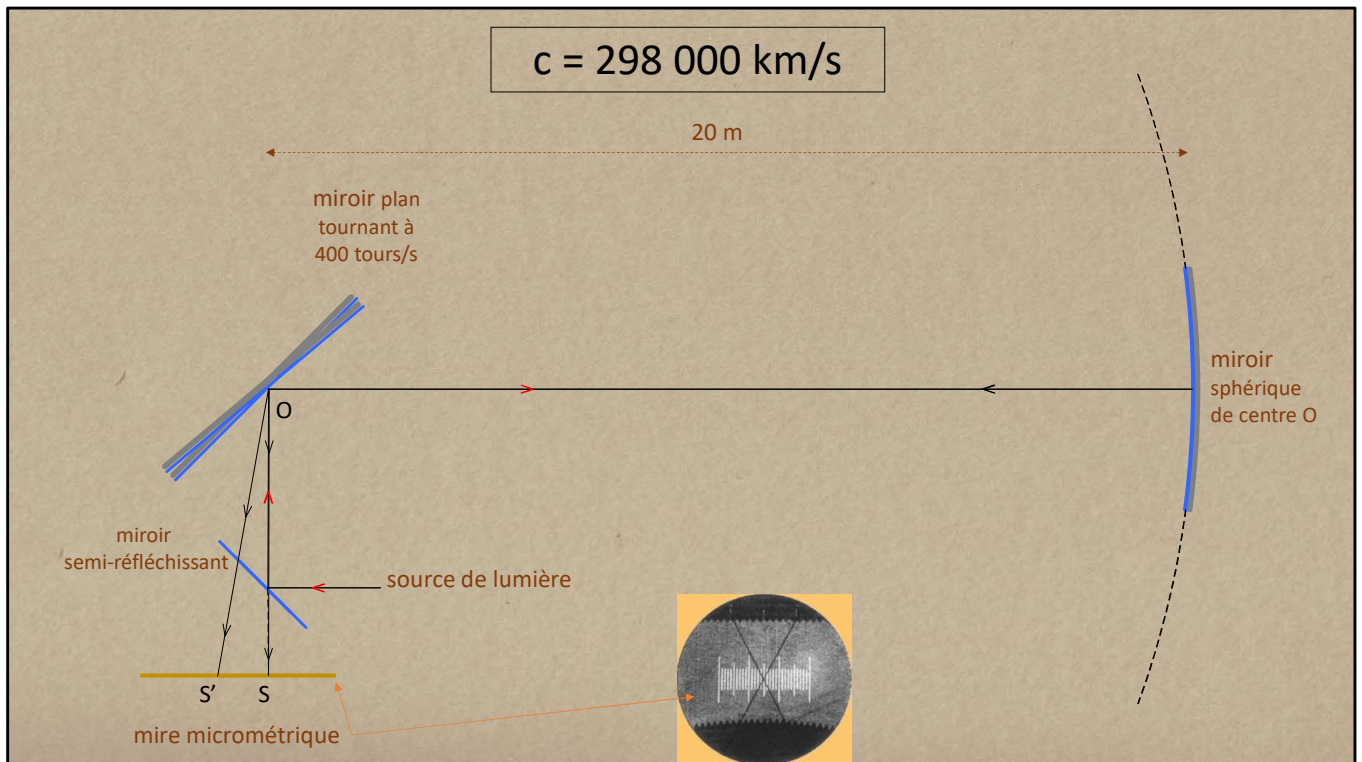


Si la roue tourne assez lentement, lorsque la lumière passe dans un creux, elle a le temps de revenir et de passer dans ce même creux. En moyenne la lumière passe et revient pendant la moitié du temps et à cause de la persistance des impressions lumineuses, l'éclairement est moitié plus faible que roue immobile devant un creux.

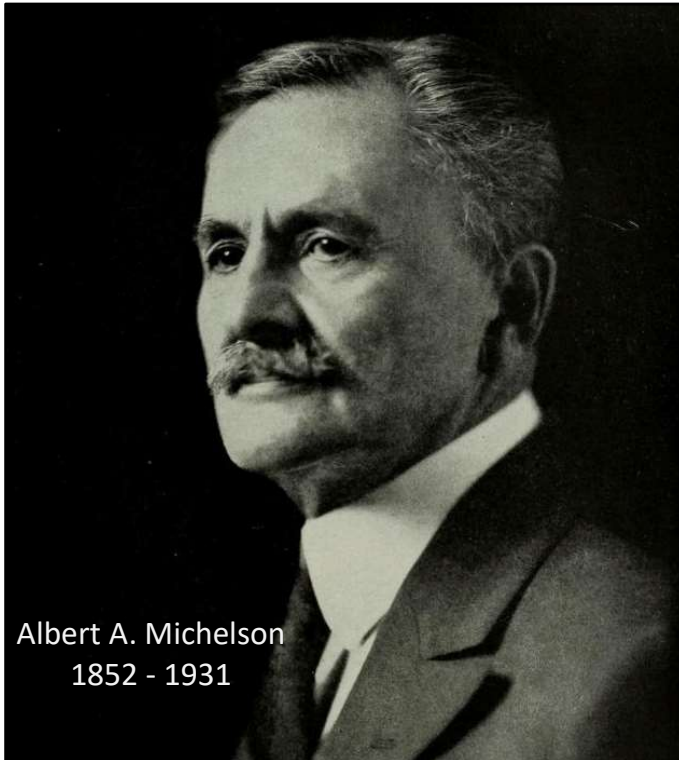
Mais en augmentant progressivement la vitesse de la roue, on constate que lorsqu'elle atteint 12,6 tours/s toute lumière disparaît. Entre l'aller et le retour de la lumière, un plein a remplacé un creux.



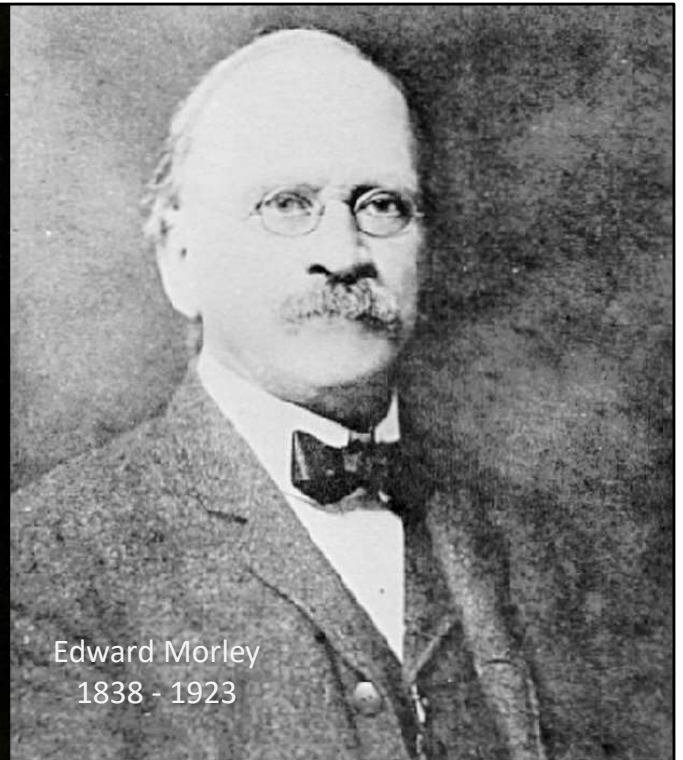
Puis Léon Foucault un ami et collègue de Fizeau, né la même année que lui, et lui aussi élève d'Arago.



Le centre du miroir sphérique est le point O du miroir tournant. Tout rayon incident sur le miroir sphérique provenant de O se réfléchit sur lui-même et suit le même trajet qu'à l'aller et ceci, quel que soit l'orientation du miroir plan. . Quelle que soit la position du miroir, la lumière revient au point S. Mais, si entre l'aller et le retour de la lumière le miroir a tourné d'un angle α , le rayon réfléchi tourne de 2α et arrive en S'

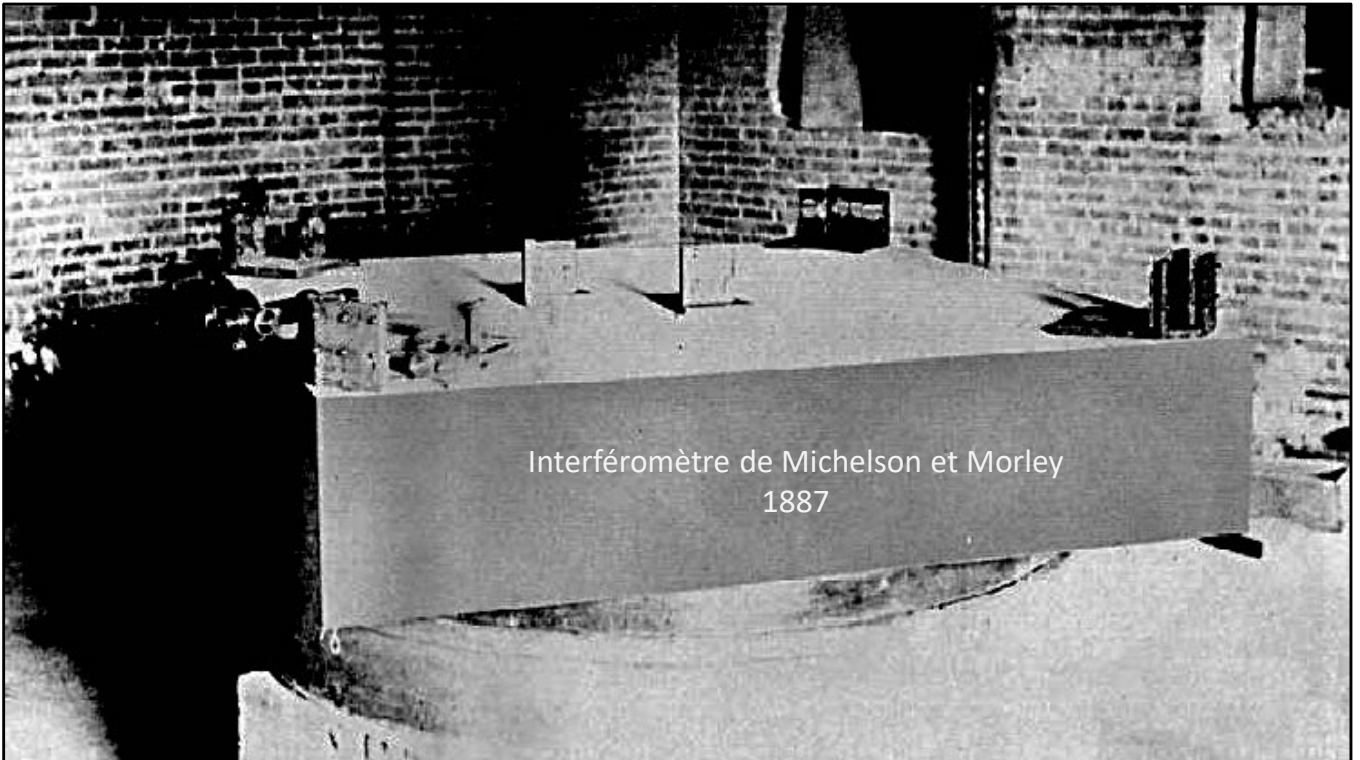


Albert A. Michelson
1852 - 1931

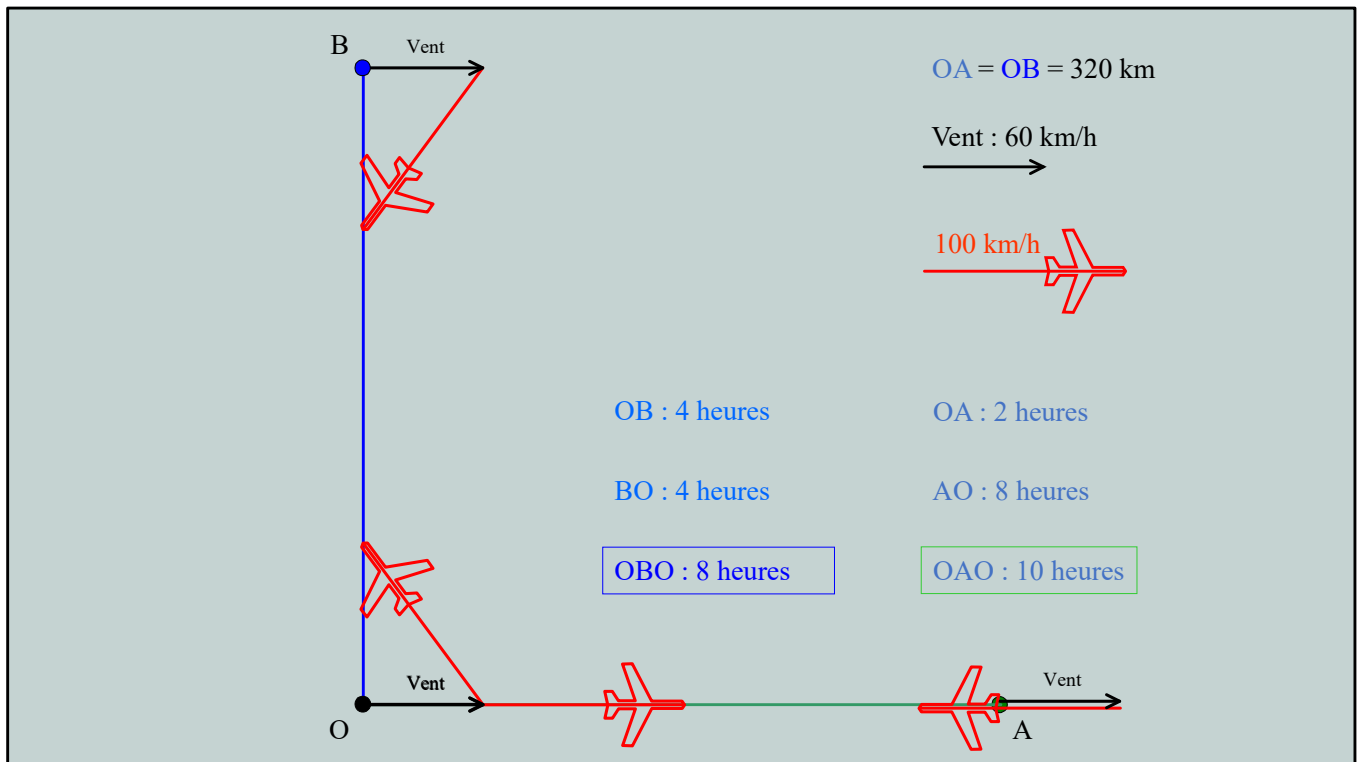


Edward Morley
1838 - 1923

L'expérience décisive qui suivra est celle de Michelson et Morley, deux physiciens américains, réalisée 25 ans plus tard



Ils cherchent, non pas à mesurer la vitesse de la lumière mais à montrer qu'elle « s'appuie sur l'éther » pour se propager comme le son s'appuie sur l'air



La mécanique classique prévoit la loi de composition des vitesses. Elle est parfaitement vérifiée dans la vie courante. Prenons un exemple :
 Le vent souffle à 60 km/h dans la direction et le sens de OA.
 Deux avions identiques volant à la même vitesse de 100 km/h partent simultanément de O.

Le premier va jusqu'au point A distant de 320 km. Poussé par le vent, sa vitesse par rapport au sol est de 160 km/h

Et il mettra 2 heures pour arriver.

Mais pour revenir sa vitesse par rapport au sol n'est plus que de 40 km/h

Et son retour durera 8 heures.

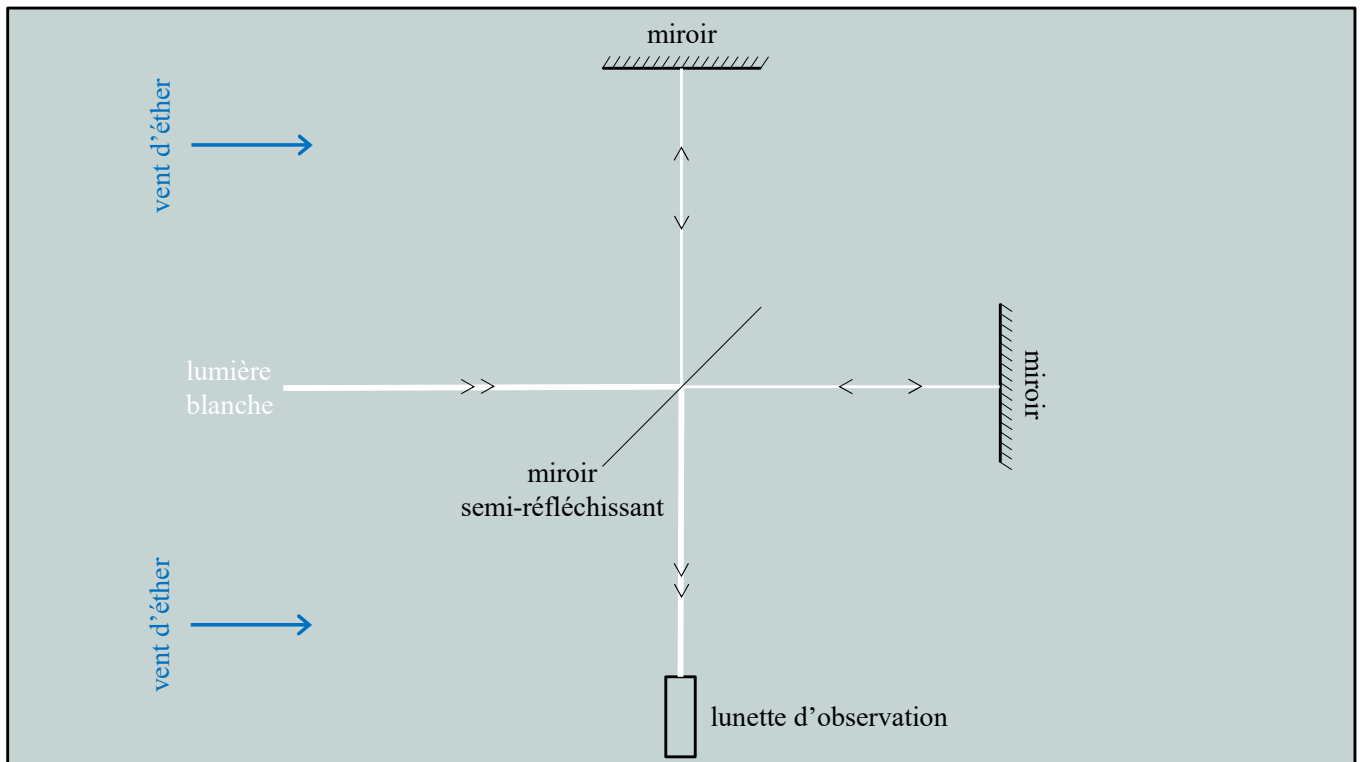
Le deuxième avion vole dans une direction perpendiculaire au vent jusqu'à un point B lui aussi distant de 320 km. Il doit avancer « en crabe » et sa vitesse par rapport au sol est de 80 km/h

Il mettra 4 heures pour atteindre B

Et

4 heures pour revenir en O

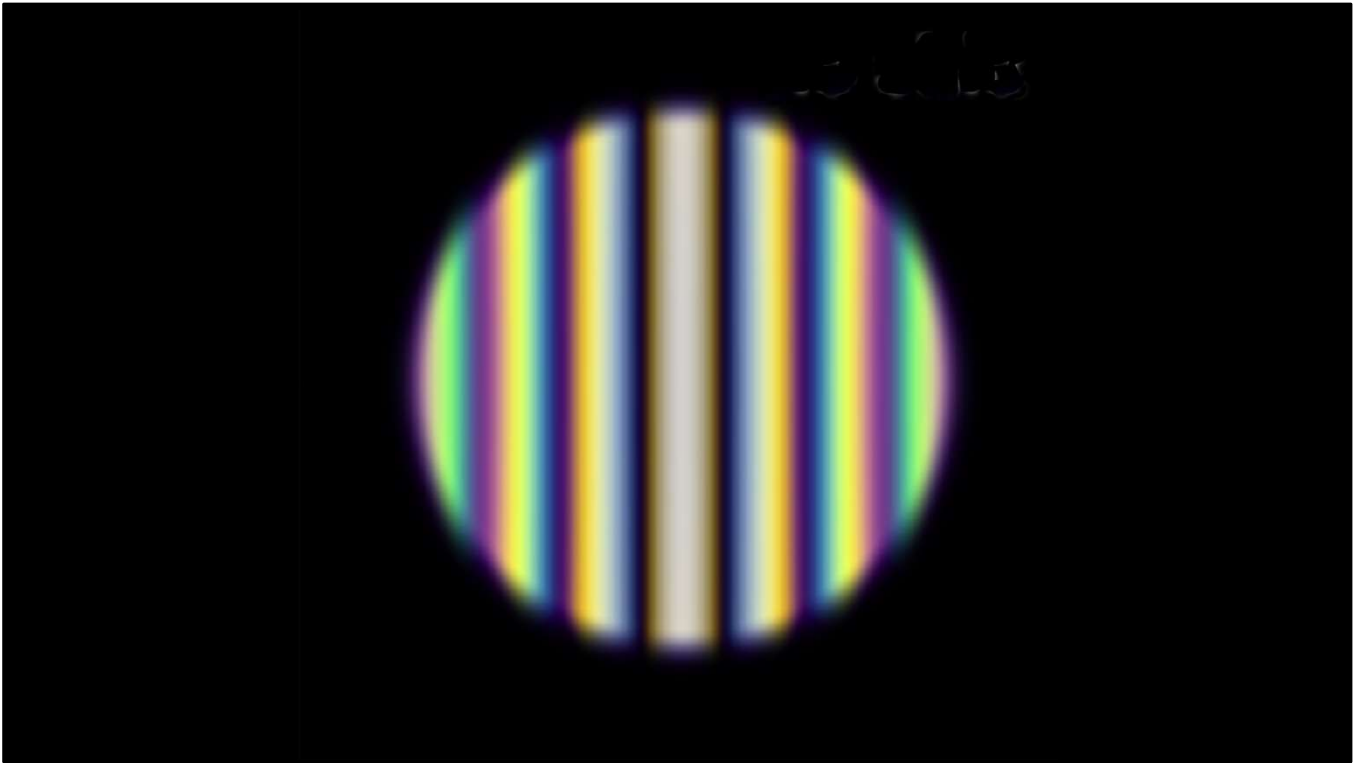
Les durées aller et retour des deux trajets ne sont pas égales.
Les deux avions ne rejoindront pas O simultanément.



Michelson et Morley font une expérience équivalente mais avec la lumière (des photons à la place des avions).

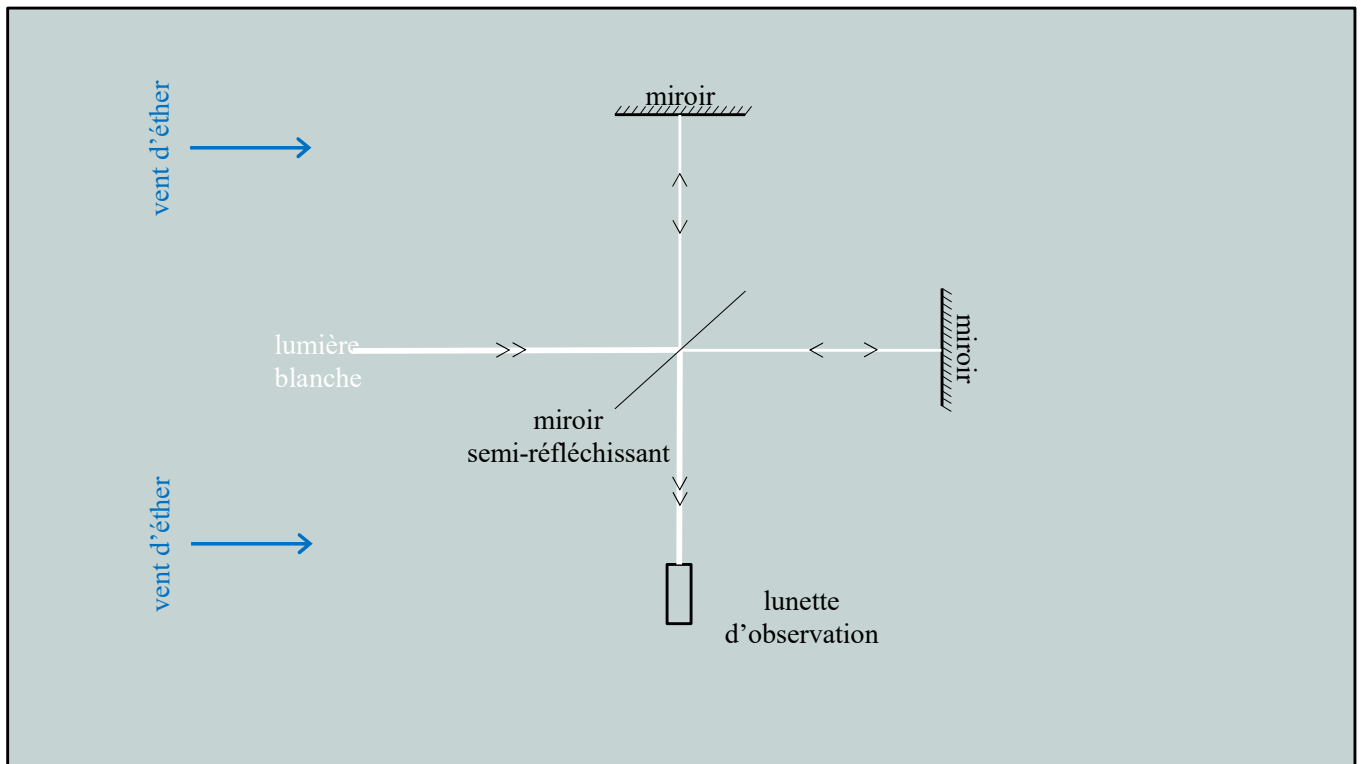
Le vent est remplacé par le mouvement de la Terre sur son orbite autour du Soleil, à la vitesse de 30 km/s (vent d'éther).

L'appareil de mesure est appelé interféromètre de Michelson .

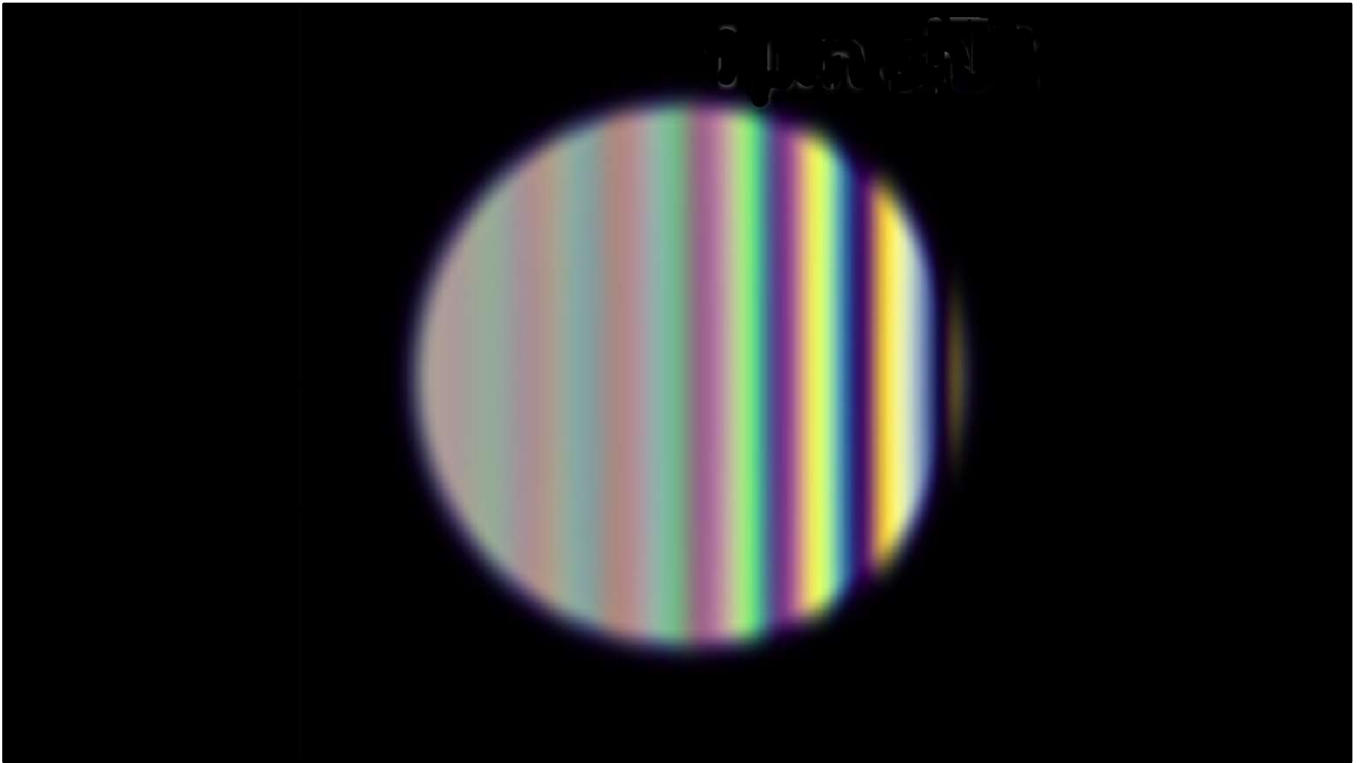


L'appareil est réglé de tel sorte que le système de franges d'interférences soit bien centré.

Les temps de parcours des photons sur les deux chemins sont identiques
Ils observent ça alors qu'ils auraient voulu voir ...



On fait tourner l'appareil de 90° par rapport au vent d'éther



Les expérimentateurs espéraient voir ça !

Et ils voient toujours ça !

Les photons partis en même temps arrivent toujours simultanément contrairement aux avions.

Cette expérience ne permet pas d'améliorer la mesure de la vitesse de la lumière, mais elle montre que l'Univers n'est pas comme on le pensait, rempli d'un fluide appelé « éther » qui servirait de support matériel aux ondes lumineuses et électromagnétiques en général. La lumière se propage dans le vide sans aucun support.

La vitesse de la lumière ne se compose
pas avec les autres vitesses

elle est identique pour deux
observateurs en mouvement l'un par
rapport à l'autre

Ce qui est absolument inexplicable par les lois de la mécanique classique

Albert Einstein

1879 - 1955



C'est Albert Einstein qui dès 1905 donnera une interprétation magistrale à cette expérience dans sa théorie de la relativité restreinte.

La vitesse de la lumière est une constante universelle

La vitesse de la lumière est une constante universelle, indépendante du référentiel de l'opérateur. Raison de plus pour la déterminer avec un maximum de précisions
Au cours du XXe siècle on améliore la précision des mesures (3 km/s en 1950, 100 m/s en 1958

Vitesse de la lumière
en km/s

1862	Léon Foucault – Miroir tournant	298 000 \pm 500
1907	Rosa et Dorsey – Constantes électromagnétiques	299 710 \pm 30
1926	Albert Michelson – Miroir tournant	299 796 \pm 4
1950	Essen et Gordon-Smith – Cavité résonnante	299 792,5 \pm 3,0
1958	K.D. Froome – Interféromètre radio	299 792,5 \pm 0,1



En 1972,
l'américain Kenneth Evenson
et son équipe
mesure

$$c = (299\,792\,458,7 \pm 1,1) \text{ m/s}$$

par interférométrie laser

En 1972, avec un laser He-Ne-méthane stabilisé donnant des raies spectrales d'une finesse extrême, Kenneth Evenson et son équipe mesure c avec une précision de 1,1 m/s soit 6 parties par milliards. Mais cette incertitude n'est pas liée au dispositif expérimental mais à la définition du mètre étalon

FIN

1983,
la 17^{eme} conférence
des poids et mesure
fixe

$c = 299\,792\,458 \text{ m/s}$

La vitesse de la lumière ne se mesure plus. Elle vaut par définition
299 792 458 m/s