



# Transits, éclipses et occultations

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

# Les phénomènes astronomiques

- Éclipse
- Occultation
- Transit
- ...

C'est une configuration particulière du système solaire qui donne lieu à un phénomène exceptionnel.

Tous les astres sont concernés et l'observation en est riche d'informations.

# 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*).

*Exemple: éclipse de Lune, éclipse des satellites de Jupiter*

**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*).

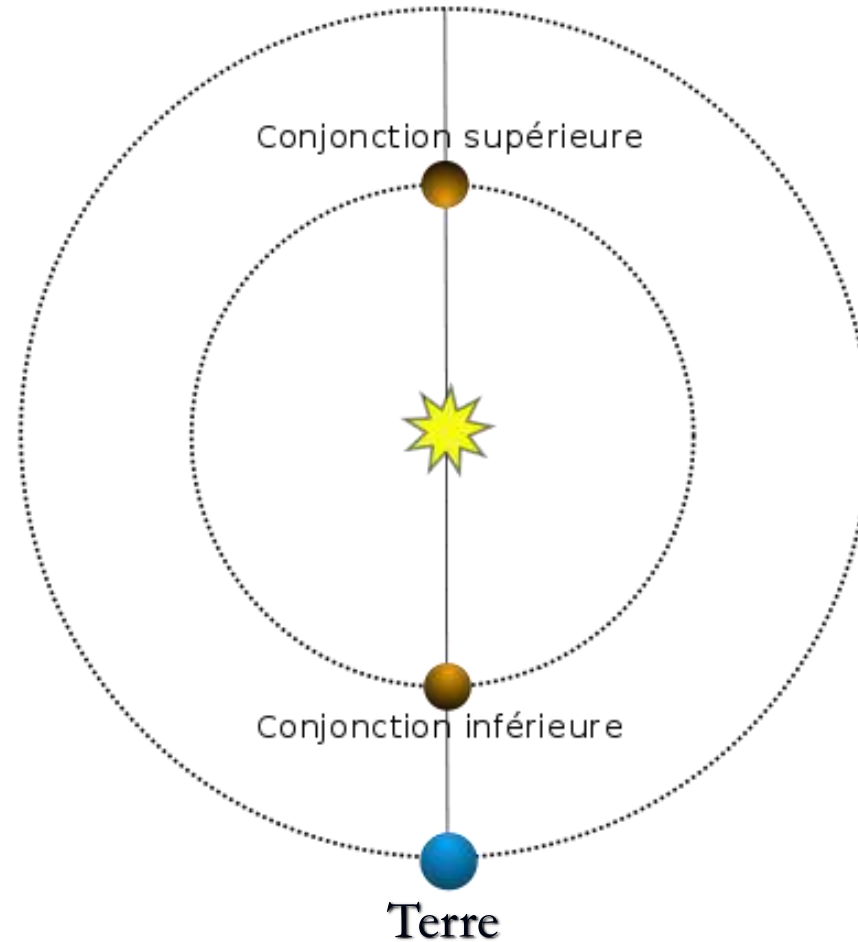
*Exemple: éclipse de Soleil, occultation d'étoiles par la Lune, par un astéroïde, occultation des satellites de Jupiter*

**Transit** : Passage d'un corps opaque devant un corps lumineux sans occultation totale provoquant la baisse de luminosité du corps occulté

*Exemple: transit de Vénus, de Mercure, des planètes extra solaires.*

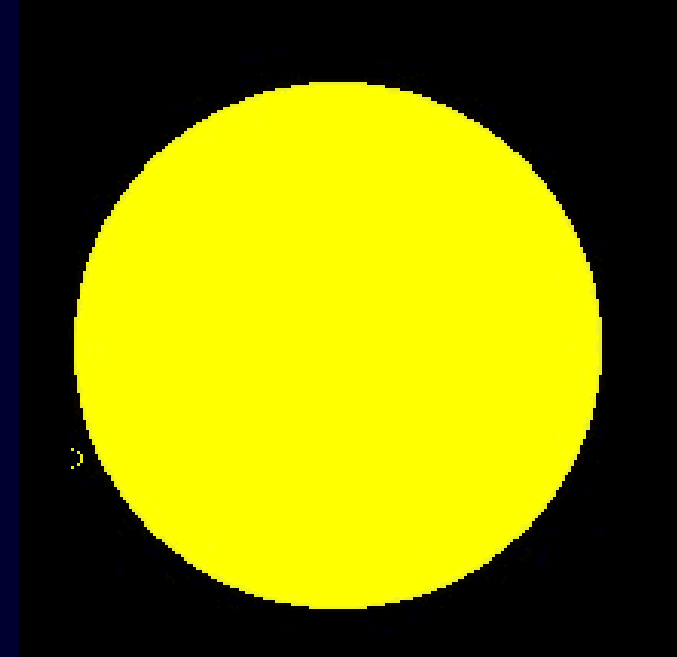
Cela implique une source lumineuse et deux corps opaques, un premier corps occultant l'arrivée de la lumière sur le second, et aussi un observateur!

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

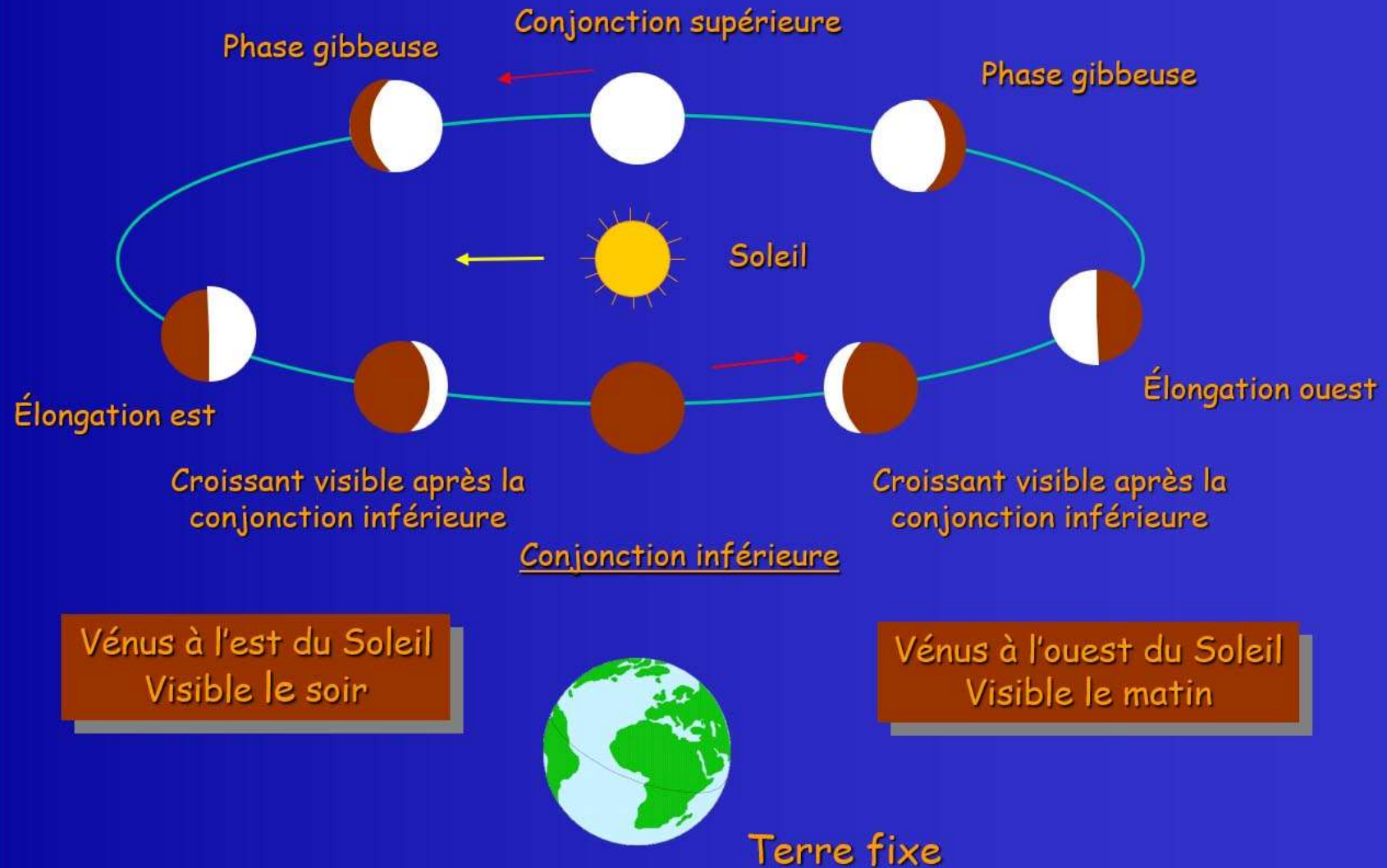


# Quand peut-on observer les passages de Vénus (ou de Mercure) ?

- Si Vénus et le Soleil sont parfaitement alignés, Vénus apparaît sur le disque solaire comme dans le cas d'une éclipse partielle de Soleil par la Lune (durée ~ 8 heures)
- Mais ces passages sont très rares... :
  - derniers en 1874-1882, puis 2004
  - puis 2004-2012, puis pas avant 2117
- Seul celui de 2004 est complètement visible depuis la France
- Mercure passe plus souvent devant le Soleil mais est plus difficile à observer avec une parallaxe plus faible car plus loin

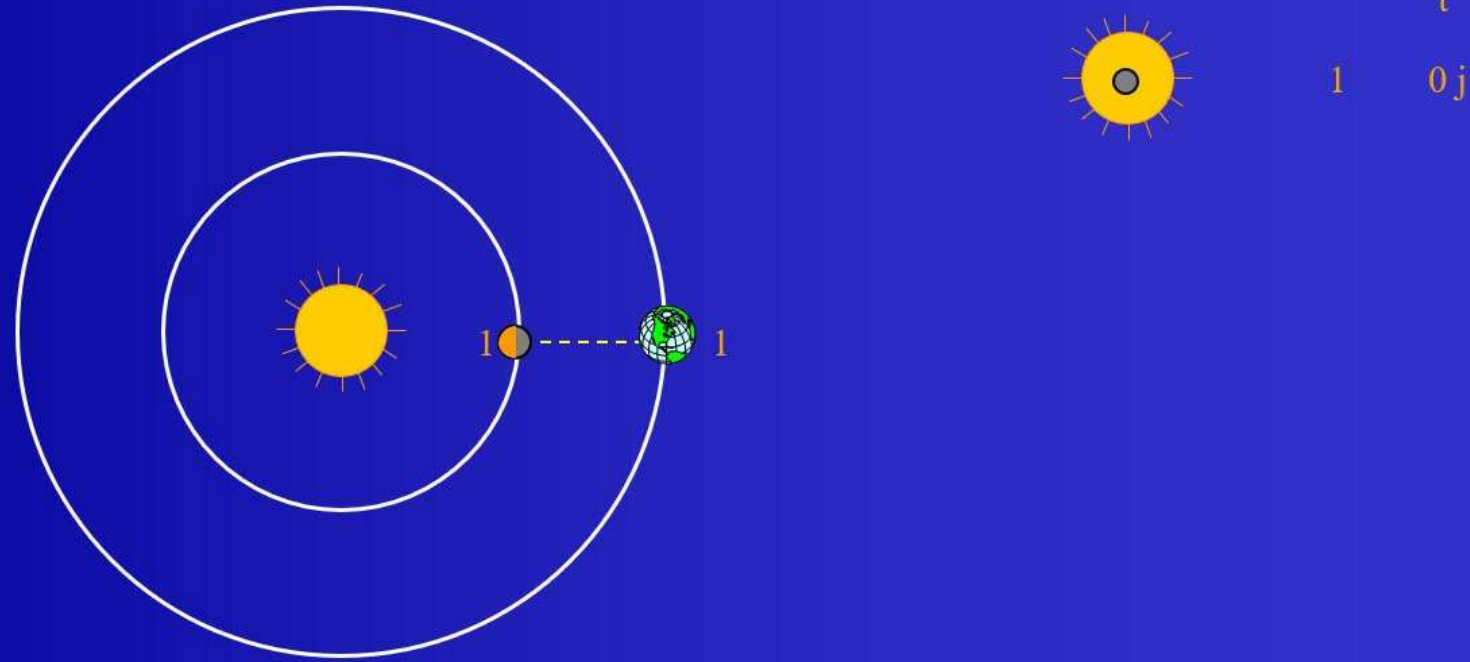


# Visibilité de Vénus (et de Mercure)



# Mouvement de la Terre et de Vénus

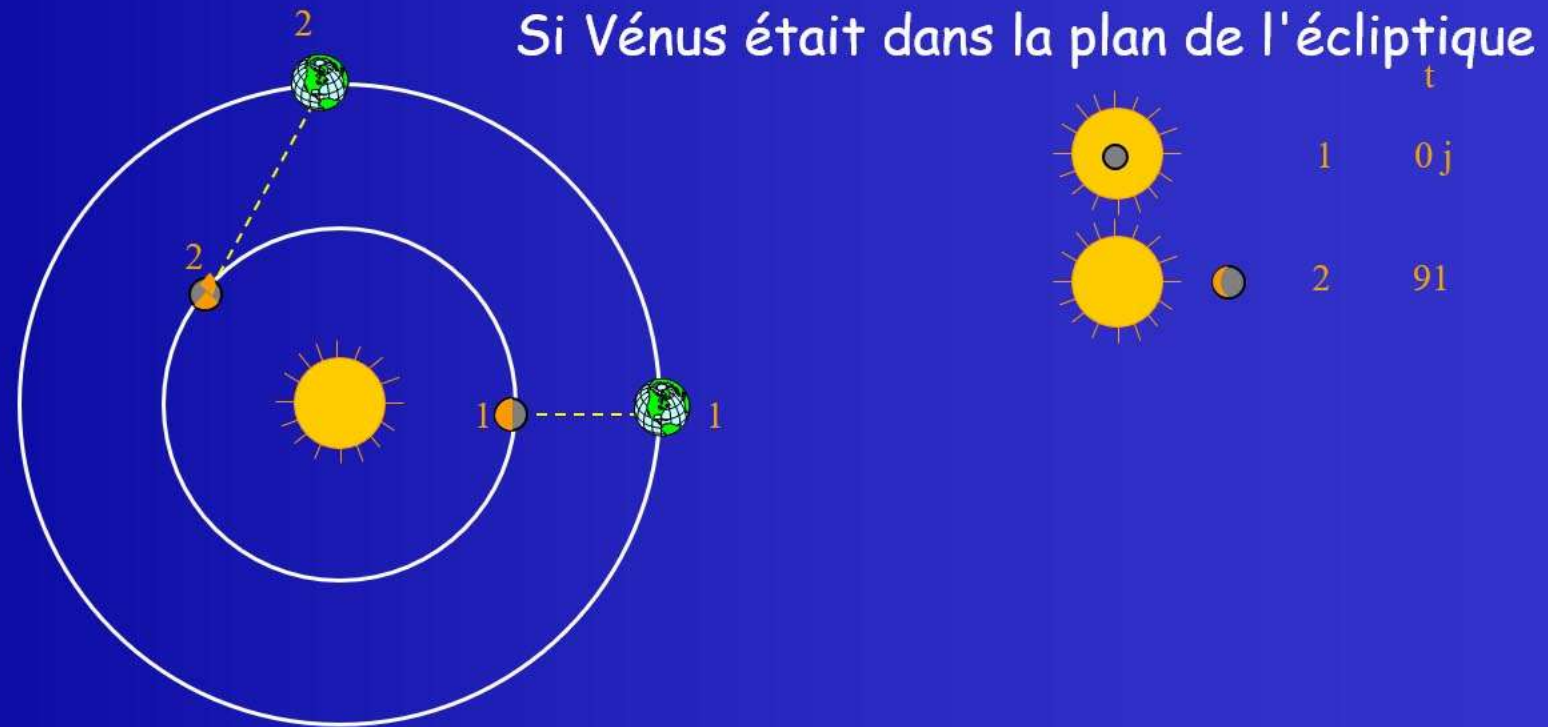
Si Vénus était dans la plan de l'écliptique



Terre	365.25 j
Vénus	224.70 j
R. Synodique	583.92 j



# Mouvement de la Terre et de Vénus

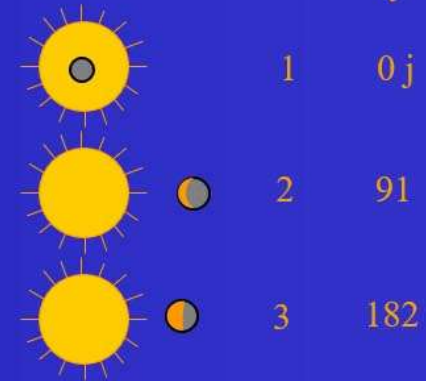
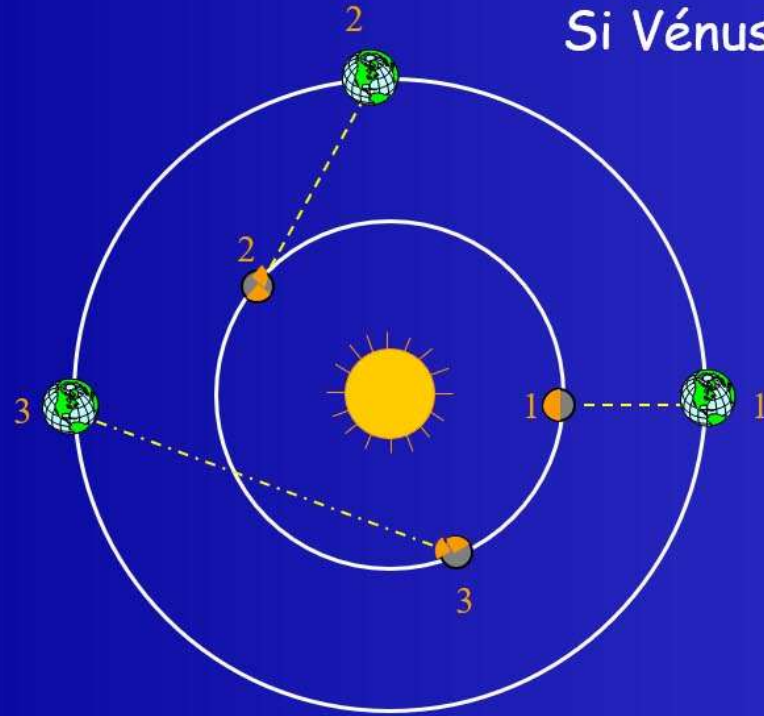


Terre	365.25 j
Vénus	224.70 j
R. Synodique	583.92 j



# Mouvement de la Terre et de Vénus

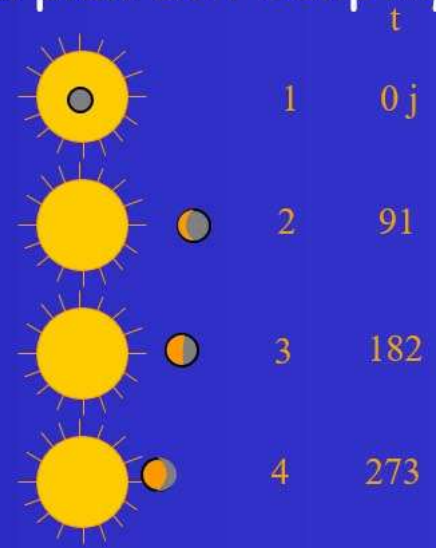
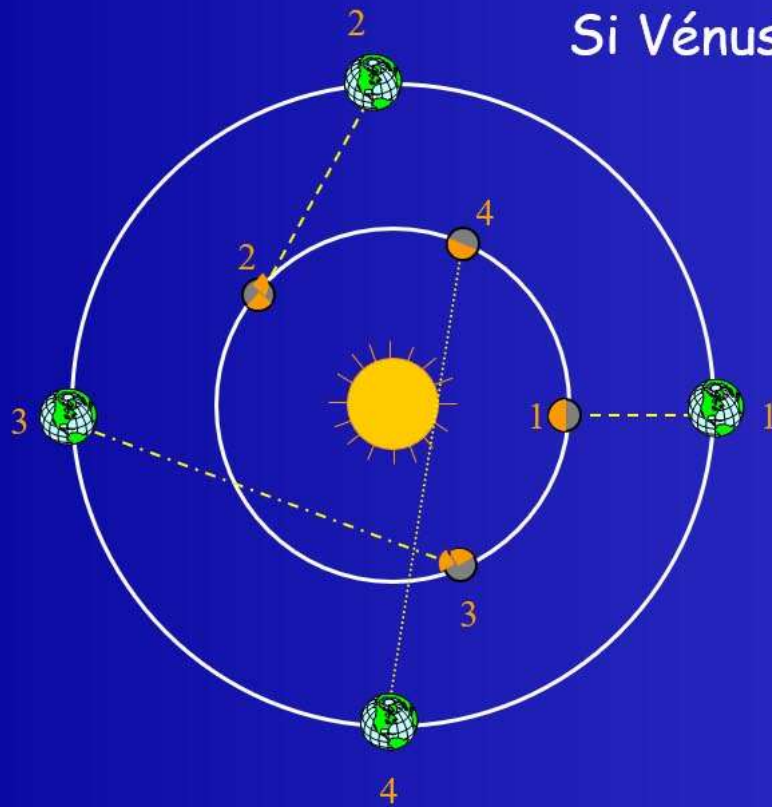
Si Vénus était dans la plan de l'écliptique



Terre	365.25 j
Vénus	224.70 j
R. Synodique	583.92 j

# Mouvement de la Terre et de Vénus

Si Vénus était dans le plan de l'écliptique

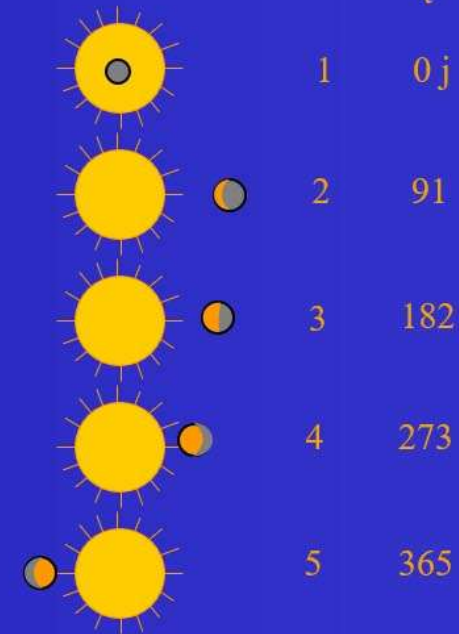
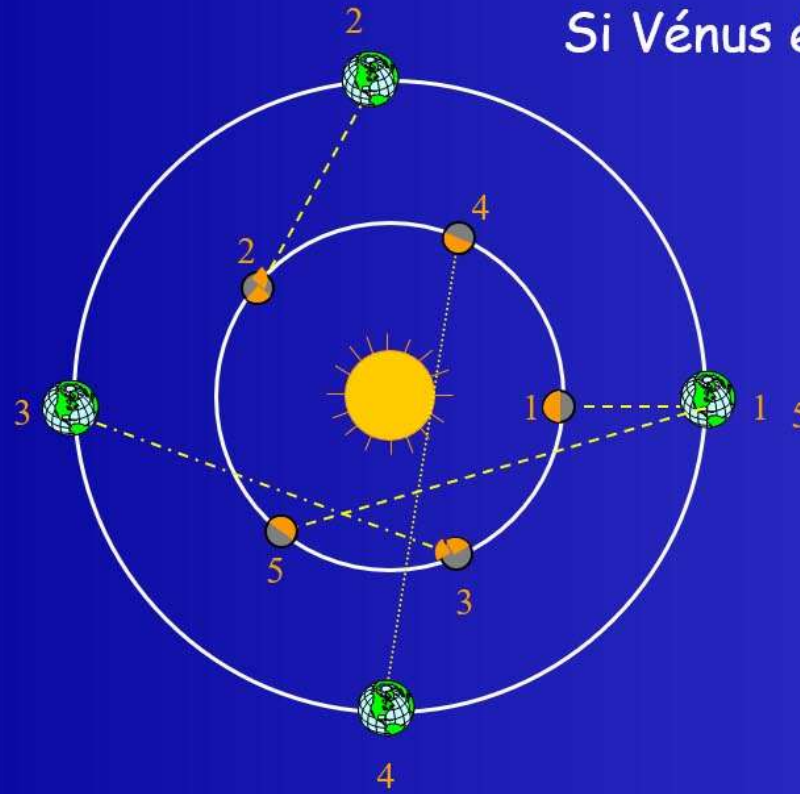


		t
1	0 j	
2	91	
3	182	
4	273	

Terre	365.25 j
Vénus	224.70 j
R. Synodique	583.92 j

# Mouvement de la Terre et de Vénus

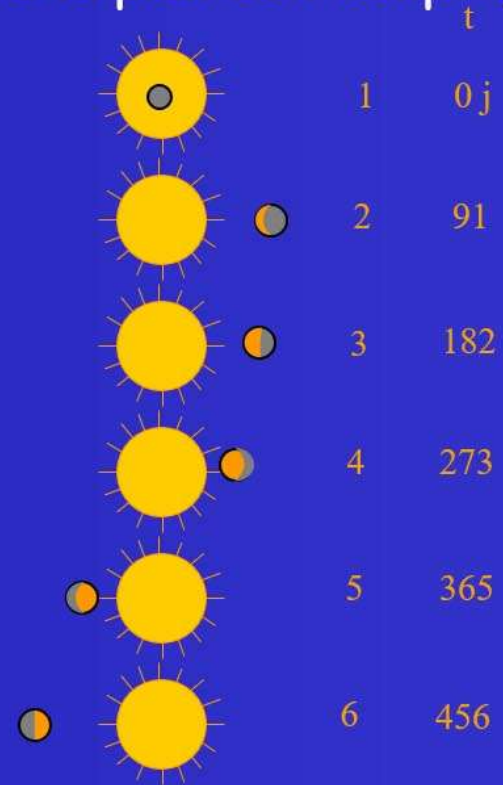
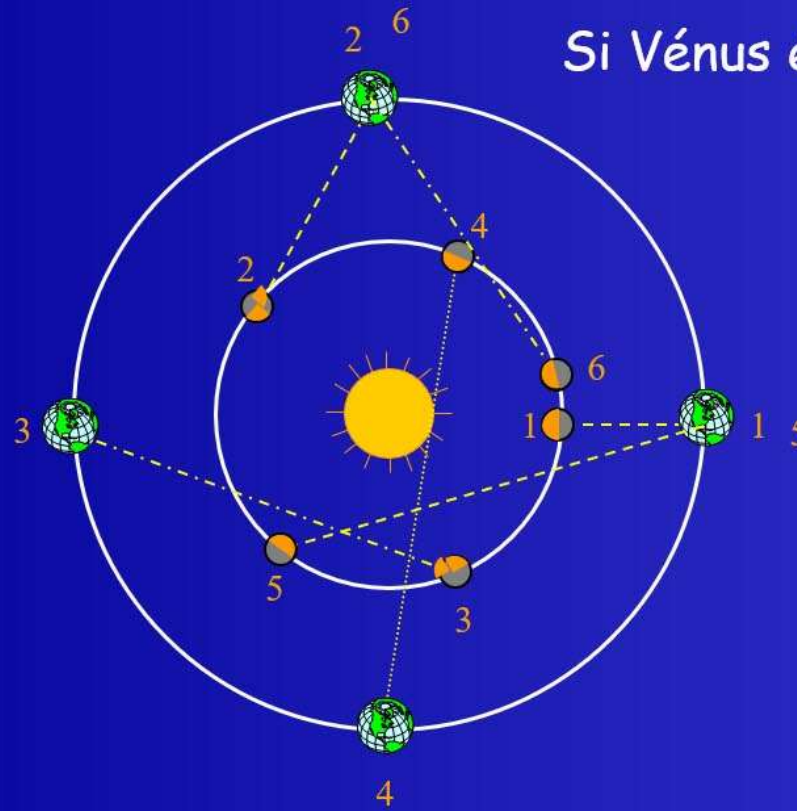
Si Vénus était dans la plan de l'écliptique



Terre	365.25 j
Vénus	224.70 j
R. Synodique	583.92 j

# Mouvement de la Terre et de Vénus

Si Vénus était dans le plan de l'écliptique

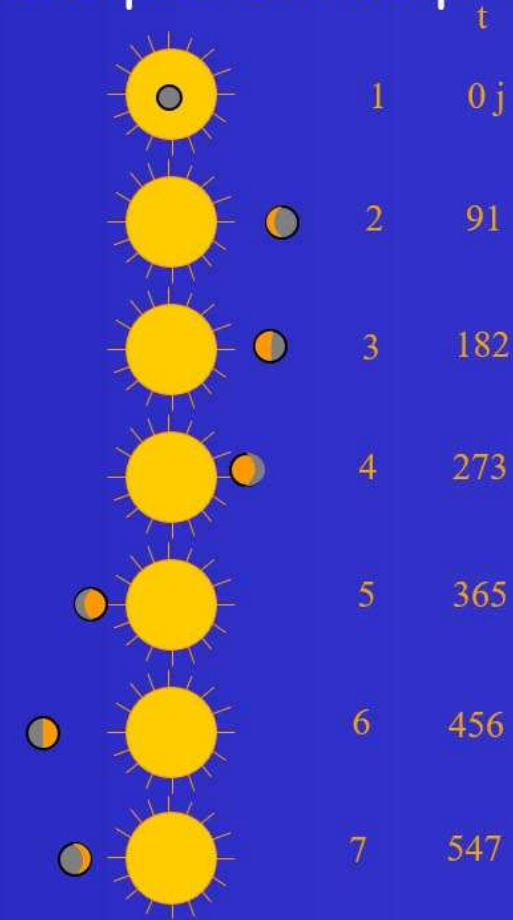
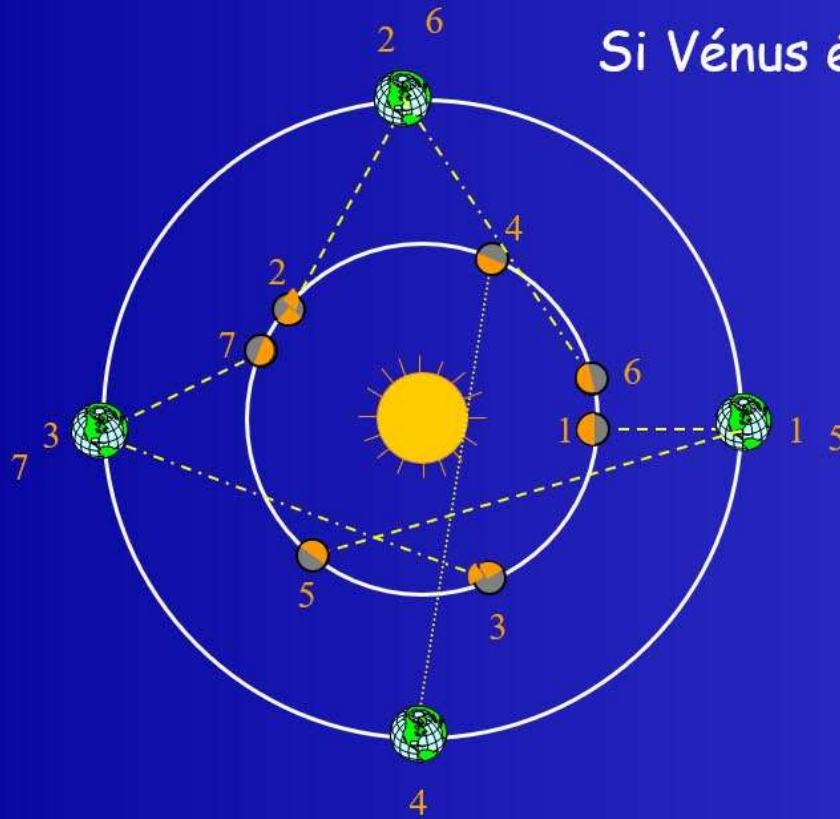


Terre	365.25 j
Vénus	224.70 j
R. Synodique	583.92 j



# Mouvement de la Terre et de Vénus

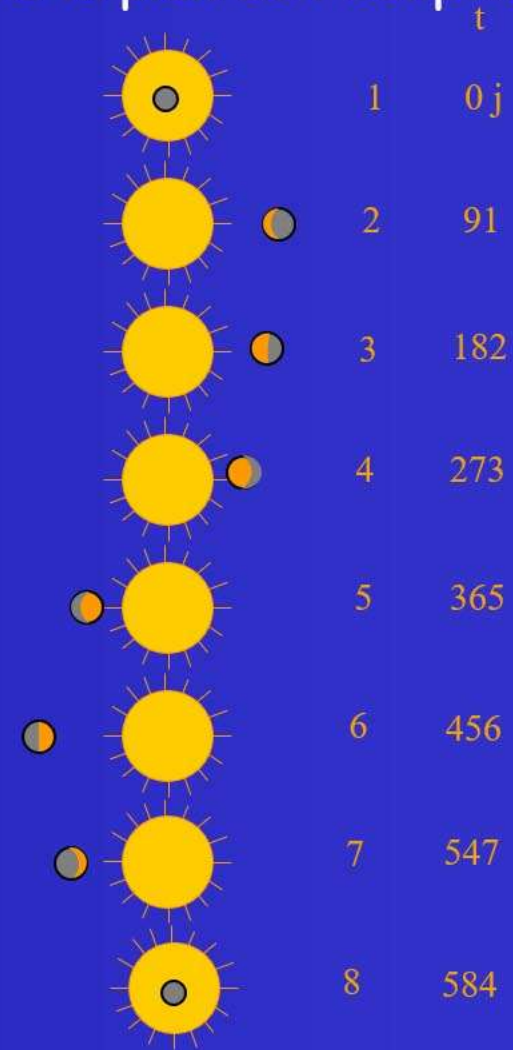
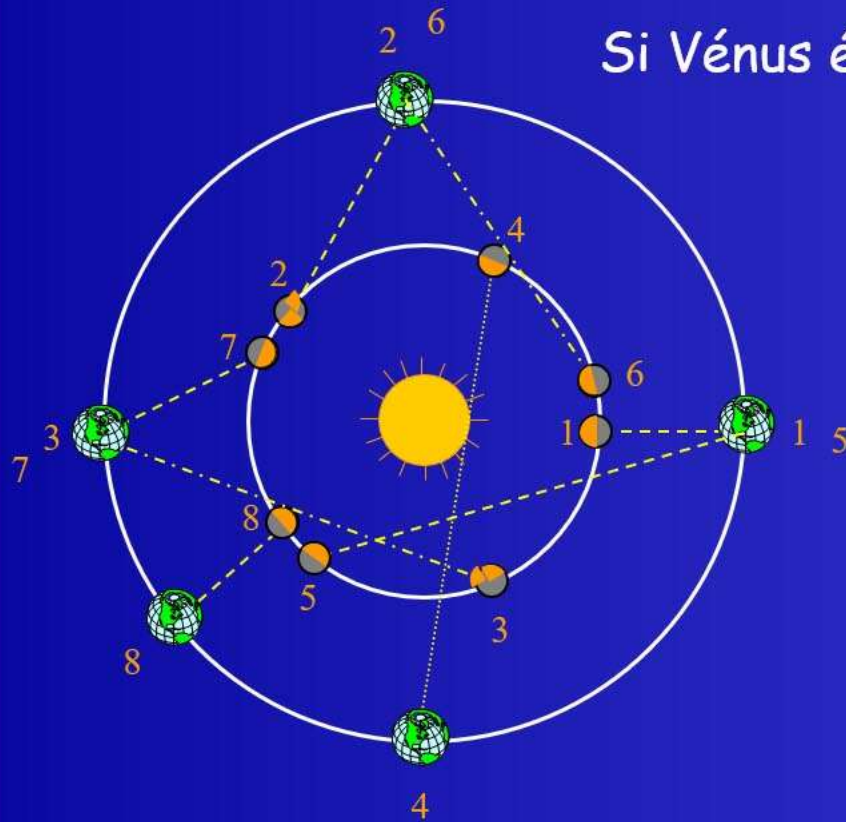
Si Vénus était dans le plan de l'écliptique



Terre	365.25 j
Vénus	224.70 j
R. Synodique	583.92 j

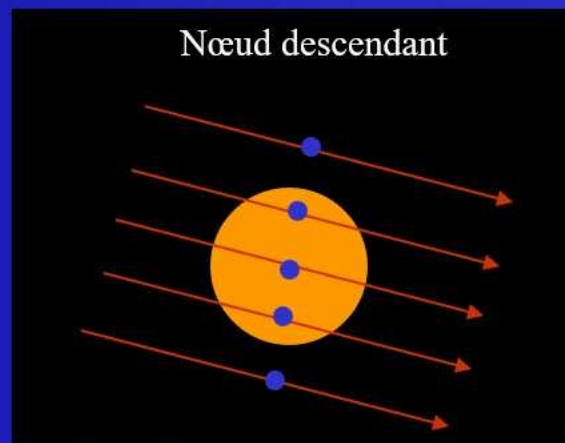
# Mouvement de la Terre et de Vénus

Si Vénus était dans le plan de l'écliptique

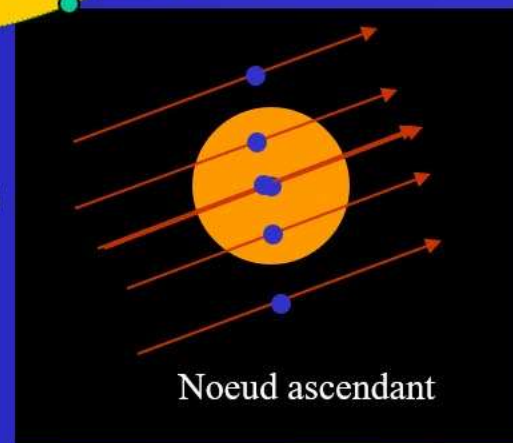
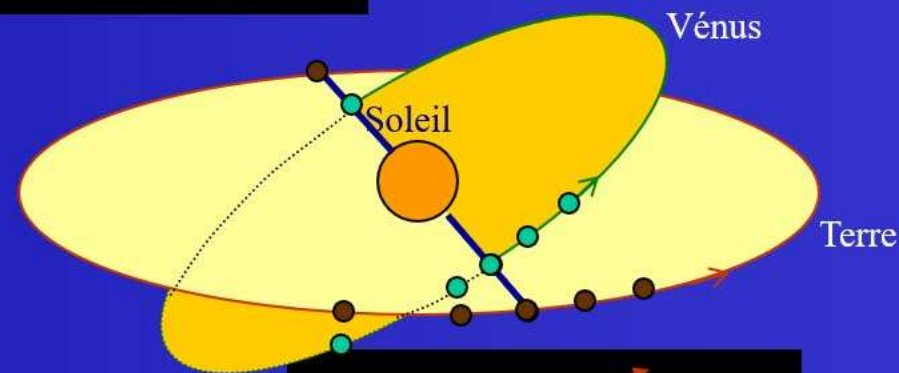


Terre	365.25 j
Vénus	224.70 j
R. Synodique	583.92 j

# Une petite complication pour Vénus



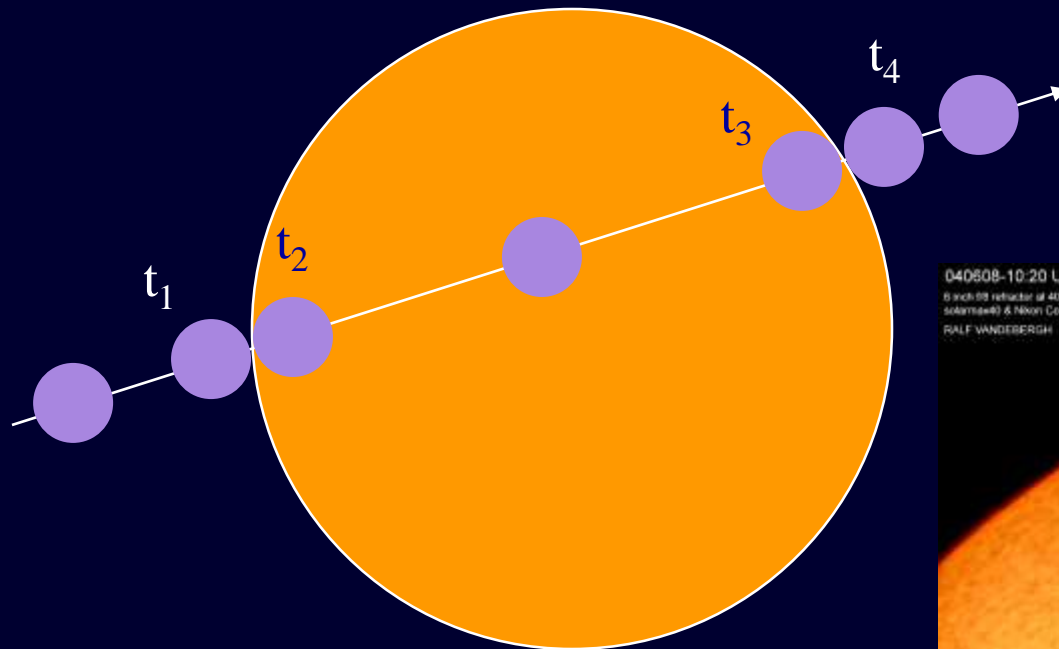
- Inclinaison de l'orbite =  $3.4^\circ$
- Passage de la Terre aux nœuds :
  - 7 décembre
  - 5 juin
- Conditions pour un passage :
  - alignement Soleil - Vénus - Terre (584 j)
  - au voisinage du nœud
- Combinaison très rare



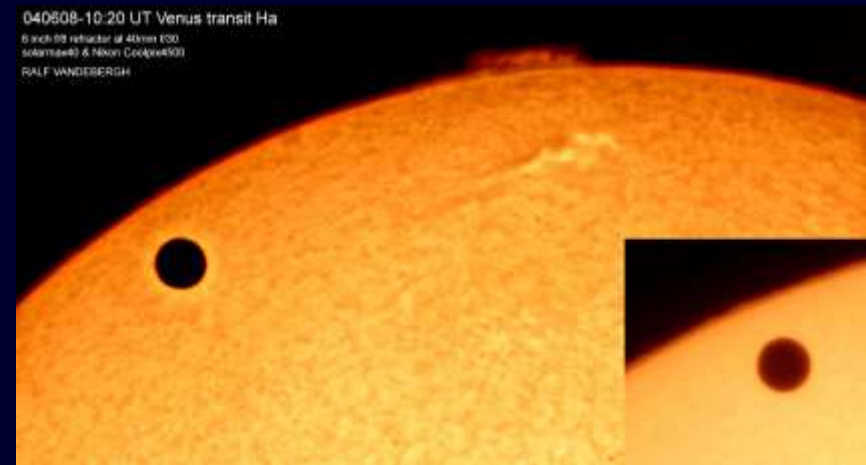


# Les passages ou transits de Vénus?

- Un phénomène rare: 1639, 1761, 1769, 1874, 1882, 2004, 2012
- Une opportunité pour mesurer facilement la distance Terre-Soleil (ua)
- Une chaîne de procédures scientifiques de l'observation au calcul

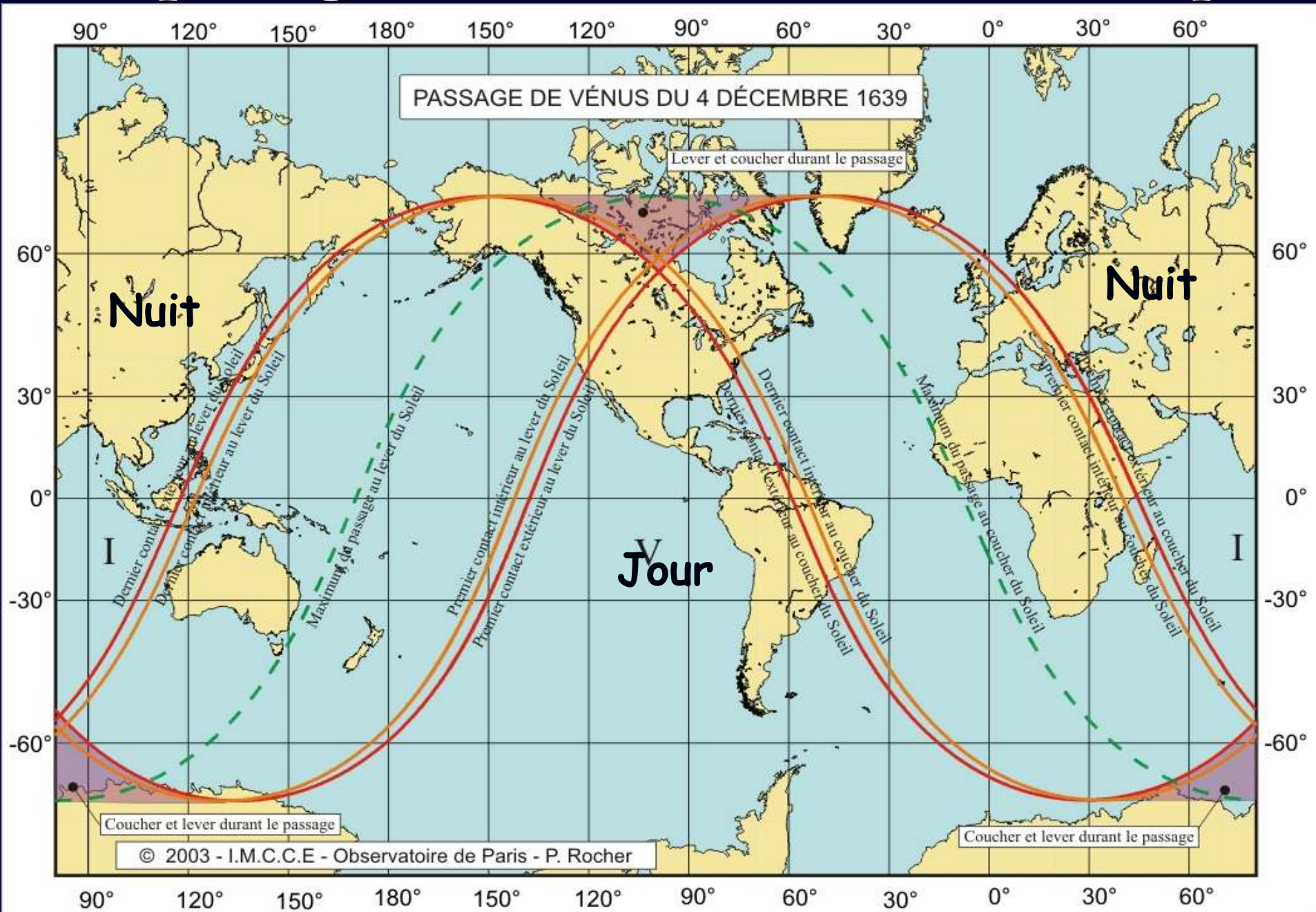


$t_1$  : 1<sup>e</sup> contact  
 $t_2$  : 2<sup>e</sup> contact  
 $t_3$  : 3<sup>e</sup> contact  
 $t_4$  : 4<sup>e</sup> contact



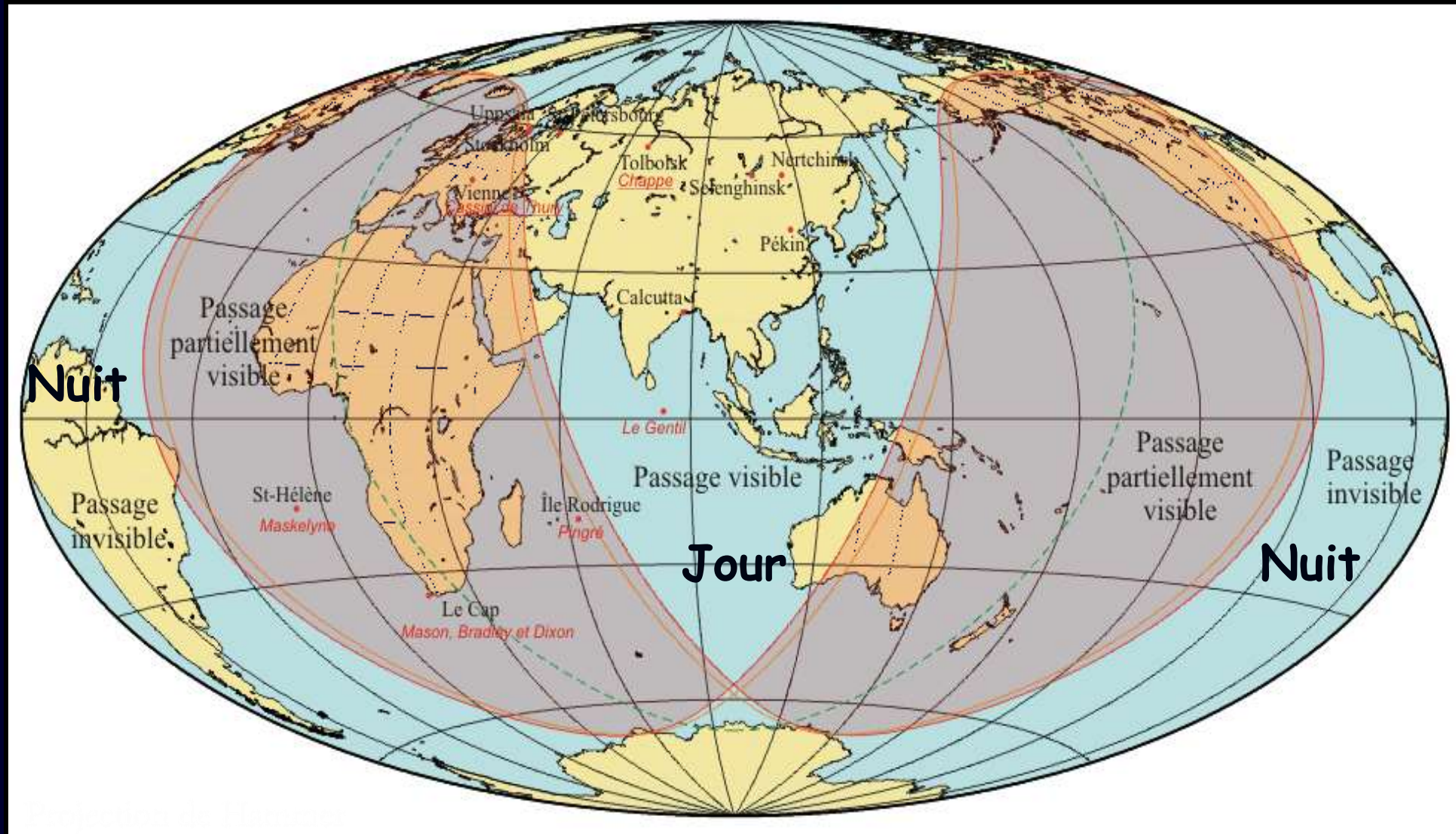
Observer c'est mesurer l'instant des contacts en Temps Universel

# Un passage difficilement visible en Europe





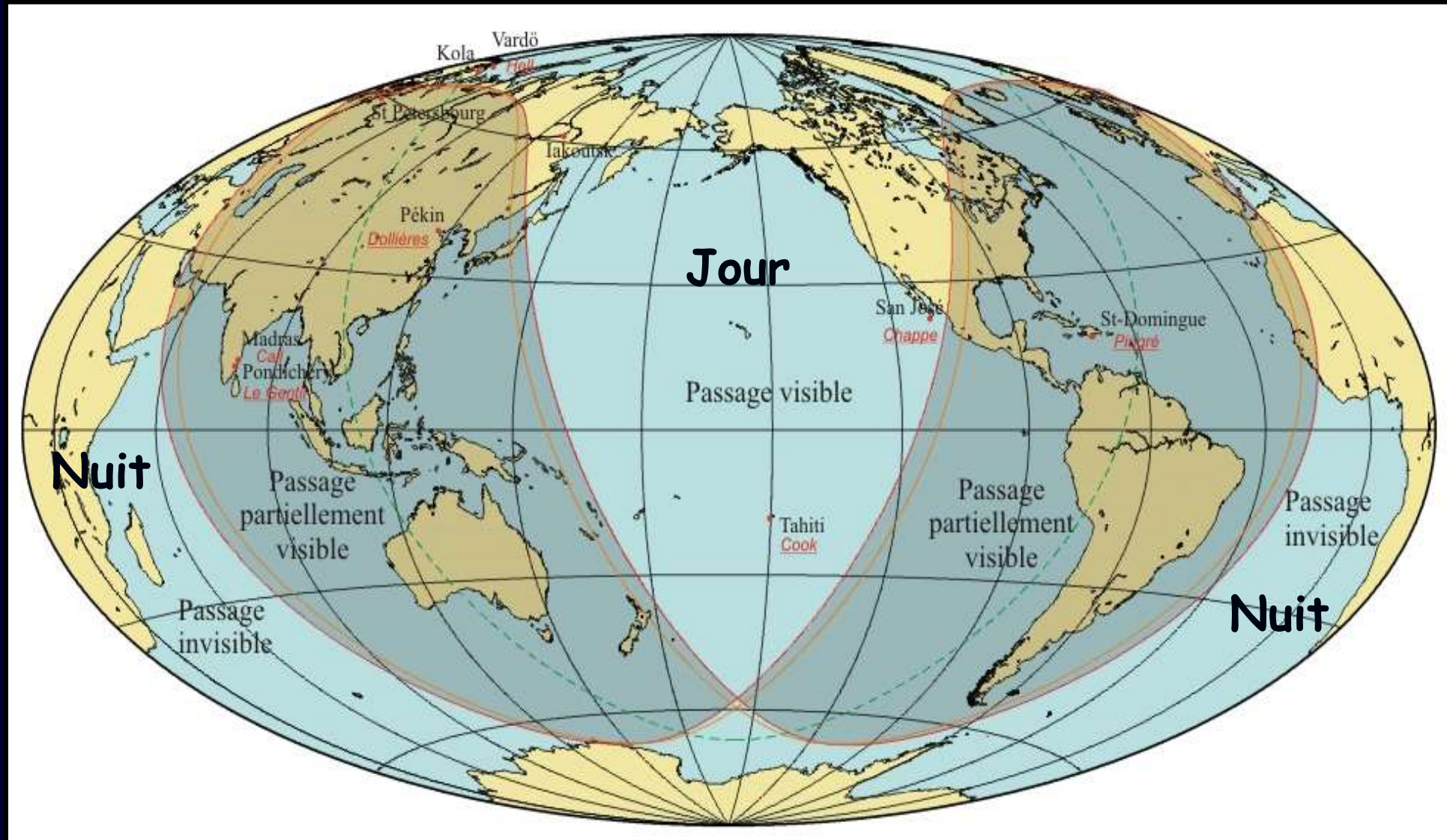
# Visibilité du passage du 6 juin 1761



XVIIIème siècle: la mobilisation générale pour mesurer l'univers!



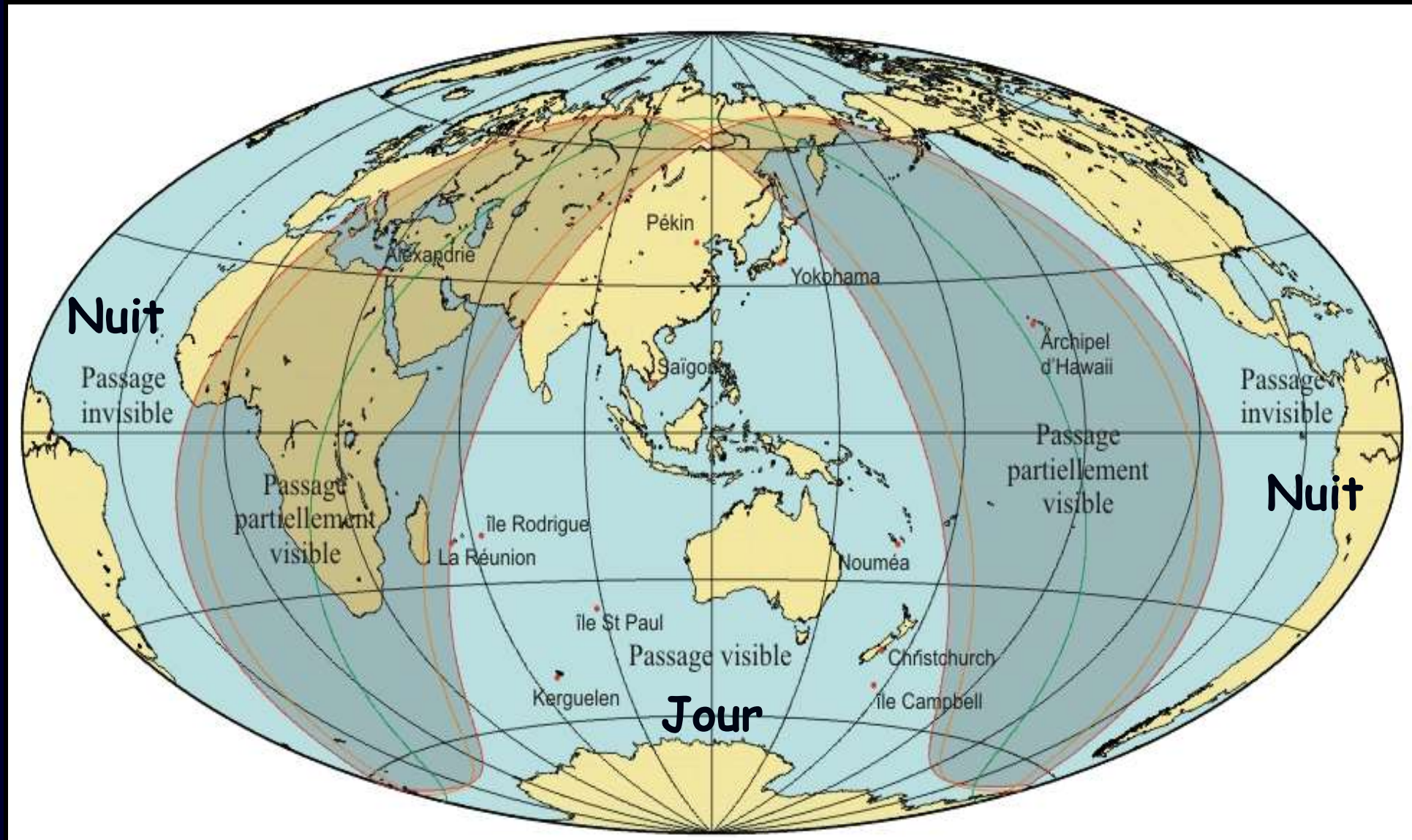
# Visibilité du passage de 1769



Toujours la nécessité de voyages lointains

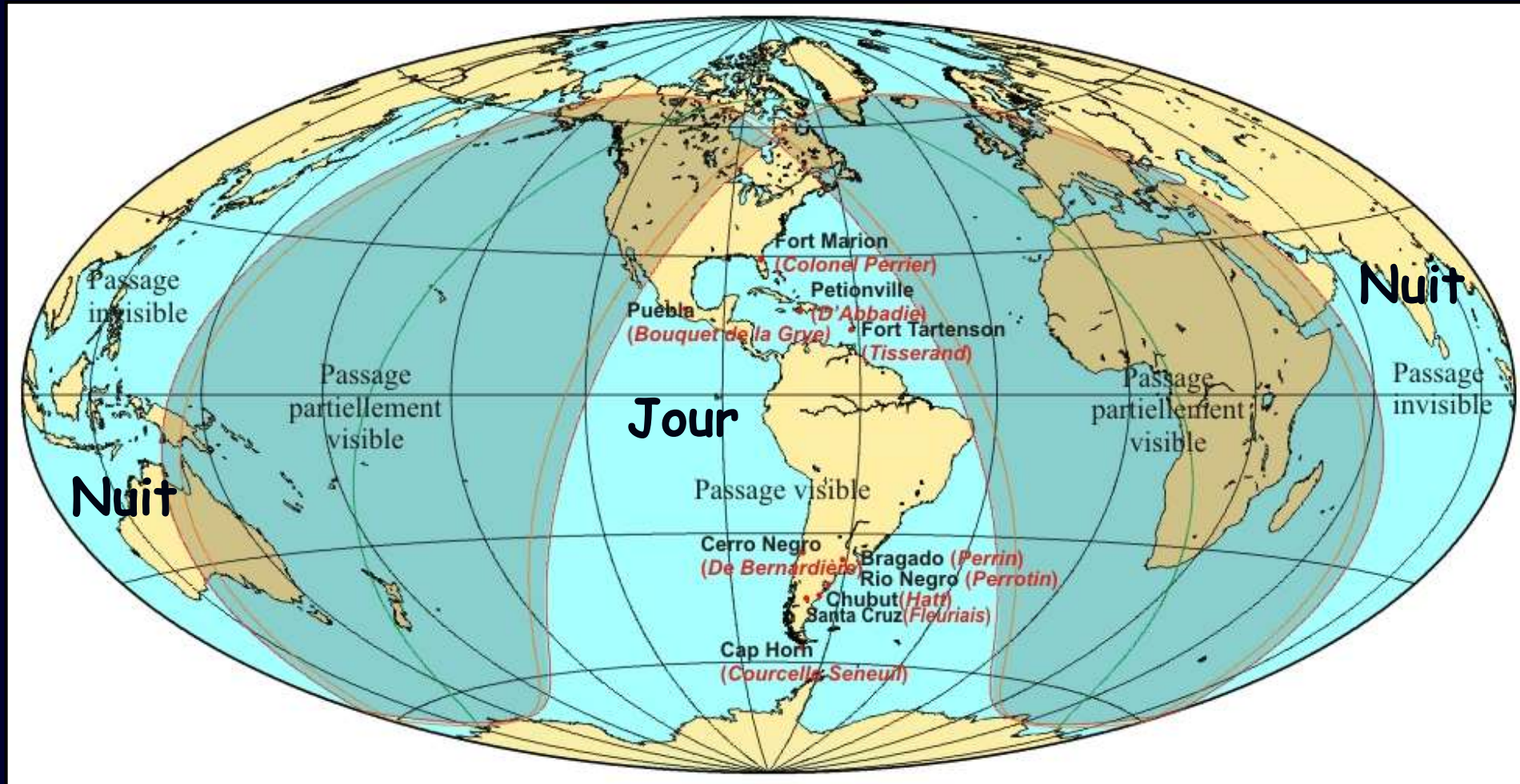


# Le passage du 9 décembre 1874





# Le passage du 6 décembre 1882

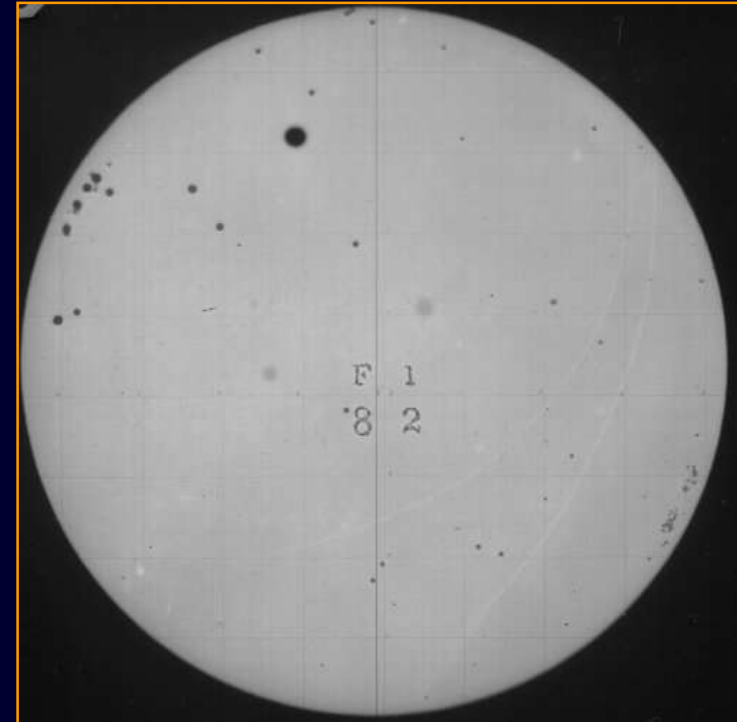


On sait que désormais le passage de Vénus ne sera plus suffisant pour améliorer la détermination de la distance Terre-Soleil

# Les images des passages de Vénus



Daguerréotype



Cliché photographique

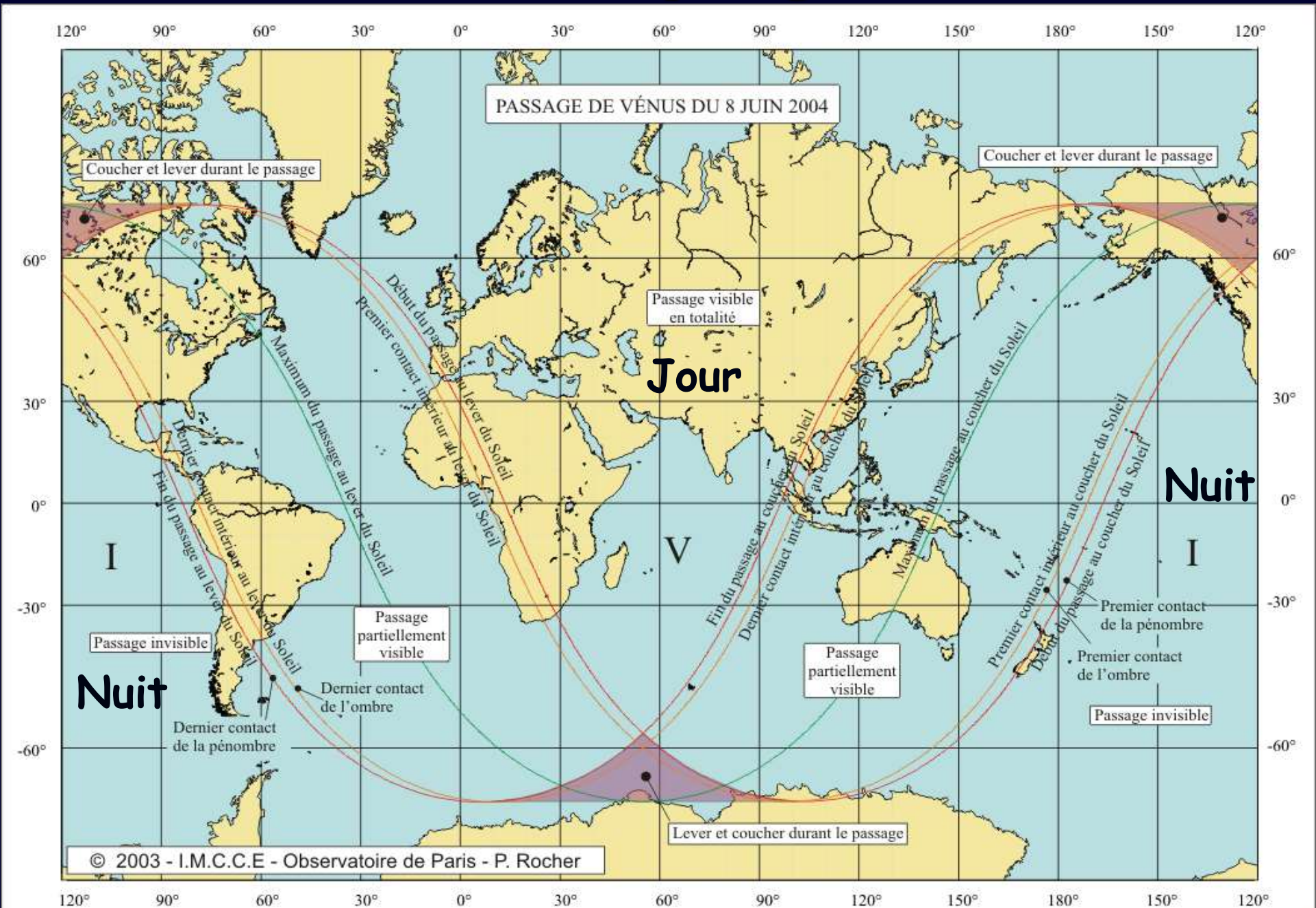
Seuls nous sont parvenus quelques clichés réalisés en 1874 et 1882



# Les mesures de la distance Terre - Soleil

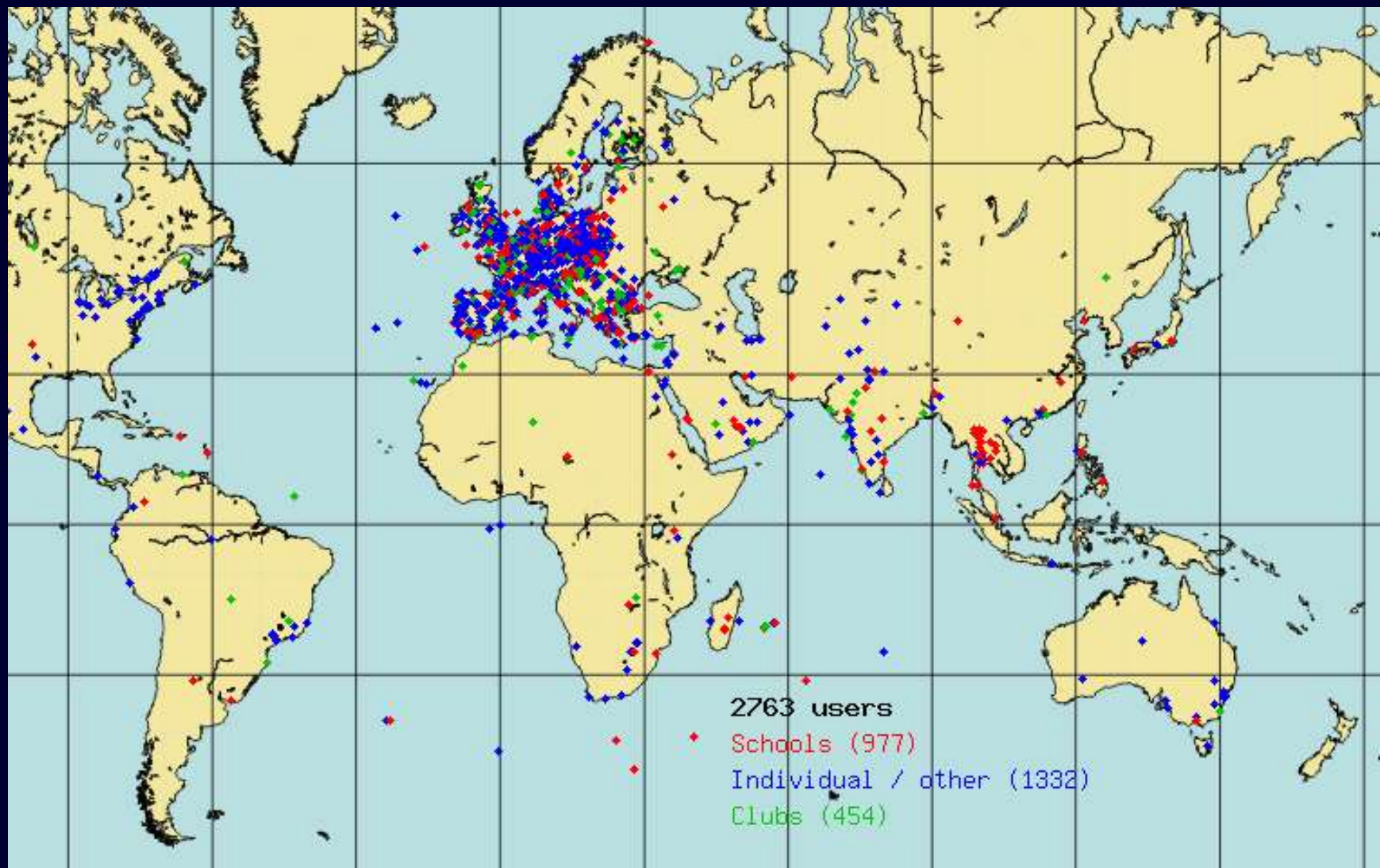
Méthode	date	parallaxe "	distance millions km
Mars	1672	9.5 - 10	130 -140
Vénus	1761	8.3 - 10.6	125 - 160
Vénus	1769	8.5 - 8.9	145 - 155
Mars	1862	8.84	149
Flora	1875	8.87	148
Mars	1885	8.78	150
Vénus	1874 - 82	8.790-8.880	148.1 - 149.7
Éros	1900	8.806	149.4
Eros	1930	8.790	149.7
radar	1970	8.79415	149.5978
Viking+radar	2000		149.597870691

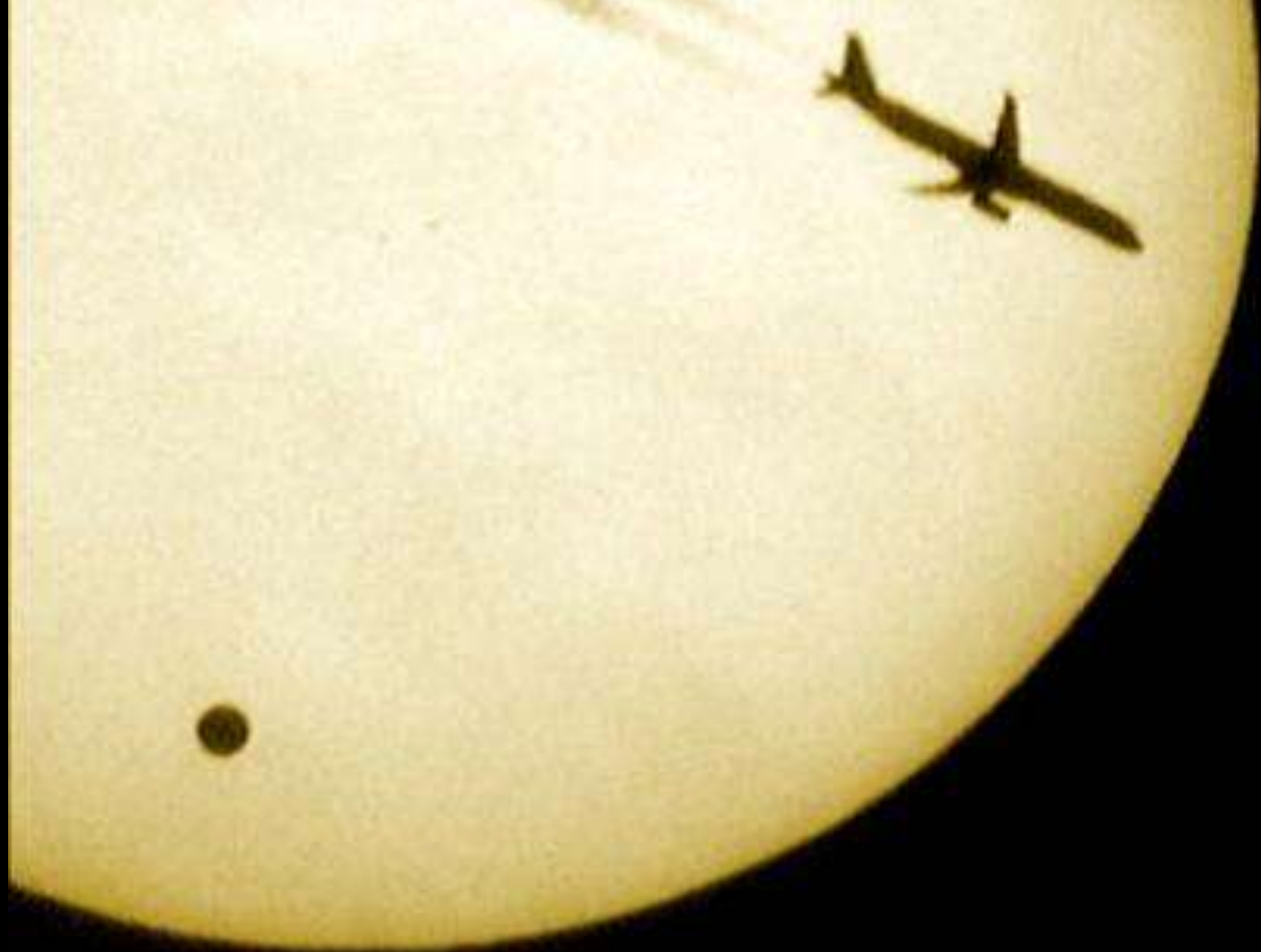
# Carte de visibilité du passage de Vénus de 2004





## Au XXIème siècle: le réseau international VT-2004





Le passage de Vénus en 2004

# Passage de Vénus



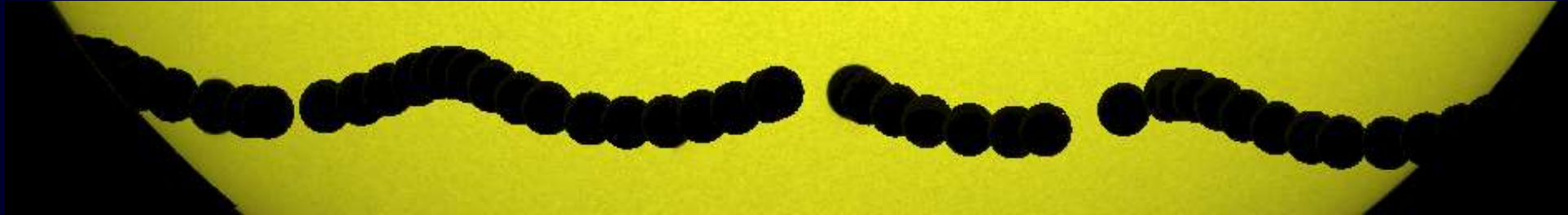
2 passages par siècle: le dernier en 2012,  
le prochain en 2117

# Passage de Mercure



Passages plus nombreux: les derniers en  
2003, 2006, 2016, visible en Europe, puis  
2019

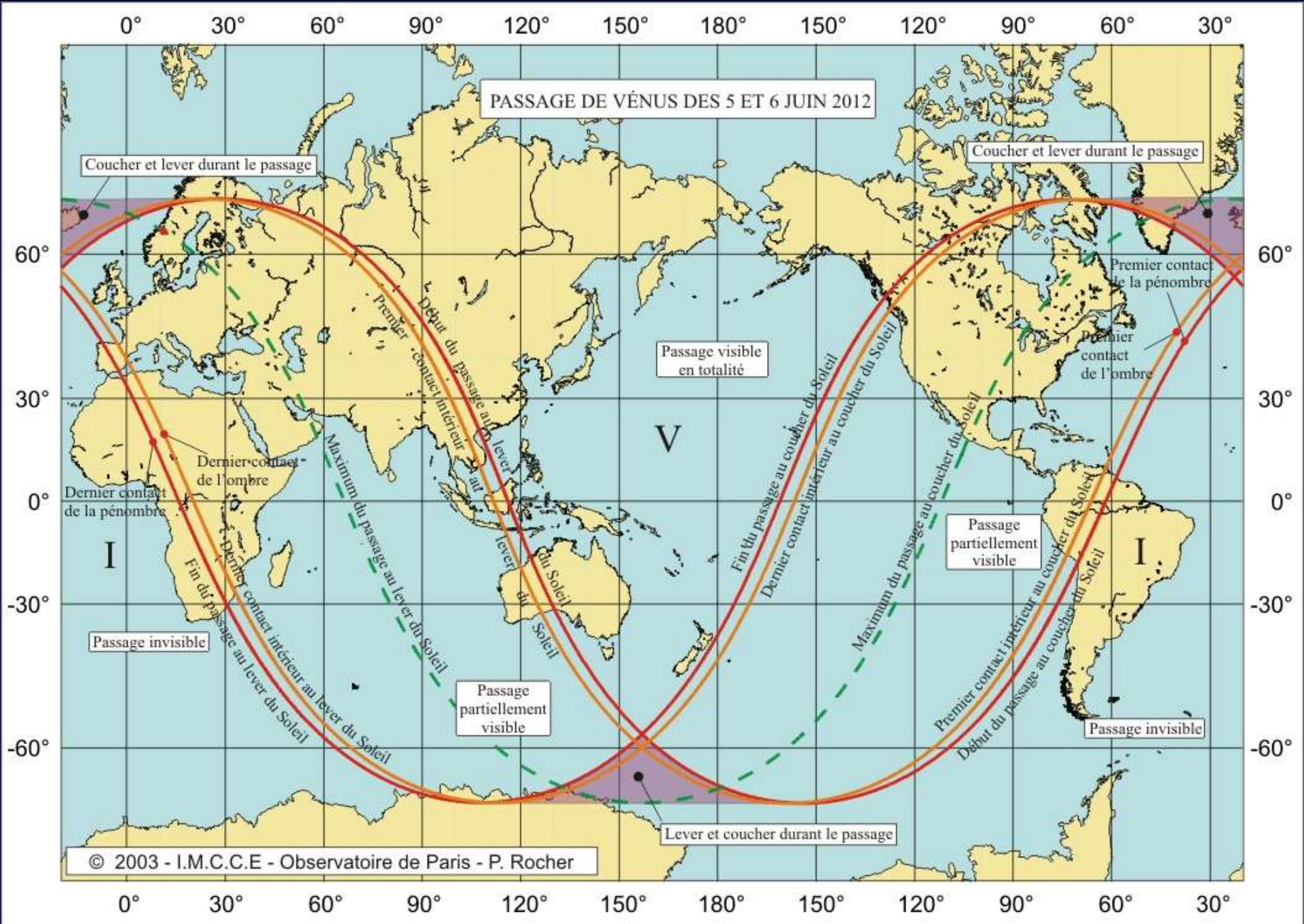
# Les images de TRACE



Le mouvement rapide de TRACE autour de la Terre montre bien l'effet de parallaxe

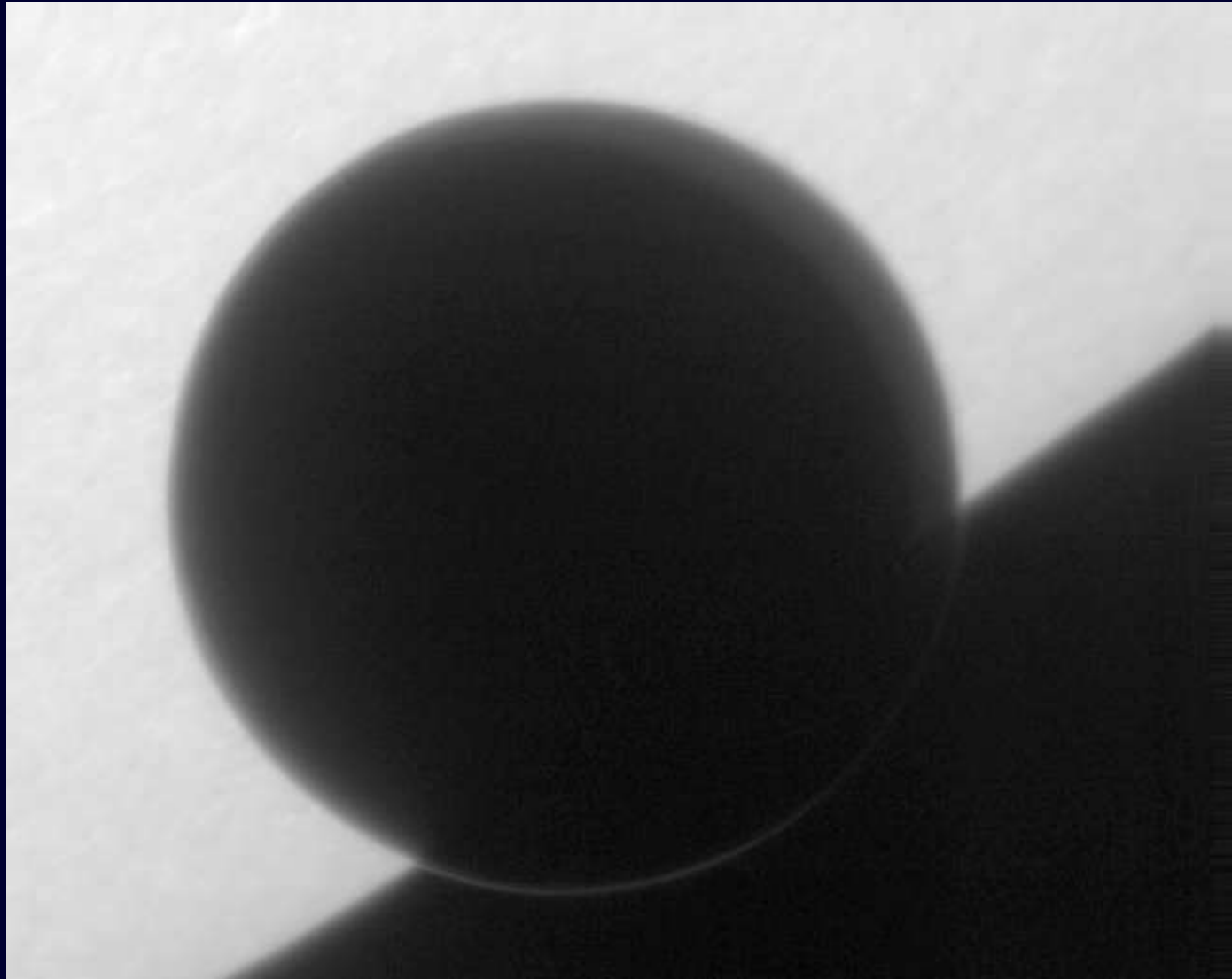


# Le passage du 6 juin 2012

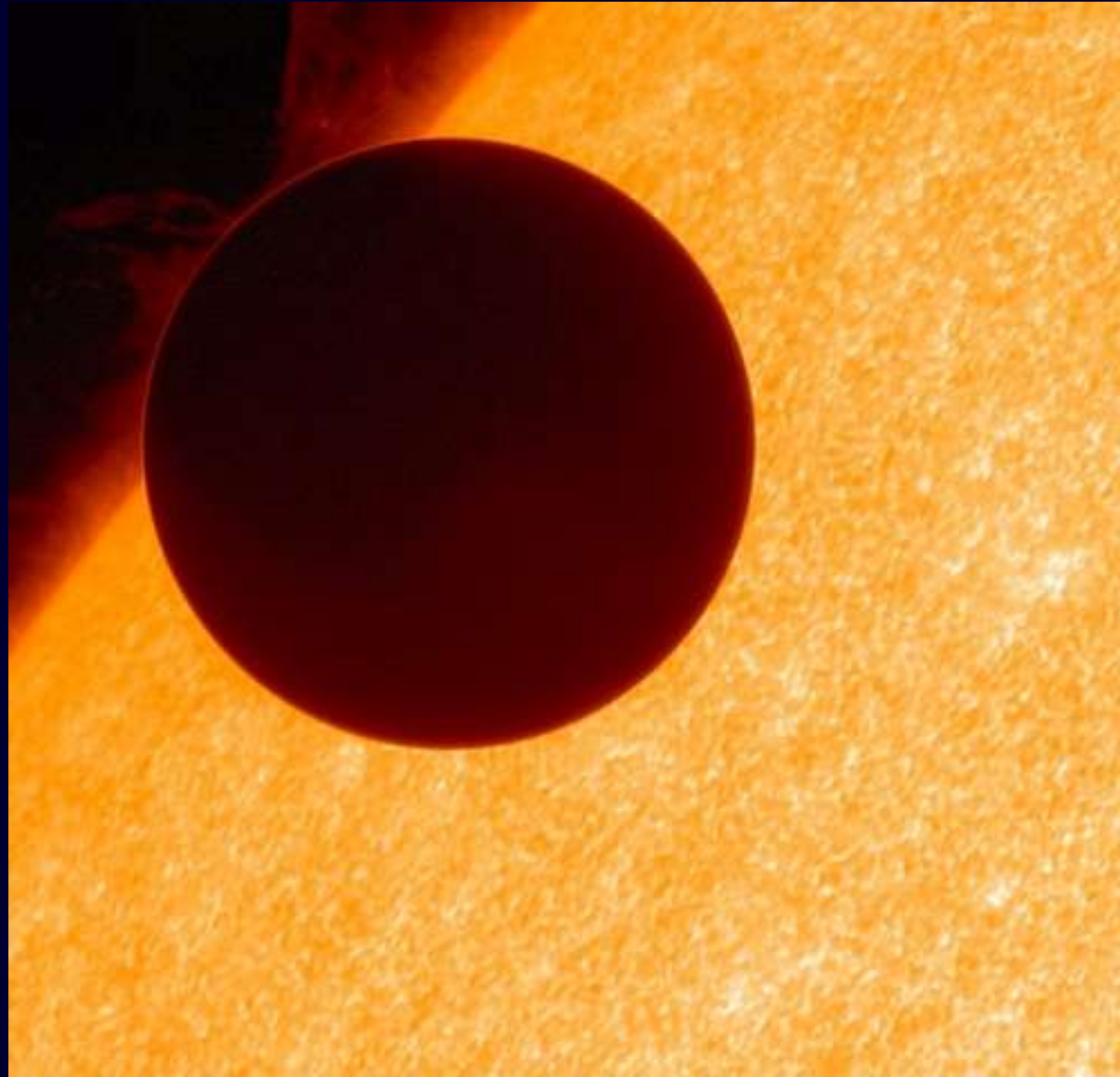




# L'atmosphère de Vénus dévoilée



# Observation du satellite japonais Hinode



# Un transit extraterrestre!

- Les passages d'un astre devant le Soleil (éclipse de Soleil, transit de Vénus ou de Mercure) sont observables depuis d'autres planètes.
- Un transit d'un satellite de Jupiter devant le Soleil donne une éclipse du satellite vue de la Terre.
- Un transit d'un satellite de Mars devant le Soleil n'est visible que depuis Mars.

# Phobos devant le Soleil

# Phobos devant le Soleil



# Phobos devant le Soleil



# Phobos devant le Soleil





# Phobos devant le Soleil



# Phobos devant le Soleil



# Phobos devant le Soleil



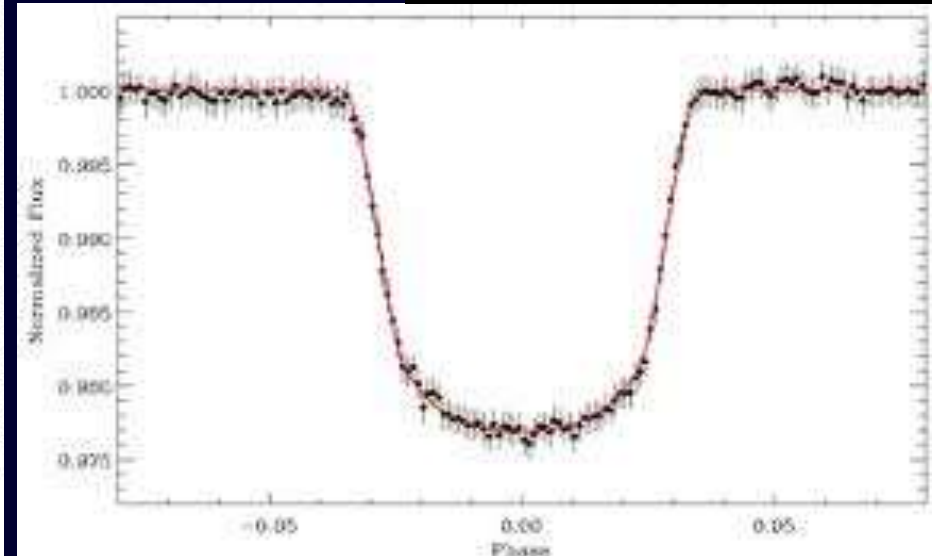
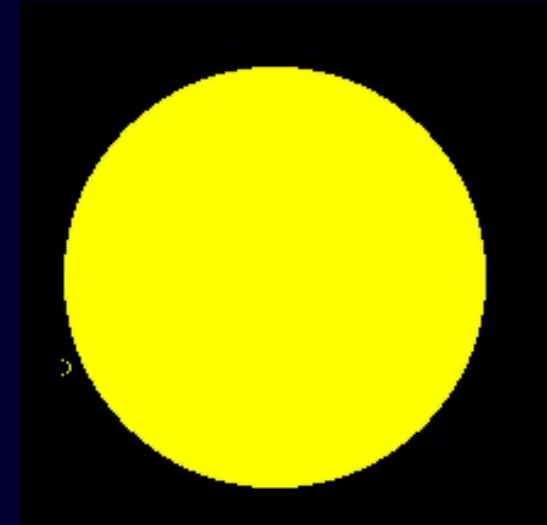
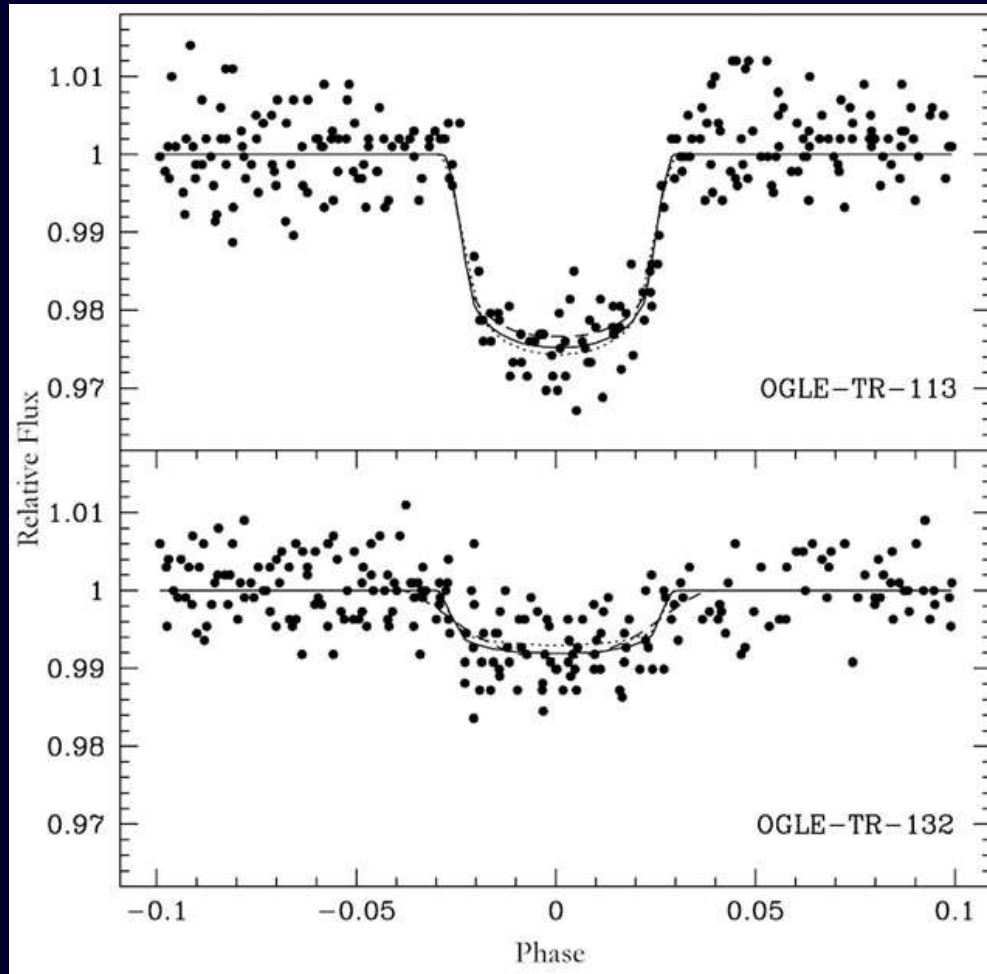
# Phobos devant le Soleil



# Phobos devant le Soleil



# 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 581c's sky.



Gliese 581

# Current Potentially Habitable Exoplanets

Ranked in Order of Similarity to Earth



\*planet candidates

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

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



# D'autres éclipses

- Outre les éclipses de Soleil et de Lune, voici les éclipses des satellites de Jupiter

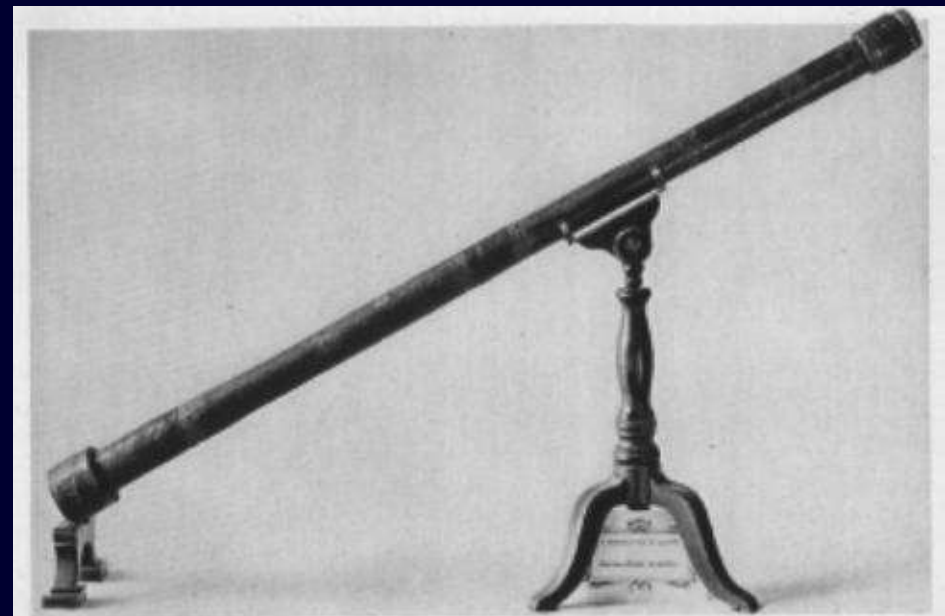


## Les éclipses des satellites de Jupiter

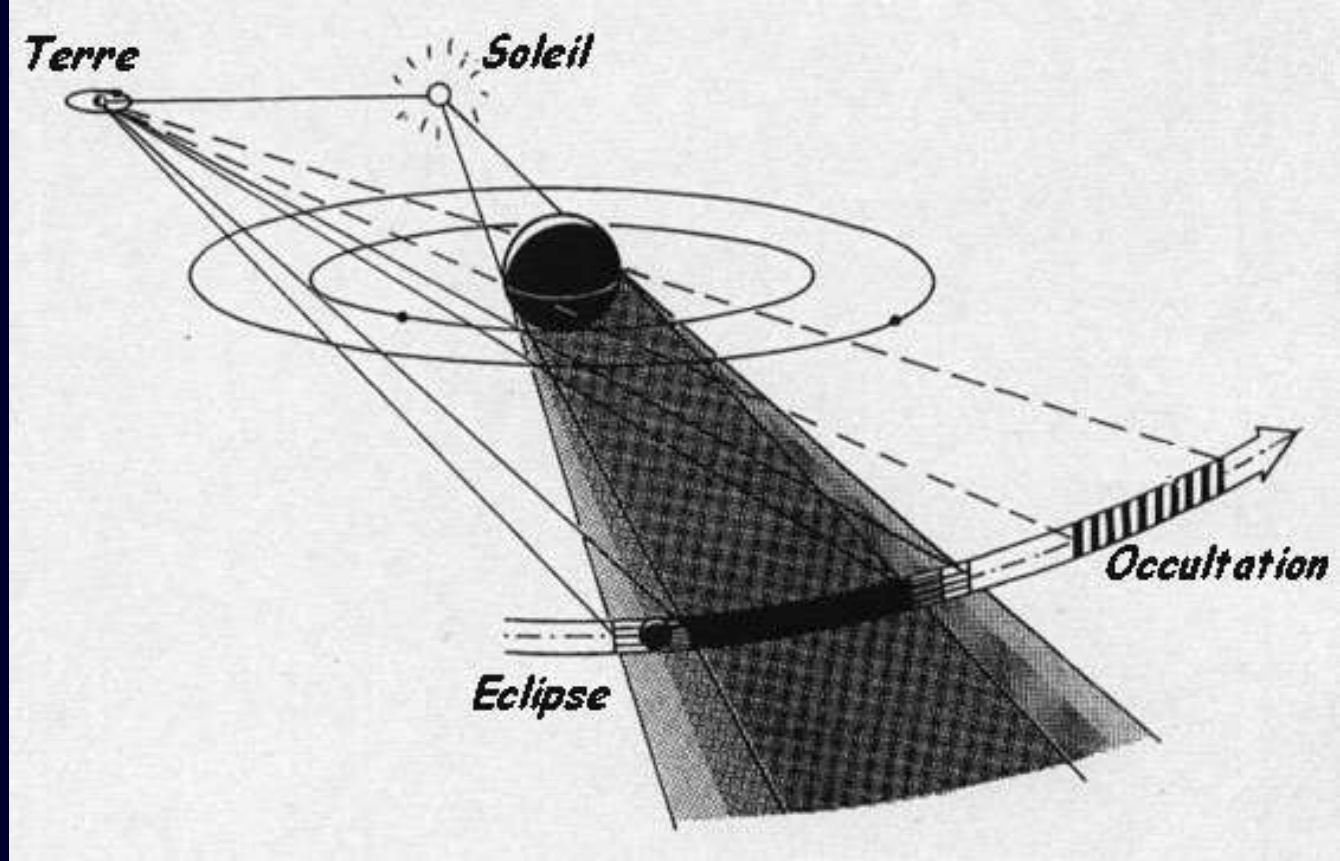


Galilée regarde Jupiter dans sa lunette et aperçoit quatre satellites tournant rapidement autour de leur planète.

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



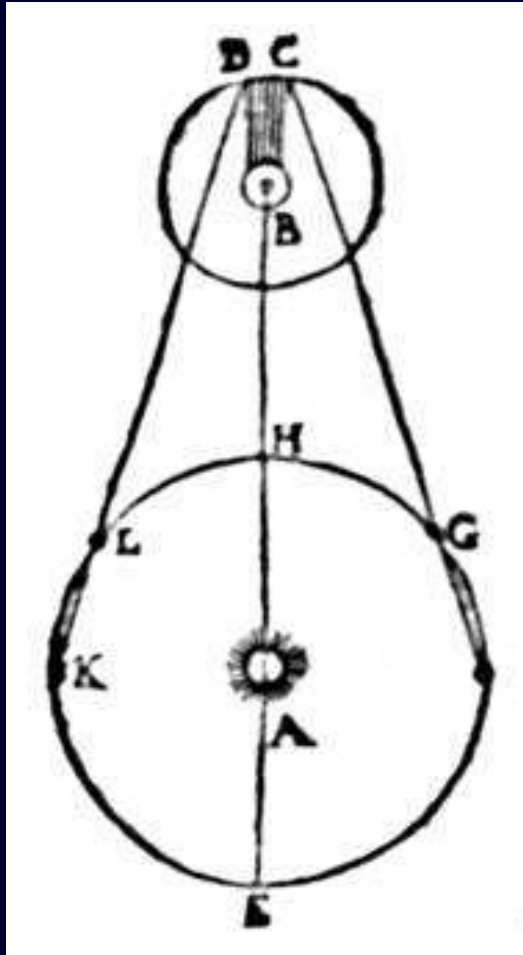
Les satellites de Jupiter, en tournant autour de leur planète, pénètrent régulièrement dans son ombre: l'observation de ces éclipses va passionner les astronomes pendant plusieurs siècles.



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



# La vitesse de la lumière

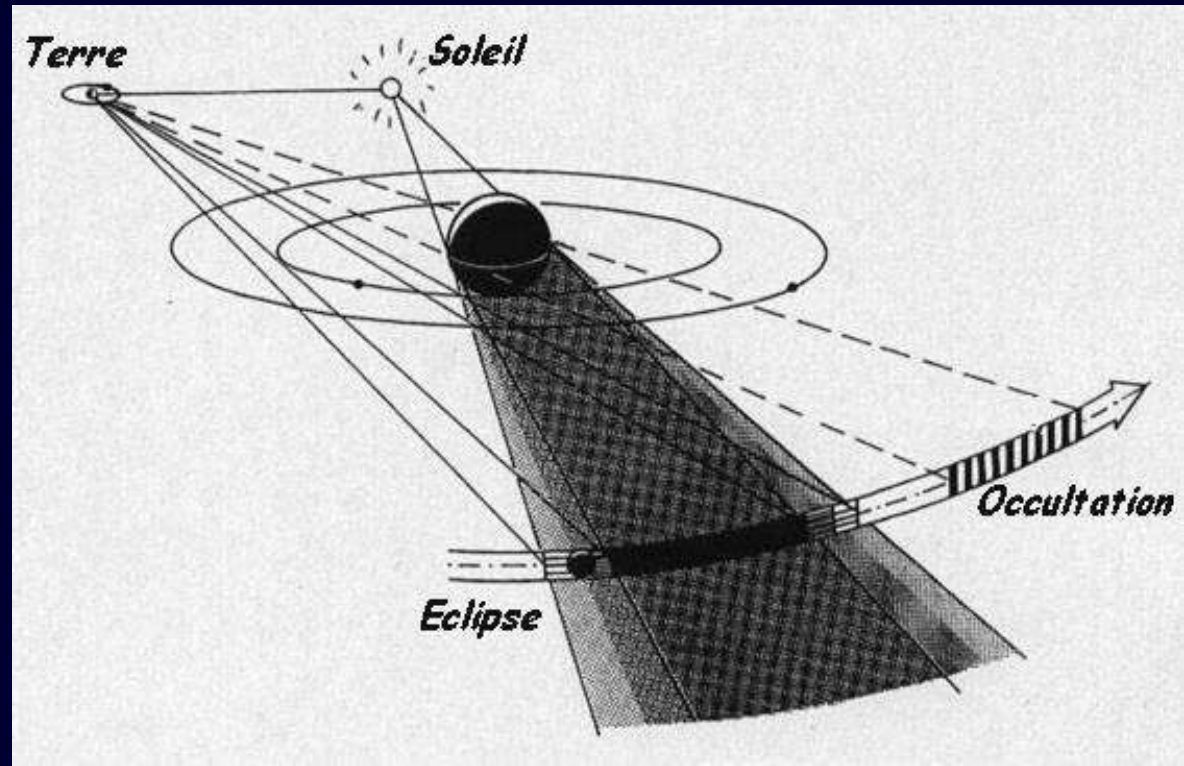


- Les éclipses devraient se produire très régulièrement
- Elles sont en avance ou en retard...
- C'est dû à la vitesse finie de la lumière (Rømer de 1676 à 1681)
- C'est aussi dû à l'excentricité de l'orbite de Jupiter



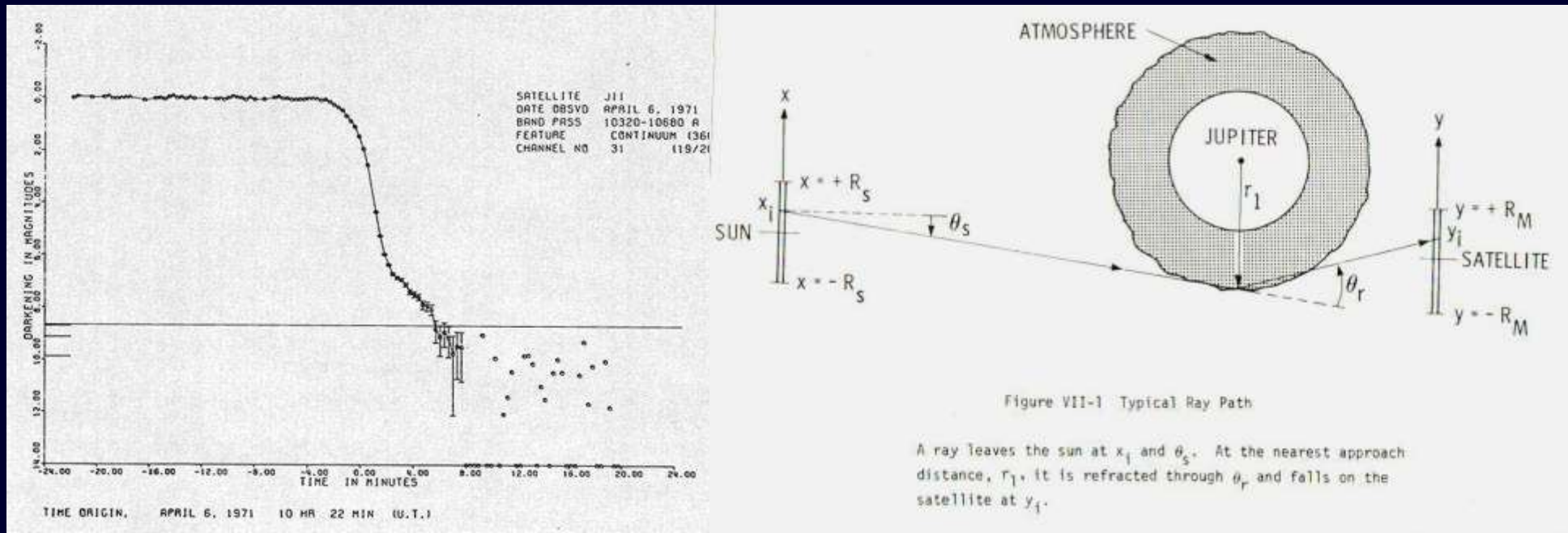
# Un temps universel et la détermination des longitudes

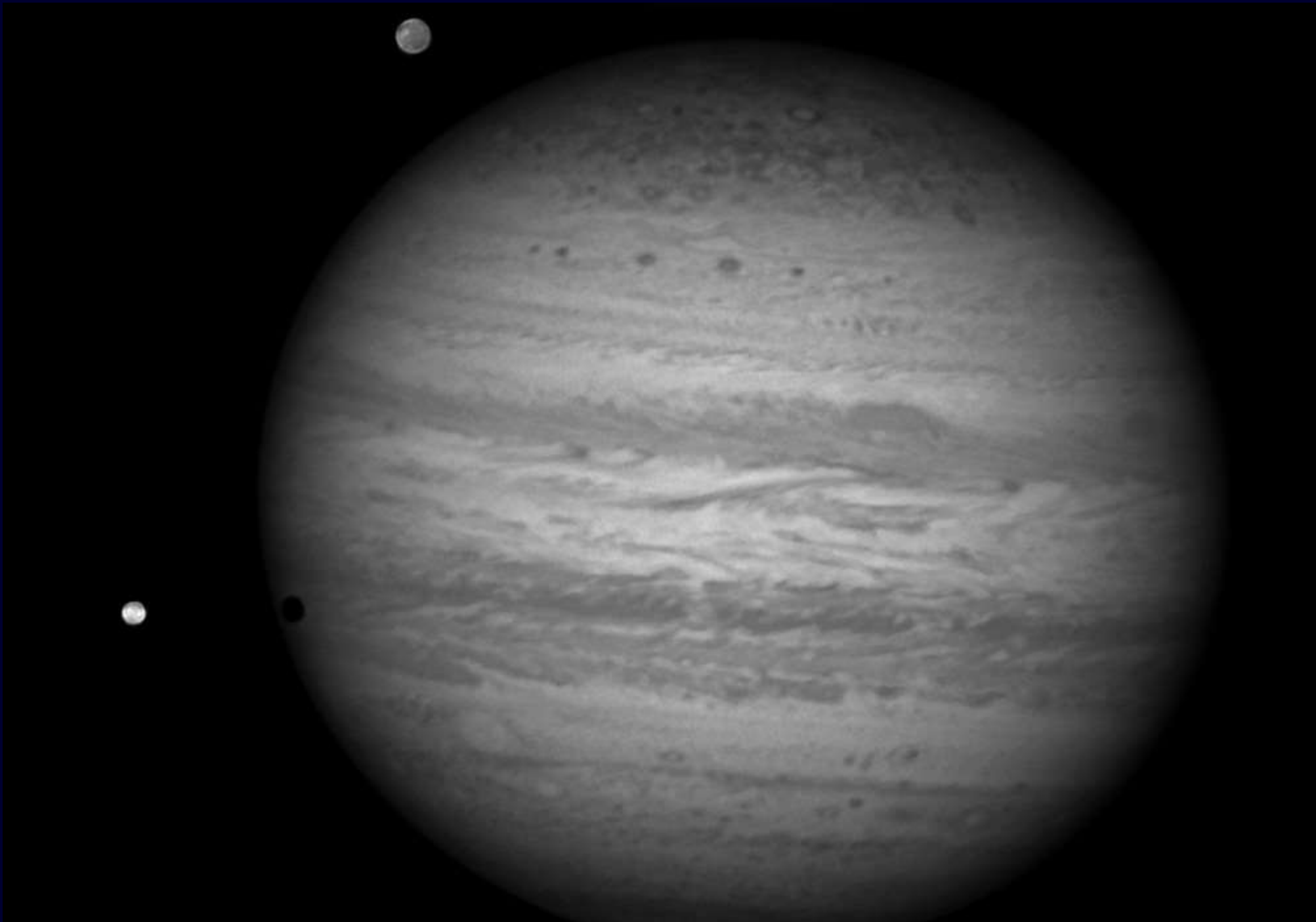
- On recherche un phénomène naturel prévisible observable par tous pour caler les horloges
- Les éclipses régulières sont une véritable horloge universelle visible par tous en tous lieux, bien plus intéressantes que les éclipses de Lune rares et imprécises



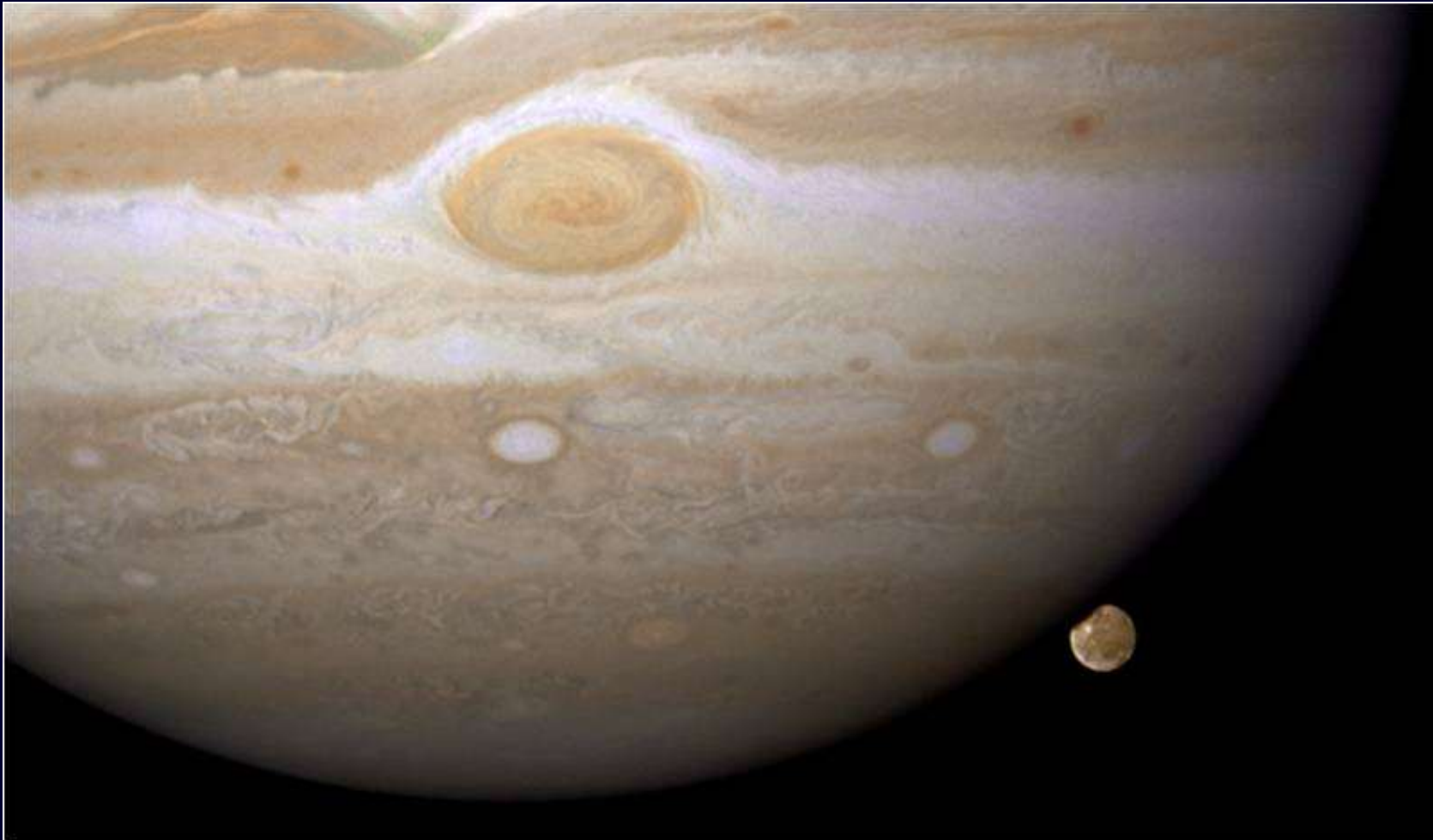
# Les observations d'éclipses

- On mesure la variation de flux reçu du satellite éclipsé dans l'ombre de Jupiter
- La précision d'observation est limitée par l'atmosphère de Jupiter





# Les occultations par Jupiter



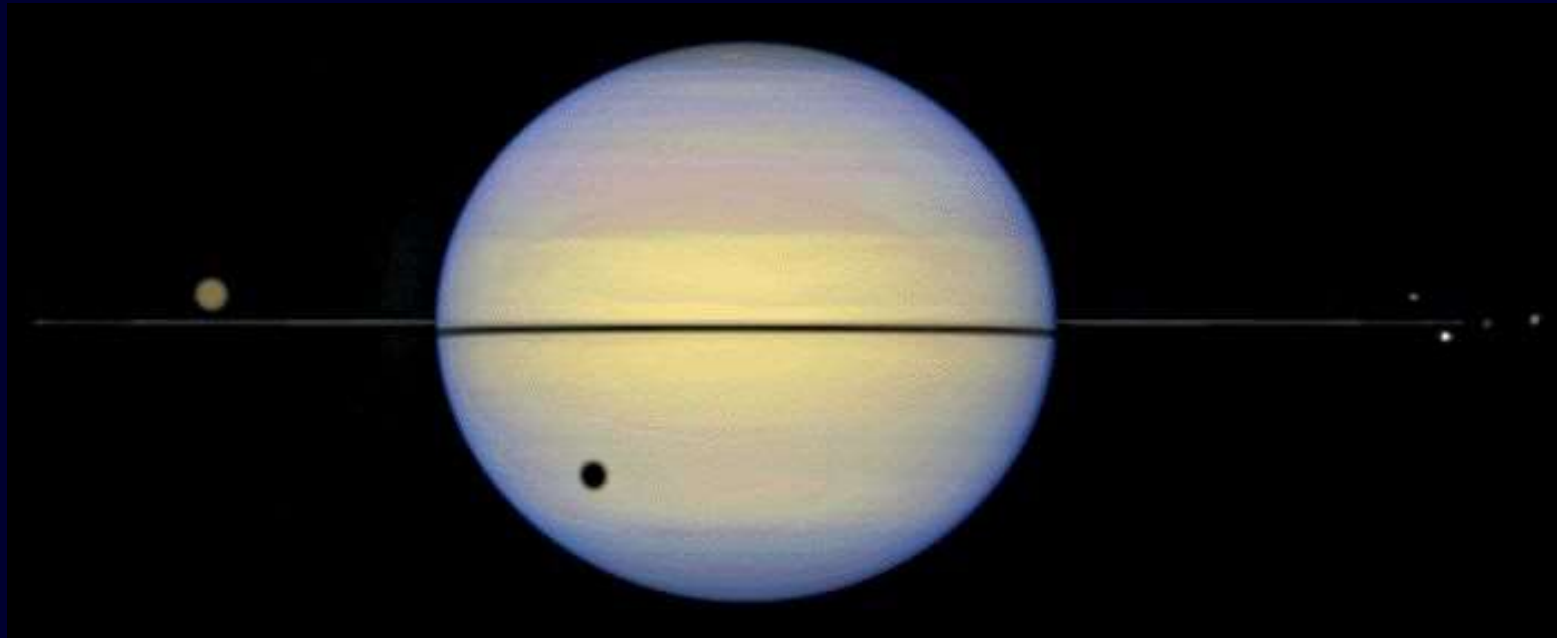
Ces occultations ont été utilisées pour calculer les orbites



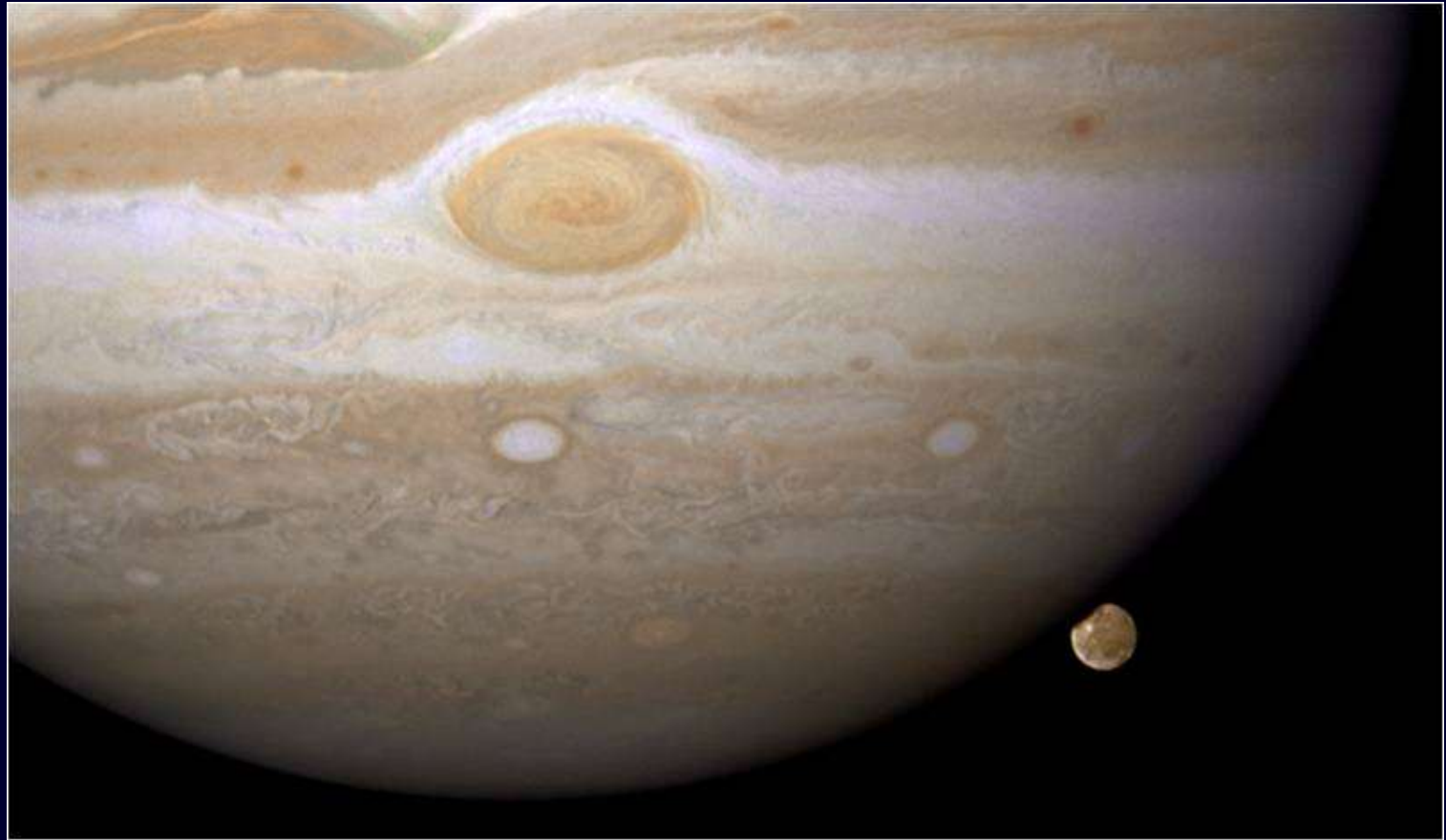
# Les passages d'ombre (peu utilisés)

← Ganymède devant Jupiter

↓ Titan devant Saturne







- Les phénomènes des satellites de Jupiter:
  - Éclipses
  - Occultations
  - Passages ou transits
  - Passages d'ombre



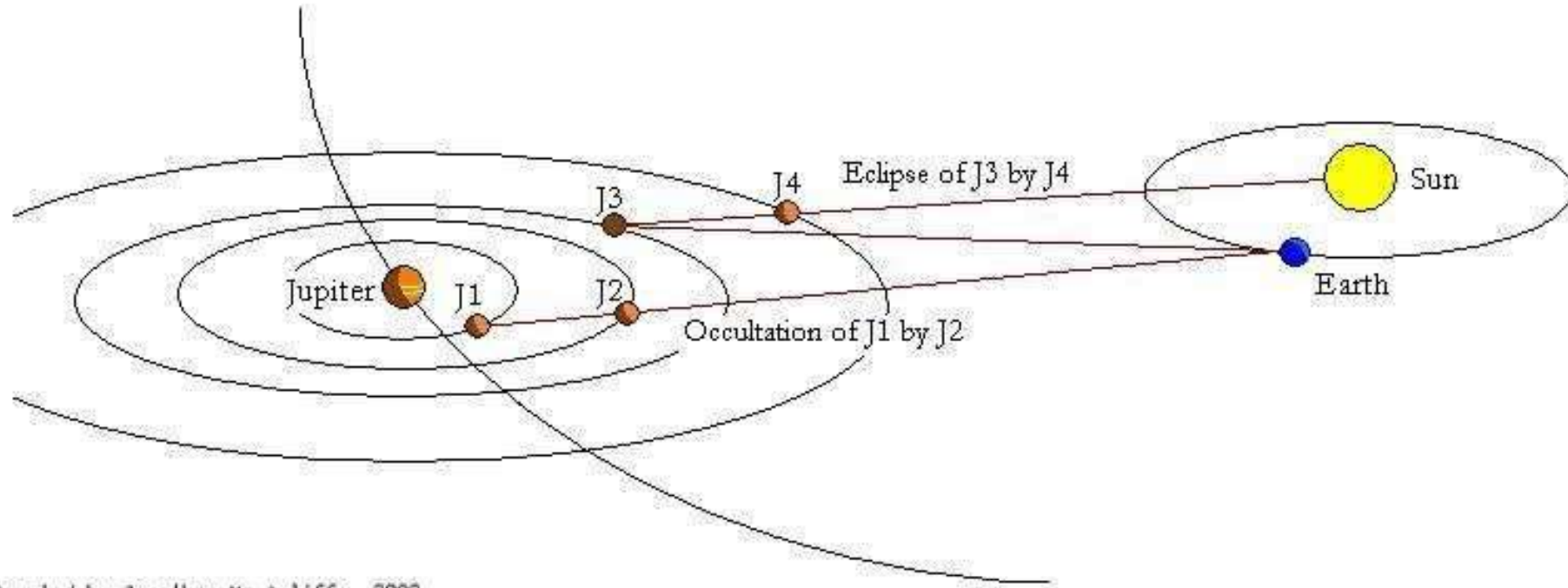
- D'autres phénomènes:

- Les phénomènes mutuels entre les satellites eux-mêmes:

- Éclipses mutuelles

- Occultations mutuelles

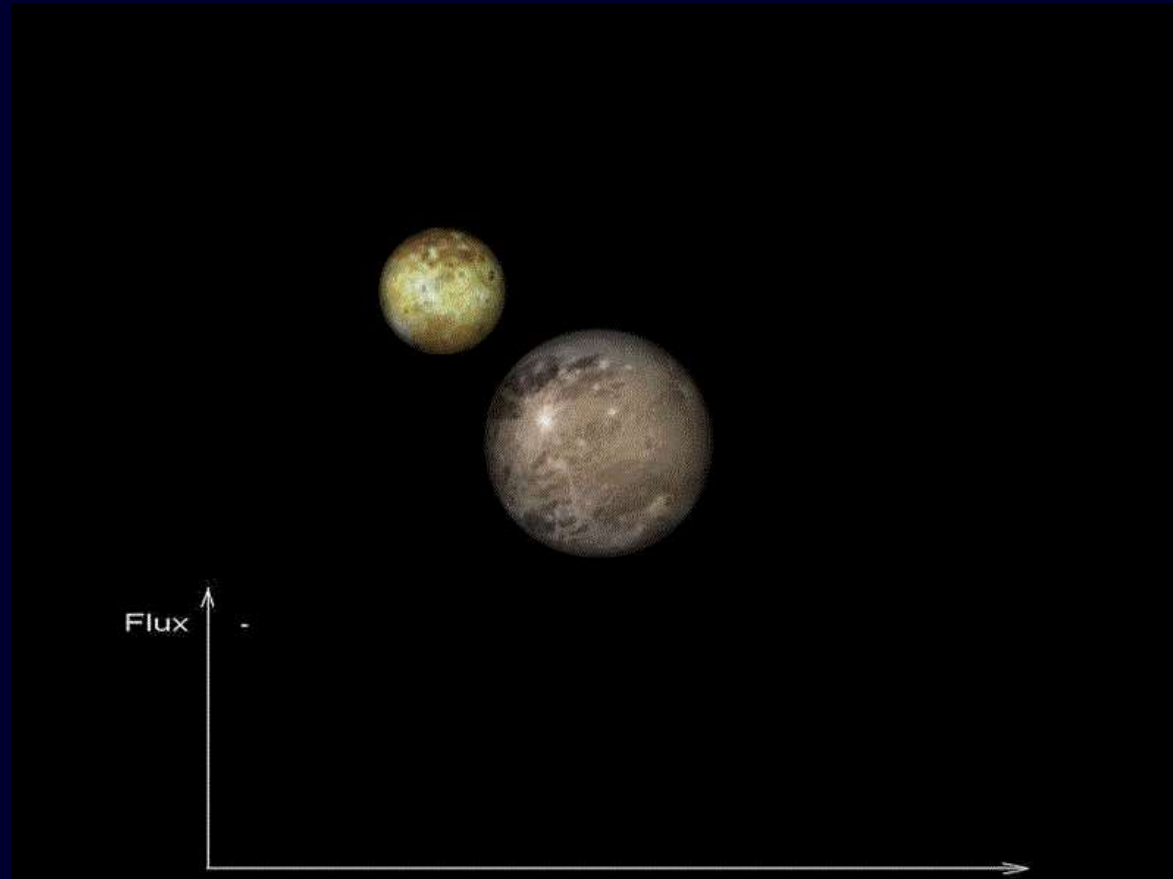
# Phénomènes mutuels: pas d'atmosphère autour des satellites



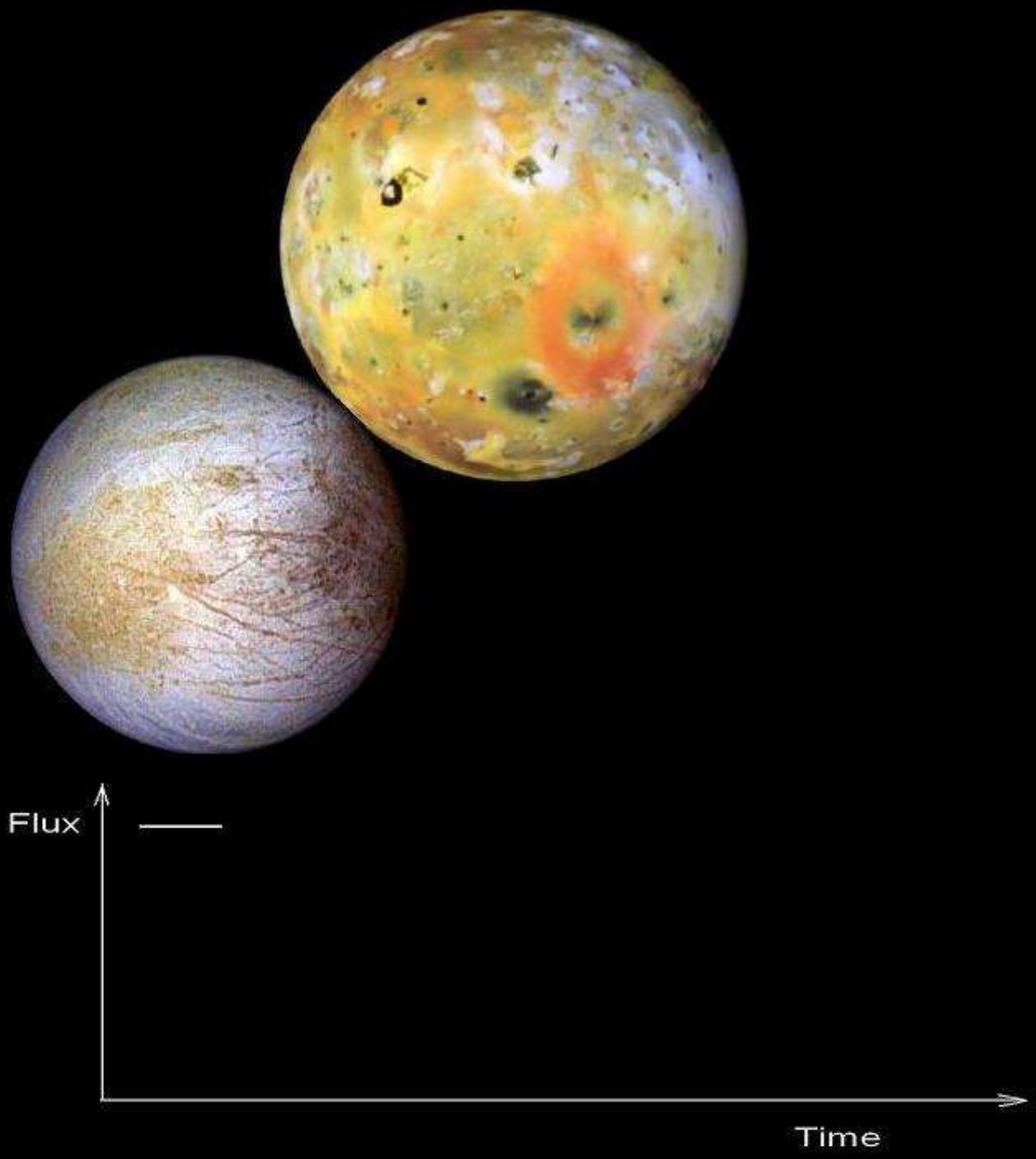
Created by Jonathan Mc Auliffe, 2003.

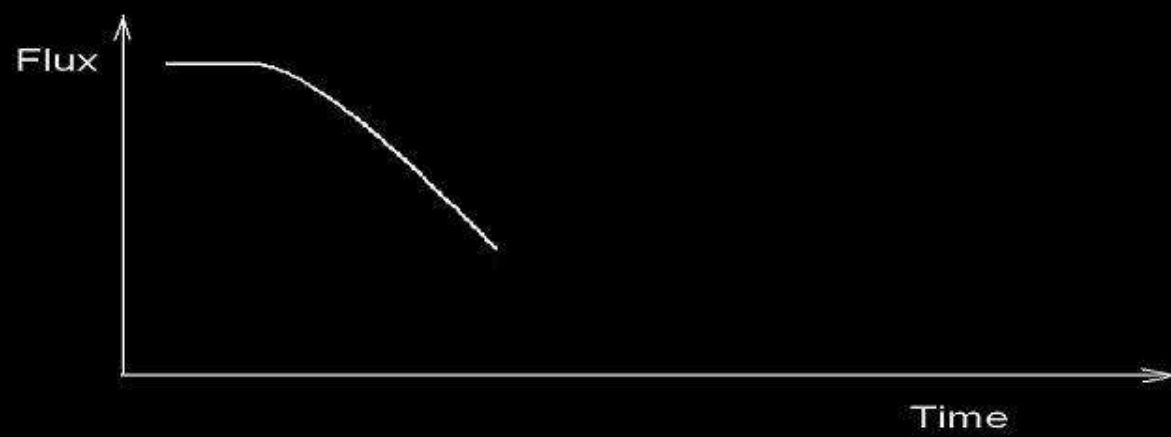
## Des observations faciles

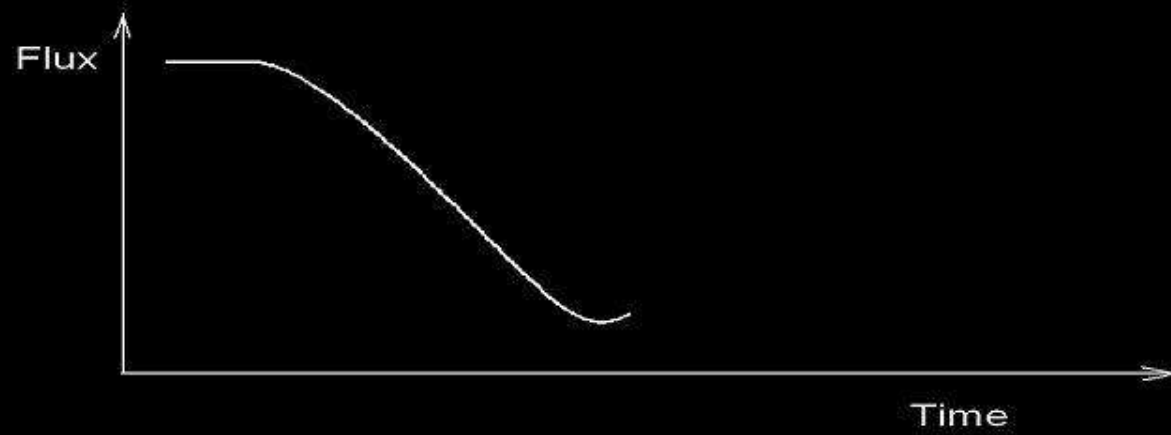
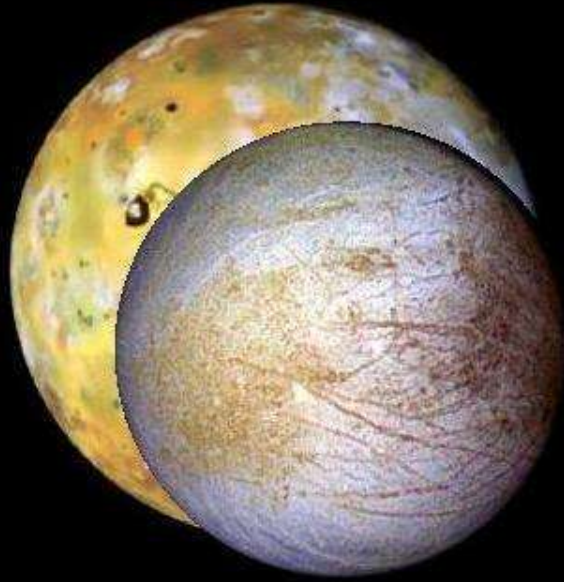
On enregistre le film du phénomène (en UTC à 0.1 seconde de temps près) pour pouvoir ensuite construire une « courbe de lumière » photométrique.

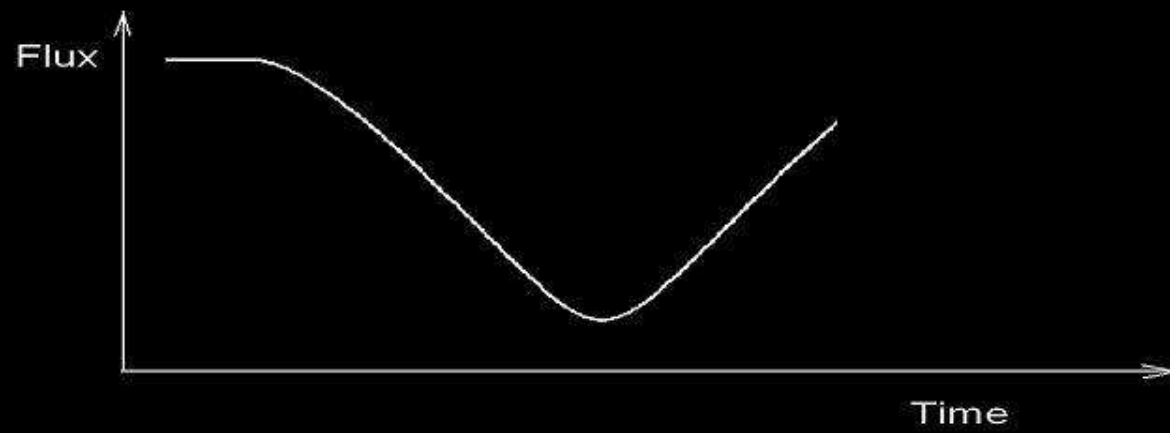


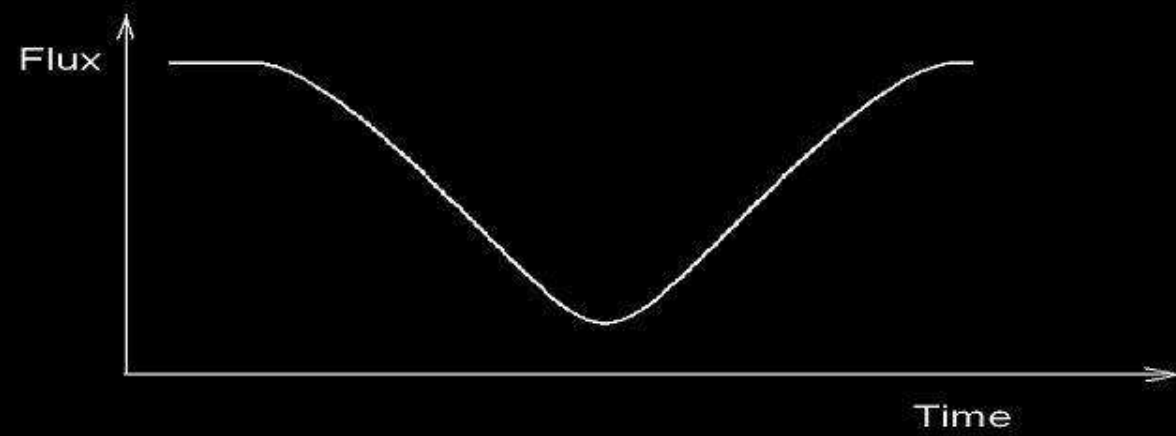




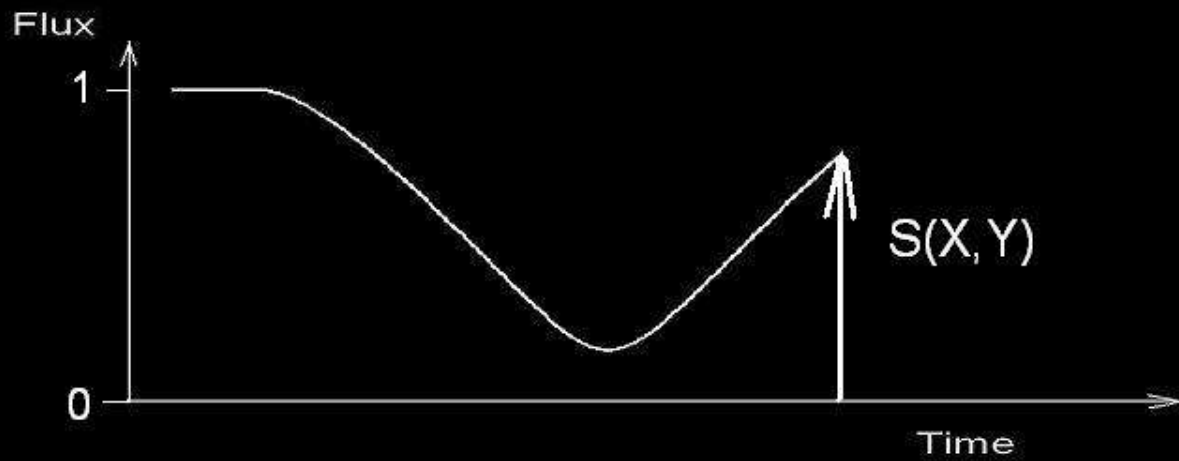
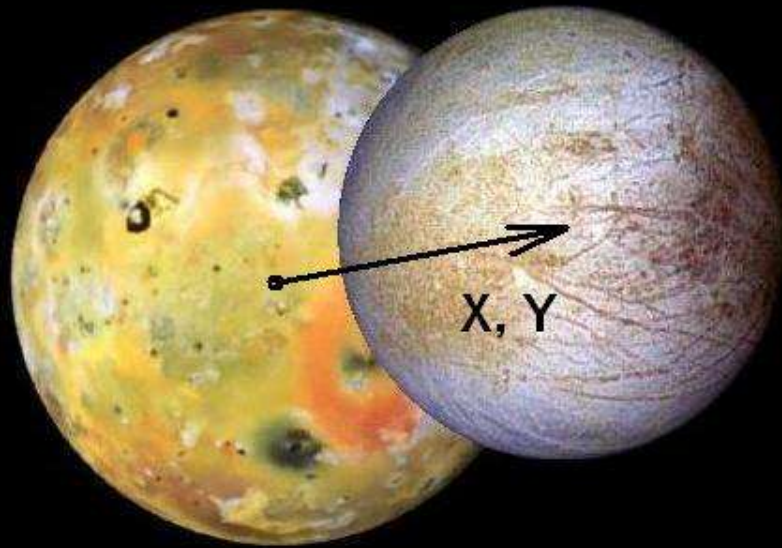




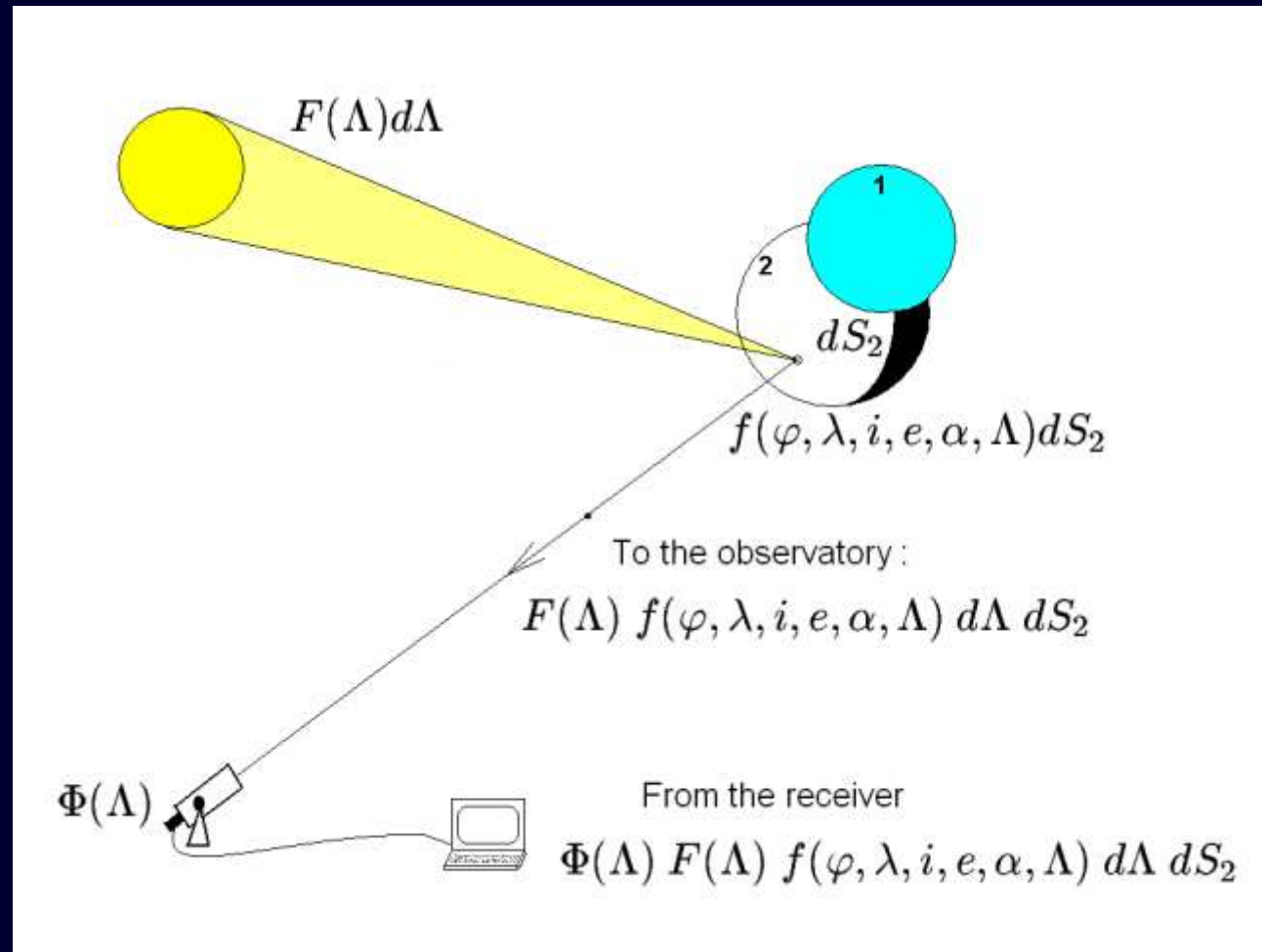








# Méthode de réduction

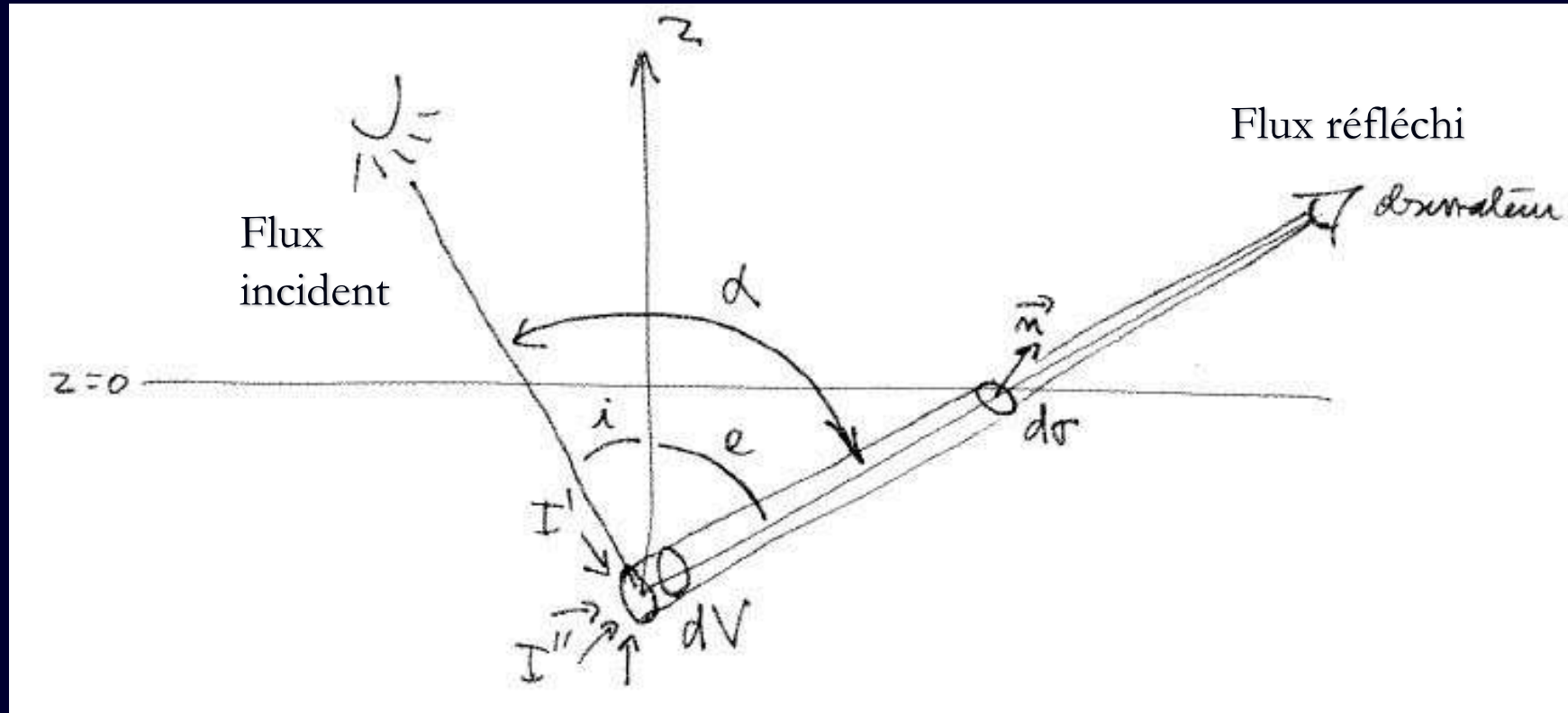


$S(X,Y)$  est modélisable et confronté à l'observation

On a une équation par point photométrique observé

→ équations de condition → calcul des inconnues X et Y

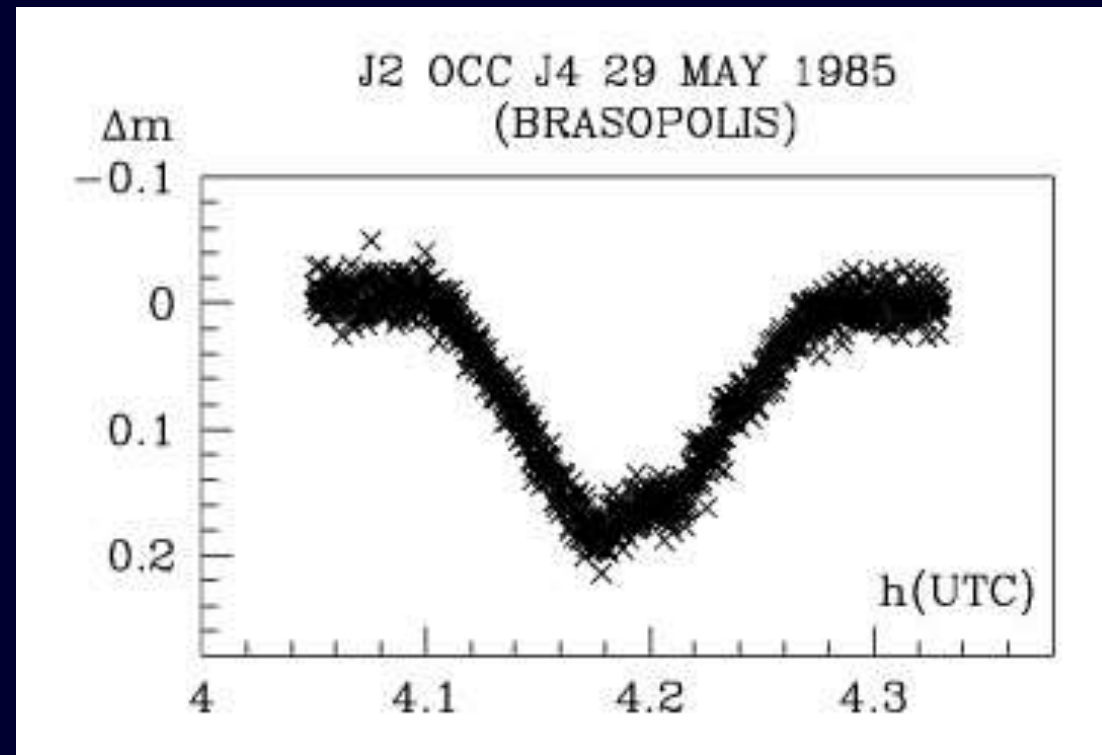
# Loi de réflexion-diffusion



diffusion dans le milieu

- L'importance de la loi de réflexion et de diffusion de la lumière à la surface du satellite

Une observation photométrique  
fournissant une position très précise



Time : 05 :21.49ut

*Jupiters Moons Ganymede, Europa  
Occulting and Eclipsing*



August 19th, 2009



◀Ganymede



◀Europa

05 :21- 06 :23ut

Efrain Morales Rivera - Jaicoa-Observatory.com - Aguadilla, Puerto Rico



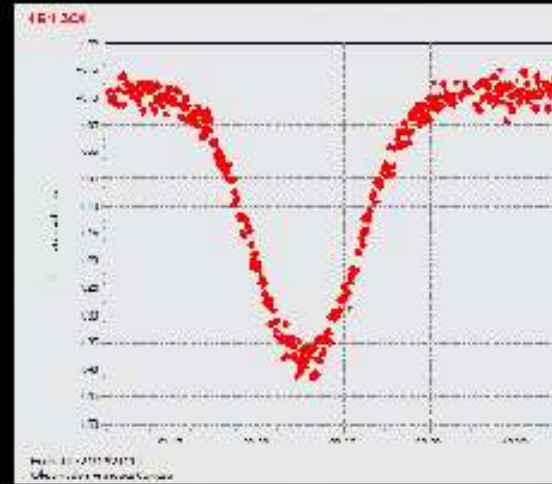
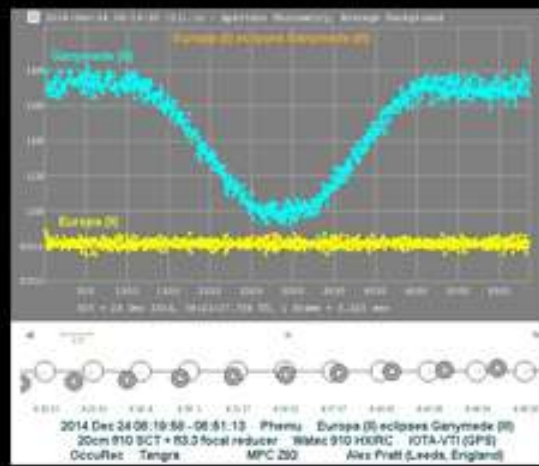
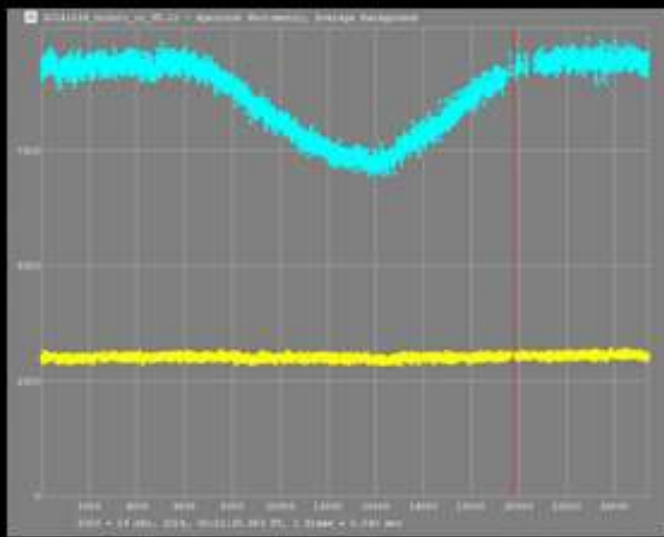
16:38UT



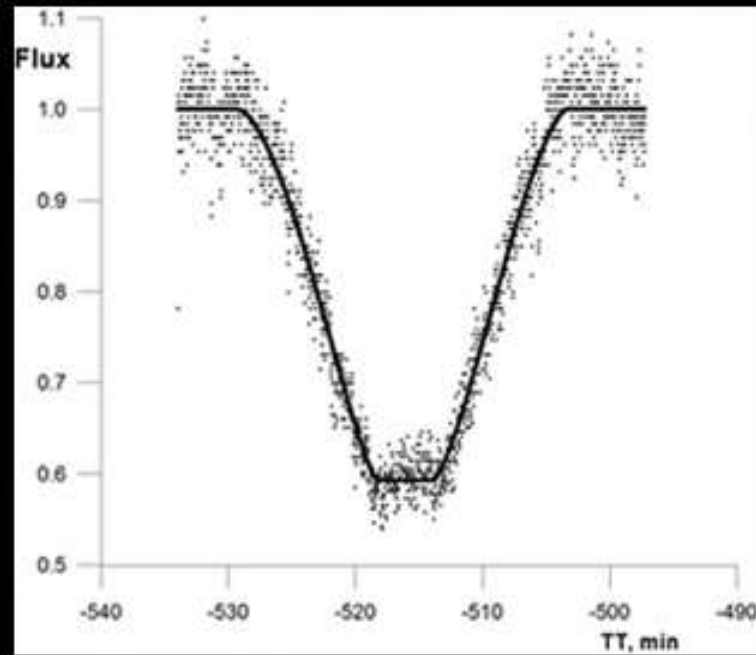
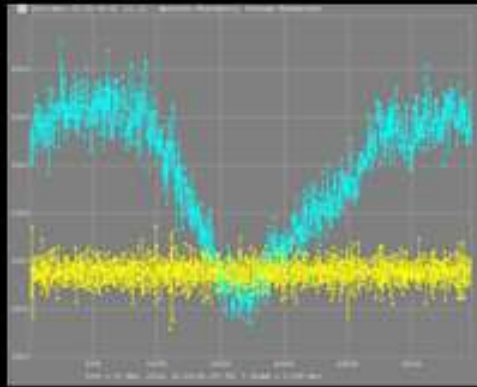
Io Shadow Transit on Ganymede

August 16, 2009

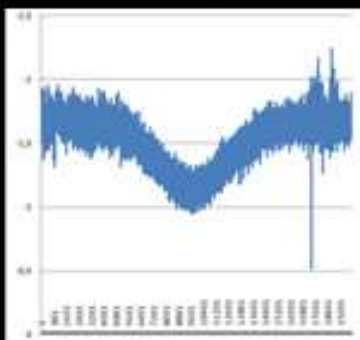
© Christopher Go (Cebu, Philippines)

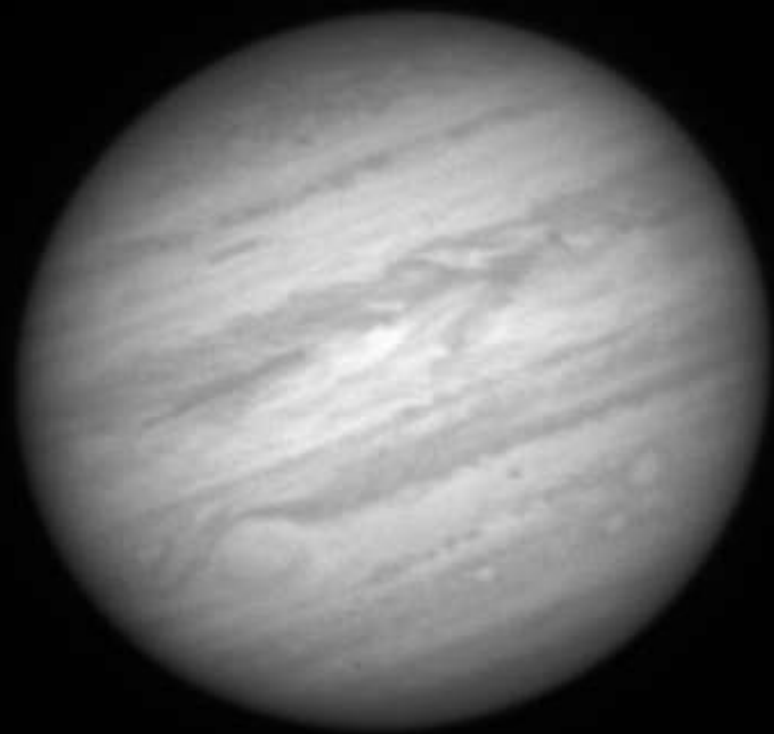


II



III  
IV





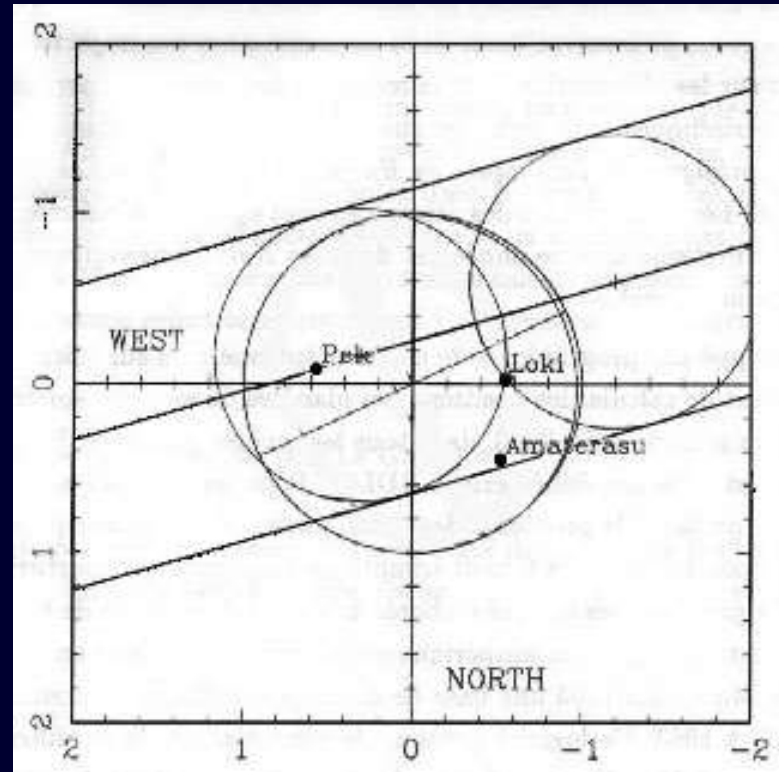
Occultation of Europa by Ganymede

Anthony Wesley

2015-02-16 1313UTC - 1321UTC

Rubyvale QLD Australia

# Les observations d'occultations mutuelles en infra rouge



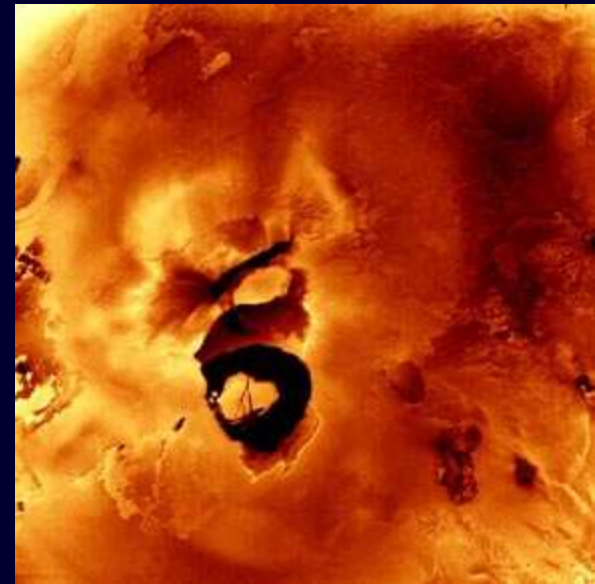
- Une occultation de Io par Europe



## Des volcans sur Io, satellite de Jupiter

**IO** le premier satellite de Jupiter possède des  
volcans très actifs.

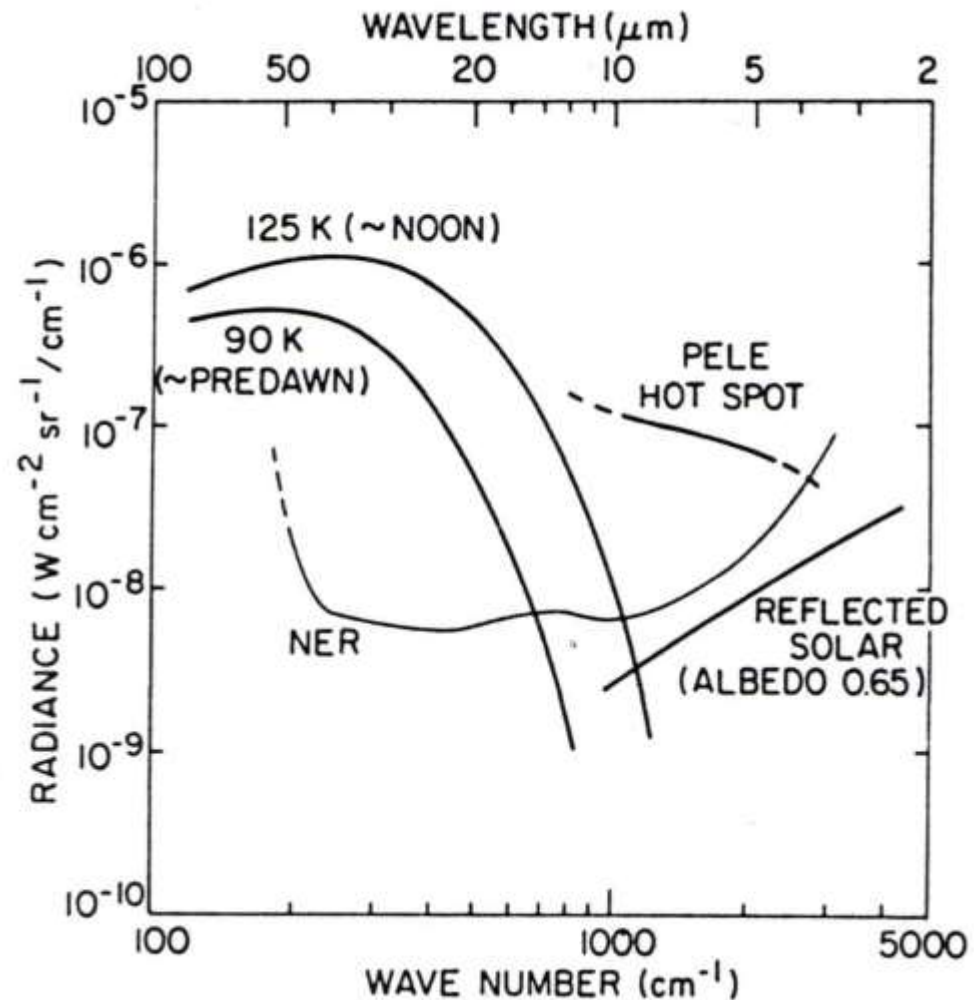
Pourquoi? Comment?



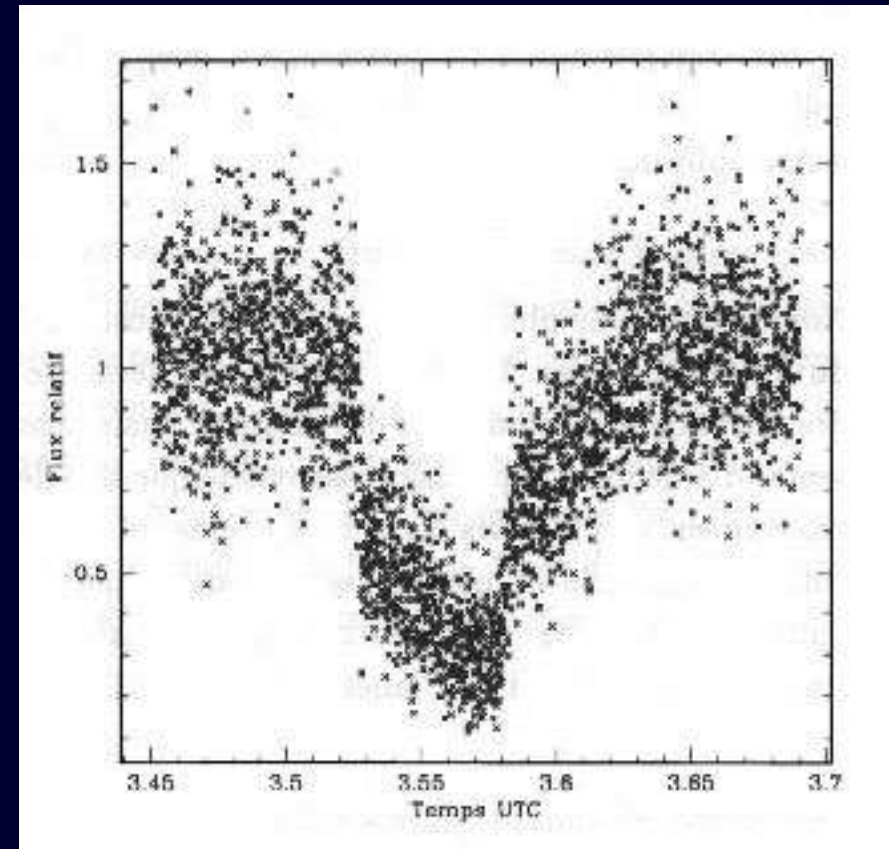
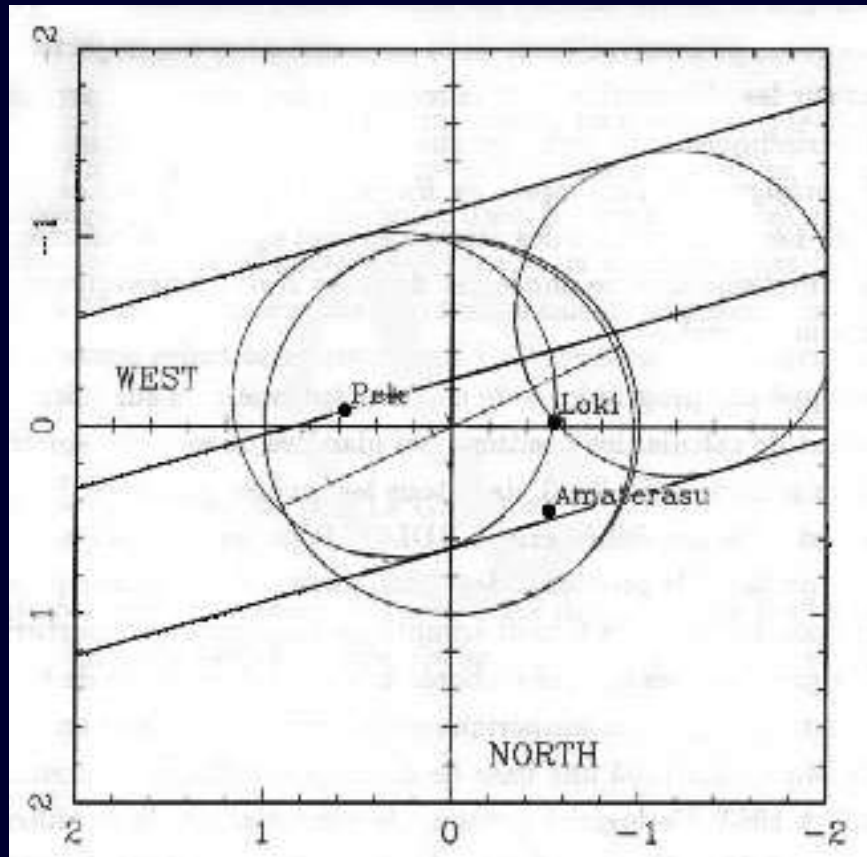


# Les observations d'occultations mutuelles en infra rouge

- Observer dans la bande correspondant au flux des volcans de Io, entre le solaire et le thermique (bande à 3.8 micromètres)



# Les observations d'occultations mutuelles en infra rouge



Cette occultation a permis de mesurer le flux et de localiser les volcans de Io

# Observations infrarouges

Utiles pour observer dans des conditions difficiles:

- Très près de Jupiter
- Pendant le crépuscule

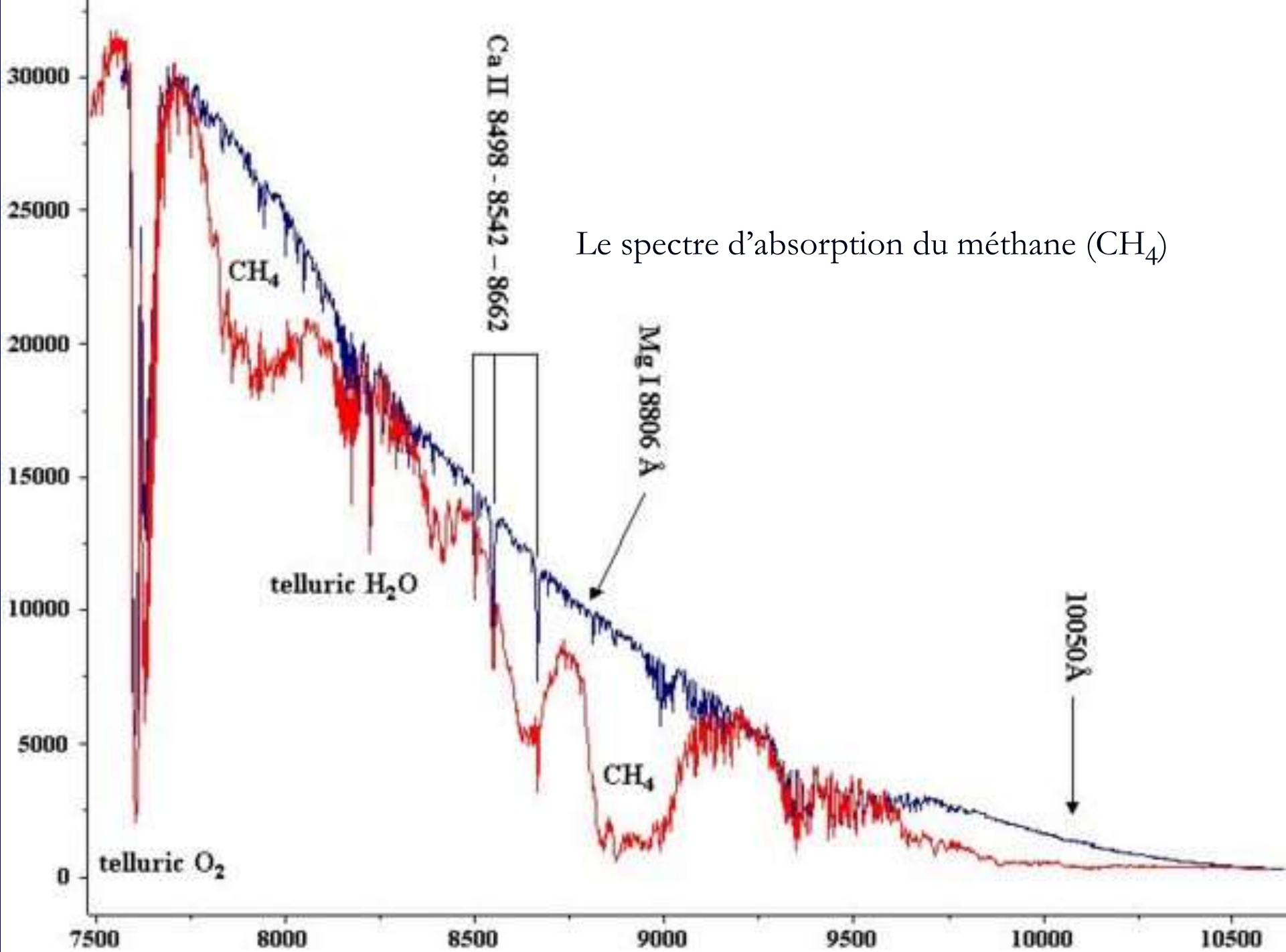
Pour les éclipses d'Amalthée ( $m_v=14$ ) on utilise la bande d'absorption du méthane:

- Jupiter plus sombre
- Ciel plus sombre

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

Attention, les flux sont bien plus faibles!

➔ Besoin de plus grands télescopes!



Le spectre d'absorption du méthane (CH<sub>4</sub>)

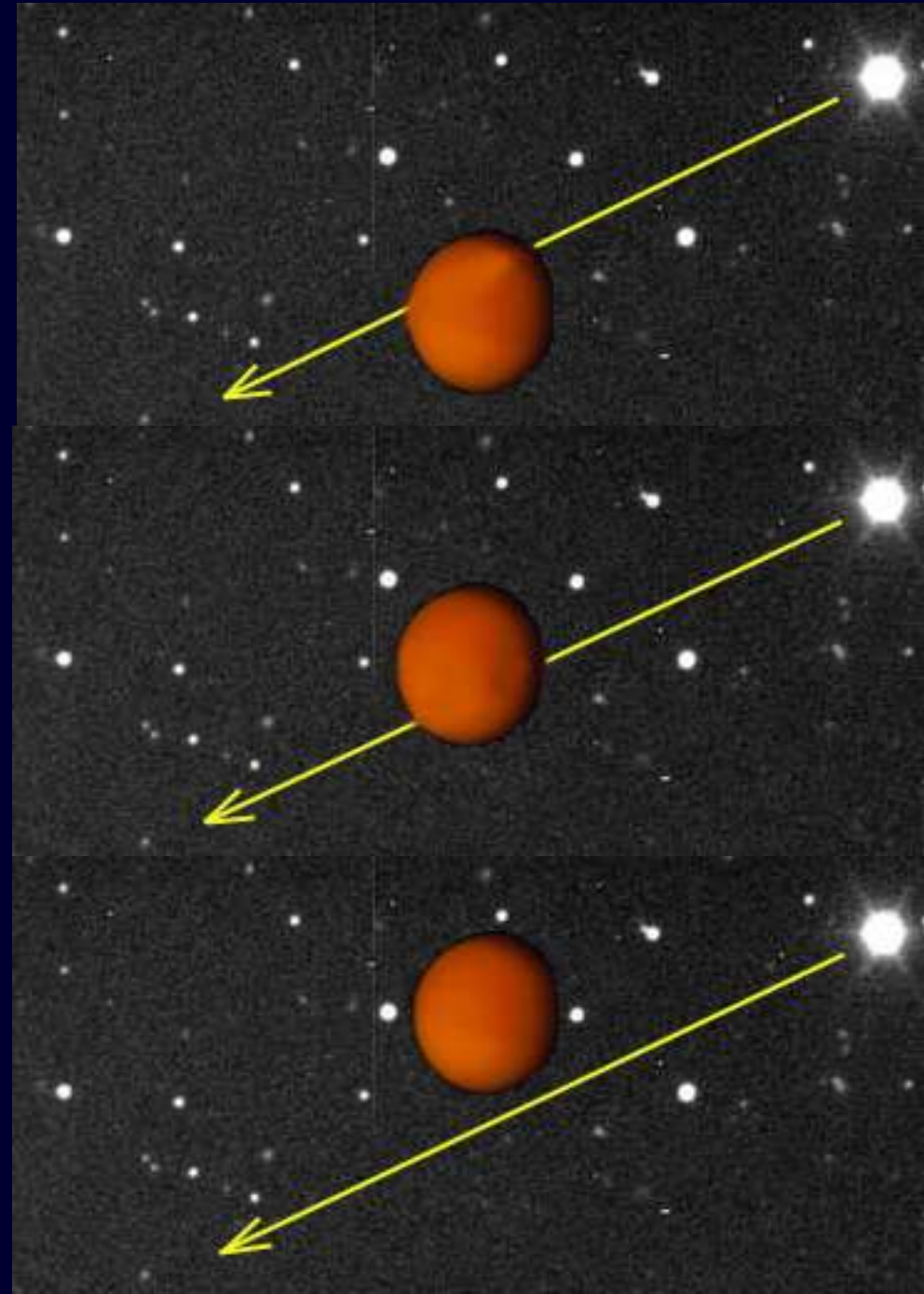
# Les occultations d'étoile

- Position de l'objet
- Taille et forme de l'objet
- Atmosphère sur l'objet

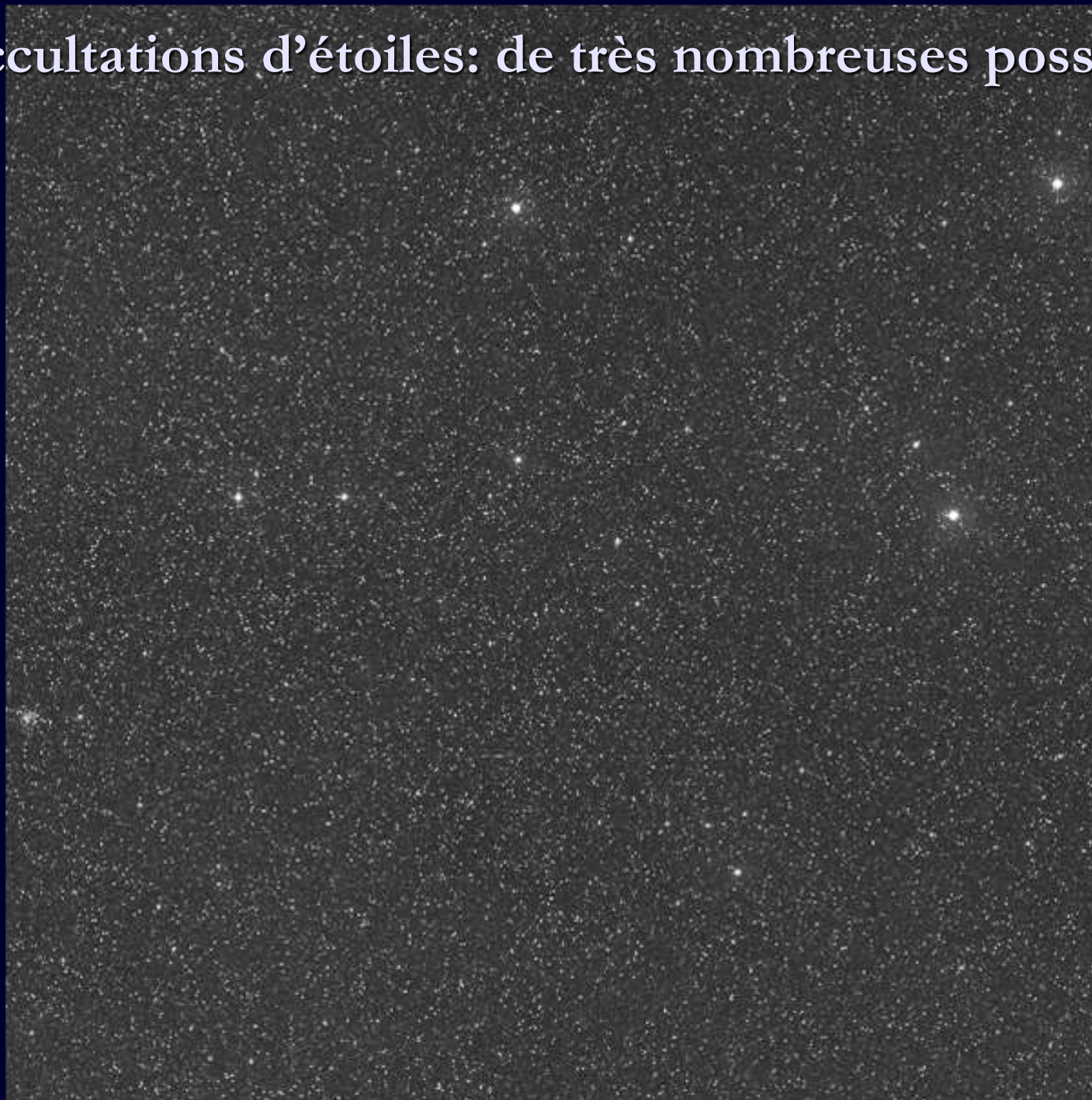


# Une occultation d'étoile par un corps du système solaire

Il est inutile de « voir » l'objet occultant: seule l'analyse du flux de lumière en provenance de l'étoile est intéressante.

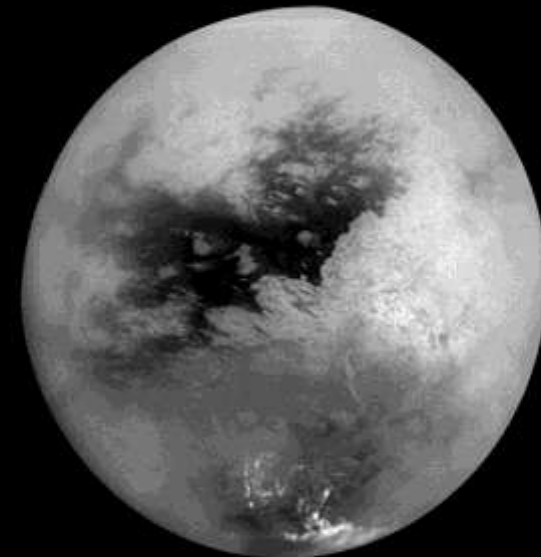
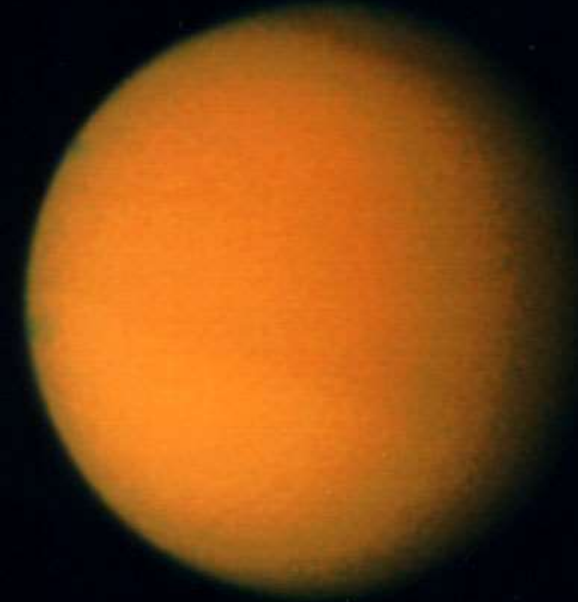


Les occultations d'étoiles: de très nombreuses possibilités



# Le cas de Titan:

une atmosphère qui rappelle la  
Terre des premiers temps:  
comment la sonder?





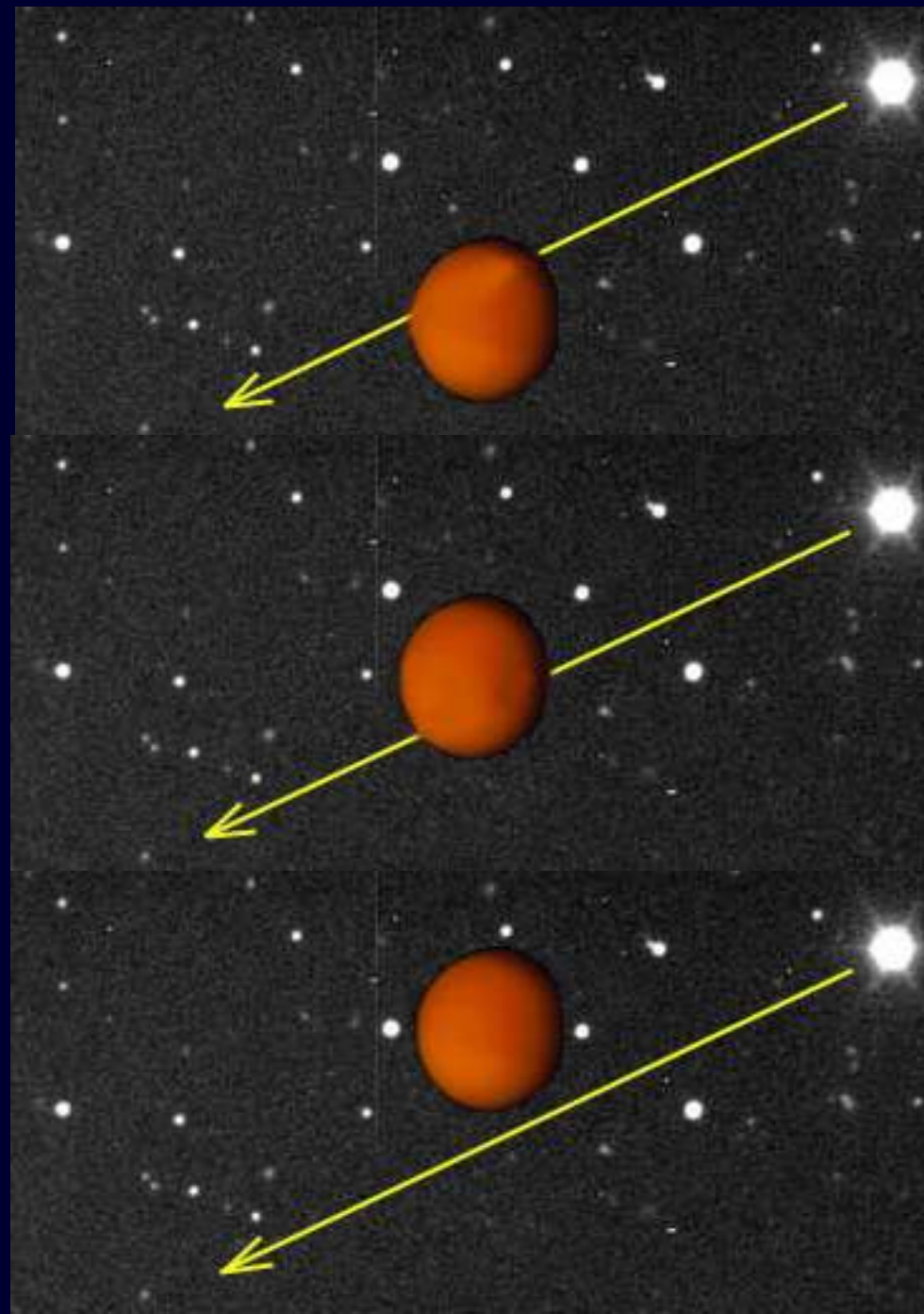
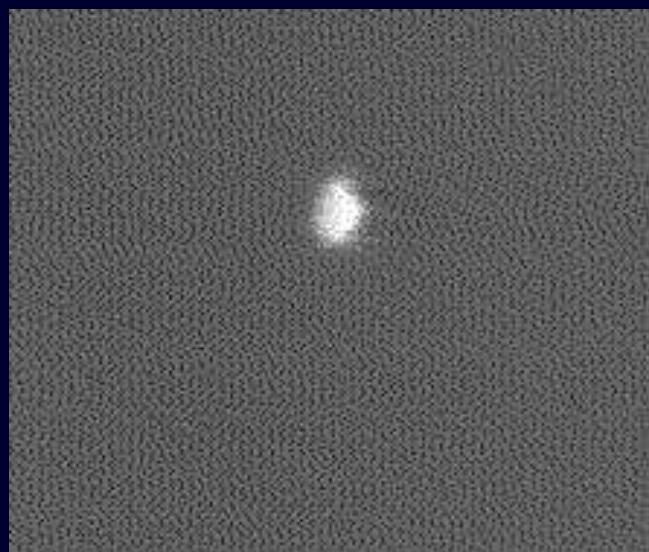
Titan, le gros satellite de Saturne possède  
une atmosphère dans laquelle la sonde  
Huygens est descendue.



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.

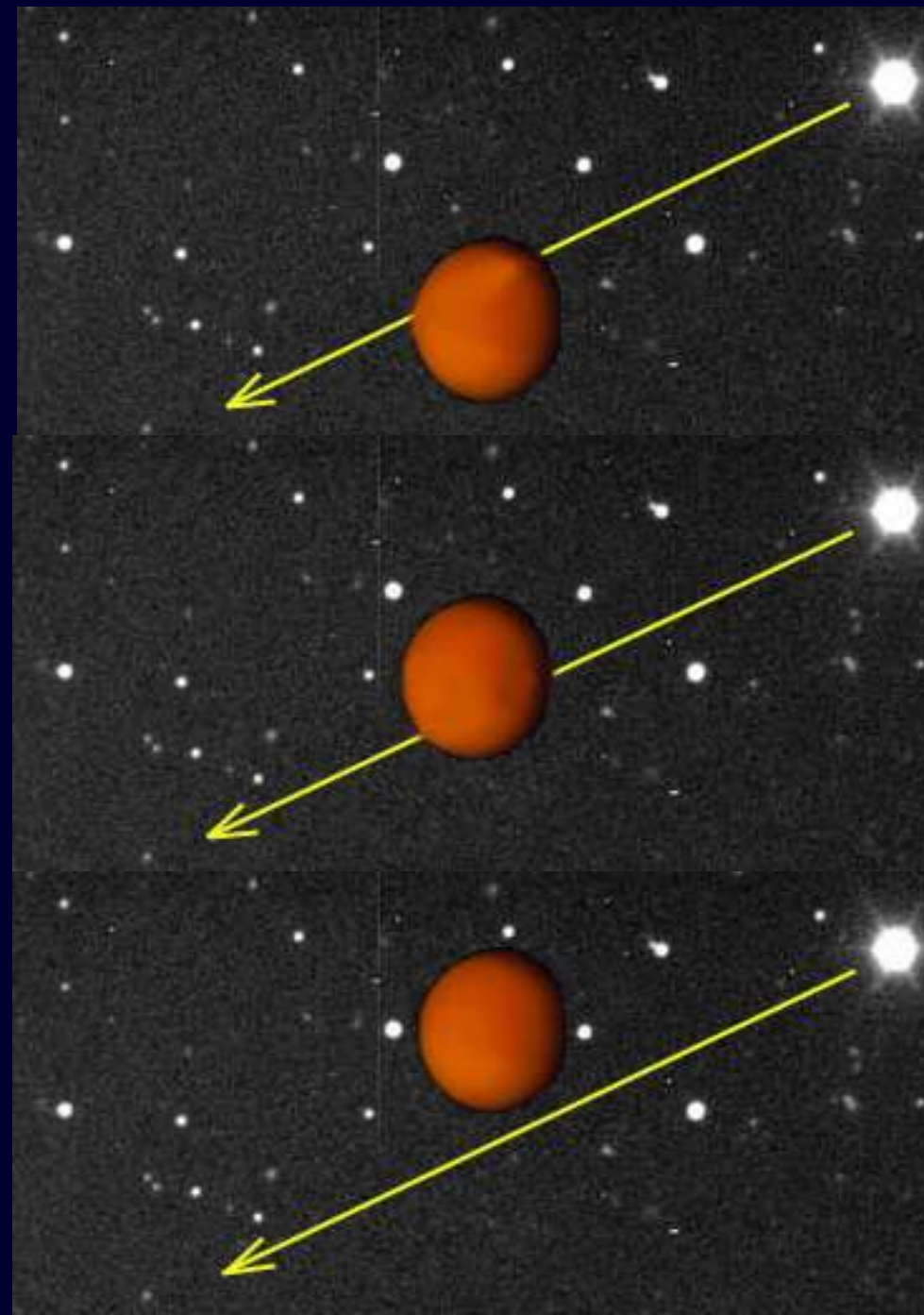
Ce sont des occultations d'étoiles qui l'ont permis.

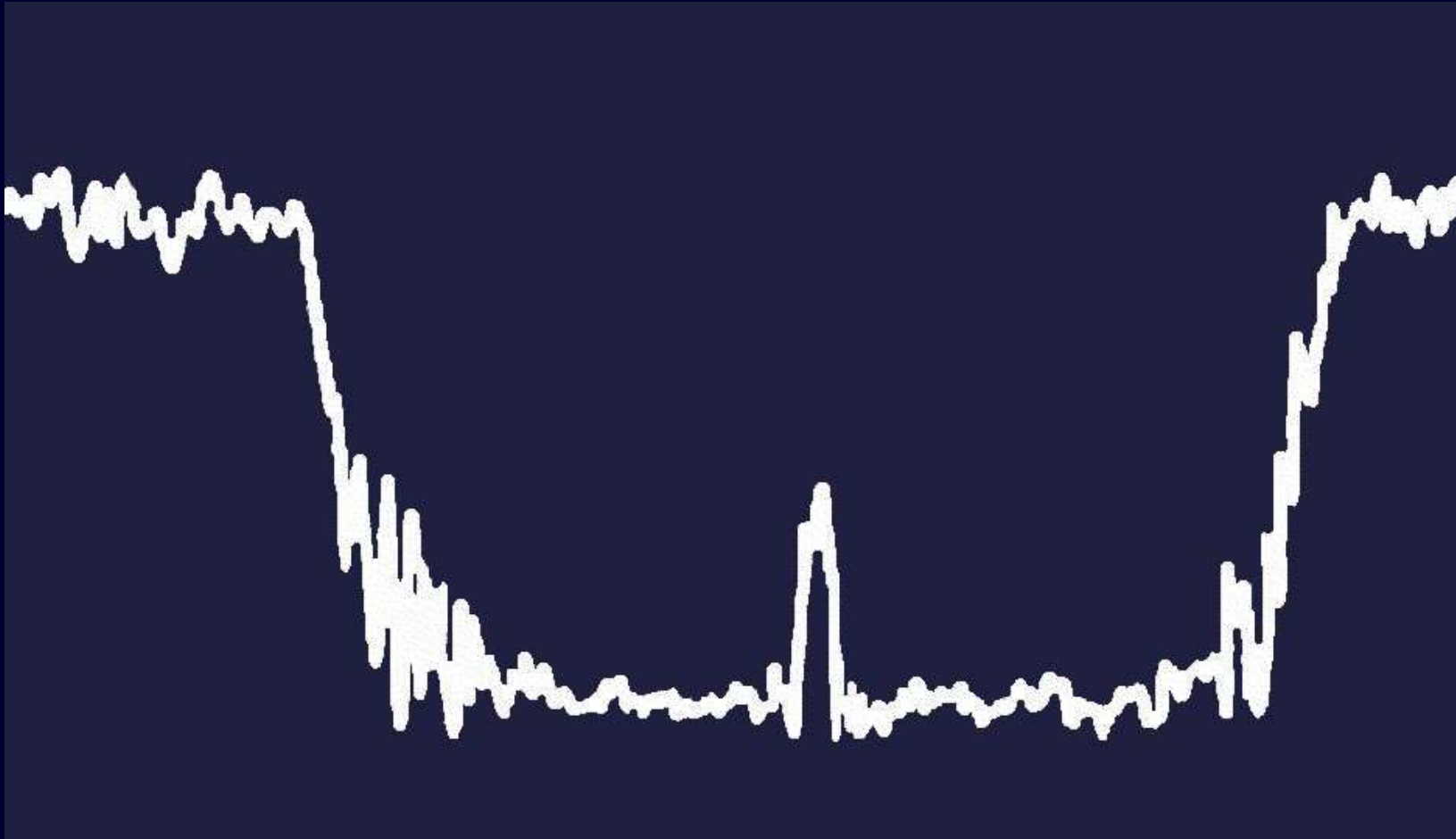




Flash central  
de Titan

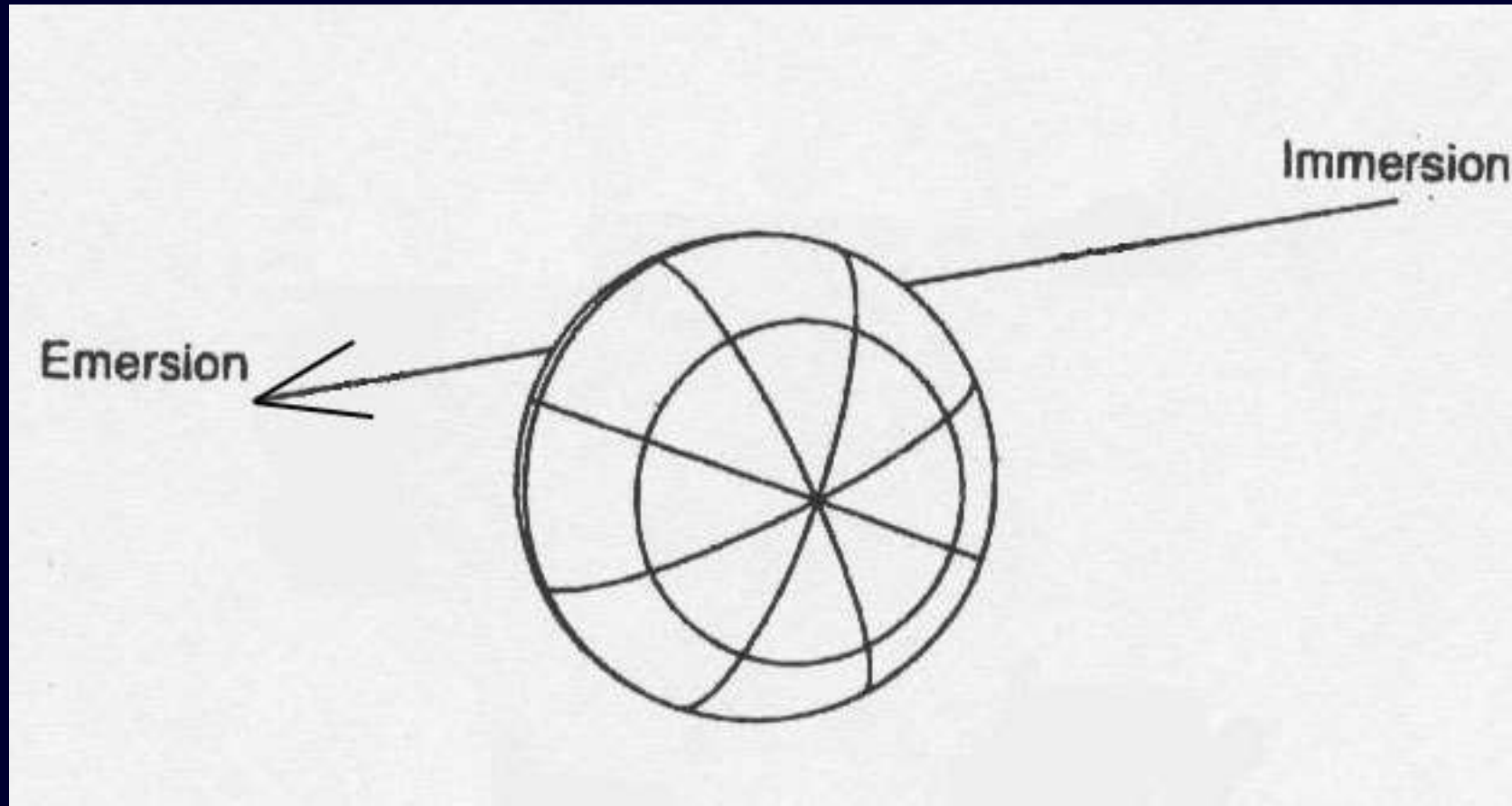
3 juillet 1989

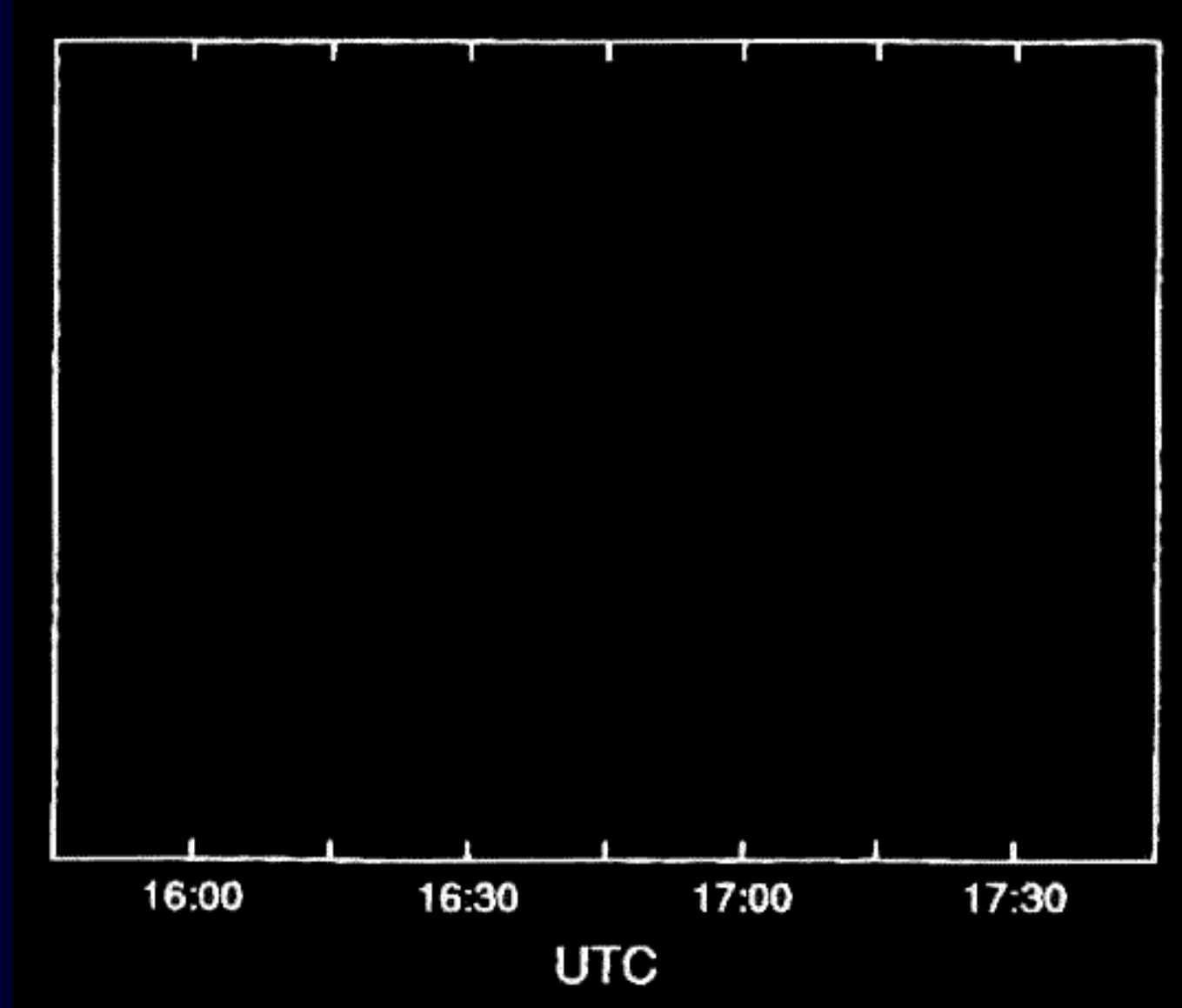




La lumière reçue sur Terre au cours de  
l'occultation

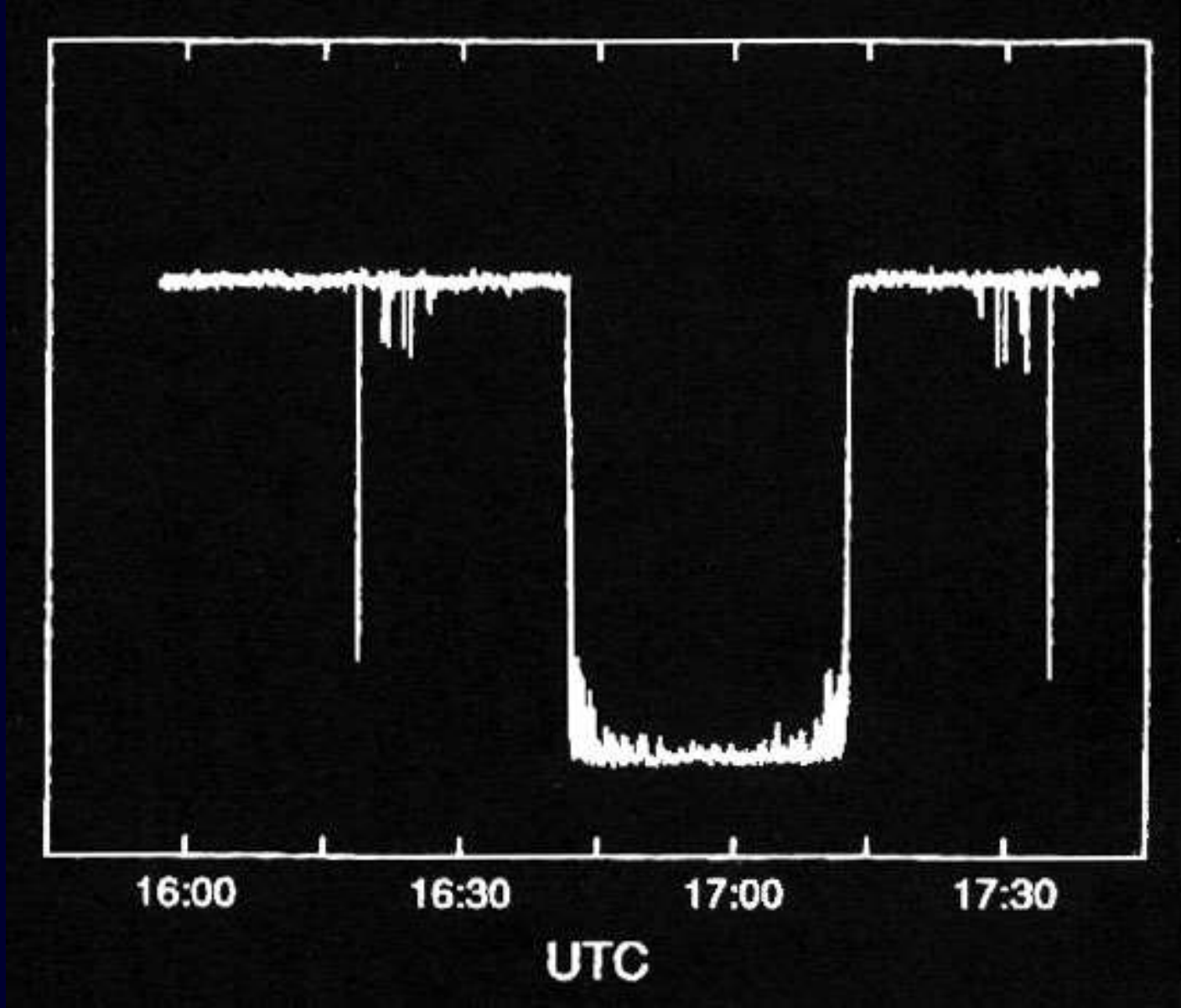
# Une occultation d'étoile par la planète Uranus



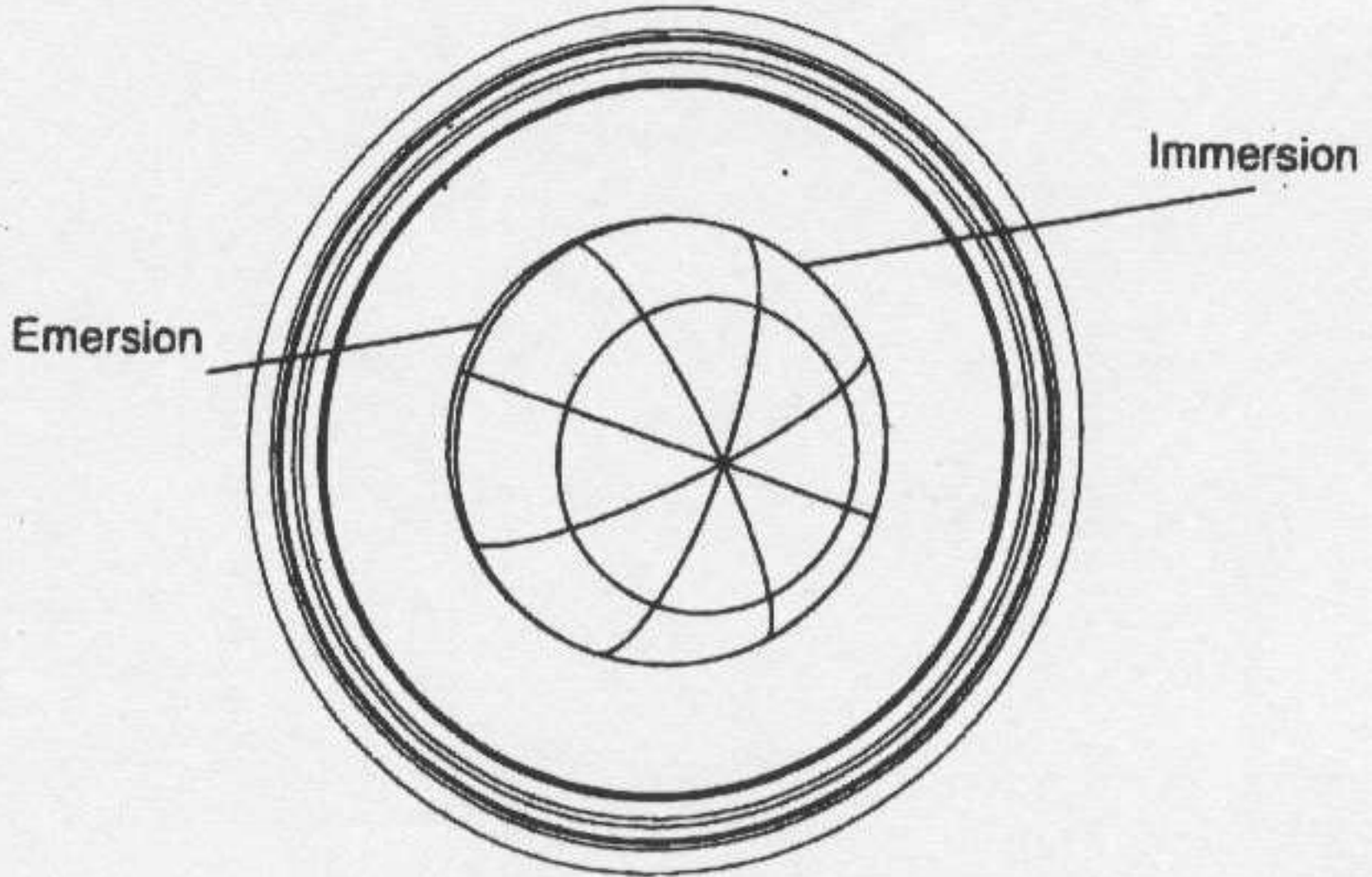


La lumière reçue sur Terre au cours de  
l'occultation

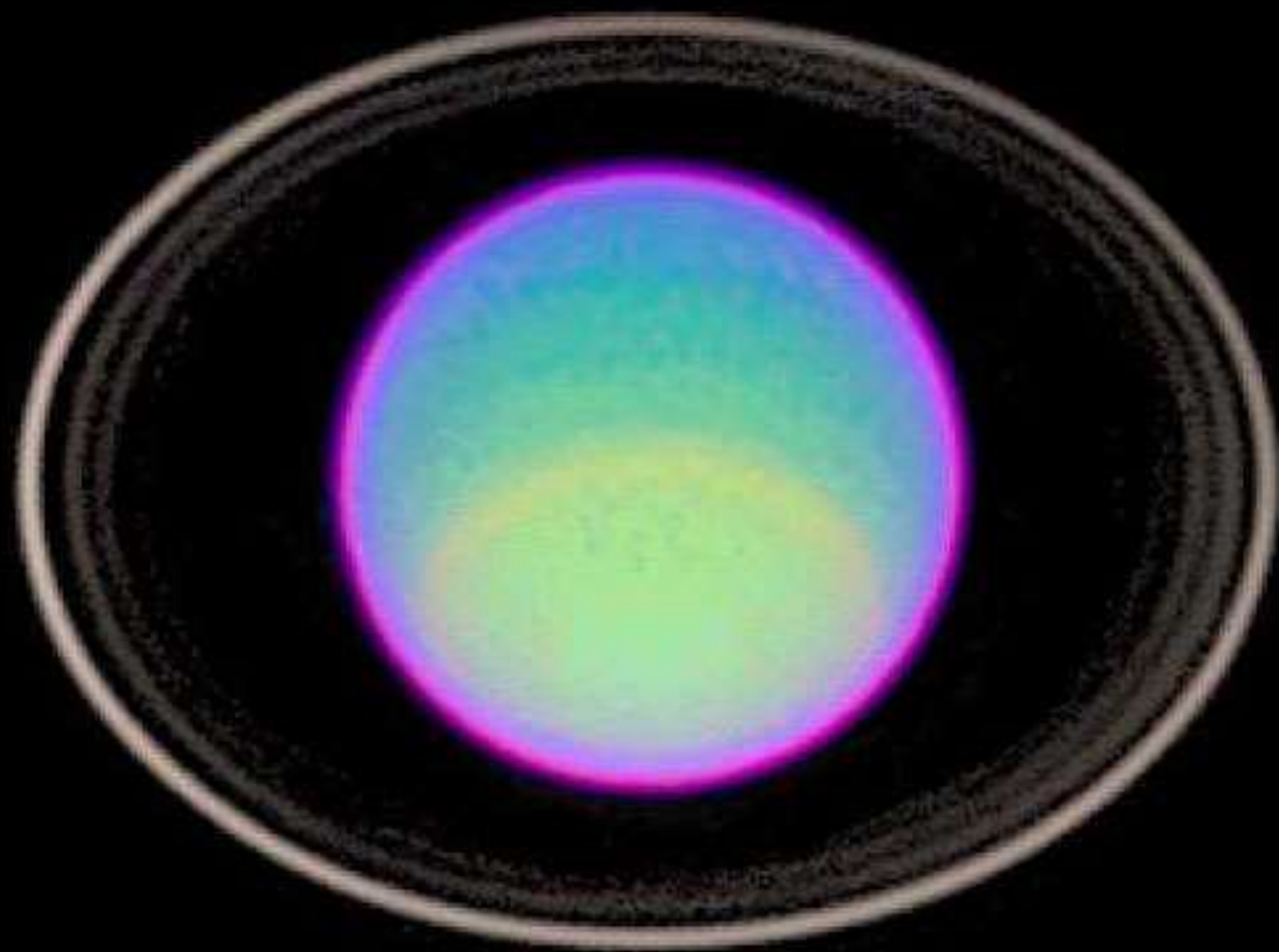




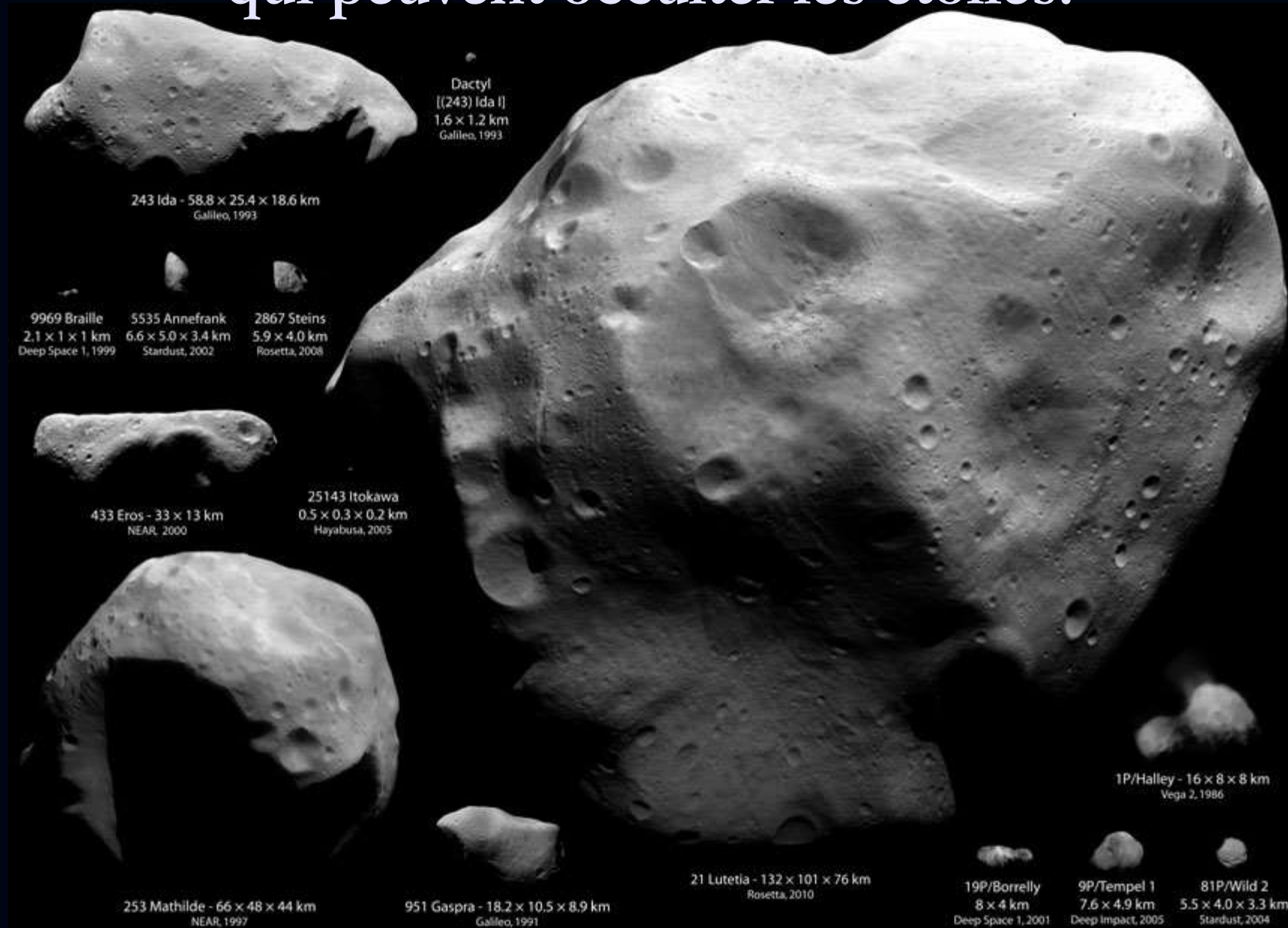
La lumière reçue sur Terre au cours de l'occultation



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



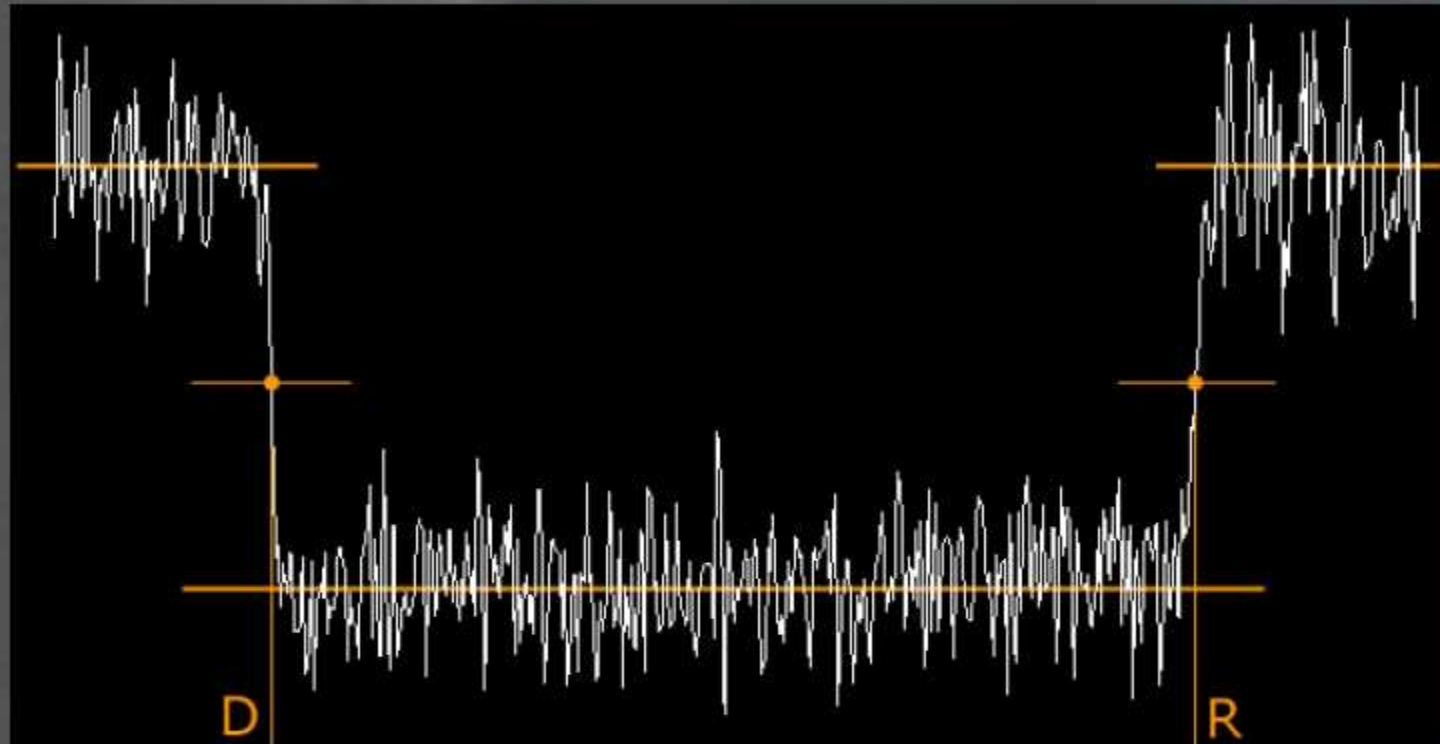
# Les astéroïdes: des points de tailles très diverses qui peuvent occulter les étoiles!





# Un exemple d'occultation

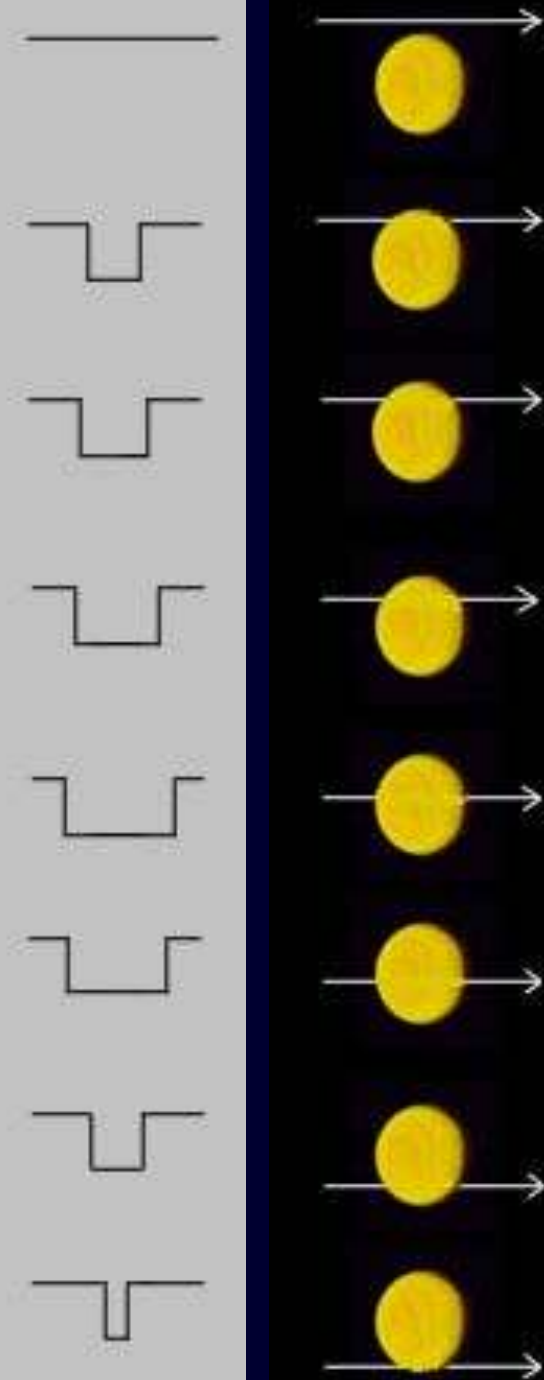
objectif : photométrie rapide et datée



**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



Occultation of HIP19388 by 345 Tercidina on 2002 Sep 17 at 0h 53.115m UT

Star (2000):

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

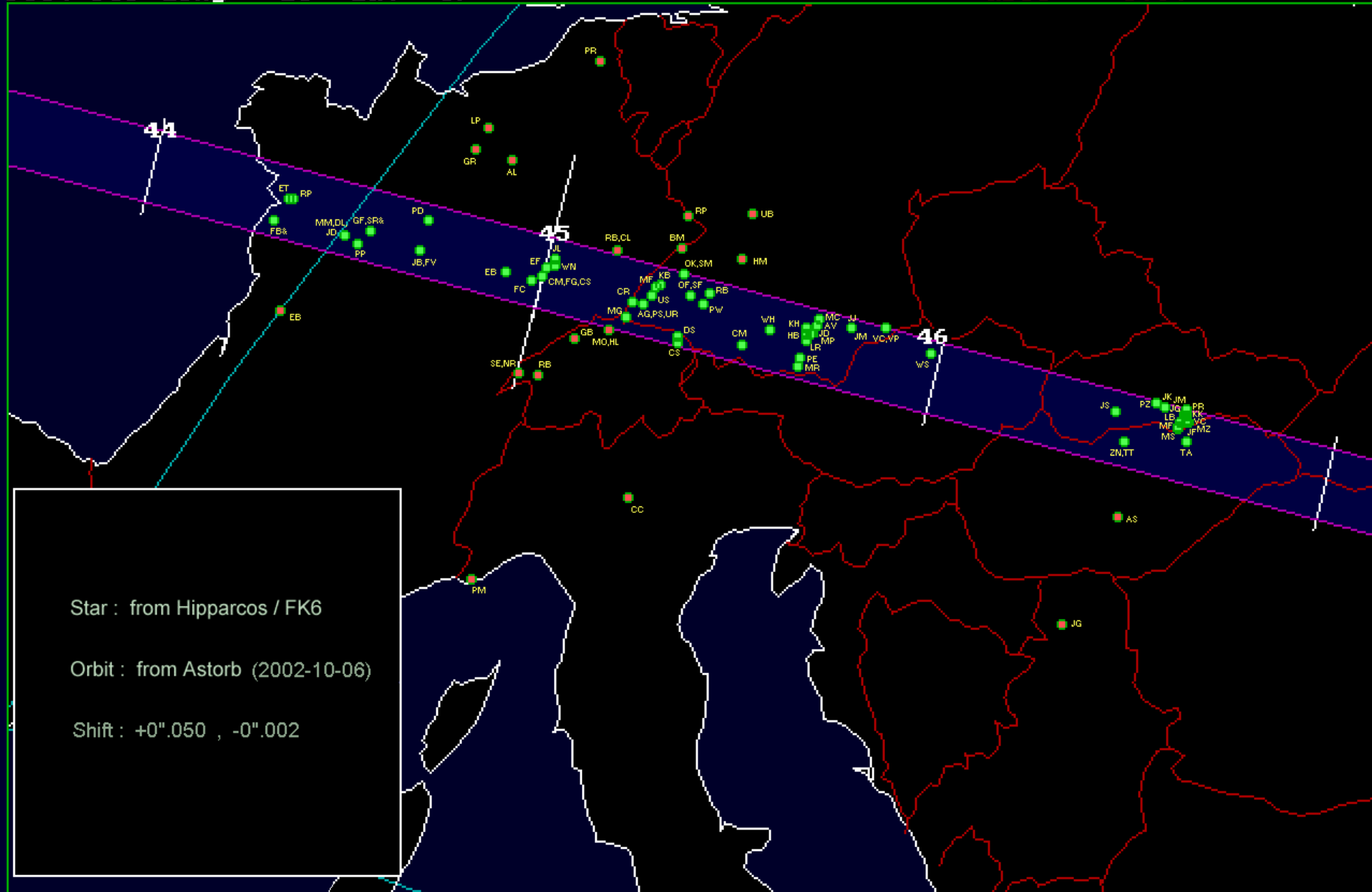
Max Duration = 10.5 secs

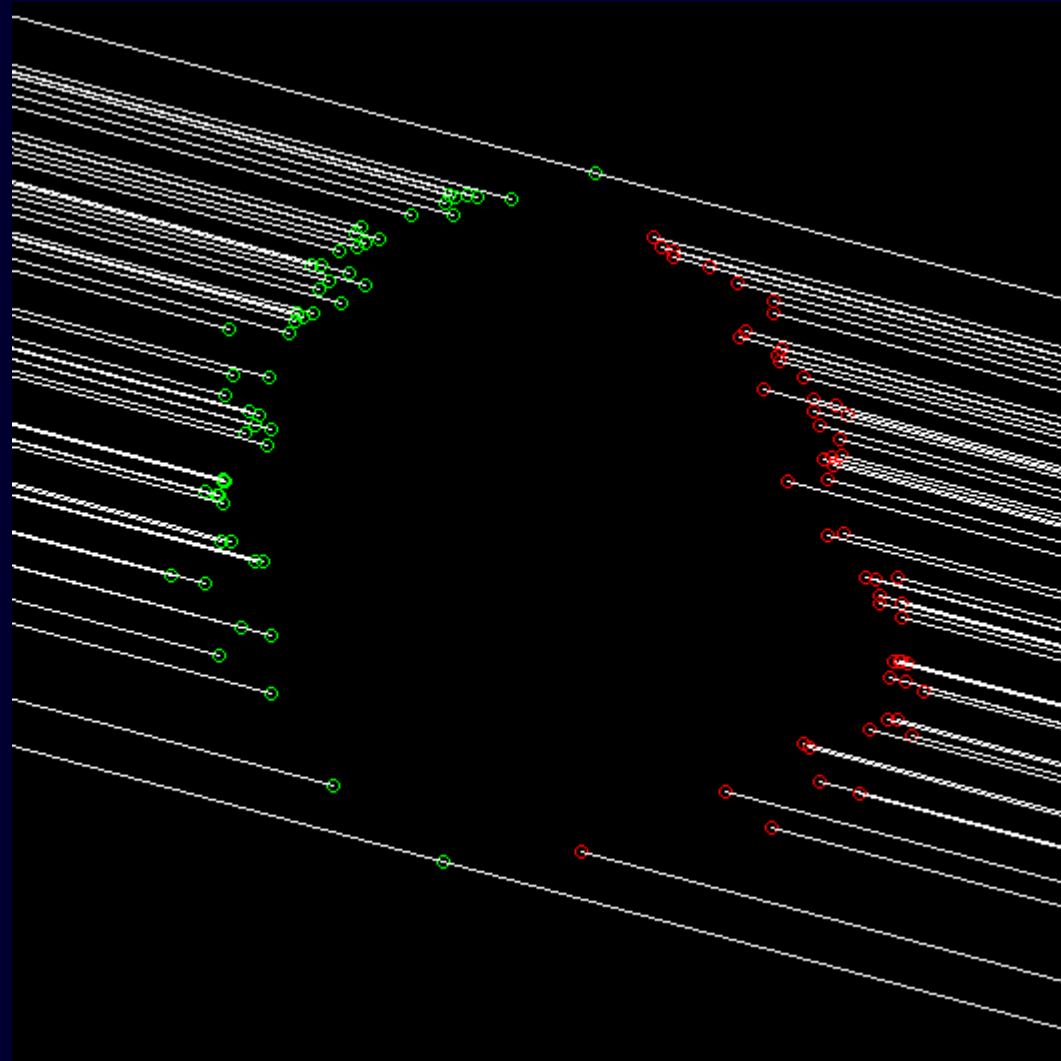
Mag Drop = 7.3  
Sun : Dist = 110°  
Moon : Dist = 122°  
illum = 81%

Asteroid:

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

Plot for Long +16 Lat +47





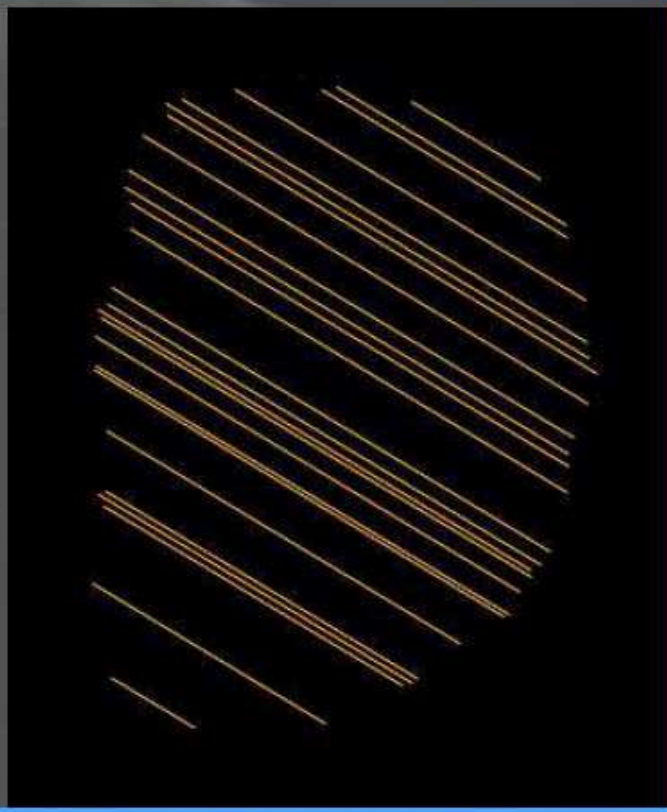
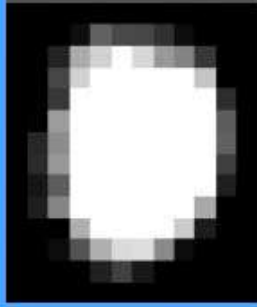
Le rassemblement de toutes les observations de l'occultation dessine la forme de l'astéroïde

# Trois observations d'un gros astéroïde

200 km de diamètre

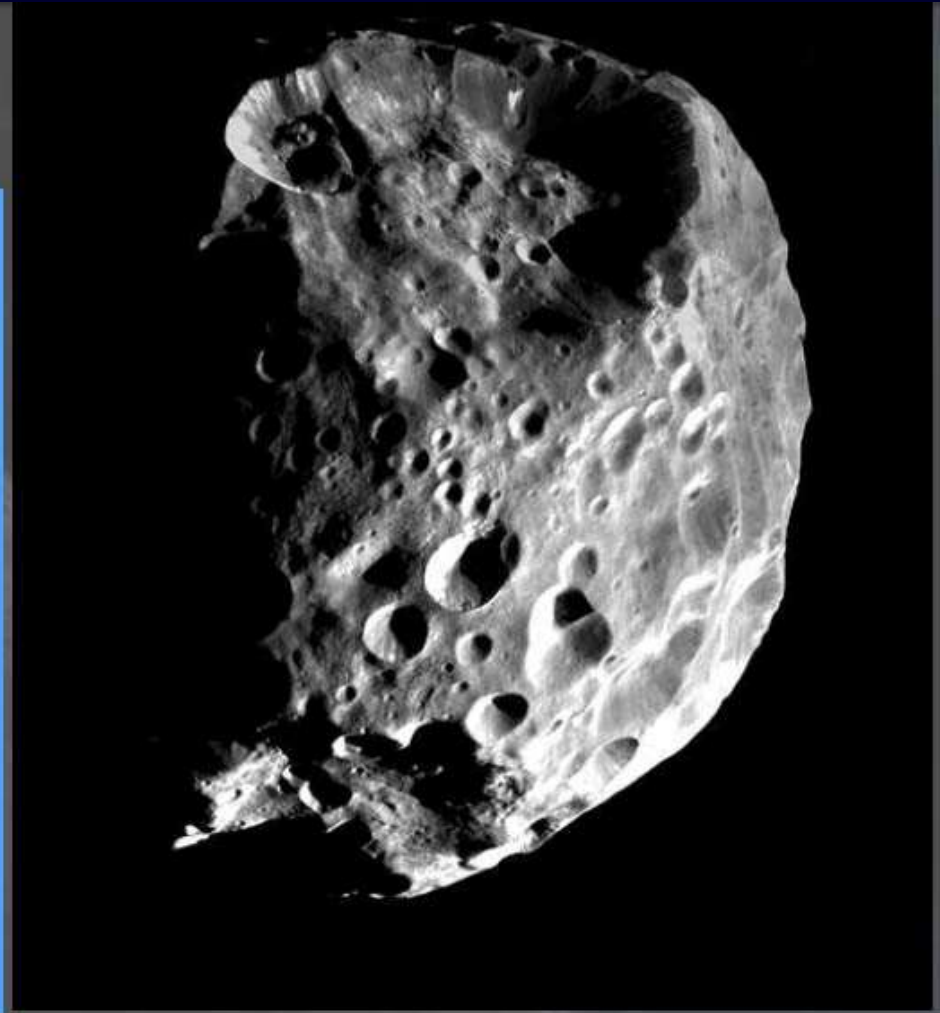
à 300 millions de km de la Terre

depuis la  
Terre



**VLT+AO**  
résolution ~60km

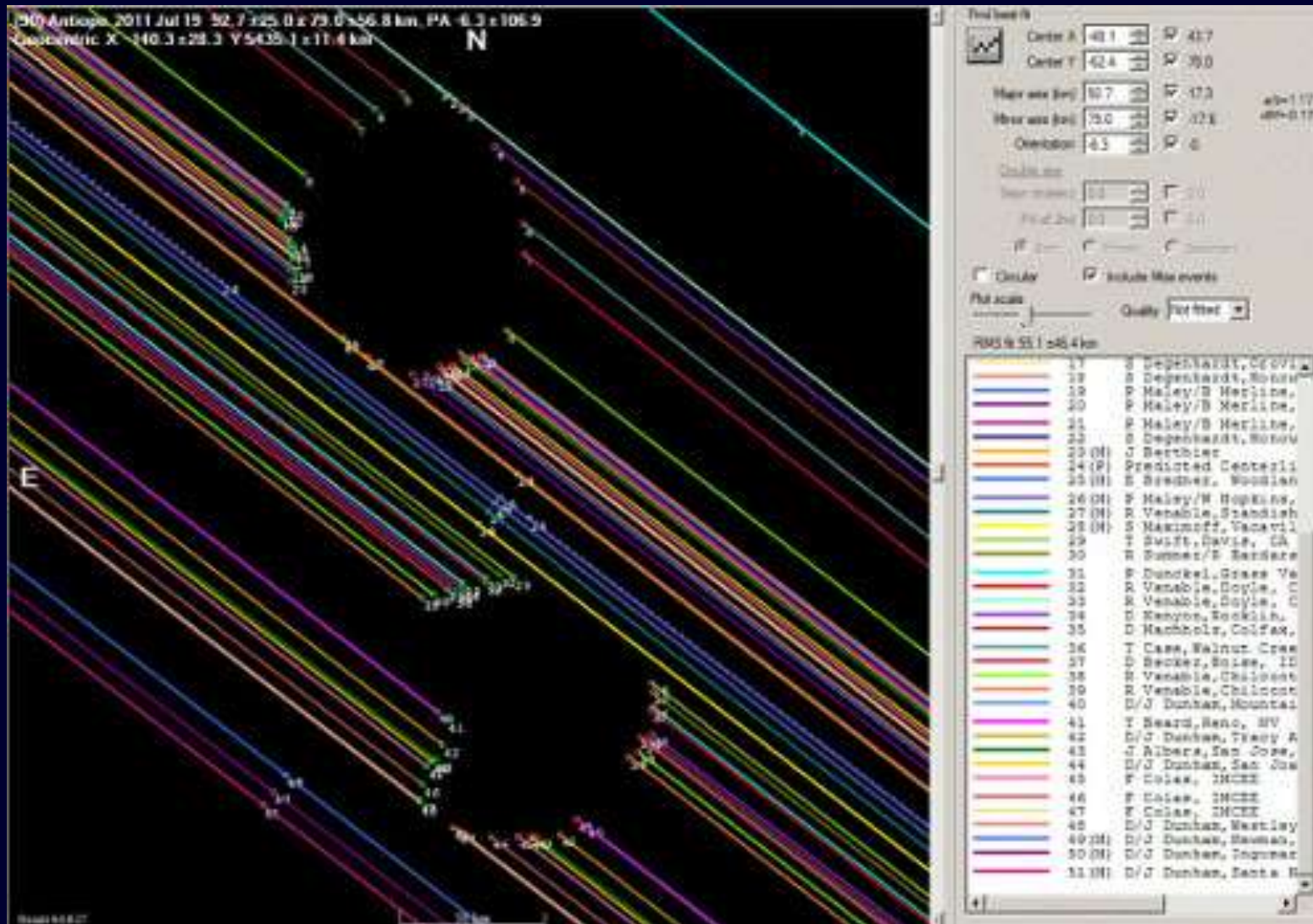
**Occultation stellaire**  
25 cordes  
résolution ~1km



**Sonde spatiale**  
résolution ~15m

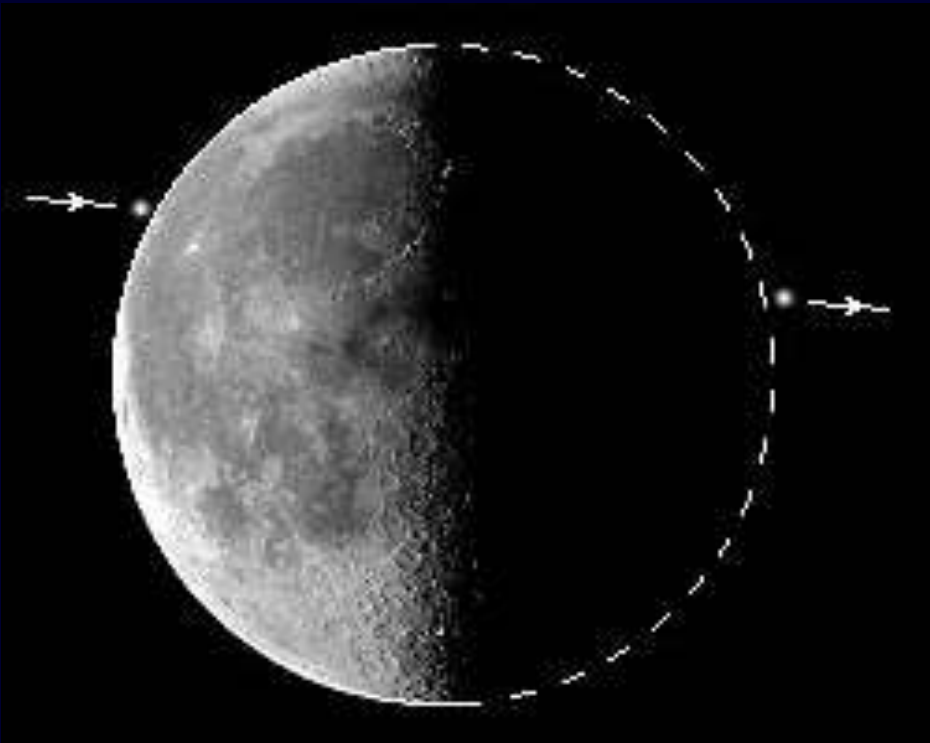
sur place !

# Un astéroïde double



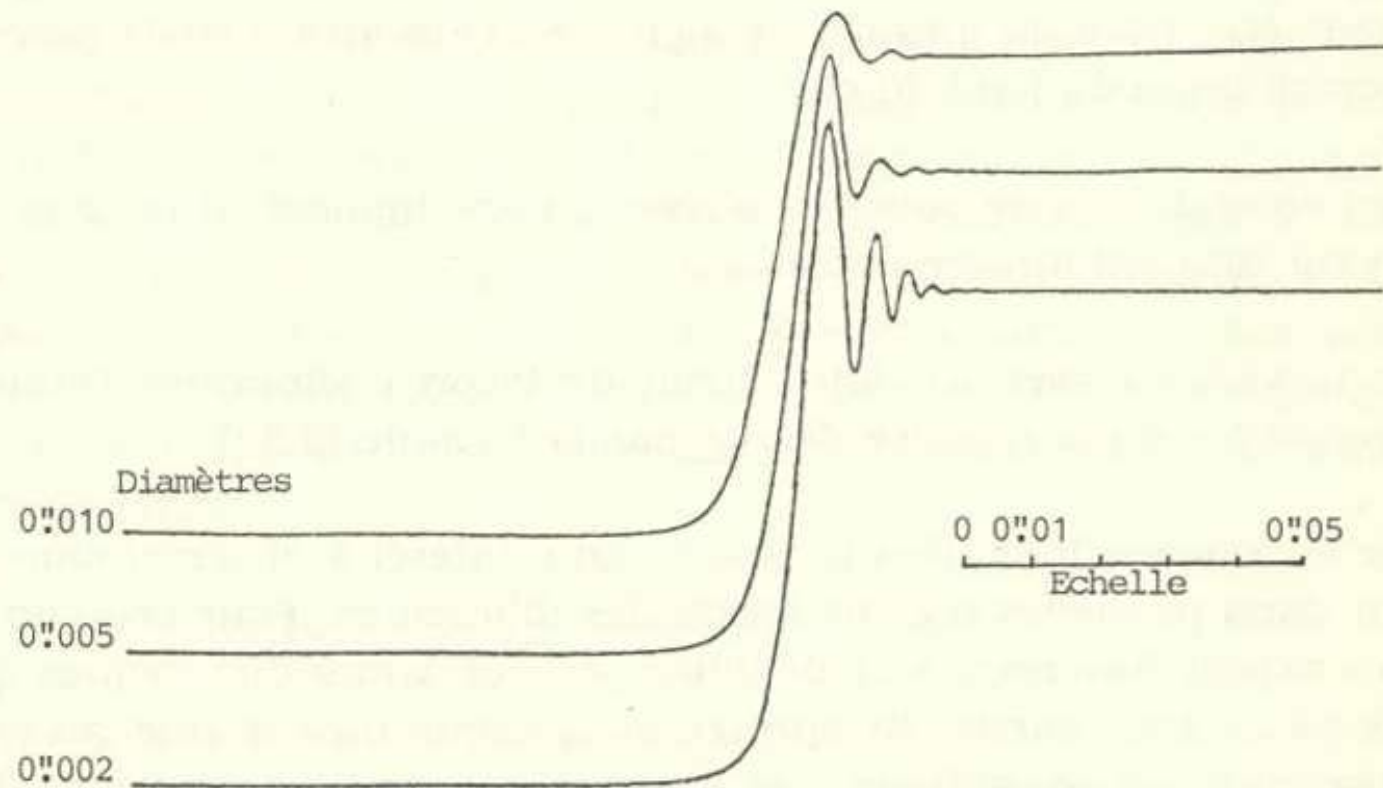


# Les occultations d'étoiles par la Lune



■ 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).

# Conclusion

- La mécanique céleste a beaucoup d'application, depuis les levers et couchers de Soleil jusqu'à la cosmologie
- La mesure des angles et des distances et la modélisation des mouvements sont fondamentales en astronomie.