

A sunset over the ocean. The sun is low on the horizon, casting a warm orange glow across the sky. The water is a deep blue. In the distance, there are several sailboats and a pier structure on the right side.

Les phénomènes astronomiques

École d'été « l'univers à la portée de tous »

23-26 août 2017

Qu'est-ce qu'un phénomène astronomique?

- Éclipse
- Occultation
- Conjonction
- Opposition
- Elongation
- ...

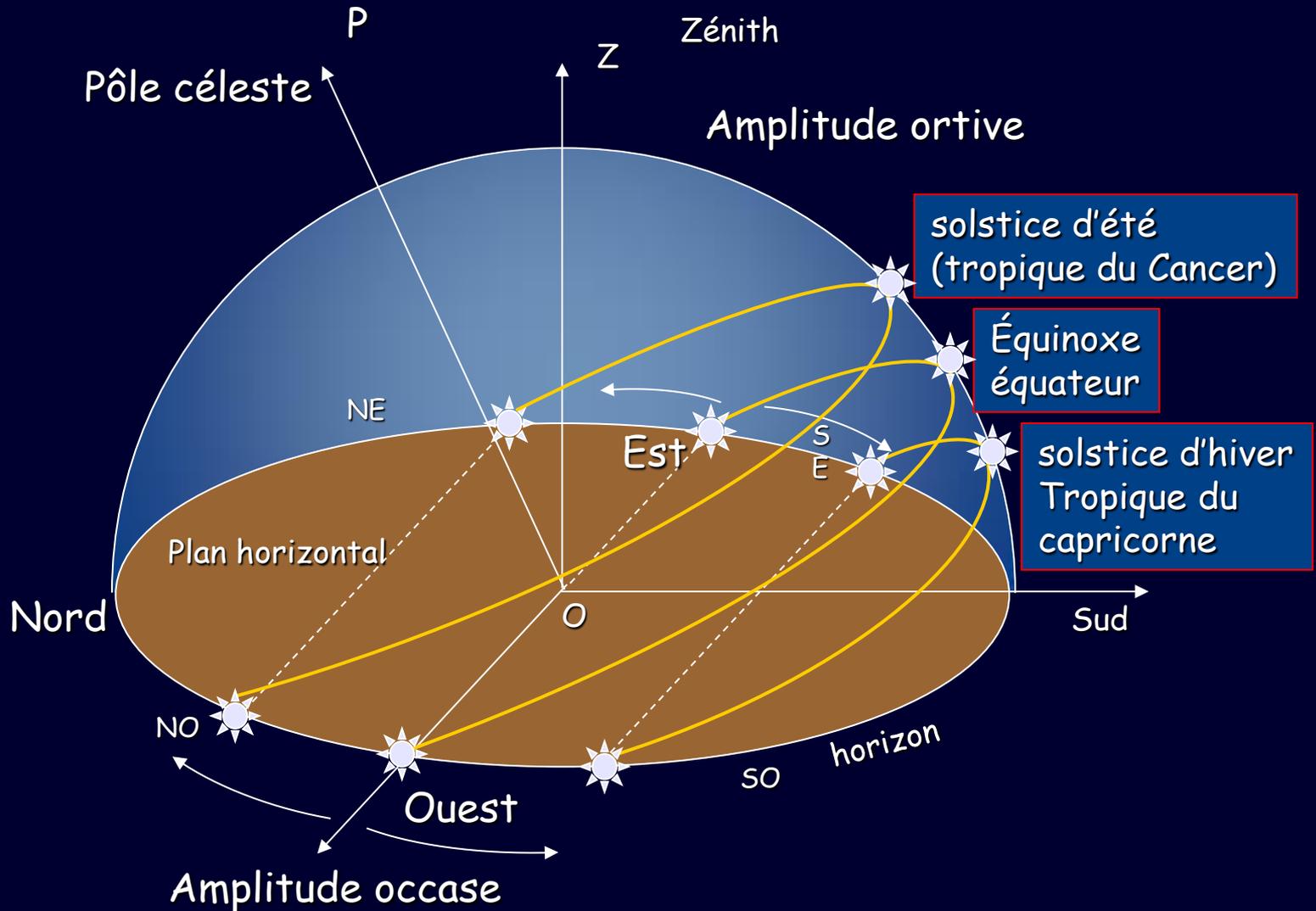
C'est une configuration particulière du système solaire qui peut donner lieu à une observation rare, spectaculaire ou exceptionnelle

Un coucher de Soleil est un phénomène astronomique



Un phénomène astronomique, ça se prédit

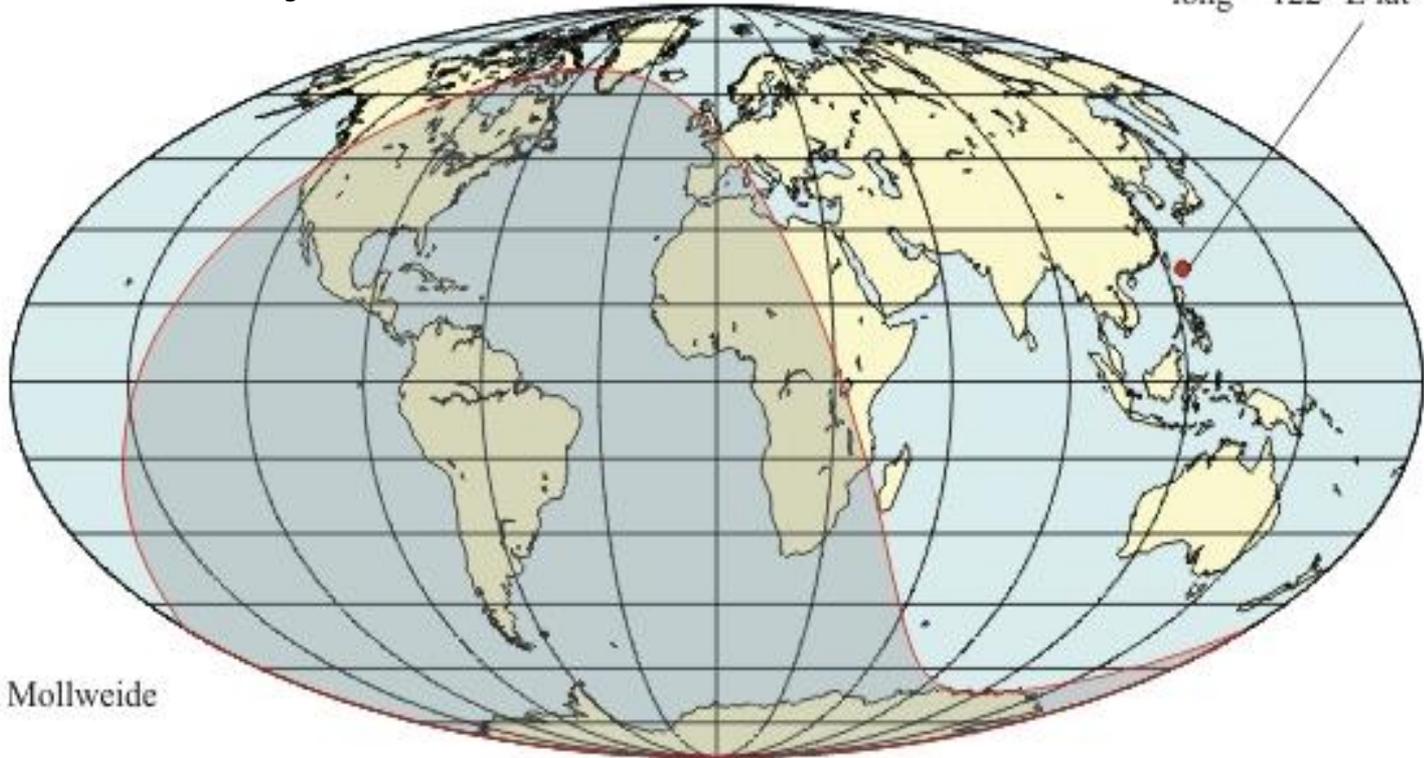
Lever, coucher, passage du Soleil



Aspect du terminateur au solstice d'été

Le pôle reste toujours éclairé →

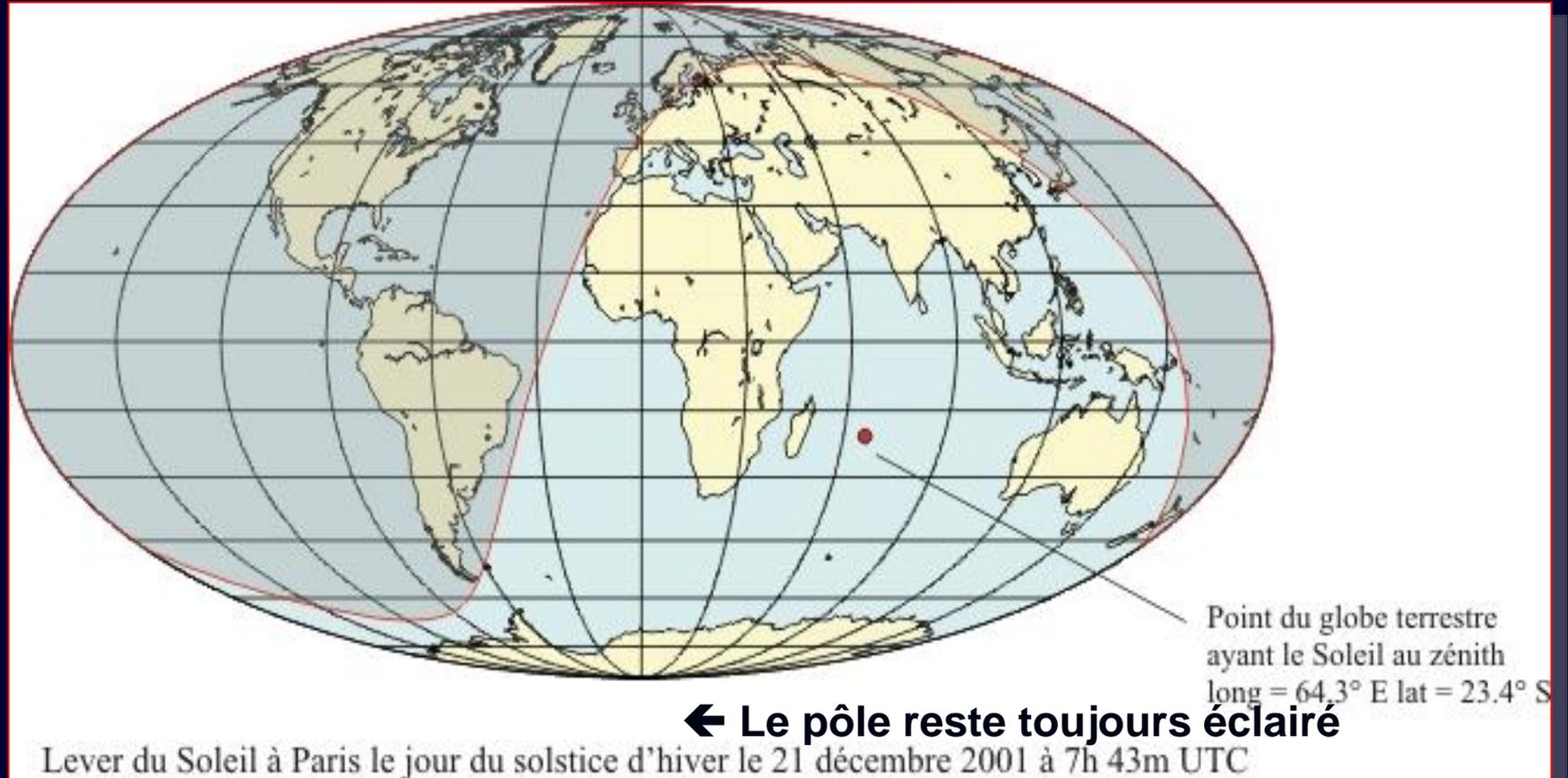
Point du globe terrestre
ayant le Soleil au zénith
long = 122° E lat = 23.4° N



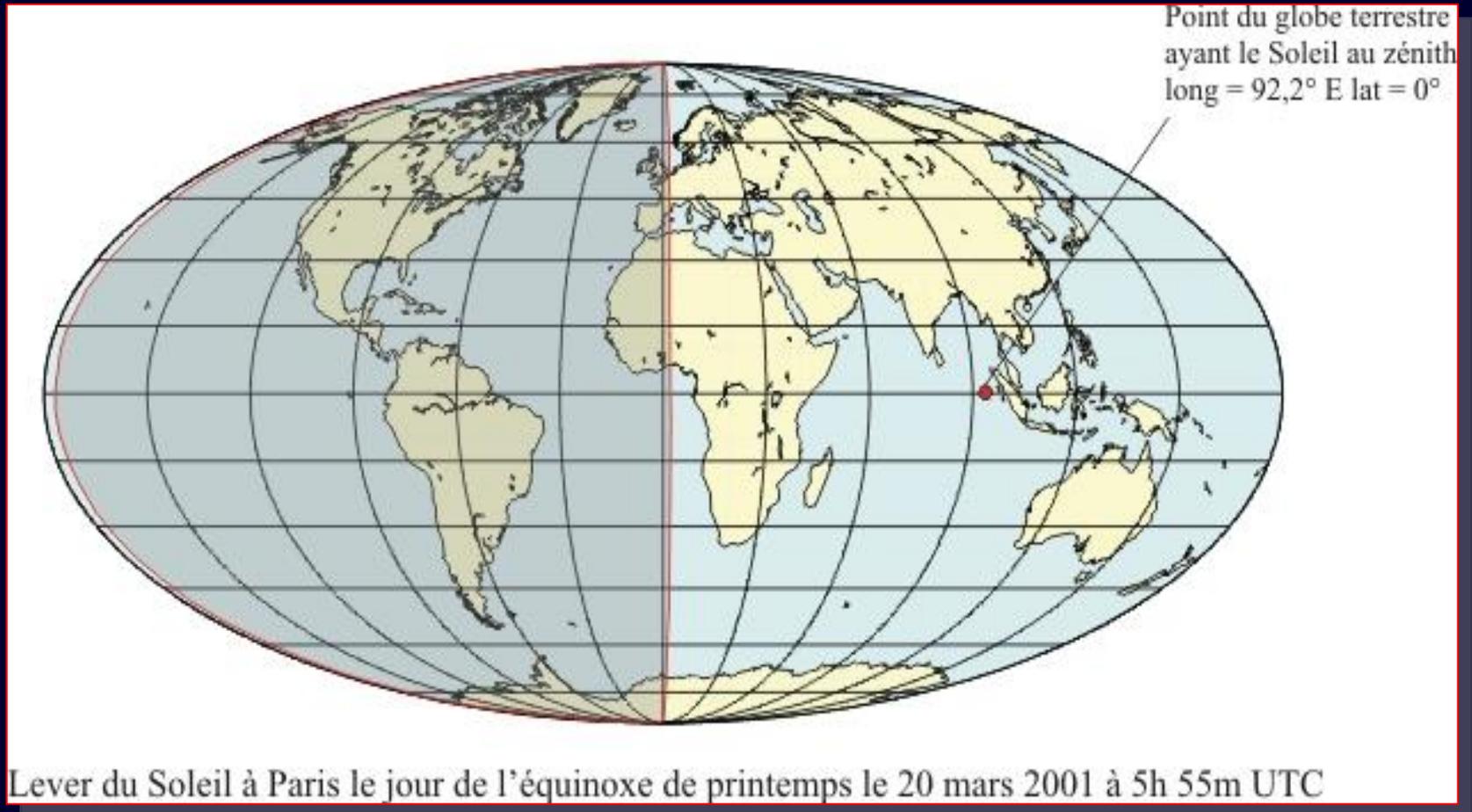
Projection de Mollweide

Lever du Soleil à Paris le jour du solstice d'été le 21 juin 2001 à 3h 49m UTC

Aspect du terminateur au solstice d'hiver



Aspect du terminateur aux équinoxes



Aspect du terminateur au solstice d'été



Coucher du Soleil à Paris le jour du solstice l'été
le 21 juin 2001 à 19h 56m UTC



Lever du Soleil à Paris le jour du solstice l'été
le 21 juin 2001 à 3h 49m UTC

Aspect du terminateur au solstice d'hiver



Coucher du Soleil à Paris le jour du solstice d'hiver
le 21 décembre 2001 à 15h 55m UT



Lever du Soleil à Paris le jour du solstice d'hiver
le 21 décembre 2001 à 7h 43m UT

Aspect du terminateur aux équinoxes



Coucher du Soleil à Paris le jour de l'équinoxe de printemps
le 20 mars 2001 à 18h 02m UT



Lever du Soleil à Paris le jour de l'équinoxe de printemps
le 20 mars 2001 à 5h 55m UT

Crépuscules

Crépuscule civil : $h_0 = -6^\circ$

Crépuscule nautique : $h_0 = -12^\circ$

Crépuscule astronomique : $h_0 = -18^\circ$

Pour un lieu de latitude φ
les jours où les
crépuscules sont les plus
courts sont donnés par :

$$\sin \delta = \sin \varphi \frac{\sin \frac{h+h'}{2}}{\cos \frac{h-h'}{2}}$$

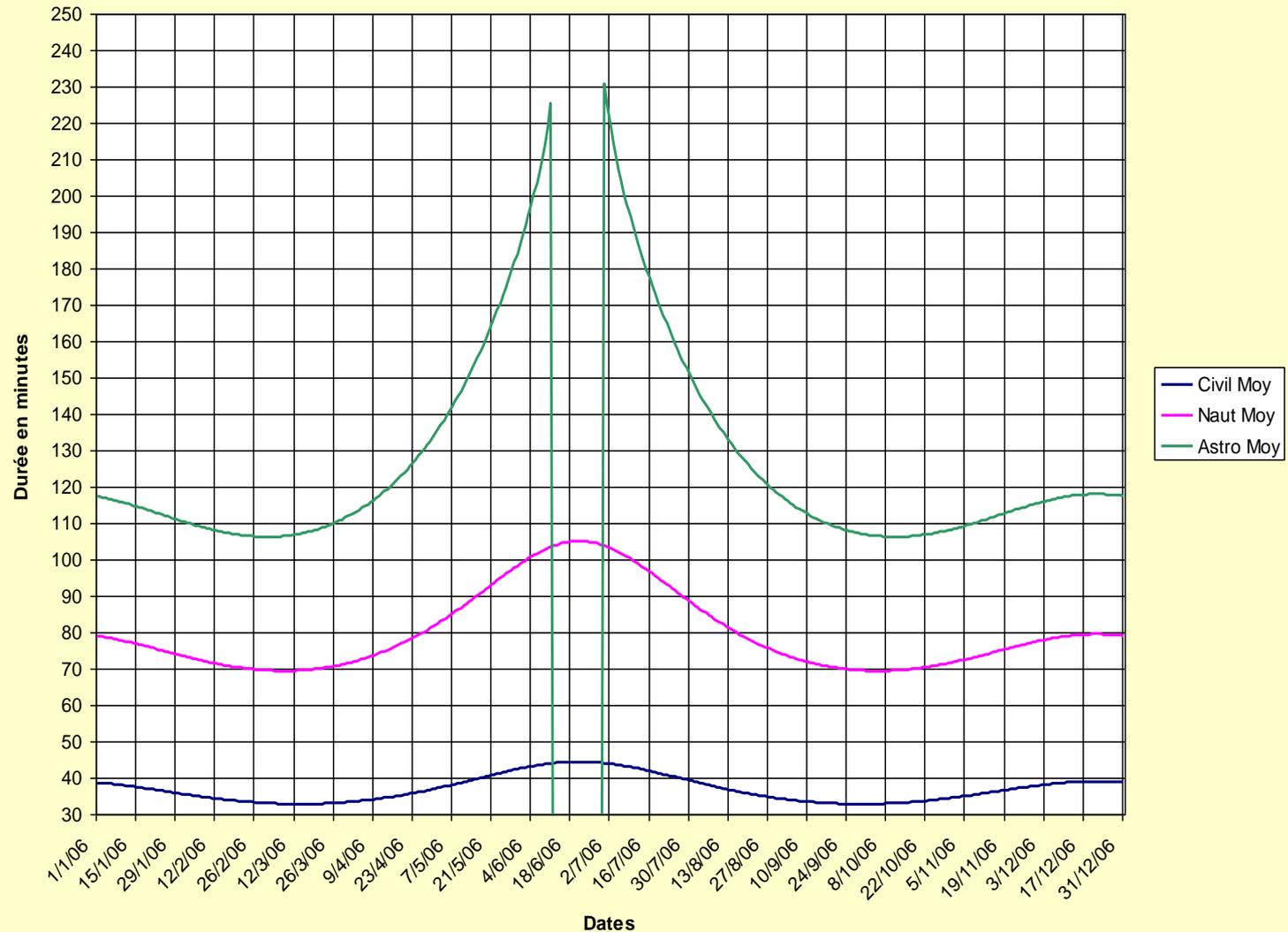
Sans réfraction : $b' = 0^\circ$, $b = b_0$ © NASA

Avec réfraction : $b' = -36,6'$, $b = b_0$

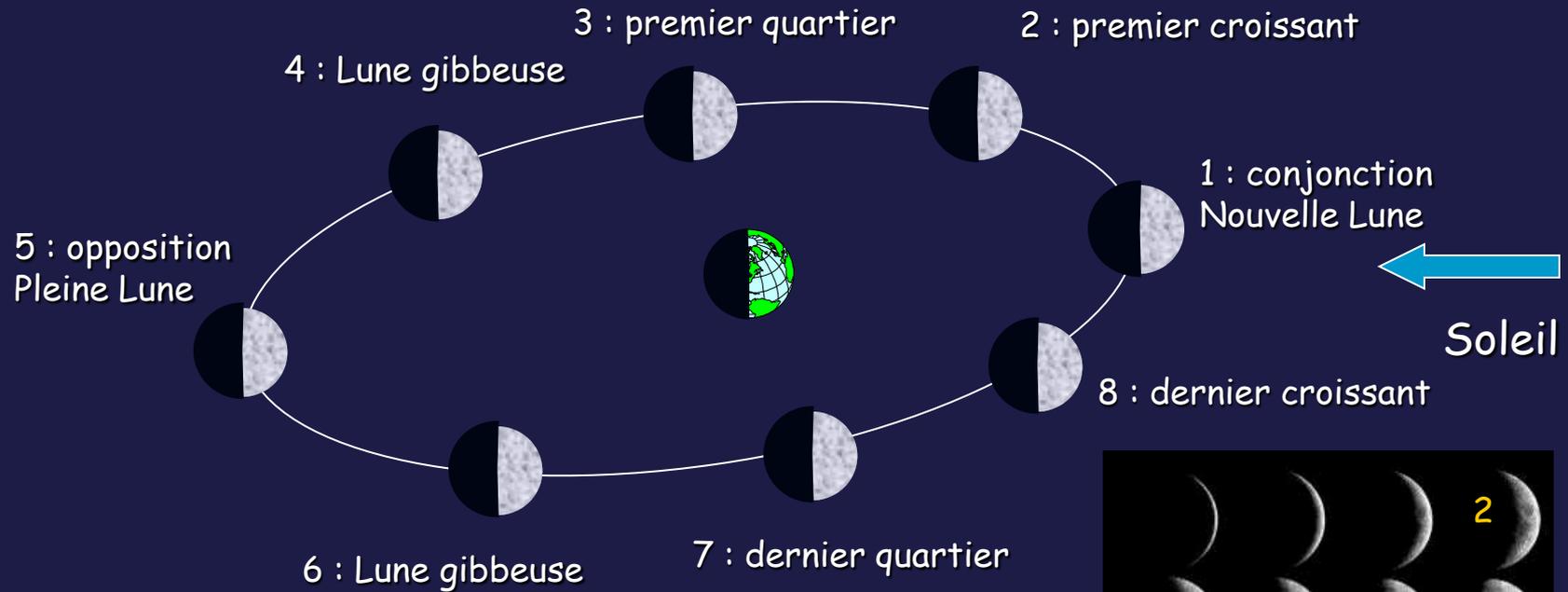


Crépuscules à Paris

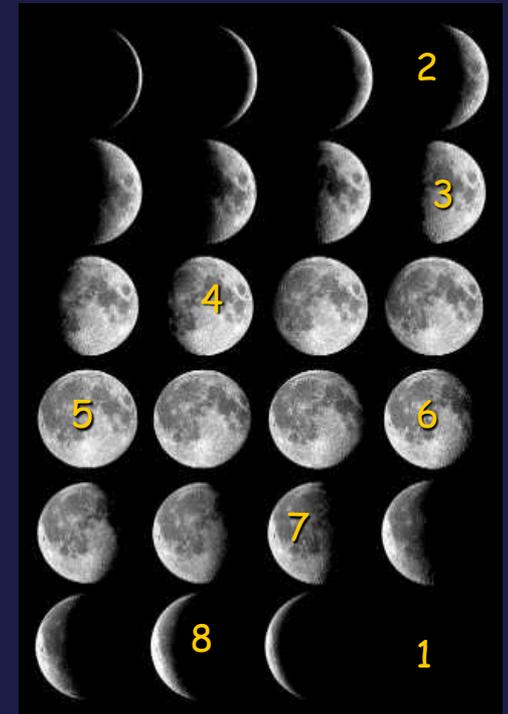
Durées des crépuscules à Paris



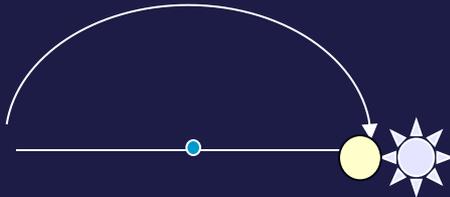
Les phases de la Lune



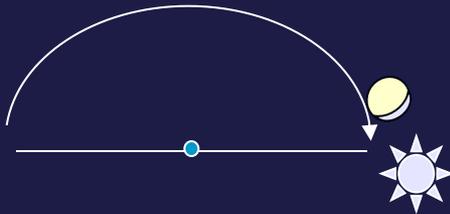
La conjonction et l'opposition s'appellent également les syzygies



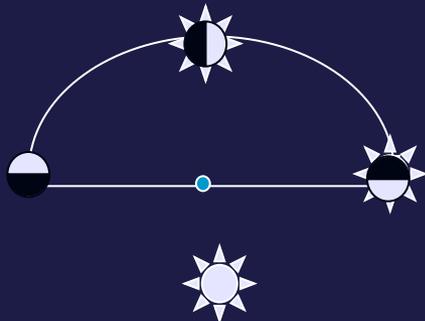
Périodes de visibilité en fonction des phases



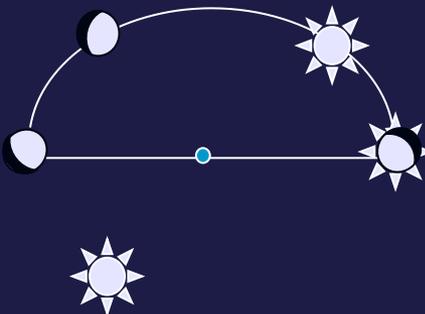
NL : la Lune se couche et se lève en même temps que le Soleil : invisible.



Premier croissant visible le soir juste après le coucher du Soleil

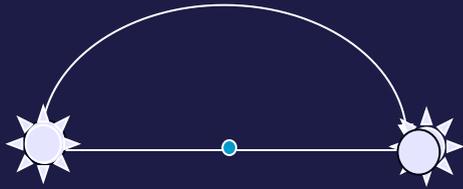


PQ : se lève lorsque le Soleil est au méridien, passe au méridien lorsque le Soleil se couche et se couche en milieu de nuit (minuit).

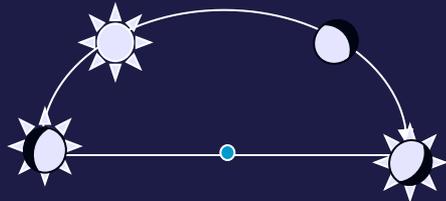


Lune gibbeuse entre PQ et PL, se lève en milieu d'après midi, au sud-est lorsque le Soleil se couche puis se couche dans la seconde partie de la nuit.
Visible depuis la moitié de l'après midi jusqu'à la moitié de la seconde partie de la nuit.

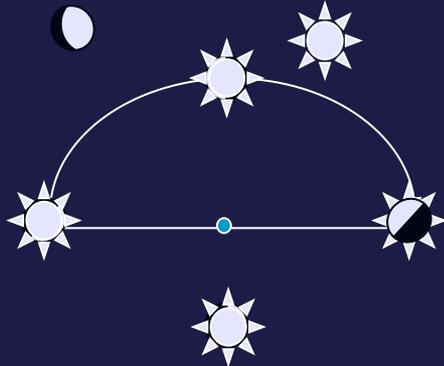
Périodes de visibilité en fonction des phases



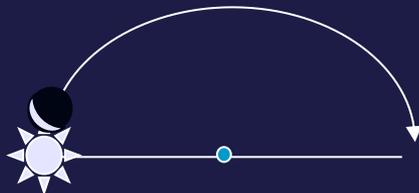
PL : la Lune se lève lorsque le Soleil se couche et se couche lorsque le Soleil se lève. Visible toute la nuit.



Lune gibbeuse entre PL et DQ sous l'horizon au coucher du Soleil, se lève au milieu de la première moitié de la nuit, au sud-ouest lorsque le Soleil se lève et se couche à la moitié de la matinée.



DQ : sous l'horizon au coucher du Soleil, se lève au milieu de la nuit, passe au méridien au lever du Soleil et se couche lorsque le Soleil est au méridien. Visible du milieu de la nuit à midi.

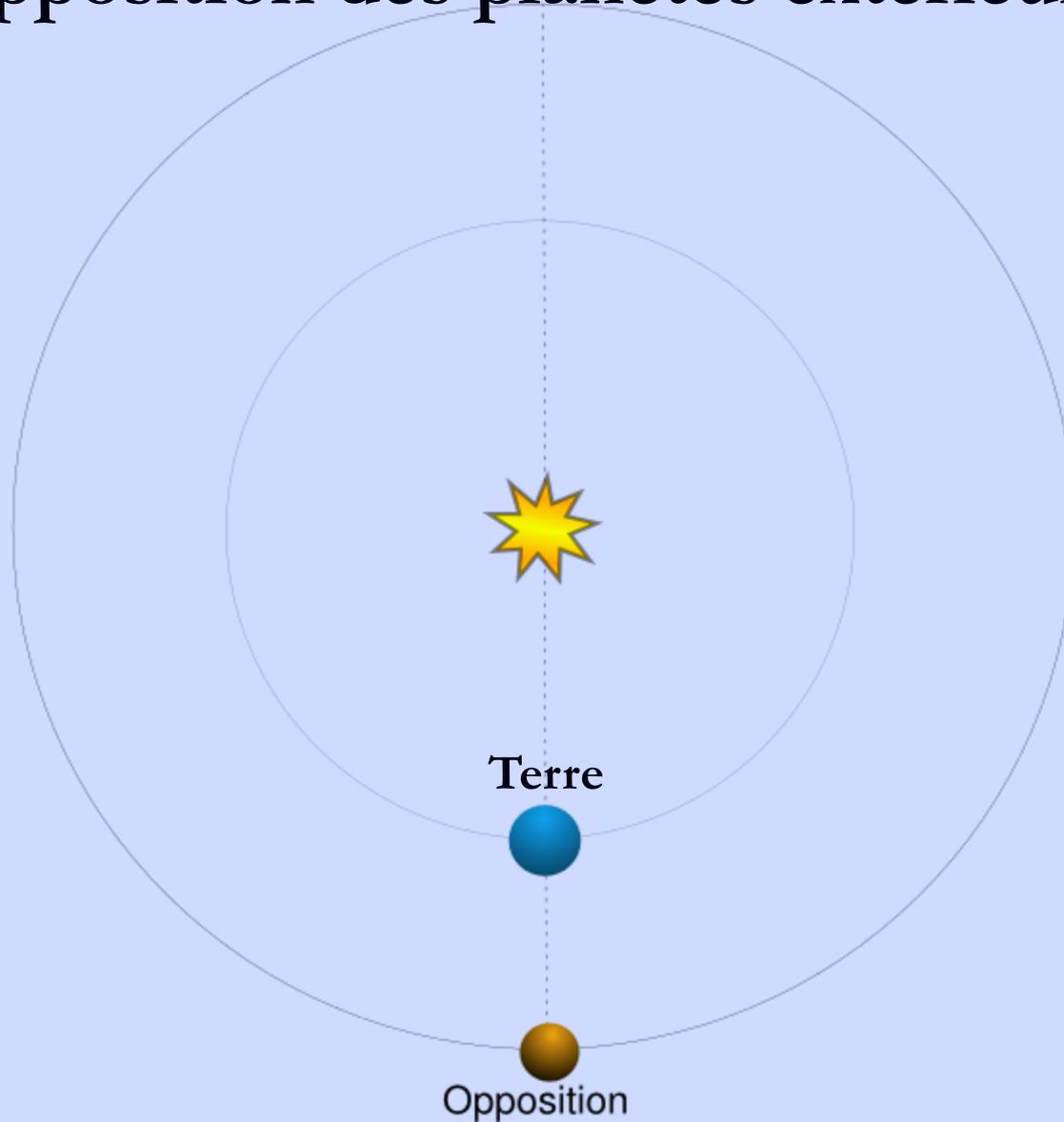


Dernier croissant : visible le matin avant le lever du Soleil.

Opposition, conjonction, élongation par rapport au Soleil

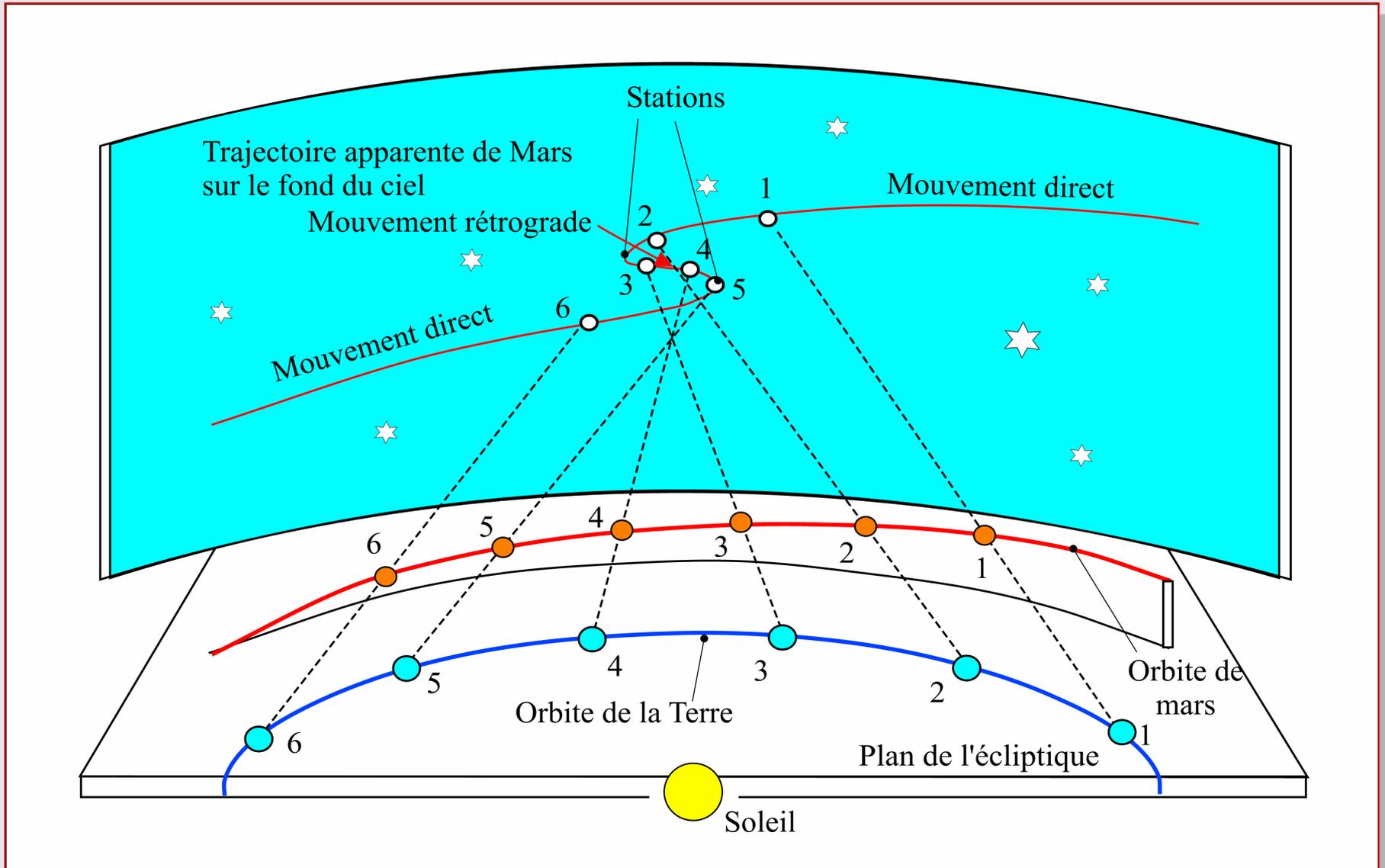
- Cela correspond à une position d'une planète par rapport à la Terre nous permettant de la voir au mieux (opposition, élongation) ou de ne pas la voir (conjonction), cachée par le Soleil

Opposition des planètes extérieures



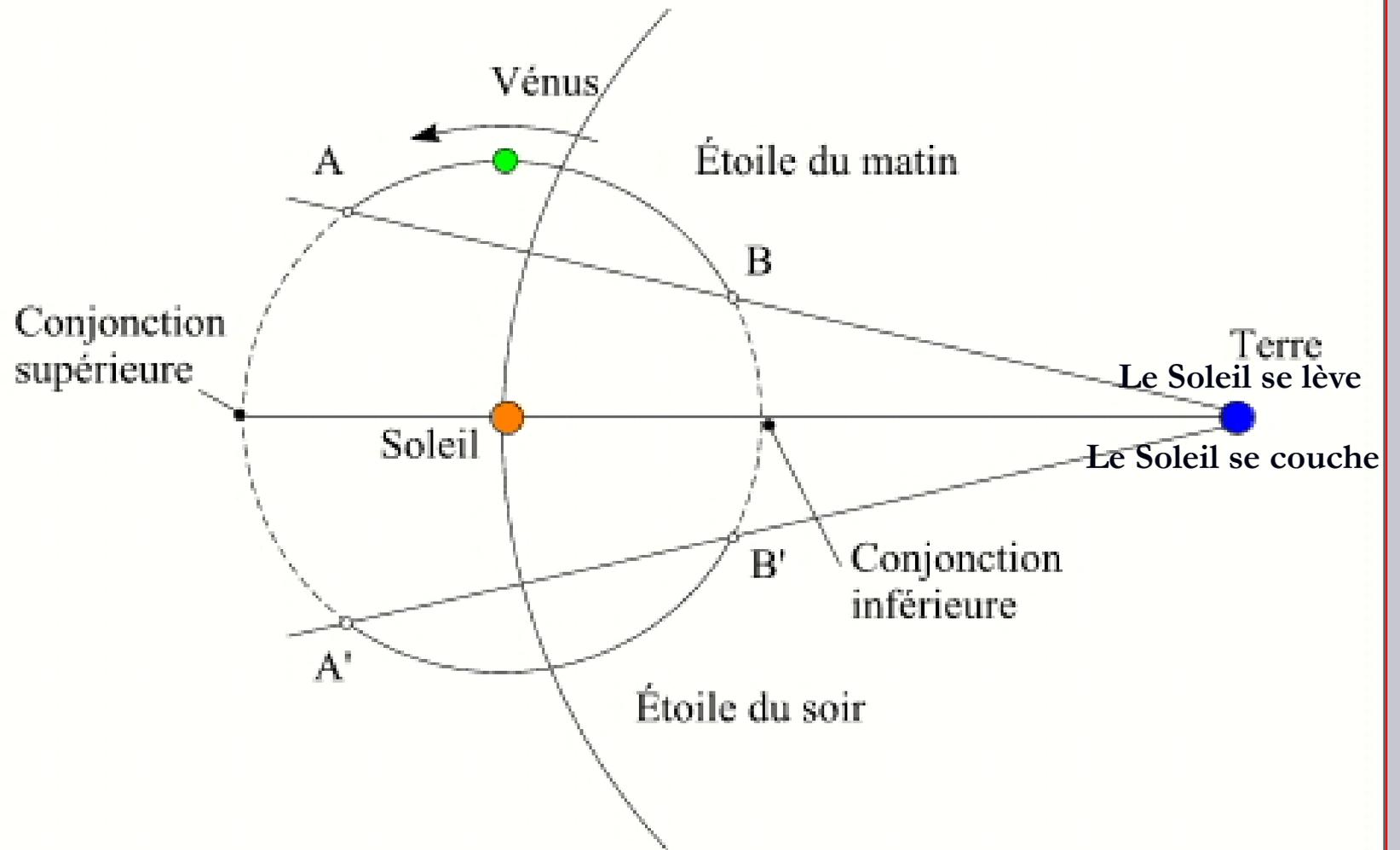
La planète est observable toute la nuit

Stations et rétrogradations des planètes extérieures

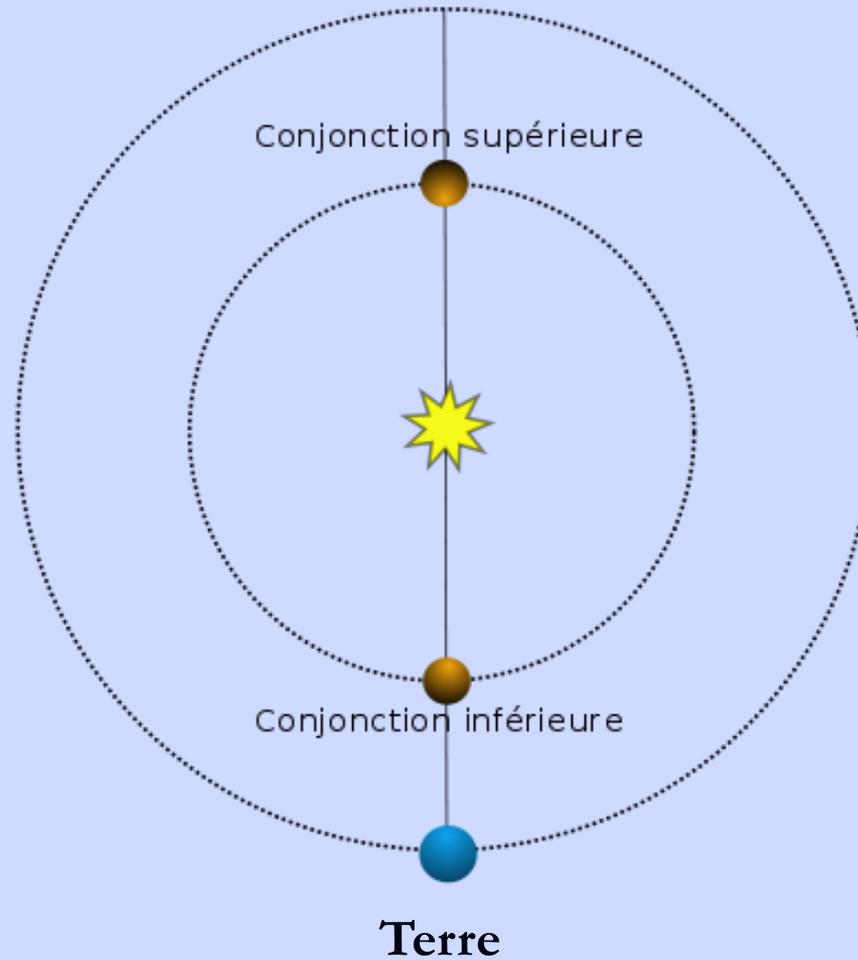


Élongations des planètes intérieures





Conjonctions des planètes intérieures



La planète n'est pas observable

Qu'est-ce qu'une éclipse?

Un jeu d'ombre et de pénombre

Éclipse : Disparition apparente et temporaire d'un astre, provoquée par l'interposition d'un corps céleste soit entre cet astre et la source lumineuse qui l'éclaire habituellement (*éclipse vraie*).

Occultation : Disparition apparente et temporaire d'un astre, provoquée par l'interposition d'un corps céleste entre cet astre et l'œil de l'observateur (*éclipse apparente*).

Ombre : Diminution plus ou moins importante de l'intensité lumineuse dans une zone soustraite *au rayonnement direct* par l'interposition d'une masse *opaque*.

Pénombre : Zone d'ombre partielle résultant de *l'interception partielle*, temporaire ou définitive, des rayons d'une source lumineuse par un corps opaque.

Cela implique une source lumineuse et deux corps opaques, un premier corps occultant l'arrivée de la lumière sur le second, et aussi un observateur!

Eclipse ou occultation ?

- L'occultation dépend de l'observateur: un astre lui est caché par un autre astre

exemple: l'éclipse de Soleil (!)



Eclipse ou occultation ?

- L'éclipse ne dépend pas de l'observateur: un astre disparaît dans l'ombre d'un autre astre
exemple: l'éclipse de Lune (La Lune disparaît de la vue de tous les observateurs terrestres)



Occultations et phénomènes: positions relatives

- Observations de phénomènes rares survenant à l'improviste
 - Occultations d'étoiles par un corps du système solaire
 - Occultations et éclipses mutuelles des satellites

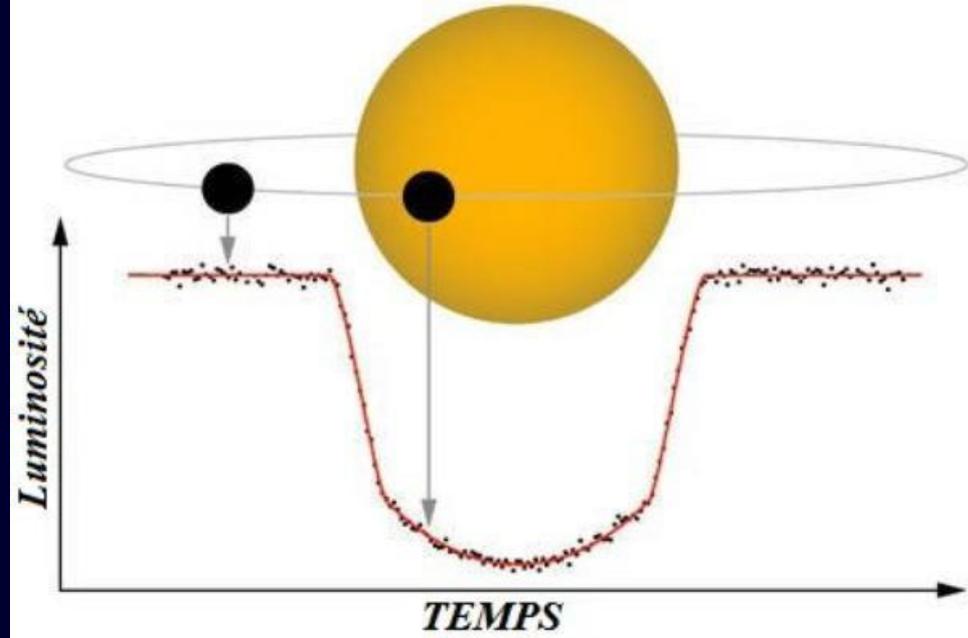
- ➔ Observations en kilomètres, pas en angle
 - Donne au moment du phénomène, une configuration géométrique dans l'espace

Occultations et phénomènes

Les astéroïdes (la vermine du ciel!) peuvent cacher une étoile lors de leur cheminement sur la sphère céleste.



Éclipse de Soleil:

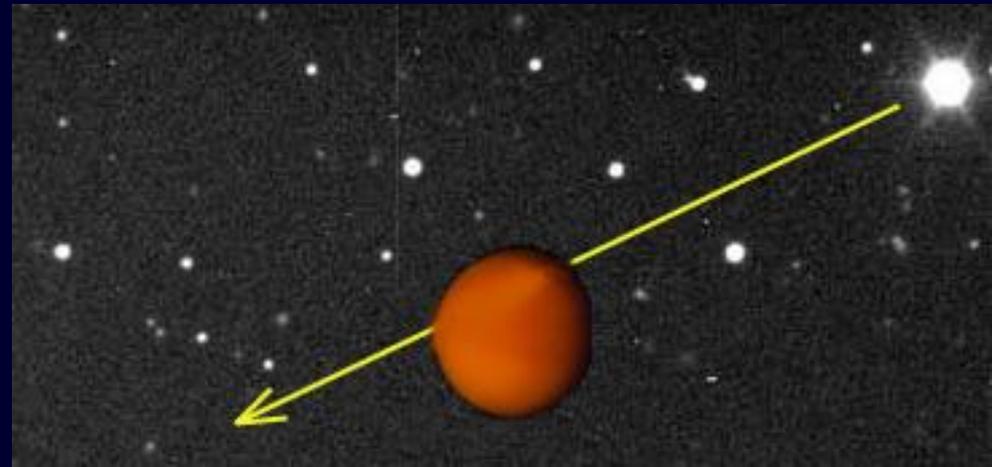


Occultation mutuelle:



Transit de planète extra-solaire

Occultation d'étoiles:



Les éclipses de Soleil





Une éclipse, c'est aussi une des grandes peurs de l'Antiquité



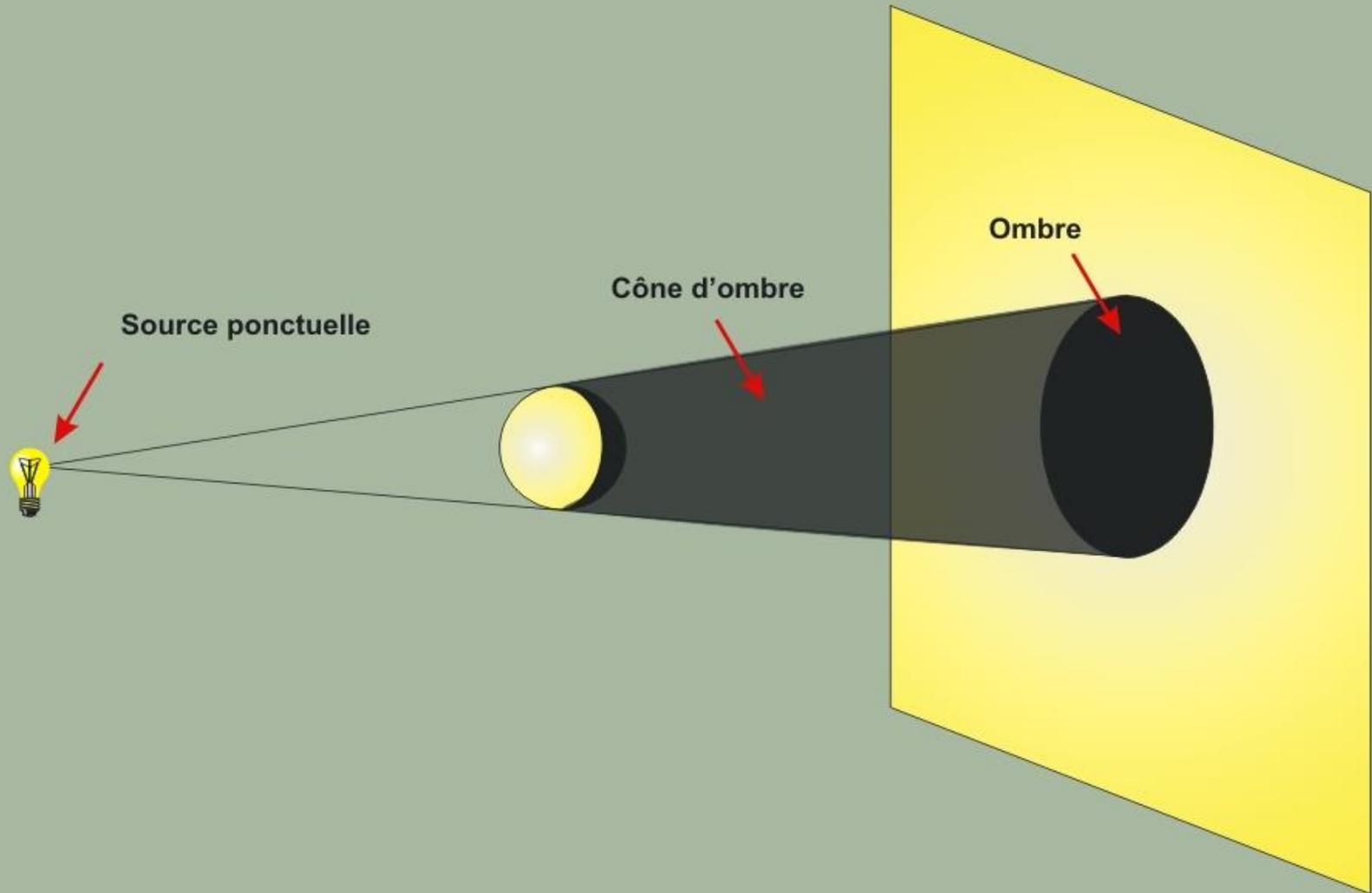
Les éclipses

- Quel est ce phénomène?
- Quand se produit-il?
- Pourquoi ?
- Comment?
- Quand?
- Se produit-il souvent?
- Quelle est la fréquence des éclipses en un lieu donné?
- Que se passe-t-il lors d'une éclipse?
- Que nous apprennent les éclipses?

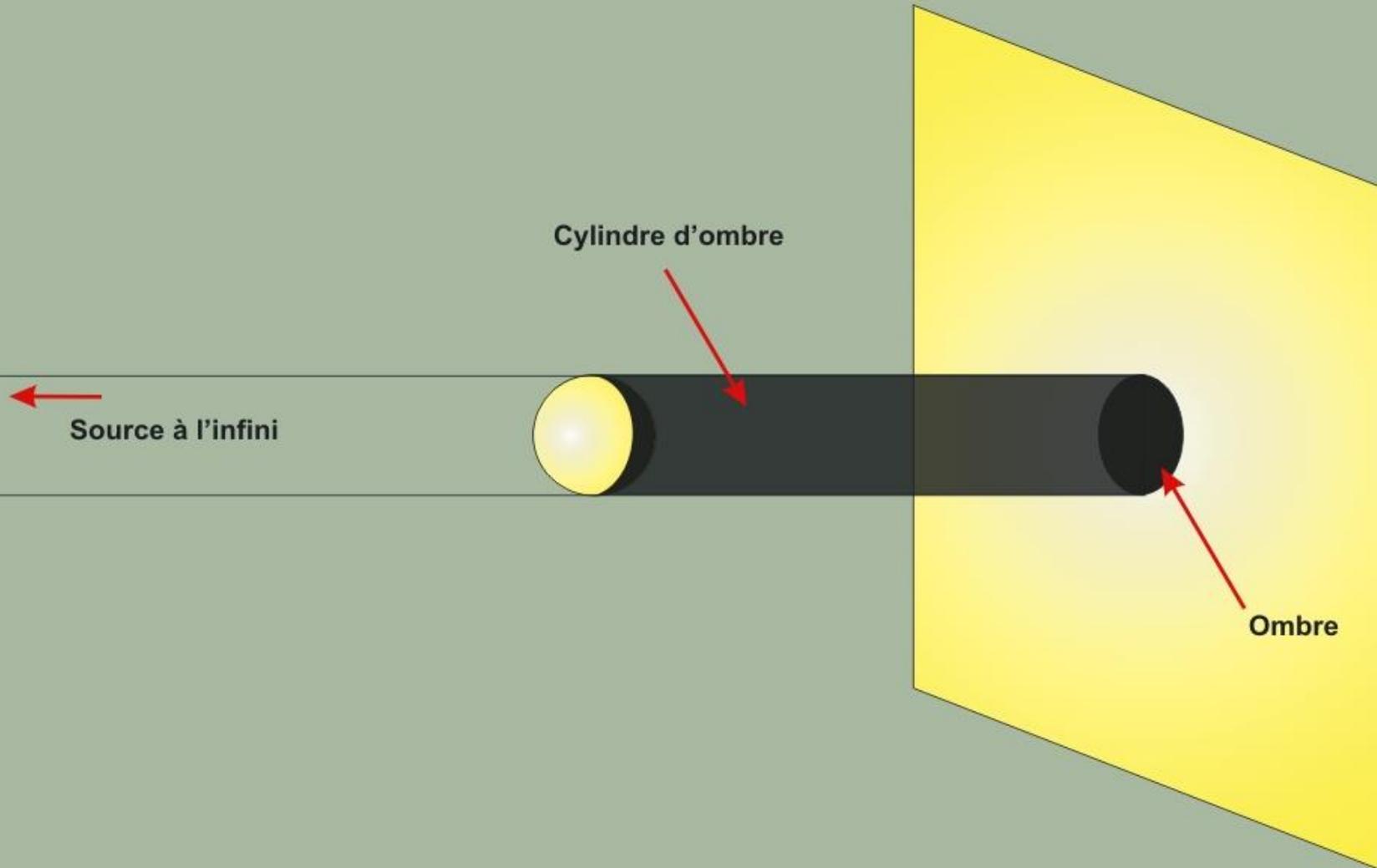
Les éclipses de Soleil



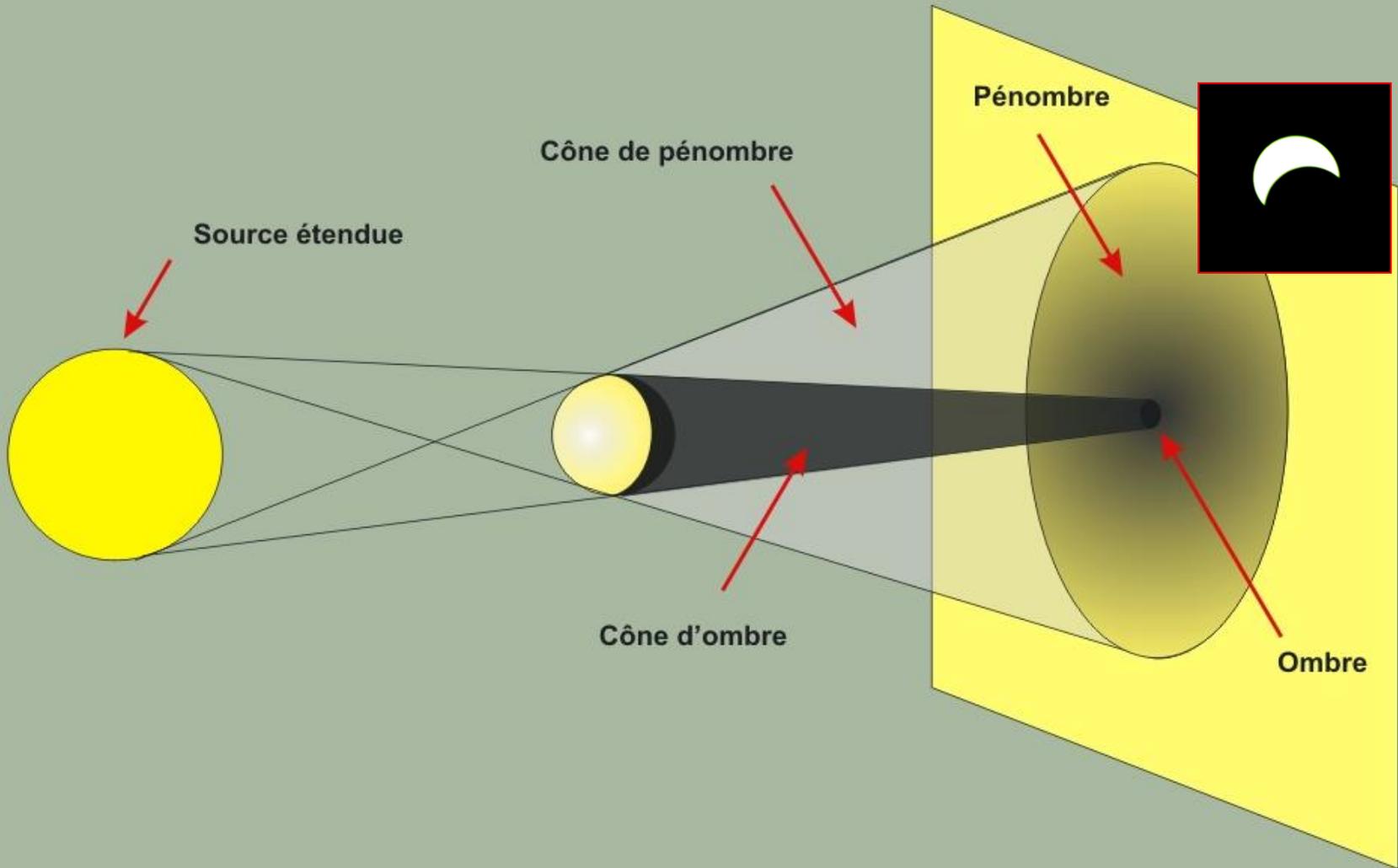
Jeux d'ombre et de pénombre



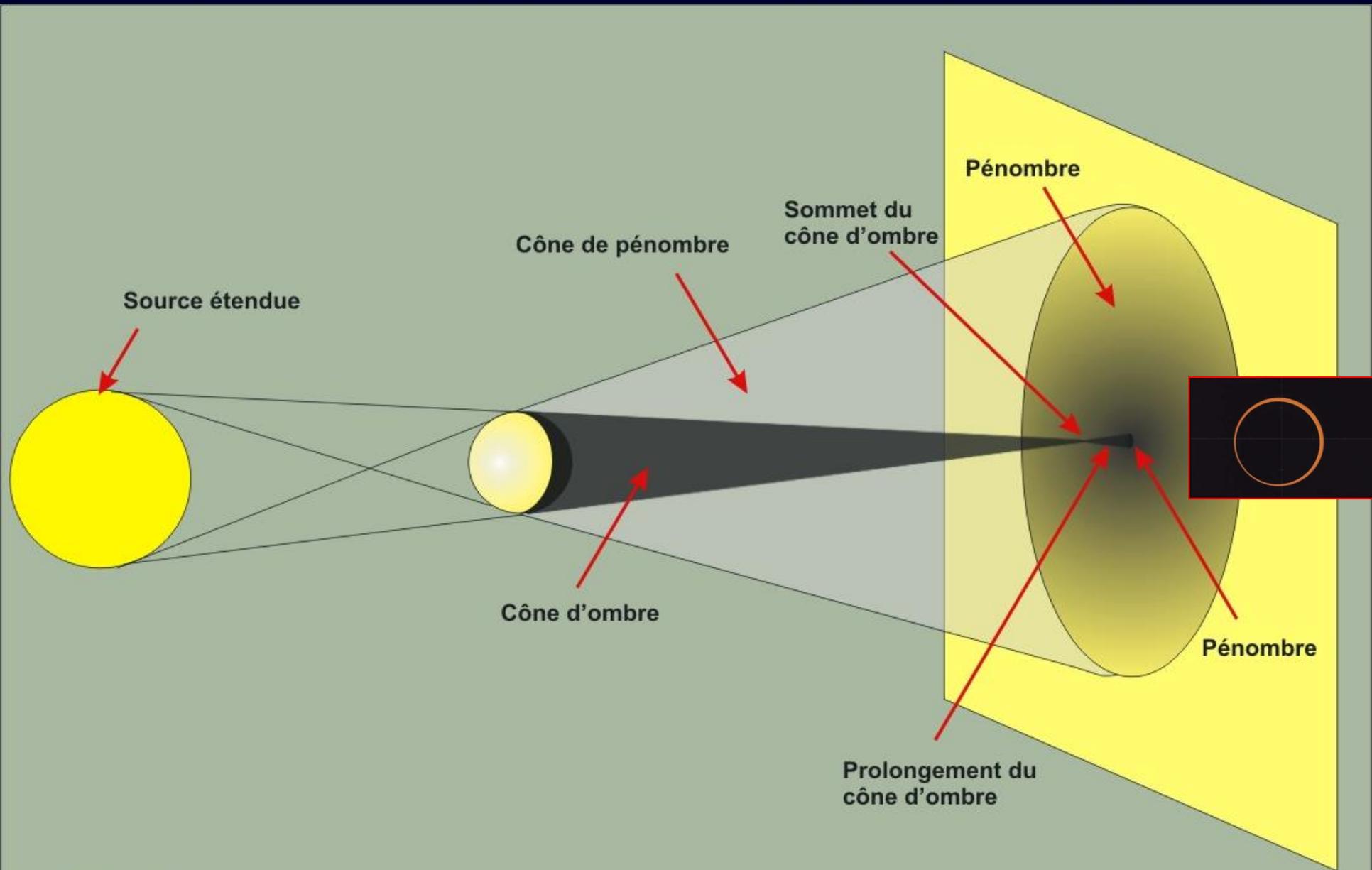
Jeux d'ombre et de pénombre



Jeux d'ombre et de pénombre



Jeux d'ombre et de pénombre



Les éclipses: les acteurs

- La Terre
- La Lune
- Le Soleil

rotation de la Terre autour de son axe

➔ mouvement apparent diurne du Soleil : le jour.

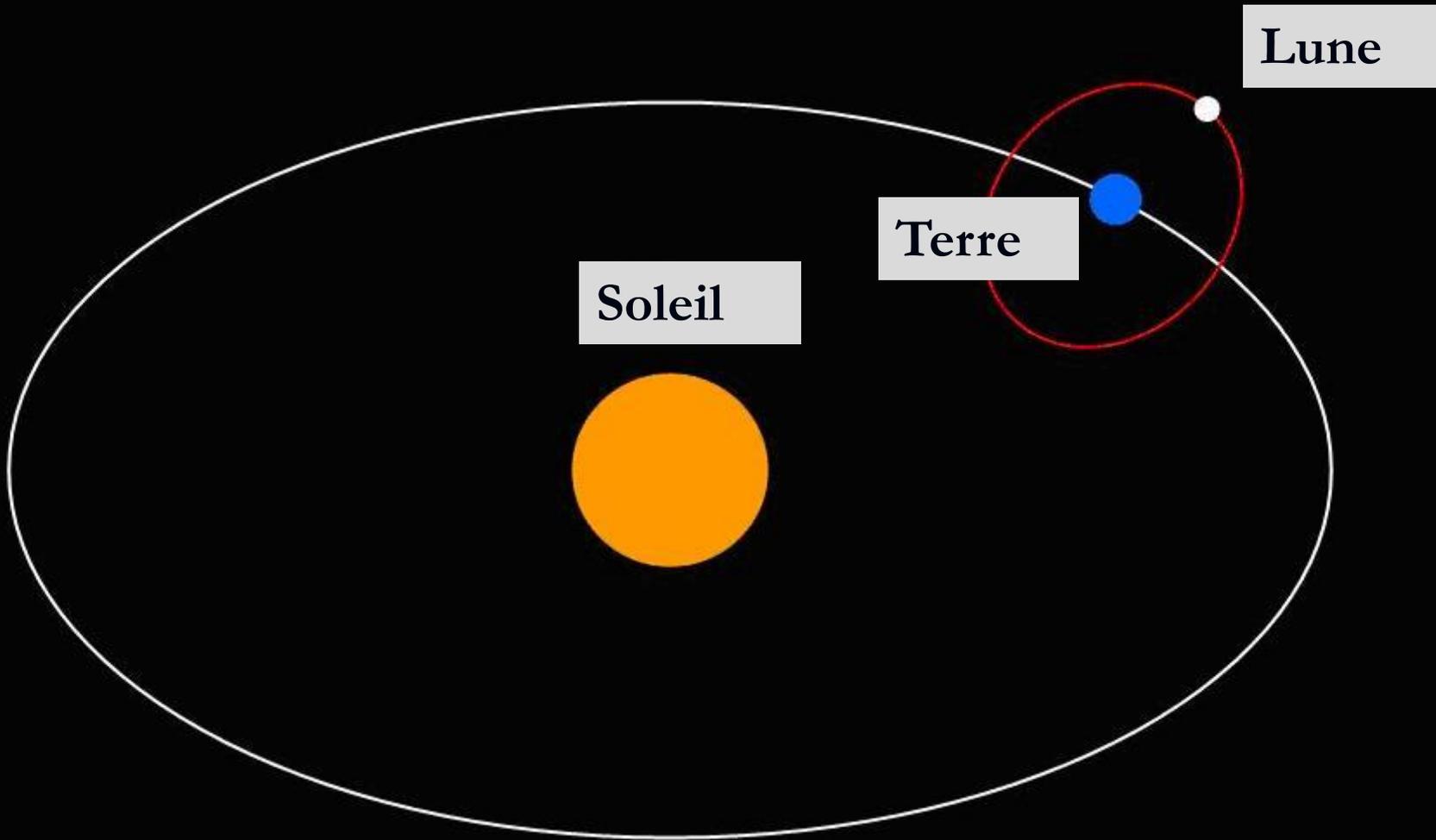
rotation de la Lune autour de la Terre

➔ phases : mois lunaire.

rotation de la Terre autour du Soleil

➔ saisons : année.

Tous ces mouvements sont étudiés depuis la plus haute antiquité et fournissent des cycles, des périodes ➔ Calendriers et phénomènes

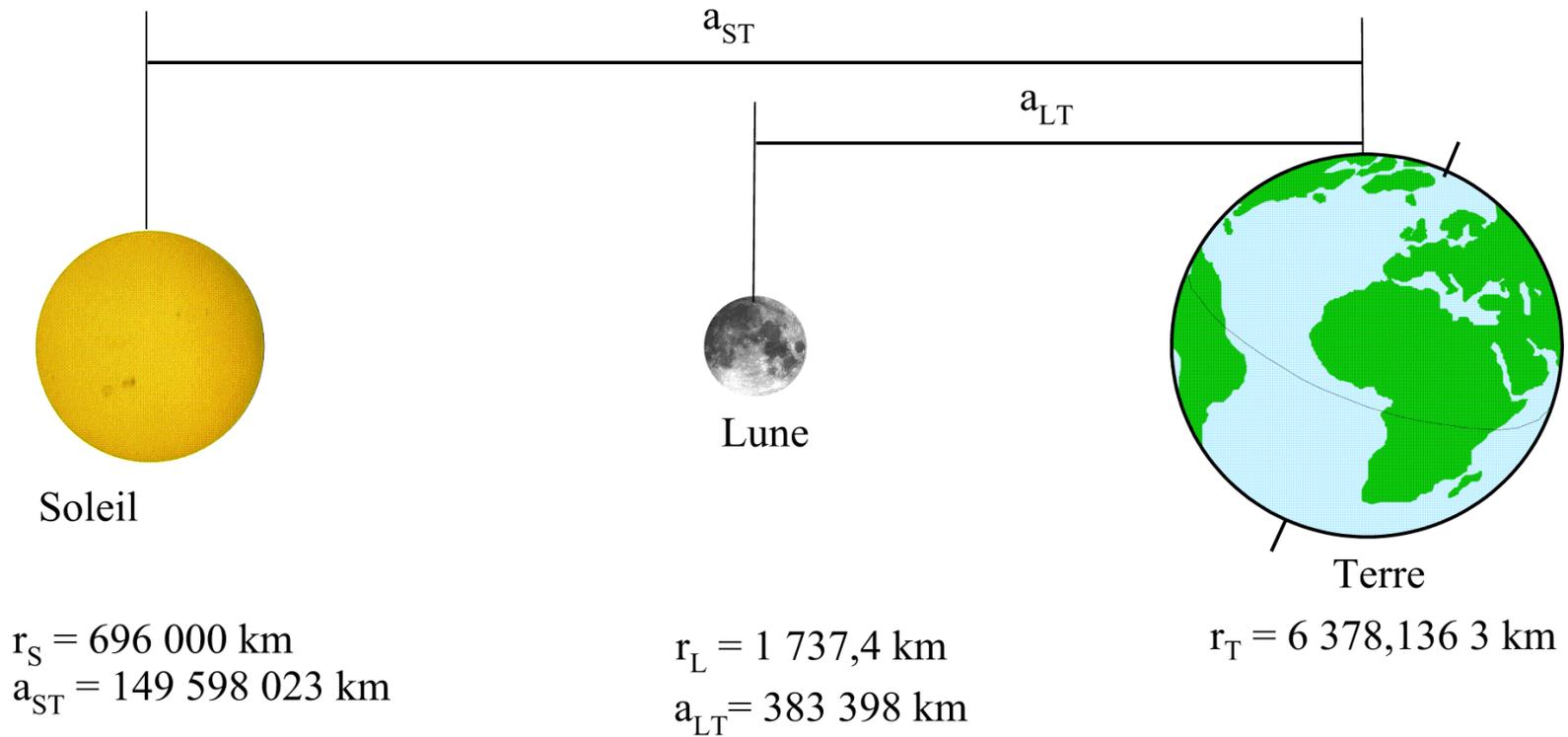


Soleil

Terre

Lune

Les tailles de nos acteurs

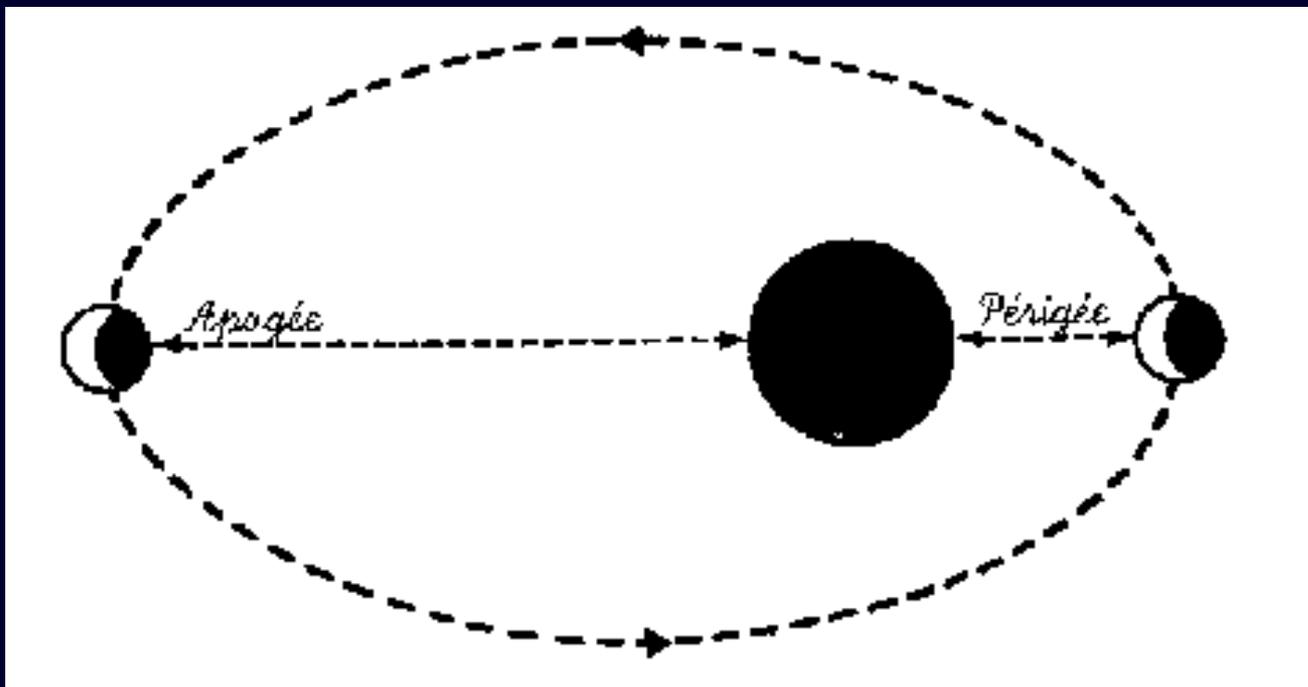


Si la Terre a un rayon de 2 cm

La Lune a un rayon de 0,55 cm et se trouve à 1,20 m de la Terre

Le Soleil a un rayon de 2,18m et se trouve à 470 m de la Terre

Le Soleil est environ 400 fois plus gros que la Lune et il est environ 400 plus loin.



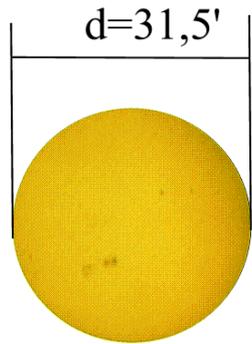
L'orbite de la Lune n'est pas circulaire:

- La distance Terre-Lune varie et donc aussi la taille apparente de la Lune
- La vitesse de la Lune sur son orbite varie et donc aussi la durée de passage de l'ombre de la Lune sur la Terre

L'orbite de la Terre autour du Soleil n'est pas non plus circulaire.

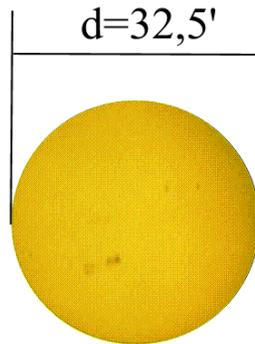
➔ Voilà pourquoi toutes les éclipses sont différentes!

Des diamètres apparents sensiblement identiques



A'

diamètre apparent
du Soleil lorsque la
Terre est à l'aphélie



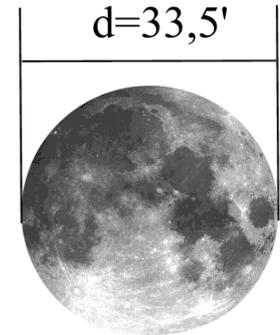
P'

diamètre apparent
du Soleil lorsque la
Terre est au périhélie



A

diamètre apparent
de la Lune à l'apogée



P

diamètre apparent
de la Lune au périhélie

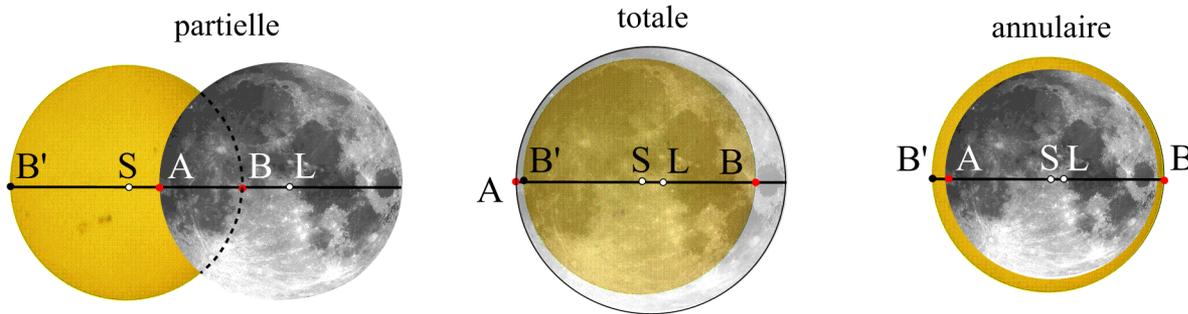
valeur moyenne $M'= 32'$

valeur moyenne $M= 31,4'$

Valeurs extrêmes des diamètres apparents

Remarque : si la Lune apparaîtrait plus petite que le Soleil, l'éclipse ne peut pas être totale et comme le diamètre moyen du Soleil est supérieur au diamètre moyen de la Lune → plus d'éclipses « annulaires » que d'éclipses totales

Paramètres d'une éclipse de Soleil

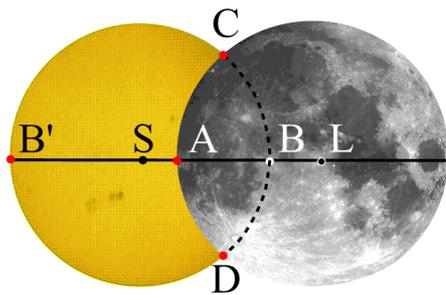


A : bord de la Lune le plus proche du centre S du Soleil
 B : bord du Soleil le plus proche du centre L de la Lune

$$g = AB/BB'$$

Grandeur ou magnitude

$G < 1$ pour les éclipses partielles et annulaires
 $G > 1$ pour les éclipses totales

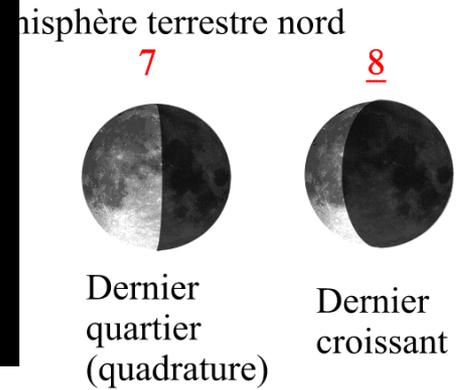
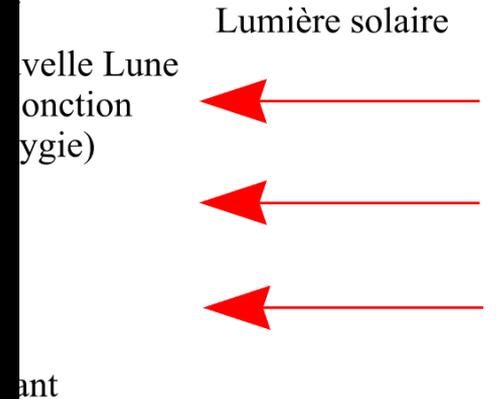
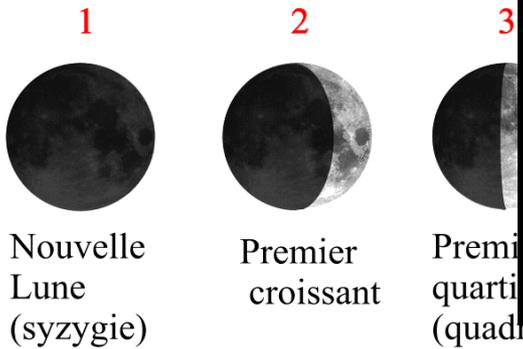
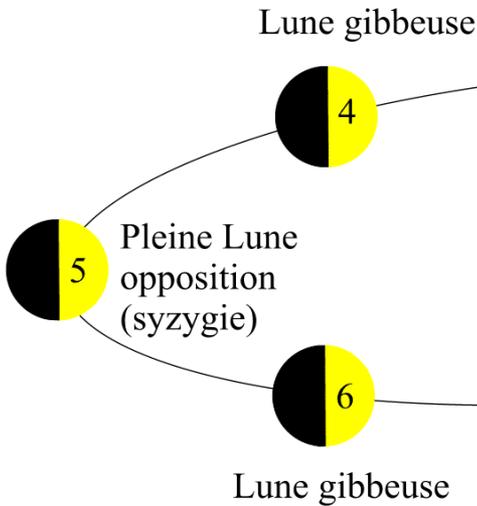


Obs. = aire ACBD/aire du disque solaire

Maximum d'une éclipse : instant où la distance entre le centre de la Lune et le centre du Soleil est minimale

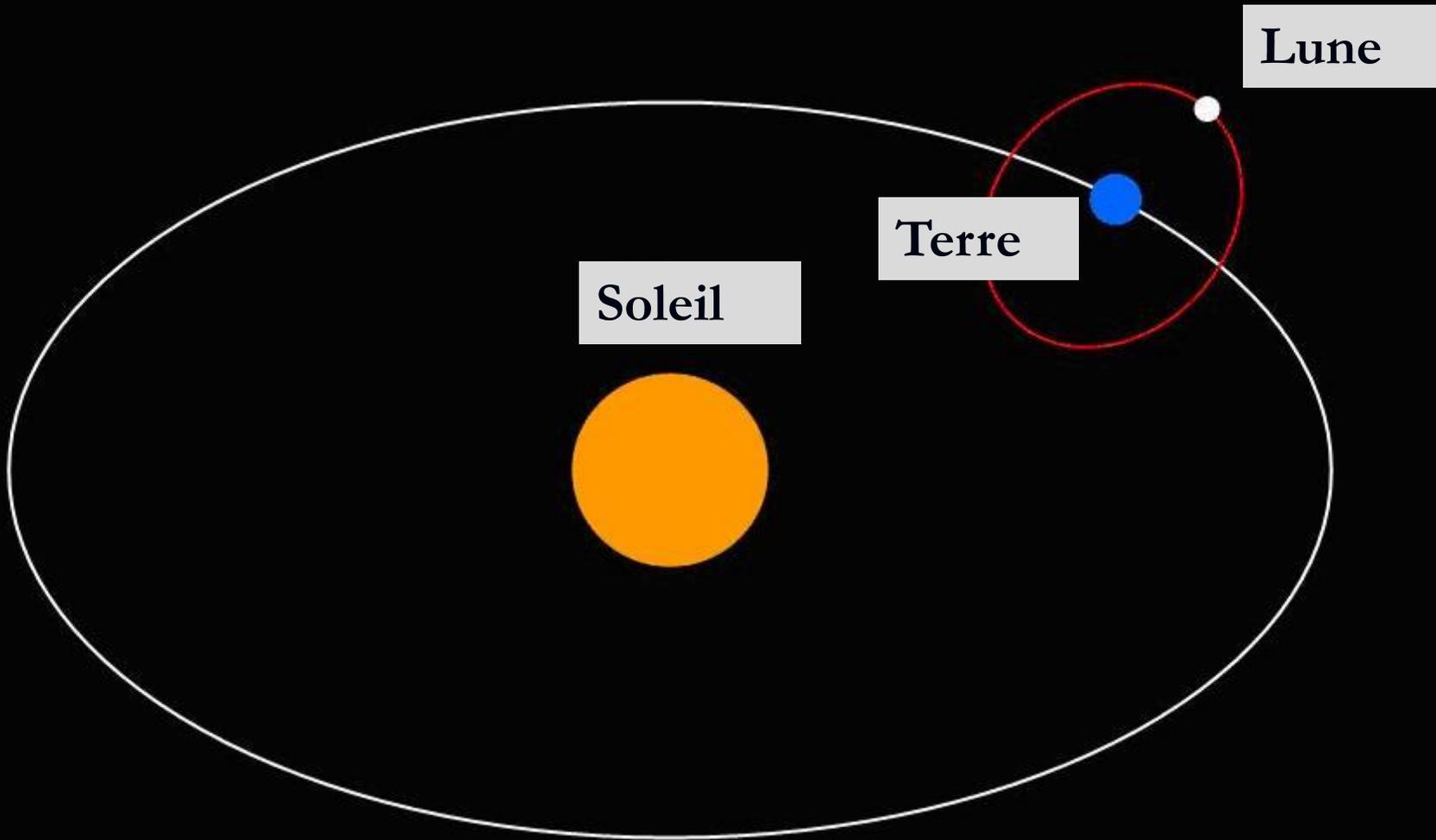
Degré d'obscurité (Obs.)
 Toujours 100% pour une éclipse totale

Mouvement et aspects de la Lune:



Pourquoi n'y-a-t-il pas une éclipse de Soleil à chaque nouvelle Lune et une éclipse de Lune à chaque pleine Lune ?

Parce que la Lune ne tourne pas autour de la Terre dans le plan de l'écliptique, mais dans un plan incliné par rapport à l'écliptique

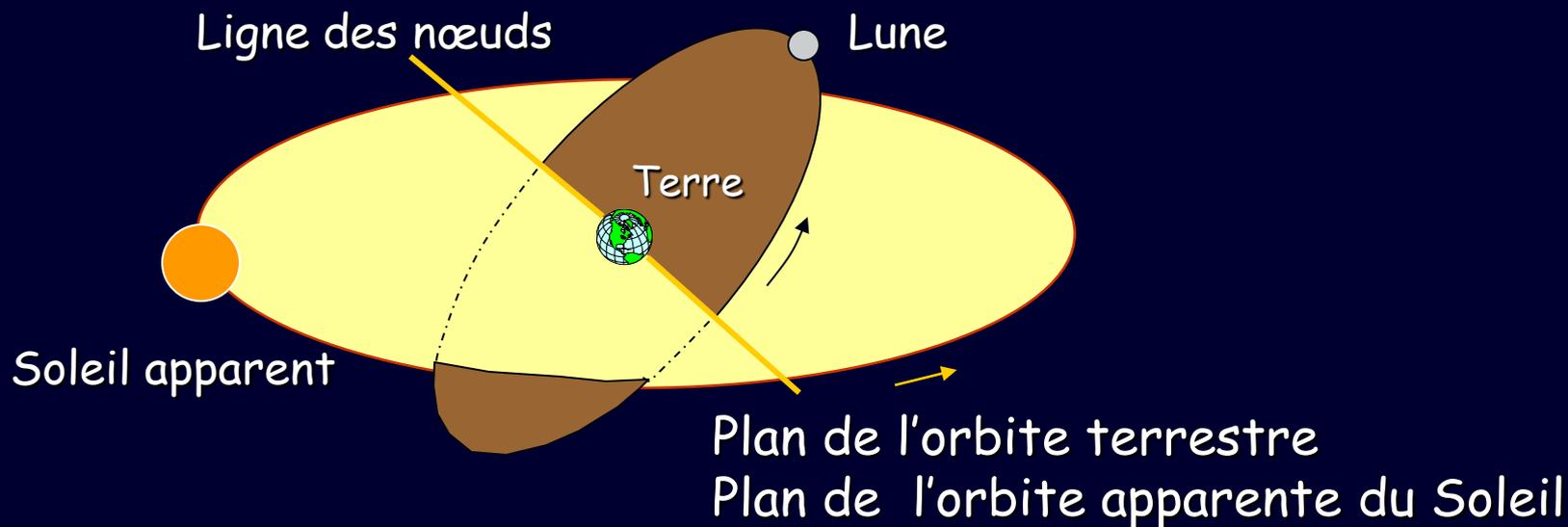


Soleil

Terre

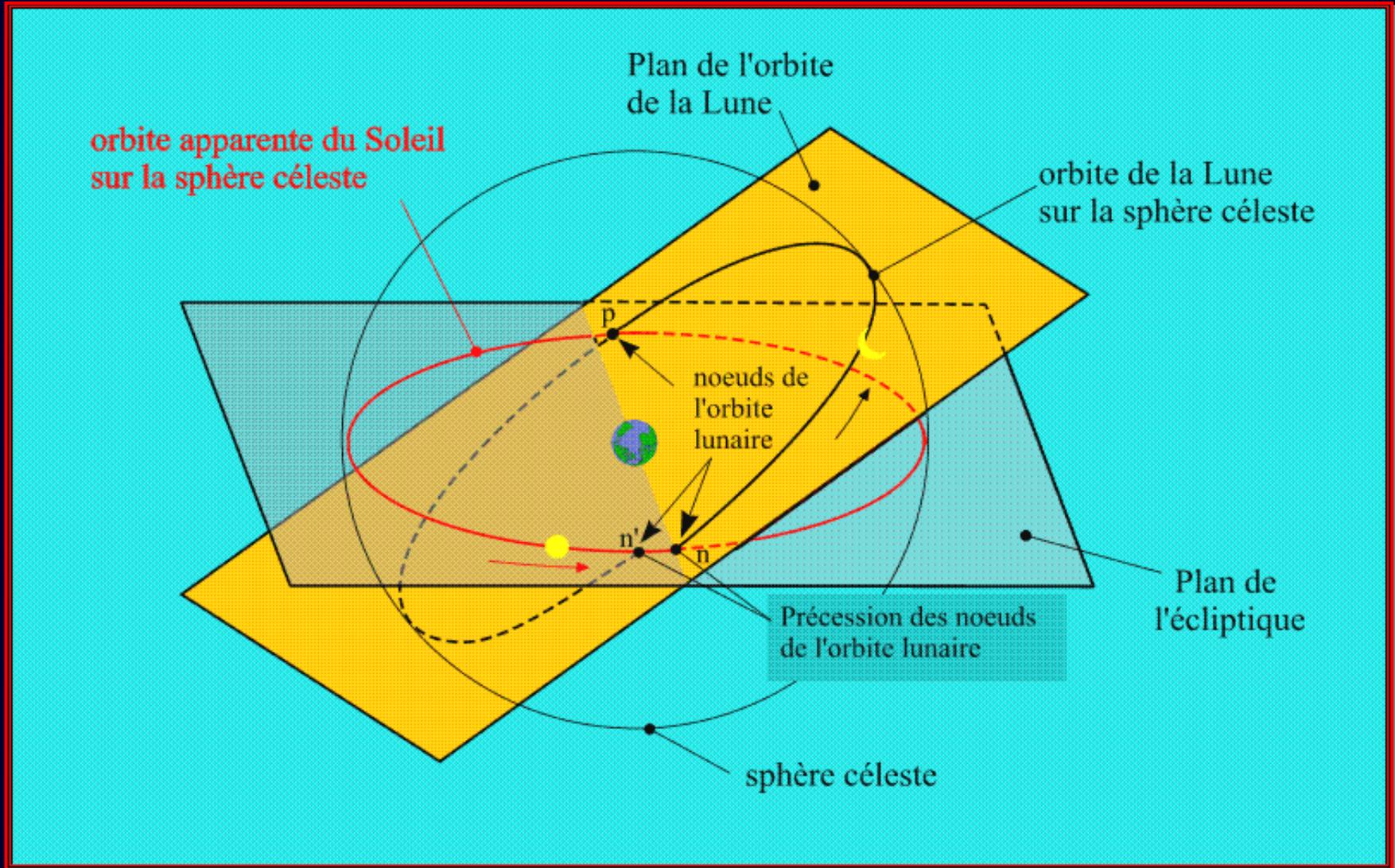
Lune

Le mouvement de la Lune

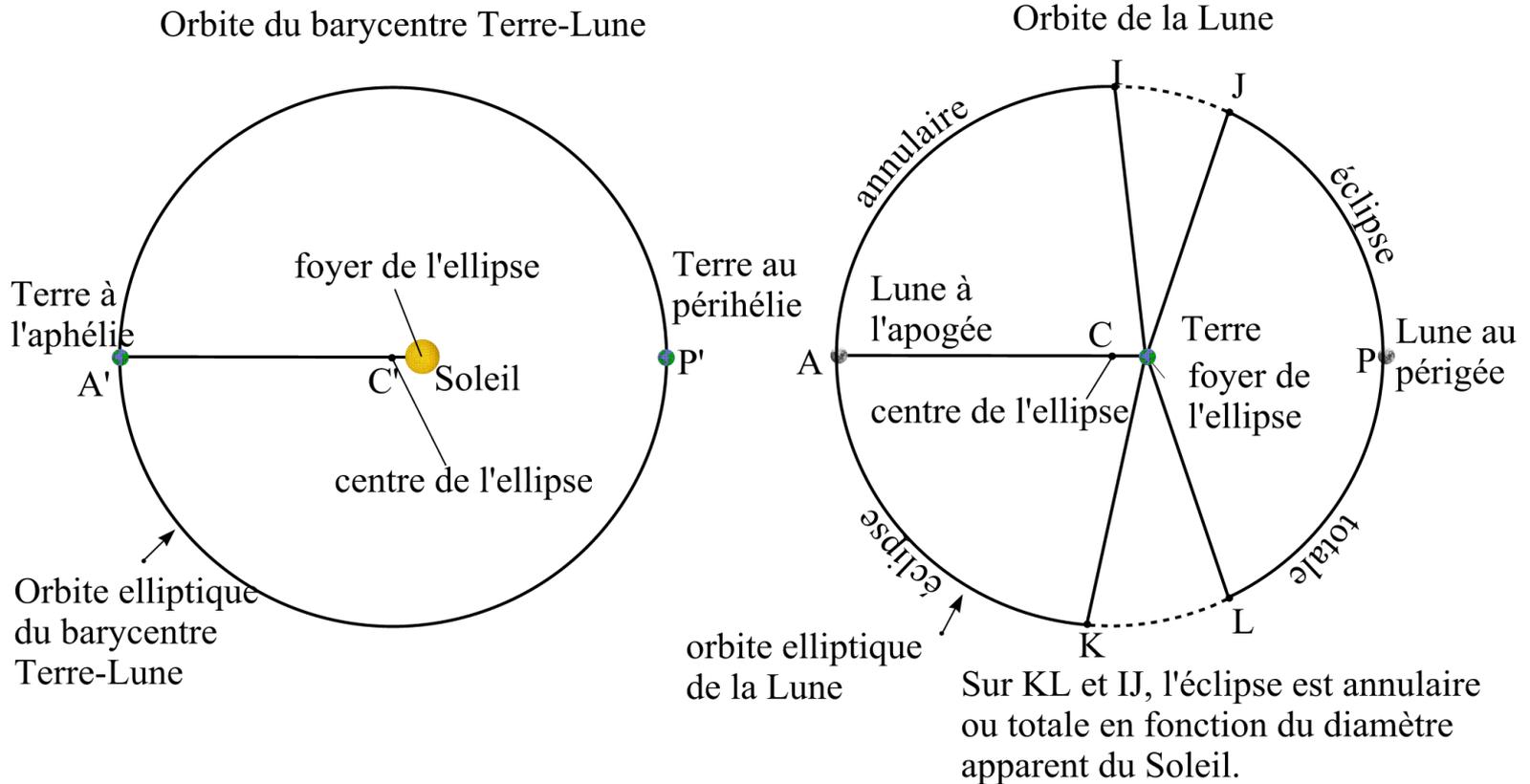


- L'orbite de la Lune n'est pas dans l'écliptique, donc son plan coupe le plan de l'orbite terrestre (écliptique) suivant une droite : la ligne des nœuds.
- Il n'y a éclipse que si le Soleil est sur la ligne des nœuds
- Cela arrive tous les 6 mois environ

La ligne de nœuds: le point critique sur l'orbite de la Lune où le Soleil a rendez-vous avec la Lune



Des orbites irrégulières



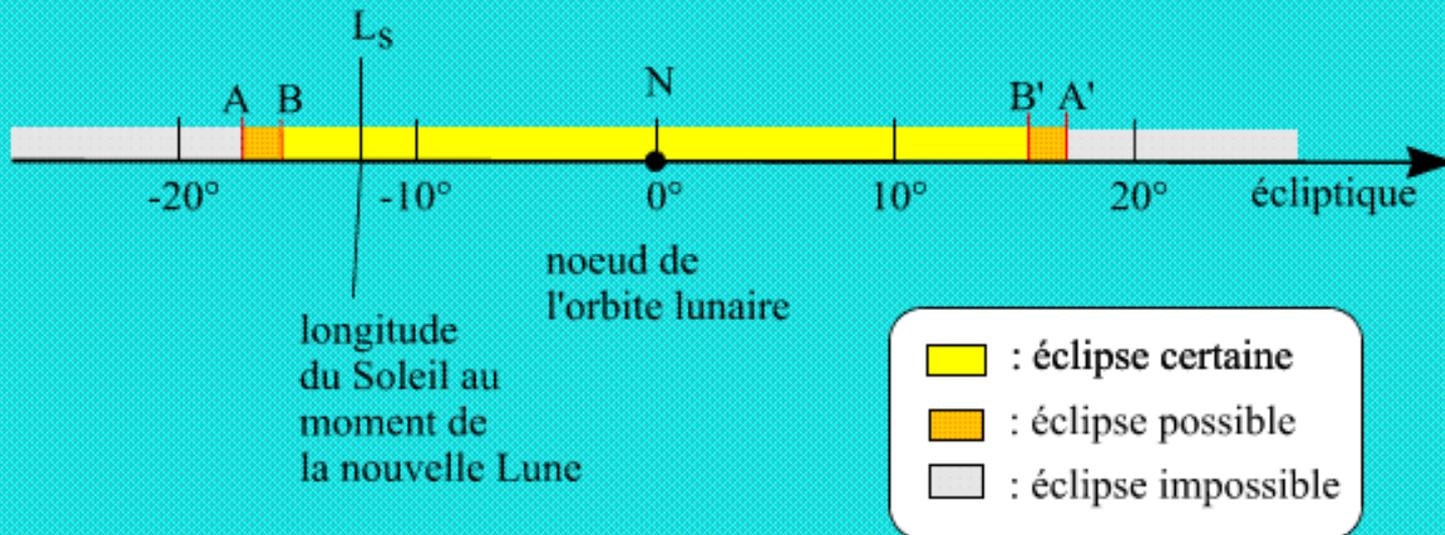
Des durées d'éclipses totales très variables:

Lune périhélie – Terre aphélie – proche des tropiques

5 juillet 2168, durée ~ 7m 34s.

Critères en longitude pour les éclipses de Soleil

$$AA' = 34,75^\circ$$
$$BB' = 31,33^\circ$$



Critères en longitude pour les éclipses de Soleil

Saison d'éclipse

173,31 jours

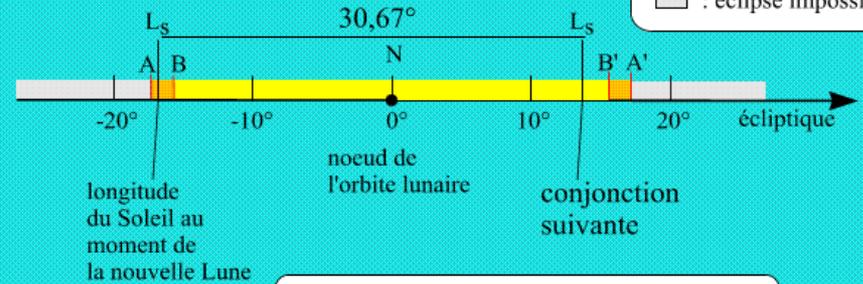
Il y a toujours au moins une éclipse de Soleil et une éclipse de Lune au voisinage de chaque passage du Soleil par un nœud de l'orbite lunaire

Quatre cas possibles

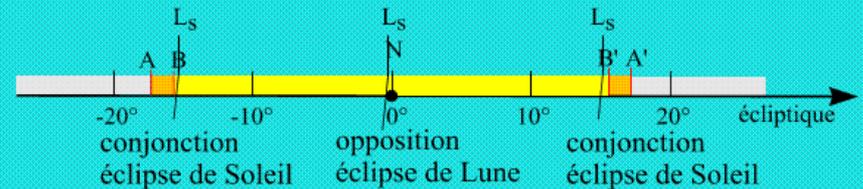
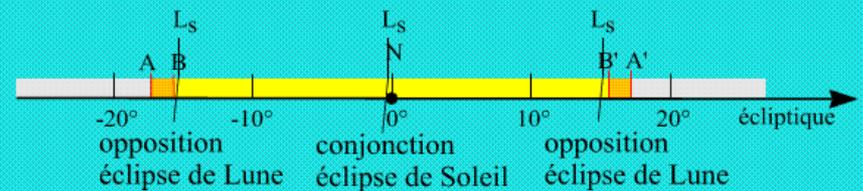
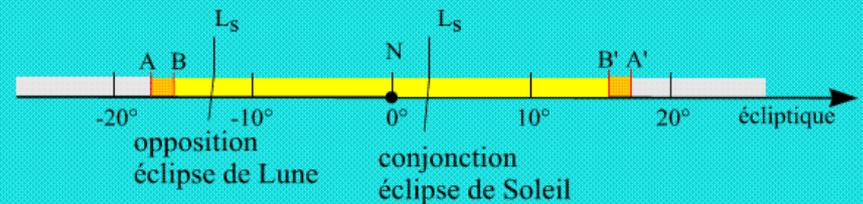
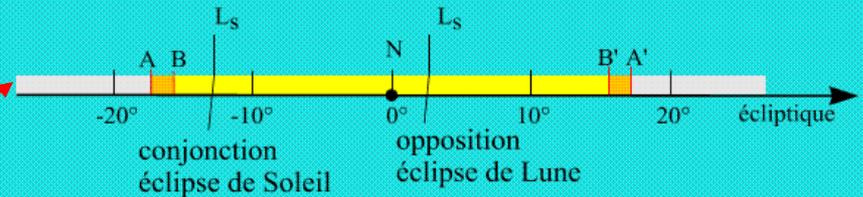
_____ S _____ L _____
 _____ L _____ S _____
 _____ L _____ S _____ L _____
 _____ S _____ L _____ S _____

$AA' = 34,75^\circ$
 $BB' = 31,33^\circ$

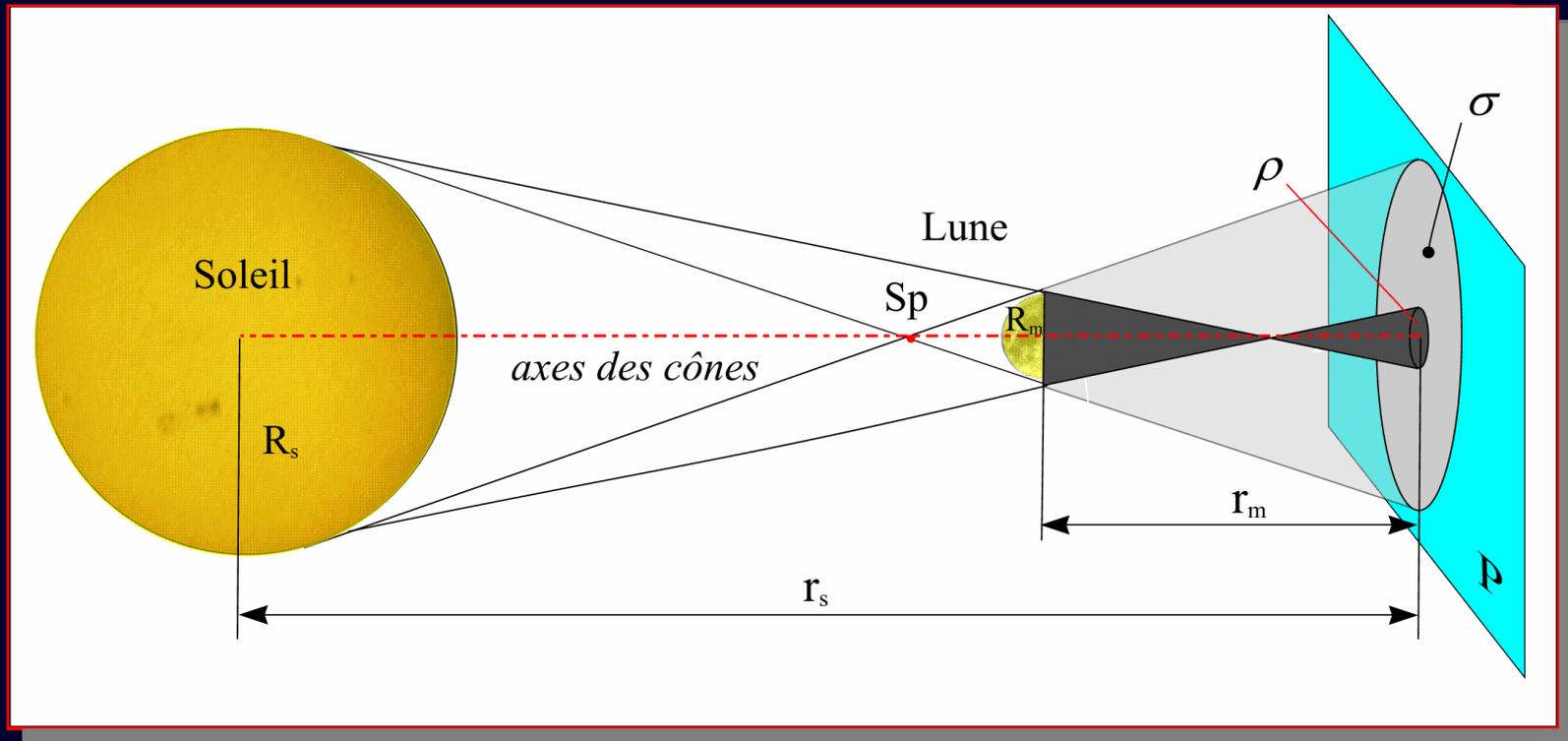
: éclipse certaine
 : éclipse possible
 : éclipse impossible



Durant une lunaison, la variation de la longitude du Soleil par rapport au noeud lunaire est de $30,67^\circ < BB'$

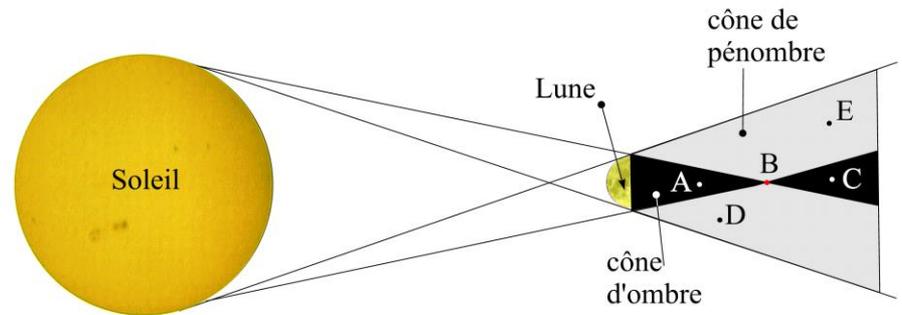


Tailles des cônes d'ombre et de pénombre



Il faut que l'ombre de la Lune tombe sur la Terre!

Les différents types d'éclipses de Soleil



Observateur en A



Éclipse totale

Observateur en B



Éclipse annulaire totale

Observateur en C



Éclipse annulaire

Observateur en D



Éclipse partielle

Observateur en E



Éclipse partielle

Éclipses totales les plus longues

Conditions pour avoir des éclipses totales longues

Éclipse de Soleil

→ NL proche d'un nœud lunaire

Petit Soleil apparent

→ Terre à l'aphélie (voisinage du 4 juillet).

Grosse Lune apparente

→ Lune au périgée.

Mais Lune au périgée

→ vitesse angulaire de la Lune rapide

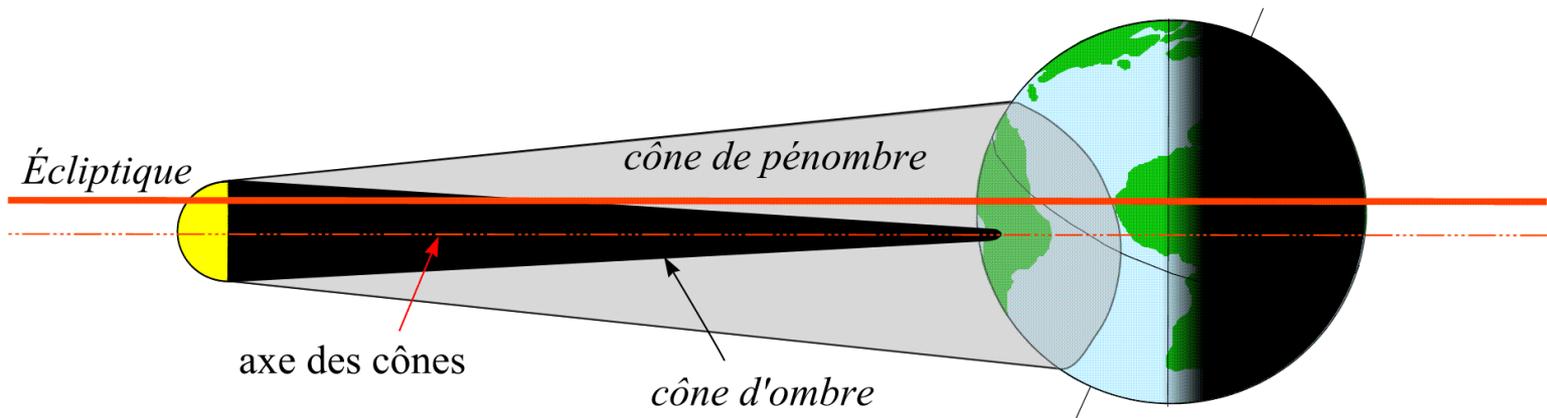
Le sommet du cône d'ombre doit être le plus près possible de la surface terrestre

→ Lune au zénith.

La vitesse du sol de la Terre

doit être la plus rapide possible → près de l'équateur terrestre.

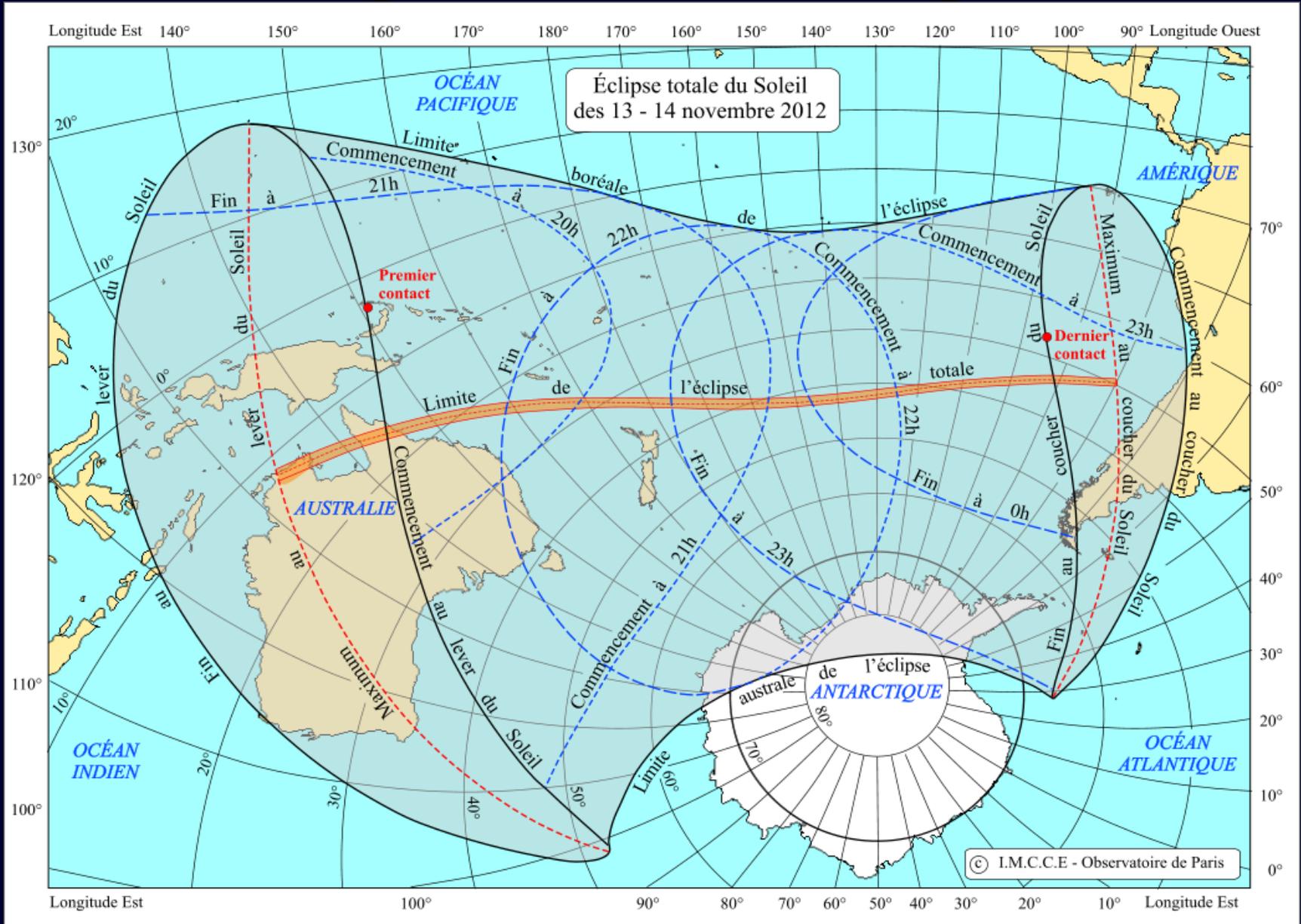
Comment prévoir d'où on verra une éclipse?



Où se projette l'ombre? A quel moment?

Pendant l'éclipse la Terre tourne autour du Soleil, la Lune autour de la Terre et la Terre autour de son axe!

L'aspect des cartes d'éclipses:



Type I : une éclipse centrale avec limites australe et boréale

Aspect des cartes d'éclipses

Type II : éclipse centrale avec une seule limite australe ou boréale

ÉCLIPSE TOTALE DU SOLEIL LE 11 AOÛT 1999



Type II

éliocentrique

Projection azimutale orthographique.

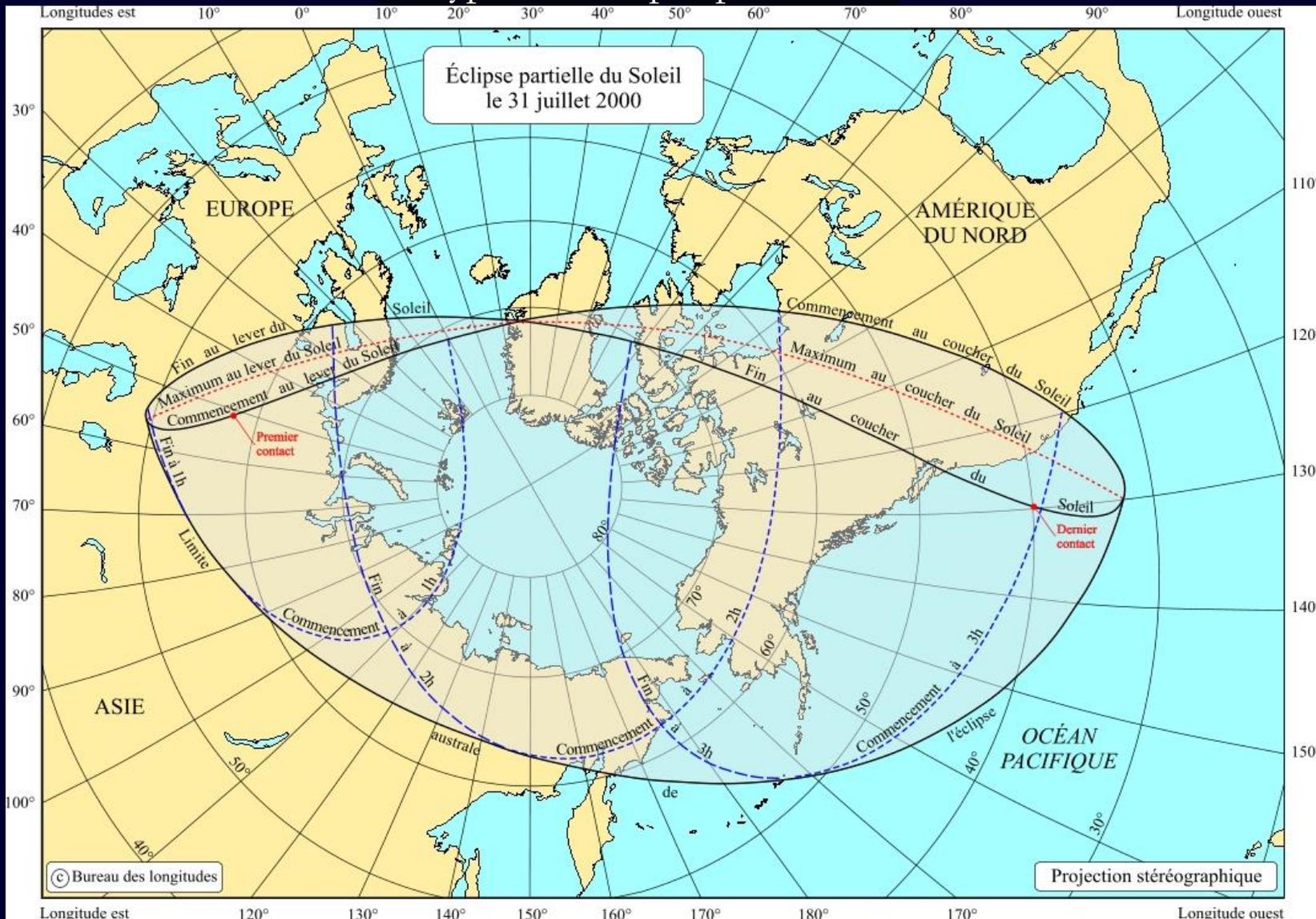
© I.M.C. B.D.L. - P. Rocher - 1999

Éclipse centrale, l'axe rencontre la Terre mais la pénombre ne passe pas entièrement sur la Terre

*

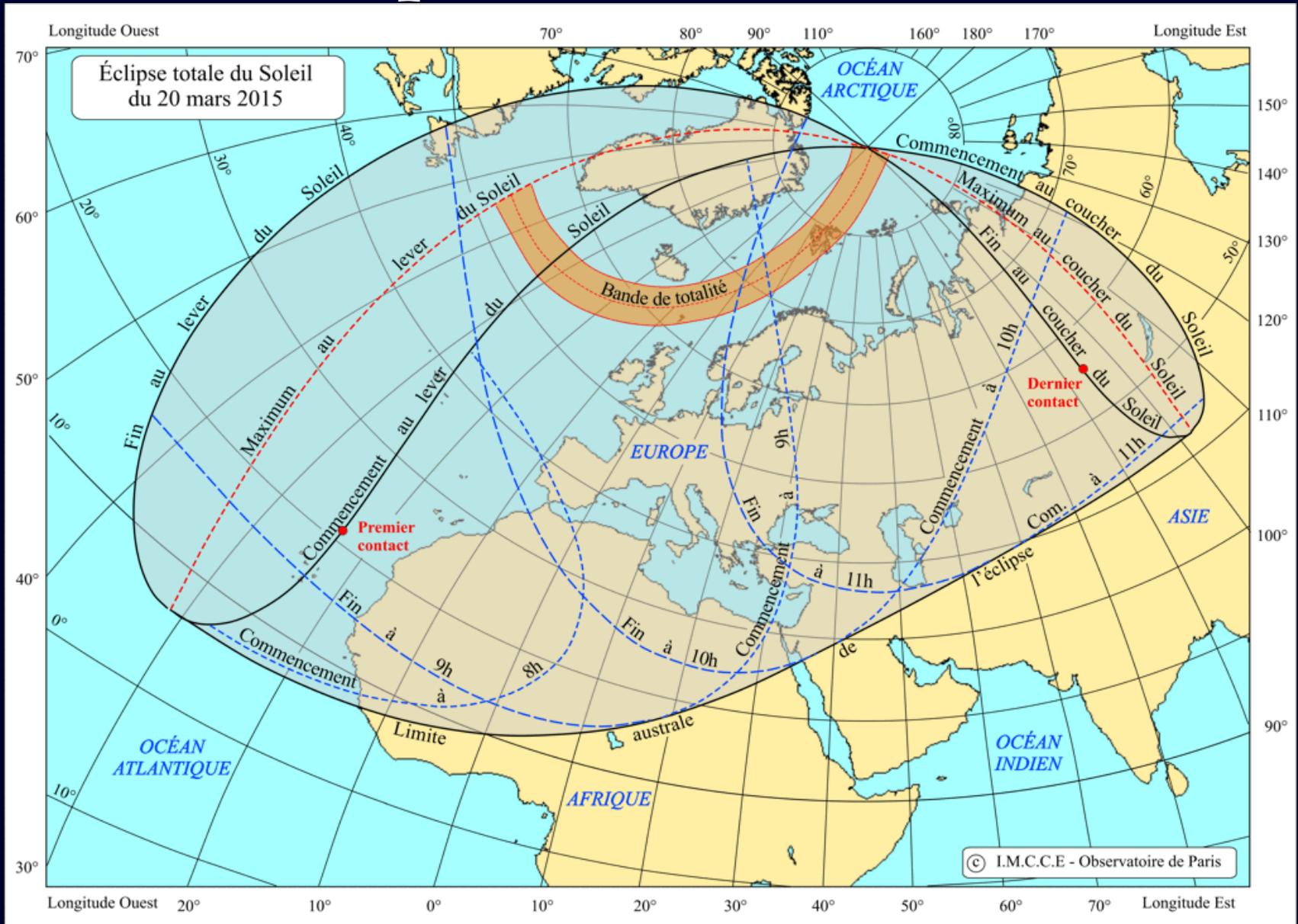
Aspect des cartes d'éclipses

Type III : éclipse partielle



Le maximum de l'éclipse se trouve à l'horizon

L'éclipse du 20 mars 2015



La Terre n'est pas entièrement incluse dans le cône de pénombre: type II

Le cône d'ombre



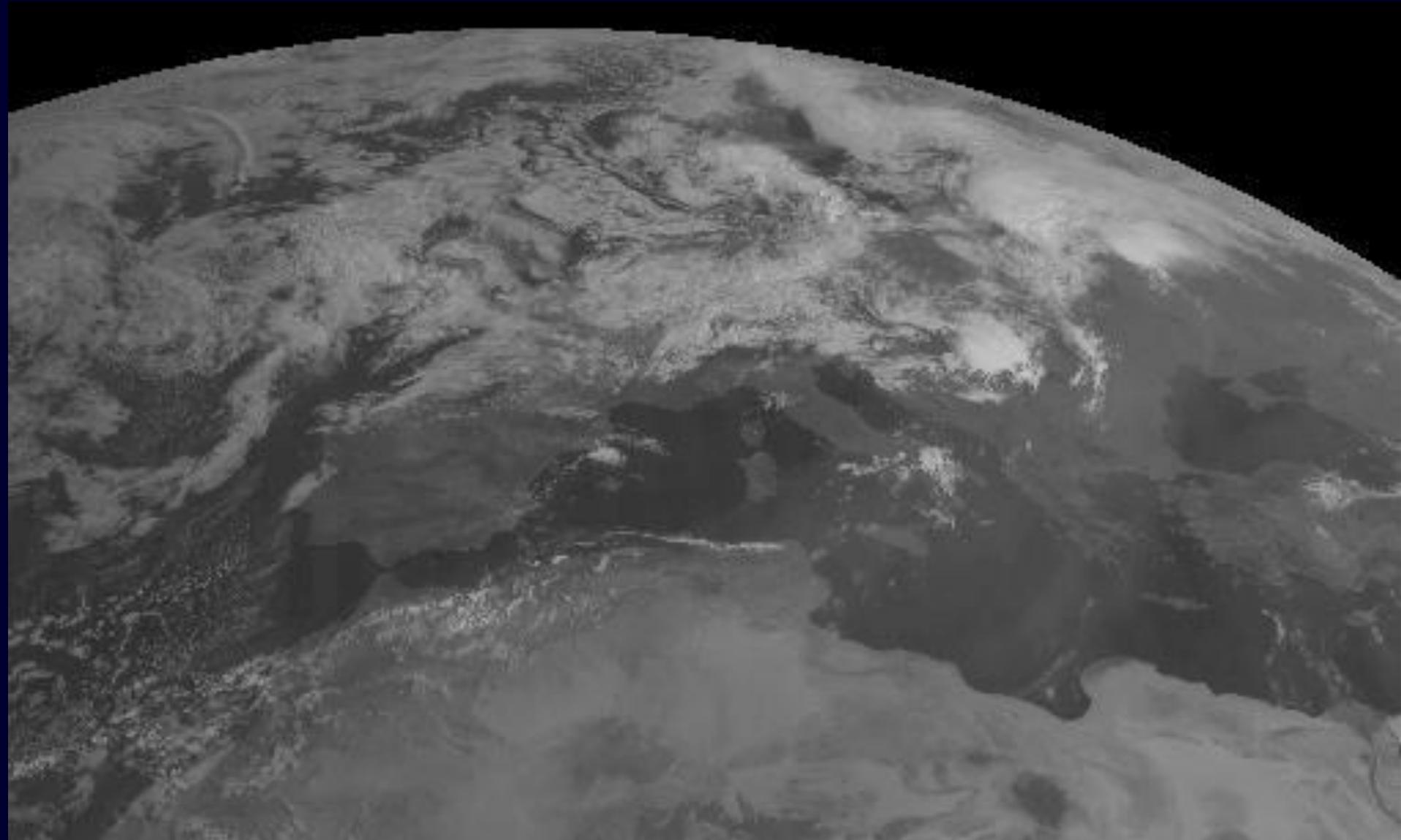
Vitesse du cône : $1 \text{ km/s} = 3600 \text{ km/h}$

La vitesse de rotation de la Terre compense:

- équateur = $0.462 \text{ km/s} = 1660 \text{ km/h}$
- latitude 45° = $0.326 \text{ km/s} = 1170 \text{ km/h}$

On peut suivre le cône d'ombre en avion!

Le cône d'ombre



Une éclipse totale
de Soleil : la nuit en
plein jour!

Le Soleil apparaît
noir entouré d'un
halo lumineux

Pourquoi observer
les éclipses de
Soleil?

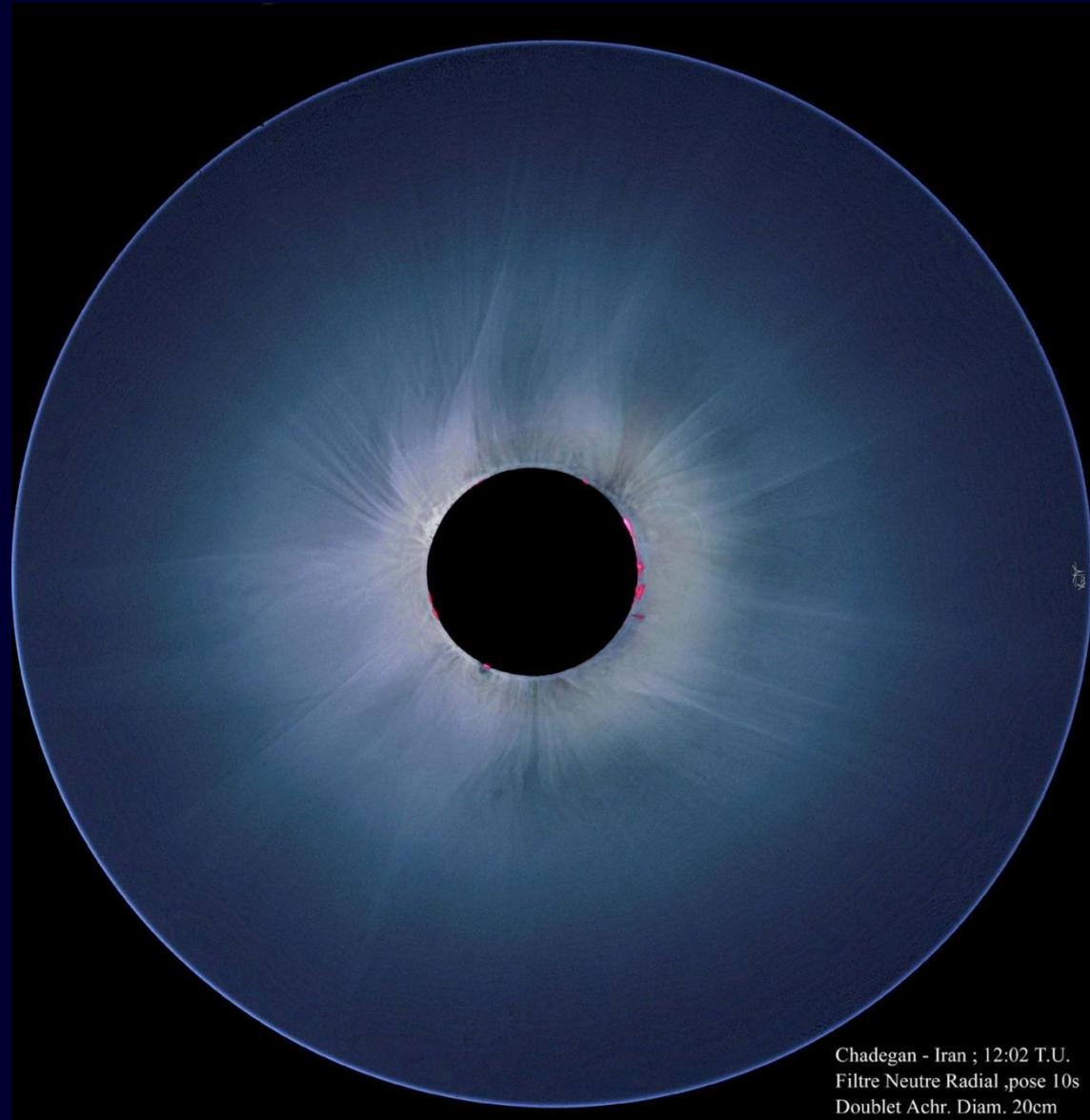


Les éclipses permettent d'observer la « couronne » solaire

La couronne observée à
Reims en 1999



© P. Déchy – Observatoire de Paris



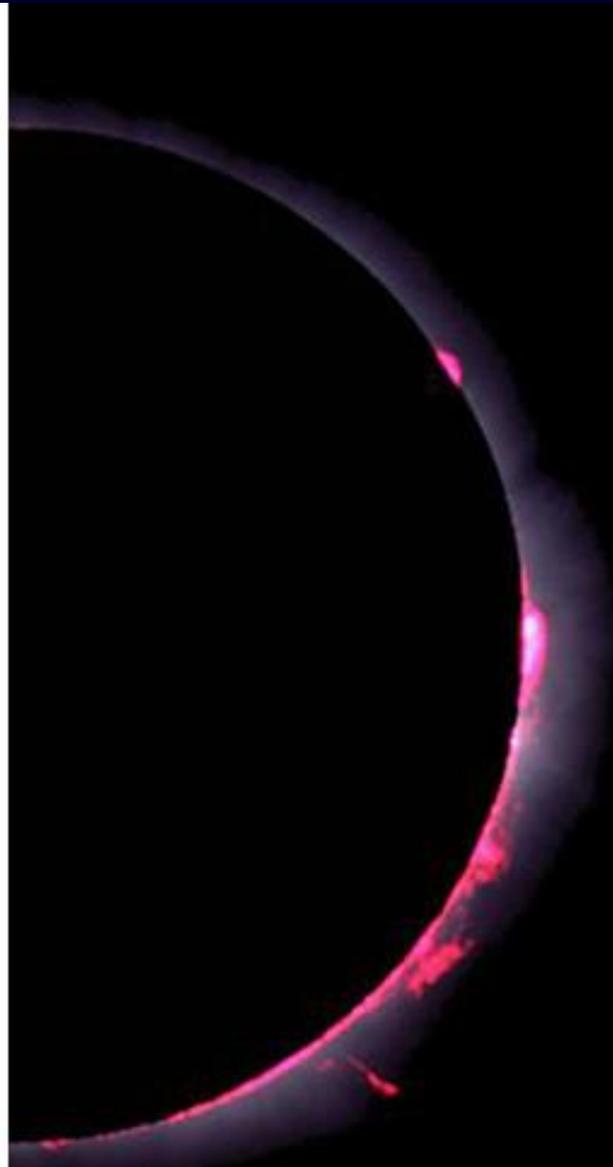
Chadegan - Iran ; 12:02 T.U.
Filtre Neutre Radial ,pose 10s
Doublet Achr. Diam. 20cm

La couronne observée en Iran © IAP/CNRS

Observer les protubérances solaires



Couronne du 11 août 1999, observée en Iran.
© Institut d'Astrophysique de Paris - CNRS (France)



Couronne du 11 août 1999, observée en Iran.
© Institut d'Astrophysique de Paris - CNRS (France)

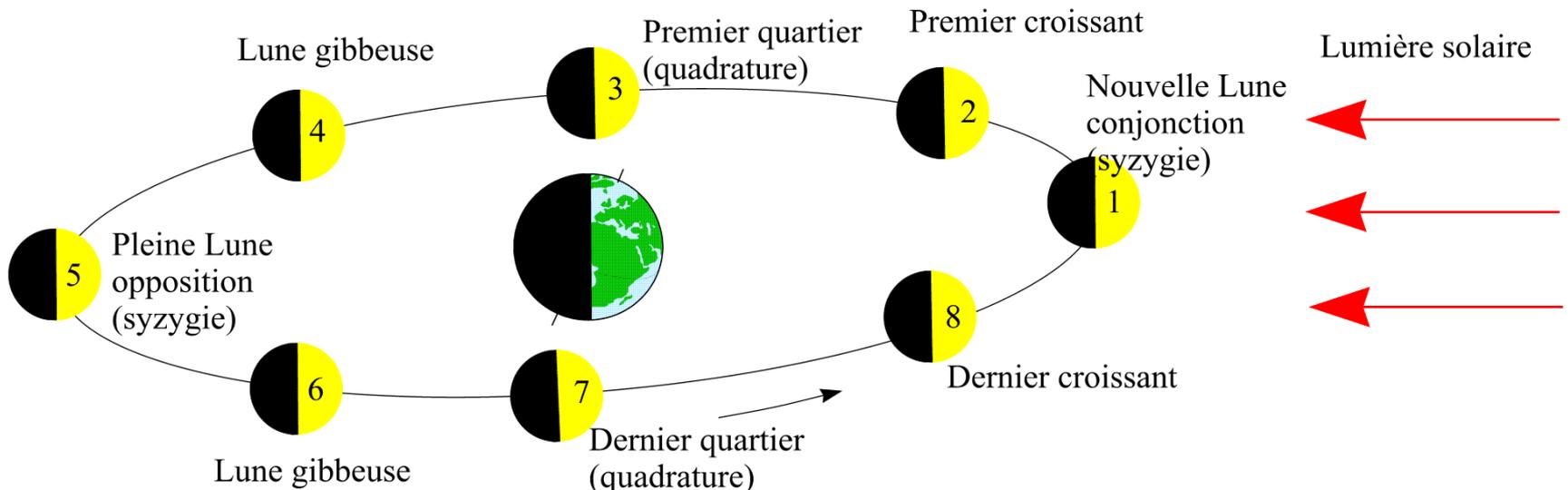
L'intérêt physique de l'observation des éclipses de Soleil

- 1901-1905-1908 : pour expliquer l'avance du périhélie de Mercure, recherche infructueuse durant les éclipses, d'une nouvelle planète proche du Soleil.
- 1919 (19/05) : tentative de vérification de la relativité générale (courbure de l'espace) au voisinage du Soleil, expérience renouvelée en 1922.
- 1930 : l'invention du coronographe par B. Lyot permet d'observer la couronne solaire et les protubérances en dehors des éclipses totales.
- 1995 : lancement du satellite SoHO (Solar and Helio-centric Observatory) vers le point de Lagrange Terre-Soleil pour l'observation continue du Soleil et de sa couronne.

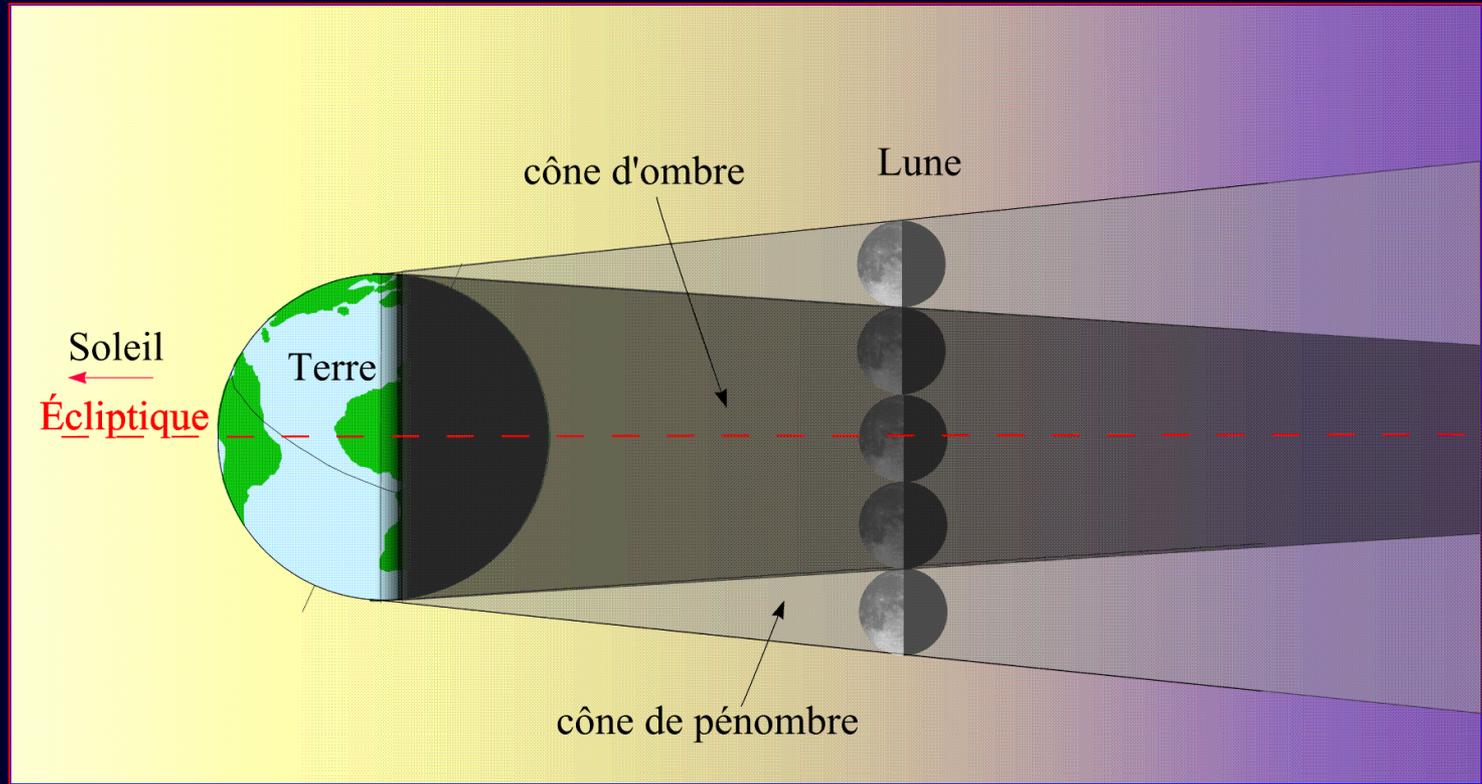
Et les éclipses de Lune ?

Les éclipses de Soleil → Nouvelle Lune

Les éclipses de Lune → Pleine Lune



Et les éclipses de Lune ?



Il y a trois types d'éclipses de Lune

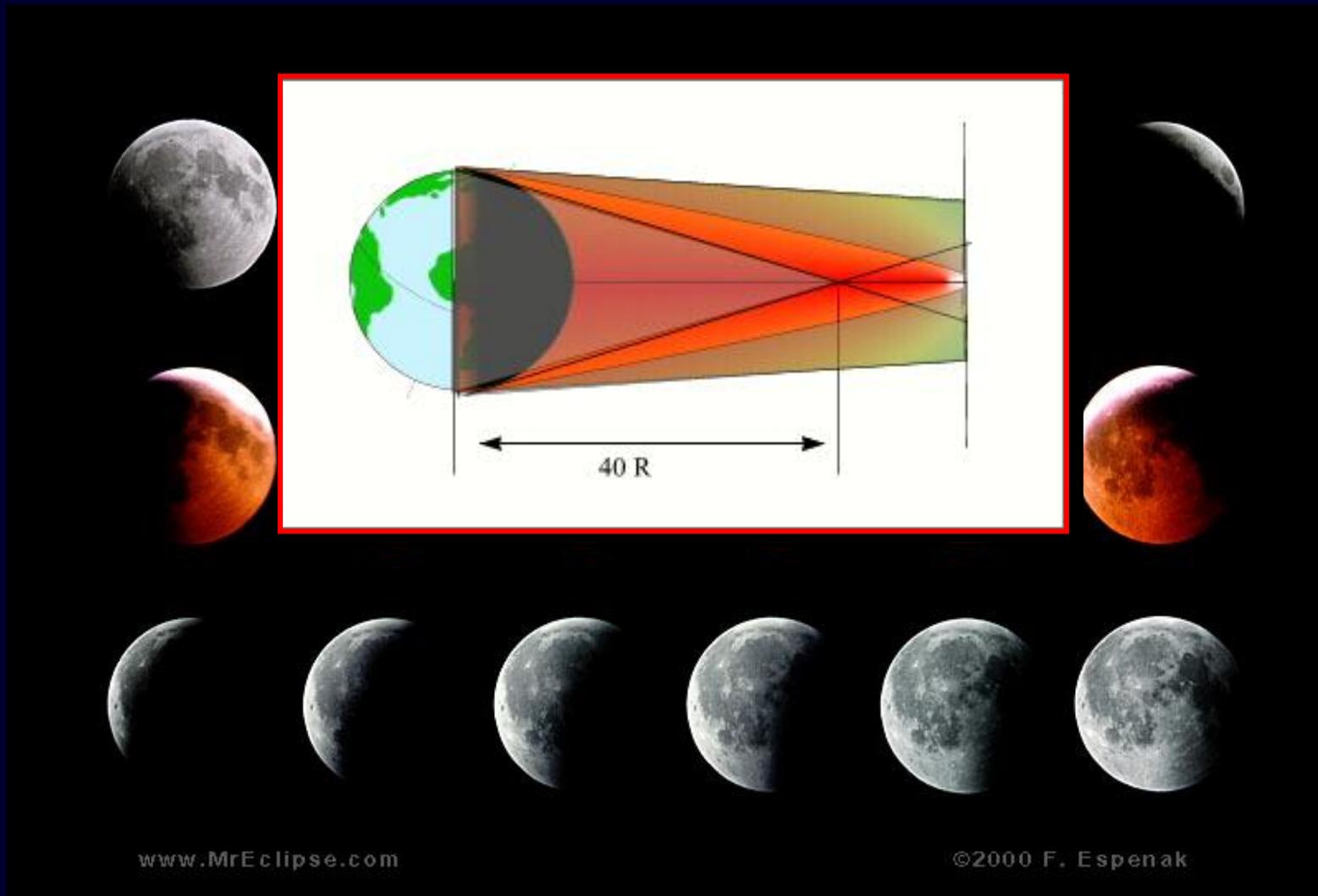
- Les éclipses par la pénombre
- Les éclipses partielles
- Les éclipses totales

Jeux d'ombre et de pénombre



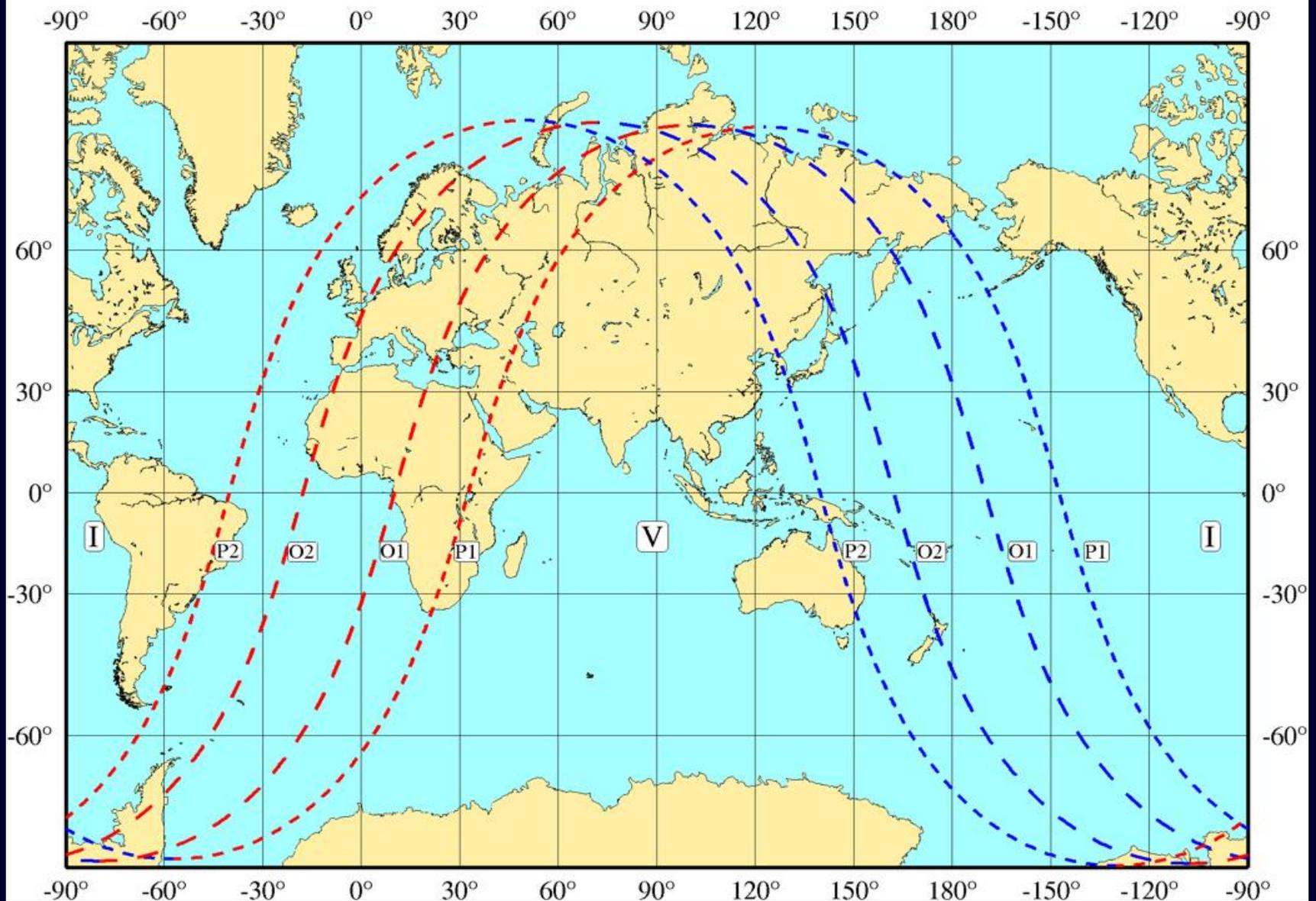
Les éclipses de Lune sont des éclipses vraies

La Lune rouge lors de son éclipse



Carte de visibilité: il suffit de voir la Lune!

Éclipse partielle de Lune du 7 août 2017



Les éclipses sont-elles fréquentes?

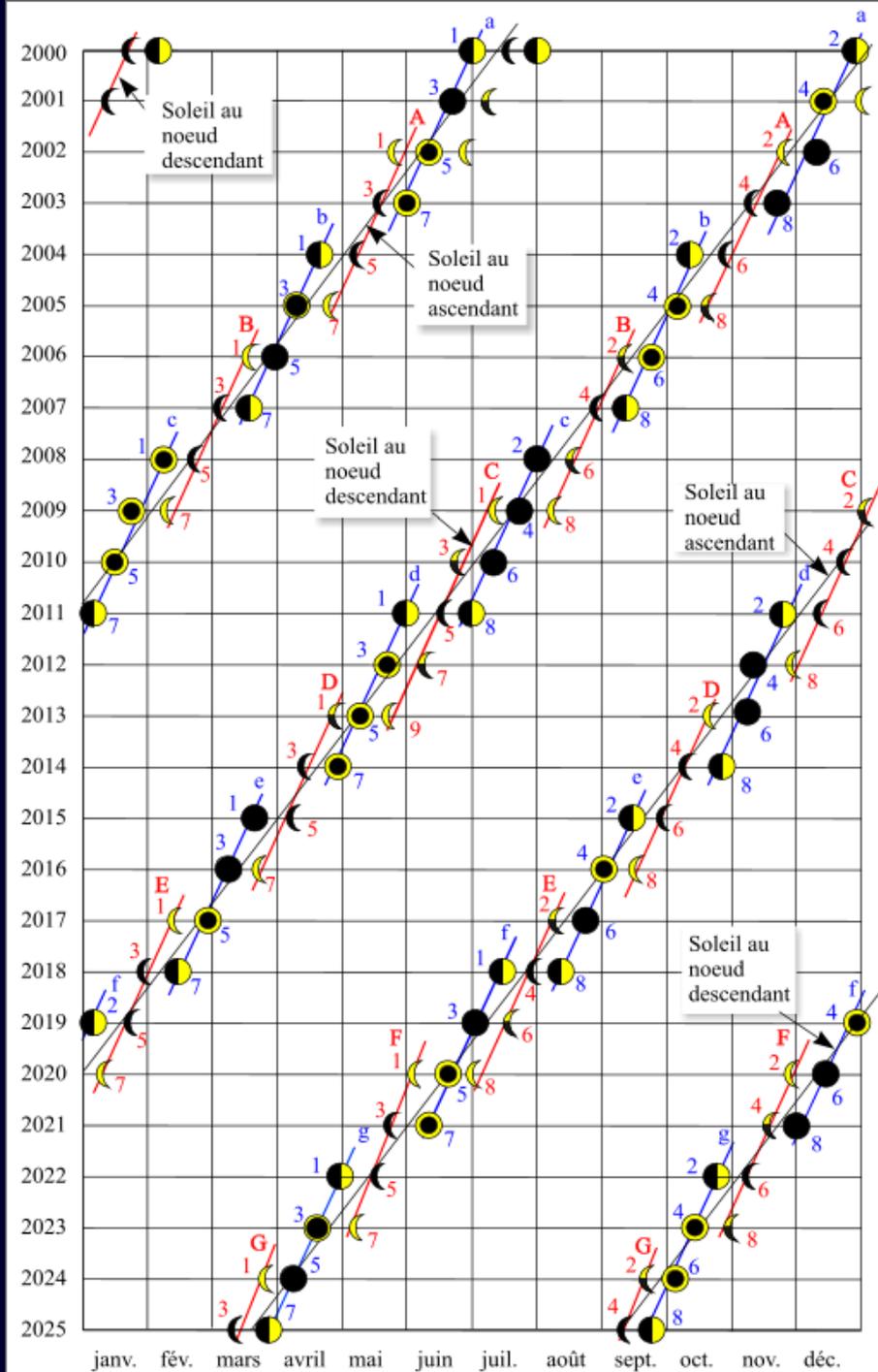
- Eclipses de Lune: il faut voir la Lune!
- Eclipses de Soleil: phénomène local! La Lune est devant le Soleil
- Eclipses totales: phénomène très local: très rares
- Il y a au moins 4 éclipses par an dont 2 de Soleil et 2 de Lune...

Périodicité des éclipses de Lune et de Soleil

Liste des éclipses de Lune et de Soleil
entre 2000 et 2025

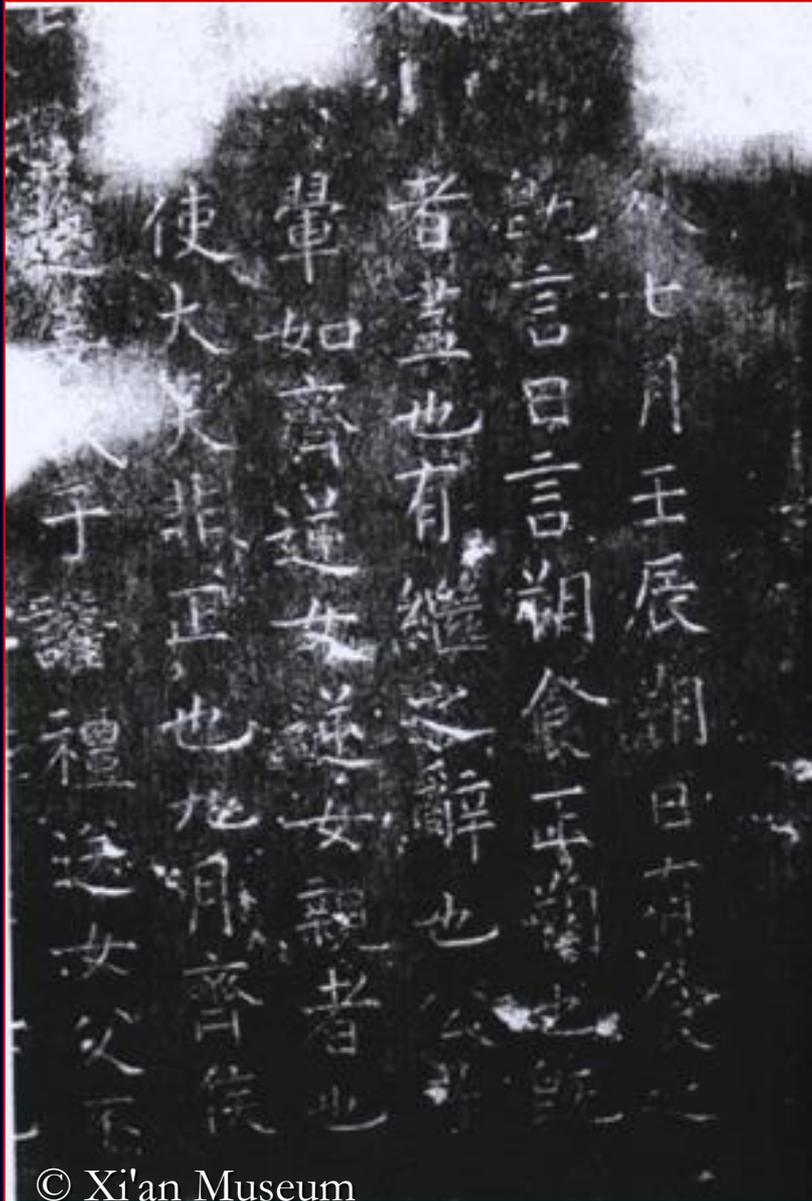
Minimum : 4 éclipses/an
Maximum : 7 éclipses/an

Éclipses de Soleil : ● = mixte; ● = totale; ☉ = annulaire; ☾ = partielle.
Éclipses de Lune : ☾ = totale; ☾ = partielle; ☾ = par la pénombre.
Séries courtes d'éclipses de Lune : — A, B, C, D, E, F, G, H, I, J, K, L, M et N.
Séries courtes d'éclipses de Soleil : — a, b, c, d, e, f, g, h, i, j, k, l, m et n.



Les anciennes éclipses de Soleil

Des observations très anciennes



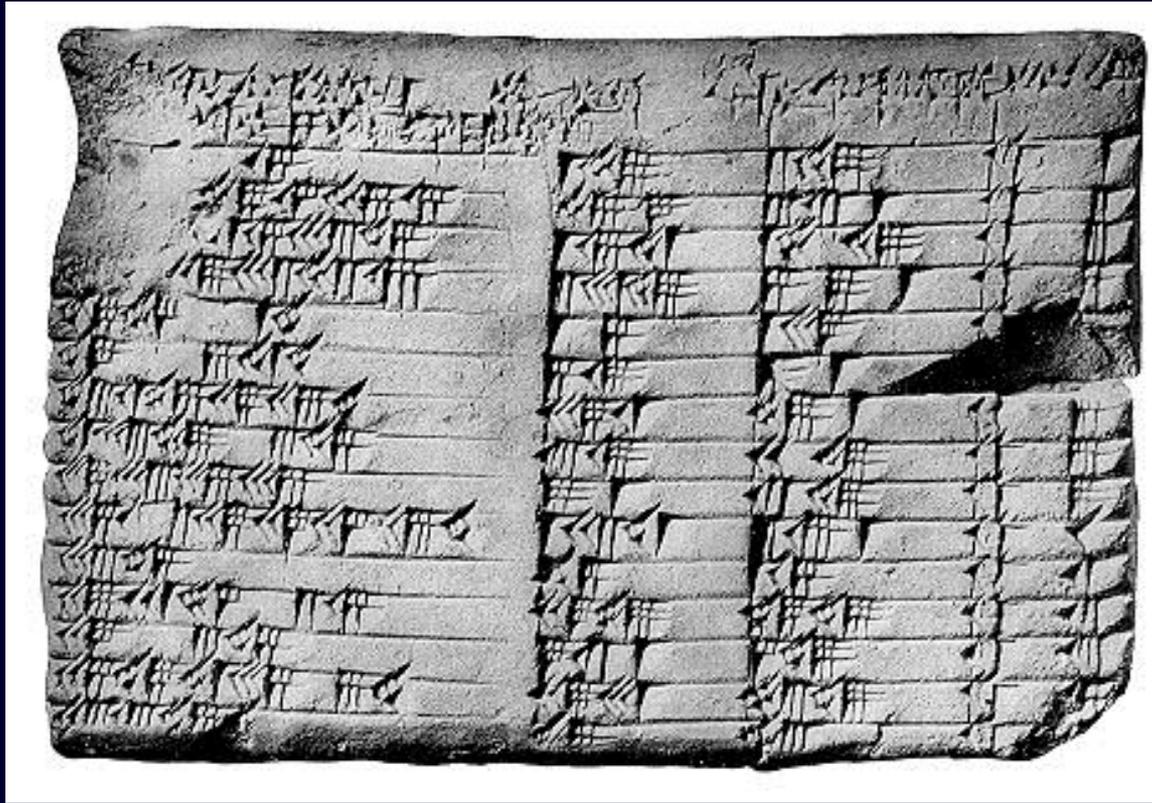
Légende de Hsi et Ho astrologues décapités pour ne pas avoir prédit une éclipse de Soleil (vers 2000 av. J.C.).

Un des plus vieux documents est un texte de 1300 avant J.C. sur un os ciselé découvert à Anyang (province du Henan).

Le plus ancien mot chinois pour désigner une éclipse, *shih*, veut dire manger.

Relation d'une éclipse de Soleil observée en Chine en 709 avant J.-C. sur une stèle du IX^e siècle.

Les éclipses anciennes pour aider les historiens



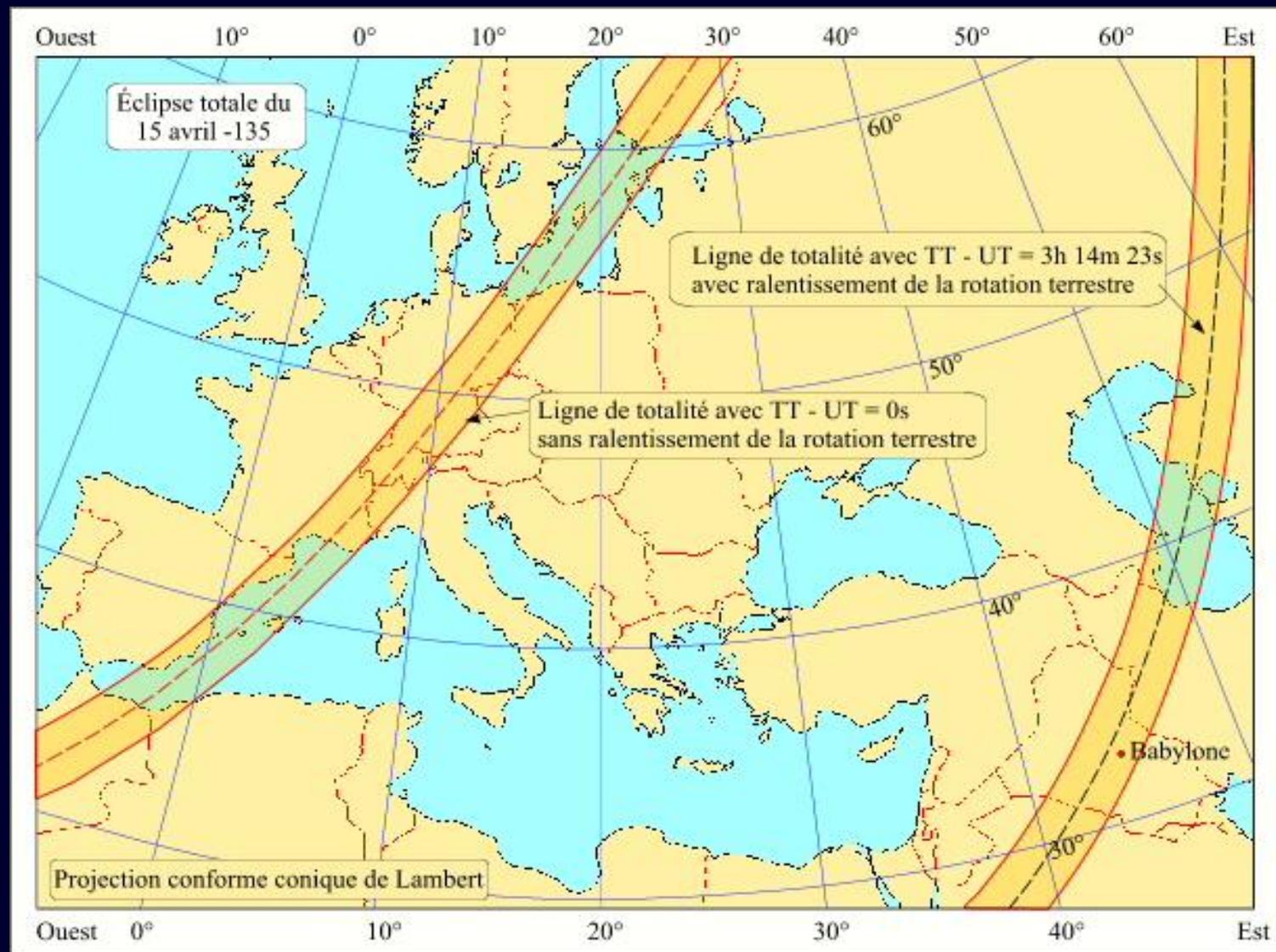
- *Traduction d'une tablette cunéiforme: « Une éclipse solaire a débuté au sud-ouest 96 minutes après le lever du Soleil et est devenue totale 72 minutes plus tard. L'ombre se déplaçait du sud-ouest au nord-est. Au total 140 minutes. »*

De quelle éclipse s'agit-il?

- Contraintes astronomiques: les éclipses qui ont eu lieu:
 - 18 janvier -401 à 11h00
 - 15 août -241 à 12h30
 - 15 avril -135 à 8h30

- Qu'a-t-on observé le 15 avril -135 ?
 - lever du soleil à 5h36
 - début de l'éclipse à 7h12
 - totalité de l'éclipse à 8h24

➔ date identifiée : **15 avril -135**

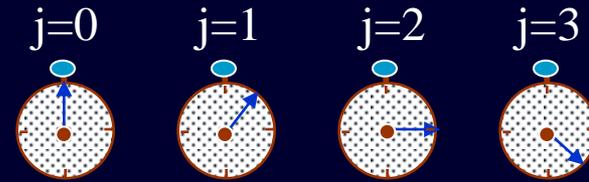


Les calculs donnent une éclipse en France, pas à Babylone !

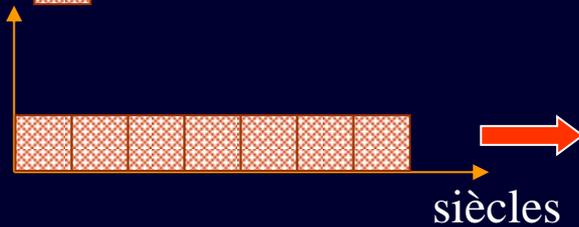
→ La Terre ralentit !

• 1 jour = 24 h + 1.6 ms

1.6 ms /jour = 1 min/siècle



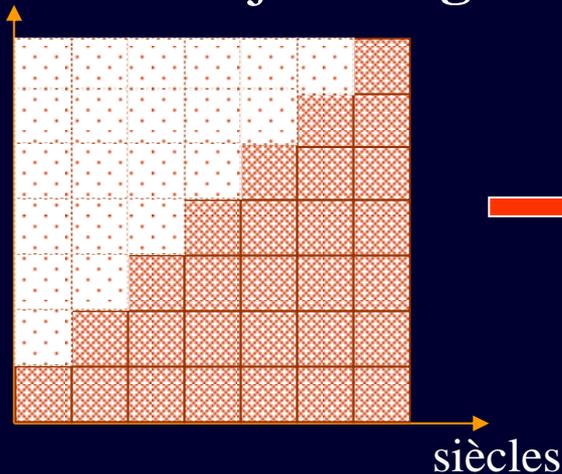
 = 60s



Décalage horloge-Terre

20 siècles = $60 \times 20 = 1200$ s = 20 min

• Mais le jour **augmente** de 1.6 ms par siècle



Décalage horloge-Terre

20 siècles = $60 \times (20 \times 20 / 2) = 12000$ s ~ 3h

L'éclipse de Christophe Colomb



Cette éclipse totale de Lune eut lieu le 29 février de l'an 1504. Lors de son quatrième voyage Christophe Colomb, échoua sur les côtes de la Jamaïque à court de vivres. Les indiens refusant de l'approvisionner, Christophe Colomb prédit aux indiens une éclipse totale de Lune trois jours avant sa venue et la présenta comme un signe céleste du mécontentement du Dieu des chrétiens. L'éclipse eut lieu effectivement la nuit du 29 février et fut, nous dit Christophe Colomb, d'un rouge sombre. Fortement impressionnés par ce phénomène céleste, les indiens ravitaillèrent Christophe Colomb et son équipage.

L'évolution des prédictions

On doit connaître la position des deux corps avec une précision inférieure à leurs diamètres apparents ($0,5^\circ$).

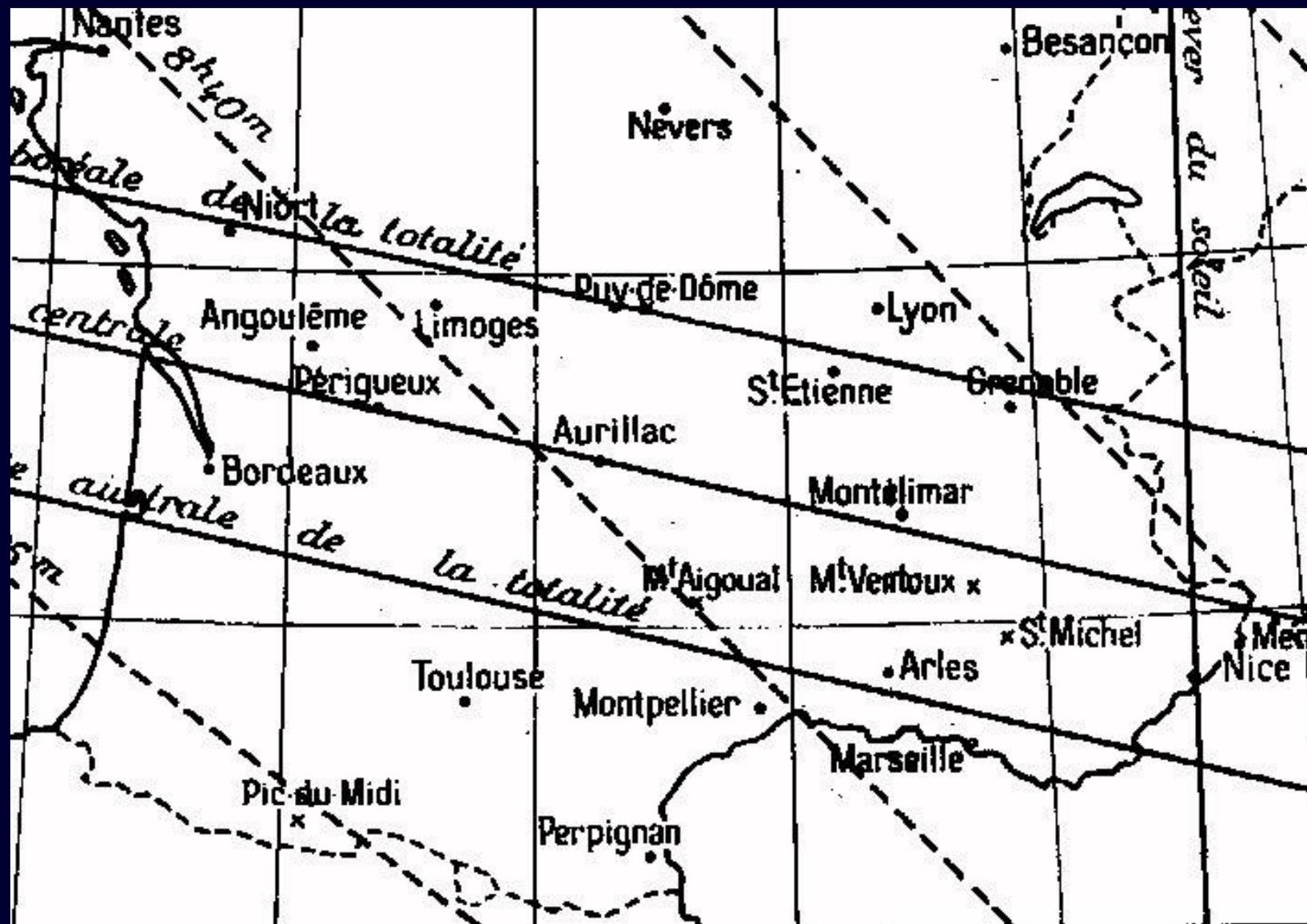
Pour la Lune cela n'est possible qu'à partir du milieu du II^e siècle (Almageste, Claude Ptolémée), avant cette date il est impossible de prédire la visibilité d'une éclipse pour un lieu donné.

Pour les cartes de prédiction des éclipses de Soleil (et de la zone de totalité), il faut attendre le XVII^e (J.D. Cassini et E. Halley) et le XVIII^e siècle.

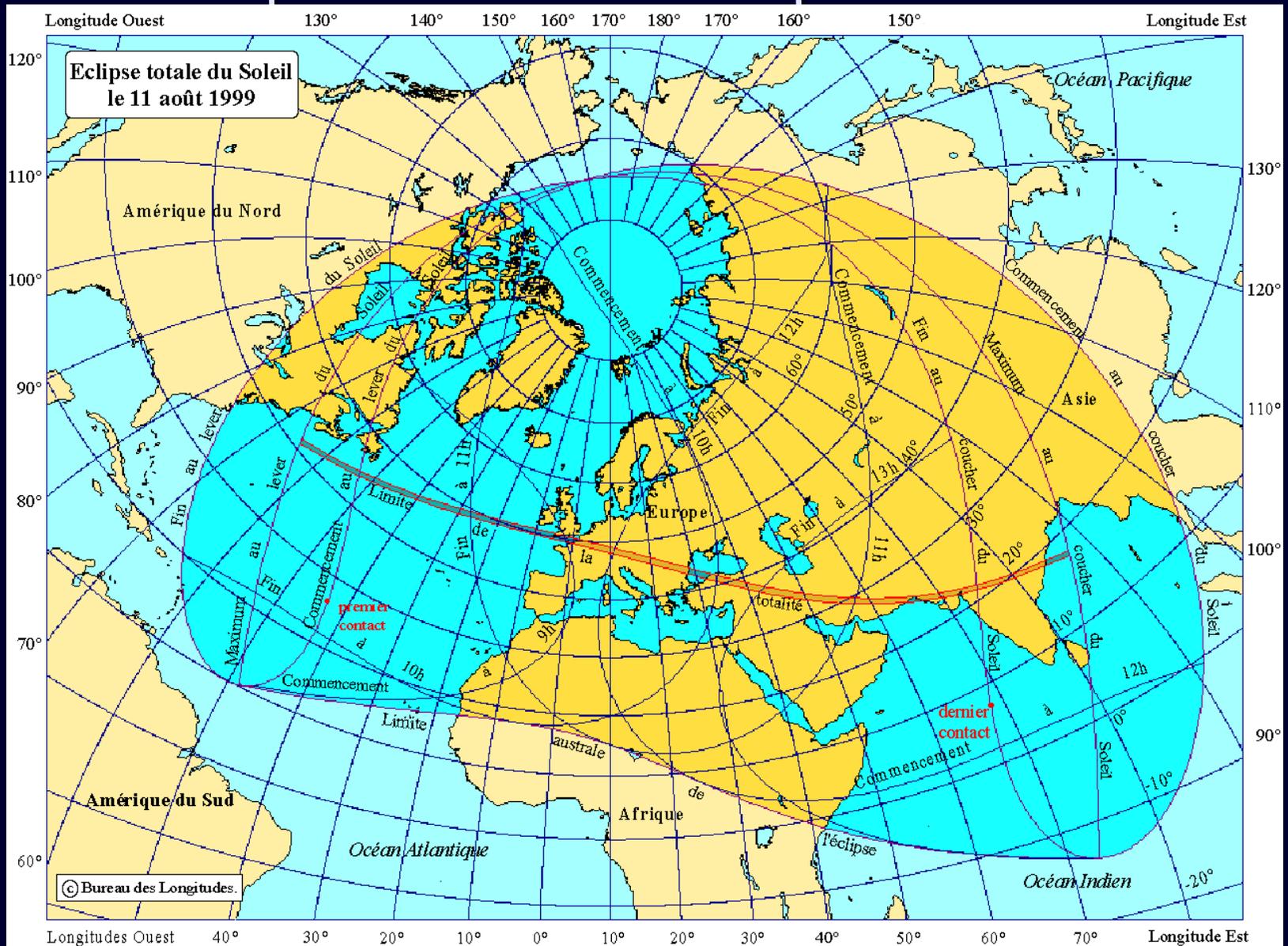
L'éclipse totale de 1724



Éclipse du 15 février 1961



L'éclipse du 11 août 1999: une expérience récente des éclipses en France



L'éclipse de 1999 vue de l'espace





浙江省装饰

新韵装饰

装潢

浙江城市

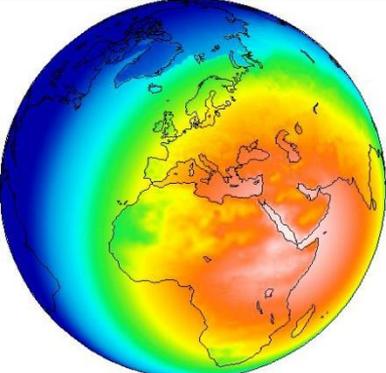
博成广告

博成广告

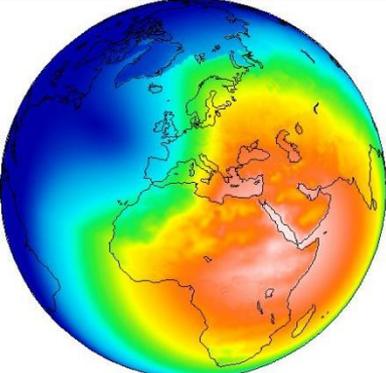
博成广告

Le rayonnement terrestre le 11 août 1999

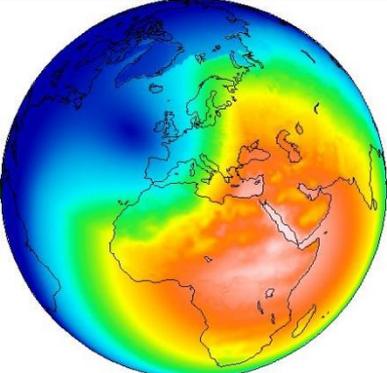
Rayonnement visible
le 11 août à 11h30



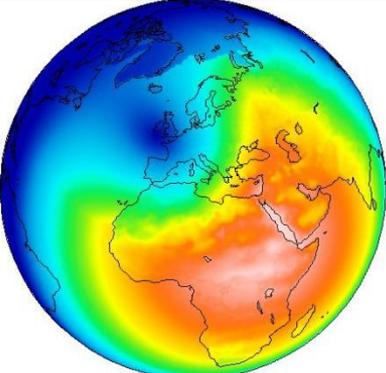
Rayonnement visible
le 11 août à 11h45



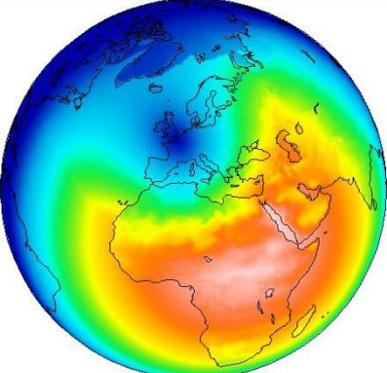
Rayonnement visible
le 11 août à 12h00



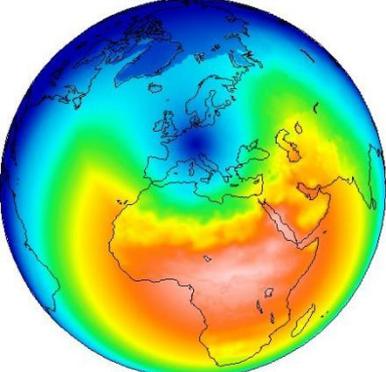
Rayonnement visible
le 11 août à 12h15



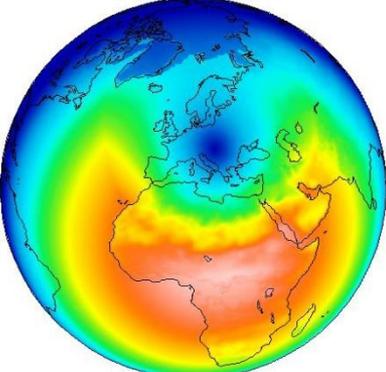
Rayonnement visible
le 11 août à 12h30



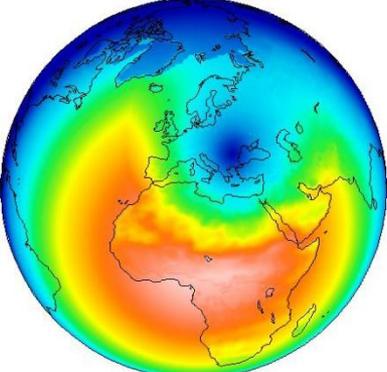
Rayonnement visible
le 11 août à 12h45



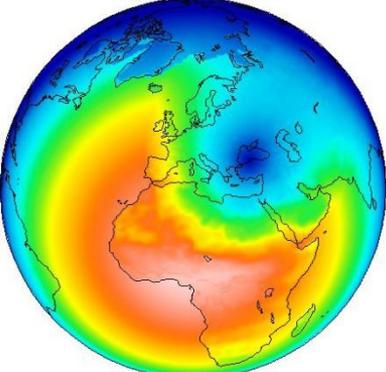
Rayonnement visible
le 11 août à 13h00



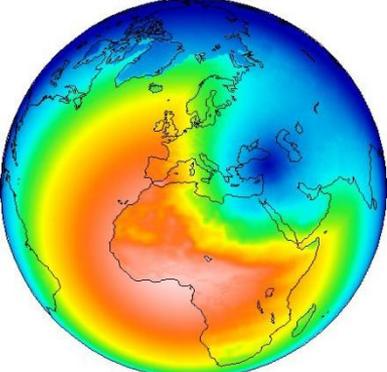
Rayonnement visible
le 11 août à 13h15



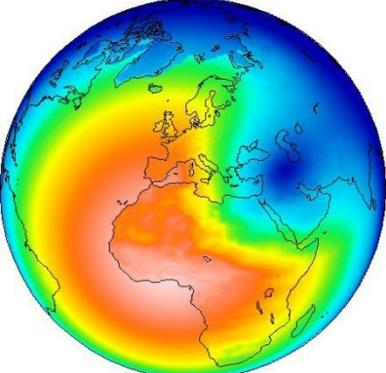
Rayonnement visible
le 11 août à 13h30



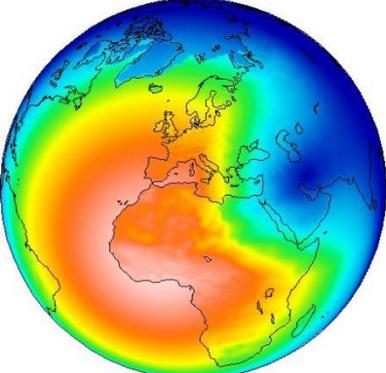
Rayonnement visible
le 11 août à 13h45



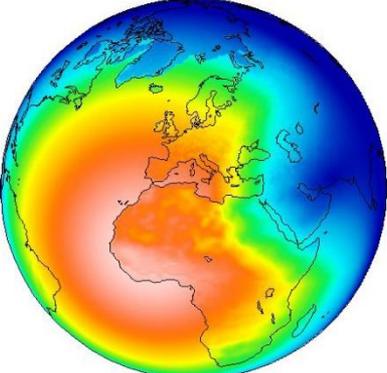
Rayonnement visible
le 11 août à 14h00



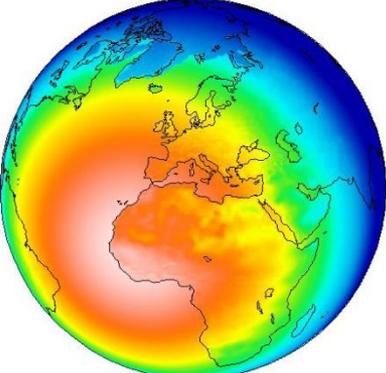
Rayonnement visible
le 11 août à 14h15



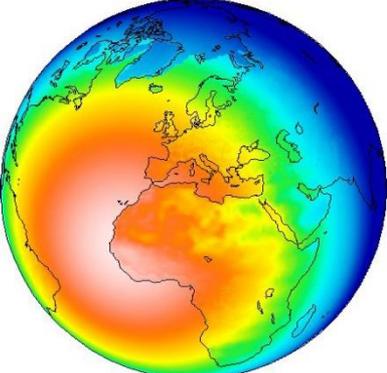
Rayonnement visible
le 11 août à 14h30



Rayonnement visible
le 11 août à 14h45



Rayonnement visible
le 11 août à 15h00

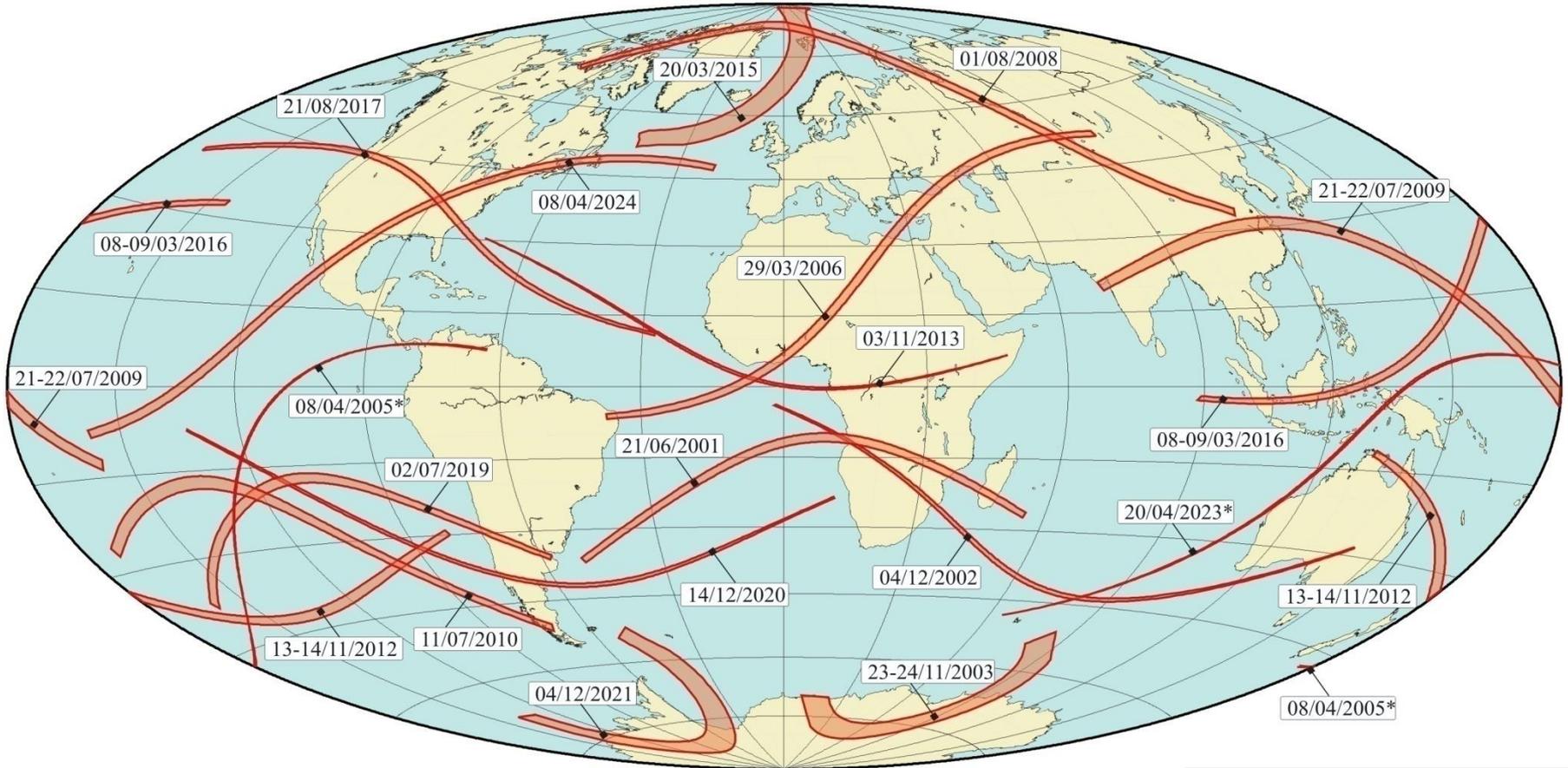


Phénomènes d'ambiance d'une éclipse totale

- Baisse de la luminosité.
- Chute de la température.
- Comportement anormal des animaux.
- Arrivée de l'ombre et obscurité.
- Apparition d'étoiles et de planètes.
- Apparition éventuelle d'une comète près du Soleil.

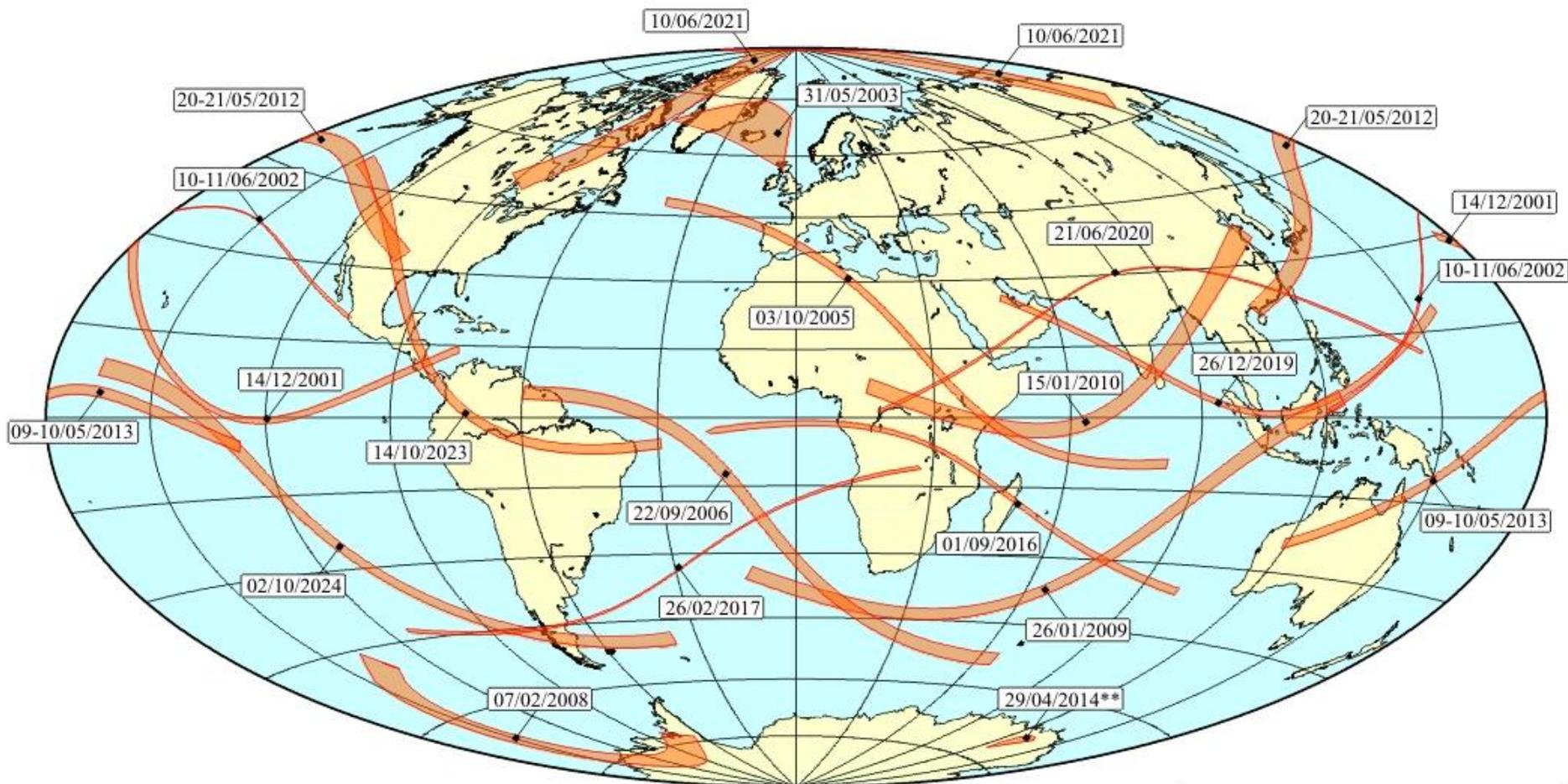
Les éclipses à venir

Éclipses totales et mixtes de 2000 à 2025



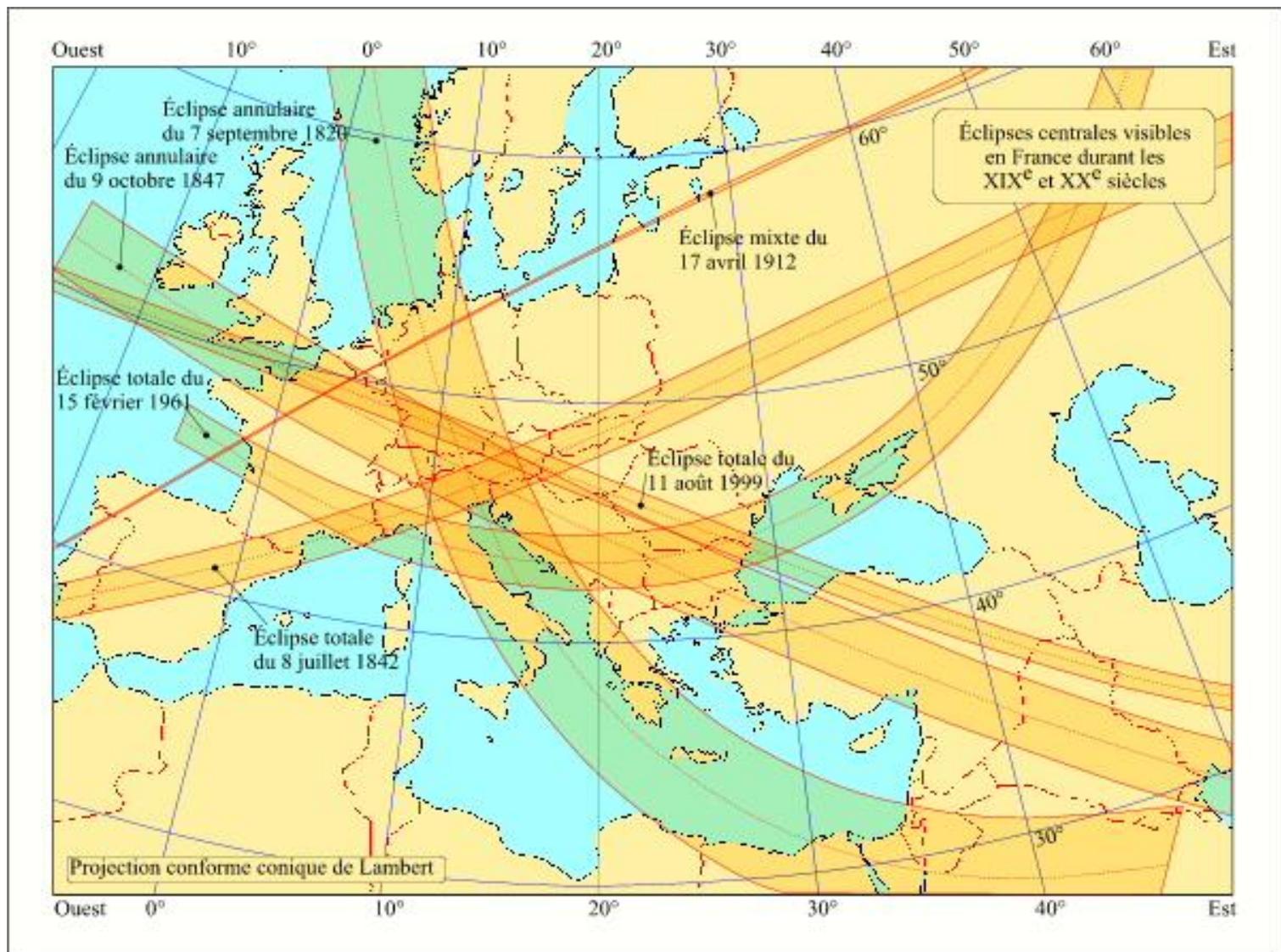
* éclipse mixte (annulaire-totale)

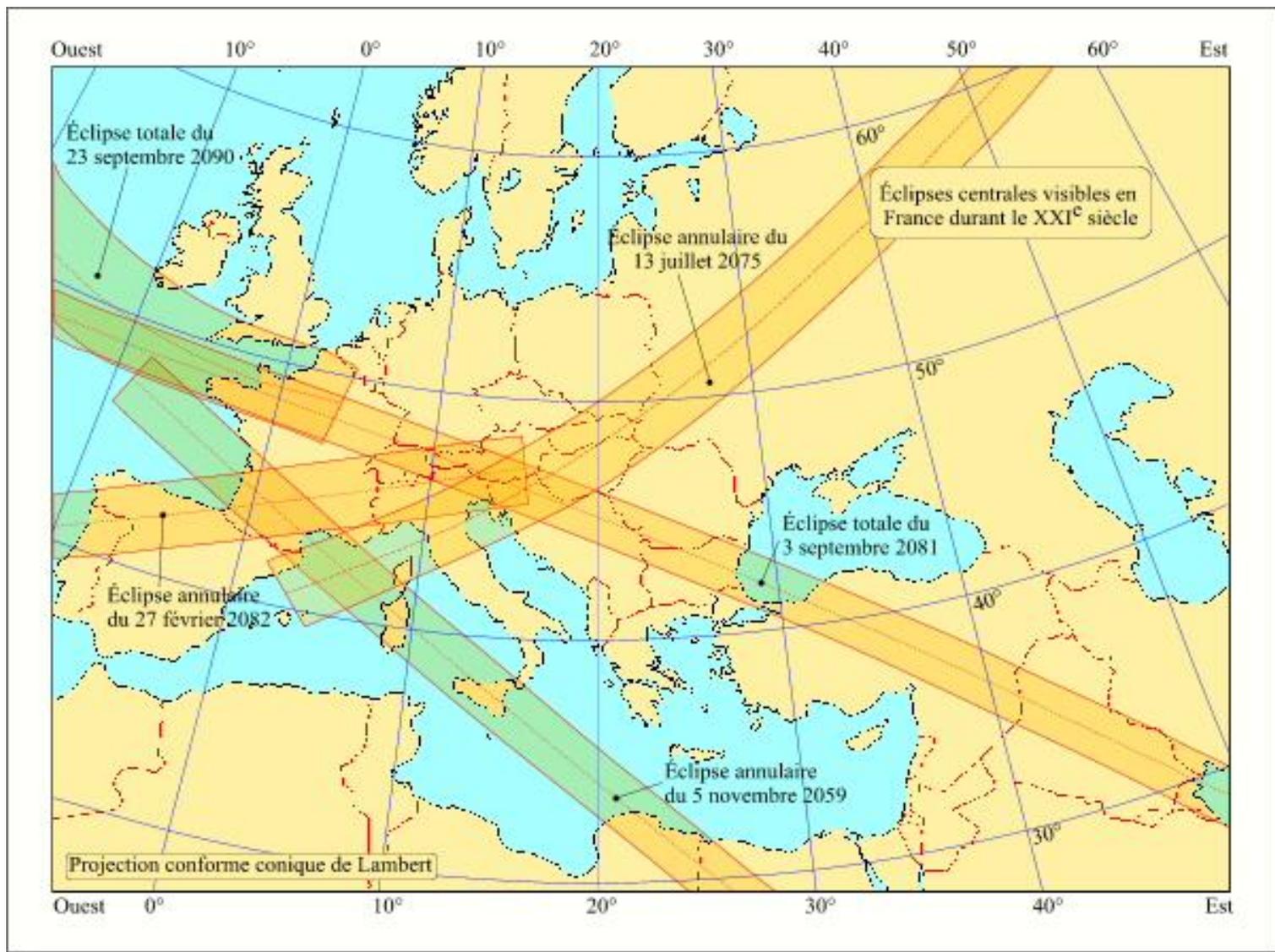
Éclipses annulaires de 2000 à 2025



** éclipse annulaire non centrale

Les éclipses passées et à venir visibles en France





Observer une éclipse de Soleil

Attention à vos yeux !

- Le cristallin des enfants est transparent aux UV
- la rétine est insensible à la douleur
- Utiliser des lunettes spéciales éclipses

Trouver un endroit avec de l'ombre !

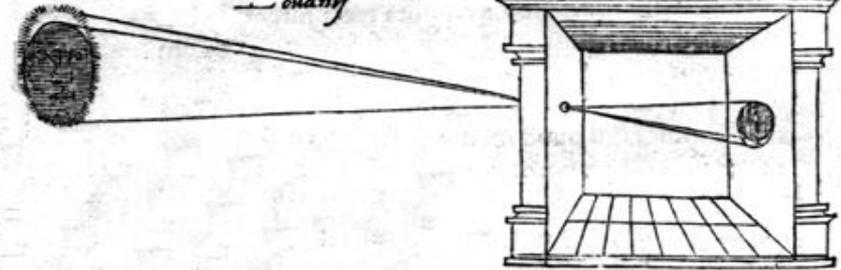
Sténopé



Projection dans une chambre noire (camera obscura)

illum in tabula per radios Solis, quam in cælo contingit: hoc est, si in cælo superior pars deliquiū patiatur, in radiis apparebit inferior deficere, vt ratio exigit optica.

*Solis deliquium Anno Christi
1544. Die 24. Januarij
Louanij*

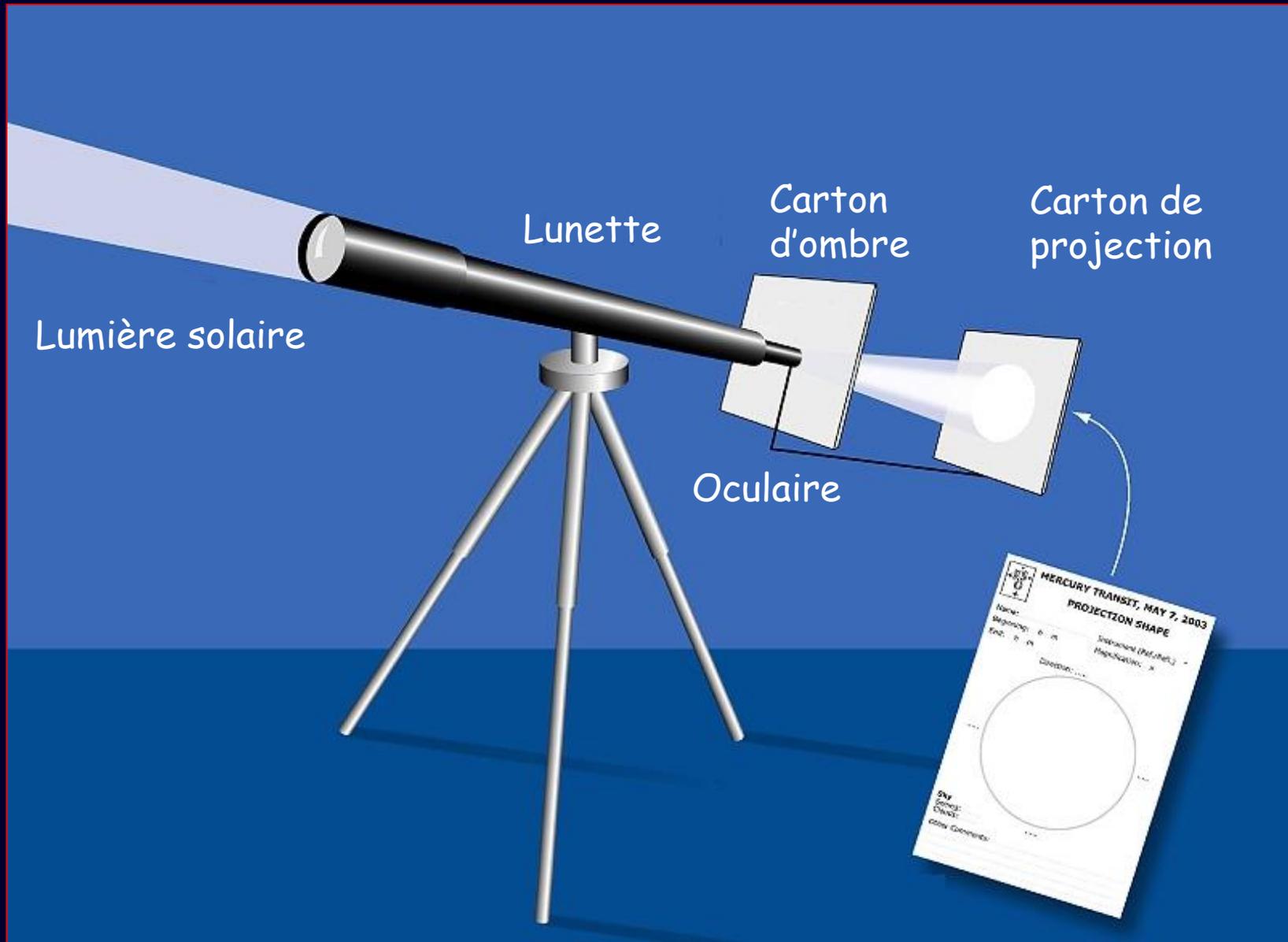


Sic nos exactè Anno .1544. Louanii eclipsim Solis obseruauimus, inuenimusq; deficere paulò plus q̄ dex-

- Obscurcir complètement une pièce exposée vers le Soleil
- Aménager un petit trou pour laisser passer un rayon du Soleil
- Projeter le rayon de Soleil sur un écran ou mur blanc

→ Vous obtenez une image du Soleil et observez l'éclipse sans risques

Observation par projection



Les éclipses de Lune



Eclipse totale de Lune

November 8-9,
2003

Ombre de la Terre

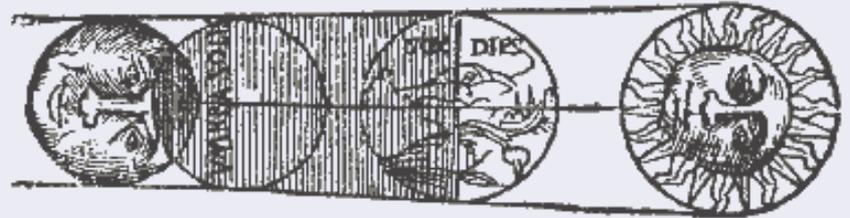
Pénombre de la Terre







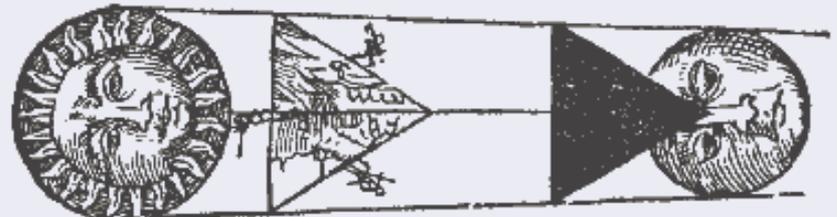
Ceste Figure demonstre que la Terre est ronde.



Si la Terre estoit quarrée, l'ombre d'icelle paroistroit de ceste mesme forme en l'Eclipse de la Lune.



Si la Terre estoit triangulaire, l'ombre d'icelle seroit aussi en l'Eclipse triangulaire.



Si la Terre auoit six anglez, son ombre en l'Eclipse de la Lune, seroit de la mesme forme.



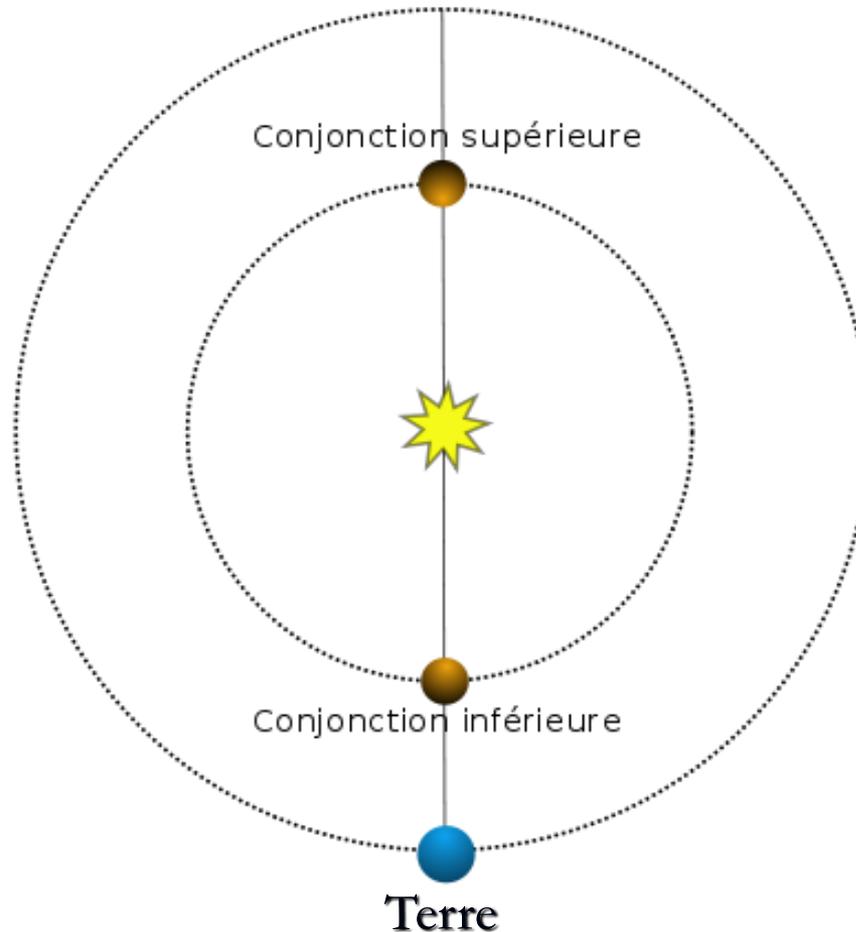
Utiliser le phénomène pour
comprendre comment est
fait notre univers:
le raisonnement d'Aristote

Cosmographie de

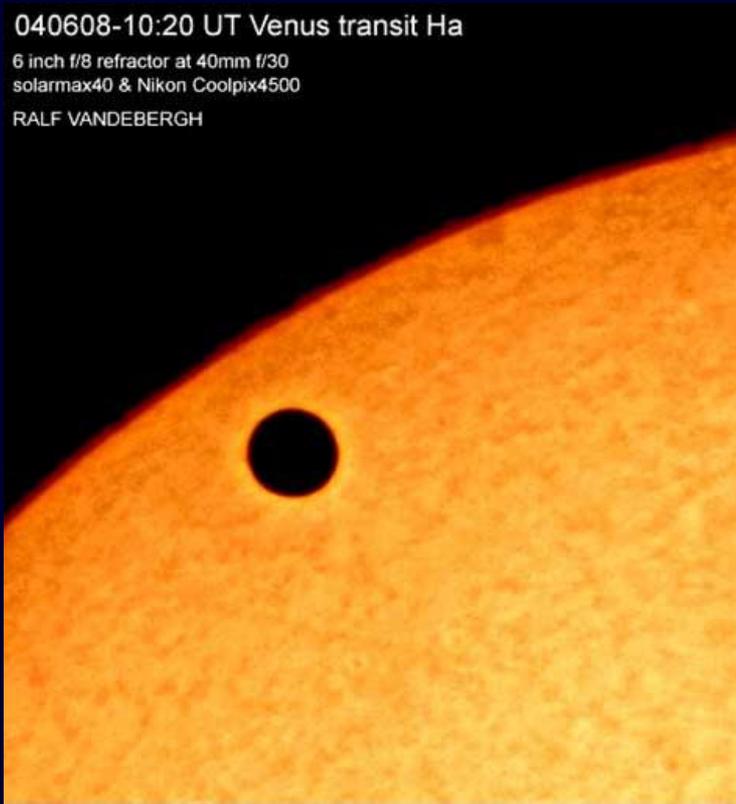
Petrus Apianus (1581).

Les autres phénomènes
d'éclipse ou d'occultation
dans le système solaire
(et au-delà...)

Outre les éclipses de Lune et de Soleil, il existe des phénomènes similaires d'alignement: les passages de Vénus et Mercure devant le Soleil



Passage de Vénus



2 passages par siècle: le dernier en 2012,
le prochain en 2117

Passage de Mercure



Passages plus nombreux: les derniers en
2003, 2006, le prochain le 9 mai 2016,
visible en Europe, puis 2019

Le dernier passage de Mercure: le 9 mai 2016

Passage de Mercure du 11 nov. 2019

Maximum du passage: 15:19:48,1 TU J.J.: 2458799,138752
 ΔT : 69,00s

Instants de contact géocentriques

I: 12:35:28 UTC (109,8°)

II: 12:37:09 UTC (109,8°)

M: 15:19:48 UTC (24,3°)

III: 18:02:33 UTC (298,8°)

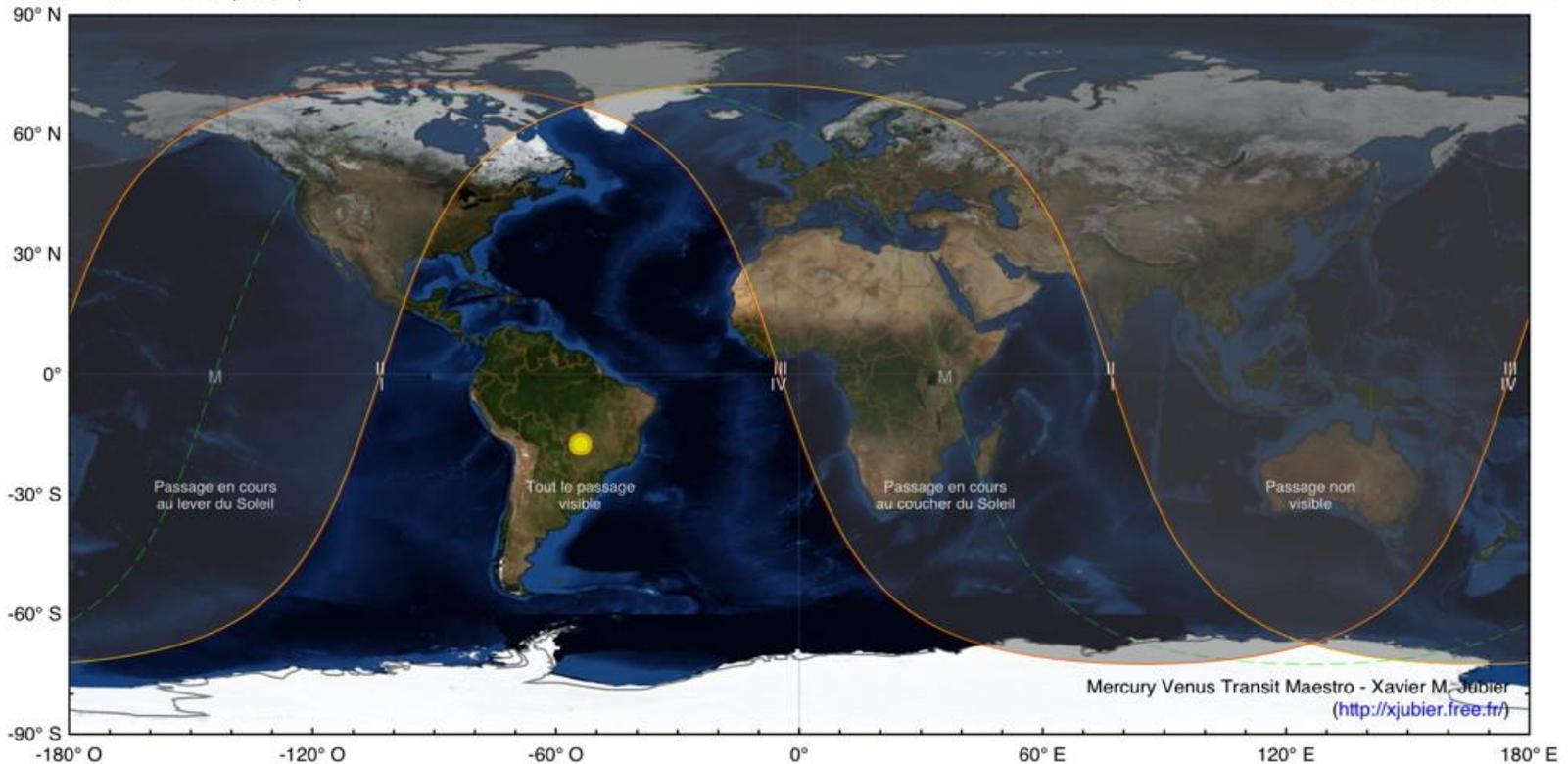
IV: 18:04:14 UTC (298,7°)

Données géocentriques

Séparation minimale: 75,9"

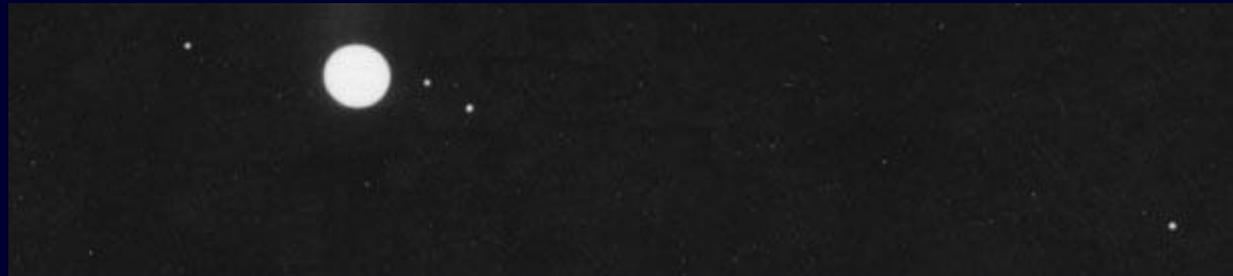
Durée générale: 05h28m46s

Durée centrale: 05h25m24s



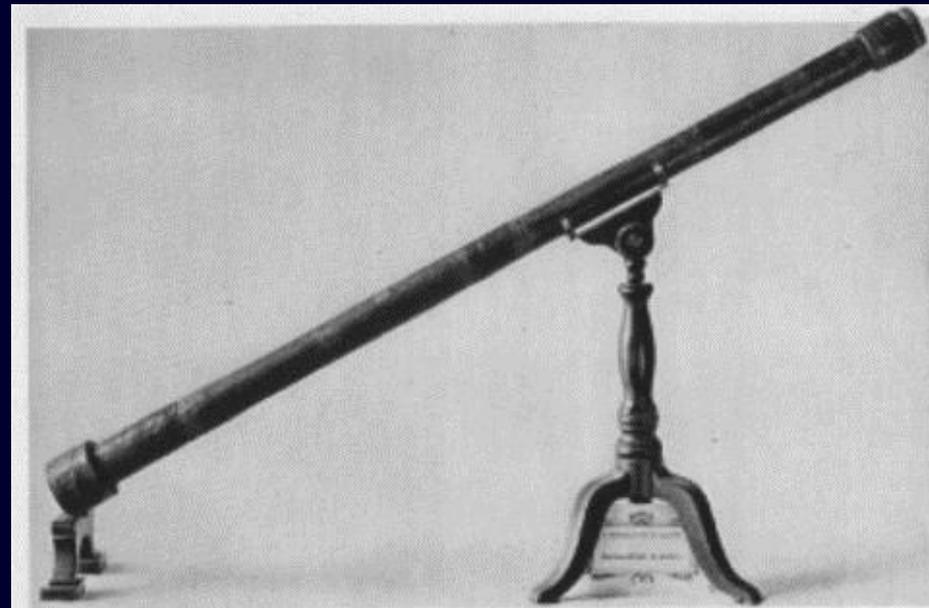


Autres phénomènes similaires: les éclipses des satellites de Jupiter

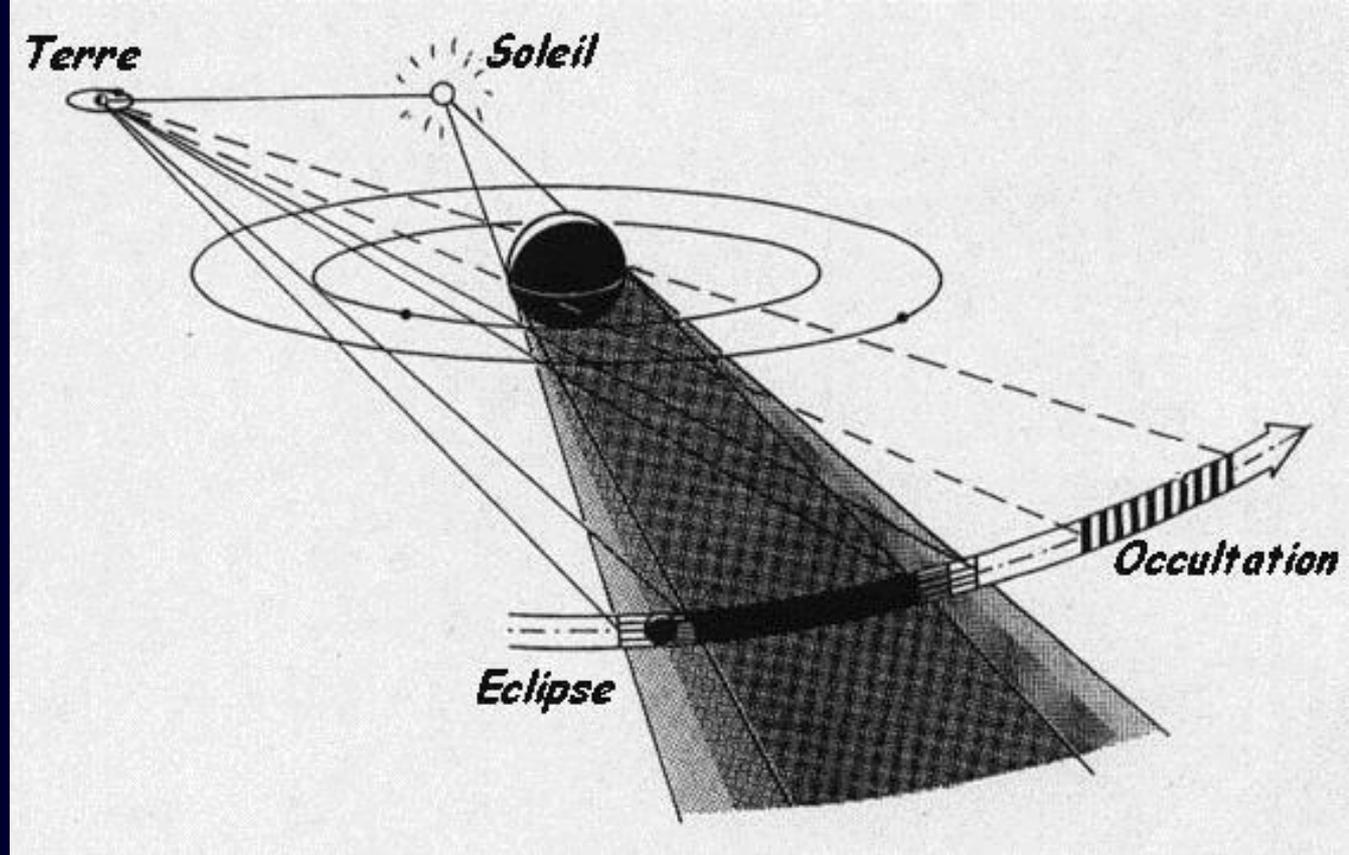


Galilée regarde Jupiter dans sa lunette et aperçoit quatre satellites tournant rapidement autour de leur planète.

C'est la surprise: ils sont éclipsés régulièrement dans l'ombre de Jupiter!



Les satellites de Jupiter, en tournant autour de leur planète, pénètrent régulièrement dans son ombre: l'observation de ces éclipses va passionner les astronomes pendant plusieurs siècles.

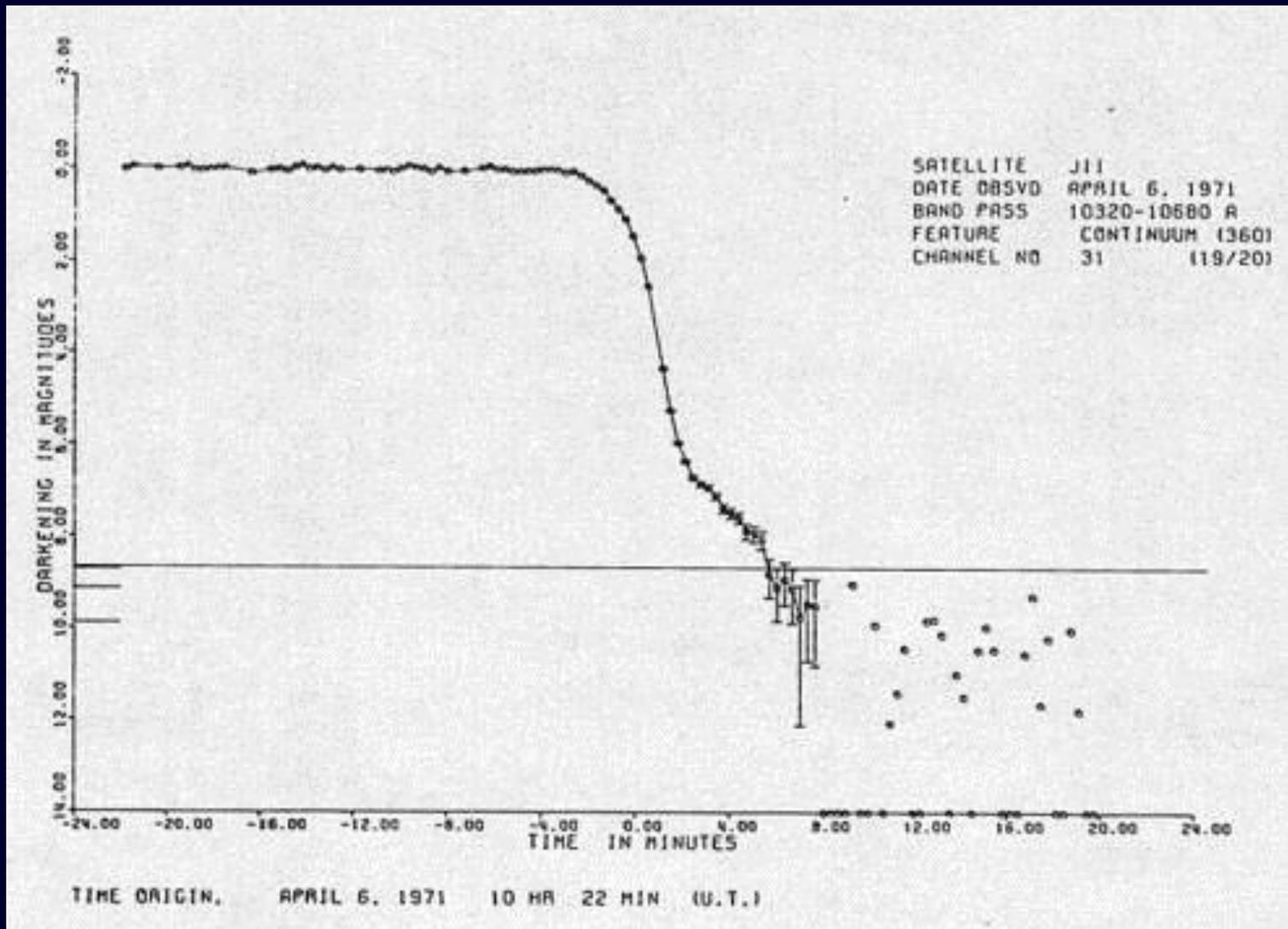


- vitesse de la lumière
- horloge régulière et détermination des longitudes
- perturbations gravitationnelles



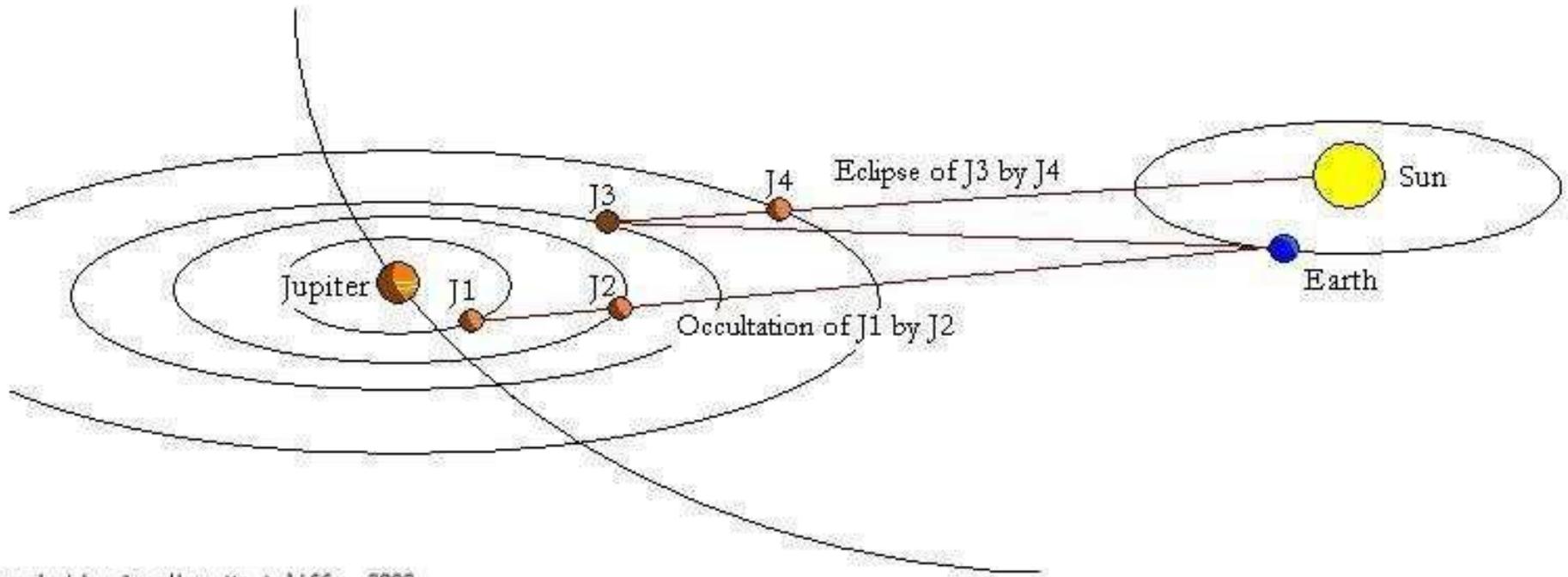






La variation de flux reçu du satellite éclipsé dans l'ombre de Jupiter

Phénomènes mutuels: pas d'atmosphère autour des satellites

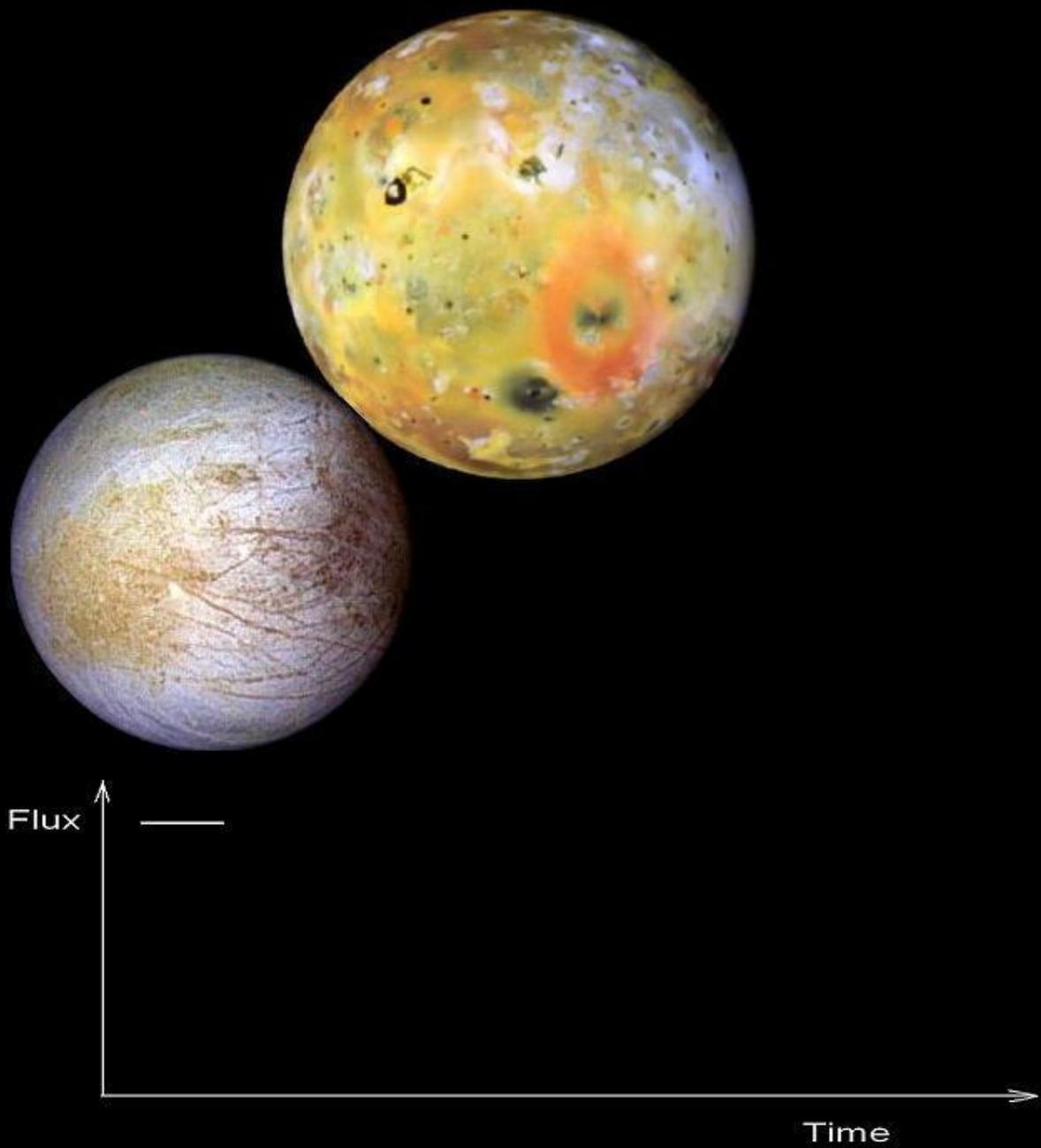


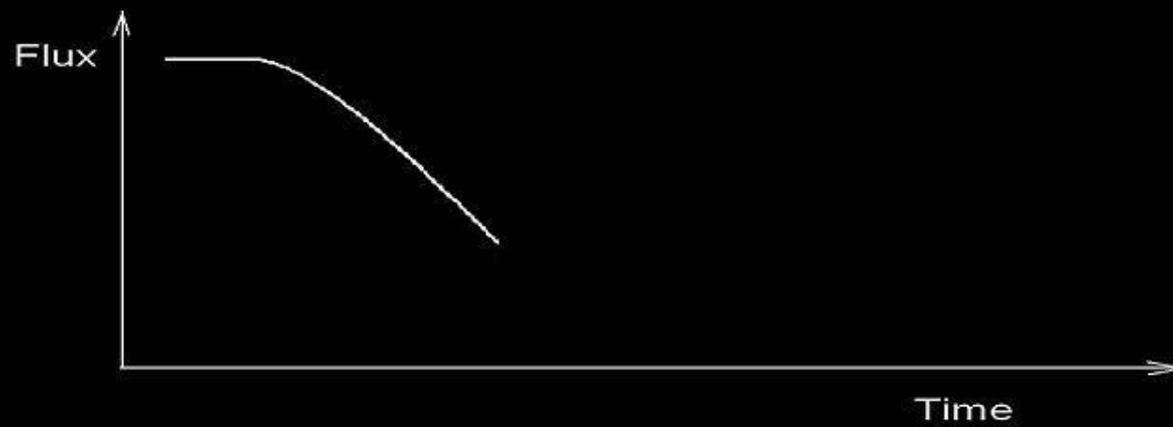
Created by Jonathan Mc Auliffe, 2003.

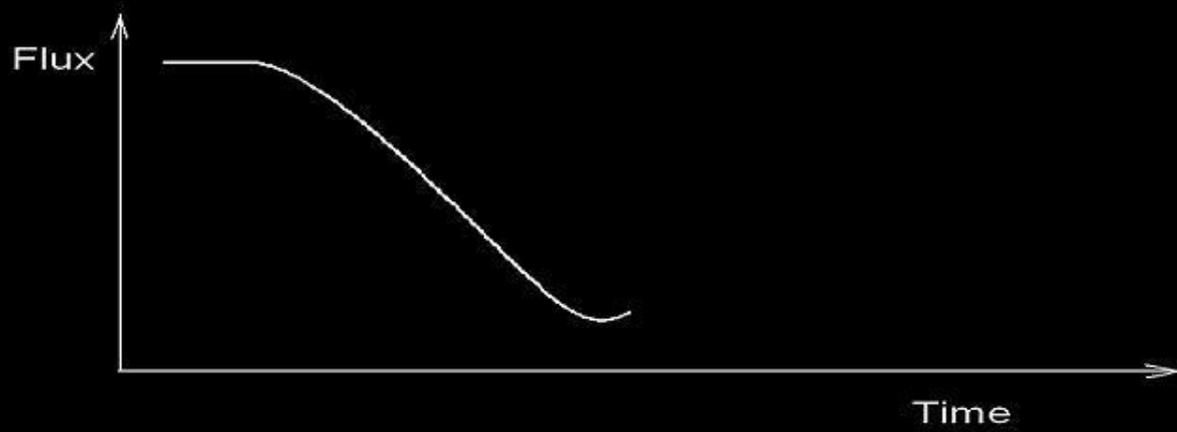
Des observations faciles

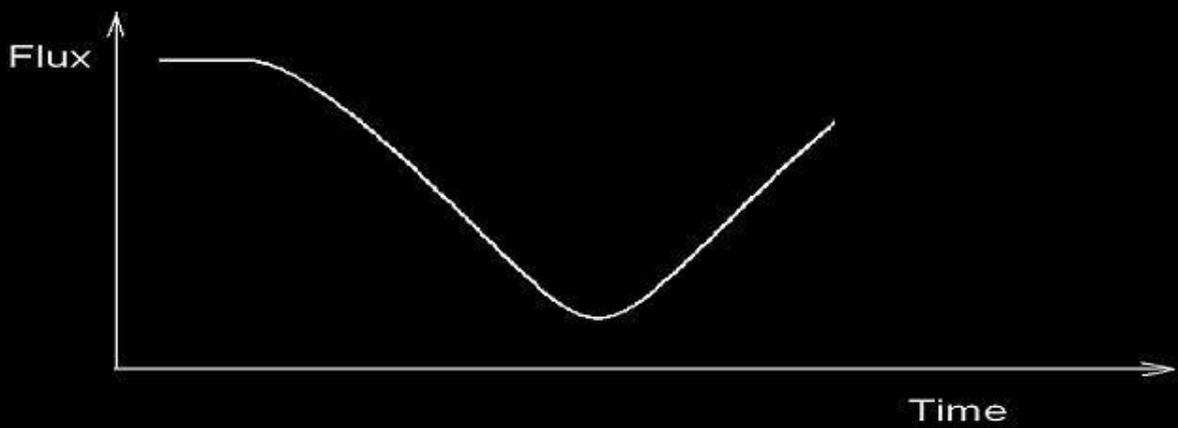
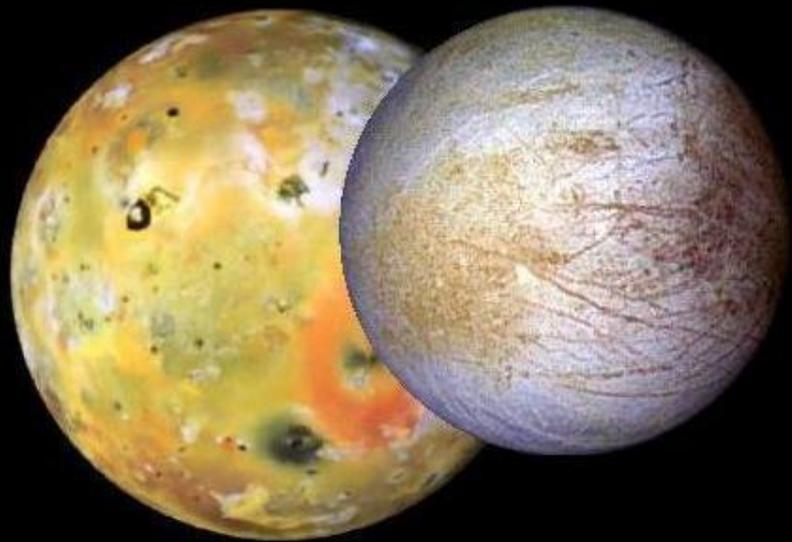
On enregistre le film du phénomène (en UTC à 0.1 seconde de temps près) pour pouvoir ensuite construire une « courbe de lumière » photométrique.

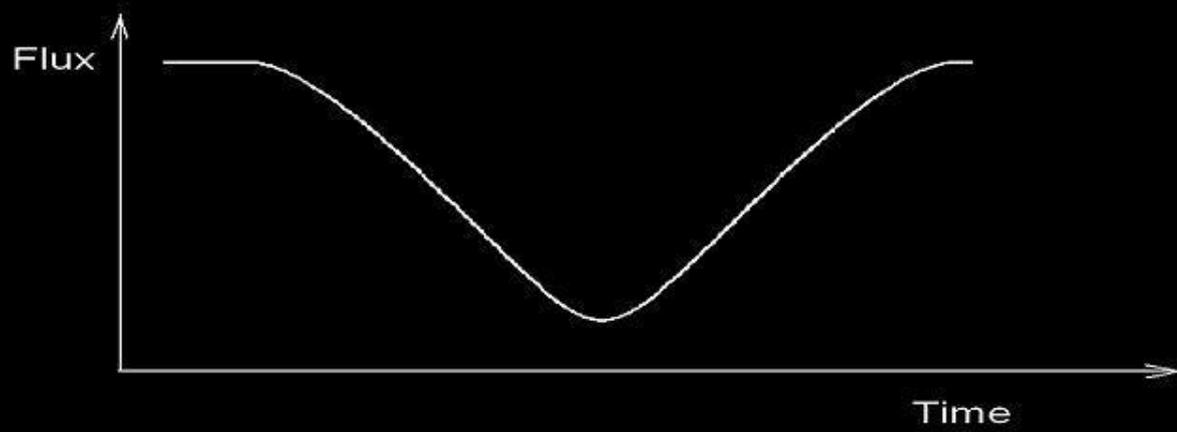


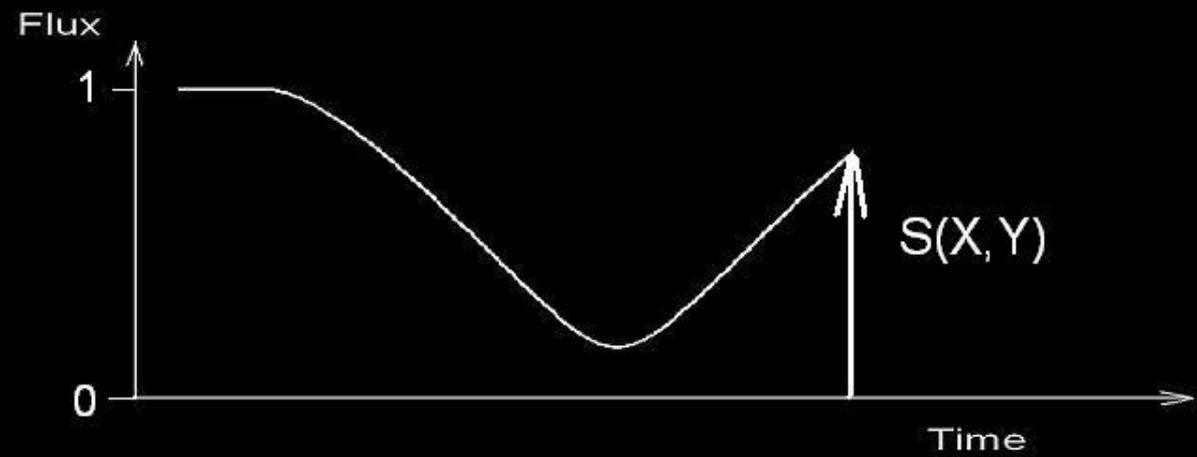
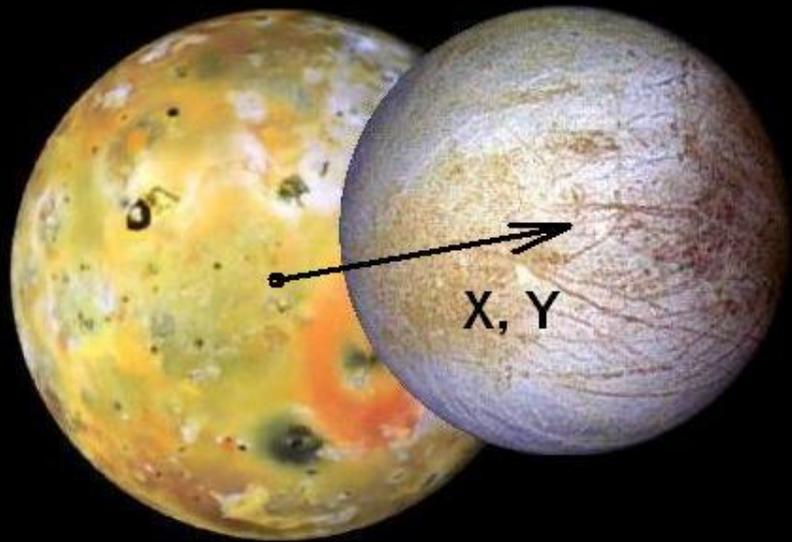












Une occultation mutuelle en haute résolution

24 Mutual Satellite Occultation

Europa occulted by Io.

1973 June 28d.

100cm (39-in)

Cass. X400

Seeing

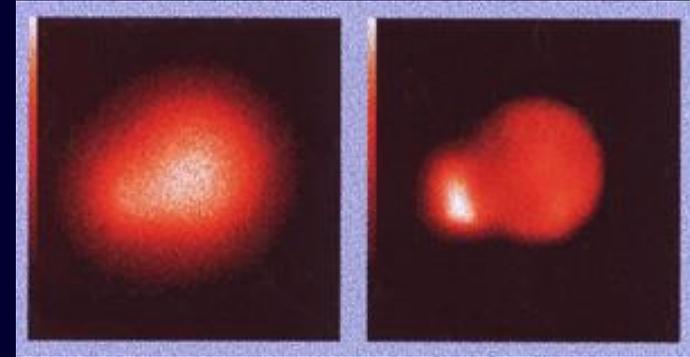
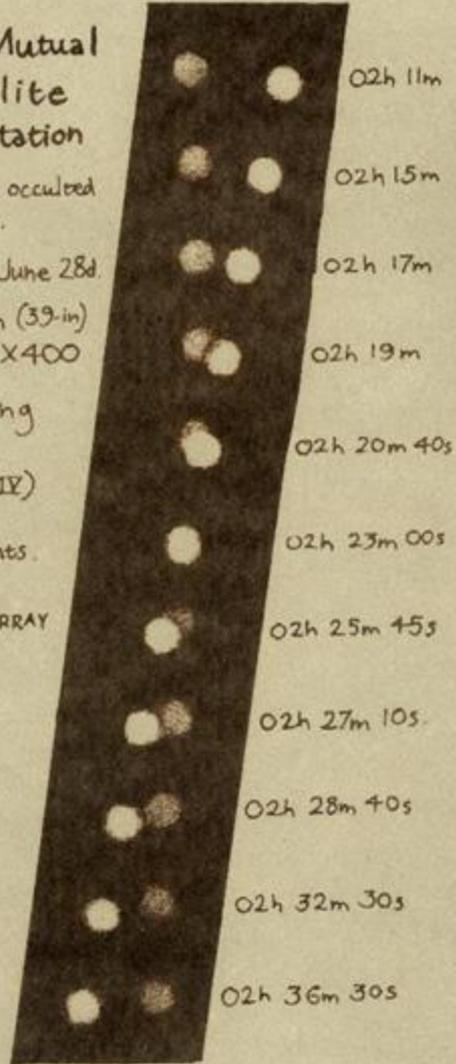
Poor.

(Ant. IX)

Fair

moments.

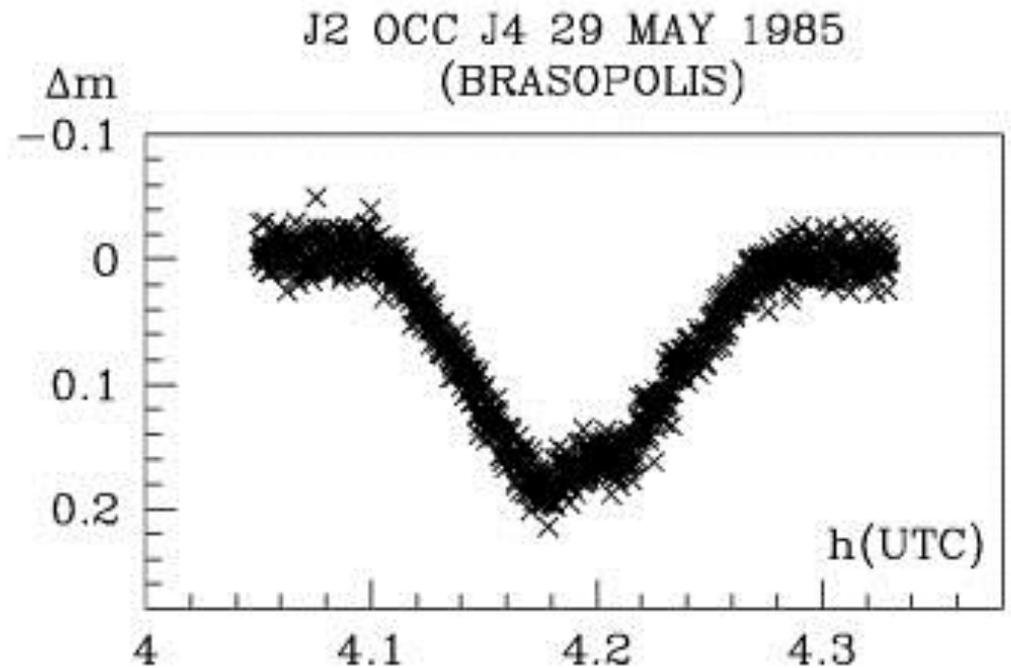
J.B. MURRAY



Observation avec
optique adaptative
(ONERA / ESO 1997)

← Une observation visuelle (1973)

Une observation photométrique fournissant une position très précise



Time : 05 :21.49ut

*Jupiters Moons Ganymede, Europa
Occulting and Eclipsing*



August 19th, 2009

05 :21- 06 :23ut



◀Ganymede



◀Europa

16:38UT

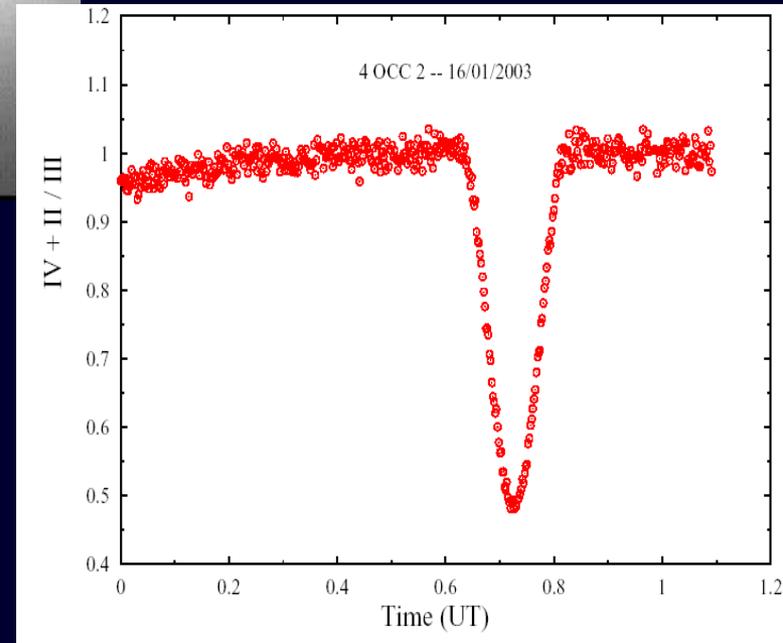


Io Shadow Transit on Ganymede
August 16, 2009
© Christopher Go (Cebu, Philippines)

L'observation des phénomènes mutuels

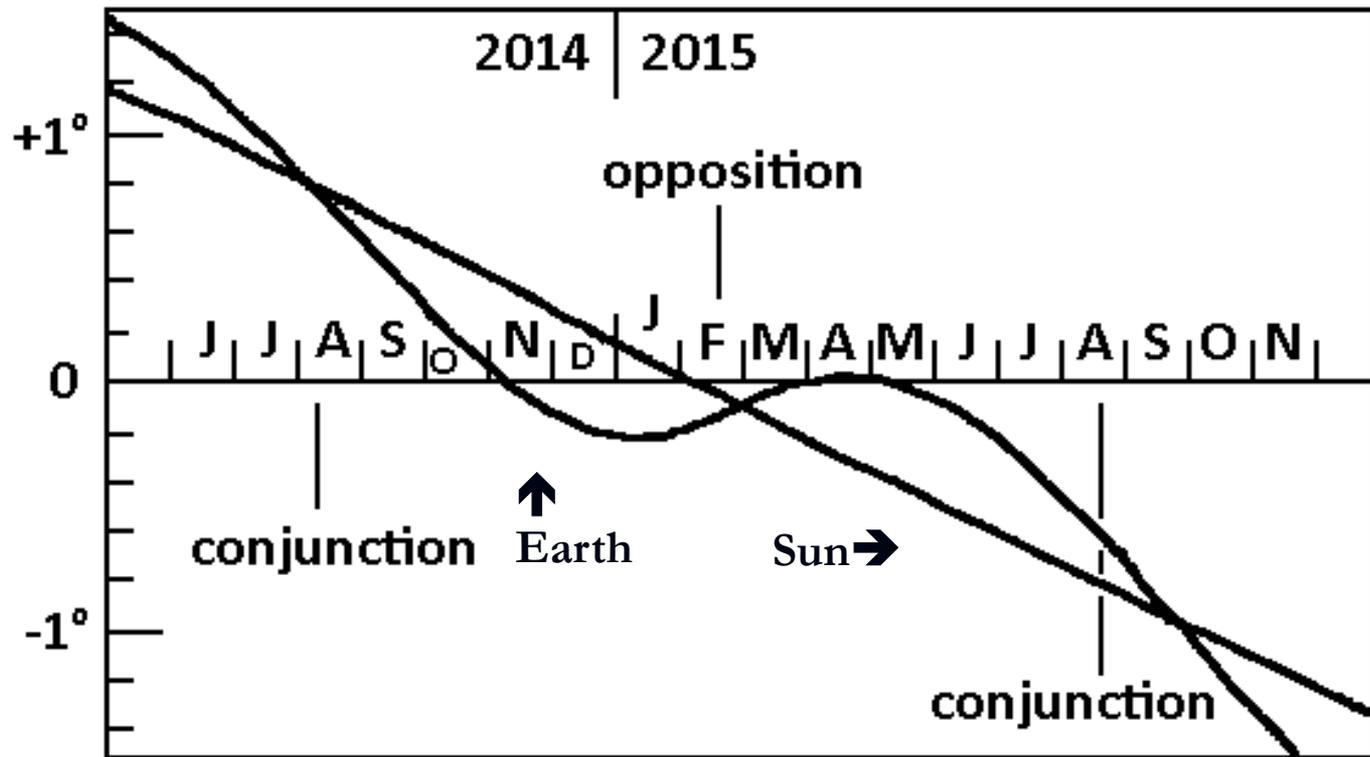
Les satellites galiléens

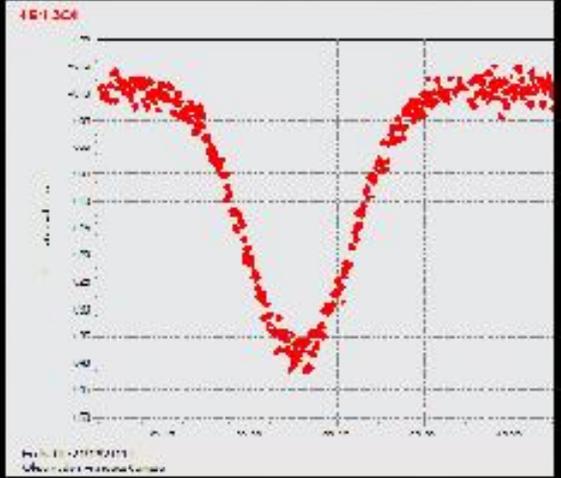
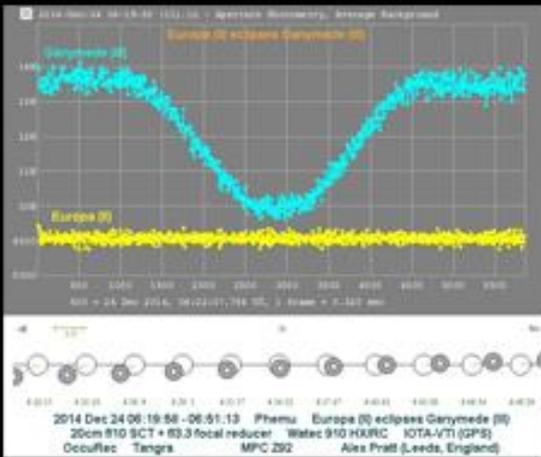
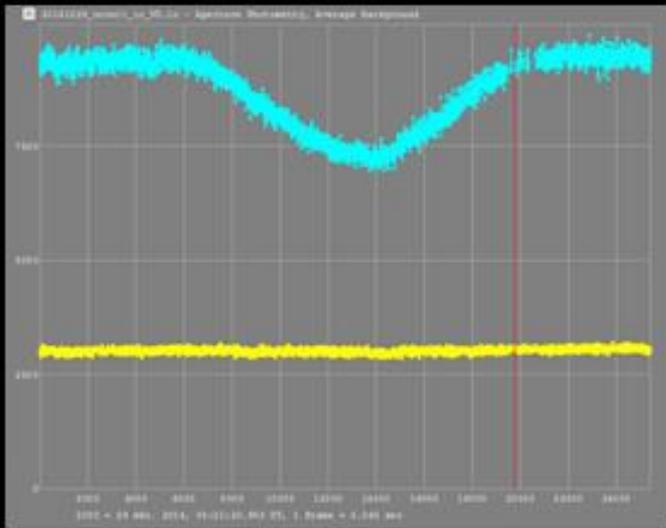
Europa (foreground) occults Ganymede
Anthony Wesley, Murrumbateman Australia
8th May 2008 18:02:56 - 18:12:08 UTC



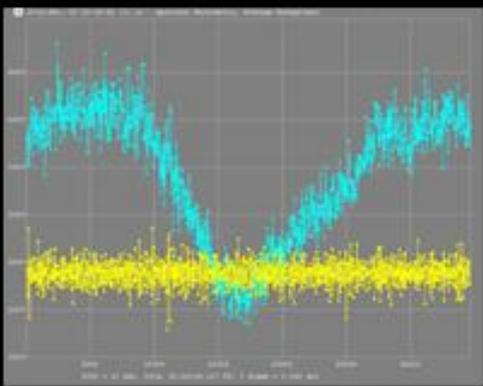
Un timing photométrique:
0,1 sec = 1 km
Une mesure astrométrique:
0.1 arcsec = 300 km

La campagne de 2015: équinoxe sur Jupiter

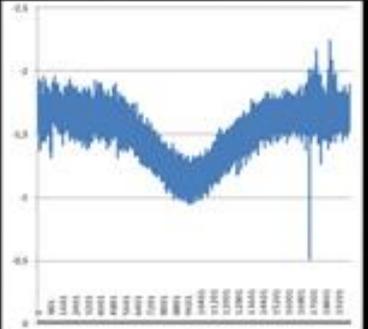
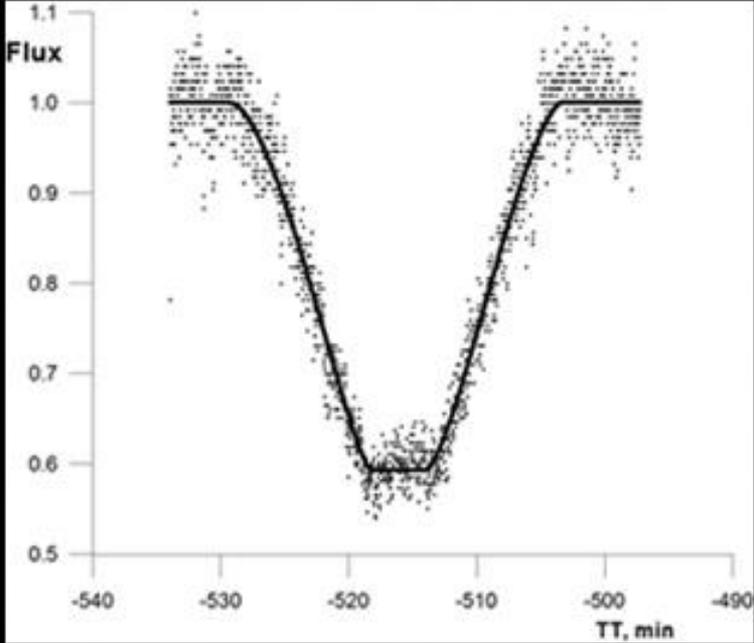




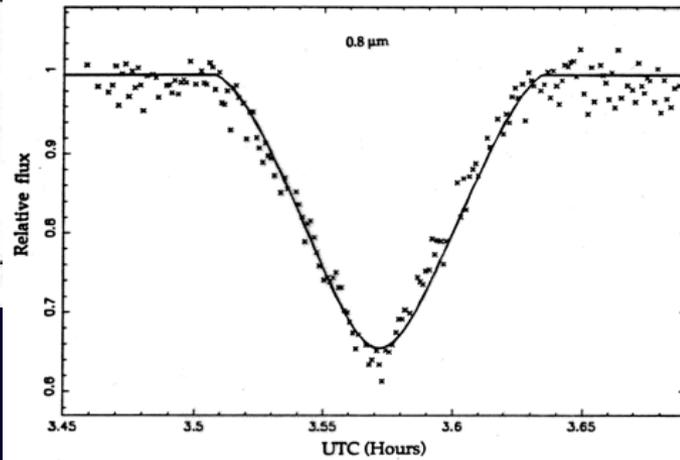
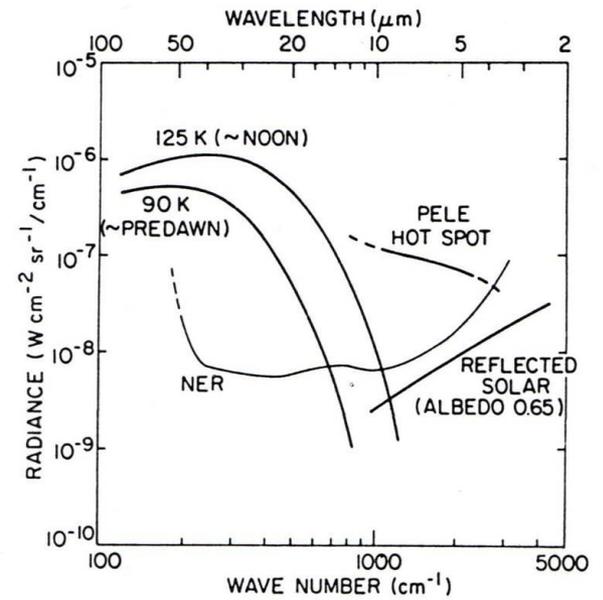
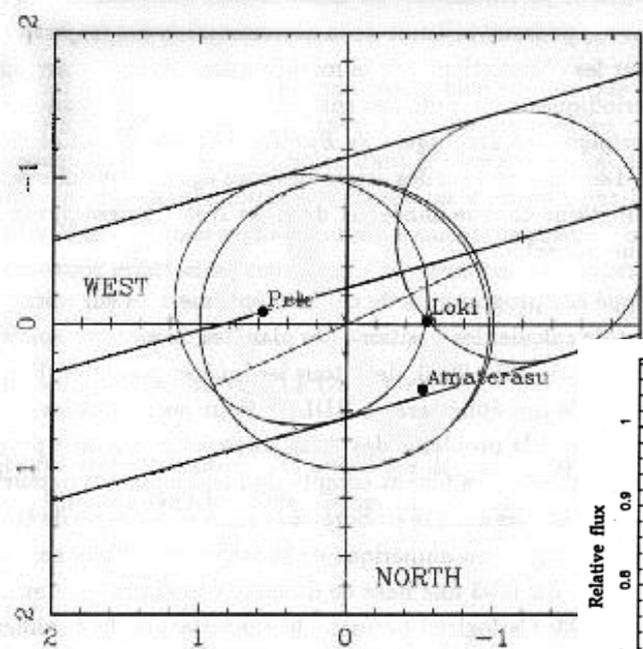
II



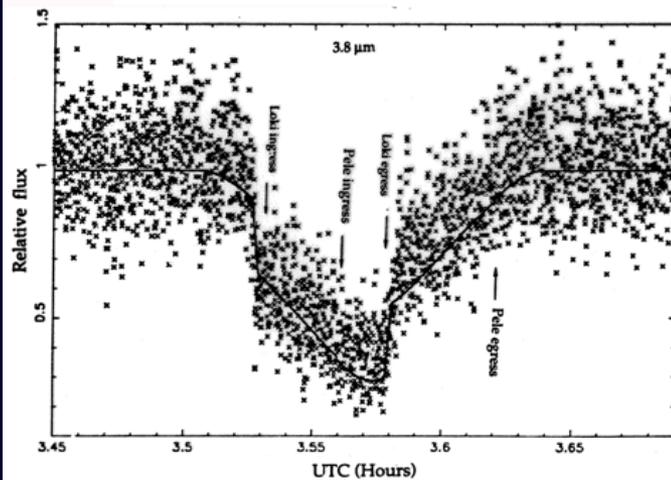
I



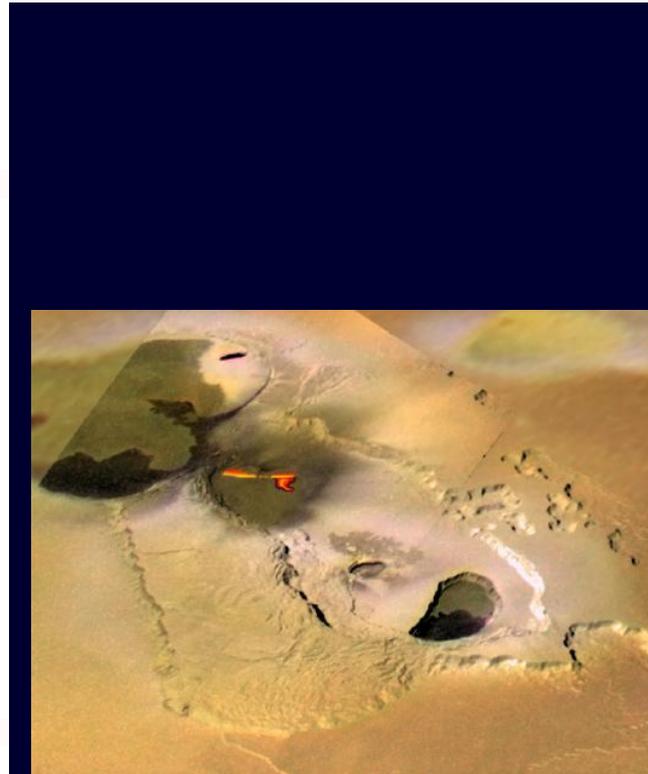
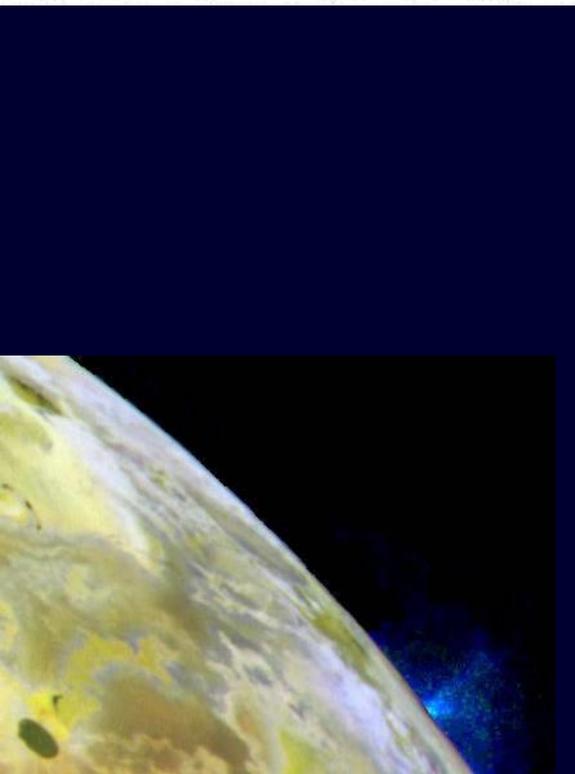
III
IV



Lightcurve observed at 0.8 μm and the model (line) during the occultation of Io by Europa on February 20, 1991, at the 1-m telescope of the Pic du Midi Observatory (Colas *et al.*, in preparation).



Lightcurve observed at 3.8 μm and the model (line) during the occultation of Io by Europa on February 20, 1991, at the 1-m telescope of the ESO.

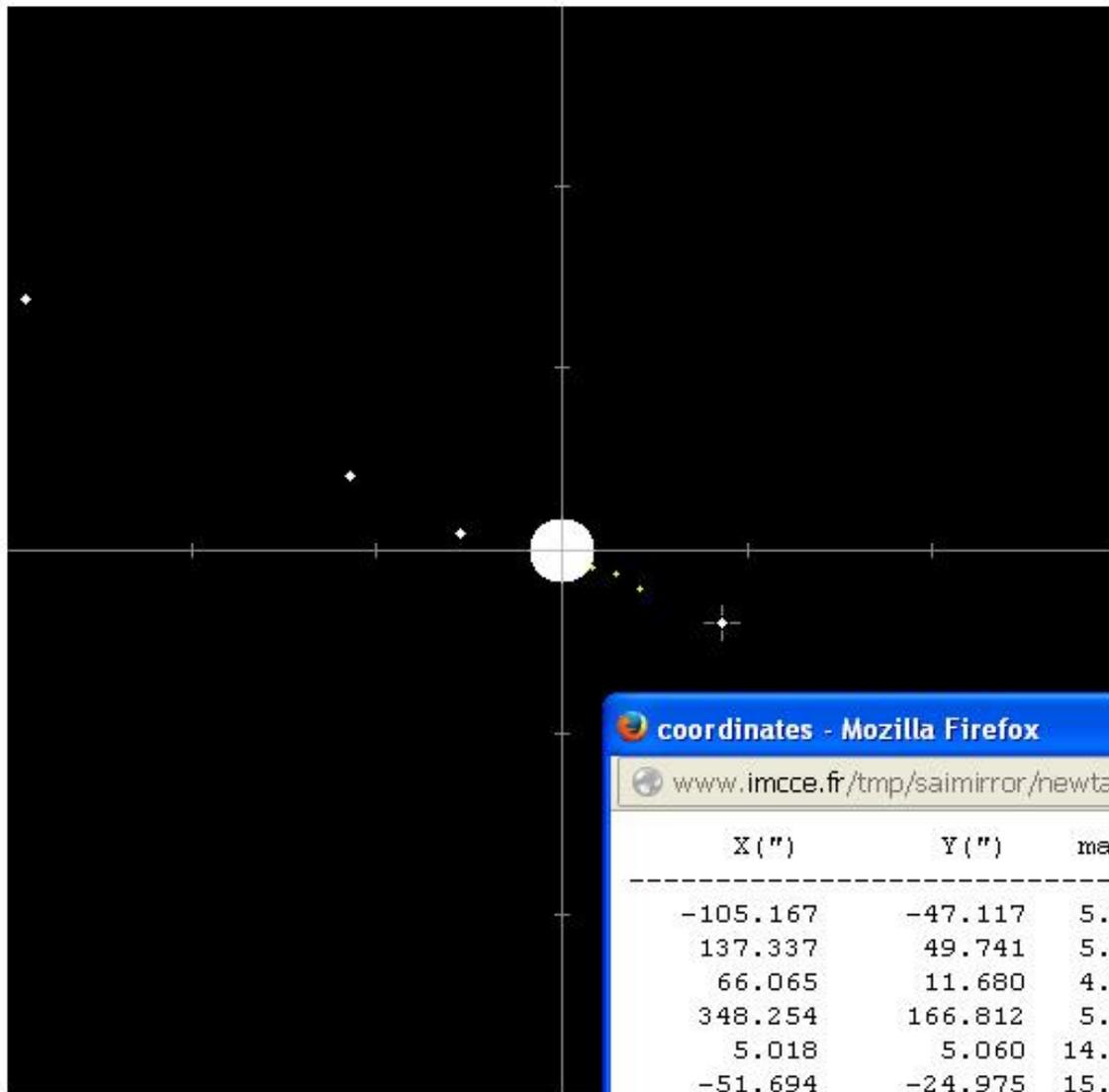


Organisation internationale pour l'observation des phénomènes: Le réseau des sites d'observation





Serveur d'éphémérides: nsdb.imcce.fr/multisat



IMCCE/SAL. Natural Satellites
Ephemeride Server. MULTI-SAT.

Satellites of Jupiter

Reference body:

Jupiter

Marked satellite:

J1 Io

Epoch of equator and equinox J2000

Differential coordinates

With field scale

One time step of days

Back

Present field : 12' x 12'
Time moment: 2000 1 1 0 0 0.00 (UTC)
Observatory: Geocenter

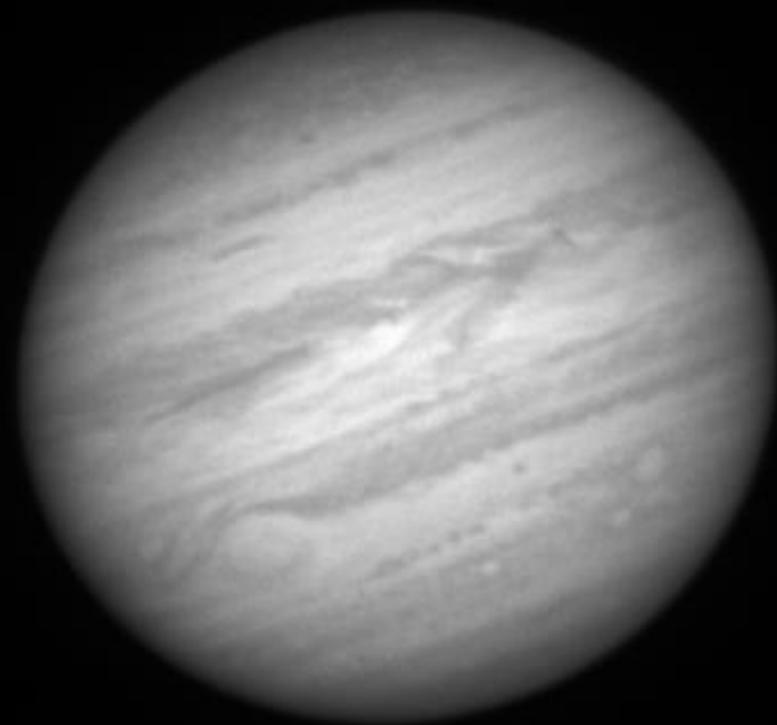
coordinates - Mozilla Firefox

www.imcce.fr/tmp/saimirror/newtab.htm

X (")	Y (")	mag	Satellite
-105.167	-47.117	5.1	J1 Io
137.337	49.741	5.4	J2 Europe
66.065	11.680	4.7	J3 Ganymede
348.254	166.812	5.8	J4 Callisto
5.018	5.060	14.2	J5 Amalthea
-51.694	-24.975	15.8	J14 Thebe
-35.777	-15.022	19.2	J15 Adrastea
-20.667	-10.400	17.6	J16 Metis

N
E + W
S

[minutes](#)



Occultation of Europa by Ganymede

Anthony Wesley

2015-02-16 1313UTC - 1321UTC

Rubyvale QLD Australia

Bilan des campagnes d'observation

	Nombre d'observations	Nombre de sites d'observation	Nombre de phénomènes observés	Nombre de phénomènes observables
Jupiter				
1973	91	26	65	176
1979	18	7	9	60
1985	166	28	64	248
1991	374	56	111	221
1997	275	42	148	390
2003	361	42	116	360
2009	523	68	206	237
2015	658	89	202	255
Saturne				
1980	14	6	13	213
1995	66	16	43	182
2009	26	15	17	131
Uranus				
2007	52	19	36	193

■ L'évolution des observateurs

- changement d'observateurs (plus d'amateurs)
- changement d'instruments (plus petits télescopes et récepteurs CCD)
- changement dans le réseau d'observation (plus de pays représentés)

Campagnes Jupiter	Taille des télescopes		Photométrie	
	< 60cm (amateurs)	> ou = 60cm (professionnels)	1 D	2 D
1973	4	20	24	0
1979	3	7	10	0
1985	12	12	21	3
1991	37	19	39	17
1997	35	10	15	30
2003	34	15	8	41
2009	52	10	0	62
2015	79	10	0	89
Saturne 1995	5	11	8	8
Uranus 2007	4	11	0	15

The PHEMU03 catalogue of observations of the mutual phenomena of the Galilean satellites of Jupiter

J.-E. Arlot¹, W. Thuillot¹, C. Ruatti¹, A. Ahmad², A. Amossé⁴⁷, P. Anbazhagan⁵⁰, M. Andreyev⁵, A. Antov¹², M. Appakutty⁵⁰, D. Asher², S. Aubry¹, N. Baron¹, N. Bassiere¹, M. Berthe³, R. Bogdanovski¹², F. Bosq²⁵, E. Bredner⁶, D. Buettner⁷, M. Buiromsky⁴⁰, S. Cammarata²⁷, R. Casas⁸, G. D. Chis⁹, A.A. Christou², J.-P. Coquerel⁴⁴, R. Corlan¹⁰, C. Cremaschini¹¹, D. Crussaire²⁶, J. Cuypers³², M. Dennefeld⁴⁶, P. Descamps¹, A. Devyatkin²², D. Dimitrov¹², T.N. Dorokhova¹³, N.I. Dorokhov¹³, G. Dourneau²⁵, M. Dueñas^{14,51}, A. Dumitrescu¹⁰, N. Emelianov⁴³, D. Ferrara²⁷, D. Fiel¹⁵, A. Fienga¹, T. Flatres³⁹, S. Foglia¹¹, J. Garlitz¹⁶, J. Gerbos¹⁷, R. Gilbert¹, R.M.D. Goncalves¹⁸, D. González^{14,51}, S. Yu. Gorda¹⁹, D.L. Gorshanov²², M. W. Hansen⁴¹, M. Harrington², T.R. Irsmbambetova²⁰, Y. Ito²¹, V. Ivanova¹², I.S. Izmailov²², M. Yu. Khovritchev²², E.V. Khrutskaia²², J. Kieken²⁵, T. P. Kisseleva²², K. Kuppusswamy⁵⁰, V. Lainey¹, M. Lavayssié²³, P. Lazzarotti²⁴, J.-F. Le Campion²⁵, E. Lellouch²⁶, Z.L. Li⁴², E. Lo Savio²⁷, M. Lou^{14,51}, E. Magny⁴⁴, J. Manek²⁸, W. Marziano¹¹, G. Marino²⁷, J.P. McAuliffe², M. Michelli¹¹, D. Moldovan⁹, S. Montagnac⁴⁴, V. Moorthy⁵⁰, O. Nickel²⁹, J.M. Nier⁴⁴, T. Noel³⁰, B. Noyelles^{1,3}, A. Oksanen³¹, D. Parrat⁴⁴, T. Pauwels³², Q.Y. Peng³³, G. Pizzetti¹¹, V. Priban³⁸, B. Ramachandran², N. Rambaux^{1,25}, A. Rapaport²⁵, P. Rapavy¹⁷, G. Rau⁴⁴, J.-J. Sacré³⁹, P.V. Sada³⁴, F. Salvaggio³, P. Sarlin⁴⁴, C. Sciuto²⁷, G. Selvakumar⁵⁰, A. Sergeev⁵, M. Sidorov²², S. Sorescu¹⁰, S.A. Spampinato¹¹, I. Stellmacher¹, E. Trunkovsky⁴³, V. Tejfel³⁵, V. Tudose¹⁰, V. Turcu⁹, I. Ugarte², P. Vantyghe⁴⁵, R. Vasundhara⁴, J. Vaubailon¹, C. Veliu⁵⁰, A.K. Venkataramana⁵⁰, J. Vidal-Sáinz^{14,51}, A. Vienne^{1,3}, J. Vilar³⁶, P. Vingerhoets⁴⁹, W. Vollman³⁷

(Affiliations can be found after the references)

Received

ABSTRACT

Context. In 2003 the Sun and the Earth passed through the equatorial plane of Jupiter and therefore through the orbital planes of its main satellites.

Aims. During this period, phenomena of mutual eclipses and occultations occurred and have been observed and we now present the catalogue of the data gathered.

Methods. Light curves of mutual eclipses and occultations were recorded by the observers of the international campaign PHEMU03 organized by the Institut de mécanique céleste, Paris, France.

Results. We made 361 observations of 116 mutual events from 42 sites. The corresponding data are given in this paper. For each observation, information is given about the telescope, the receptor, the site and the observational conditions.

Conclusions. This paper gathers together all these data and gives a first estimate of the precision. The catalogue of these rare events published in this paper intends to be an improved basis of accurate astrometric data useful for the development of dynamical models.

Key words. Jupiter – Galilean satellites – Mutual events – Eclipses – Occultations – Astrometry

1. Introduction

Observations of mutual events of the natural satellites are performed intensively since 1973 and they had been proved to be a very accurate way to get astrometric measurements of the natural satellites. As we did in the past, we encouraged the observers to make as many observations as possible and we organized and coordinated an international campaign in order to catch these events. This campaign named PHEMU03-1

to the observers of our international network made of 42 sites.

We provide in this paper all the data collected by our network: note that 19 more observations were made (at Meudon, Pulkovo, Armagh, Nauchny, Novara, Sendai, Terskol, Sobota

¹ tables 4 and figures are available in electronic form at the CDS via anonymous ftp to cdsarc.u-strasbg.fr (130.79.128.5) or via

The PHEMU09 catalogue and astrometric results of the observations of the mutual occultations and eclipses of the Galilean satellites of Jupiter made in 2009.

J.-E. Arlot¹, N. Emelianov^{2,1}, M. I. Varfolomeev², A. Amossé³, C. Arena⁴, M. Assafin⁴⁰, L. Barbieri⁵, S. Bolzoni⁶, F. Bragas-Ribas⁵⁴, J.I.B. Camargo⁵⁴, F. Casarramona⁸, R. Casas³⁷, A. Christou⁹, F. Colas¹, A. Collard³, S. Combe¹⁰, M. Constantinescu¹¹, G. Dangl¹², P. De Cat³⁴, S. Degenhardt¹³, M. Delcroix¹⁴, A. Dias-Oliveira⁵⁴, G. Dourneau^{15,57}, A. Douvris¹⁶, C. Druon³, C.K. Ellington¹⁷, G. Estraviz⁸, P. Farissier¹⁰, A. Farmakopoulos¹⁶, J. Garlitz¹⁸, D. Gault¹⁹, T. George²⁰, S. Yu. Gorda⁴², J. Grismore²¹, D.F. Guo²², D. Herald⁵⁶, M. Ida²³, M. Ishida²³, A.V. Ivanov²⁴, B. Klemt⁷, N. Koshkin²⁵, J.F. Le Campion^{15,57}, A. Liakos²⁶, S.L. Liao²⁷, S.N. Li²⁷, B. Loader²⁸, C. Lopresti²⁹, E. Lo Savio⁴, A. Marchini³⁰, G. Marino⁴, G. Masi⁵³, A. Massallé⁸, R. Maulella²⁹, J. McFarland⁹, K. Miyashita³², C. Napoli⁴, B. Noyelles^{33,1,3}, T. Pauwels³⁴, H. Pavlov³⁵, Q.Y. Peng³⁶, C. Perelló⁸, V. Priban³⁸, J. Prost³⁹, S. Razemon³, J.P. Rousselle^{3,58}, J. Rovira⁸, R. Ruisi⁴¹, N. Ruocco³¹, F. Salvaggio⁴, G. Sbarufatti⁴³, L. Shakun²⁵, A. Scheck⁴⁴, C. Sciuto⁴, D.N. da Silva Neto⁵⁵, N.V. Sinyayeva⁴⁵, A. Sofia⁴, A. Sonka¹¹, J. Talbot⁴⁶, Z.H. Tang²⁷, V.G. Tejfel⁴⁵, W. Thuillot¹, K. Tigani¹⁶, B. Timerson⁴⁷, E. Tontodonati⁴⁸, V. Tsamis¹⁶, M. Unwin⁴⁹, R. Venable⁵⁰, R. Vieira-Martins^{54,1,50}, J. Vilar⁵¹, P. Vingerhoets³⁴, H. Watanabe⁵², H.X. Yin²², Y. Yu²⁷, R. Zambelli²⁰

(Affiliations can be found after the references)

Received XX XXXXX 2014 / Accepted XX XXXXX 2014

ABSTRACT

Context. In 2009, the Sun and the Earth passed through the equatorial plane of Jupiter and therefore the orbital planes of its main satellites. It will be the equinox on Jupiter. This occurrence will make possible mutual occultations and eclipses between the satellites. Experience has shown that the observations of such events will provide accurate astrometric data able to bring new information on the dynamics of the Galilean satellites. Observations are made under the form of photometric measurements but need to be made through the organization of a world wide campaign of observation maximizing the number and the quality of the data obtained.

Aims. This work focuses on processing the complete database of photometric observations of the mutual occultations and eclipses of the Galilean satellites of Jupiter made during the international campaign in 2009. The final goal is to derive new accurate astrometric data.

Methods. We used an accurate photometric model of mutual events adequate of accuracy of observation. Our original method is applied to derive astrometric data from photometric observations of mutual occultations and eclipses of the Galilean satellites of Jupiter.

Results. We process the 457 light curves obtained during the international campaign of photometric observations of the Galilean satellites of Jupiter in 2009. As compared with the theory, for successful observations, the r.m.s. of 'O-C' residuals are equal to 45.8 and 81.1 mas in right ascension and declination, respectively and the mean 'O-C' residuals are equal to -2 mas and -9 mas in right ascension and declination respectively for mutual occultations and -6 mas and +1 mas in right ascension and declination respectively for mutual eclipses.

Key words. ephemerides – planets and satellites: general

1. Introduction

Photometric observations of mutual occultations and eclipses of natural satellites of planets offer an efficient source of new astrometric data. We have taken the oppor-

Send offprint requests to: J.-E. Arlot

Publication de catalogues des phénomènes observés (ci-dessus en 2003 et en 2009)

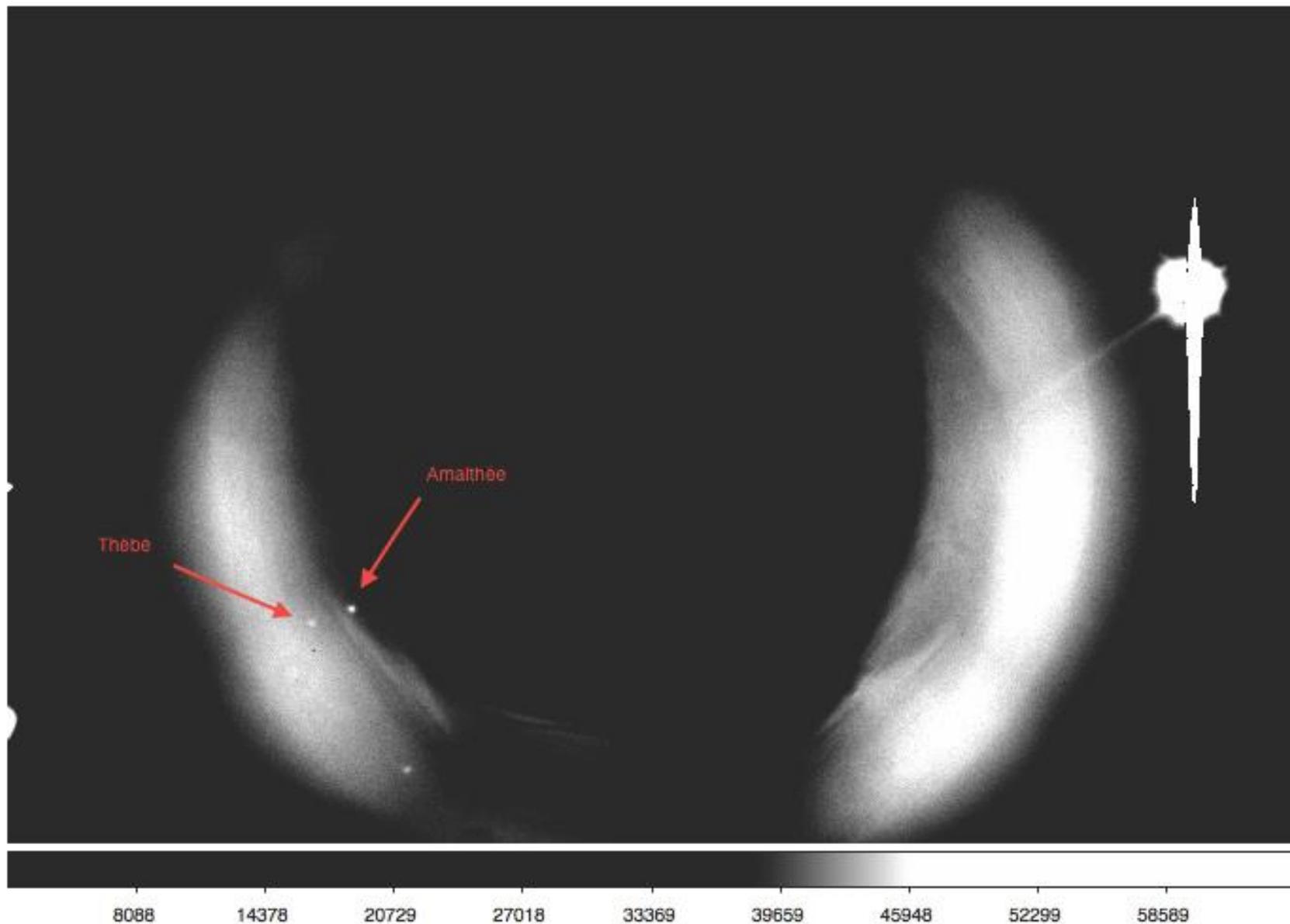
Phénomènes impliquant les petits satellites intérieurs proches de Jupiter, Amalthée et Thebe.

Les meilleures conditions d'observation concernent:
Amalthée, $m_v=14$ à $30''$ du limbe de Jupiter

La durée maximale d'une éclipse
d'Amalthée est de 8 minutes

Amalthée en infra-rouge →





Thebe

Amalthee

8088

14378

20729

27018

33369

39659

45948

52299

58589

Observations infrarouges

Utiles pour observer dans des conditions difficiles:

- Très près de Jupiter
- Pendant le crépuscule

Et pour les éclipses d'Amalthée ($m_v=14$)

On utilise la bande d'absorption du méthane:

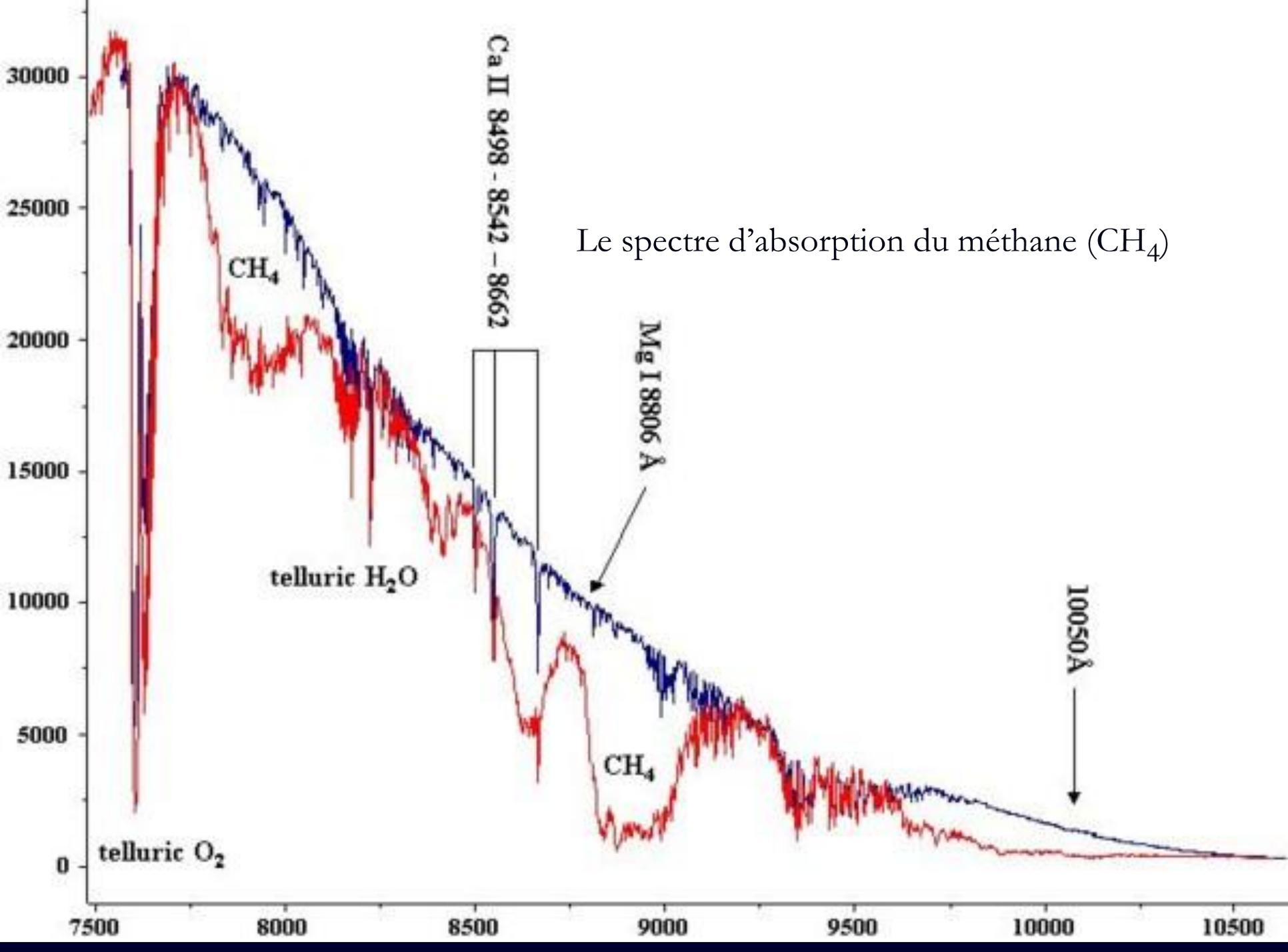
- Jupiter plus sombre
- Ciel plus sombre

Bandes: 890 nm, 1.3 micromètre, 2.2 micromètres, ...

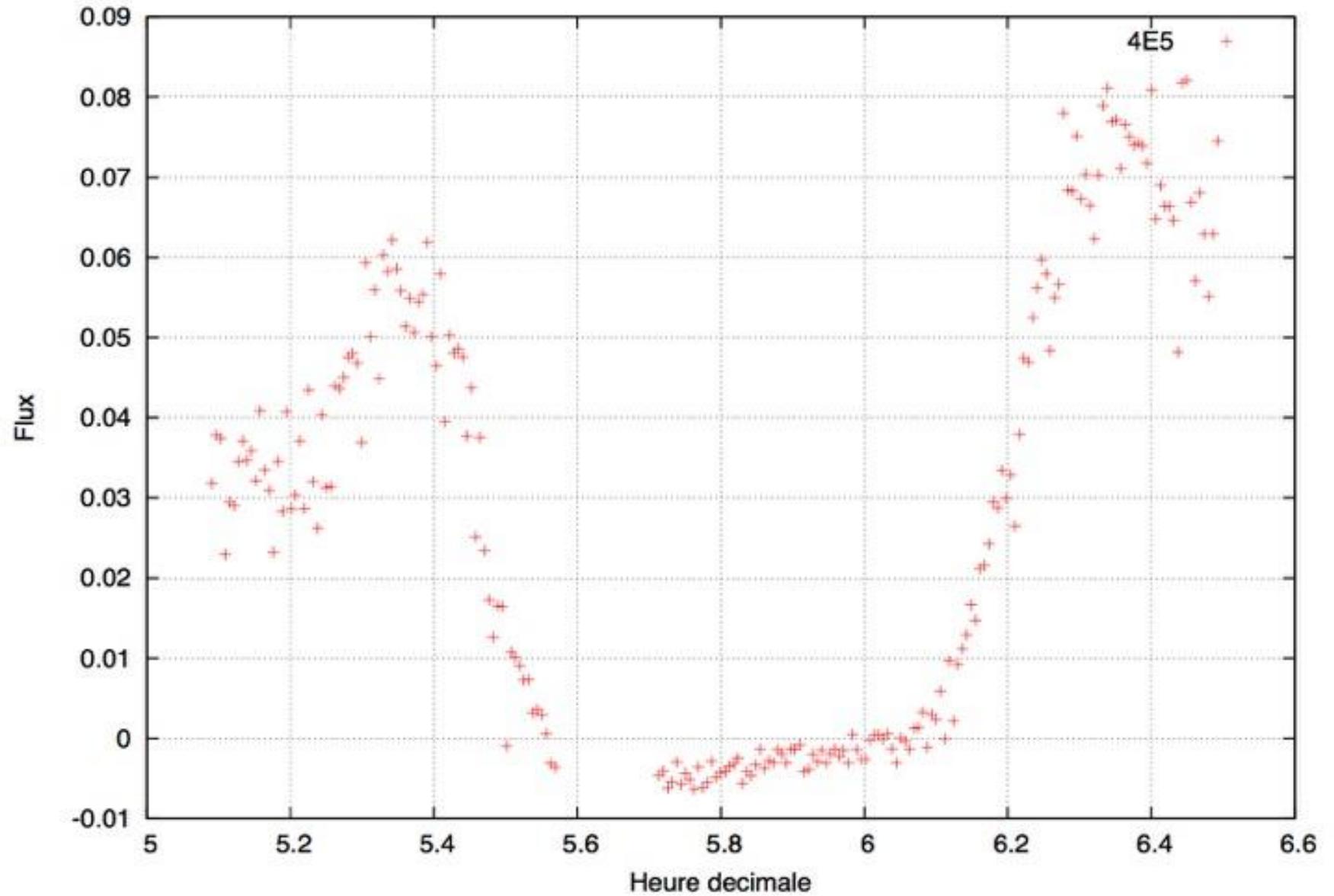
Attention, les flux sont bien plus faibles!

143 → Besoin de plus grands télescopes!

Le spectre d'absorption du méthane (CH₄)

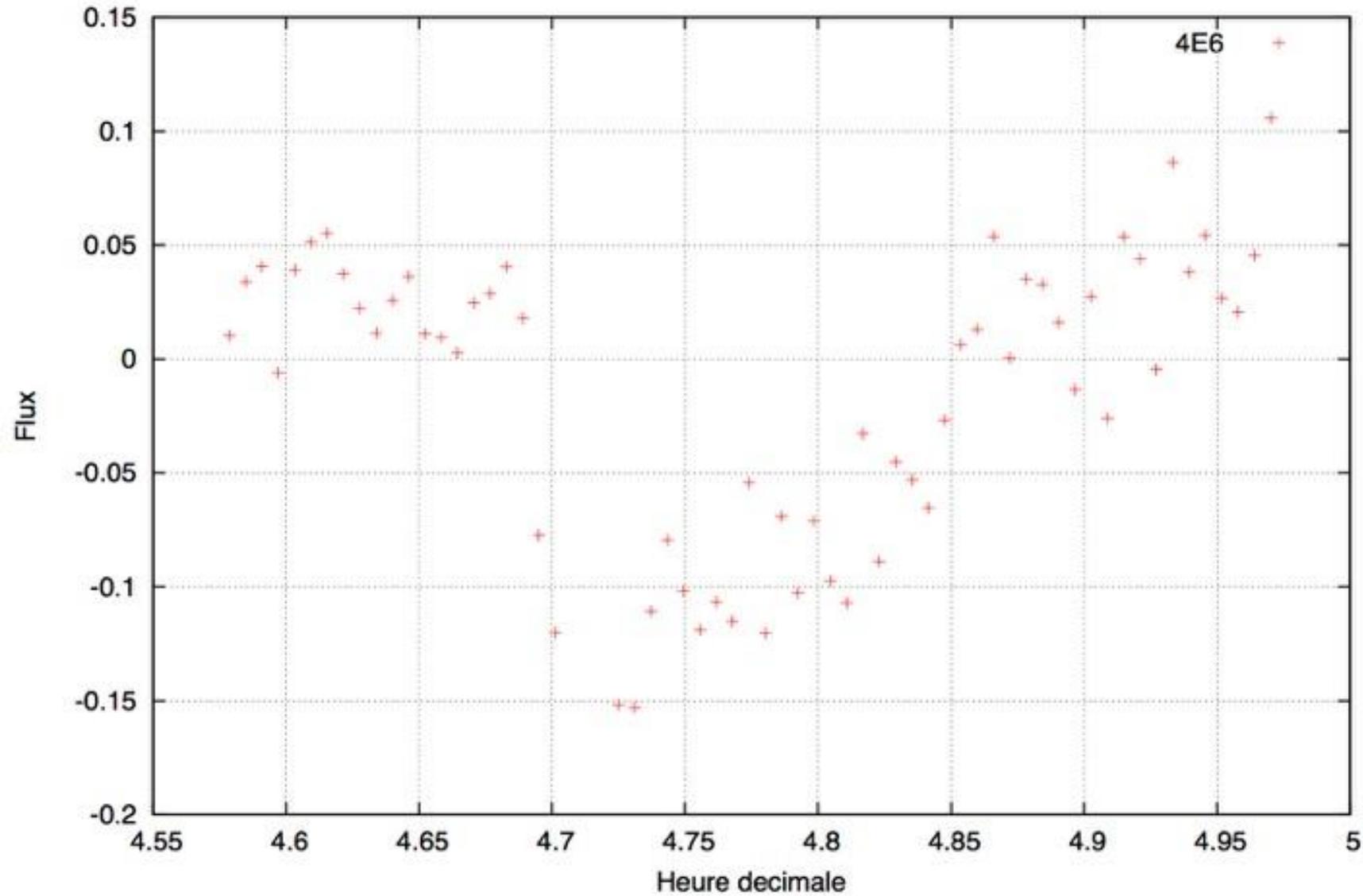


Callisto éclipse Amalthée



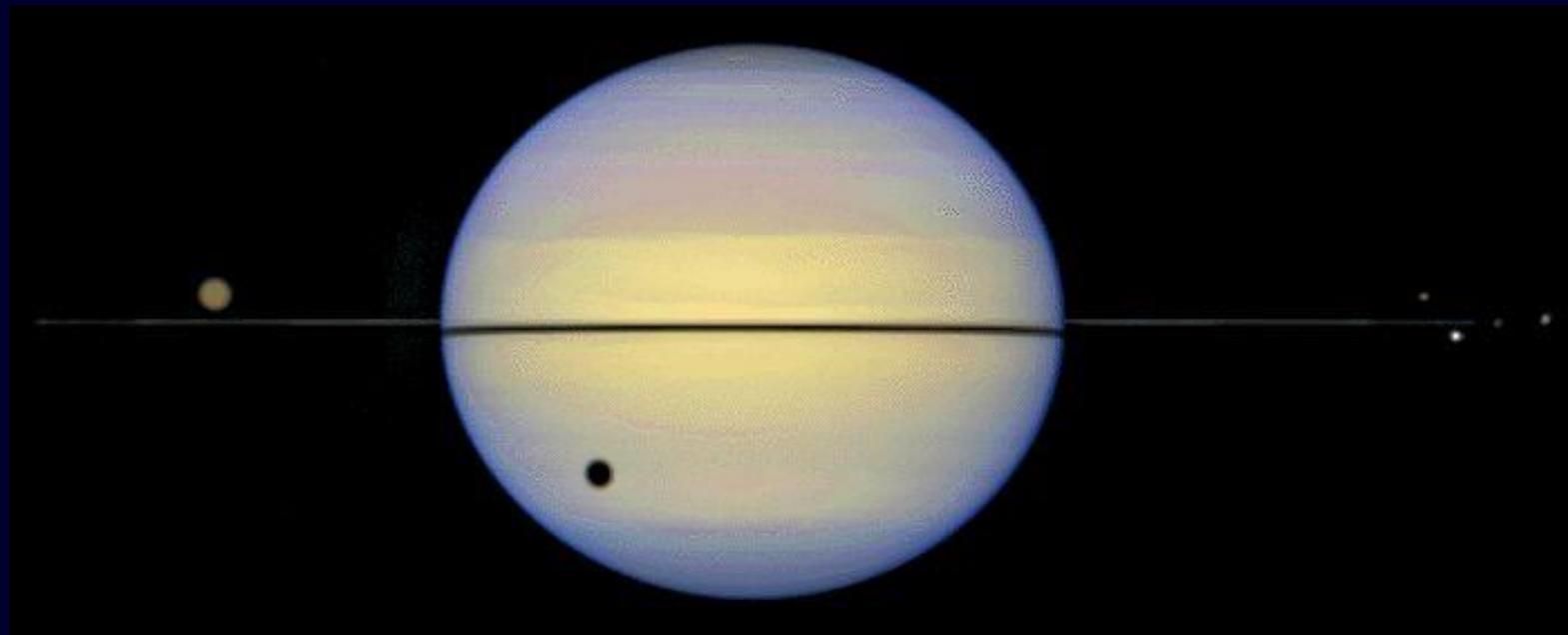
Callisto éclipse Thébé

4E6

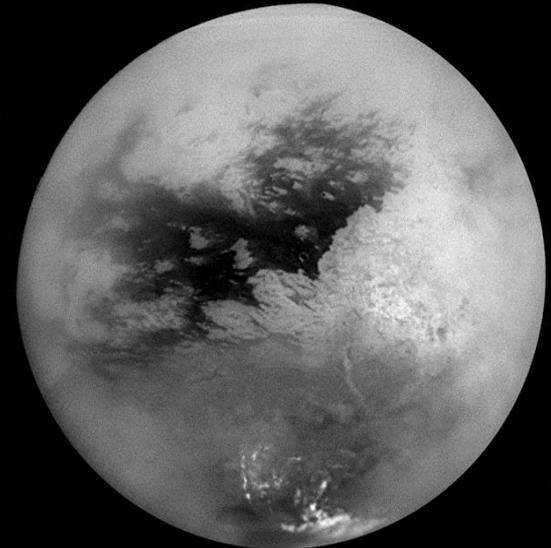
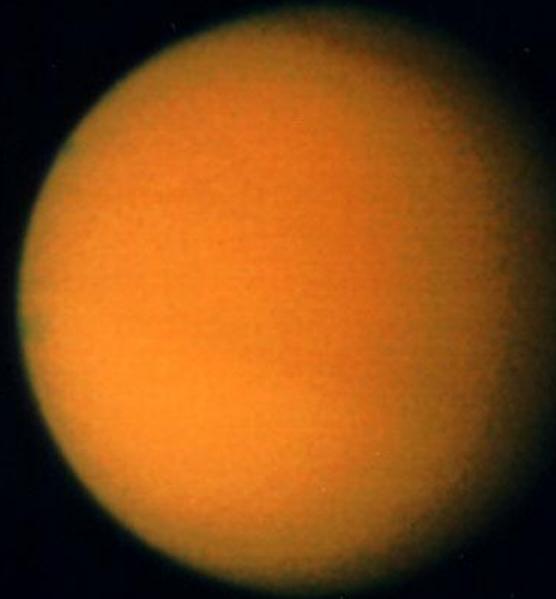




- Les passages d'ombre



Le cas de Titan: une
atmosphère qui rappelle la
Terre des premiers temps:
comment la sonder?

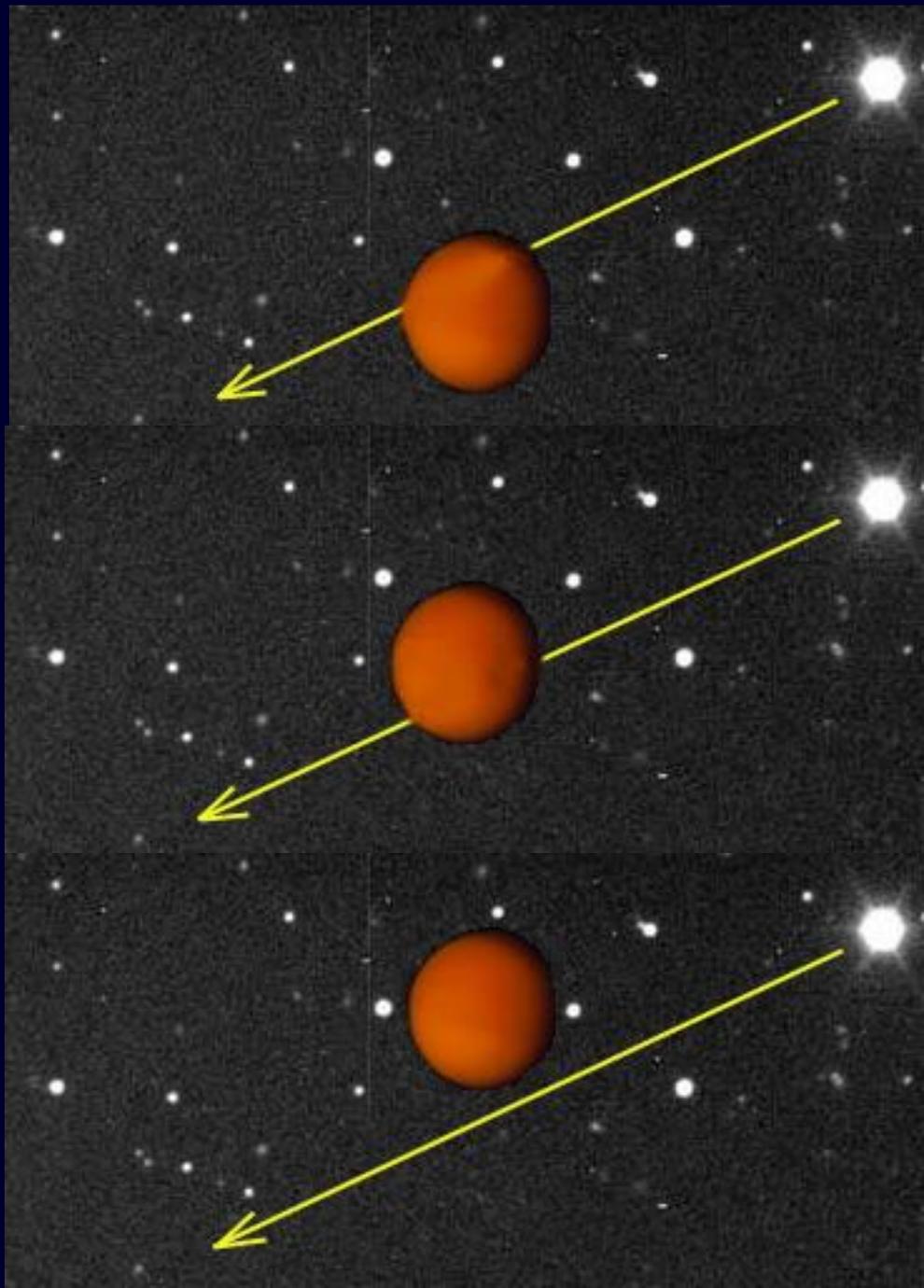
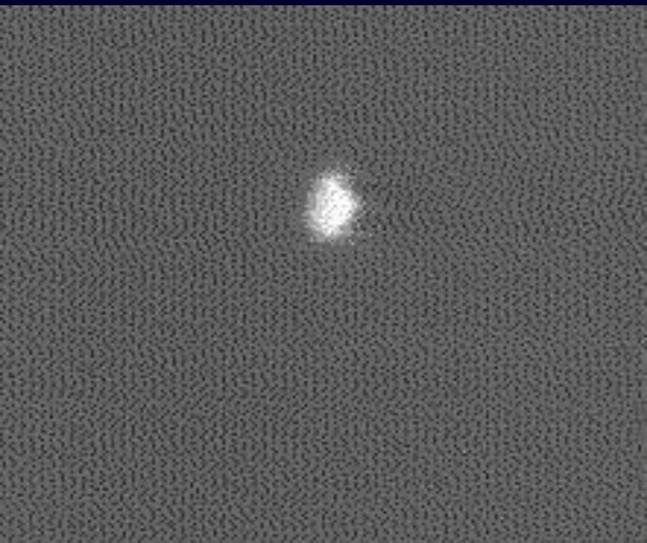


Titan, le gros satellite de Saturne possède une atmosphère dans laquelle la sonde Huygens est descendue.



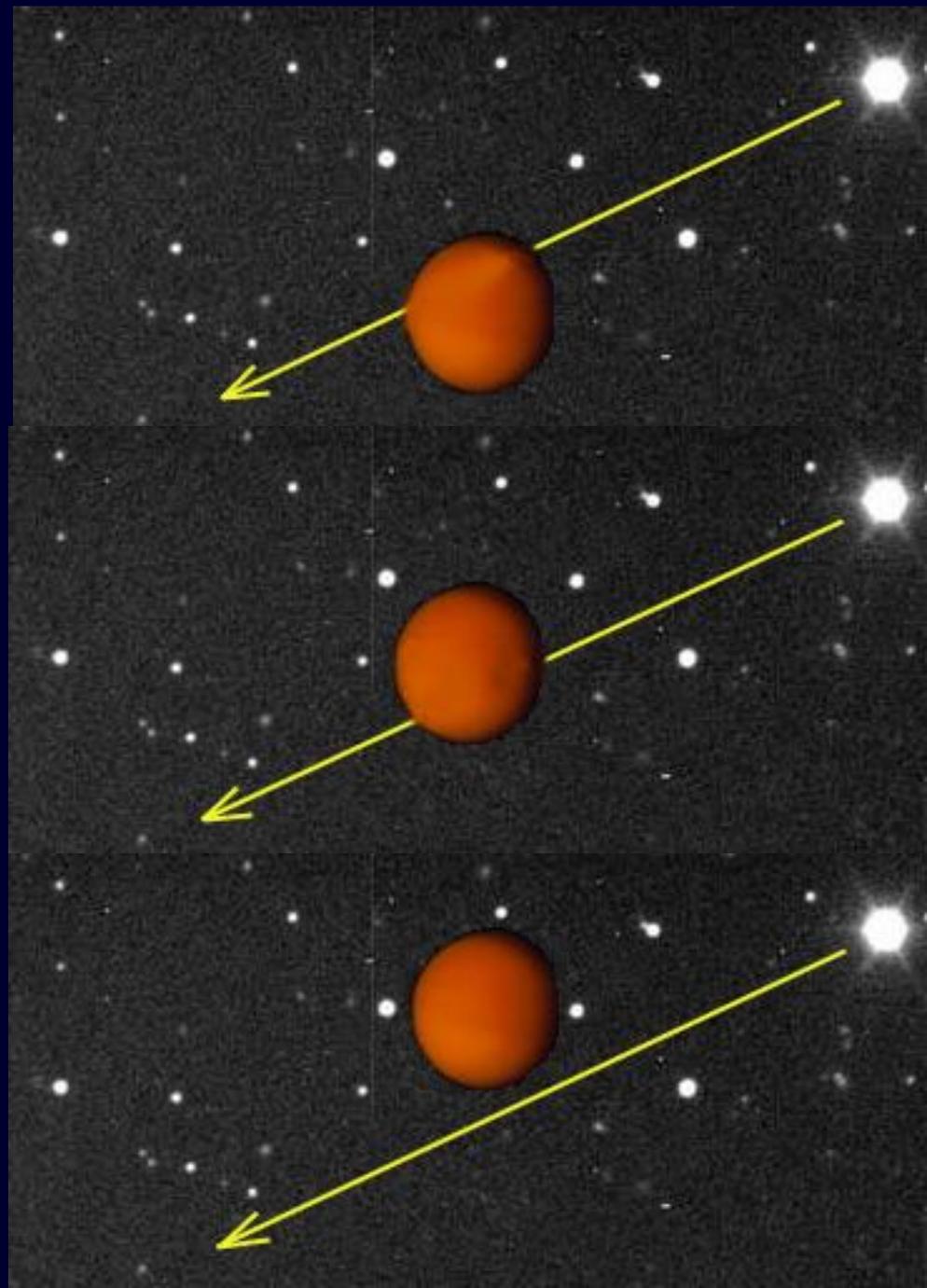
Cet exploit n'a été possible que grâce à des observations préparatoires depuis la Terre: l'analyse de l'atmosphère de Titan a été nécessaire pour préparer la descente de la sonde Huygens.

Ce sont des occultations d'étoiles qui l'ont permis.



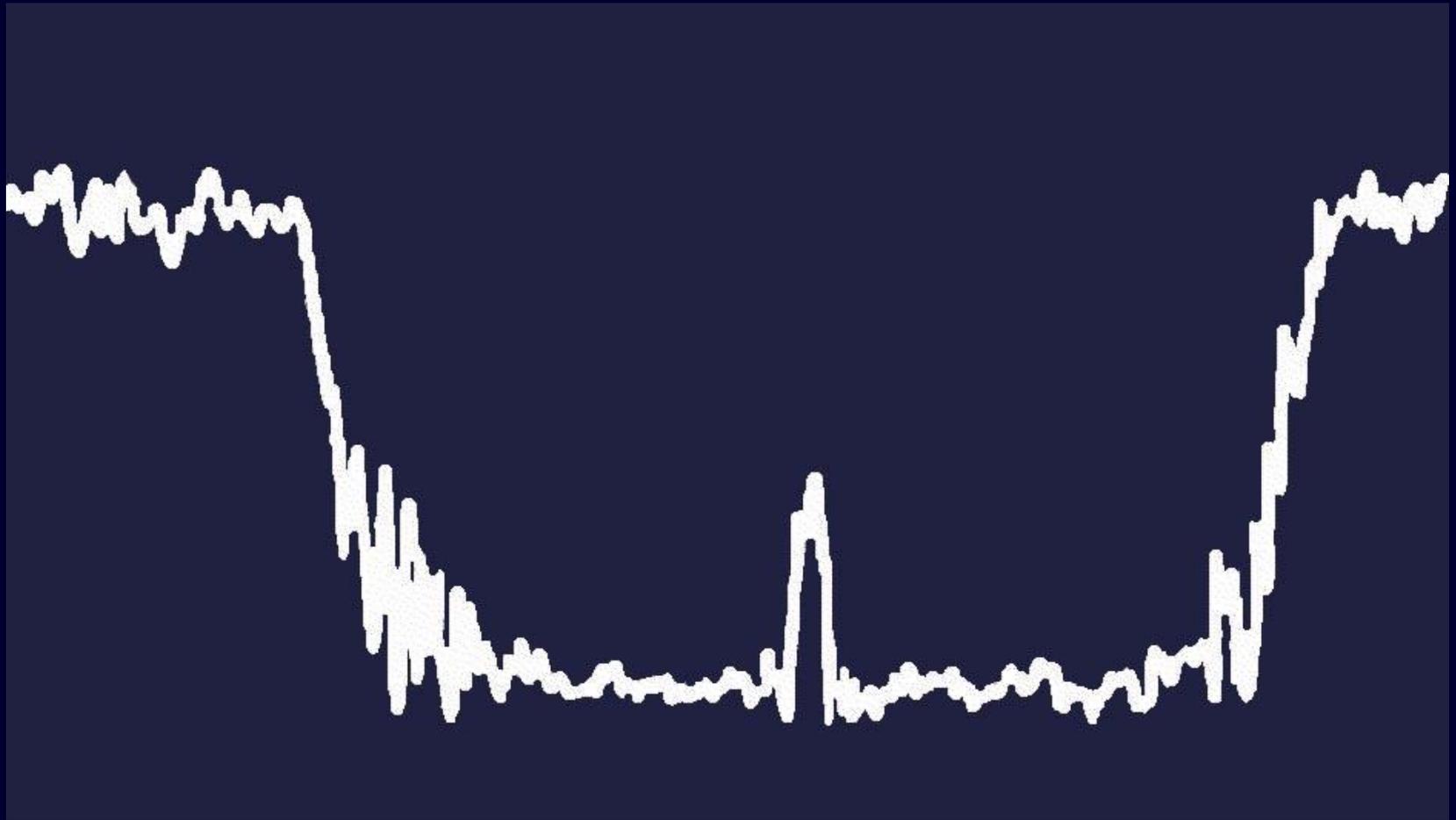
Flash central de Titan

3 juillet 1989



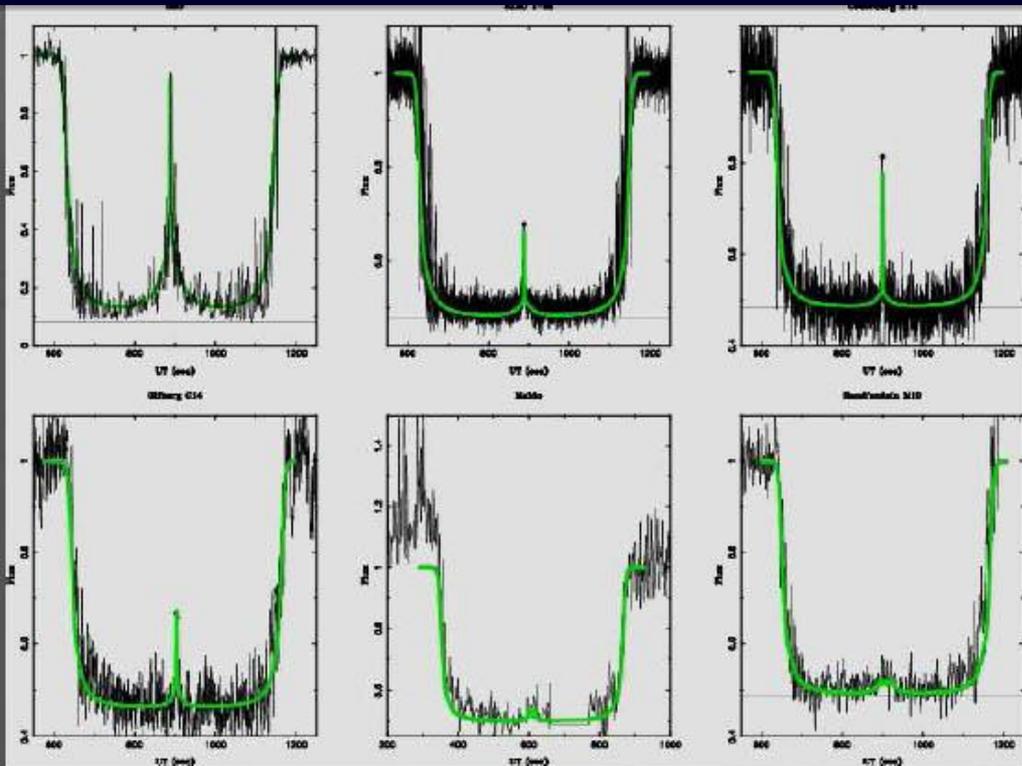


La lumière reçue sur Terre au cours de
l'occultation



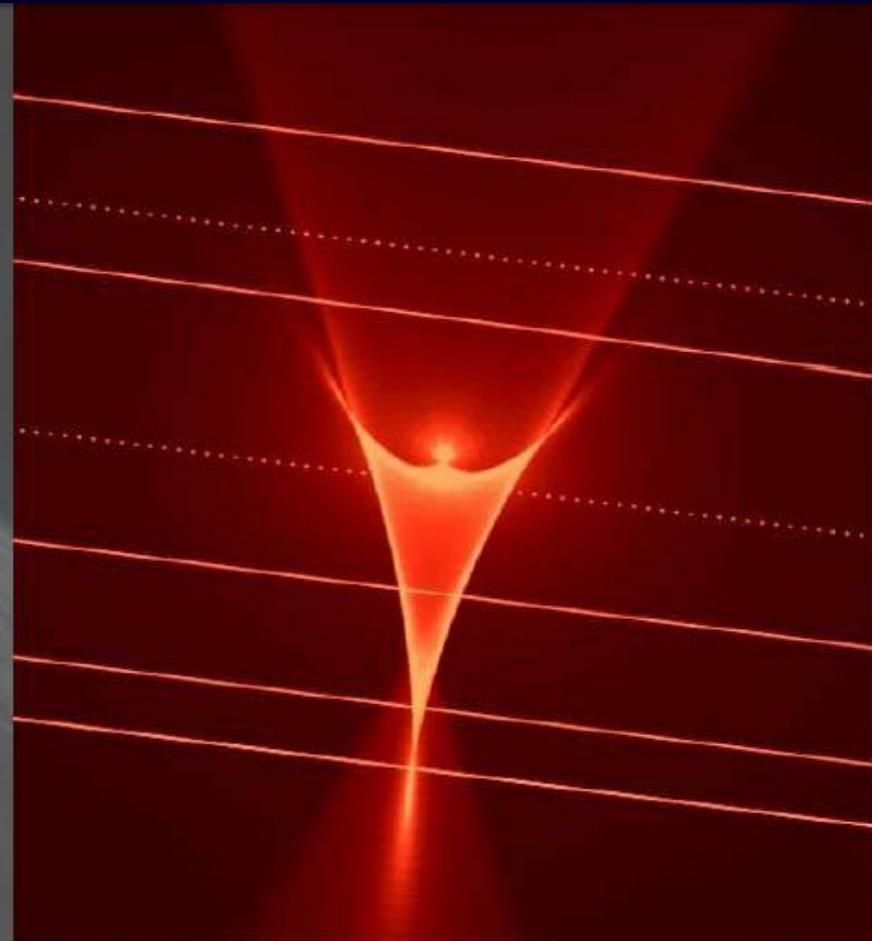
La lumière reçue sur Terre au cours de
l'occultation

Le « flash central »



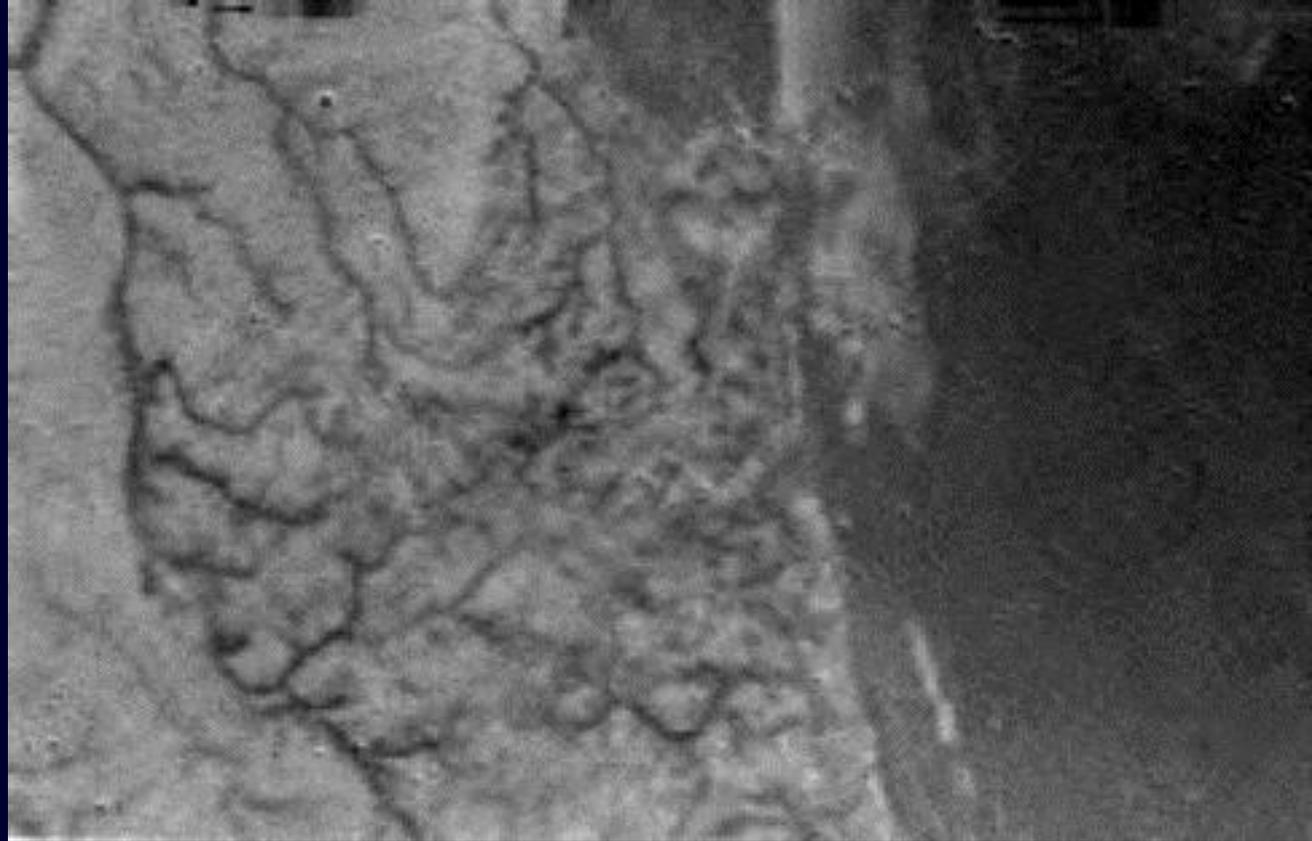
observations et ajustement
du modèle théorique

- ▶ couche d'inversion à 515 km d'altitude
- ▶ vitesse des vents zonaux à 250 km d'altitude (200 m/s à 55°N décroissant vers le sud)

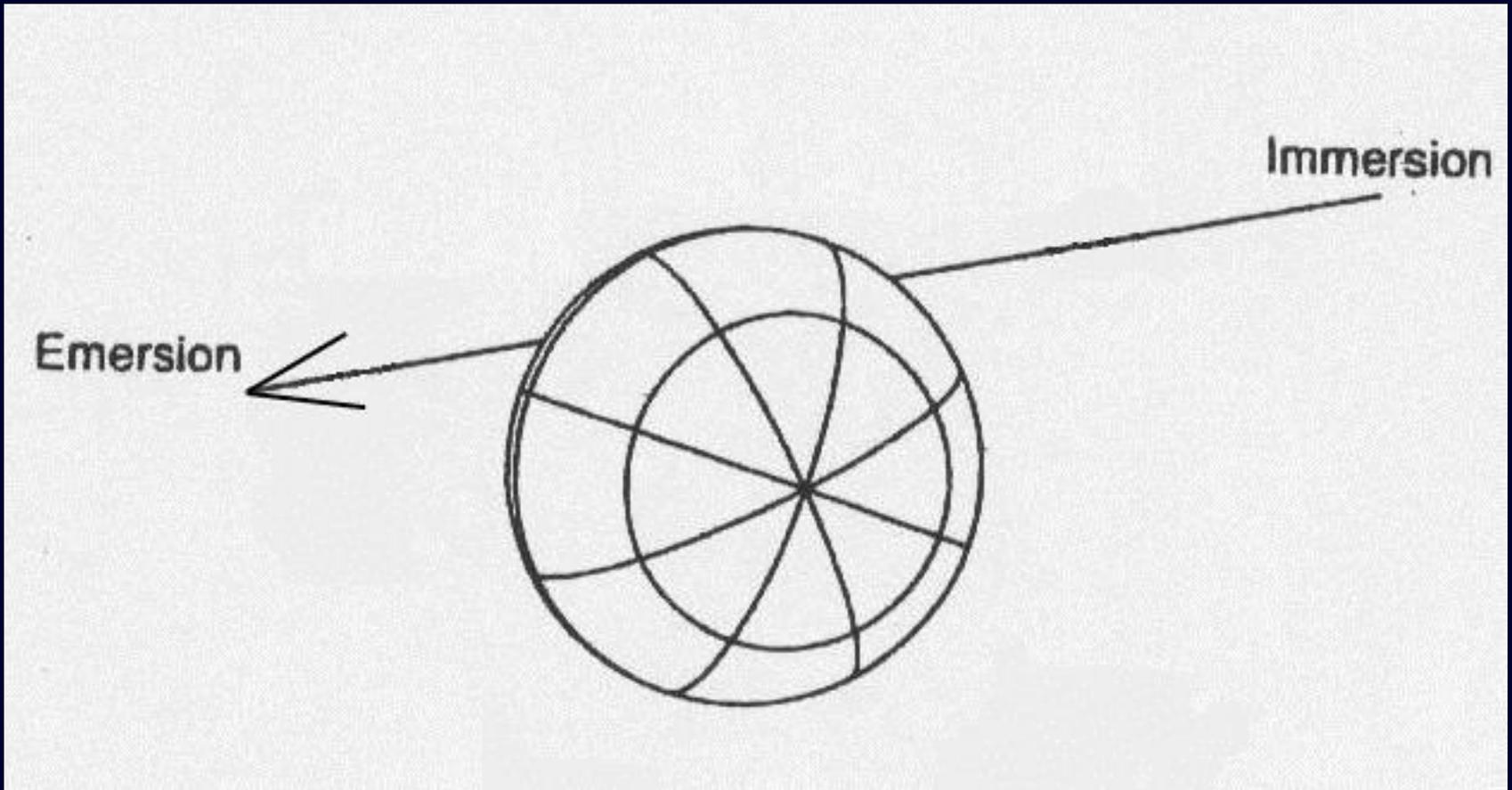


modélisation de la caustique

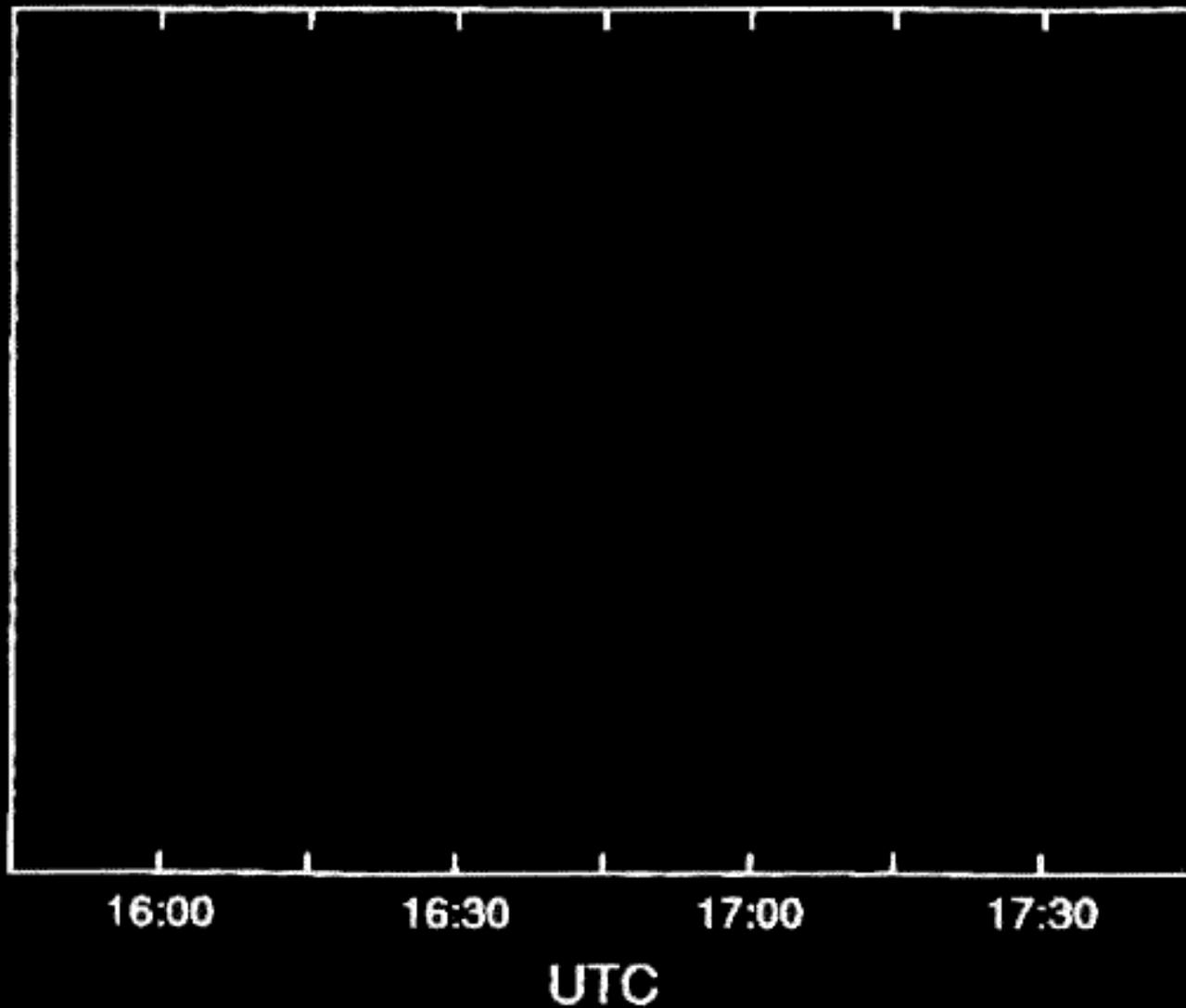
Bruno Sicardy et al, *JGR* - 2006



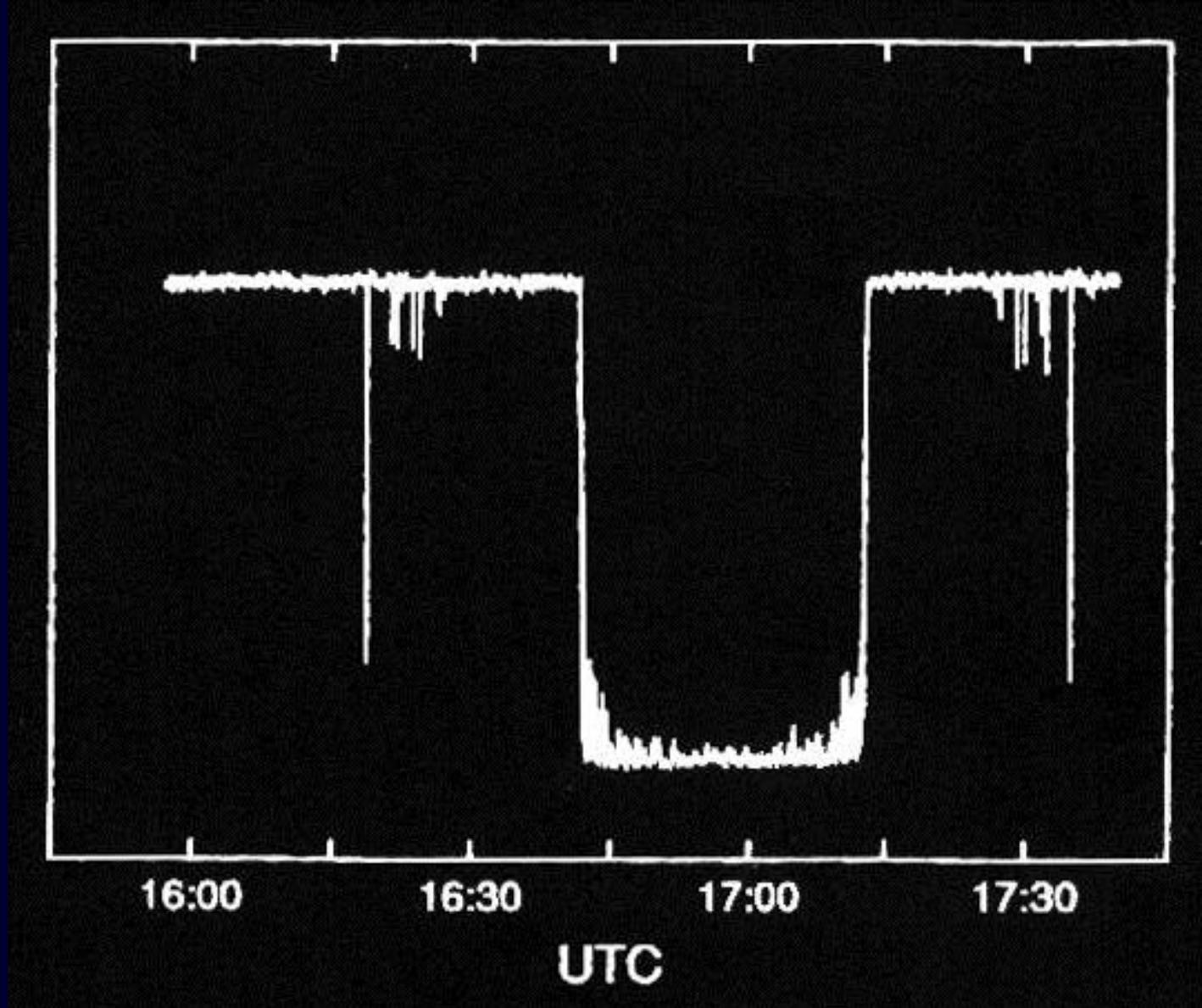
Titan vu par Huygens



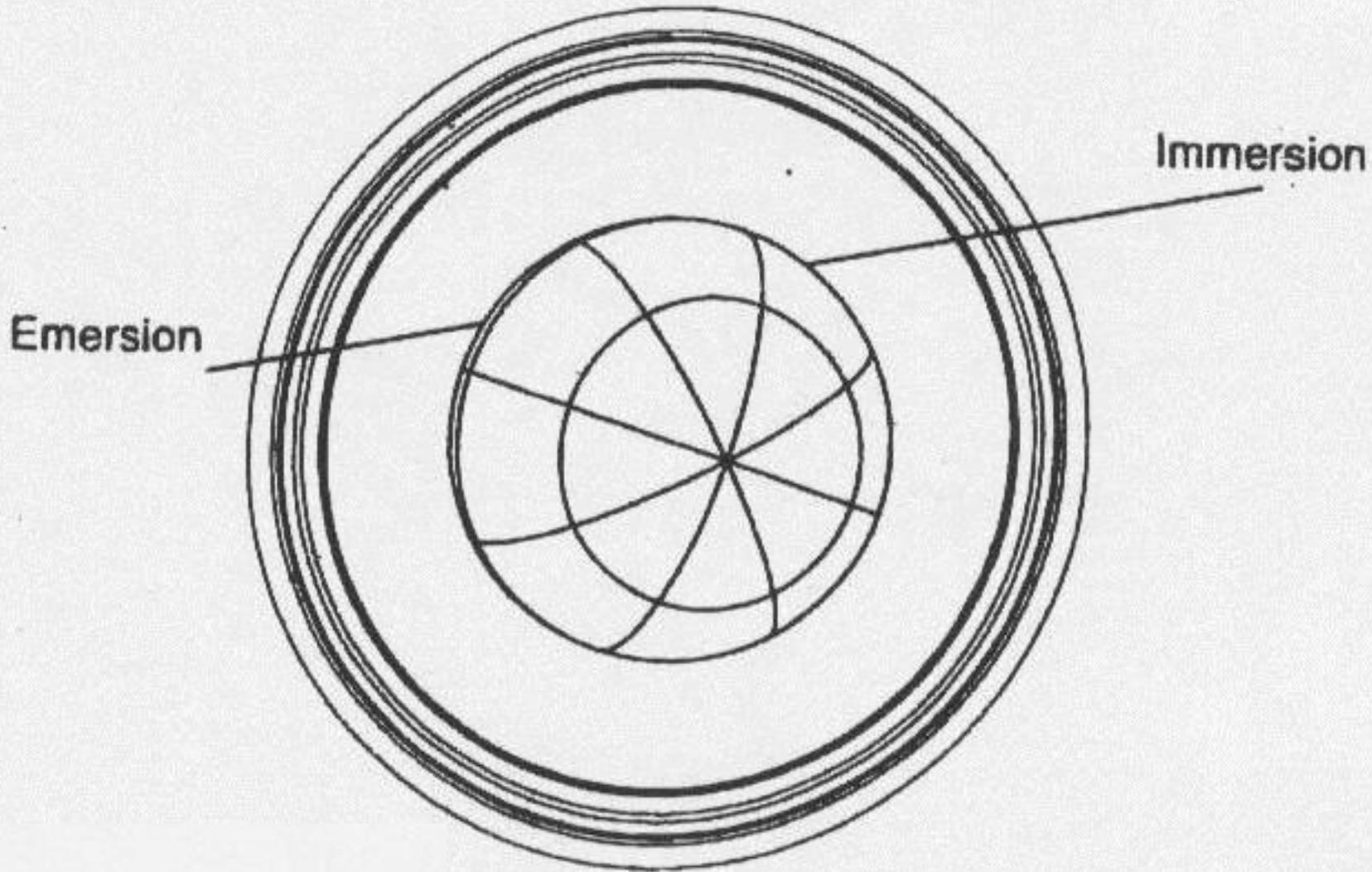
Une occultation d'étoile par la planète Uranus



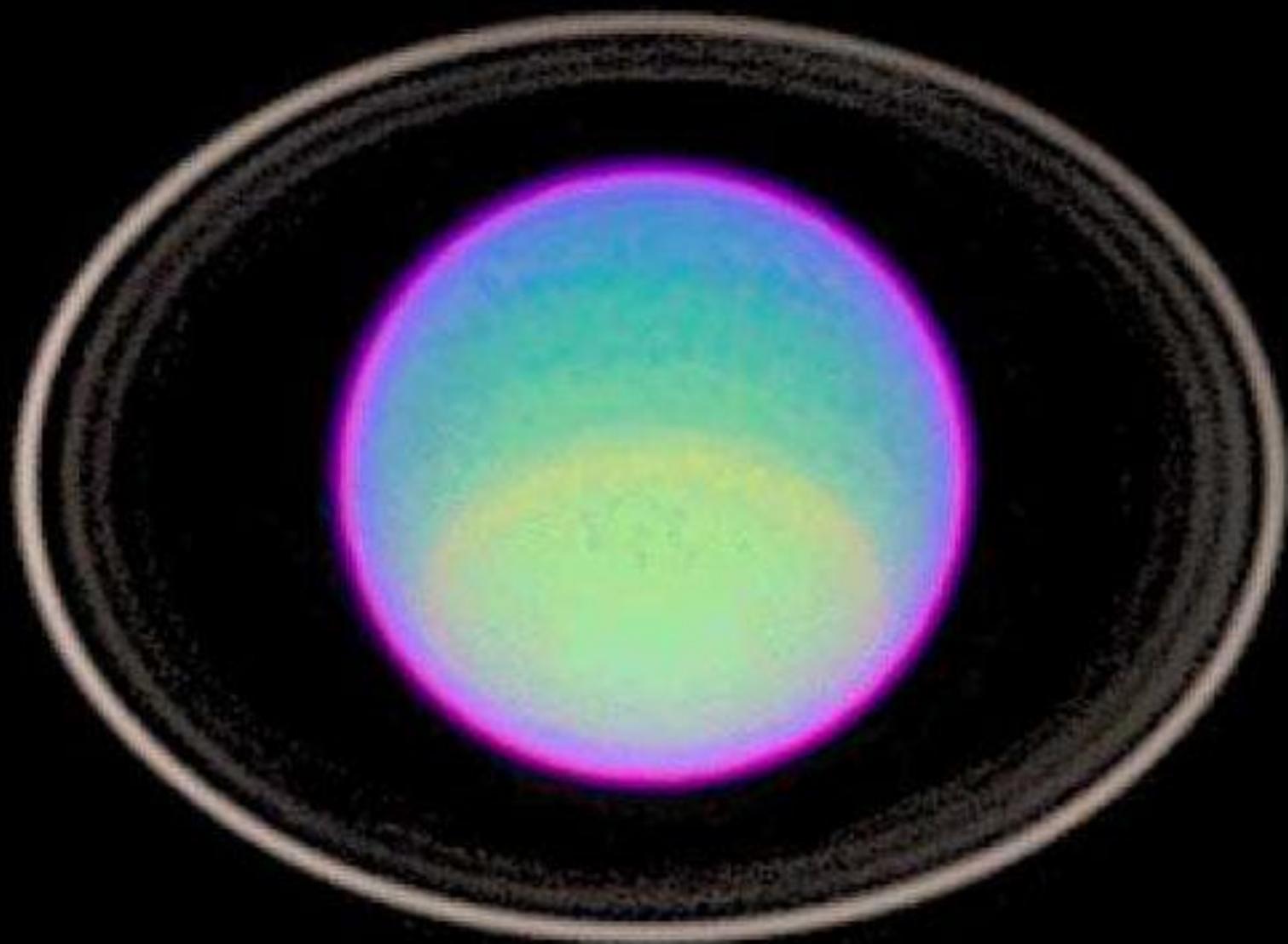
La lumière reçue sur Terre au cours de
l'occultation



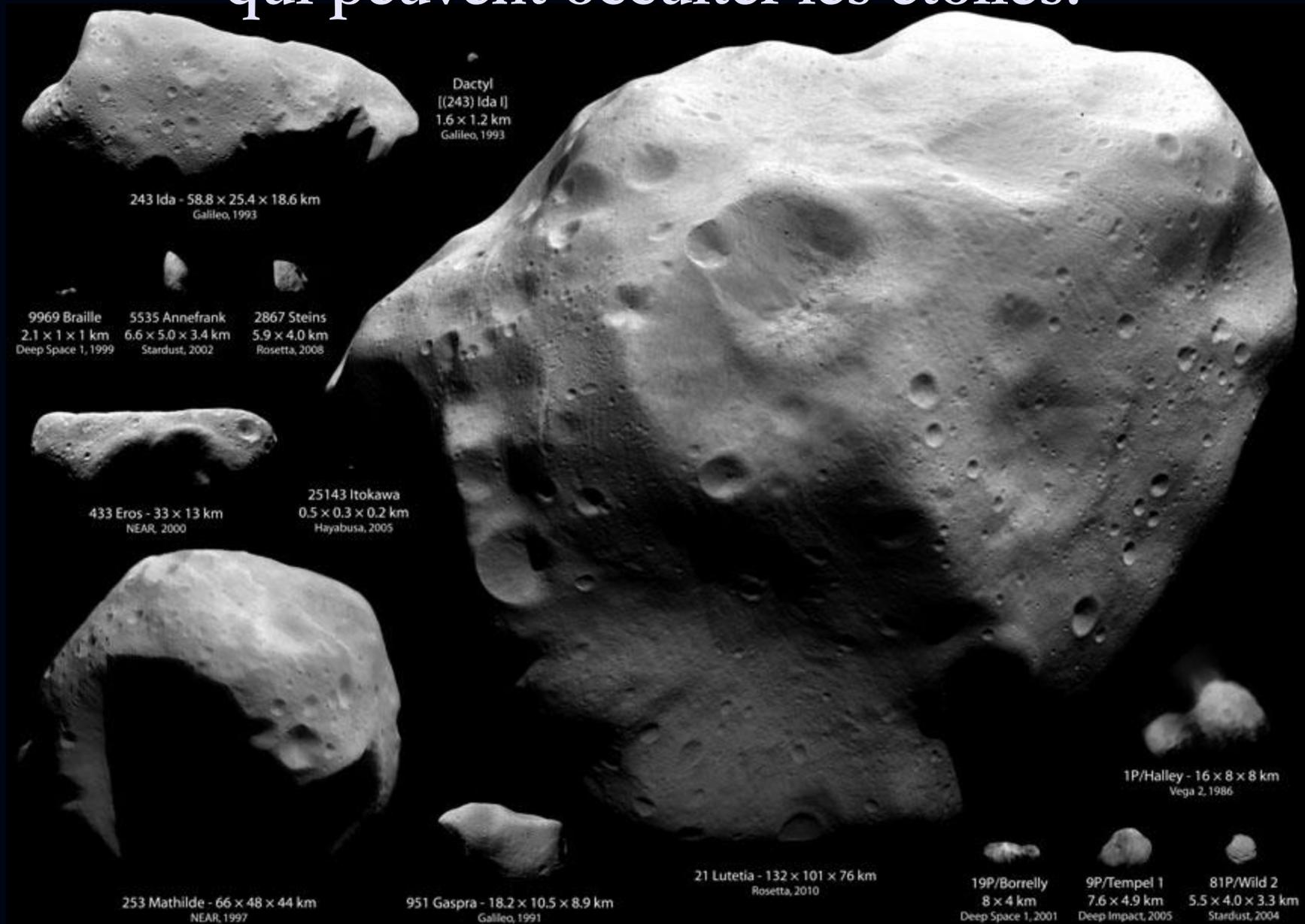
La lumière reçue sur Terre au cours de
l'occultation



L'explication du mystère ou la découverte des anneaux d'Uranus

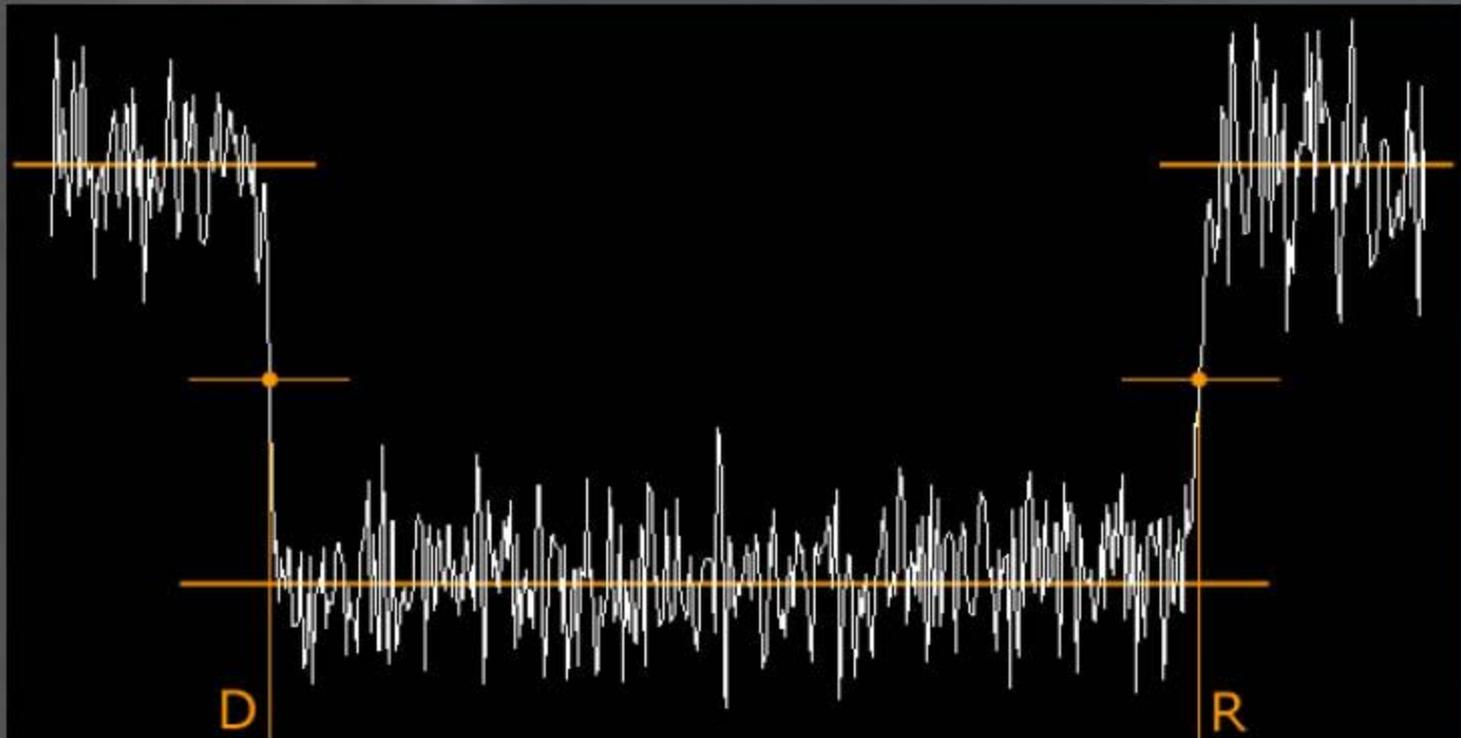


Les astéroïdes: des points de tailles très diverses qui peuvent occulter les étoiles!



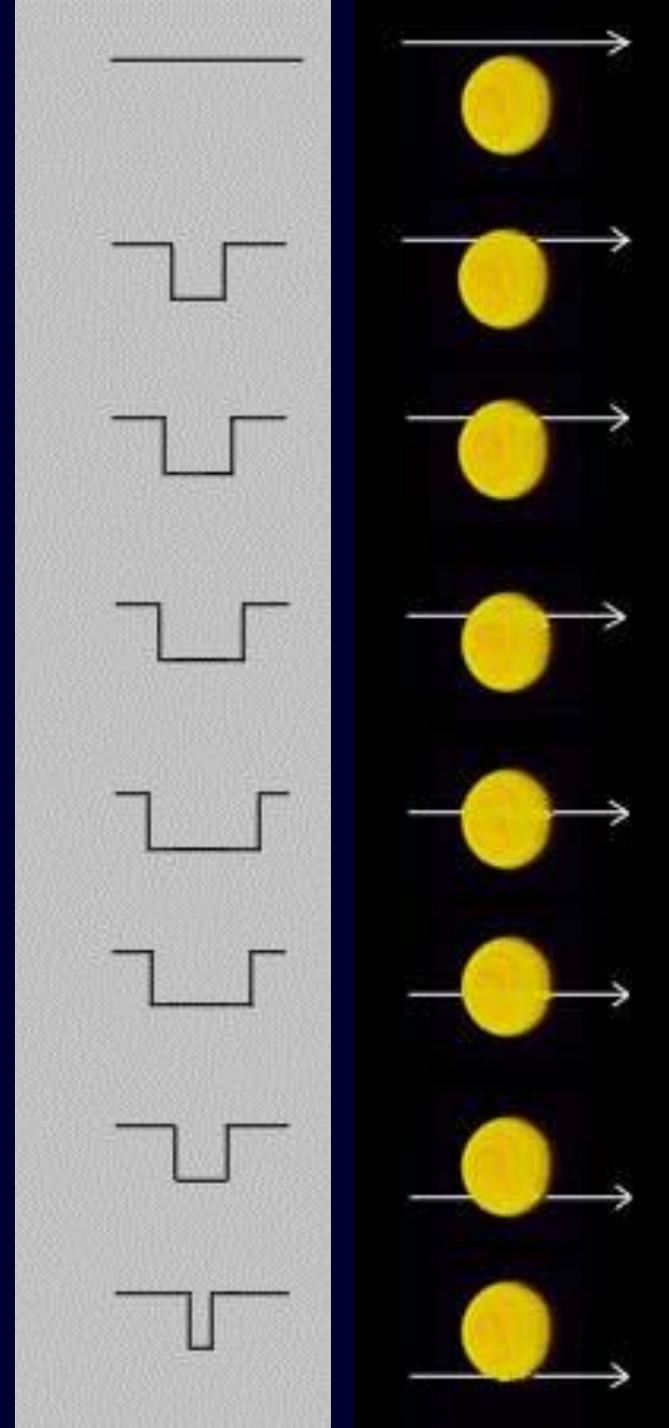
Un exemple d'occultation

objectif : photométrie rapide et datée



**Tout l'intérêt des occultations
réside dans la précision temporelle
sur l'observation**

- - la lumière reçue pendant une occultation dépend de la position de l'observateur
- - la recombinaison des observations va fournir la taille de l'astéroïde grâce à la durée de chaque interruption de signal



Star (2000):

Mag = 5.5
 RA = 4 09 09.988
 Dec = +19 36 33.10

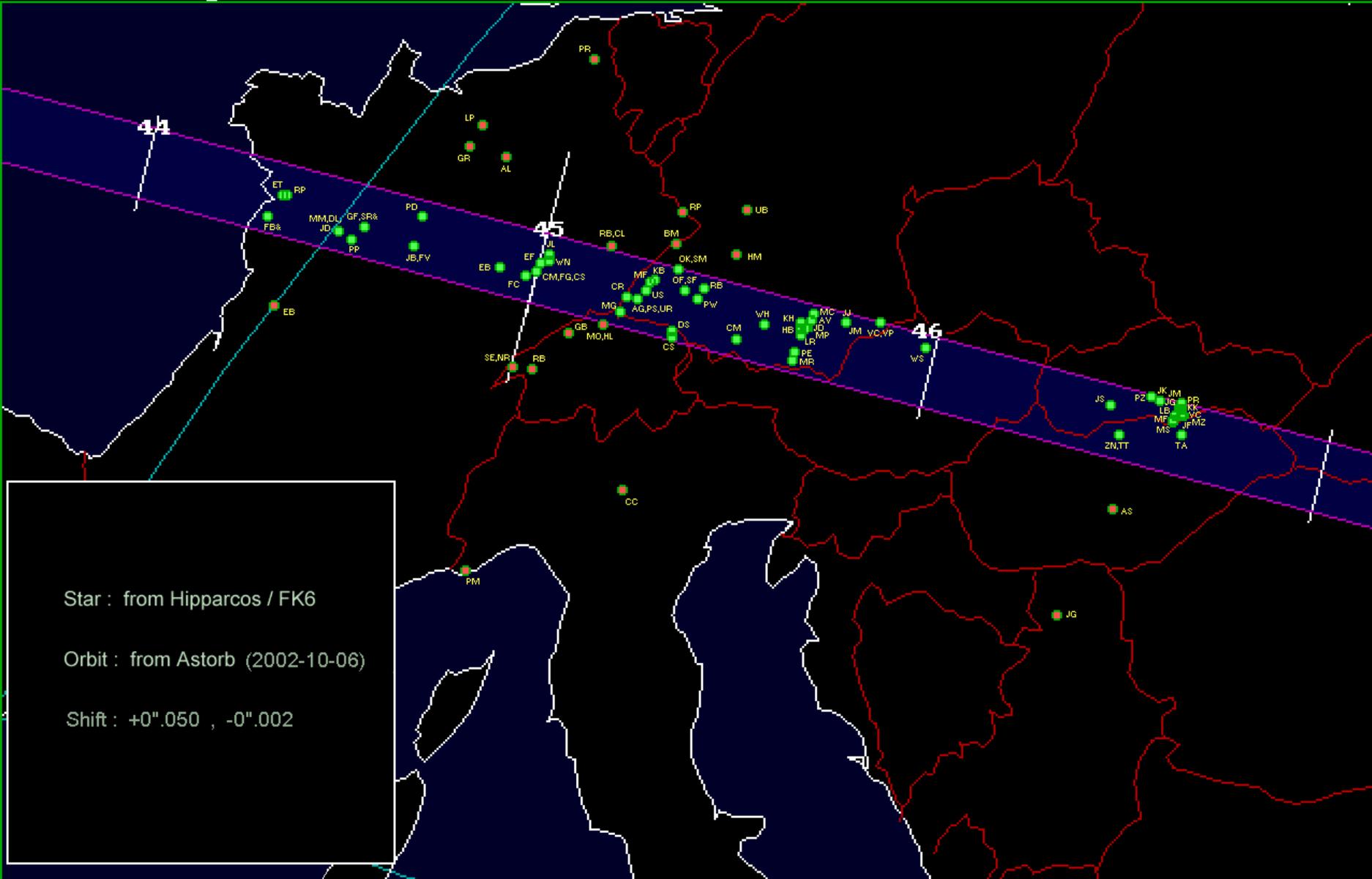
Max Duration = 10.5 secs

Mag Drop = 7.3
 Sun : Dist = 110°
 Moon : Dist = 122°
 illum = 81%

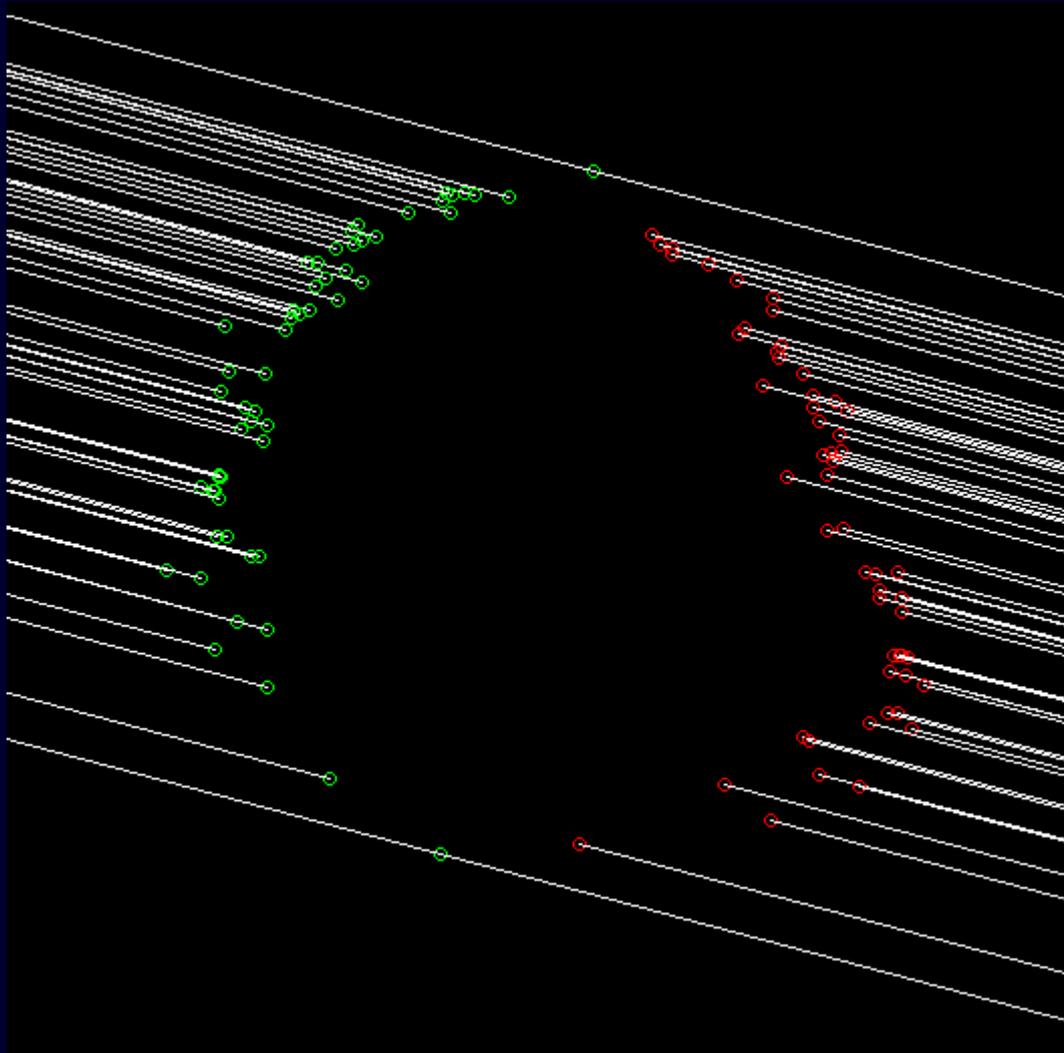
Asteroid:

Mag = 12.8
 Dia = 94km, 0.078"
 Parallax = 5.279
 Hourly dRA = 1.821s
 dDec = -6.97"

Plot for Long +16 Lat +47



Star : from Hipparcos / FK6
 Orbit : from Astorb (2002-10-06)
 Shift : +0".050 , -0".002



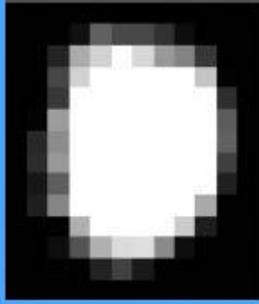
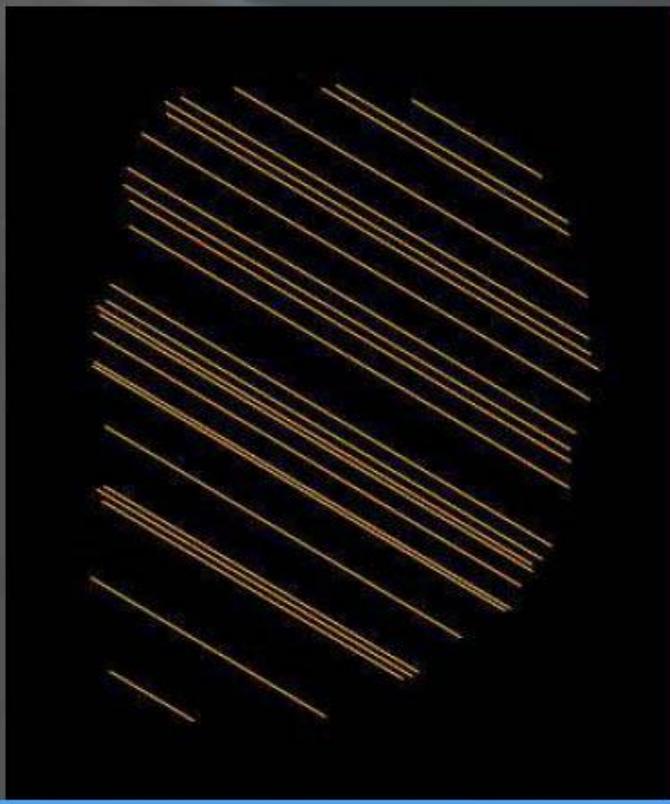
Le rassemblement de toutes les observations de l'occultation dessine la forme de l'astéroïde

Trois observations d'un gros astéroïde

200 km de diamètre

à 300 millions de km de la Terre

depuis la
Terre



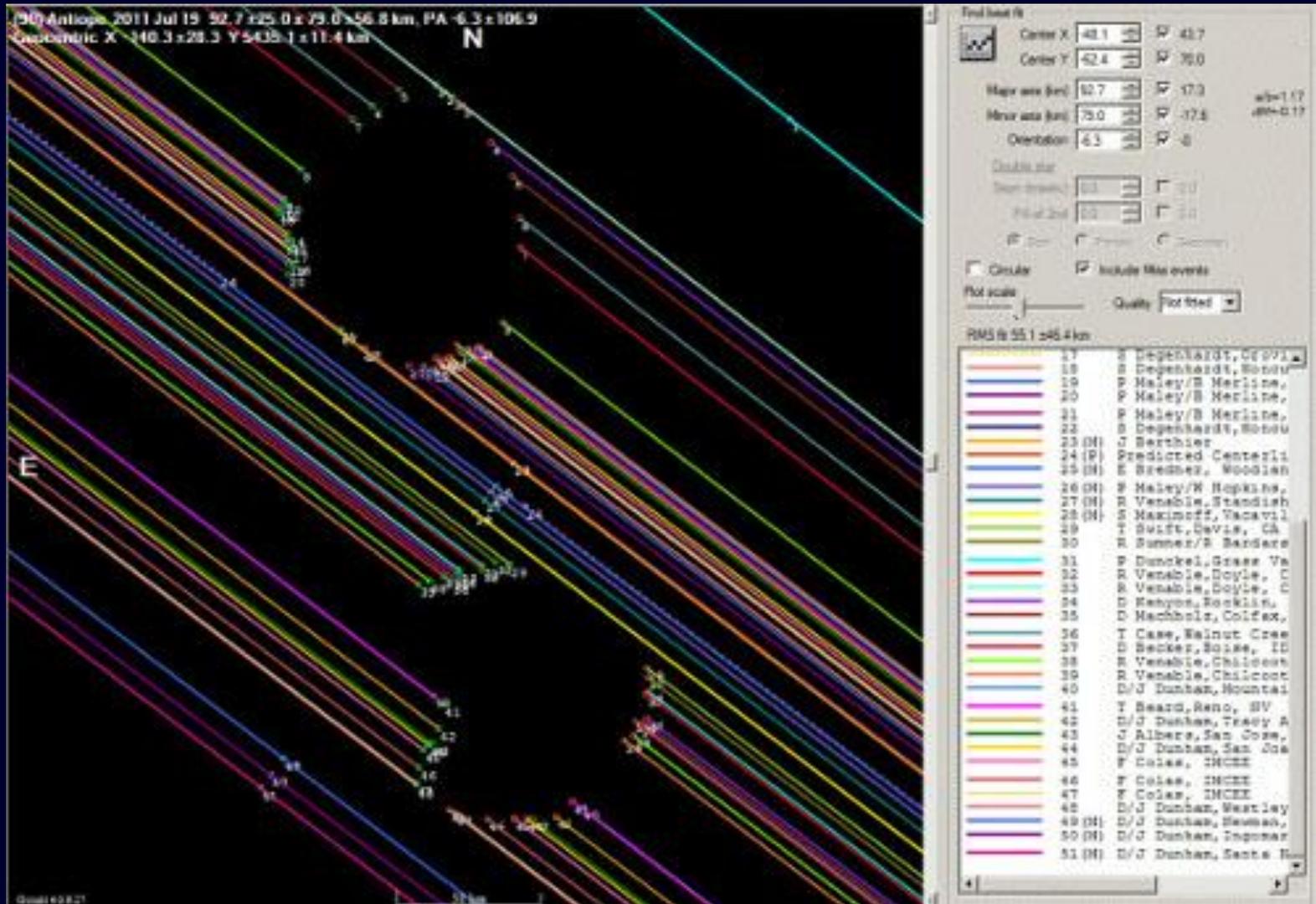
VLT+AO
résolution ~60km

Occultation stellaire
25 cordes
résolution ~1km

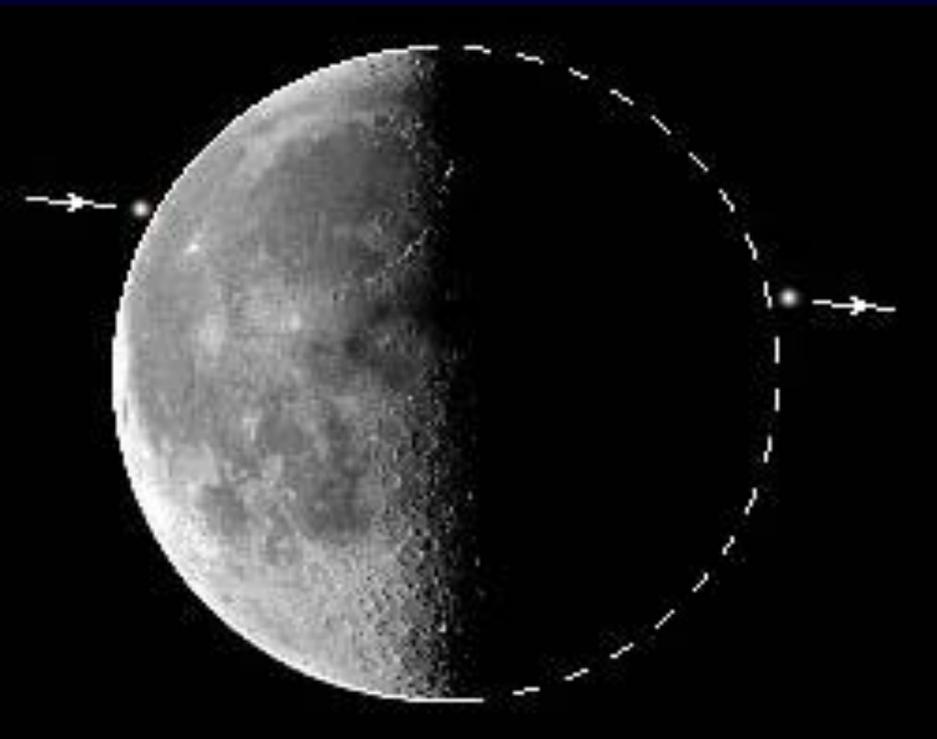
Sonde spatiale
résolution ~15m

sur place !

Un astéroïde double

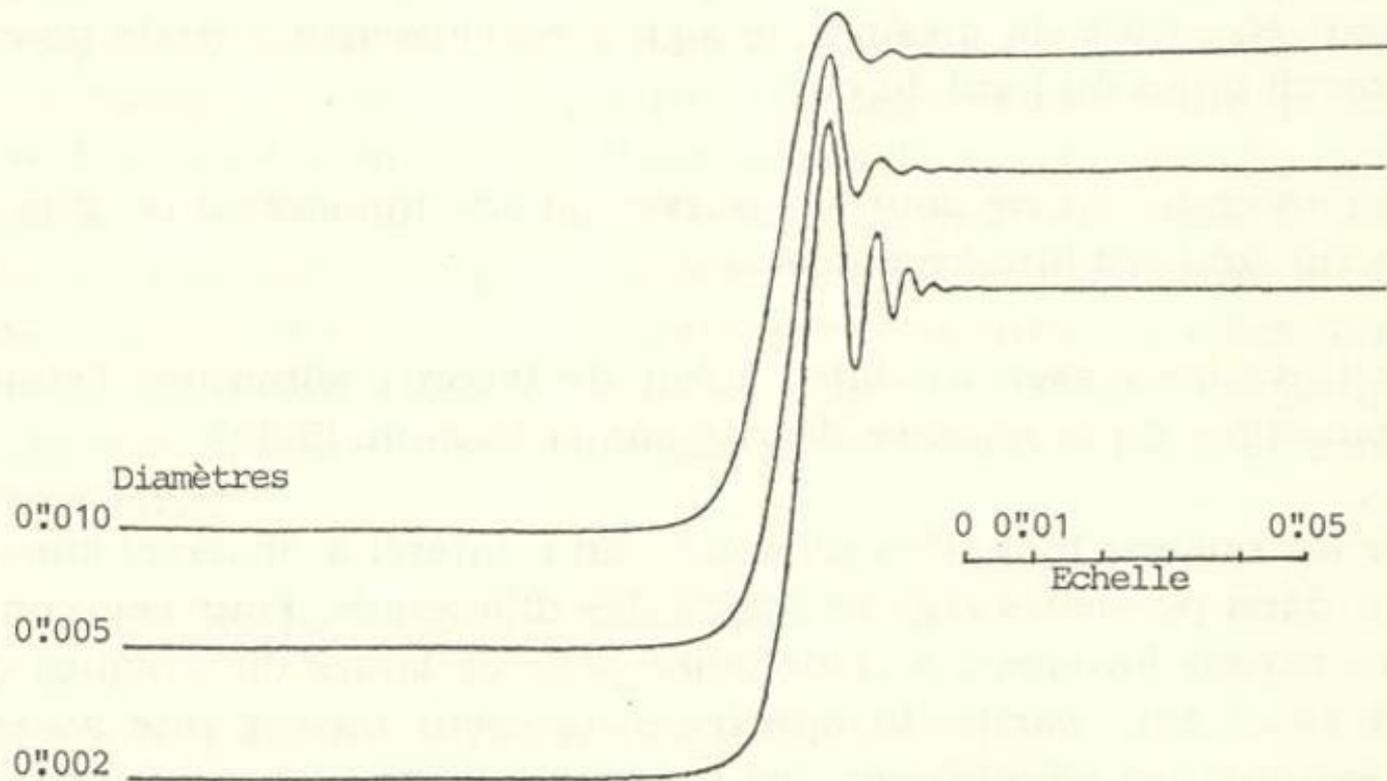


Les occultations d'étoiles par la Lune



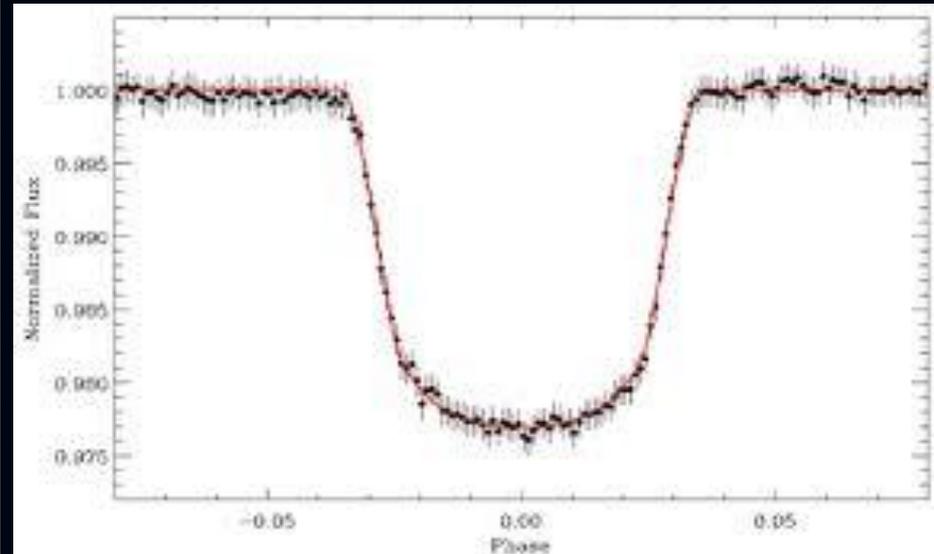
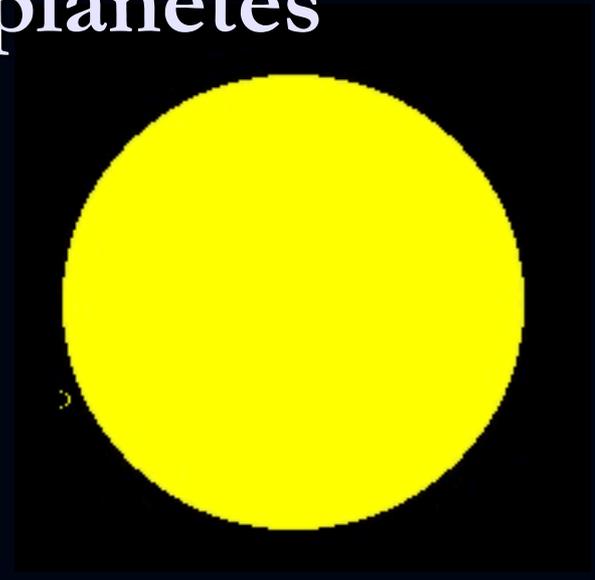
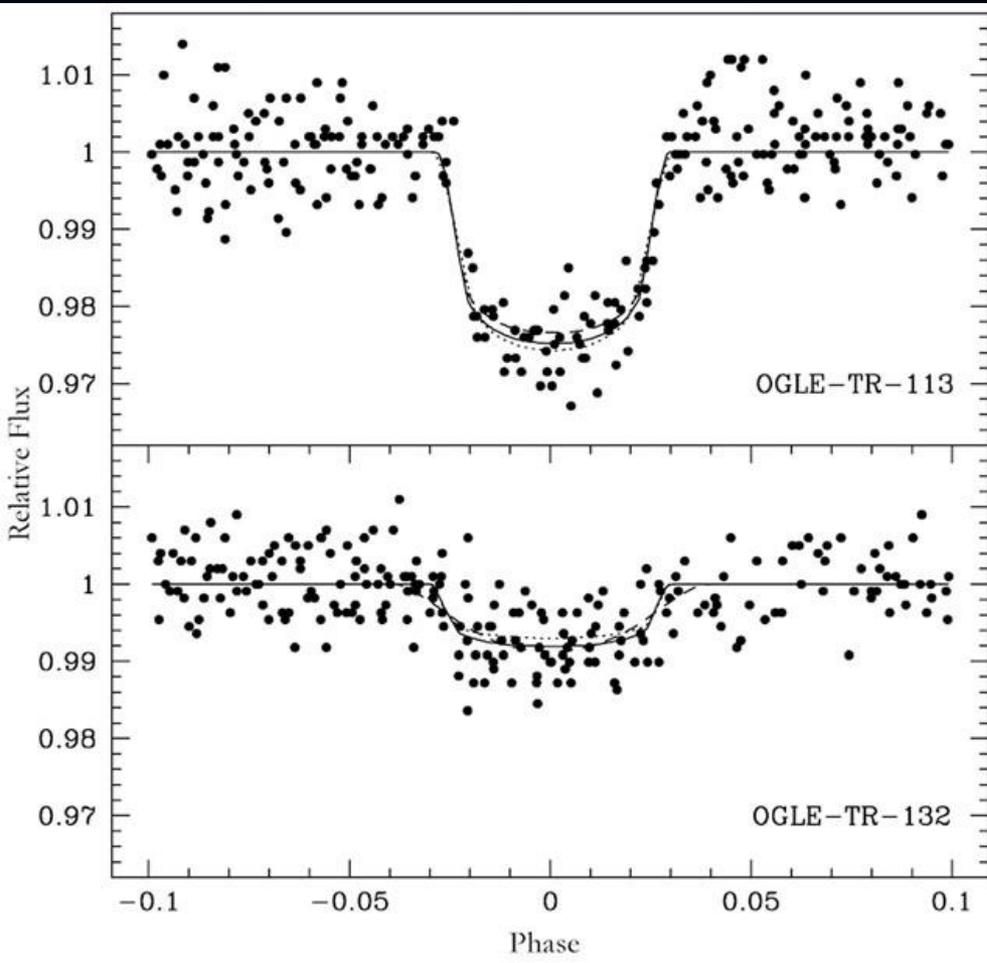
■ Franges de diffraction

➔ diamètre stellaire



Signaux simulés de l'occultation d'étoiles de diamètres différents avec une demi-largeur de bande passante de $0,05 \mu\text{m}$ et un télescope de 60 cm d'ouverture.
(D'après M. Froeschlé et C. Meyer).

Un signal qui vient de loin: les transits d'exoplanètes



Observations: ESO

CoRot

Que sont ces exo-planètes?

- Une abondance de planètes extra-solaires
- Peu de planètes similaires à la Terre... mais plus difficile à observer.
- Une candidate:

Gliese 581

distance à la Terre: 20 a.l.
étoile: naine rouge
distance à son étoile: 0,07 distance Terre-Soleil
« année » = 13 jours
diamètre = 1,5 rayons terrestres
gravité = 2,2 gravité terrestre
température: de 0° à 40°C
type: tellurique ou océane



Terre

Gliese 581
Distance from Earth = 20.5 ly
Atmosphere = Yes (composition unknown)
In Habitable Zone = Yes
Size = 1.5 x Earth
Gravity = 1.6 x Earth
Year = 13 Earth Days
Day = Tidlocked
Surface Temperature = 32 to 104 F
Distance from Sun = ~6642857 mi

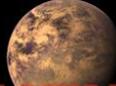
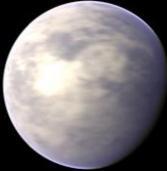
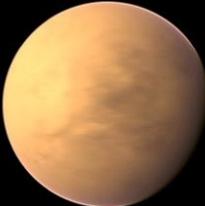
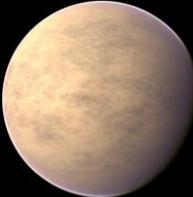
Gliese 581, its M2.5V class red dwarf sun, is 28% the size of Sol, but it would appear 20x larger than our full moon in Gliese 581's sky.

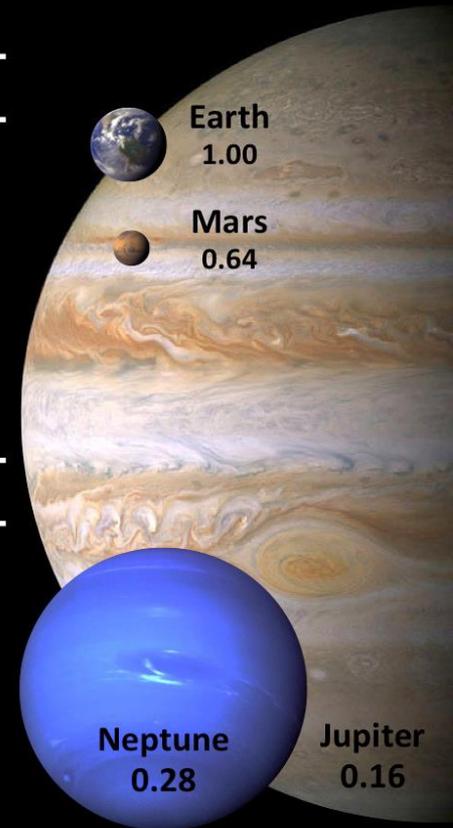


Gliese 581

Current Potentially Habitable Exoplanets

Ranked in Order of Similarity to Earth

#1	#2	#3	#4	#5	#6
				 NEW	
Kepler-62 e 0.83	Gliese 667C c 0.82	Gliese 581 g* 0.82	Tau Ceti e* 0.77	Gliese 667C f 0.76	Kepler-22 b 0.75
#7	#8	#9	#10	#11	#12
				 NEW	
Gliese 163 c 0.74	HD 40307 g* 0.72	Kepler-61 b 0.72	Kepler-62 f 0.67	Gliese 667C e 0.60	Gliese 581 d 0.53



*planet candidates

Number below the names is the Earth Similarity Index (ESI)

CREDIT: PHL @ UPR Arcibo (phl.upr.edu) June 26, 2013

Conclusion

- La méthode des occultations est très puissante car elle donne accès à des objets que l'on ne voit pas!

