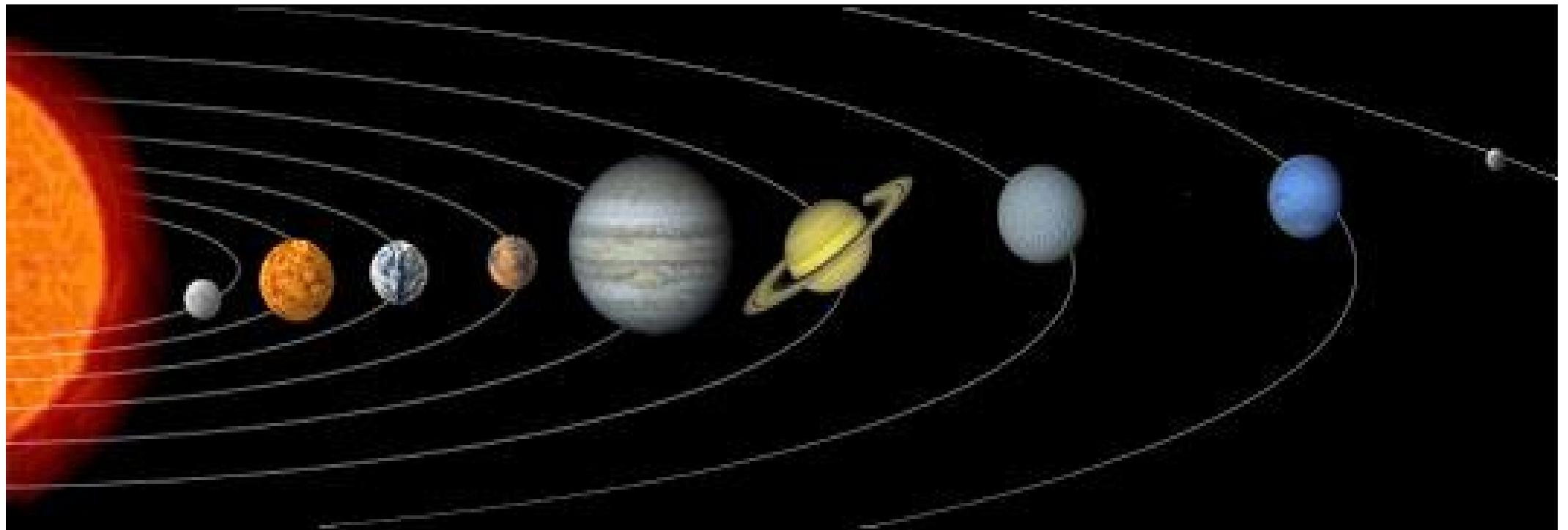


# **Chapitre 6**

# **Les planètes**

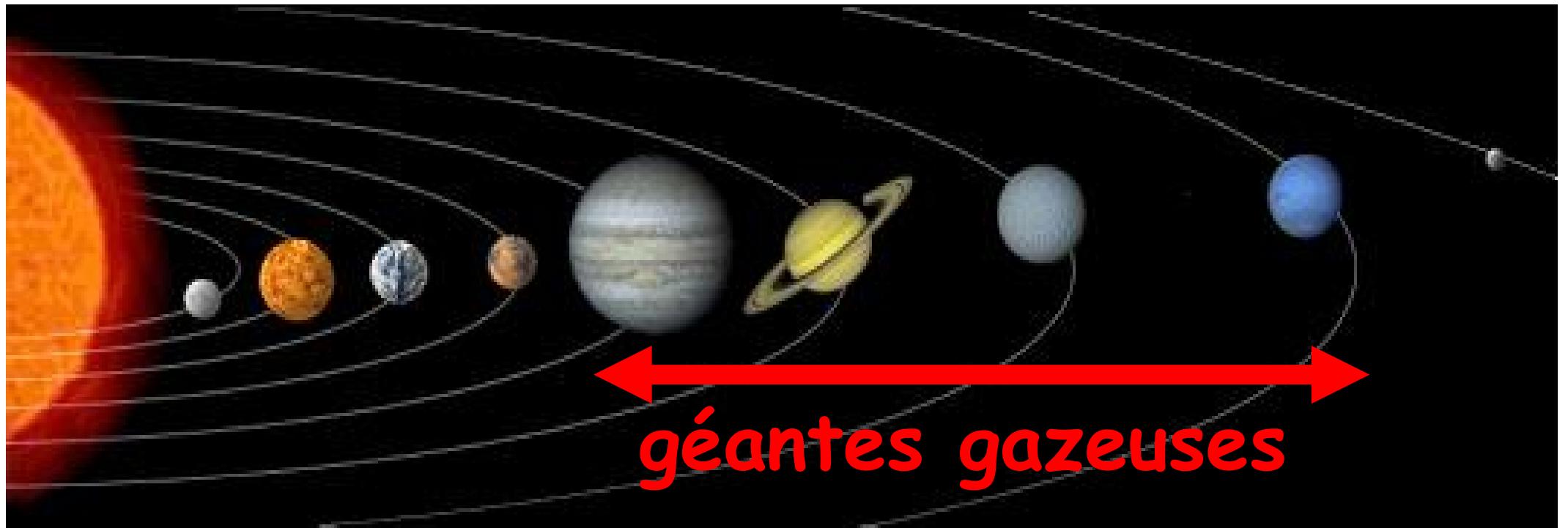
# Le système solaire



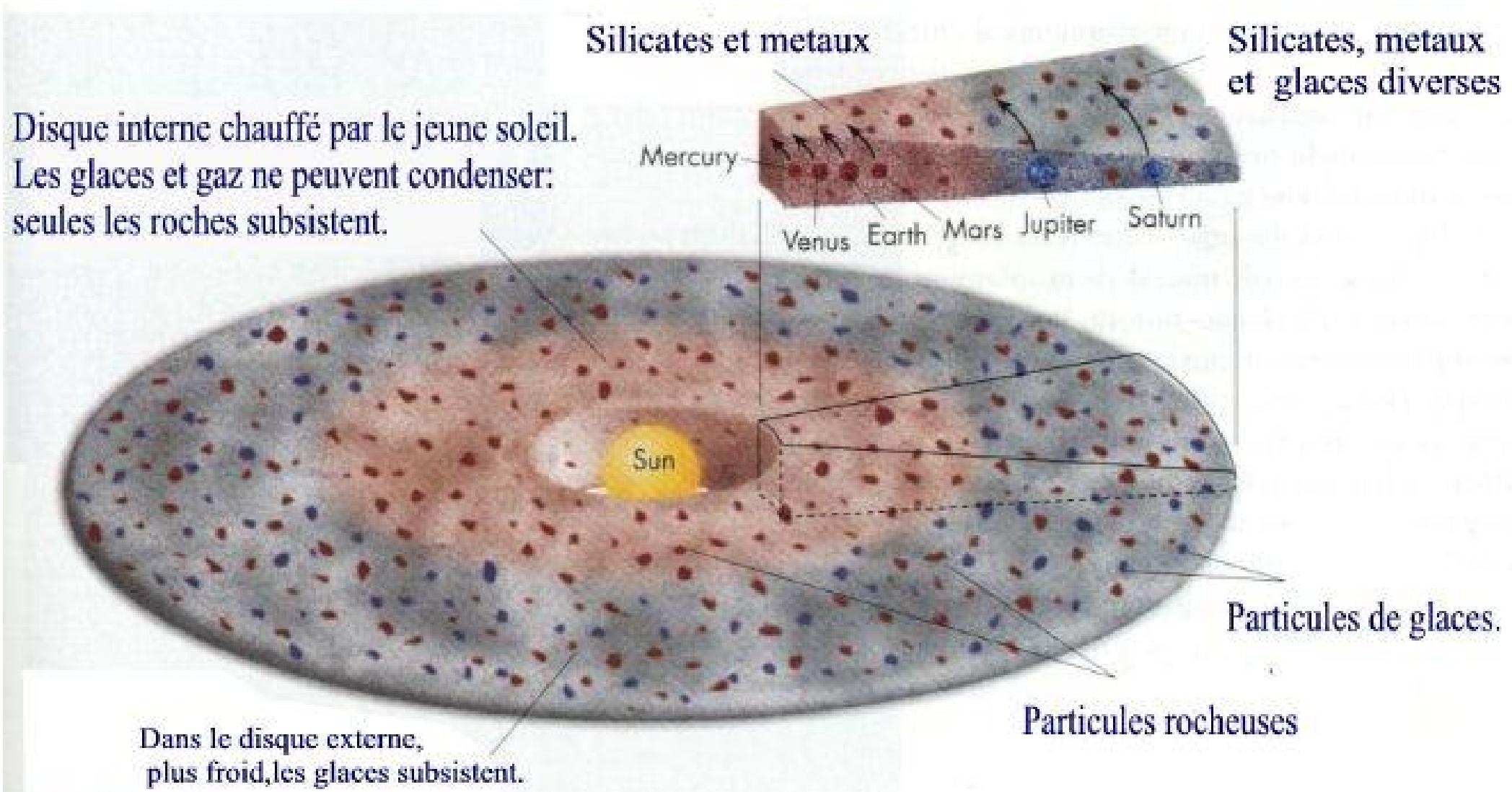
# Le système solaire



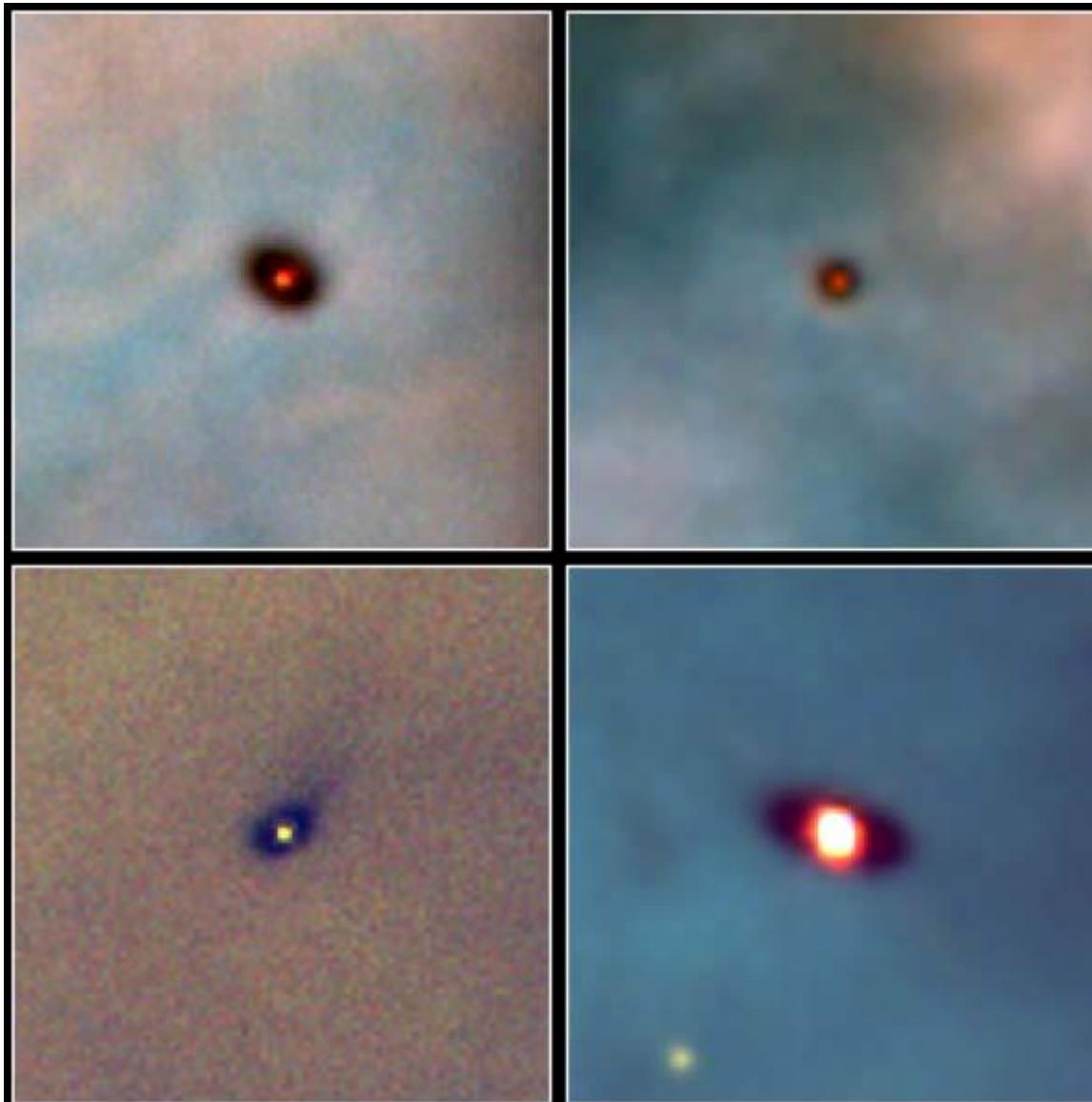
# Le système solaire



# La formation du système solaire



# La formation du système solaire



Protoplanetary Disks  
Orion Nebula

HST • WFPC2

PRC95-45b • ST Scl OPO • November 20, 1995

M. J. McCaughrean (MPIA), C. R. O'Dell (Rice University), NASA

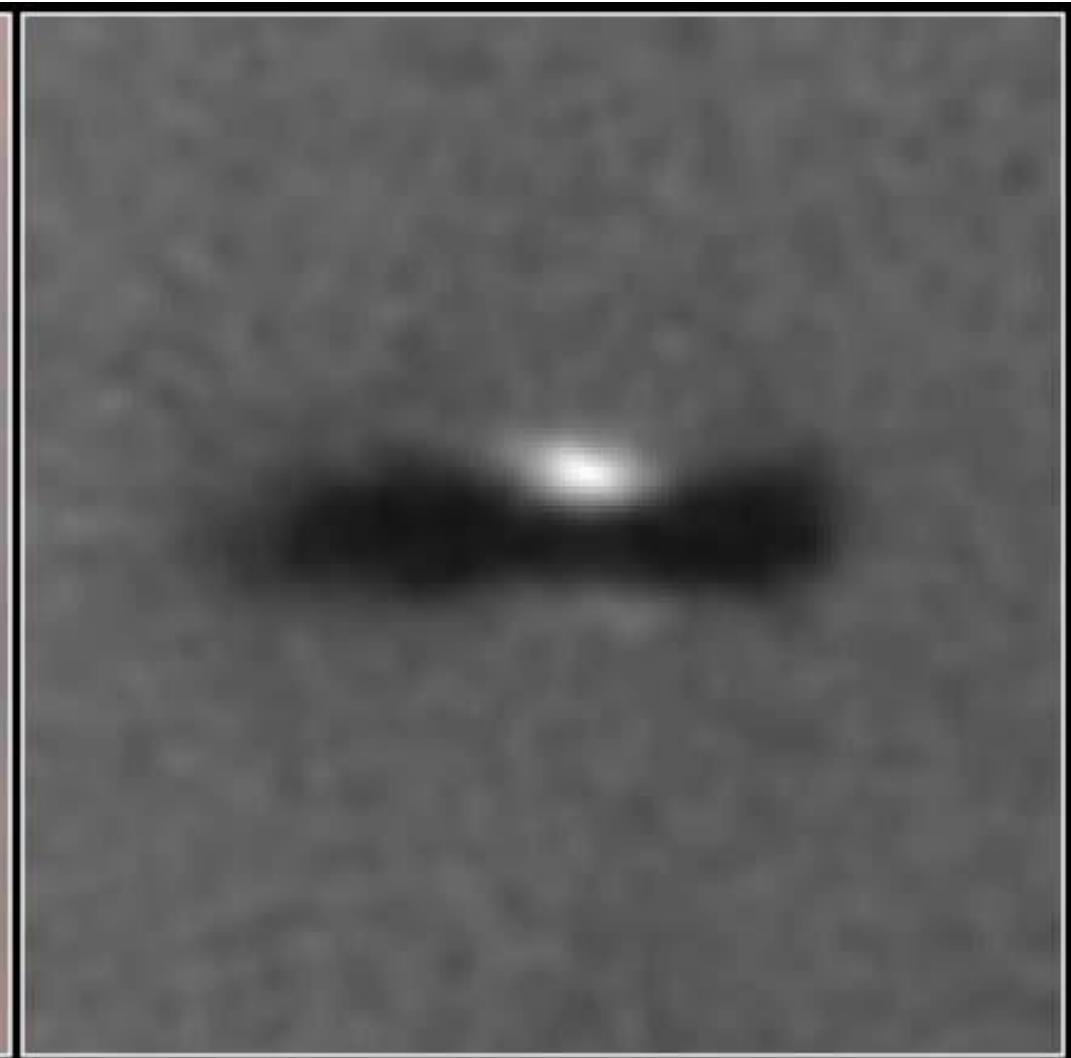
# La formation du système solaire



Edge-On Protoplanetary Disk  
Orion Nebula

PRC95-45c · ST Scl OPO · November 20, 1995

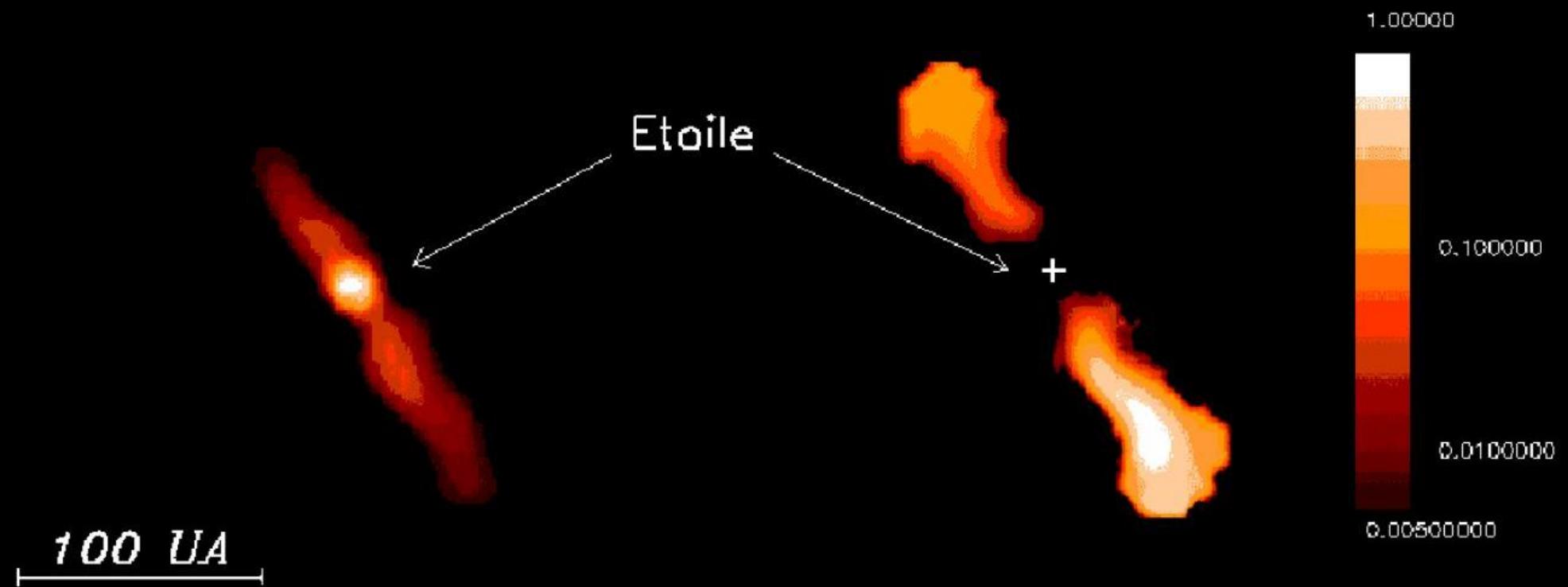
M. J. McCaughrean (MPIA), C. R. O'Dell (Rice University), NASA



HST · WFPC2

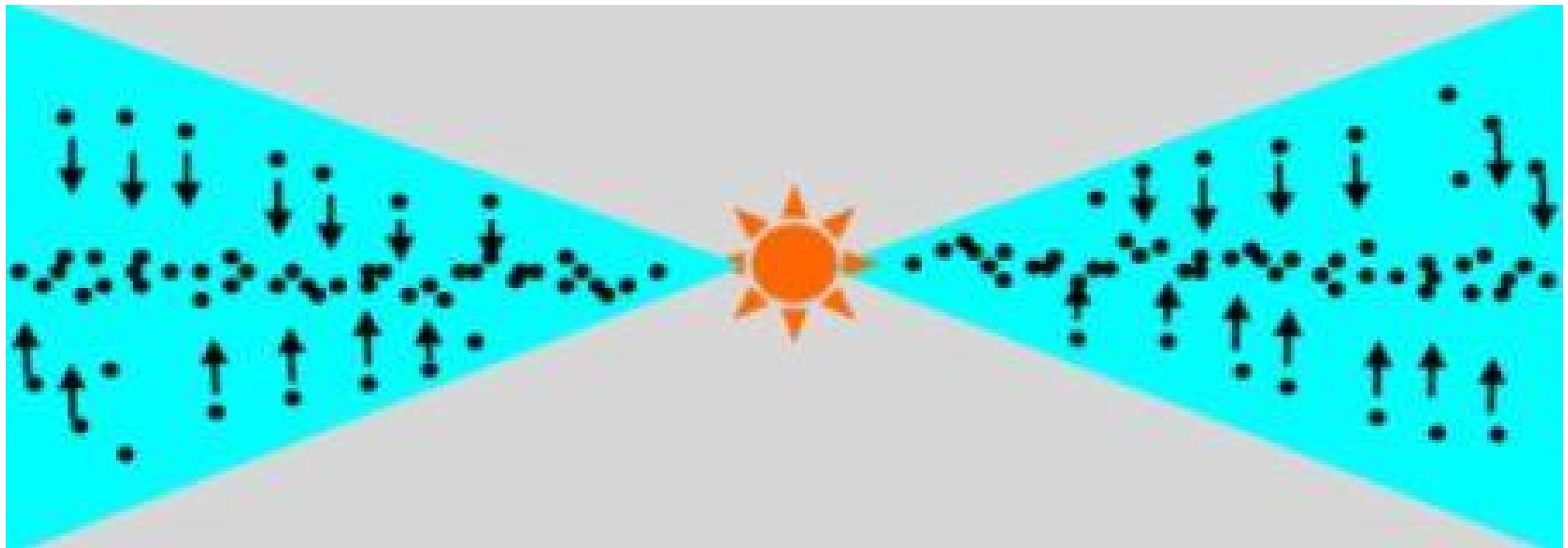
# La formation du système solaire

*Flux à 10 μm et densité du disque de β Pictoris*

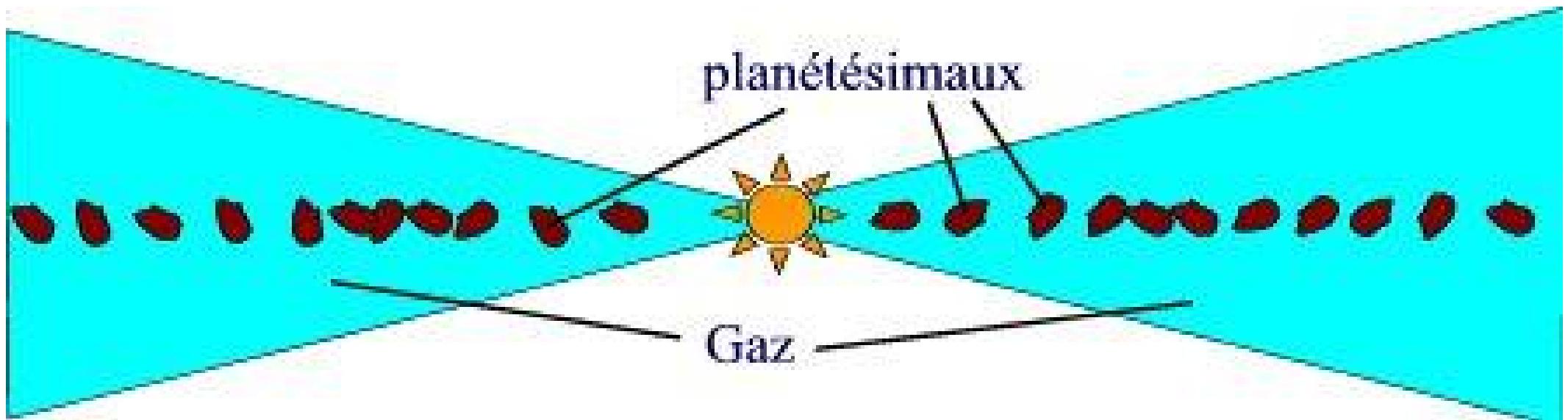


Cliché DSM/DAPNIA/SAp Lagage P.O. et Pantin E.

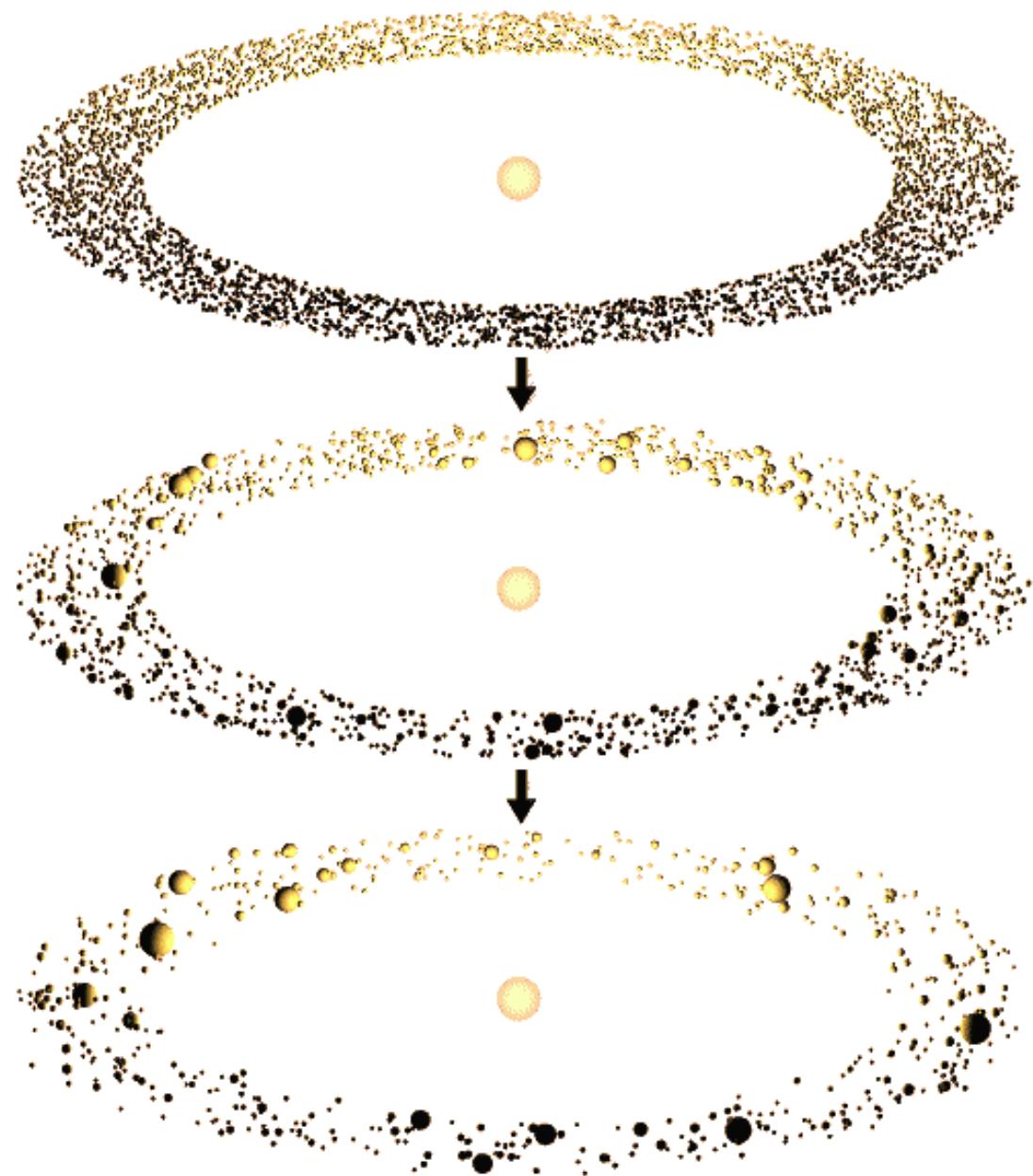
# La formation du système solaire



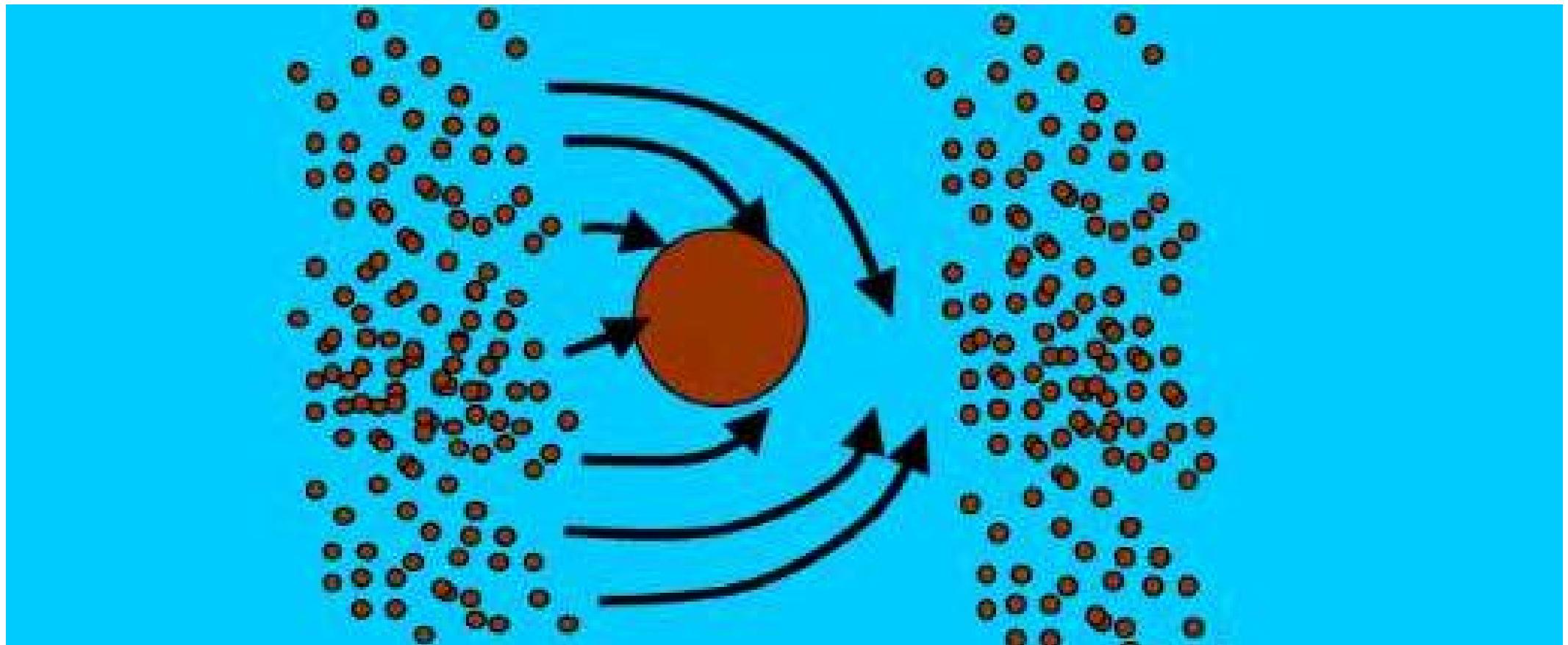
# La formation du système solaire



# La formation du système solaire

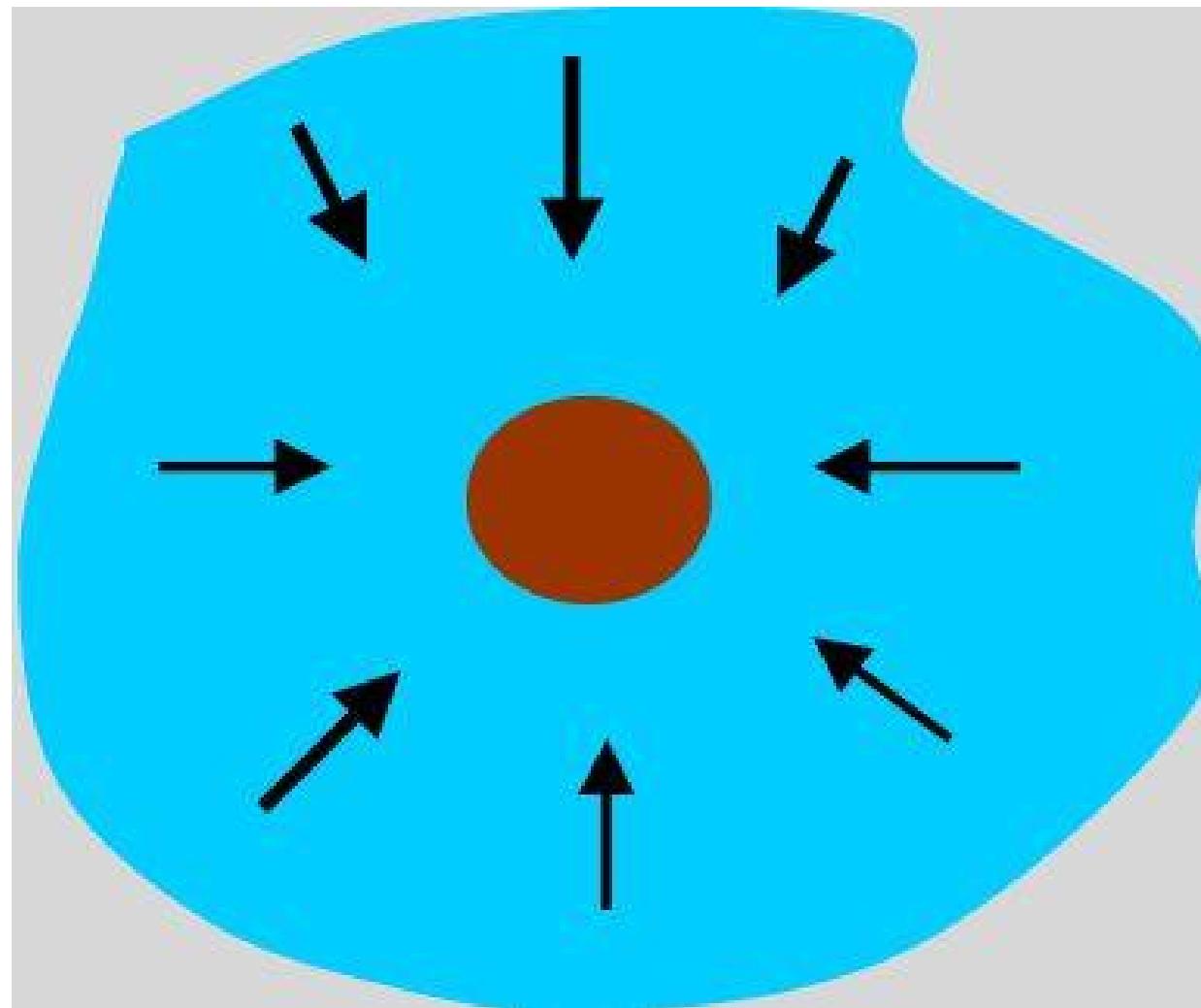


# La formation du système solaire



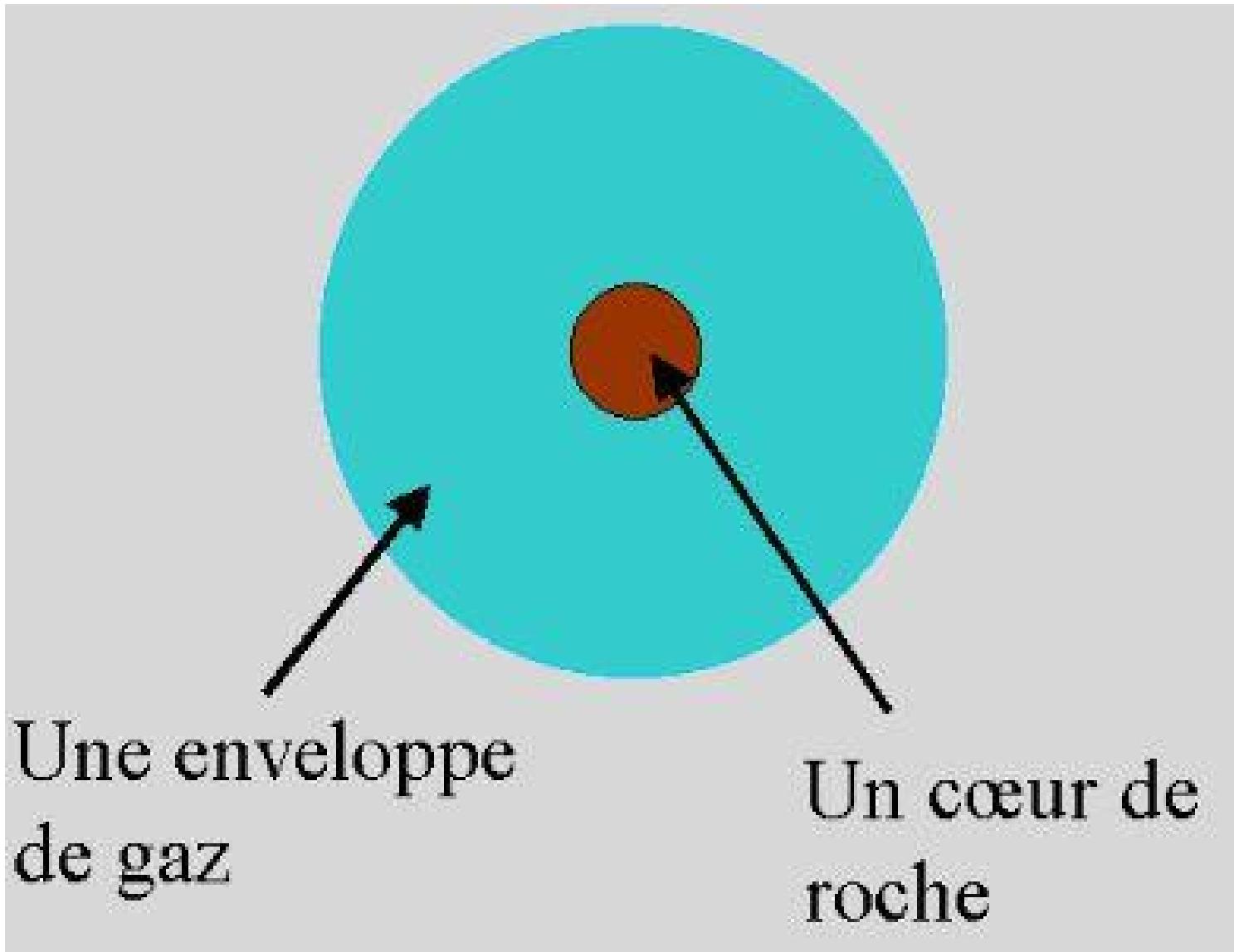
Planètes gazeuses

# La formation du système solaire



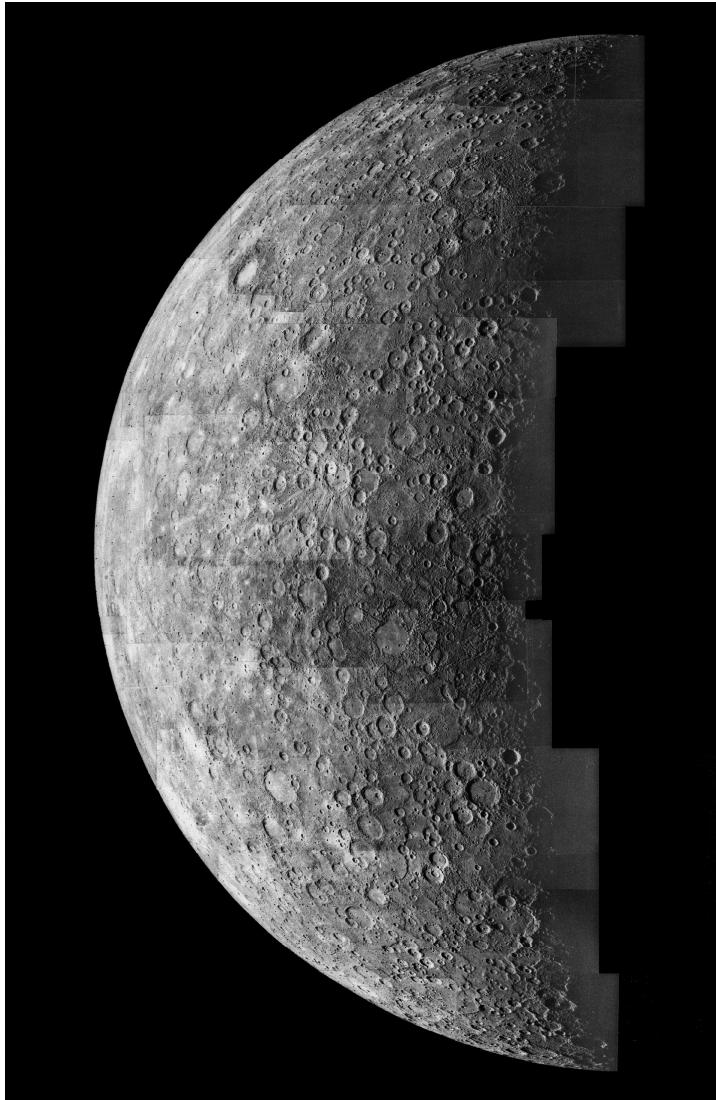
Planètes gazeuses

# La formation du système solaire



Planètes gazeuses

# Mercure



Diamètre : 4.878 km

Distance du Soleil : 58 millions de km

# Mercure

Nommée par les Romains  
du nom du messager des Dieux  
car elle est la planète  
qui se déplace le plus rapidement  
autour du Soleil

Révolution sidérale en **88** jours

# Mercure

Diamètre 4.878 km



Lune < Mercure < Terre

140% de la Lune

60% de la Terre

# Mercure

Diamètre 4.878 km



Mercure < Ganymède  
(satellite de Jupiter)

Mercure < Titan  
(satellite de Saturne)

# Mercure

Période de rotation sidérale  
déterminée tardivement

en 1965  
par Pettengill et Dyce  
par écho radar  
estimée  
à 59 jours  $\pm$  5 jours

# Mercure

en mars 1974  
précisée  
par la sonde Mariner 10  
à  $58,646 \pm 0,005$  jours

# Mercure

Révolution sidérale : 88 jours

Rotation sidérale : 59 jours



Durée du jour : 176 jours

# Mercure



Mariner 10 en 1974

# Mariner 10

atteint Mercure le 29 mars 1974  
survol à 705 km

2 autres passages  
le 21 septembre 1974  
à 47000 km

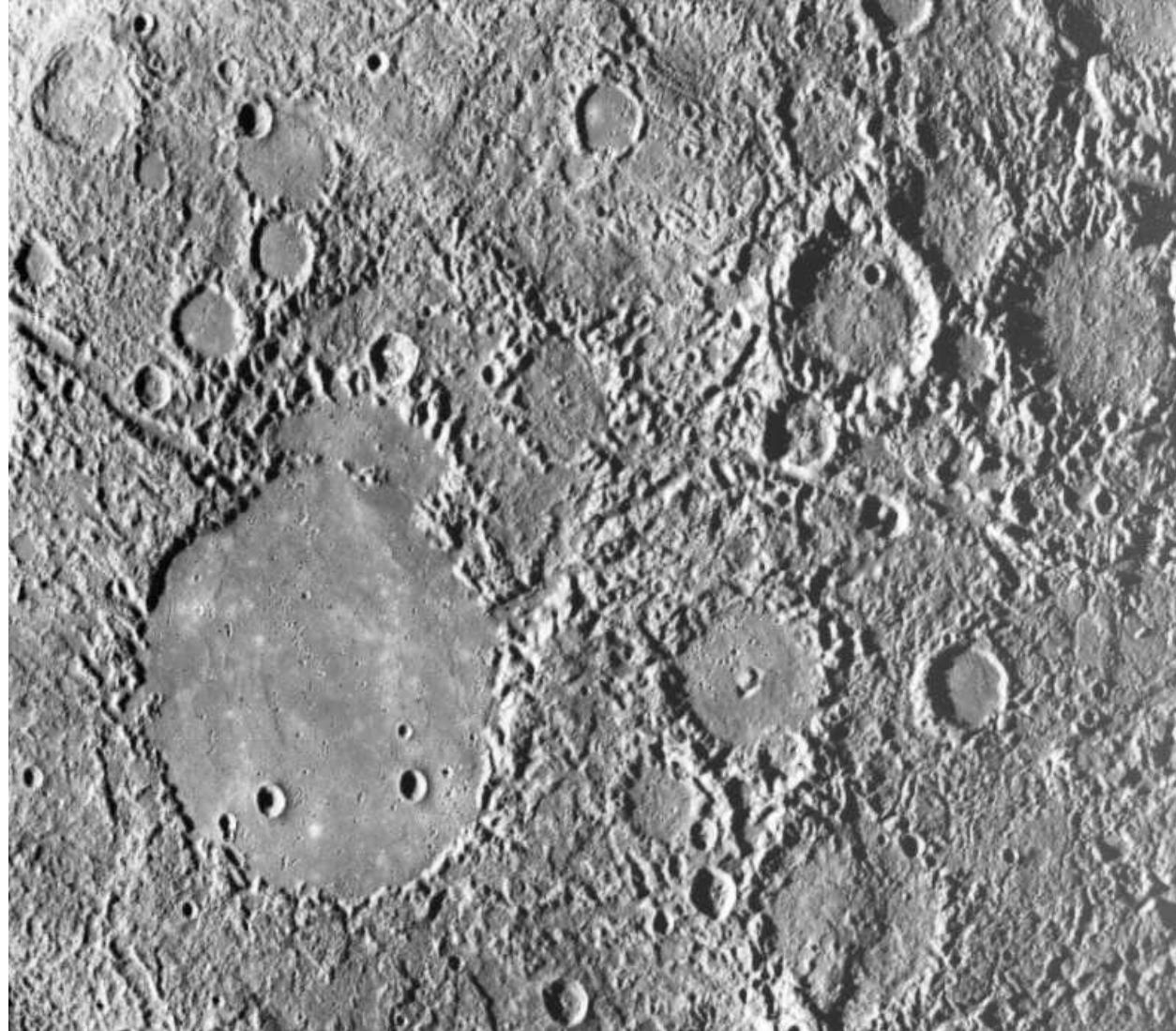
le 16 mars 1975  
à 327 km

# Mercure



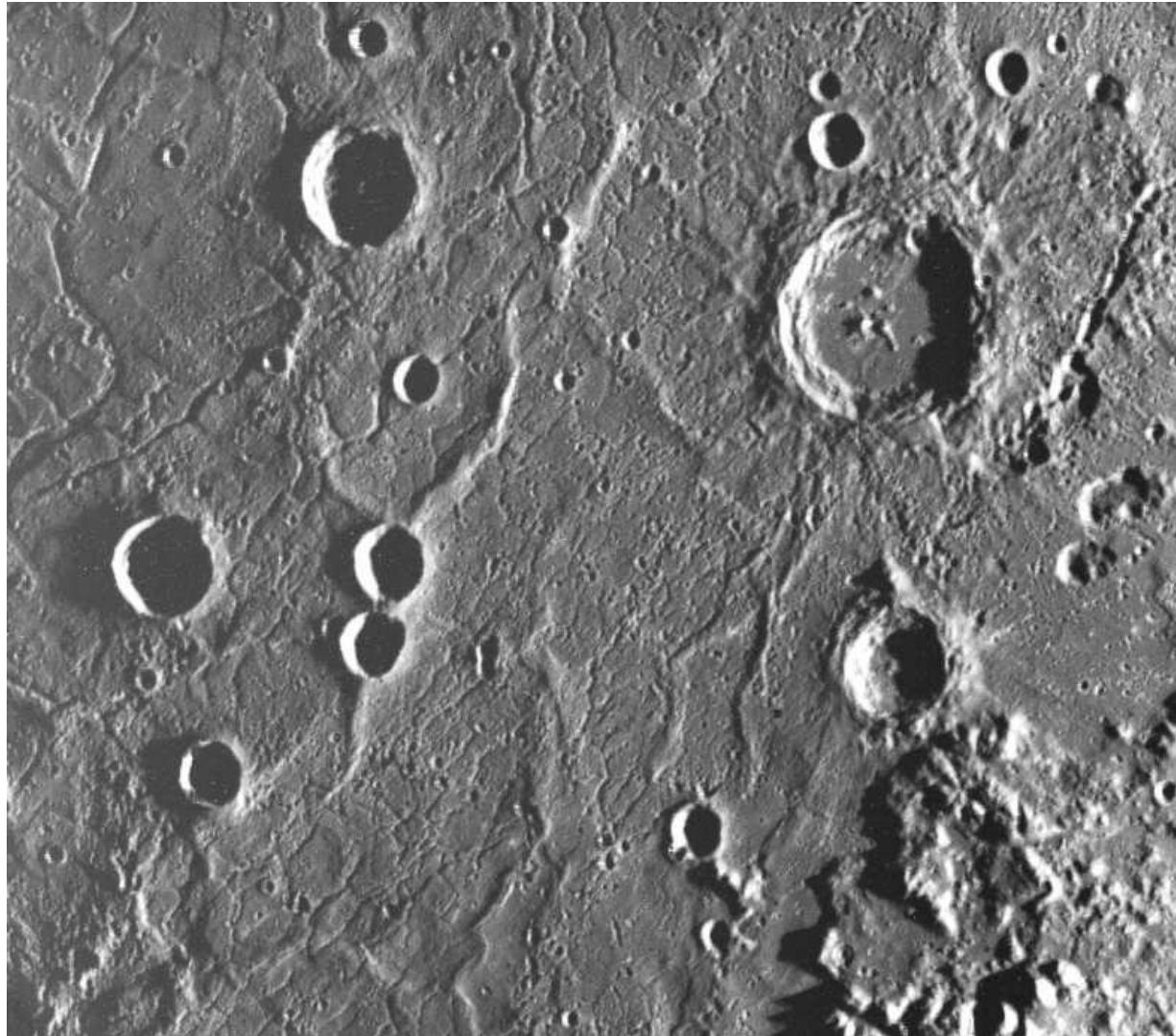
2.700 images  
couvrant 45% de la surface de la planète  
résolution jusqu'à 100 mètres

# Mercure



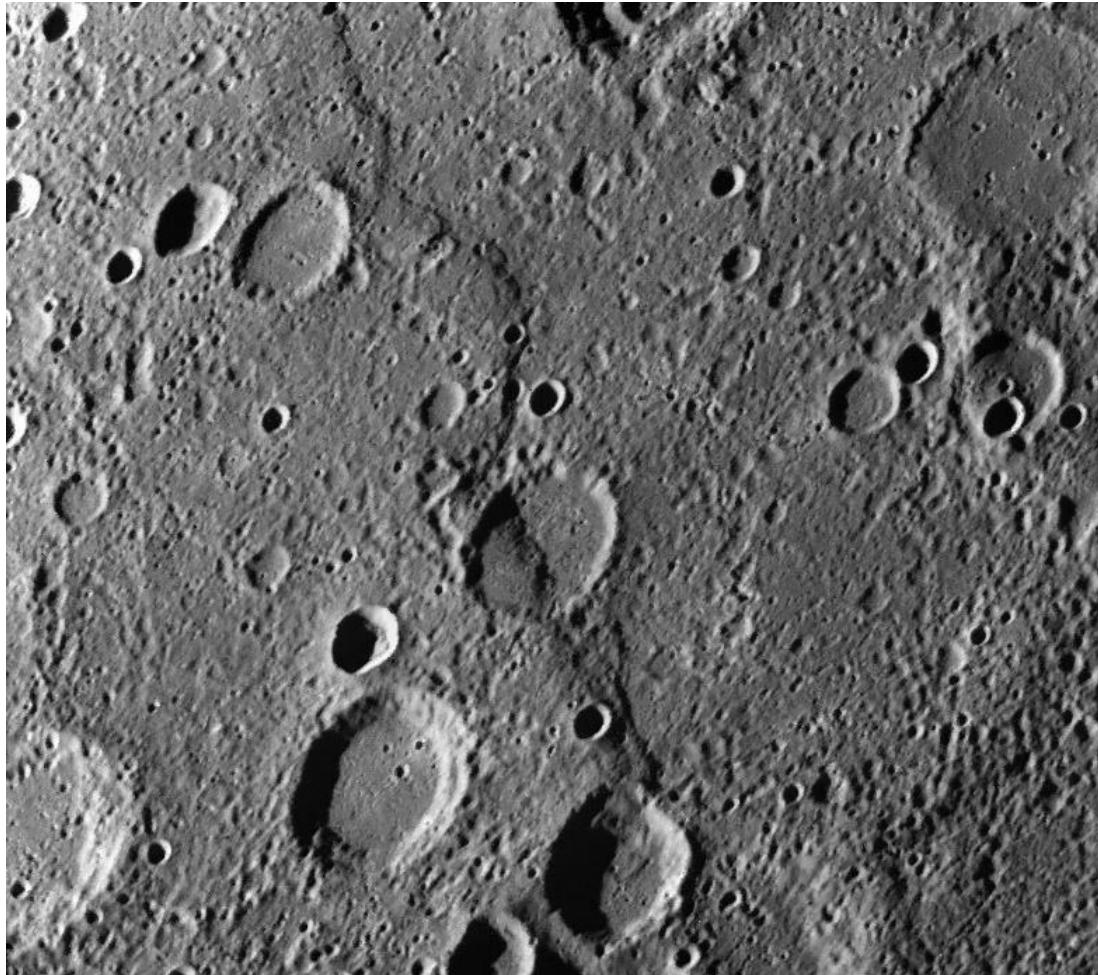
Planète solide de densité  $5,44 \text{ g/cm}^3$   
(Terre :  $5,52 \text{ g/cm}^3$ )

# Mercure



Sol couvert de cratères,  
semblable à la Lune

# Mercure



Pas d'atmosphère ( $10^{-12}$  bars)  
Pas d'eau

Températures extrêmes :  $-173^{\circ}\text{C} \leftrightarrow +427^{\circ}\text{C}$

# Mercure

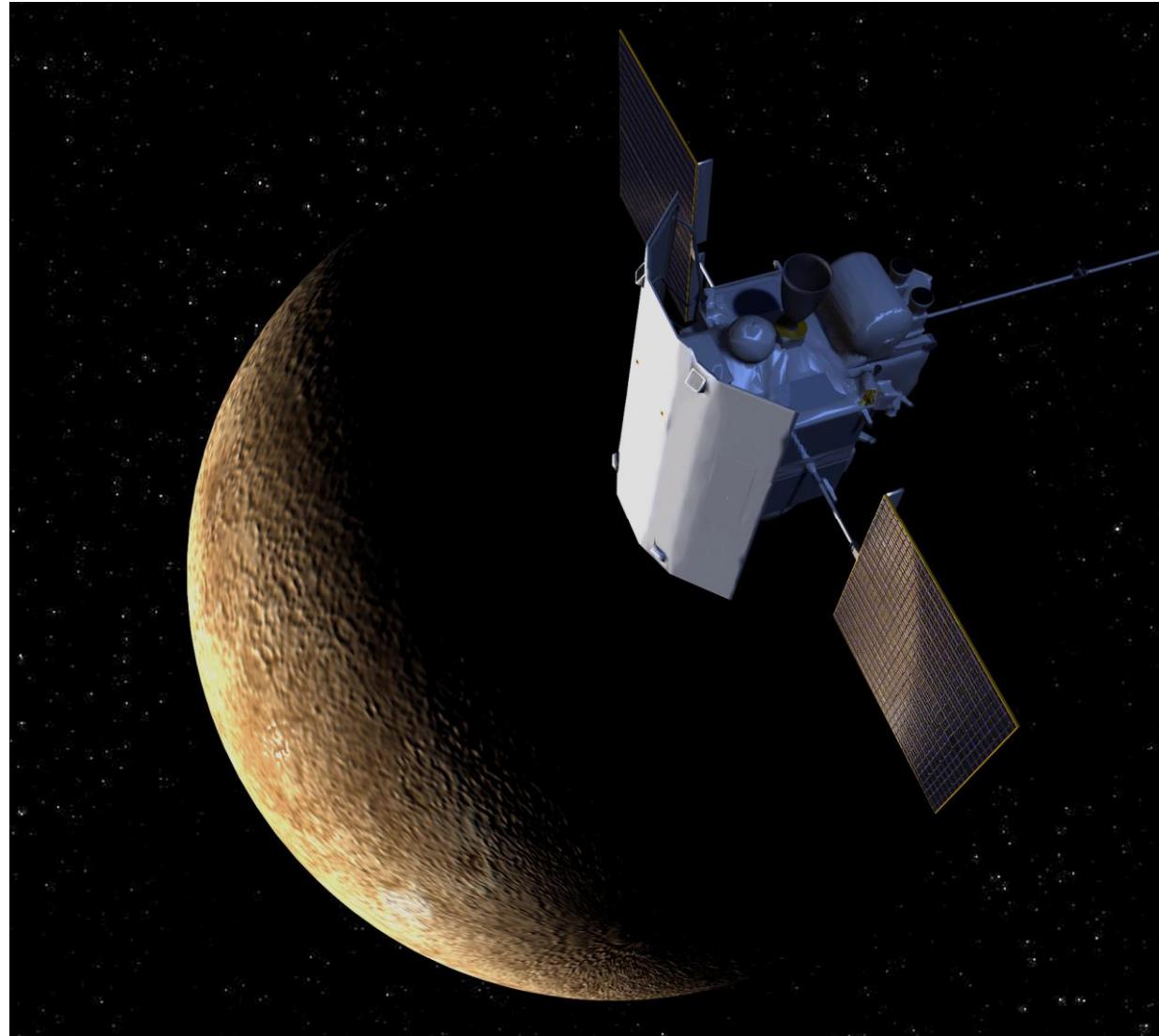


# Mercure



**Messenger**  
**Départ le 30 juillet 2004**

# Mercure



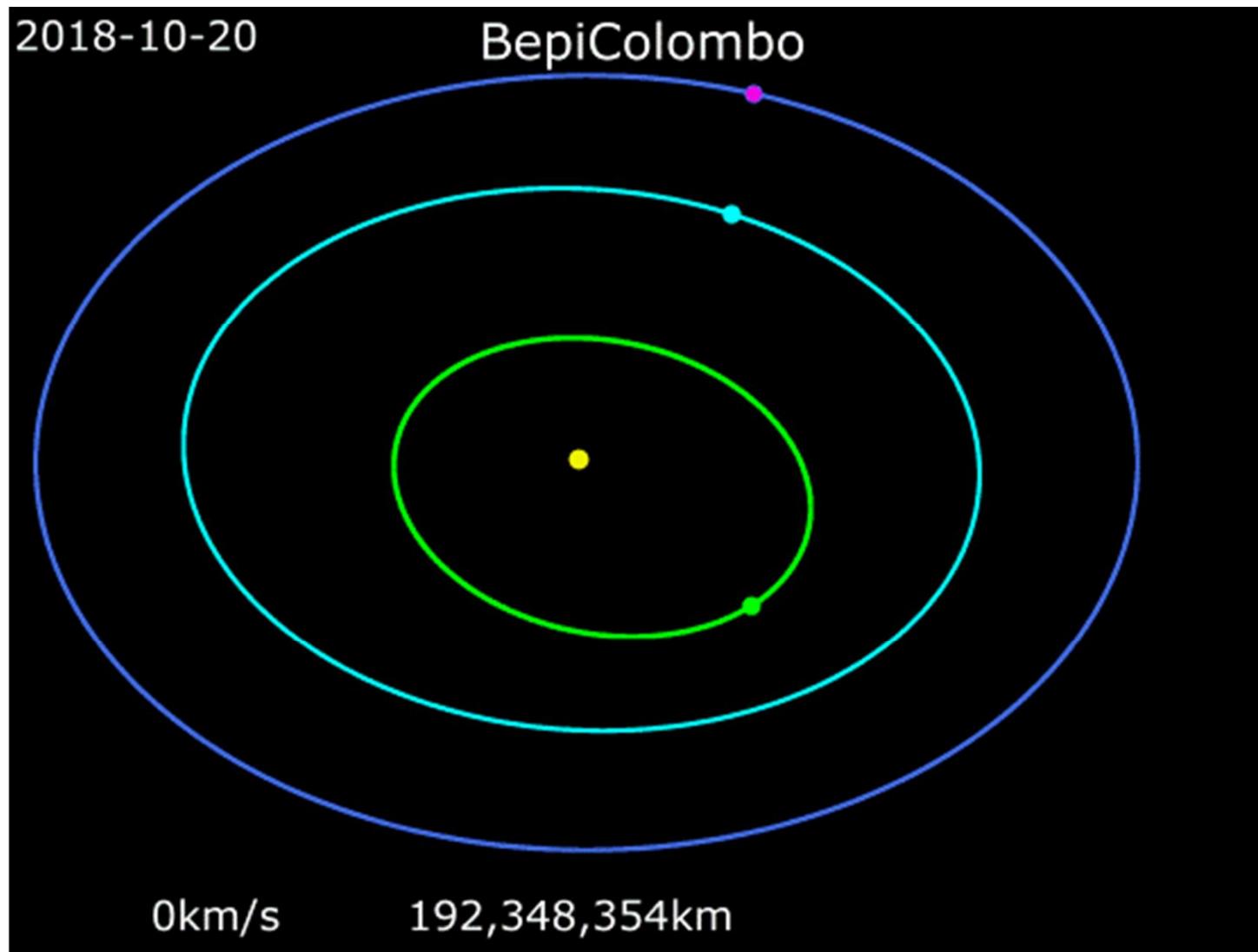
Mise en orbite en mars 2011  
Cartographie complète résolution 10 m

# Mercure



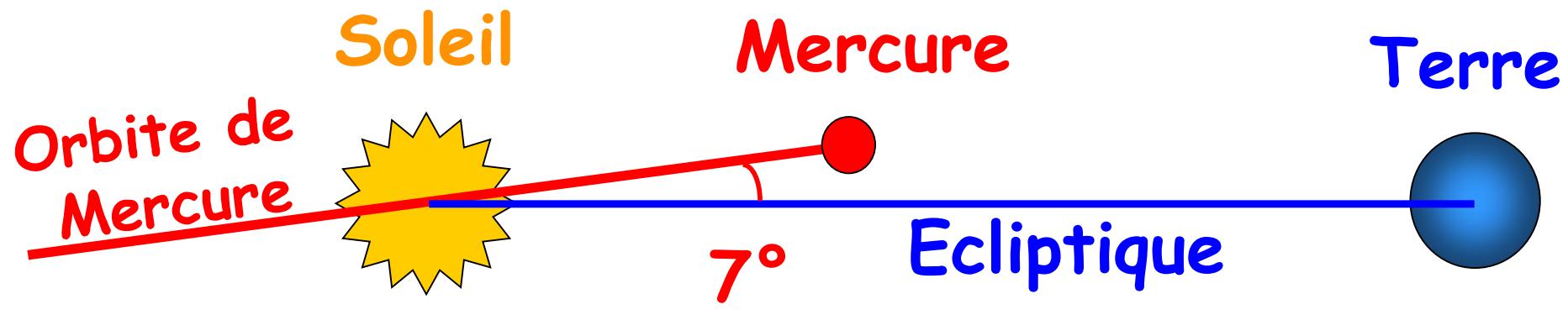
Sonde européenne Bepi Colombo  
Lancée le 19 octobre 2018

# Mercure



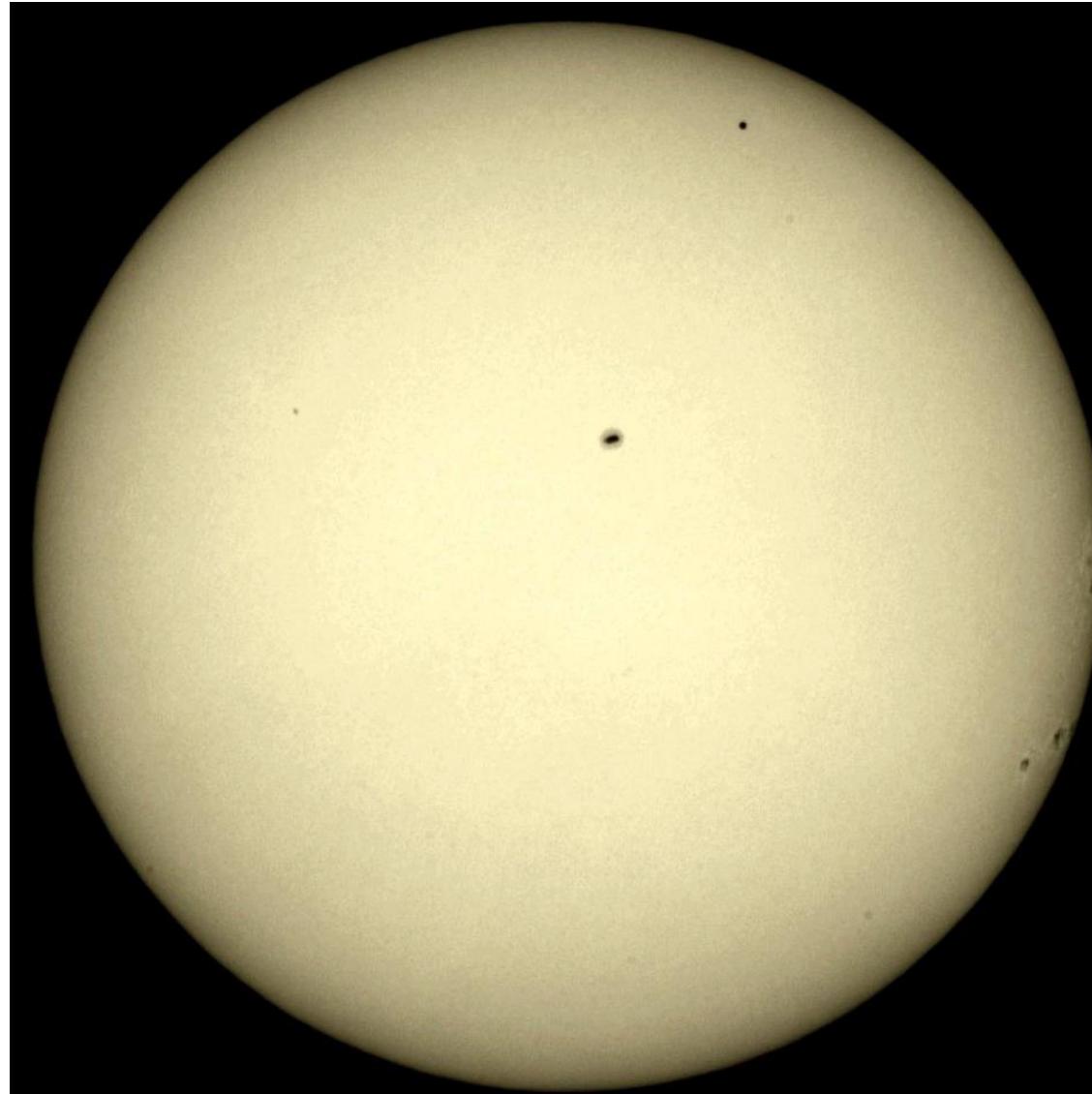
Mise en orbite en 2025

# Mercure



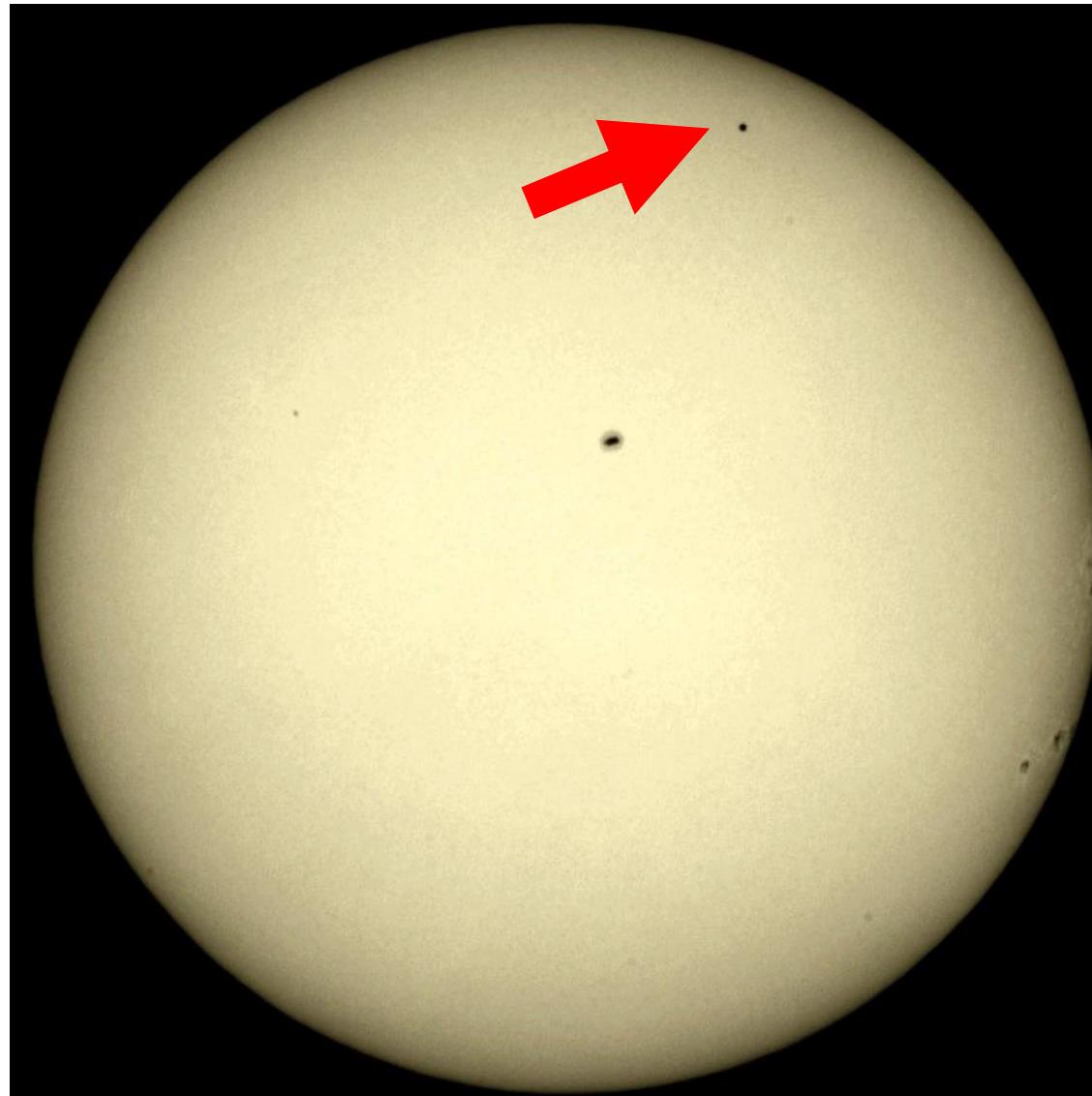
Inclinaison du plan de l'orbite  
par rapport à l'écliptique  
7°

# Mercure



Passage devant le Soleil

# Mercure



Passage devant le Soleil

# Mercure



Passage devant le Soleil

# Transits de Mercure 1900-2050

Date	Universal Time	Separation* (Sun and Mercury)
1907 Nov 14	12:06	759"
1914 Nov 07	12:02	631"
1924 May 08	01:41	85"
1927 Nov 10	05:44	129"
1937 May 11	09:00	955"
1940 Nov 11	23:20	368"
1953 Nov 14	16:54	862"
1957 May 06	01:14	907"
1960 Nov 07	16:53	528"
1970 May 09	08:16	114"
1973 Nov 10	10:32	26"
1986 Nov 13	04:07	471"
1993 Nov 06	03:57	927"
1999 Nov 15	21:41	963" (graze)
2003 May 07	07:52	708"
2006 Nov 08	21:41	423"
2016 May 09	14:57	319"
2019 Nov 11	15:20	76"
2032 Nov 13	08:54	572"
2039 Nov 07	08:46	822"
2049 May 07	14:24	512"

\* distance (arc-seconds) between the centers of the Sun and Mercury

# Mercure

Pas de satellite  
naturel connu

# Avance du périhélie de Mercure

A la fin du XIXème siècle, le chimiste Marcellin Berthelot annonçait la fin de la physique

« Le monde est aujourd'hui sans mystères »

En 1885 dans la préface de son ouvrage  
« Les origines de l'alchimie »

# Avance du périhélie de Mercure

Il restait cependant 2 petites choses

- La théorie du corps noir
- L'avance du périhélie de Mercure

# Avance du périhélie de Mercure

La théorie du corps noir  
expliquée par Max Planck  
a abouti à  
la mécanique quantique

# Avance du périhélie de Mercure

L'avance du périhélie de  
Mercure  
a été une démonstration de  
la théorie de la relativité

# Avance du périhélie de Mercure

Mécanique classique



Observations

Le périhélie se déplace  
plus rapidement que les prévisions  
de 43" par siècle

# Avance du périhélie de Mercure

43" qui ne sont explicables que par la déformation de l'espace à proximité de la masse du soleil, prédite par la relativité générale

# Vénus



Diamètre : 12.104 km

Distance du Soleil : 109 millions km

# Vénus

Du nom de la déesse de l'amour

Etoile du matin

Etoile du soir

Etoile du Berger

Période de révolution sidérale  
224 jours

# Vénus

Diamètre 12.104 km



Vénus ~ Terre



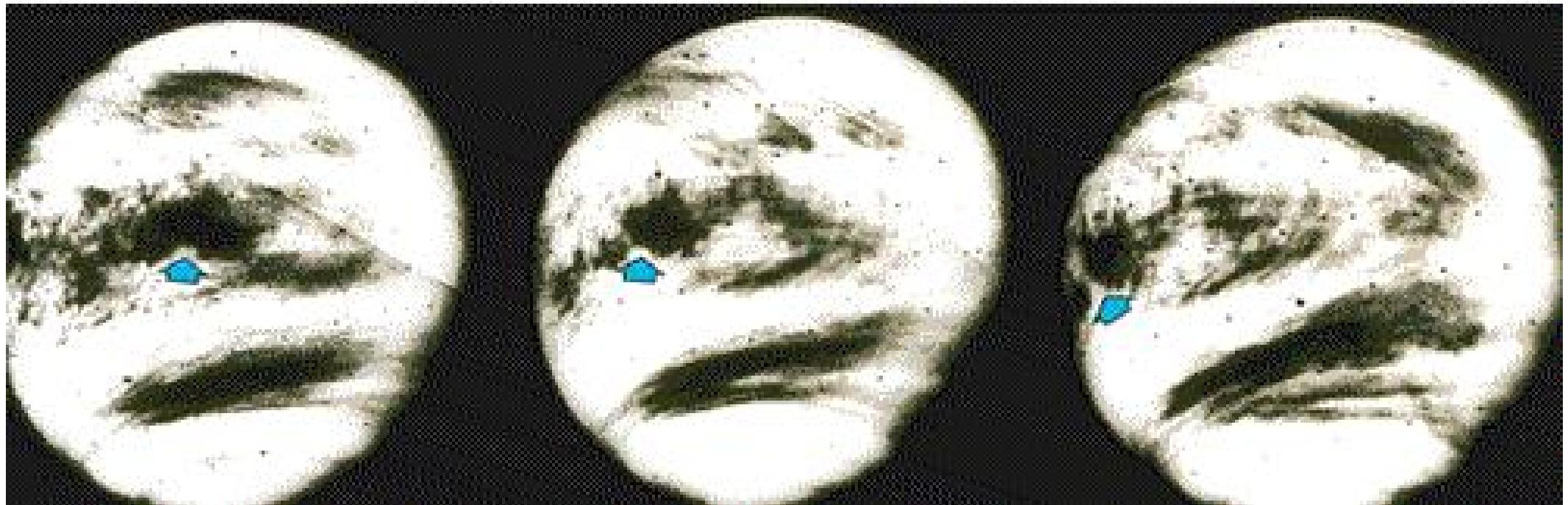
Planètes soeurs

# Vénus

Période de rotation sidérale

Déterminée au Pic du Midi  
Par Charles Boyer en 1957  
4 jours rétrograde

# Vénus



Confirmé par Mariner 5  
en 1967

# Vénus

Mais il s'agissait  
de la période de rotation  
de la haute atmosphère  
de Vénus

# Vénus

Période de rotation sidérale  
du sol déterminée tardivement  
en 1970

par la sonde russe Venera 5  
qui se pose sur Vénus  
et émet pendant 23 minutes

243,018 jours

Rétrograde

# Vénus

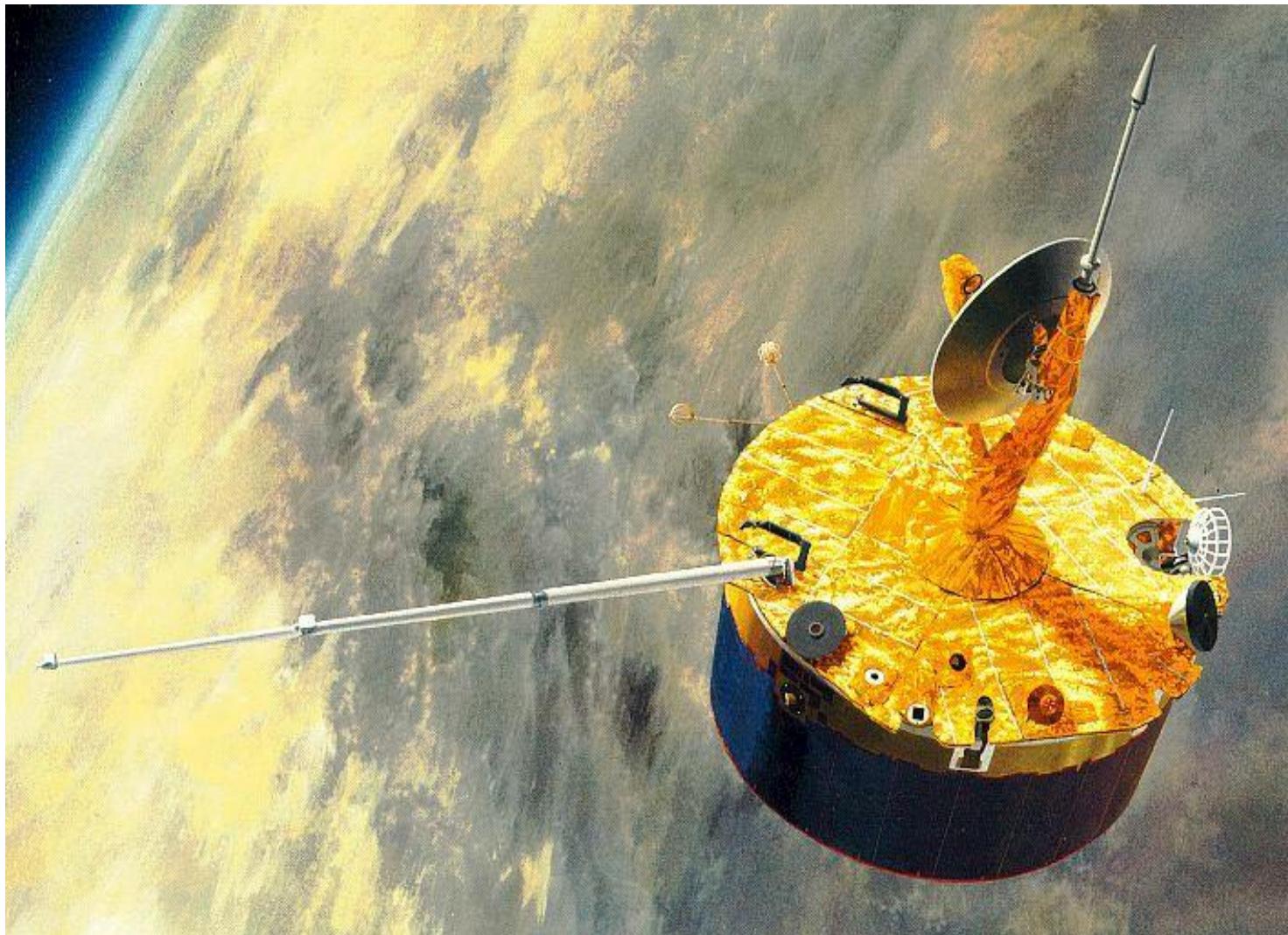
Révolution sidérale : 224 jours

Rotation sidérale : 243 jours  
rétrograde



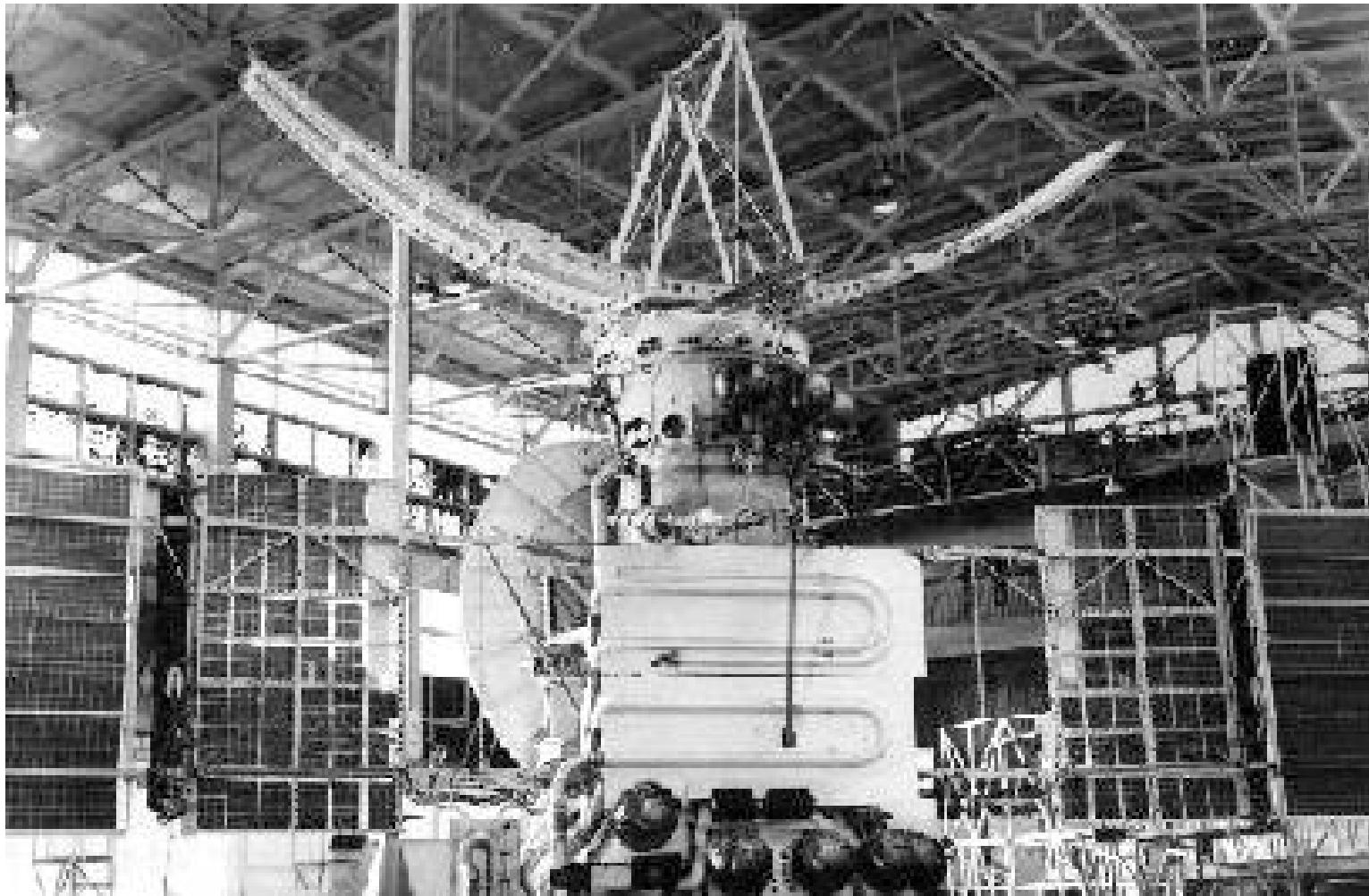
Durée du jour : 117 jours

# Vénus



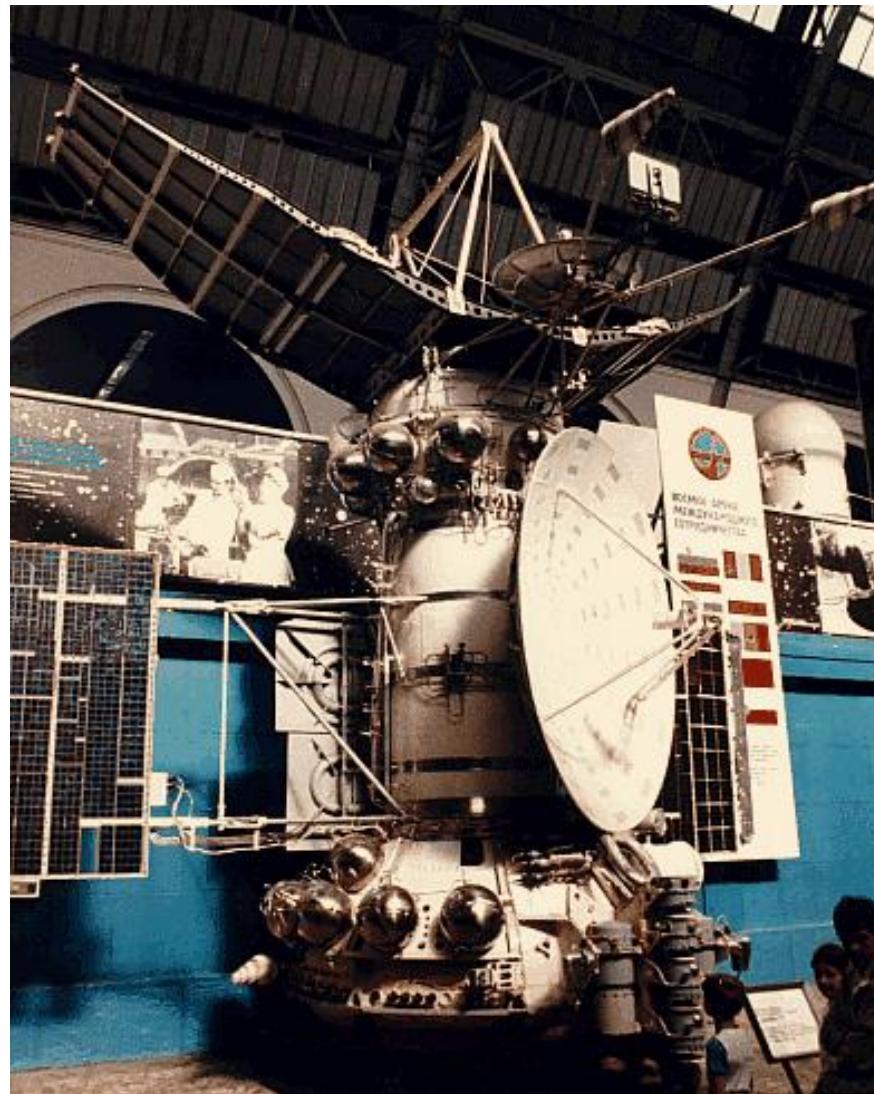
Pioneer Venus Orbiter  
En 1978

# Vénus



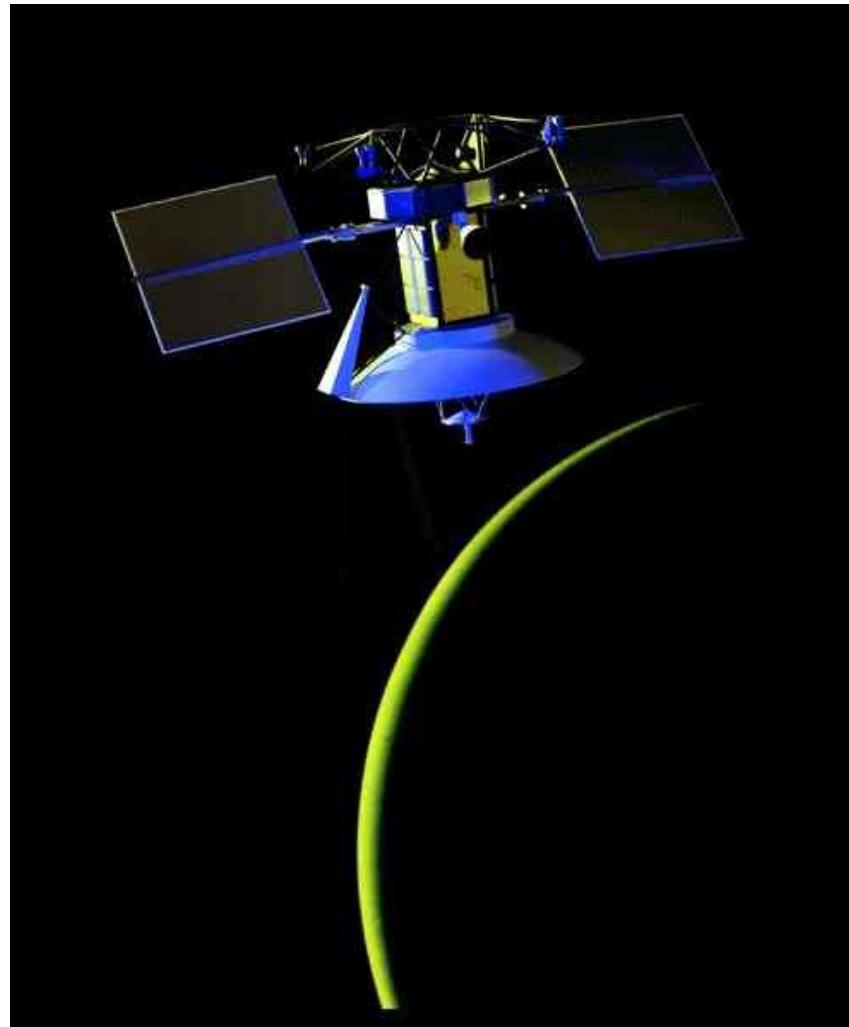
Venera 15    1983

# Vénus



Venera 16      1984

# Vénus



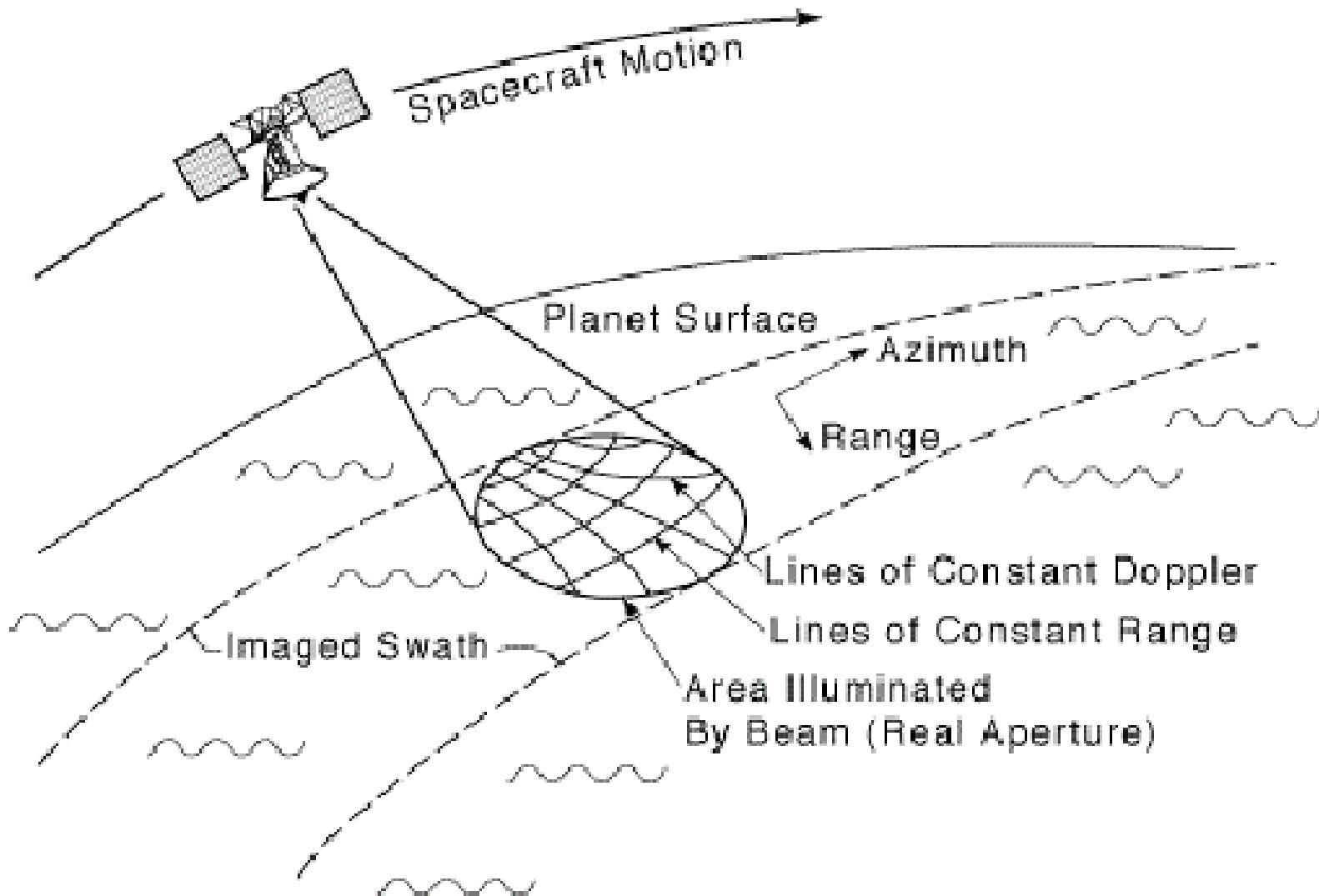
Magellan 1990

# Vénus



Magellan  
Sonde radar à synthèse d'ouverture

# Vénus



**Cartographie systématique de la planète  
Résolution 120 m**

# Vénus



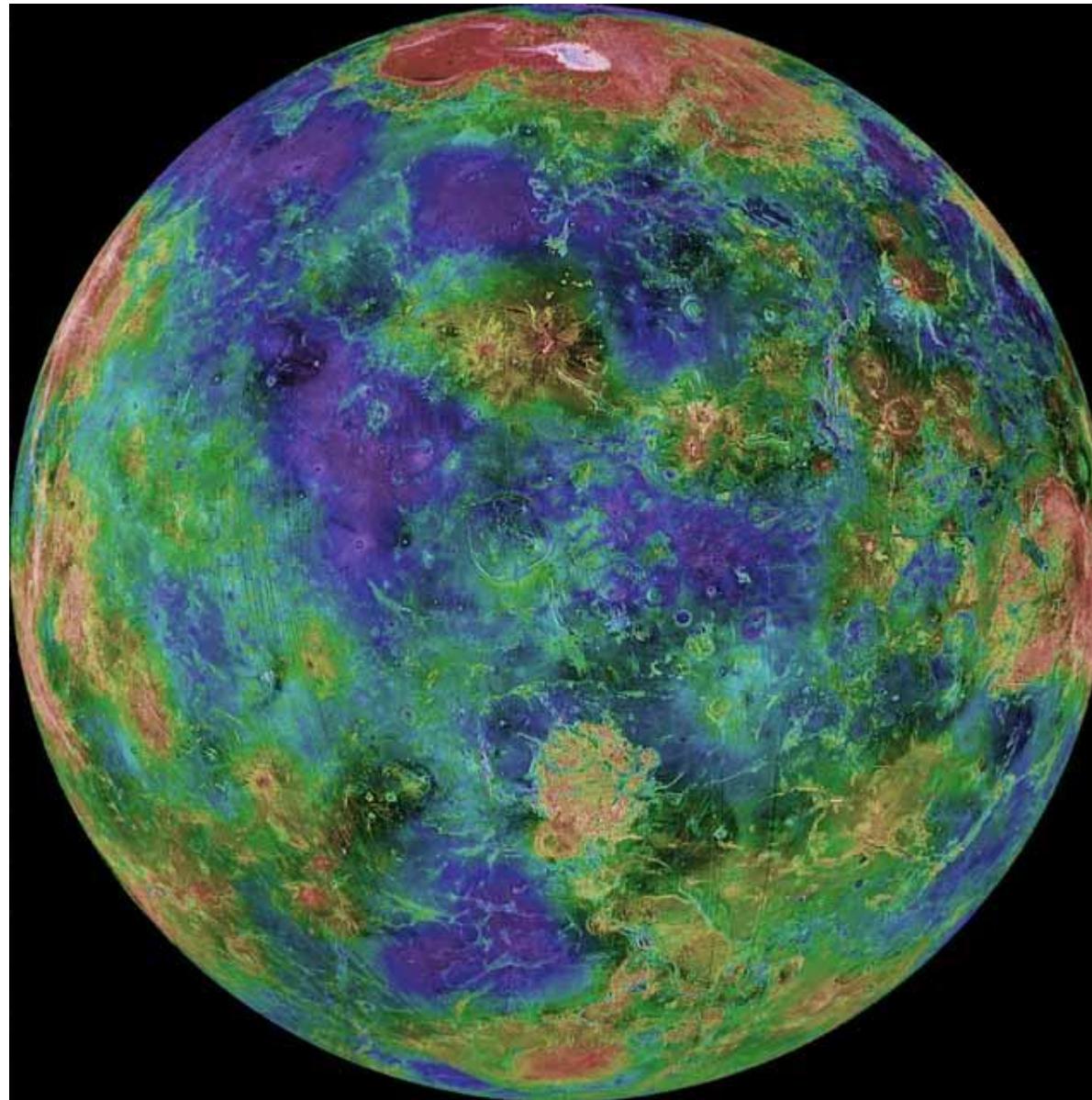
Atmosphère de Vénus

# Vénus



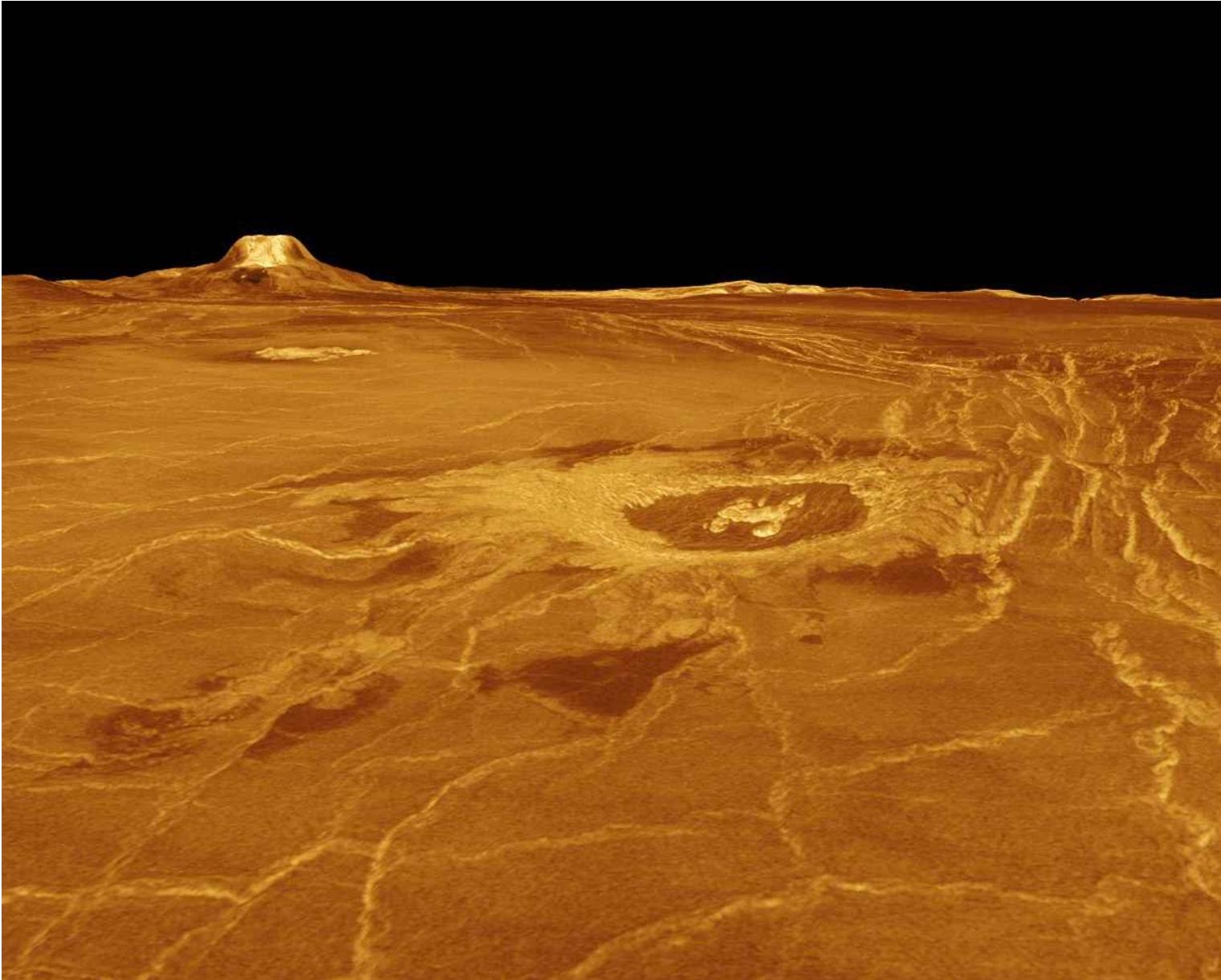
Surface de Vénus

# Vénus



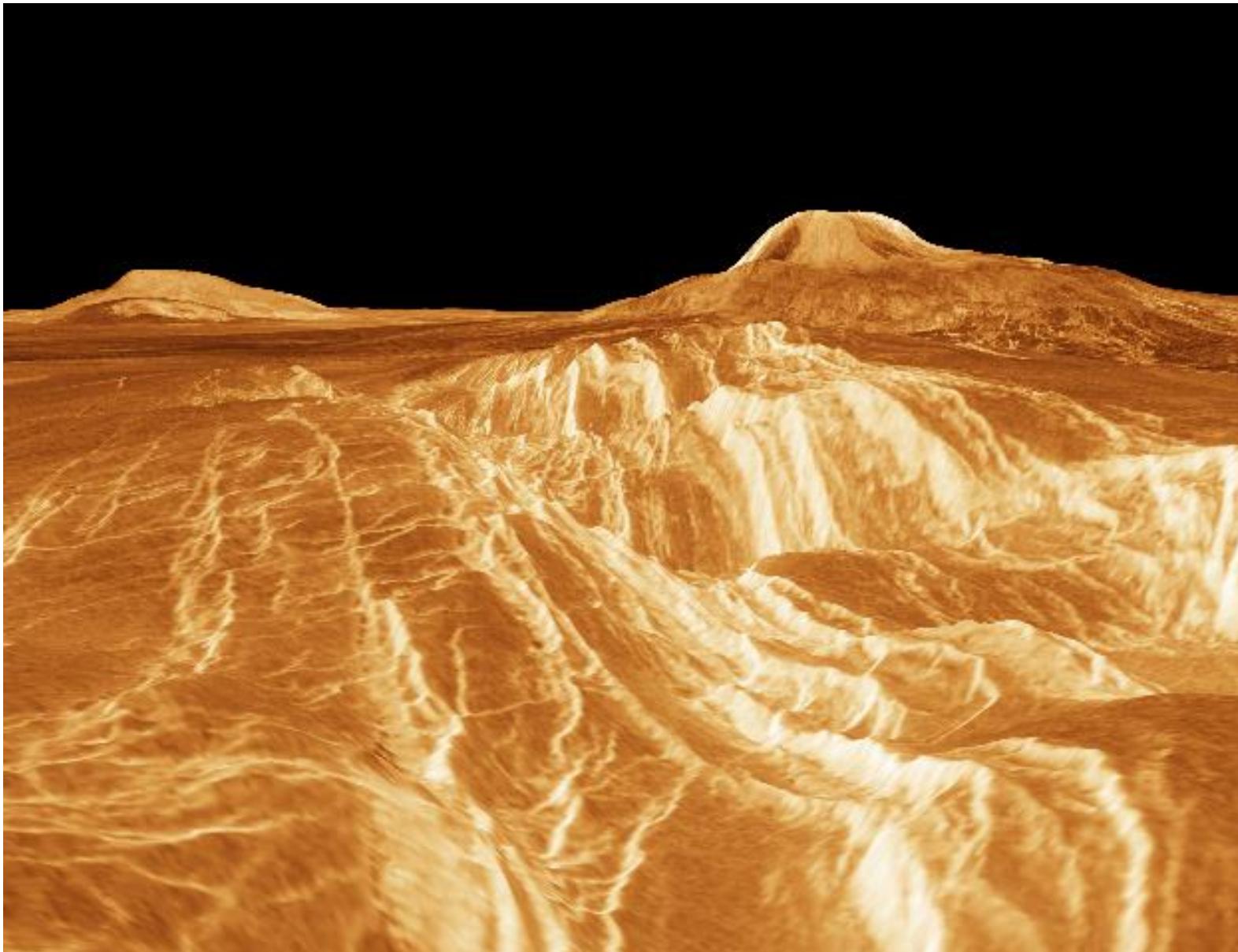
Surface de Vénus

# Vénus



Surface de Vénus

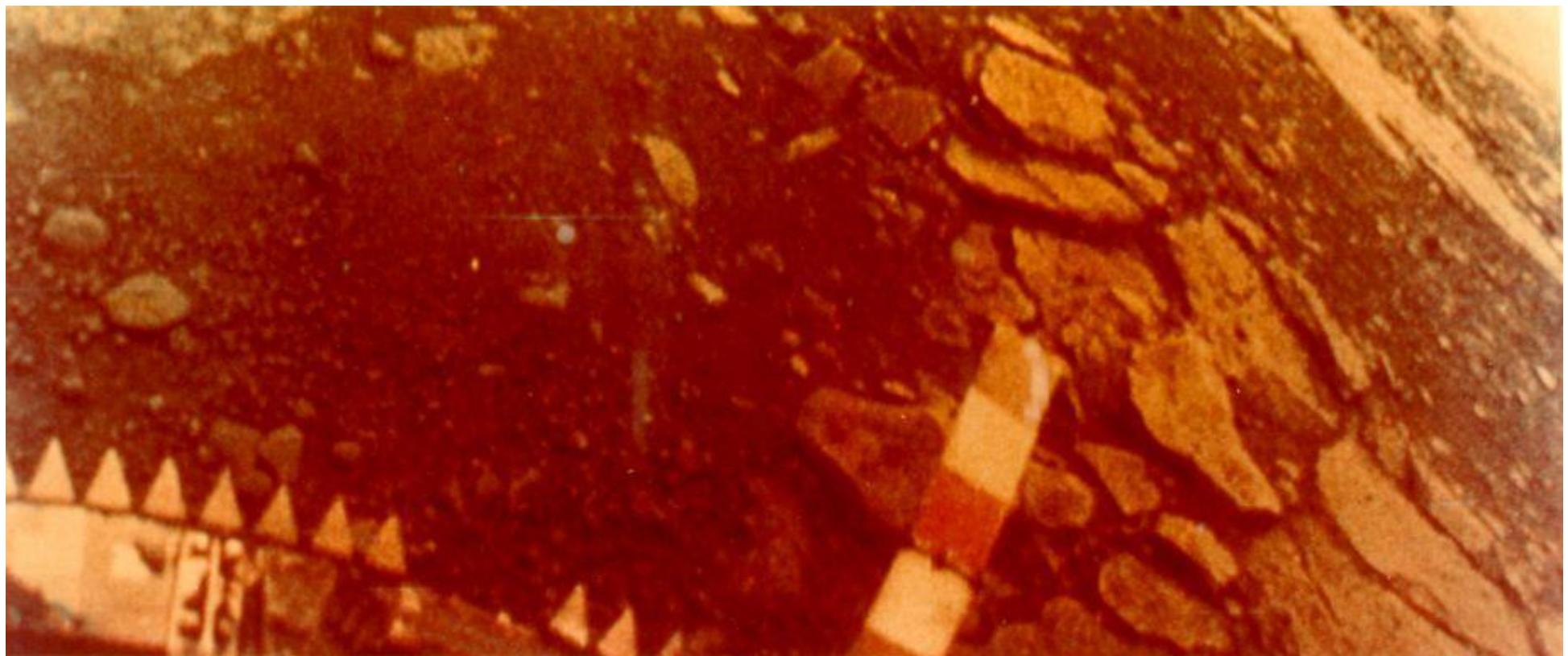
# Vénus



Surface de Vénus

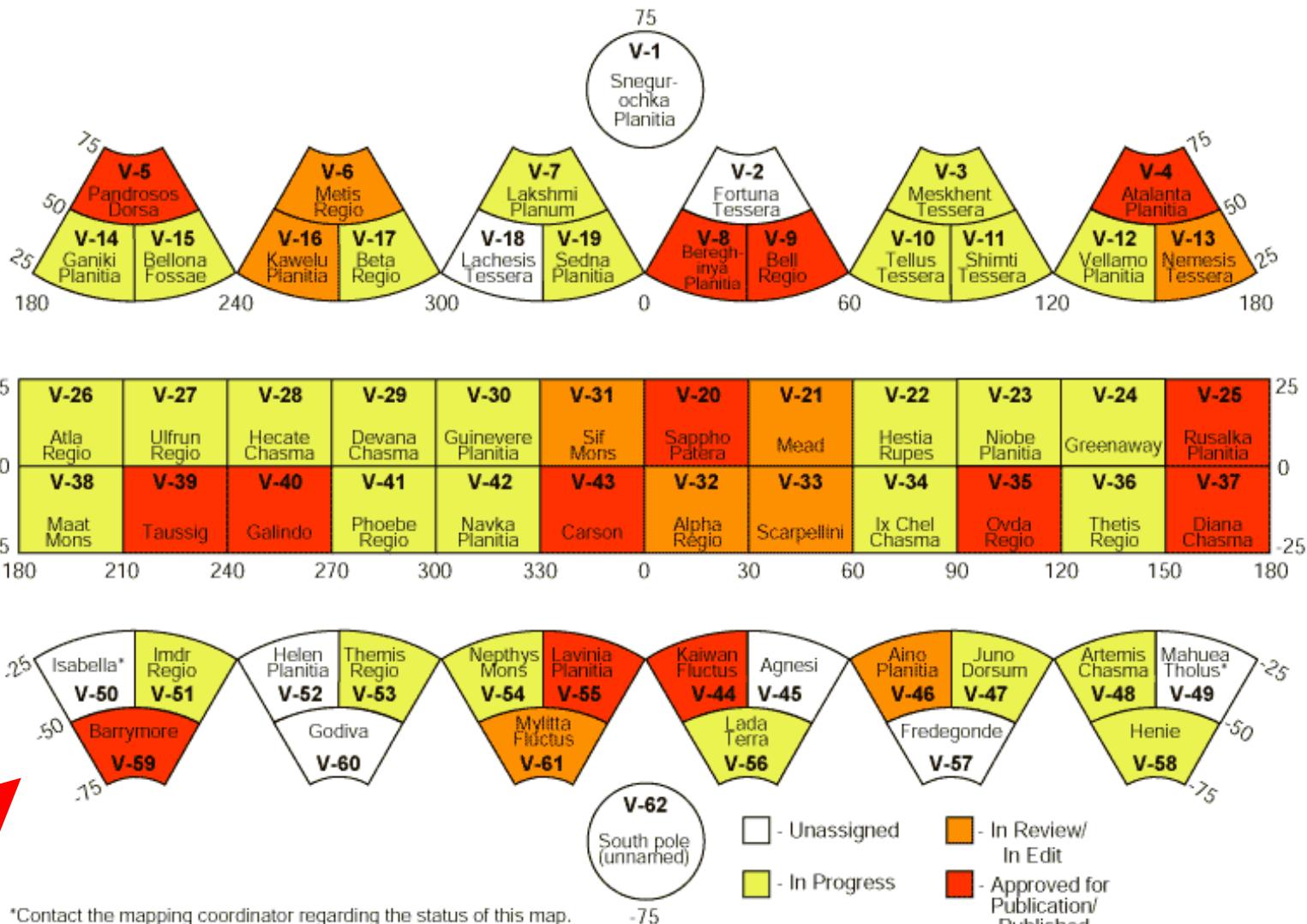
# Vénus

2.700 images couvrant 45% de la surface de la planète, résolution jusqu'à 100 mètres



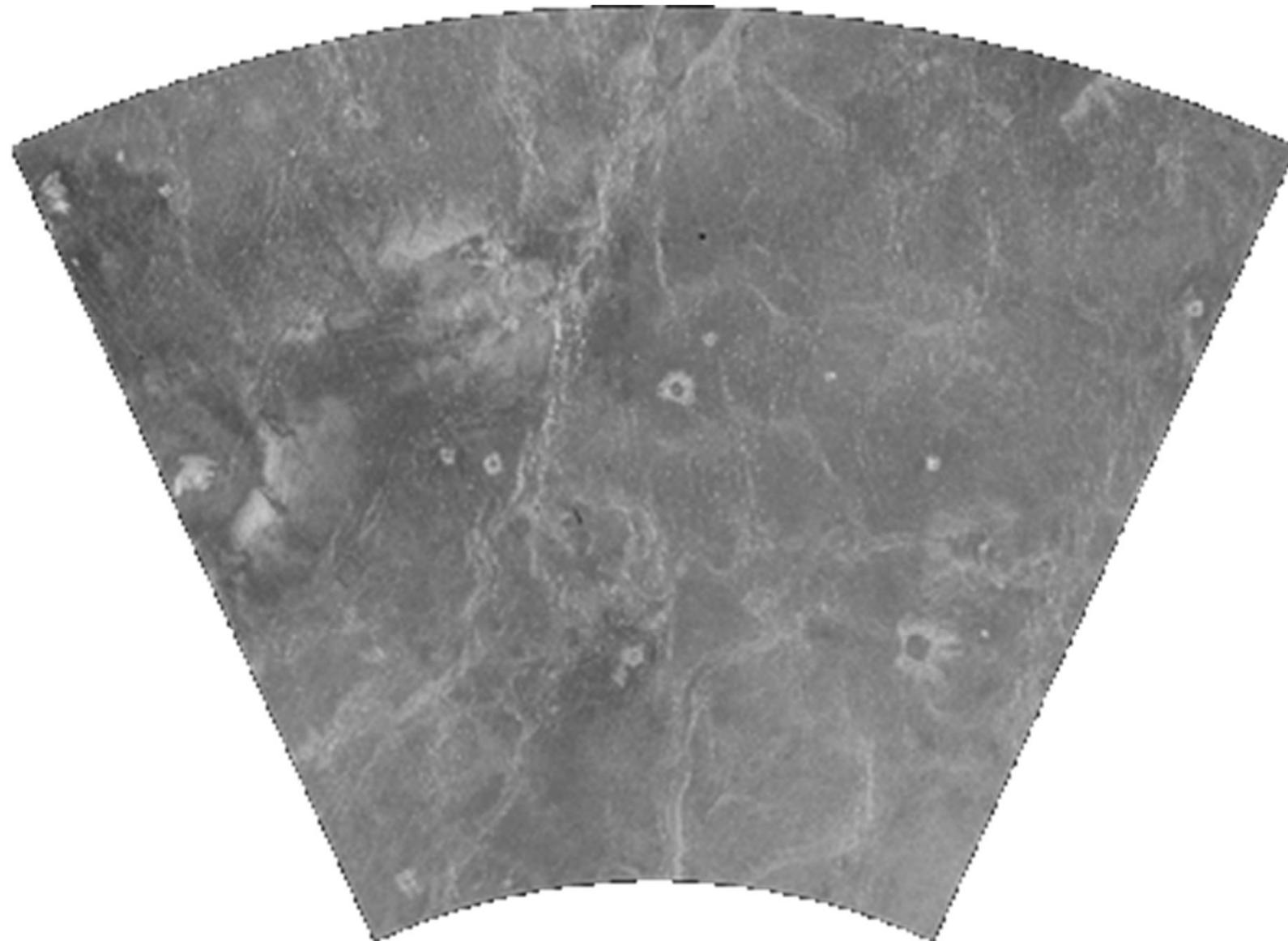
Sol de Vénus par Venera 13

# Vénus



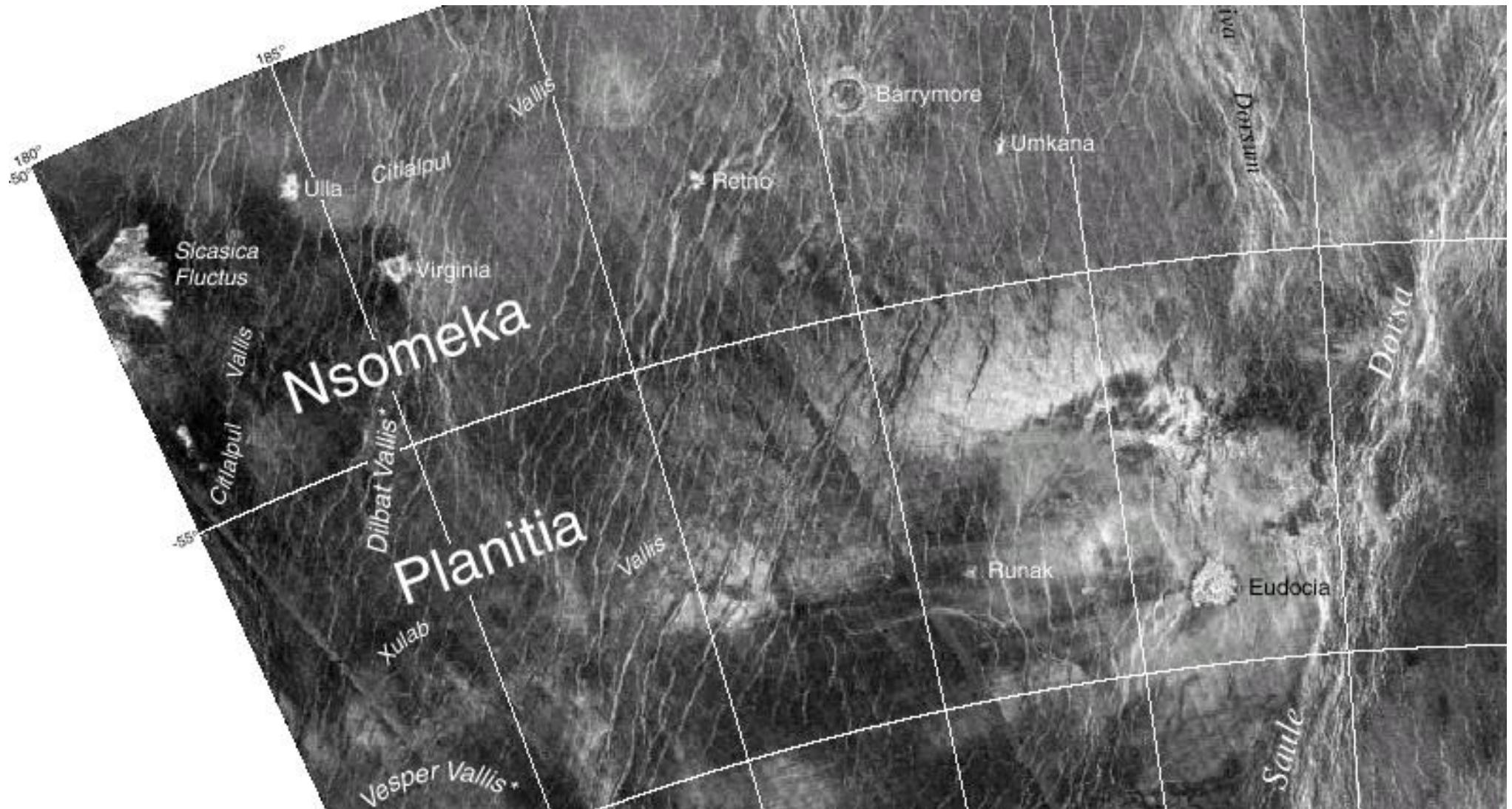
Vénus cartographié par  
l'US Geological Survey

# Vénus



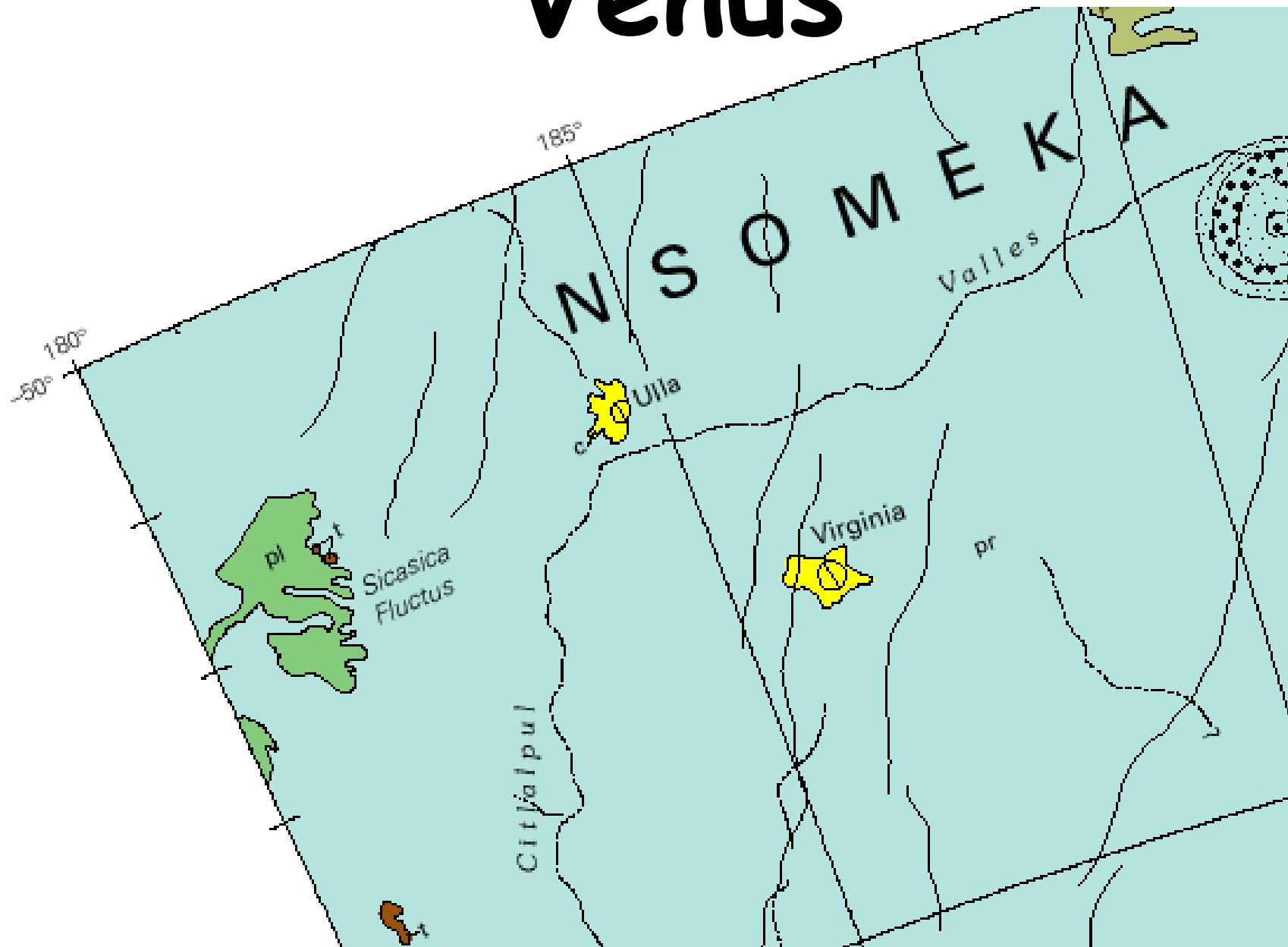
Zone V59

# Vénus



Détail de la zone V59

# Vénus



Détail de la zone V59

# Vénus

Zone V59

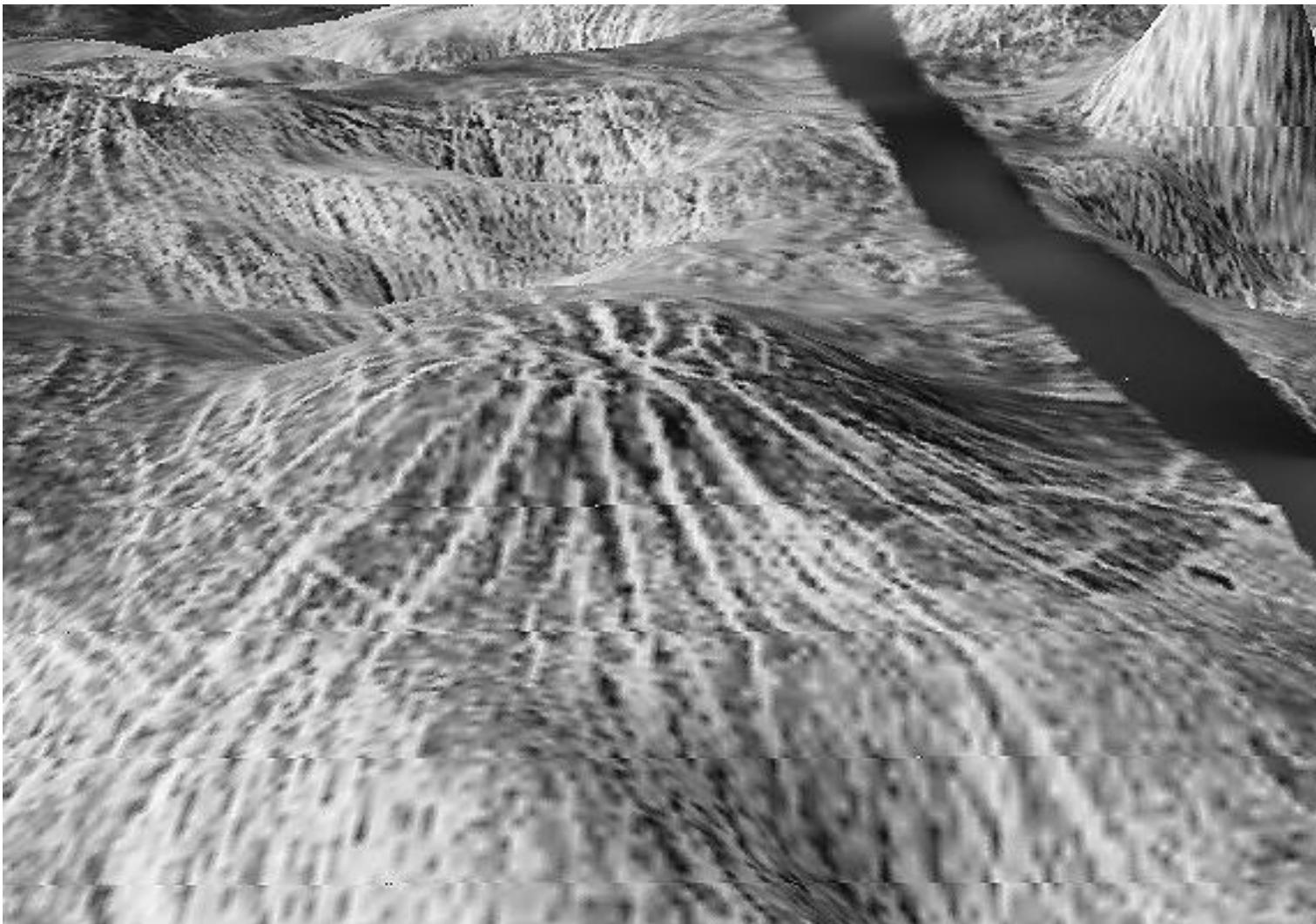
Disponible en pdf

30 Mo

Format 1,3 m x 1,0 m

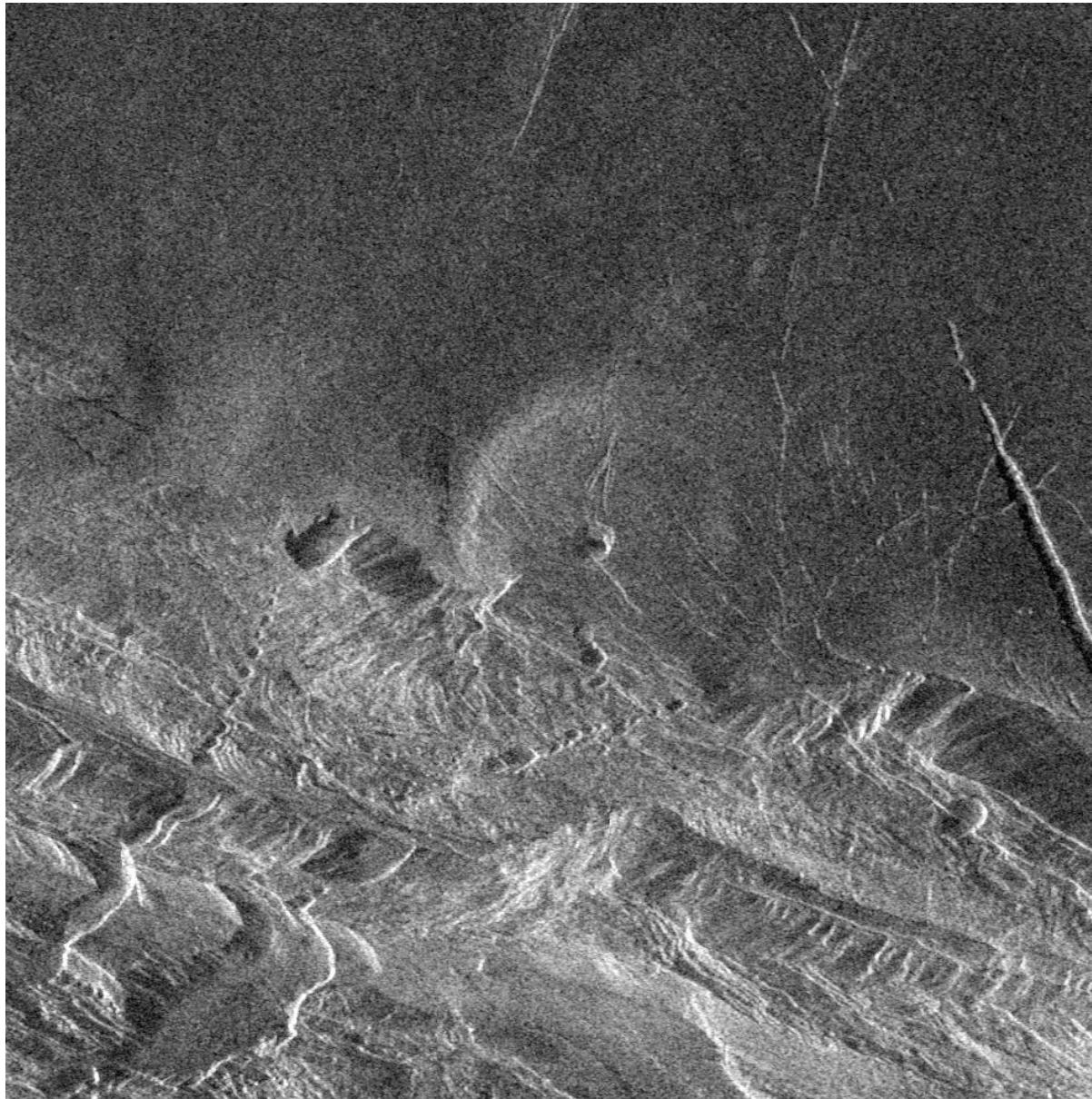
<https://planetarymapping.wr.usgs.gov>

# Vénus



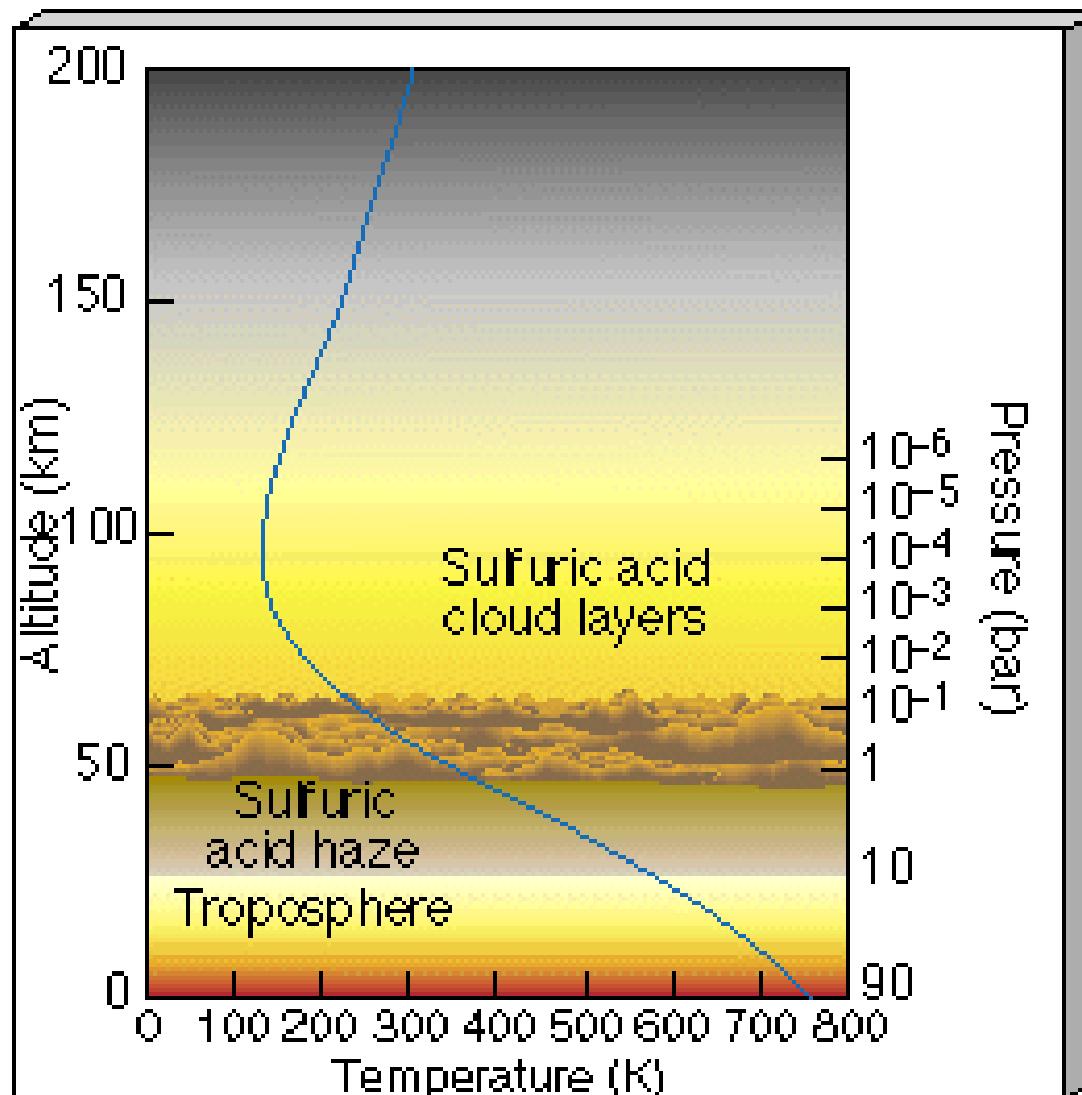
Planète solide de densité  $5,25 \text{ g/cm}^3$   
(Terre :  $5,52 \text{ g/cm}^3$ )

# Vénus



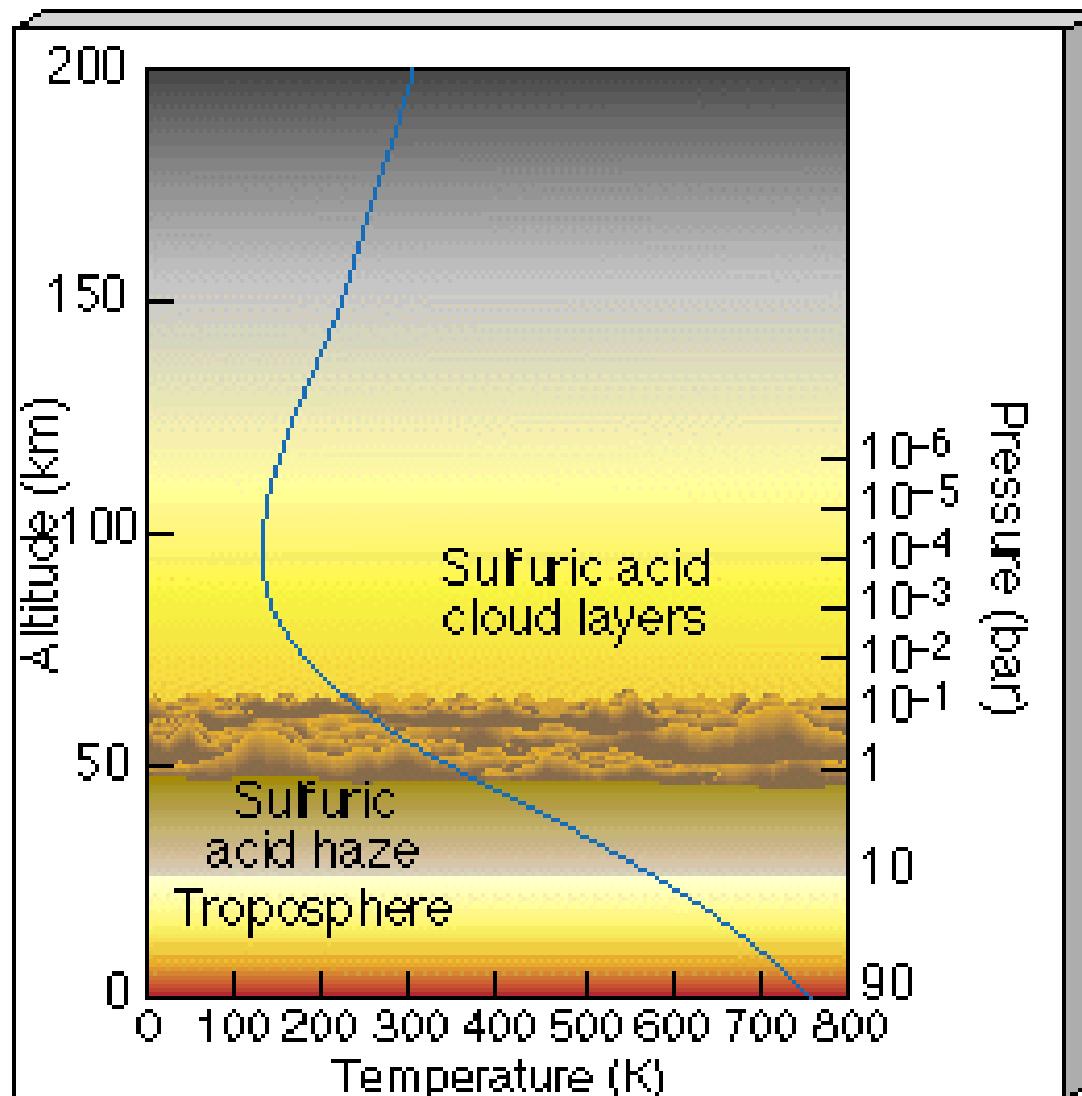
Le sol modelé par l'atmosphère

# Vénus



Pression atmosphérique à la surface 90 bars  
 $CO_2$  96%  $N_2$  3%

# Vénus

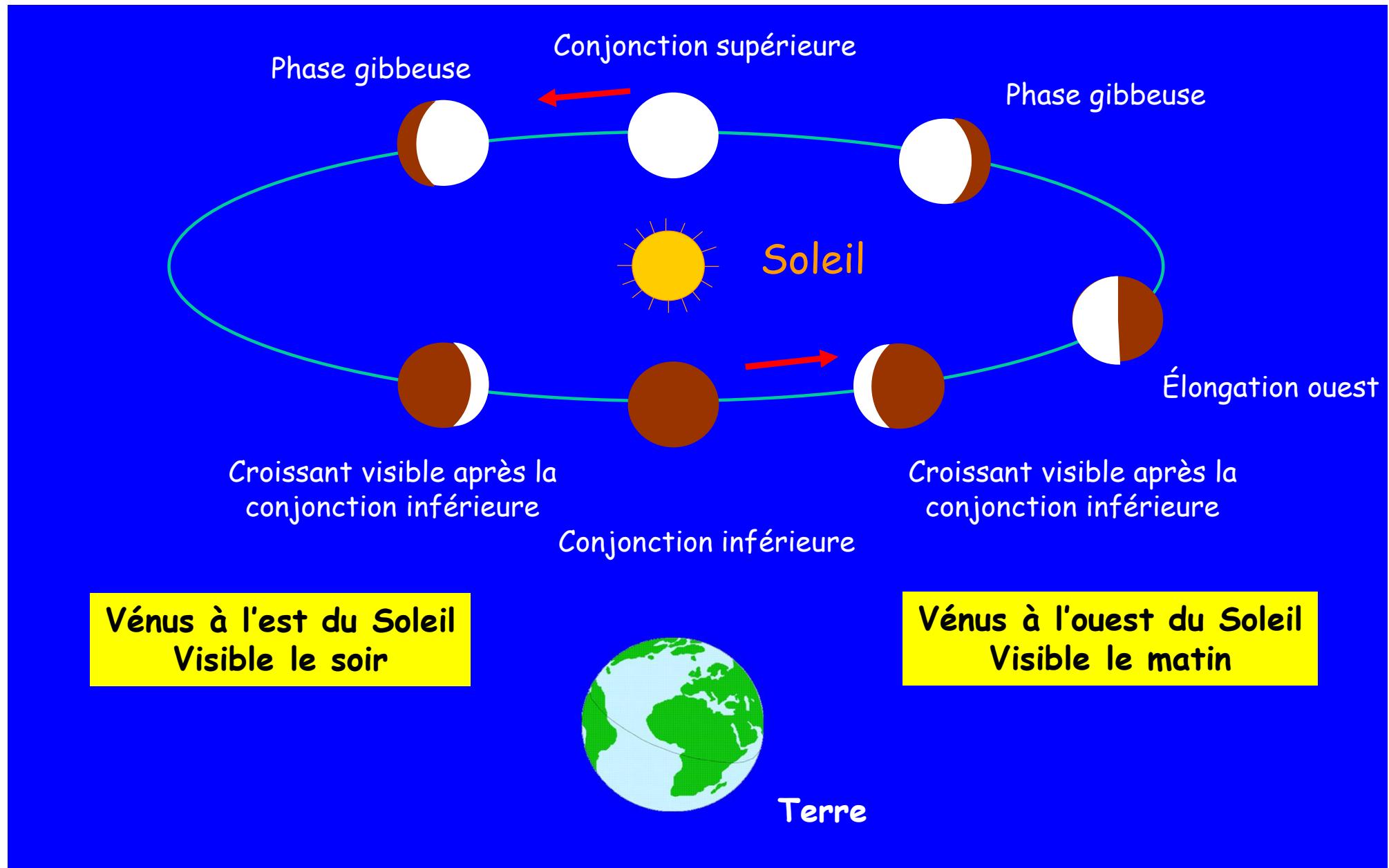


Effet de serre  
Température à la surface 500°C

# Vénus

Pas de satellite  
naturel connu

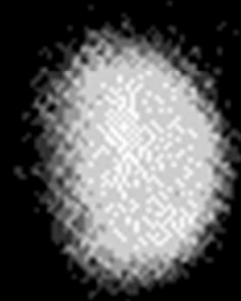
# Les phases de Vénus



# Les phases de Vénus

11.9.1981

15h 59m T.U.



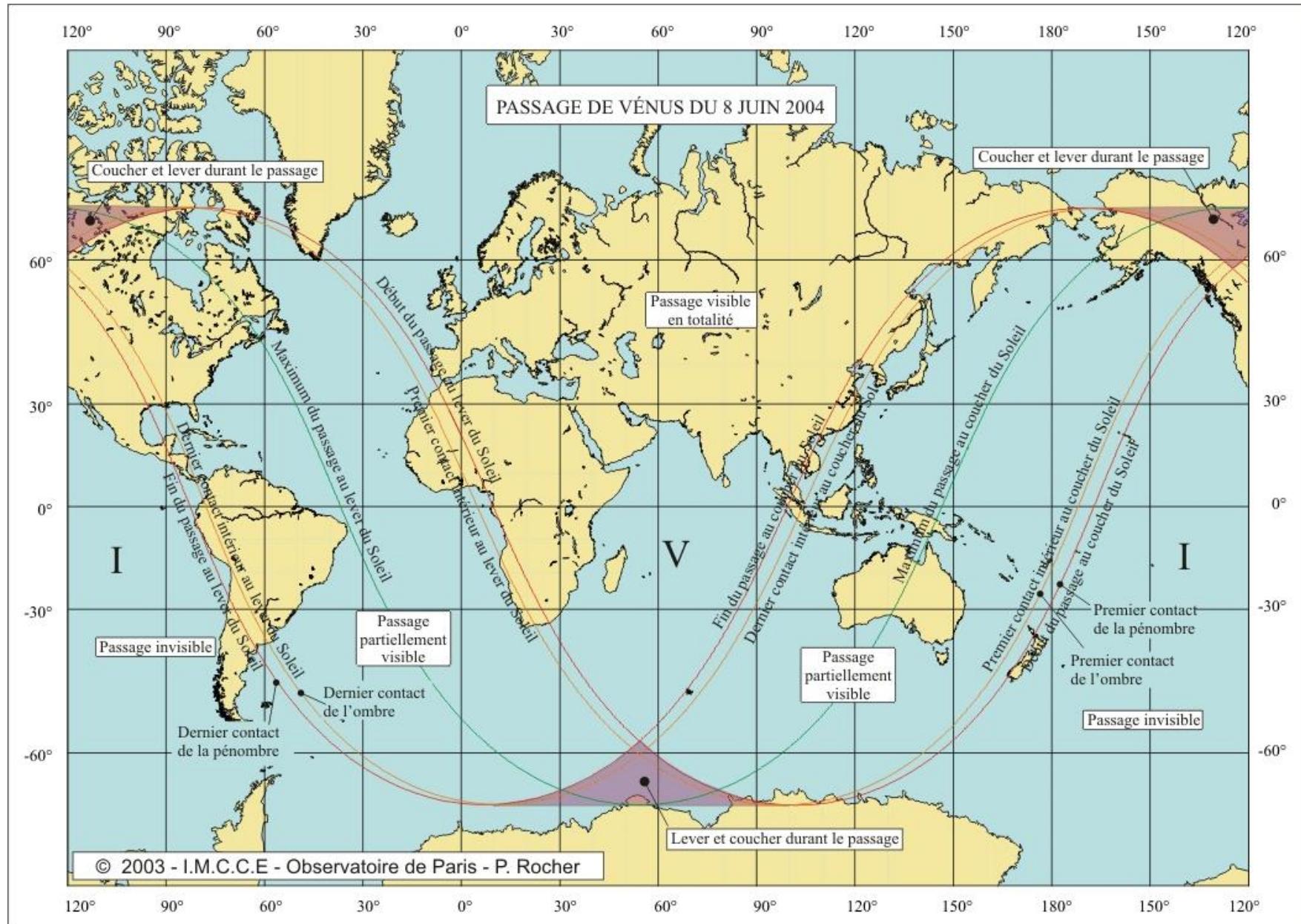
# Les phases de Vénus



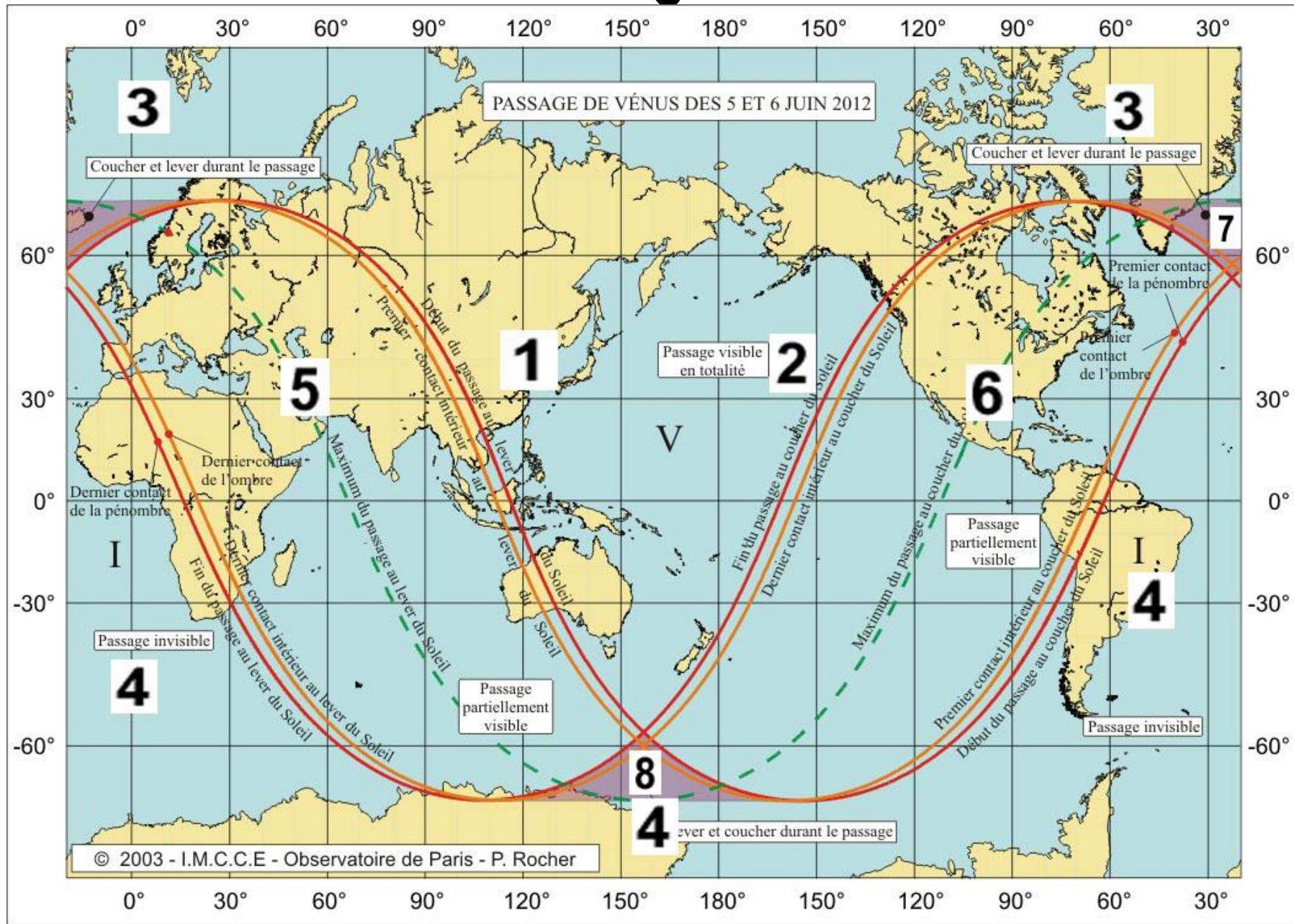
# Variation du diamètre apparent



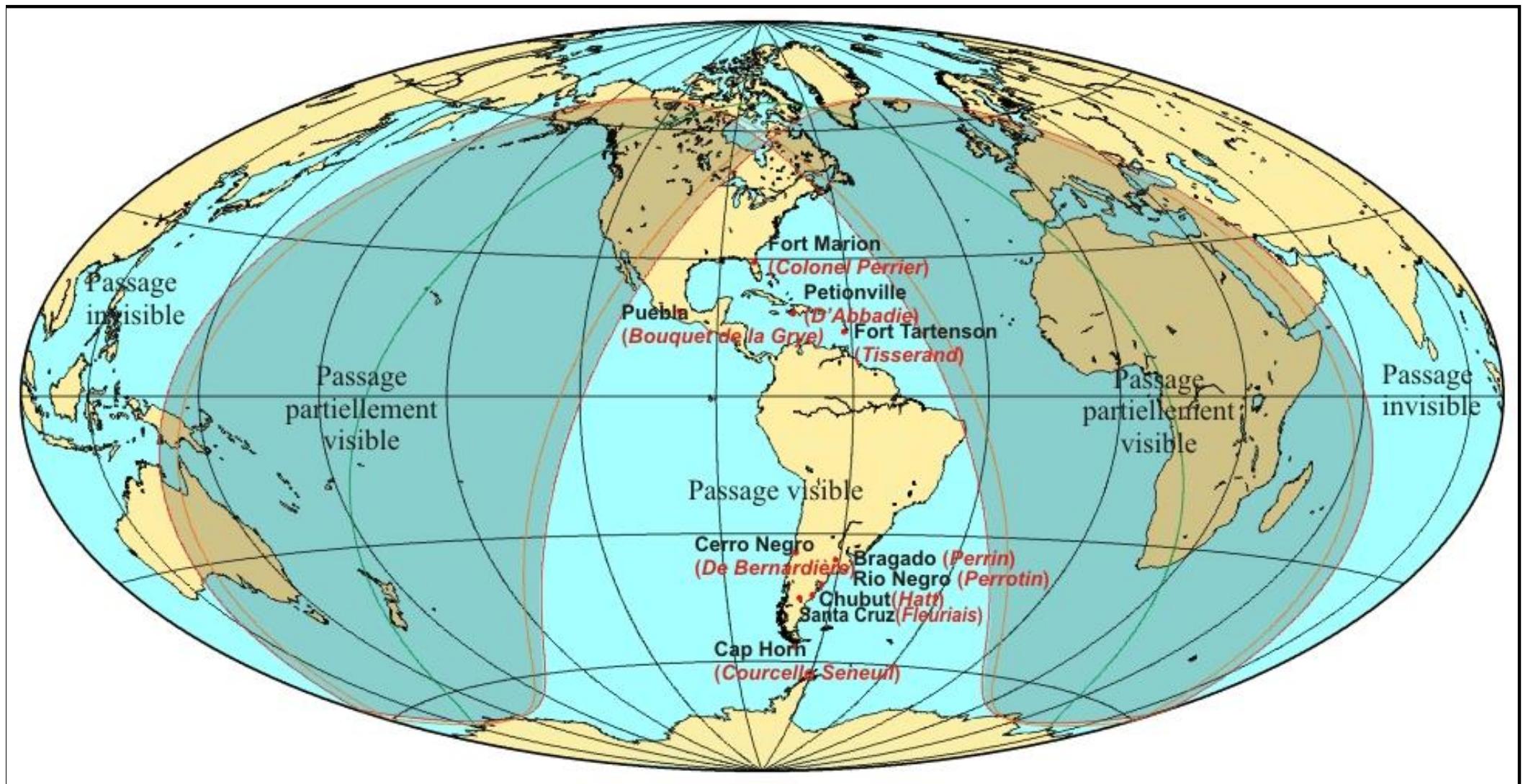
# Passage de Vénus devant le Soleil le 8 juin 2004



# Passage de Vénus devant le Soleil le 6 juin 2012



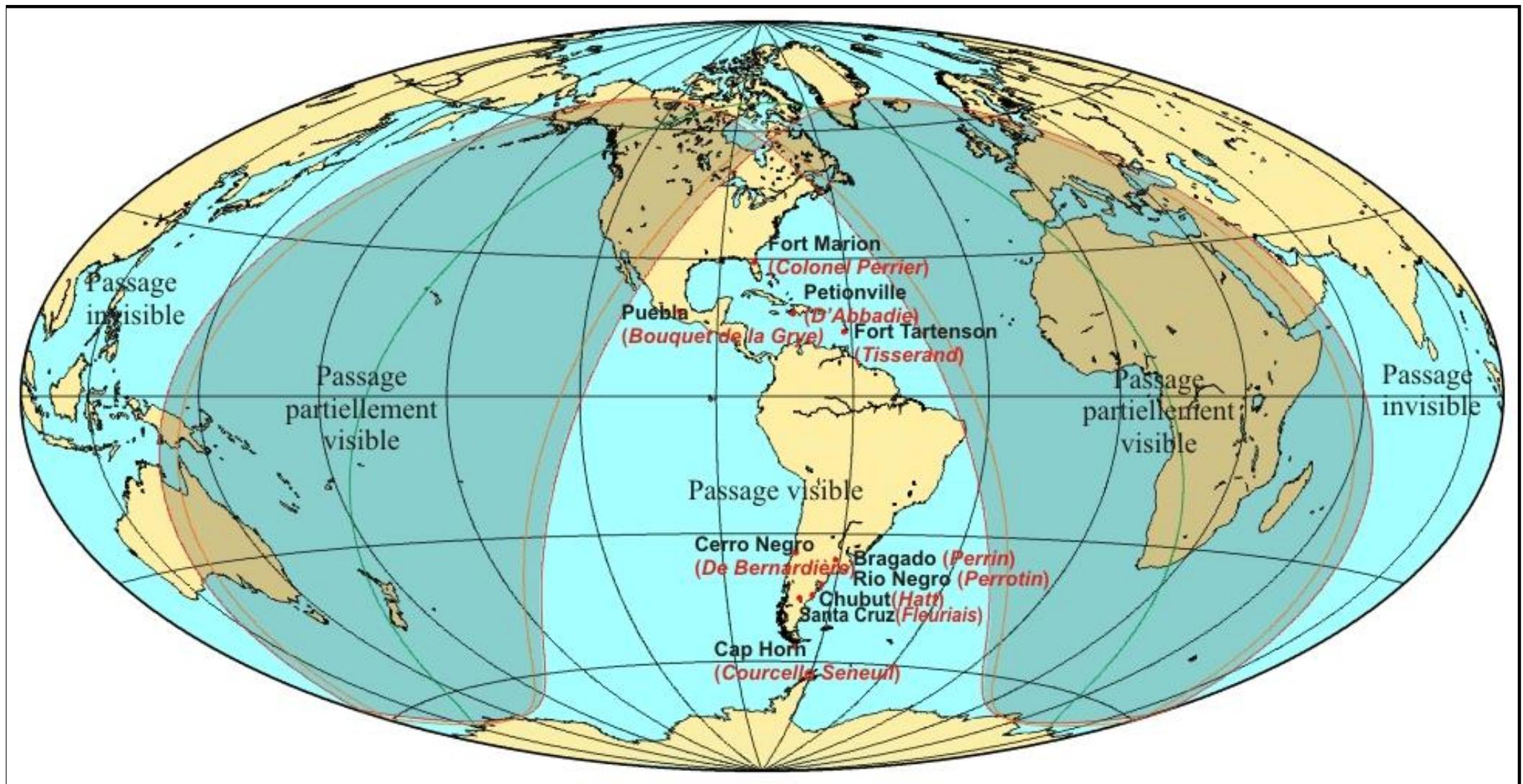
# Passage précédent le 6 décembre 1882



Passage précédent  
le 6 décembre 1882

Détermination précise de la  
distance Terre-Soleil

# Passage précédent le 6 décembre 1882



# Passages suivants

11 décembre 2117  
8 décembre 2125

# Passages suivants

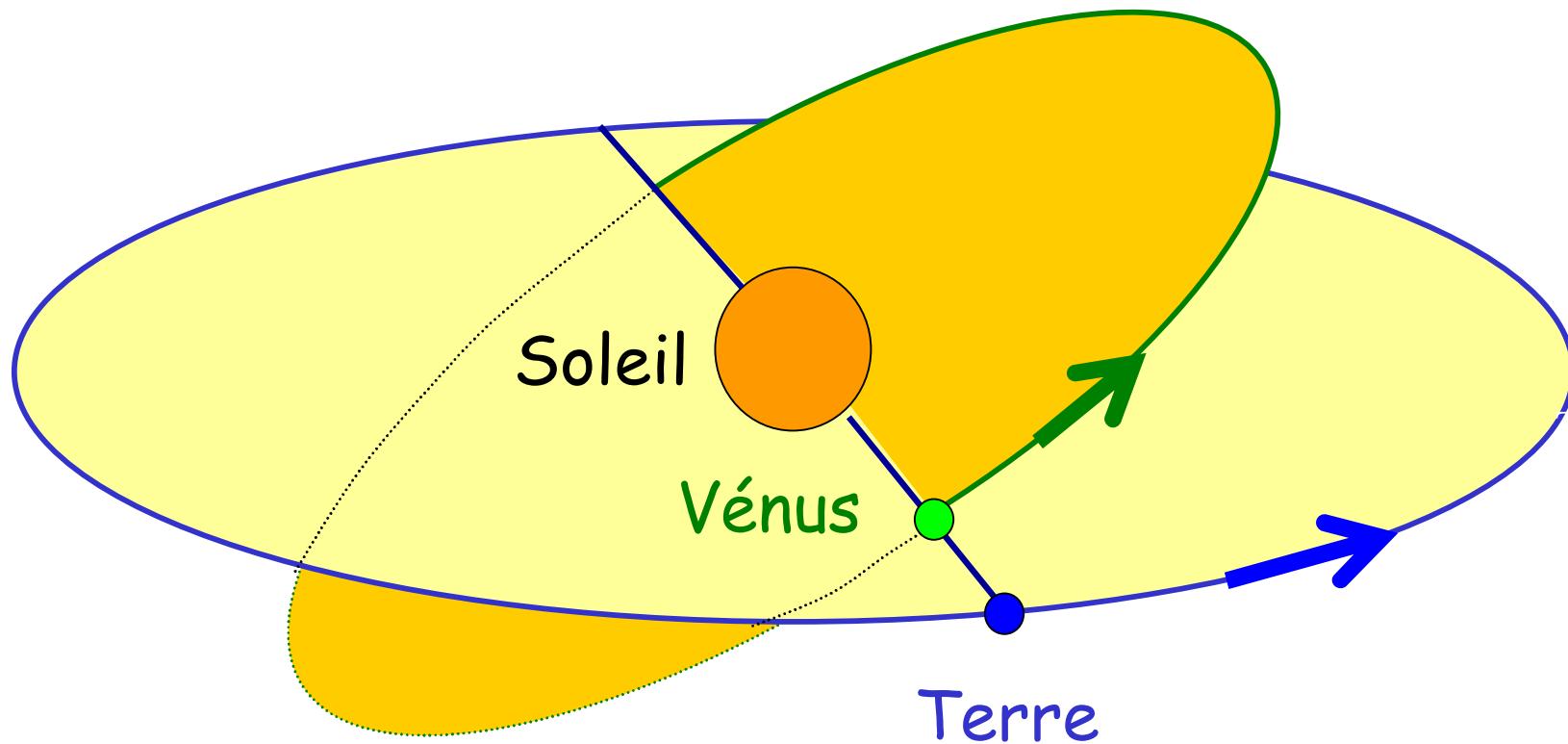
11 juin 2247

9 juin 2255

13 décembre 2360

10 décembre 2368

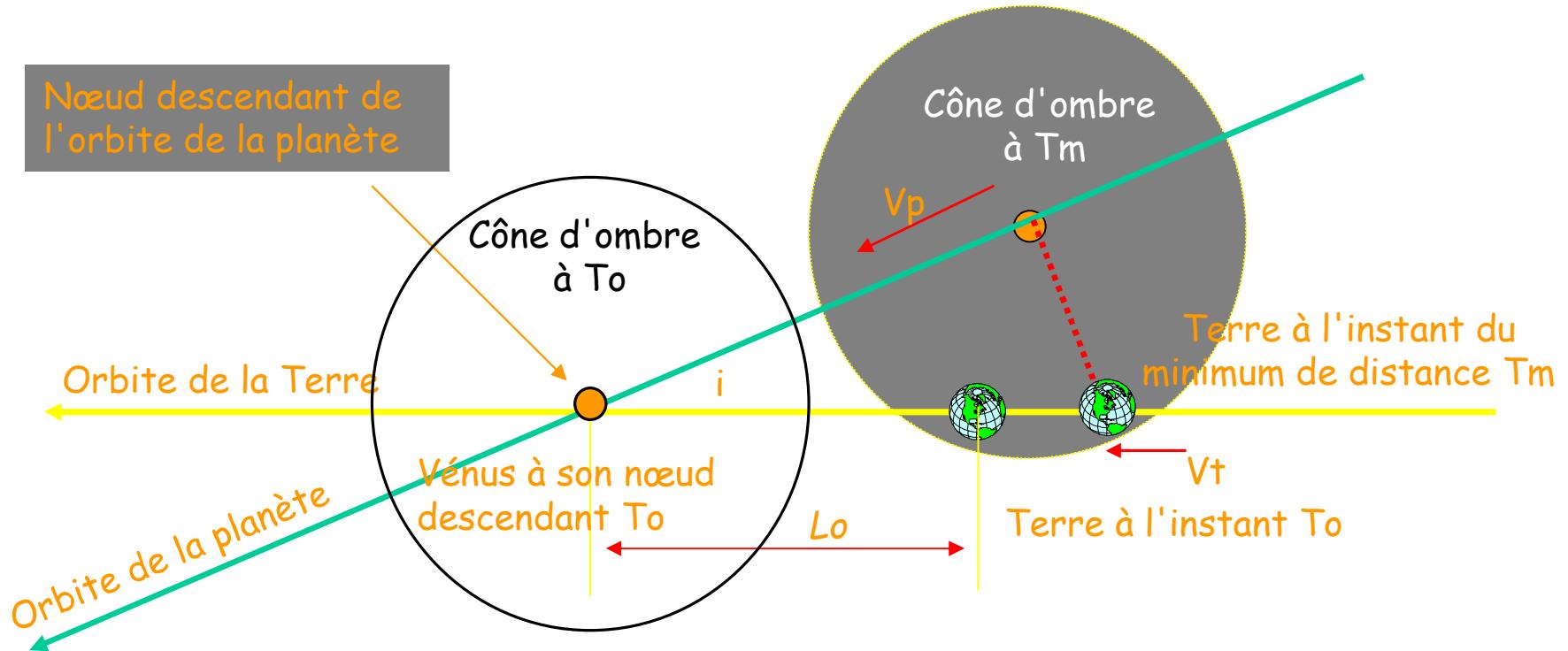
# Inclinaison de l'orbite de Vénus



$3,4^\circ$

# Critère de visibilité

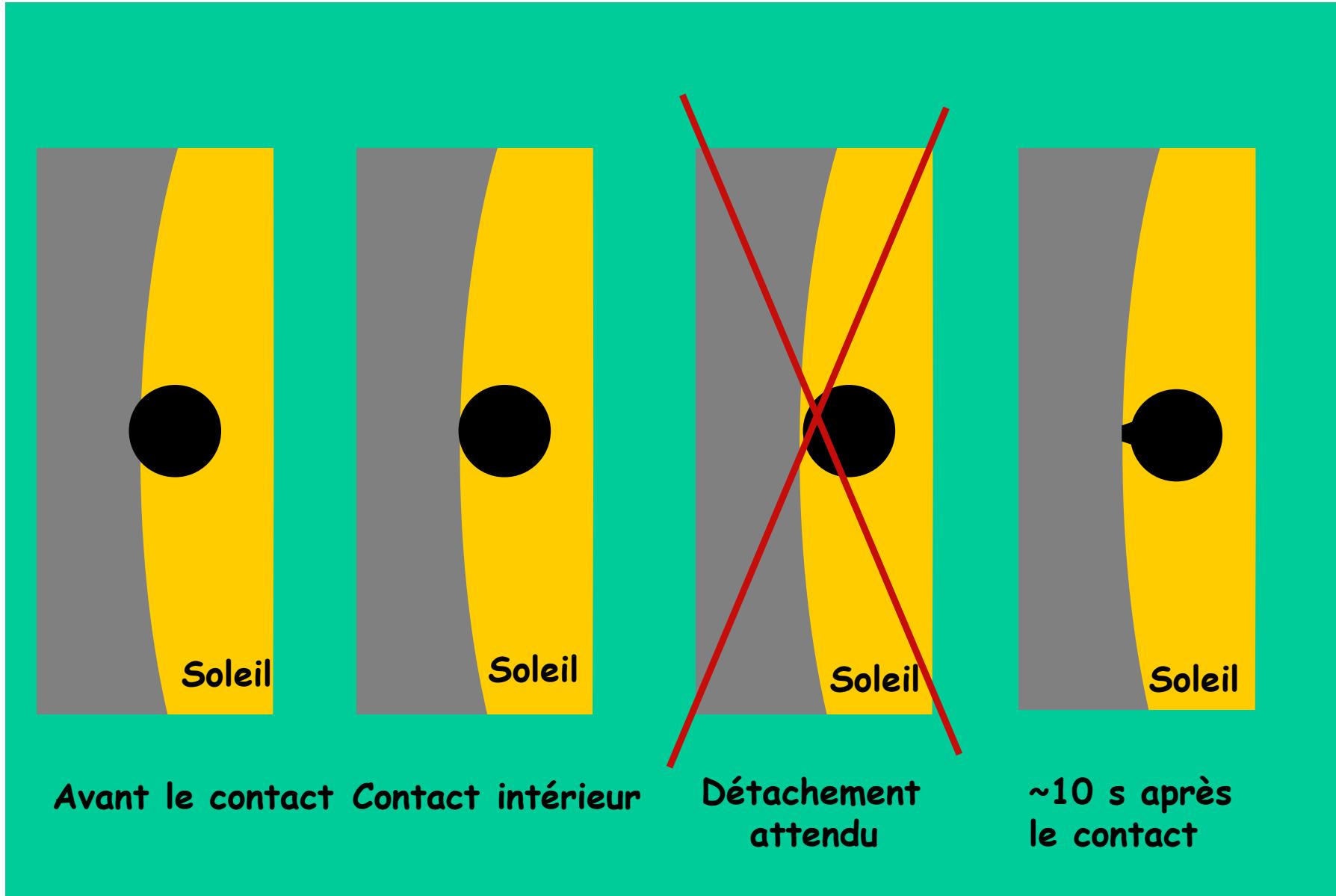
## Vue héliocentrique



$$L_0 = \frac{s_0 \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{\Delta} \right) \left( 1 - \frac{V_t}{V_p} \right)}{\sin i}$$

$r$  : distance Soleil planète.  
 $\Delta$  : distance Soleil Terre.  
 $V_t$  : vitesse héliocentrique de la Terre.  
 $V_p$  : vitesse héliocentrique de la planète.  
 $s_0$  : rayon du Soleil..

# Goutte noire

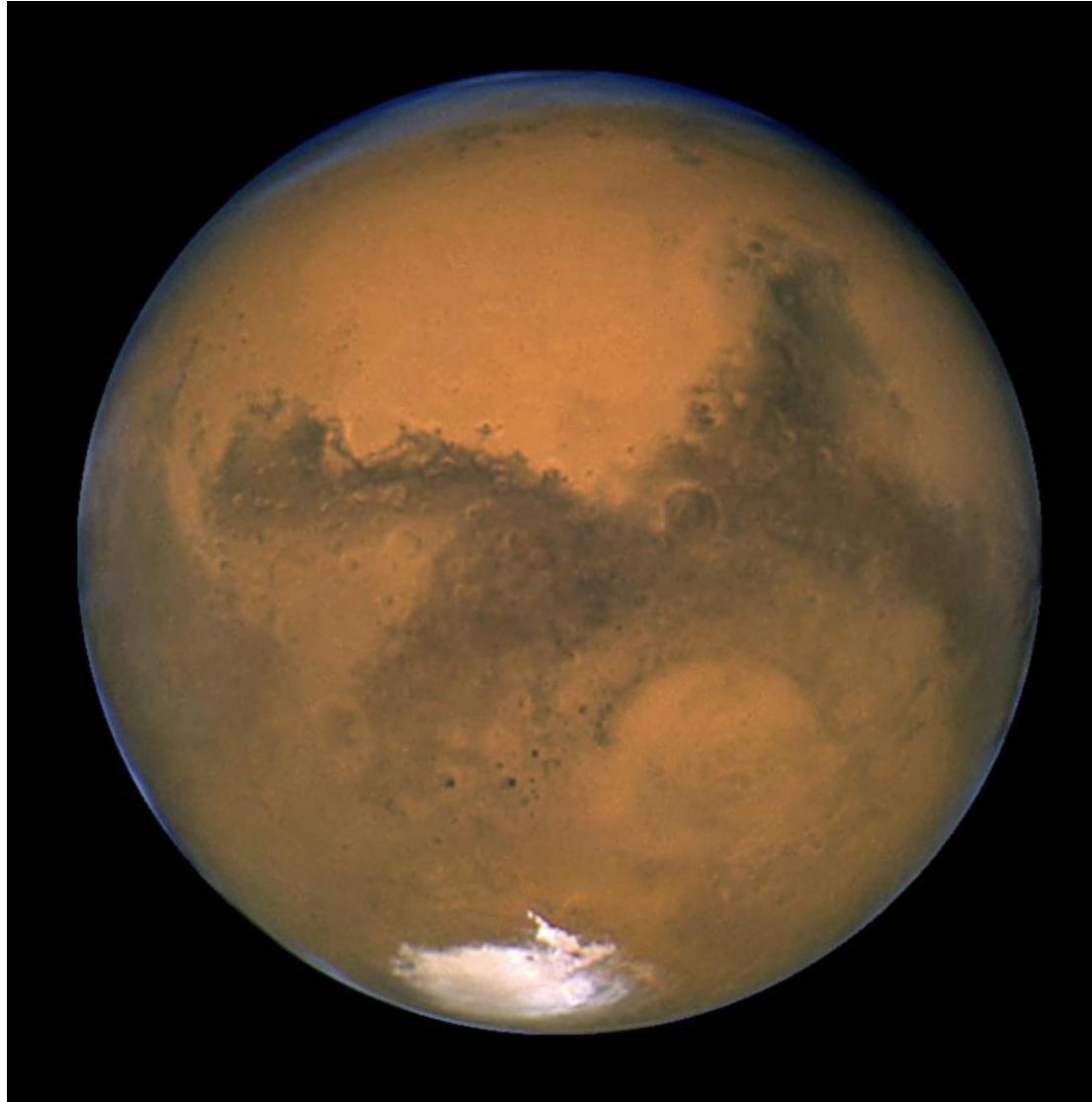


Contact imprécis

# La Terre



# Mars



Diamètre : 6.794 km

Distance du Soleil : 230 millions km

# Mars

Du nom du dieu de la guerre

La planète rouge

# Mars

Diamètre 6.794 km

Diamètre ~ 1/2 Terre

Surface ~ 1/4 de la Terre

Volume et masse ~ 1/8 de la Terre

# Mars

Période de révolution sidérale

687 jours

1 année martienne  
~ 2 années terrestres

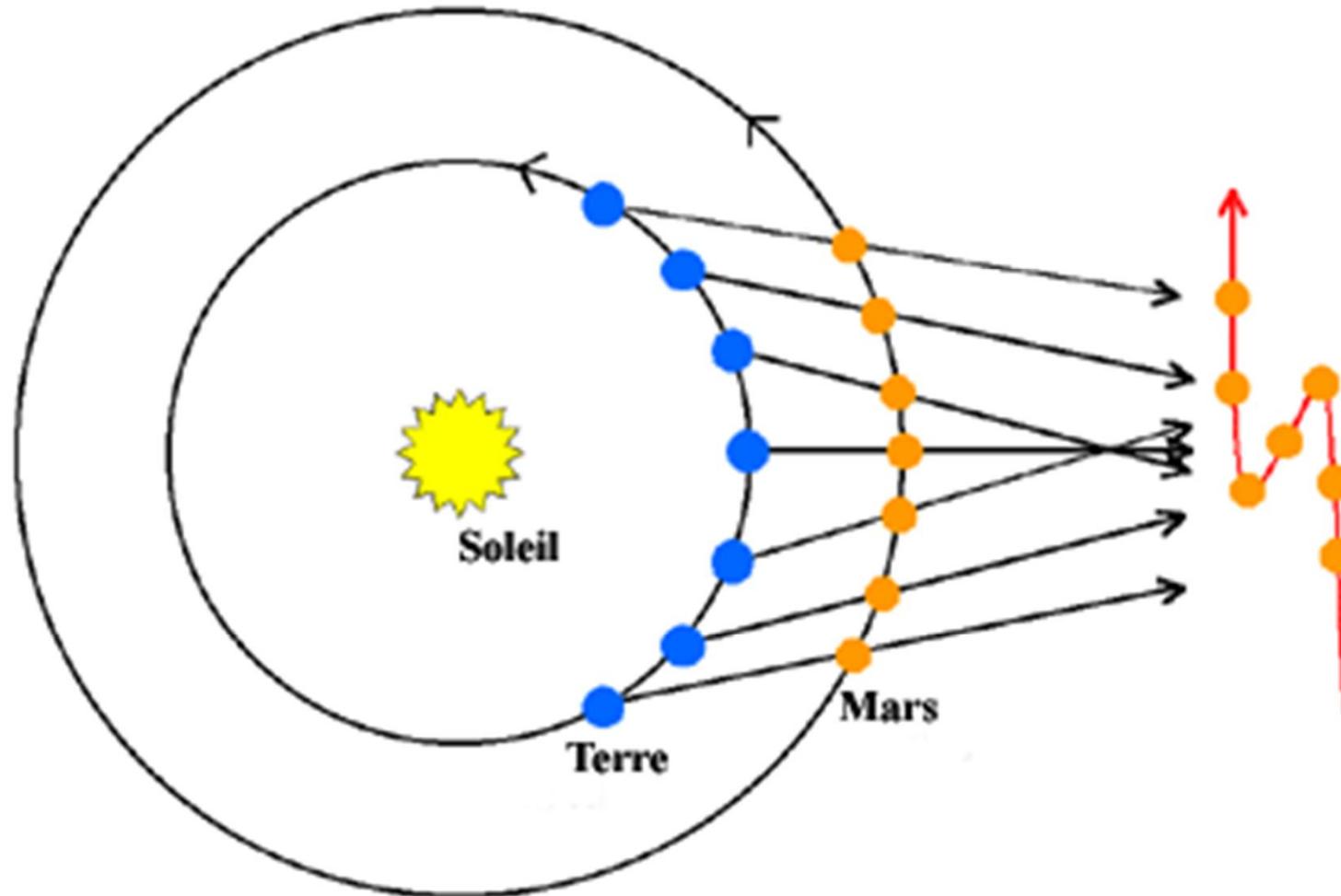
# Mars

Période de rotation sidérale

24h 38 mn

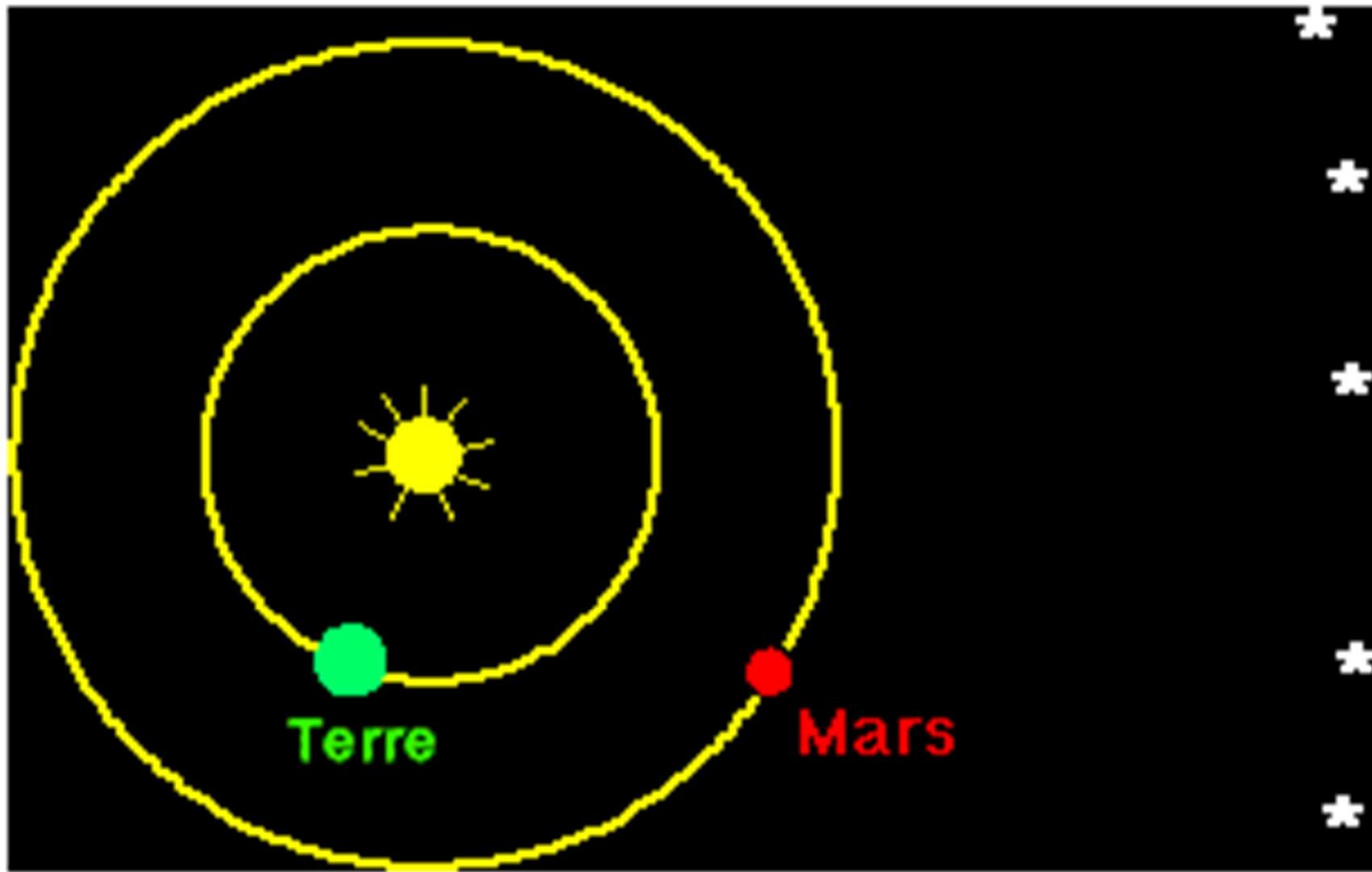
1 jour martien ~ 1 jour terrestre

# Mars



Mouvement rétrograde apparent

# Mars



Mouvement rétrograde apparent

# Mars



## Mouvement rétrograde apparent

# Mars



Mouvement rétrograde apparent

# Satellites de Mars

Phobos  
La Peur

Deimos  
L'Epouvante

Fils d'Arès (Mars)  
et  
d'Aphrodite (Vénus)

# Satellites de Mars

Découverts en 1877

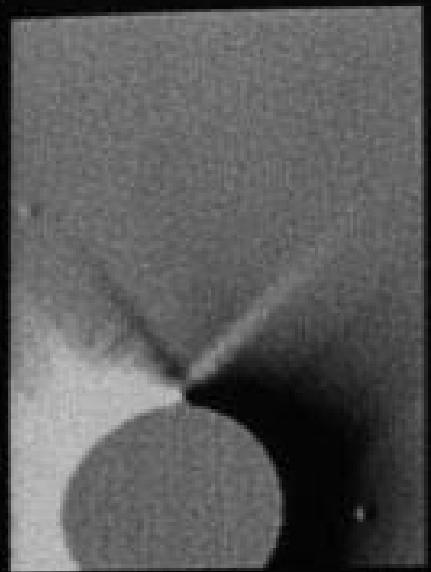
Phobos

Magnitude 11,3

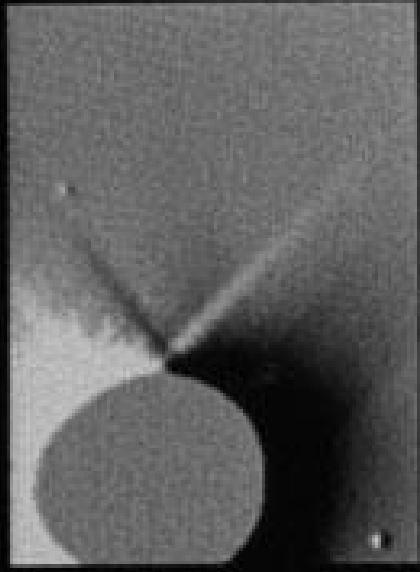
Deimos

Magnitude 12,4

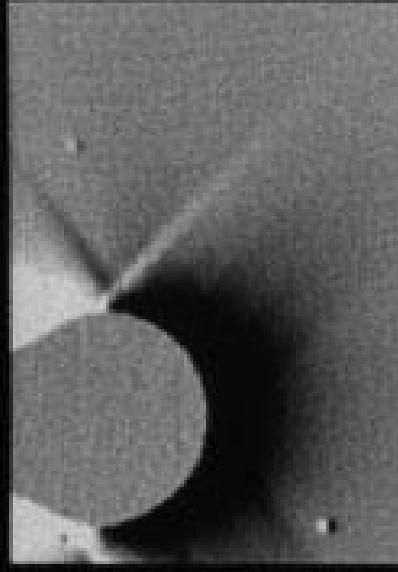
# Satellites de Mars



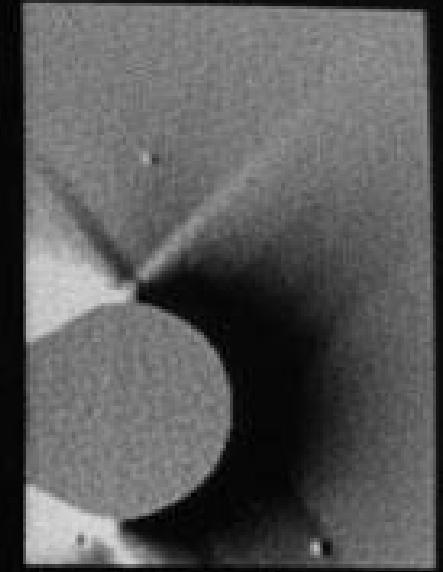
20h 12 UTC



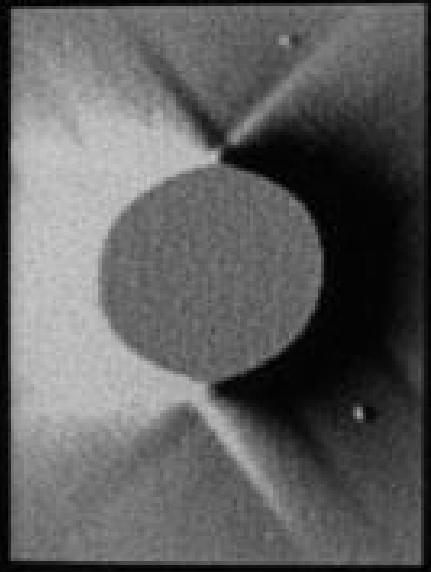
20h 41 UTC



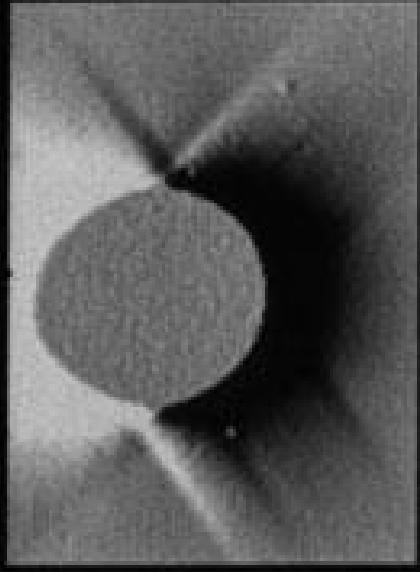
21h 11 UTC



21h 39 UTC



22h 02 UTC



22h 28 UTC

MARS, PHOBOS et DEIMOS

22 octobre 1988

CCD THX 785Z

Télescope de 1 mètre du Pic du Midi

Pose 4 secondes Filtre RG 630

# Satellites de Mars

Phobos

$27 \times 21 \times 19$  km

Distance de Mars  
9.380 km

Période de révolution  
7 heures 30

# Mars



# Phobos

Mars

Deimos

$15 \times 12 \times 11 \text{ km}$

Distance de Mars

23.460 km

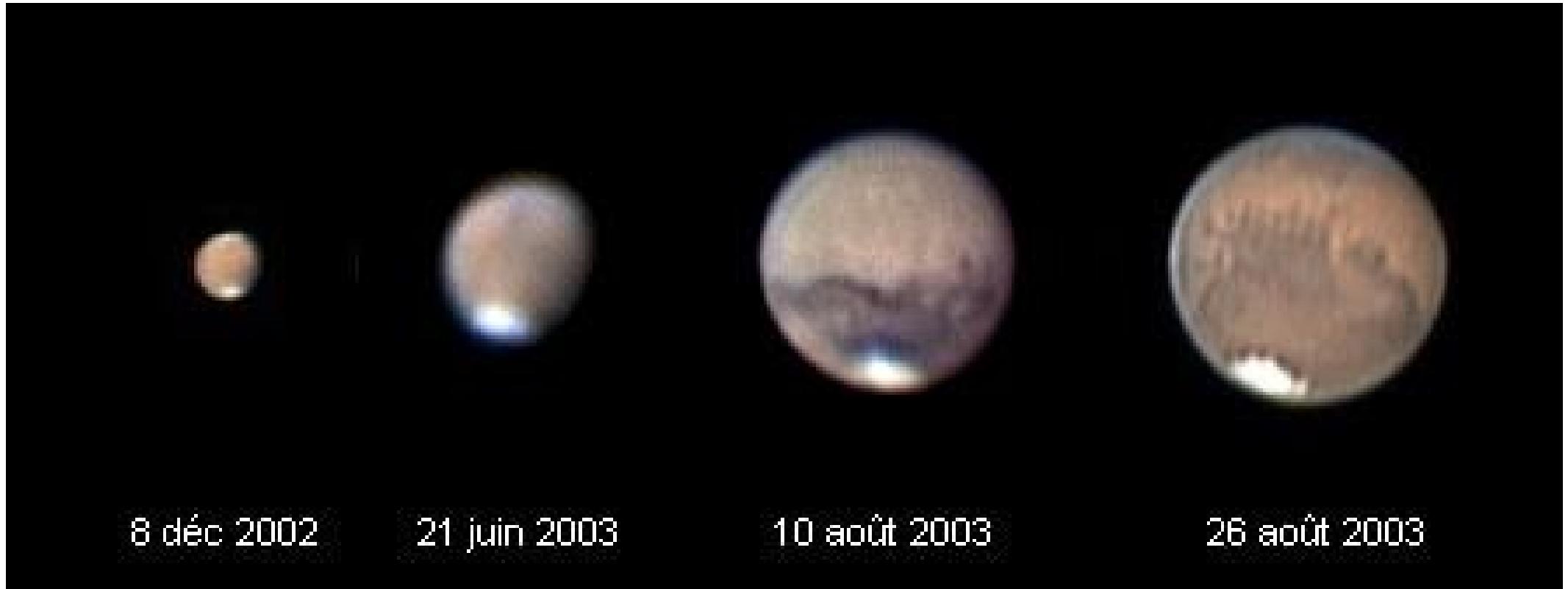
Période de révolution  
1,62 jours

# Mars



# Deimos

# Mars



8 déc 2002

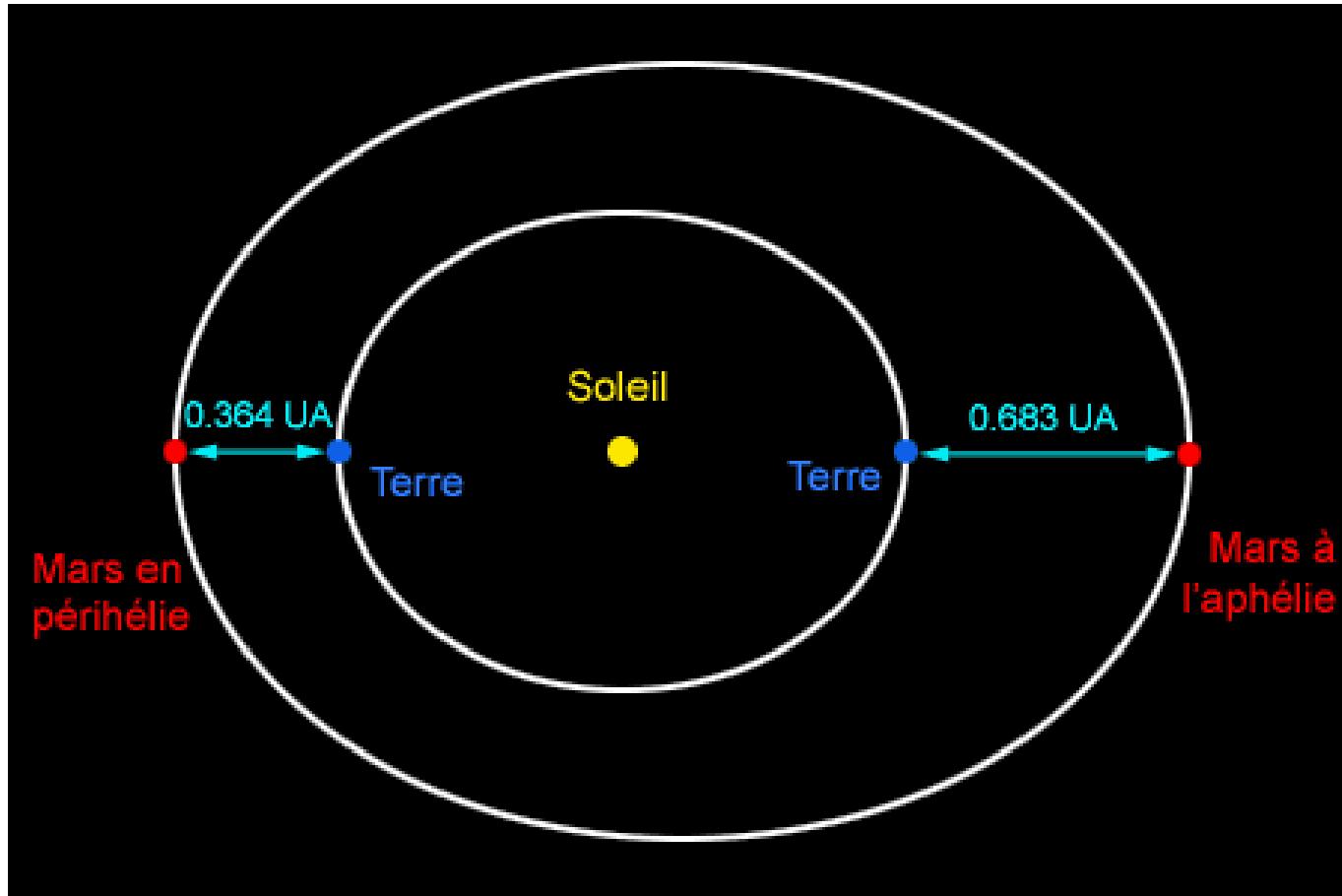
21 juin 2003

10 août 2003

26 août 2003

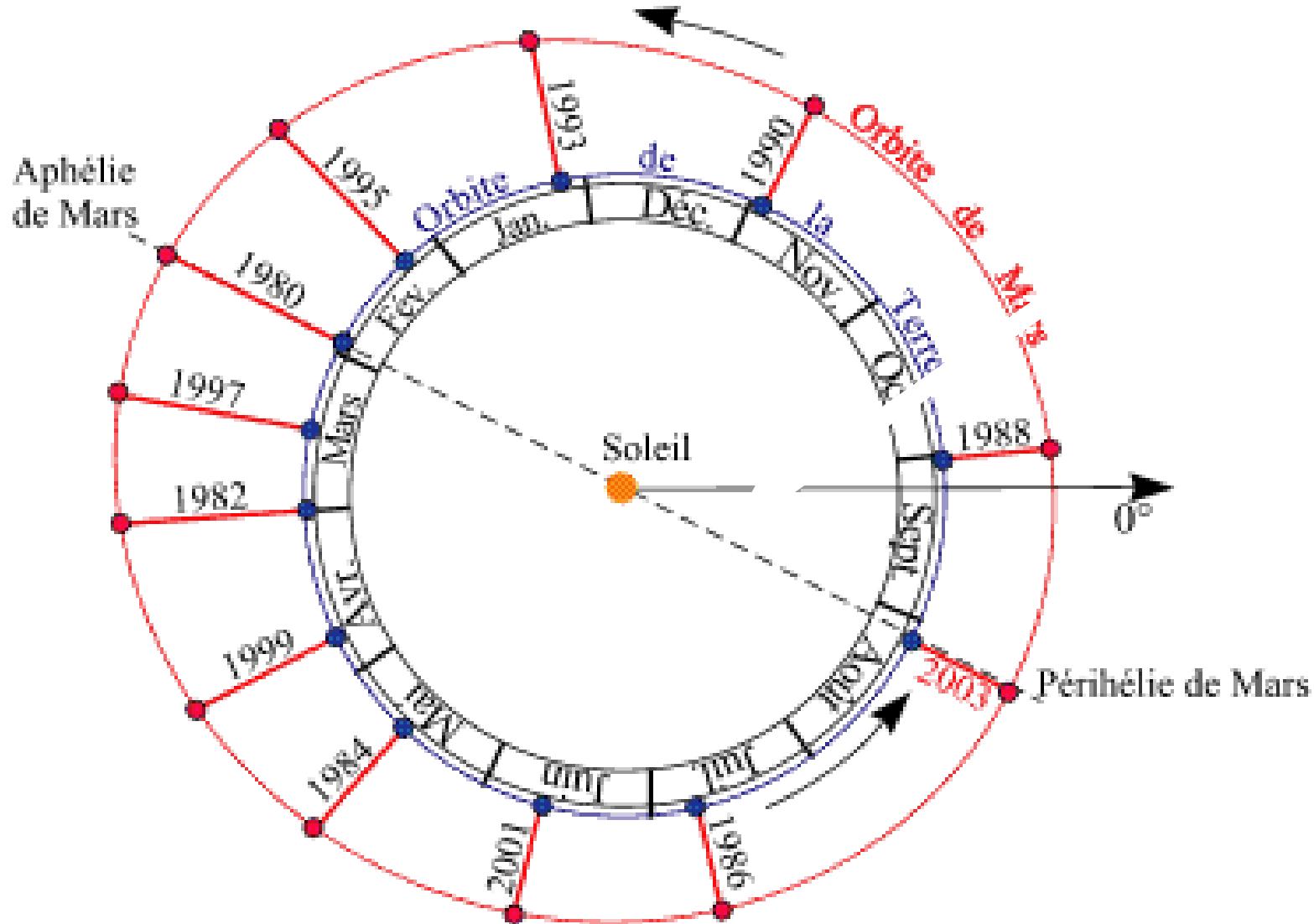
Diamètre apparent varie de  
4,2 " à 25 "

# Opposition de Mars



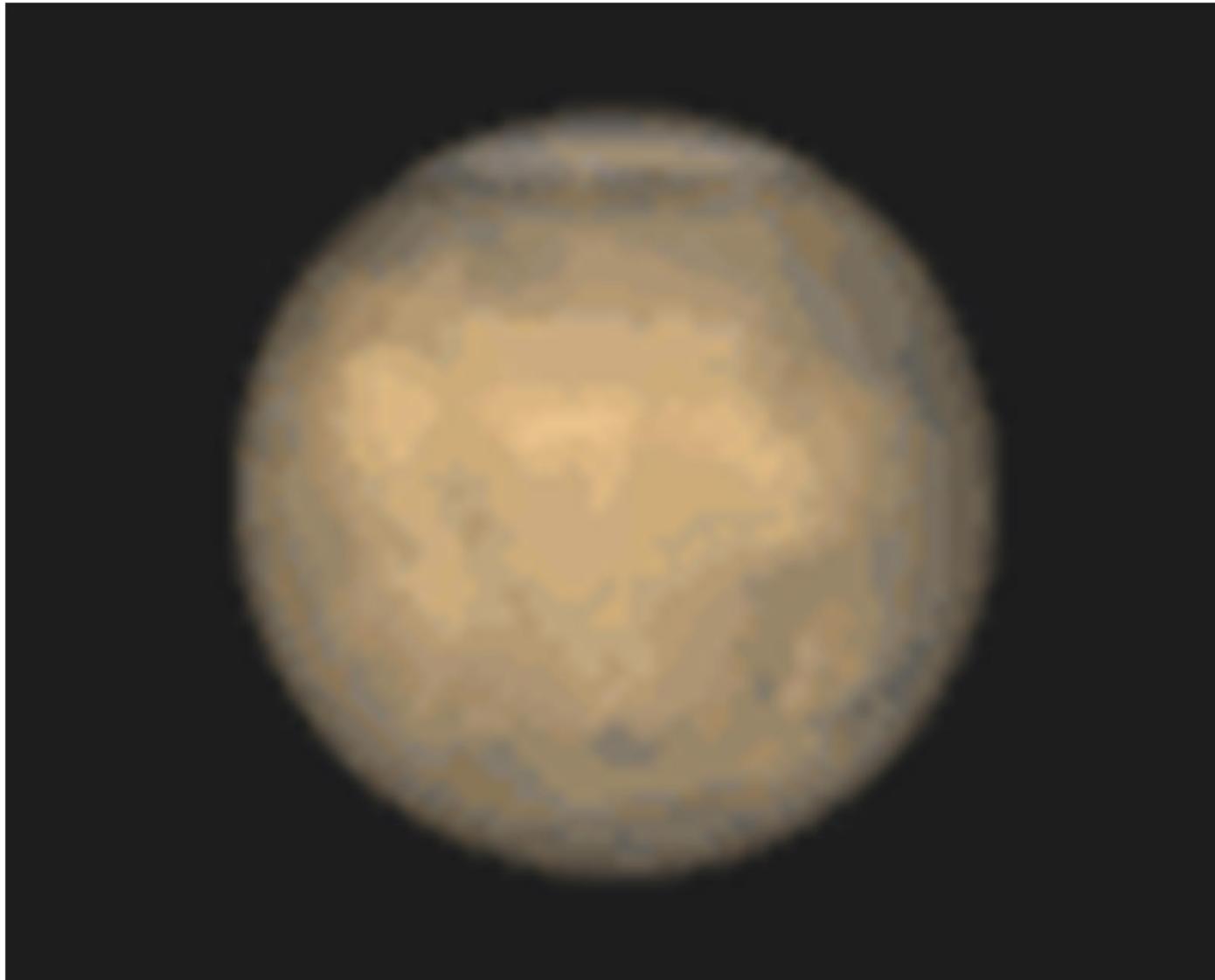
Plus ou moins favorables

# Oppositions de Mars



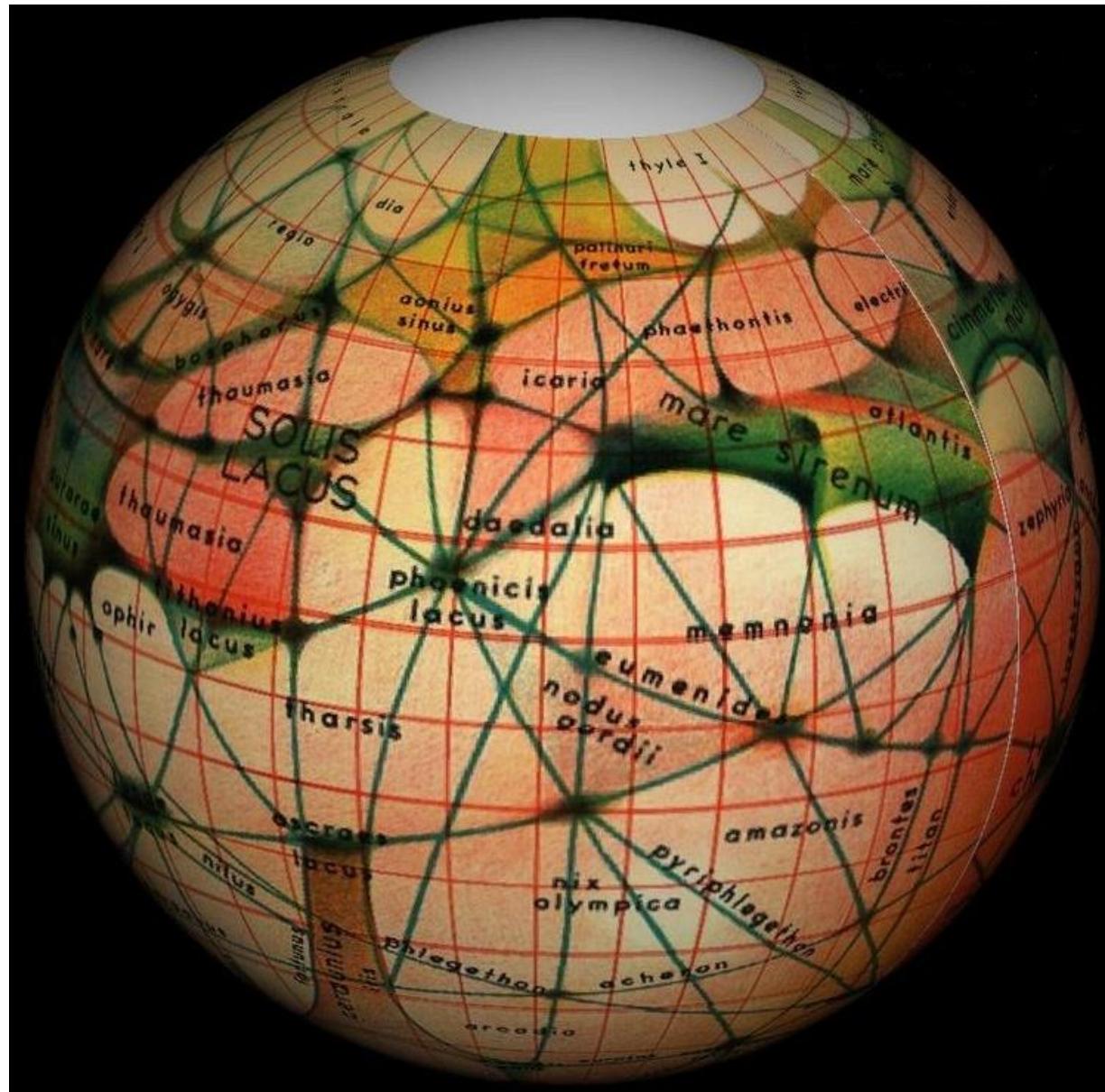
Plus ou moins favorables

# Mars



Observé depuis la Terre

# Mars



Les canaux de Mars

# Mars



Schiaparelli  
1877

# Mars



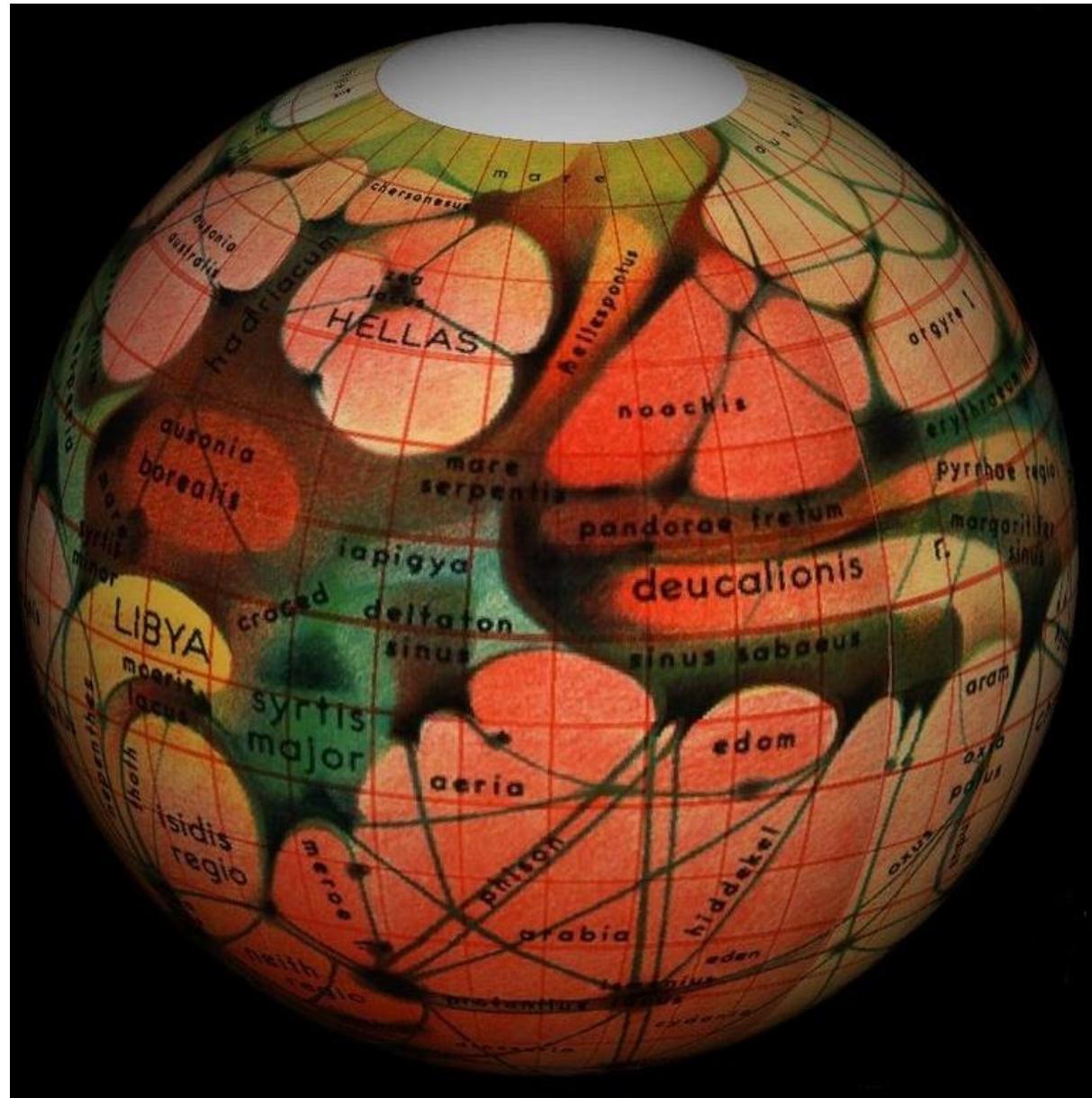
1897  
Percival Lowell

# Mars



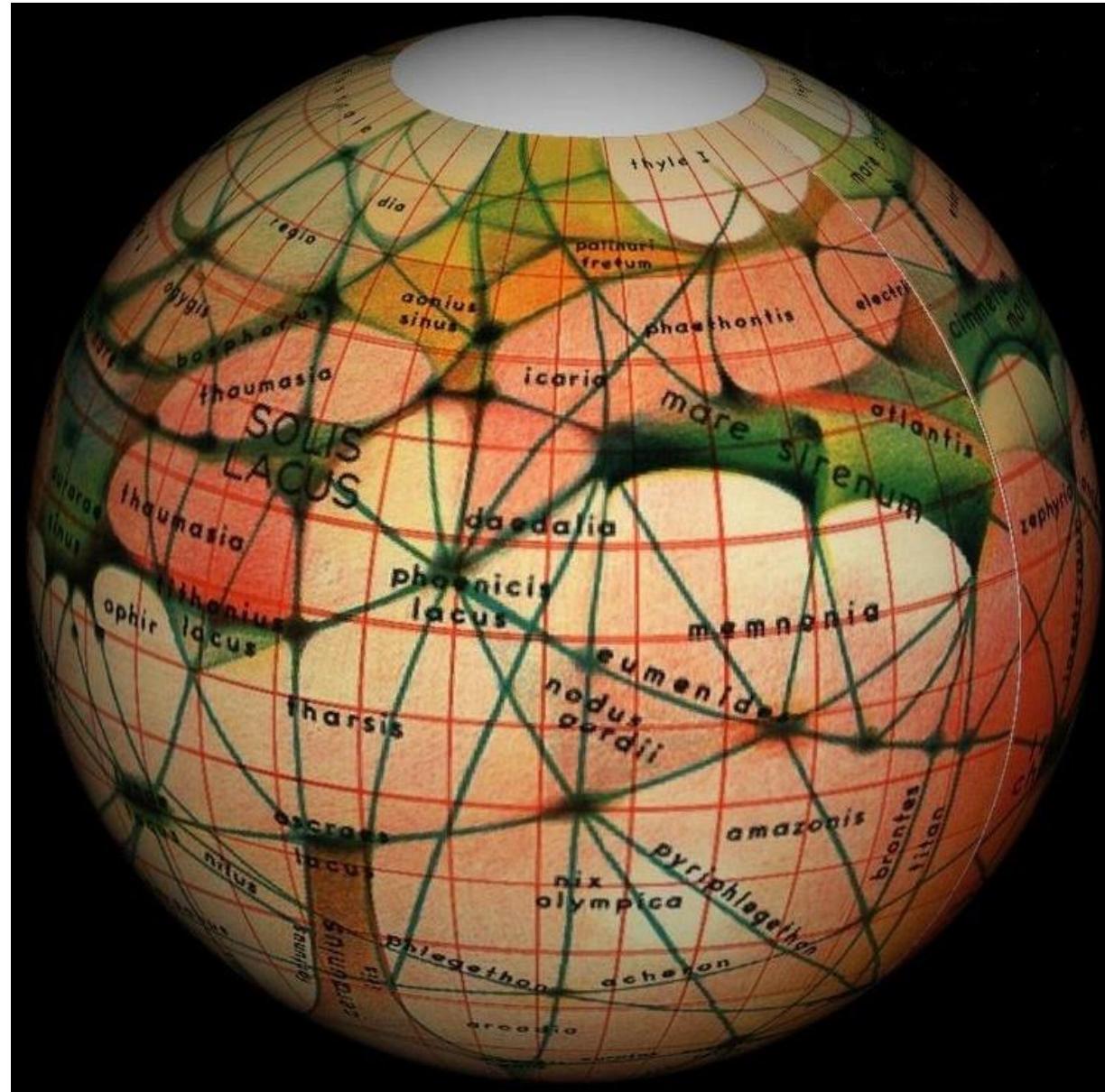
Fondateur de l'observatoire de  
Flagstaff Arizona

# Mars



500 canaux

# Mars



Système d'irrigation des Martiens

# Mars



1898 - H.G WELLS

La guerre des Mondes

# Mars



Orson Welles  
1938

# Mars



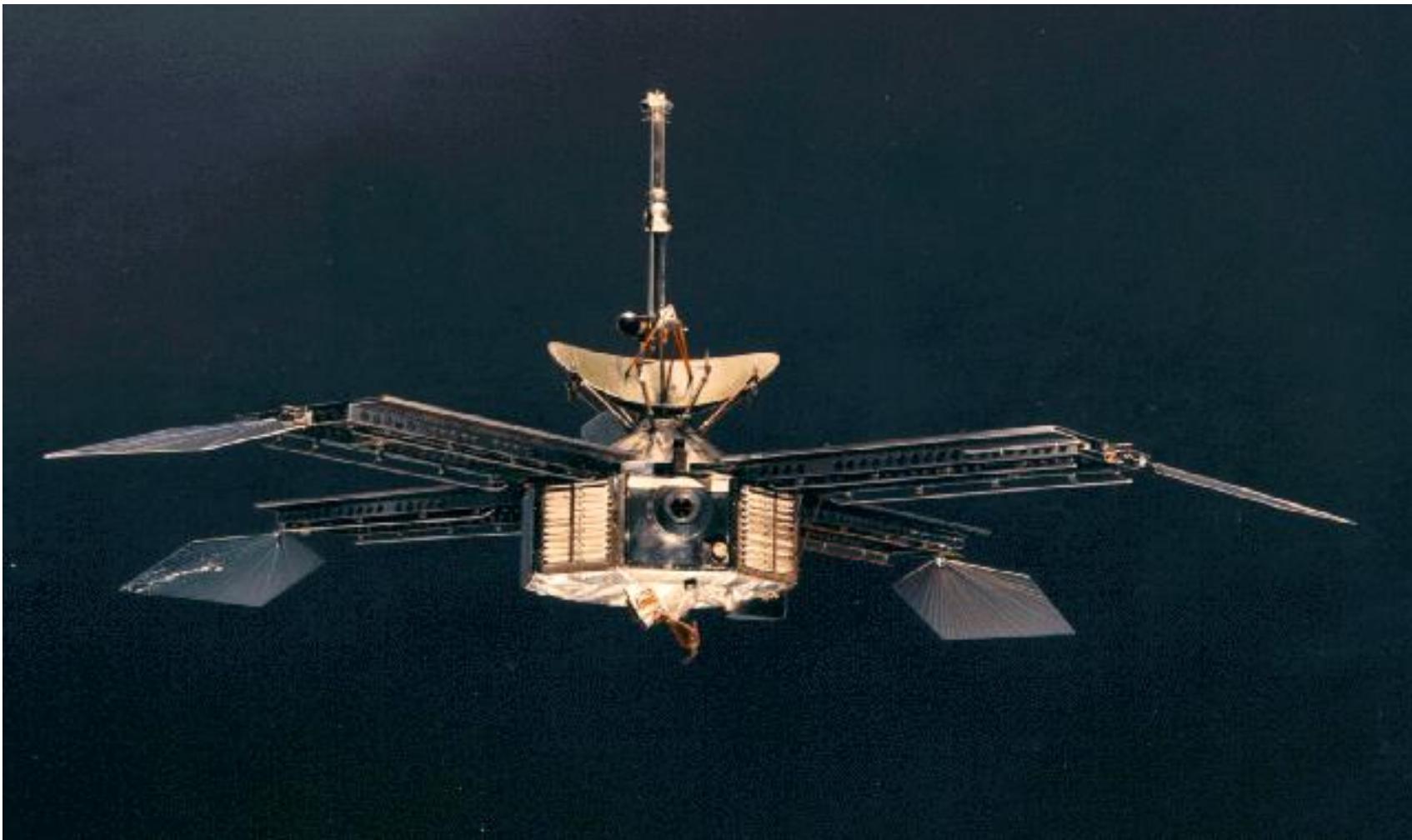
Orson Welles  
1938

# Mars



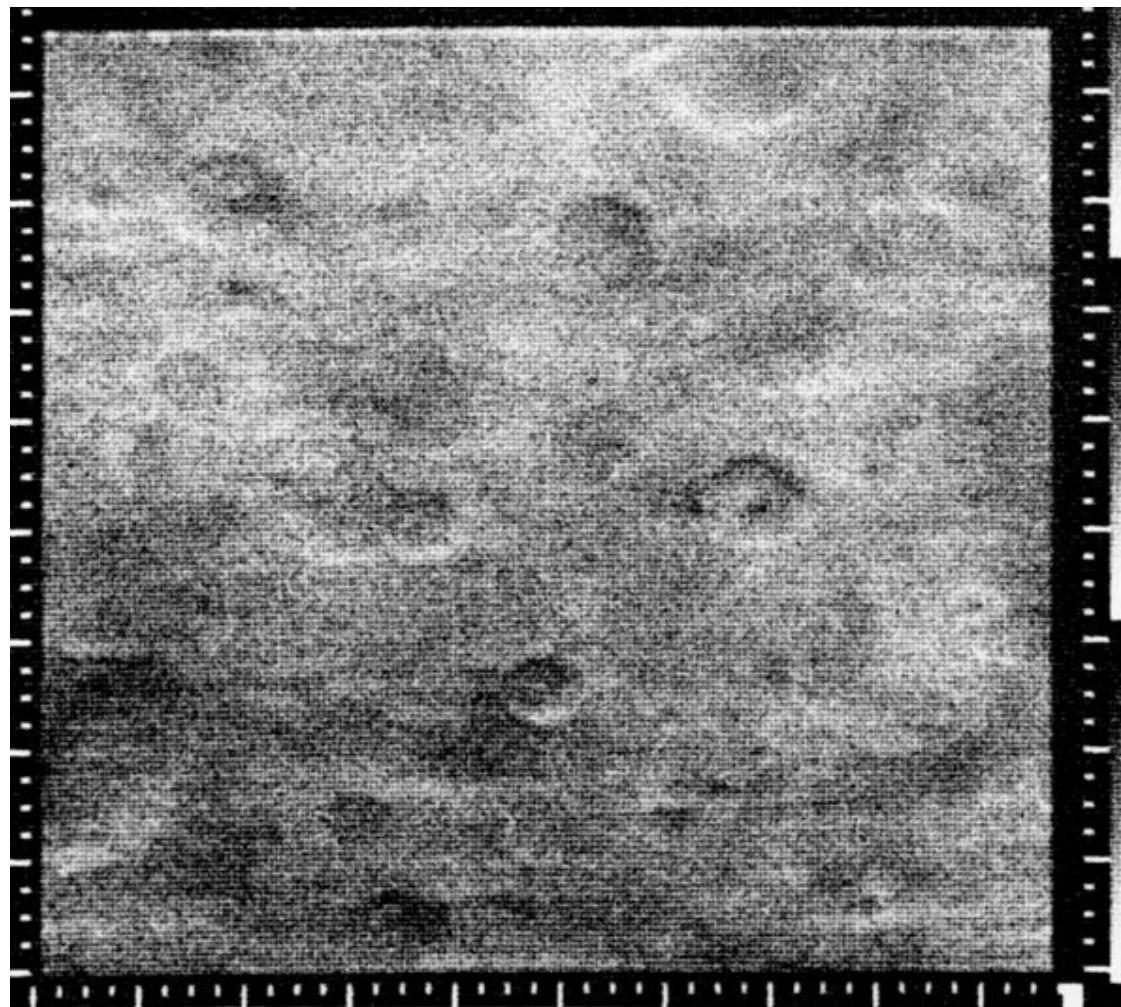
En 1948 Audouin DOLLFUS montre qu'il ne s'agit pas de canaux mais de taches indépendantes

# Mars



Mariner 4  
1965

# Mars



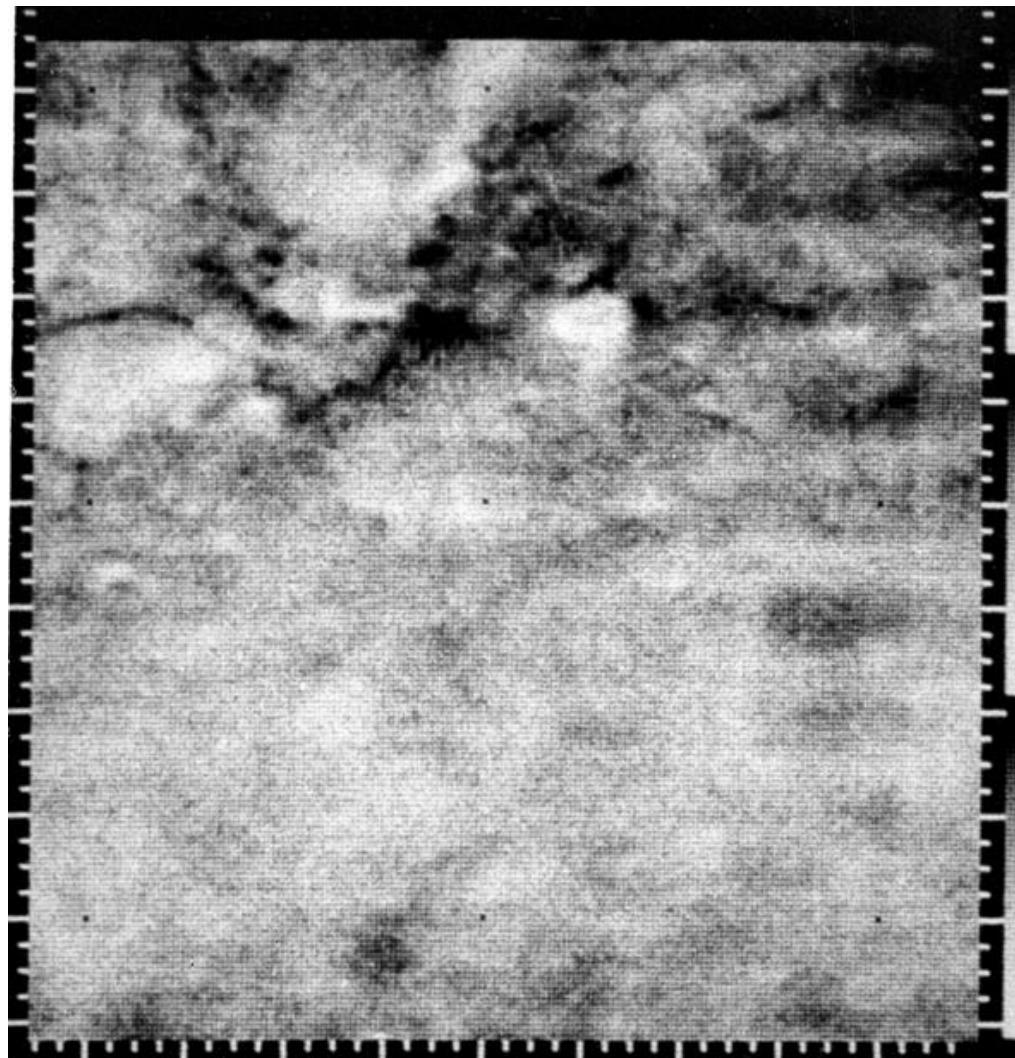
Mariner 4  
1965

# Mars



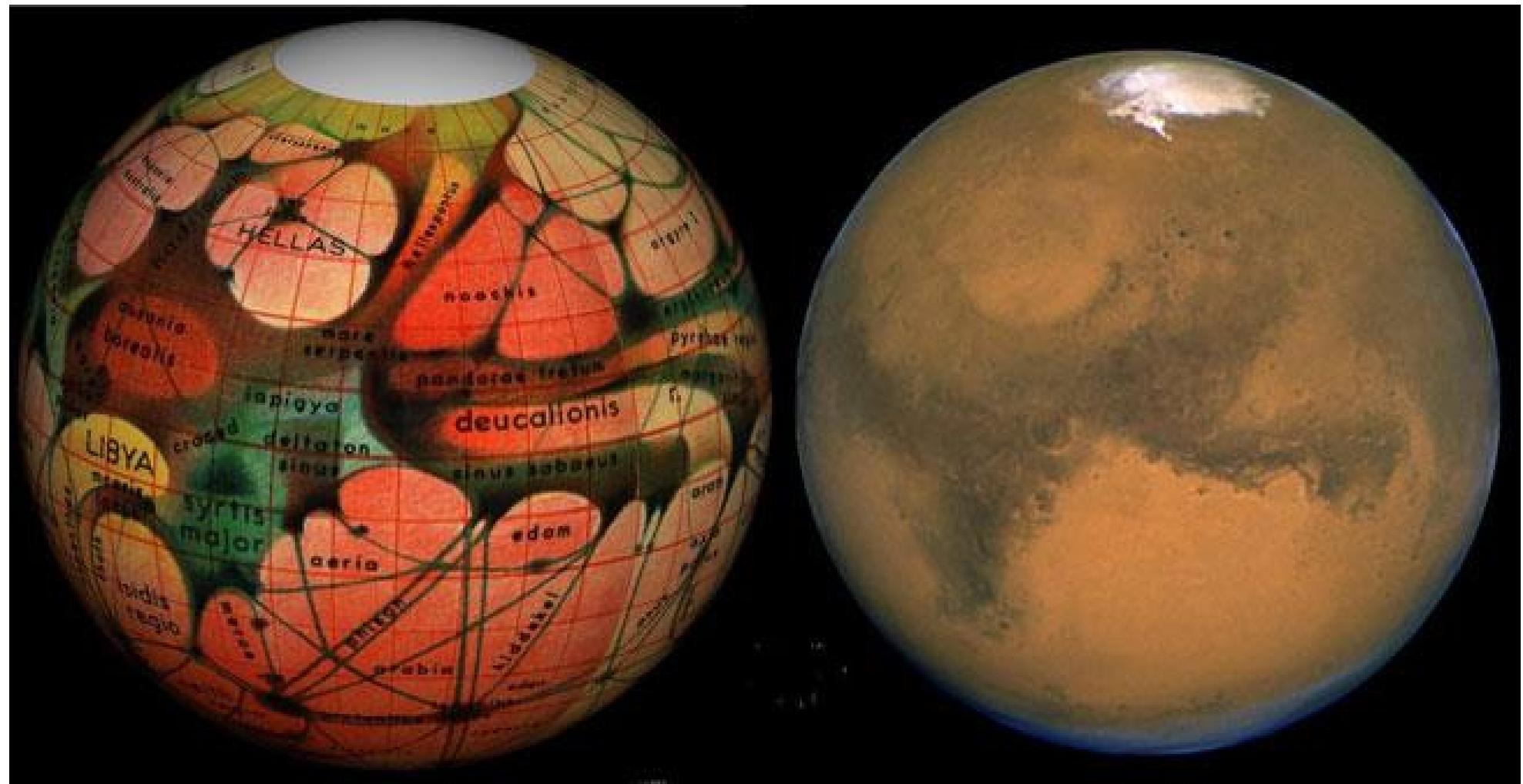
Mariner 4  
1965

# Mars



Mariner 4  
1965

# Mars



Comparaison

# Mars

53 missions envoyées vers Mars

dont 23 succès

# Mars

En 2005

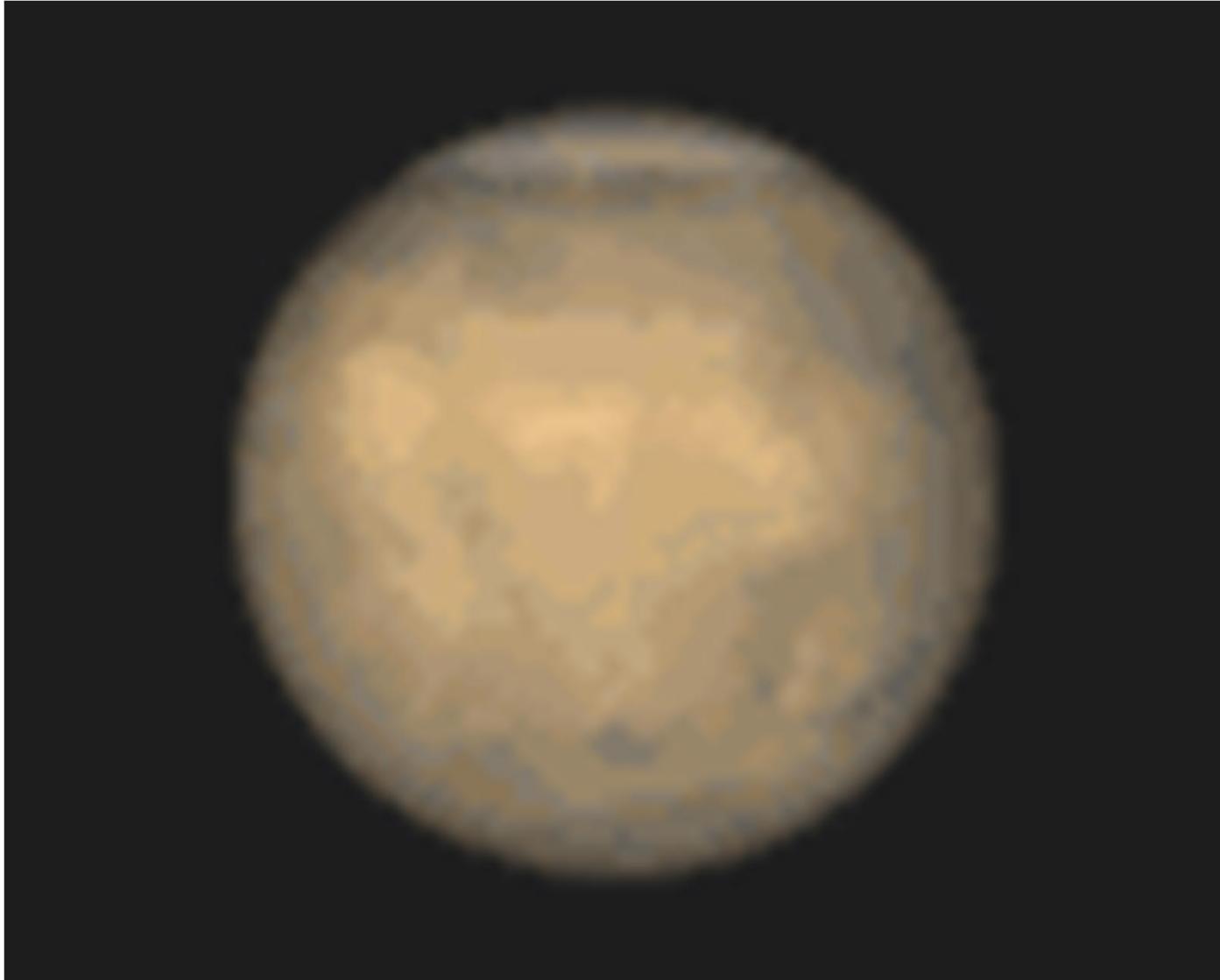
Mars Reconnaissance Orbiter  
Cartographie avec une résolution de  
25 cm

# Mars

En 2005

Mars Reconnaissance Orbiter  
Cartographie avec une résolution de  
25 cm

# Mars



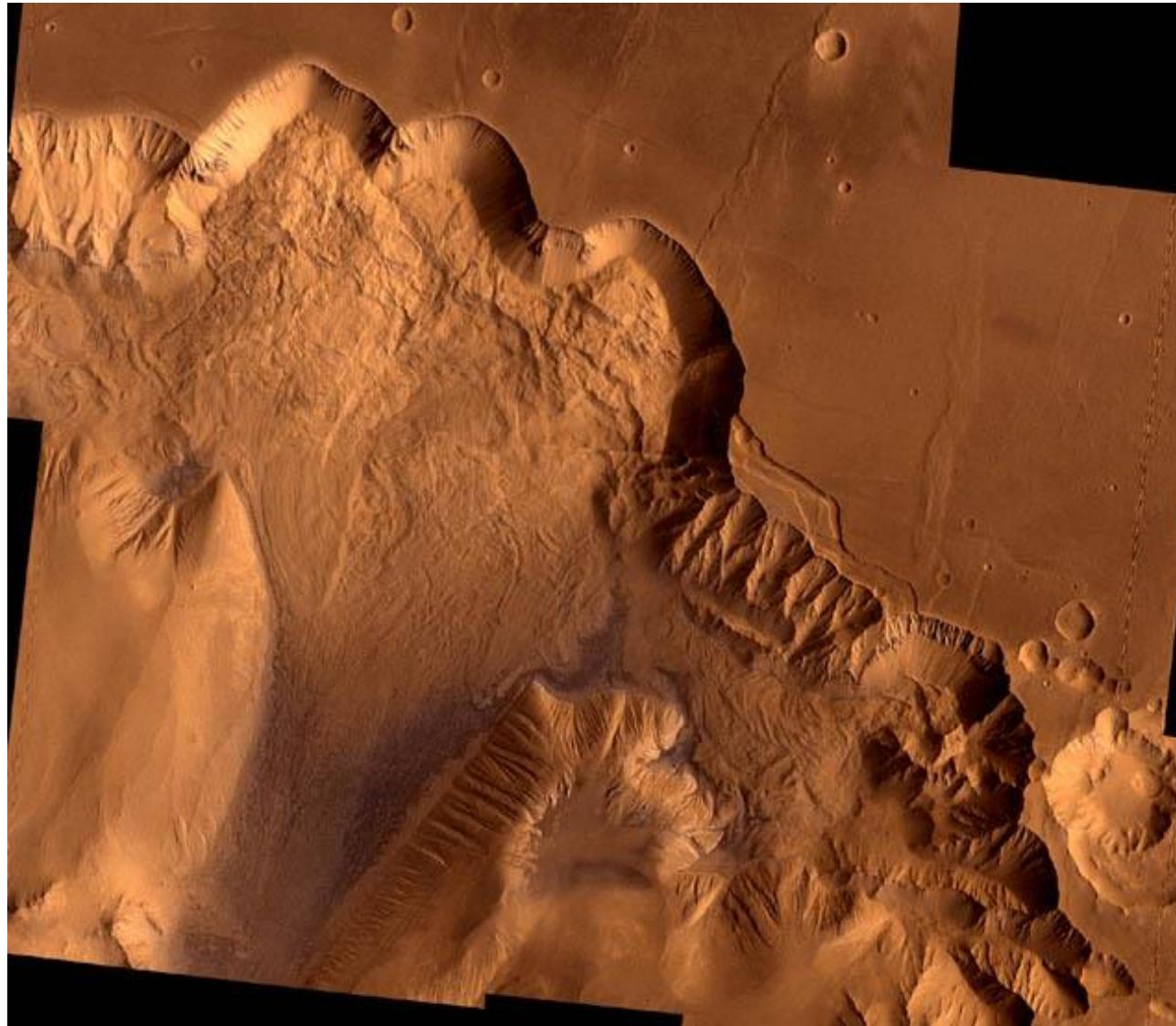
Mars planète rouge  
Vue de la Terre

# Mars



Mars planète rouge  
Vu par Hubble

# Mars



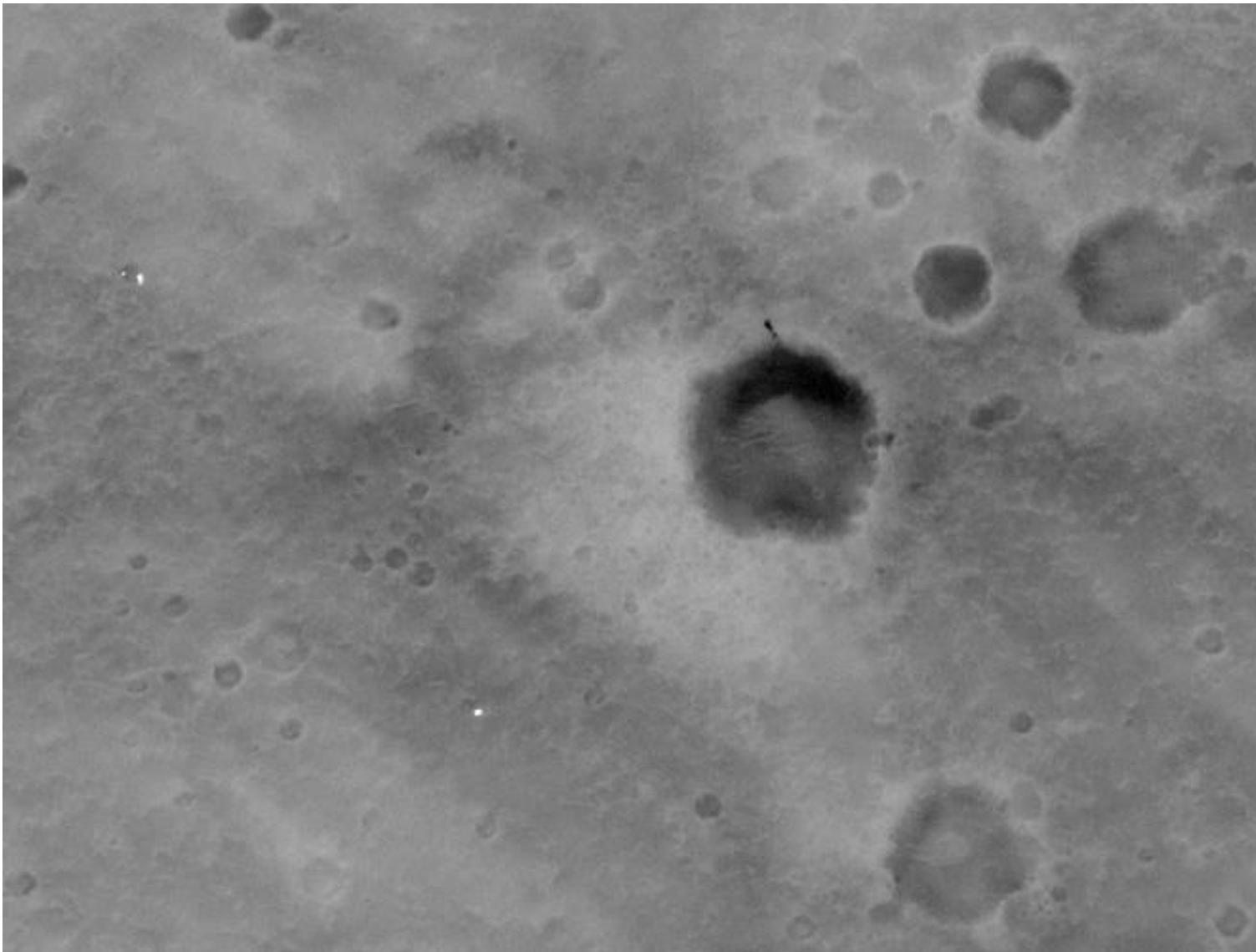
Mars planète rouge  
Vue orbitale Mars Odyssey

# Mars



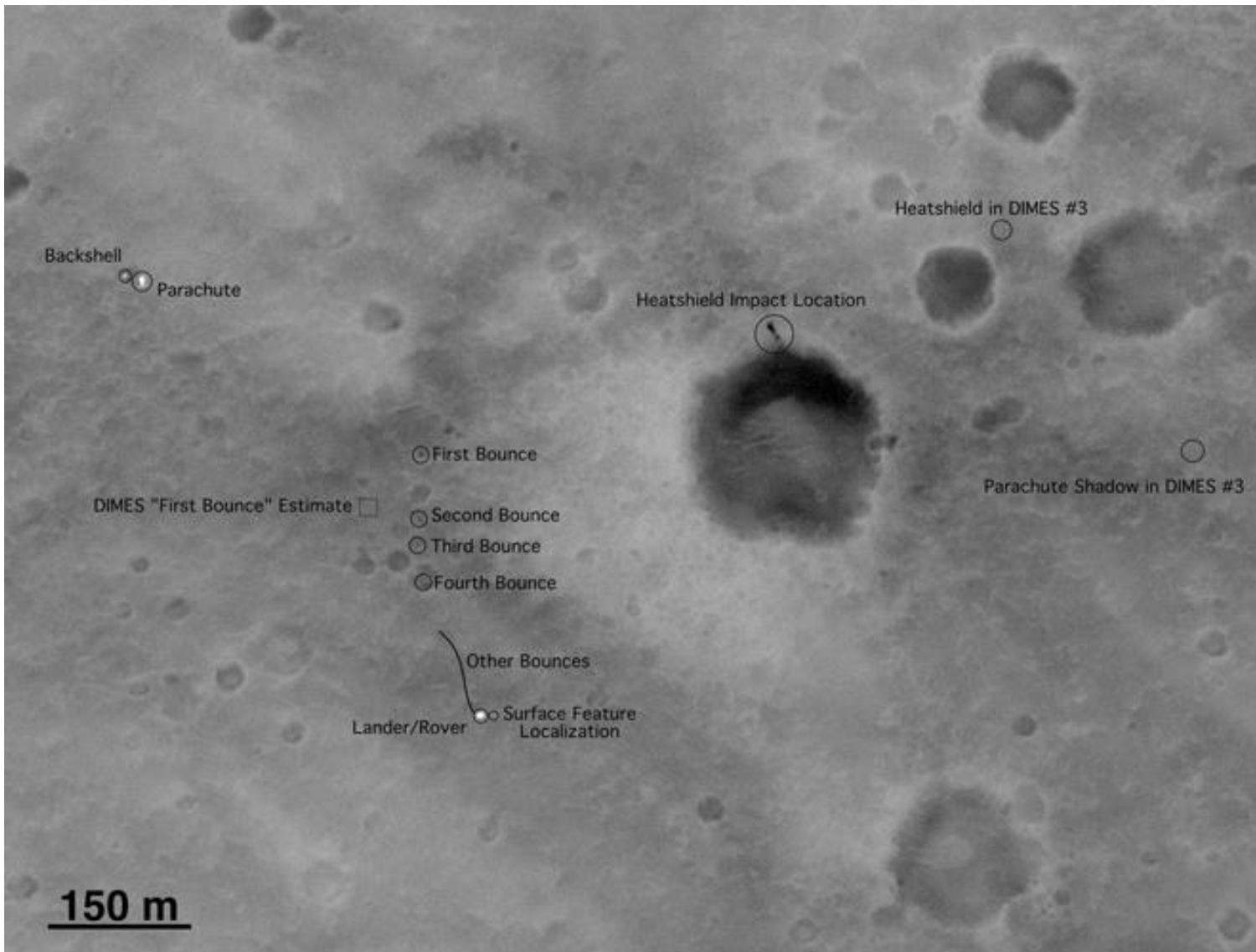
Mars planète rouge  
Vue du sol Viking 1

# Mars



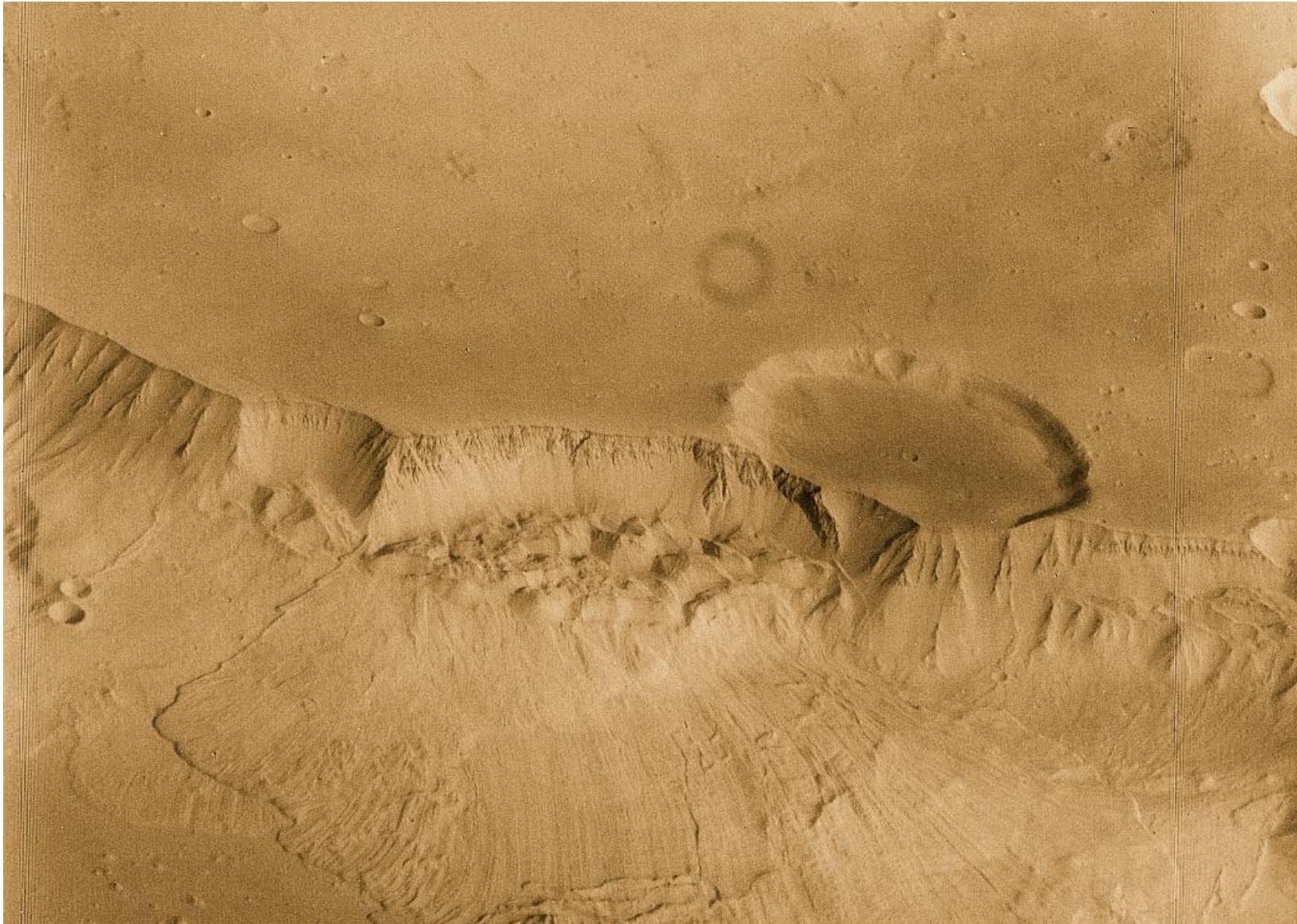
**Site d'atterrissement de Spirit  
par Mars Global Surveyor**

# Mars

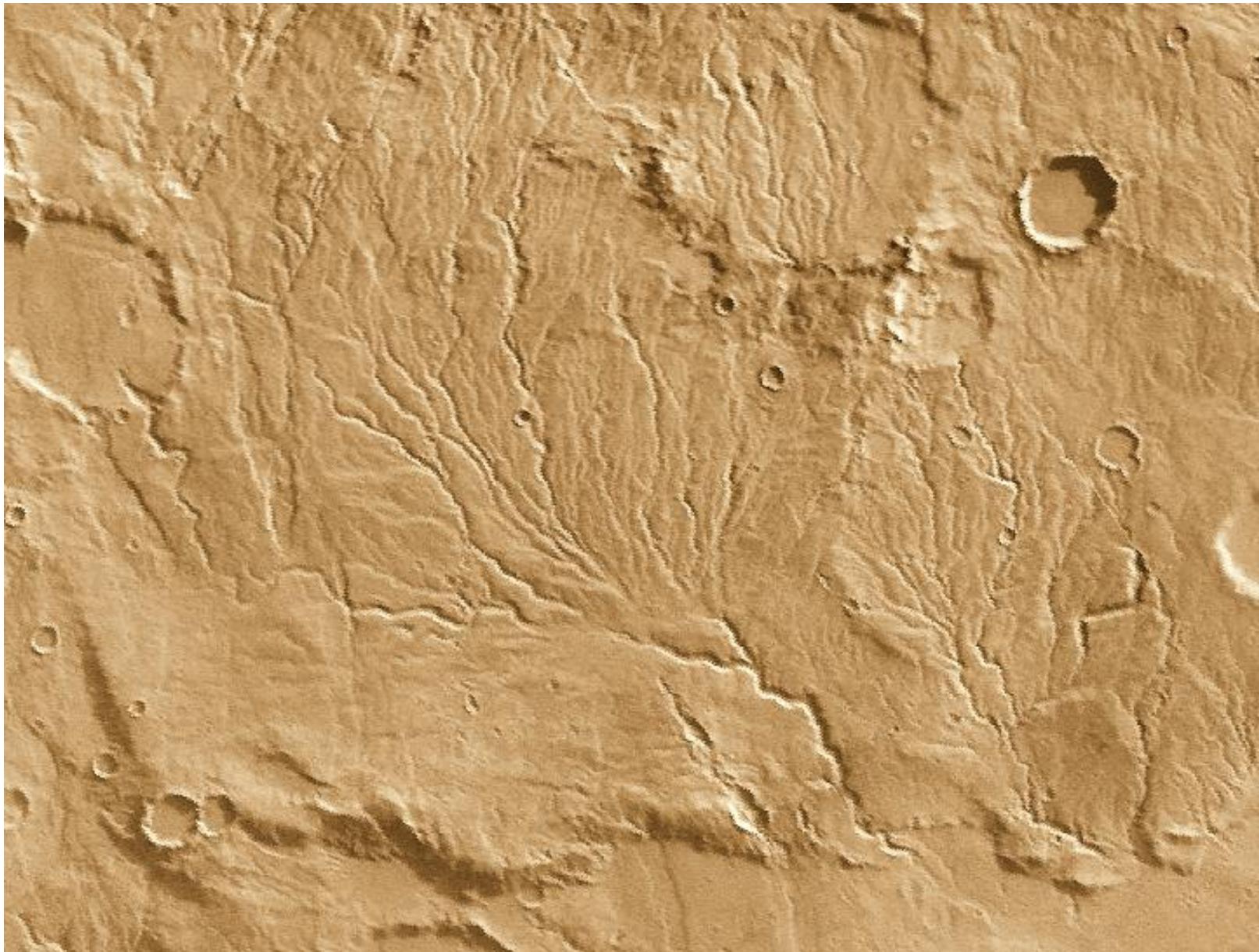


**Site d'atterrissement de Spirit  
par Mars Global Surveyor**

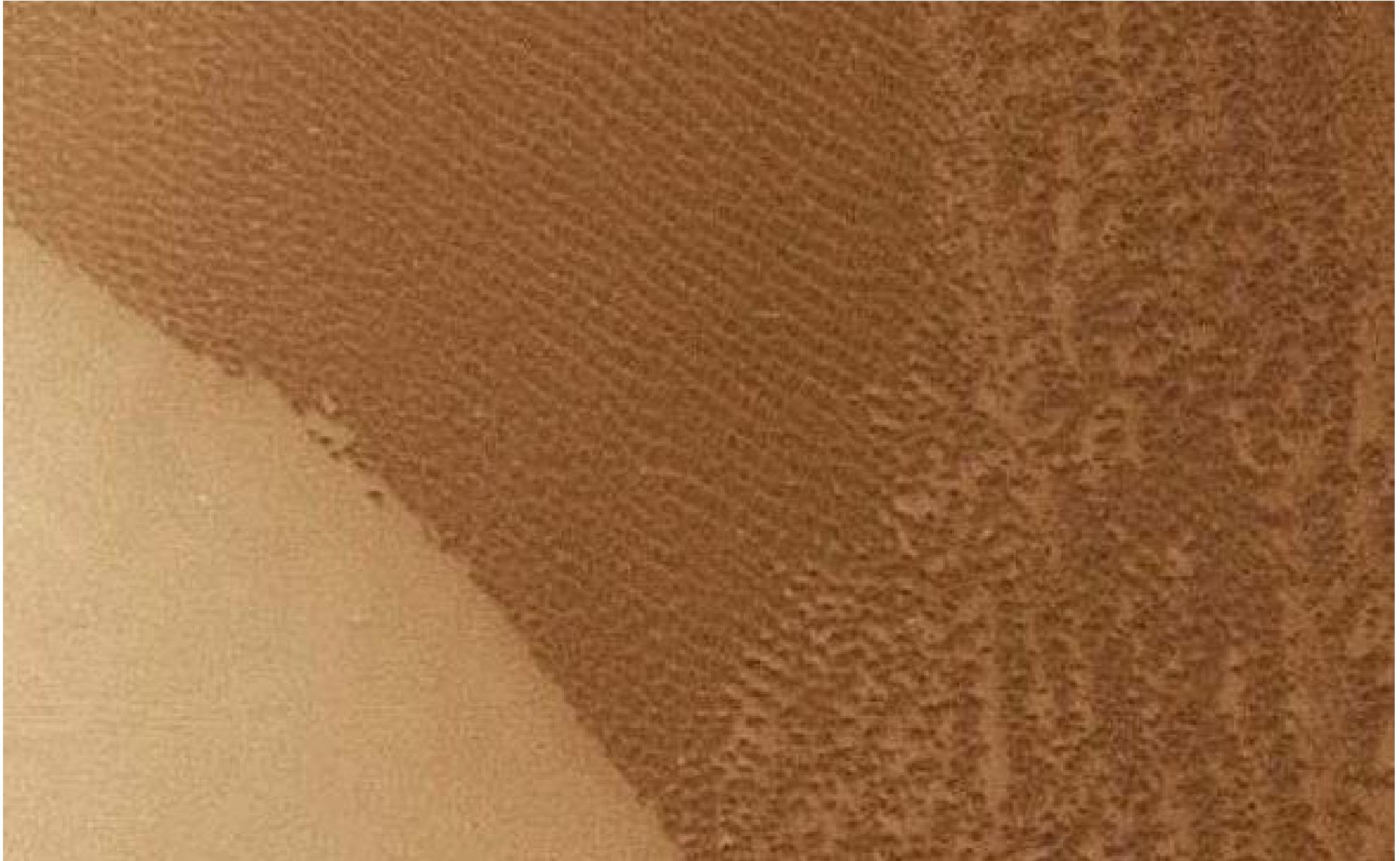
# Topographie de Mars



# Topographie de Mars



# Topographie de Mars



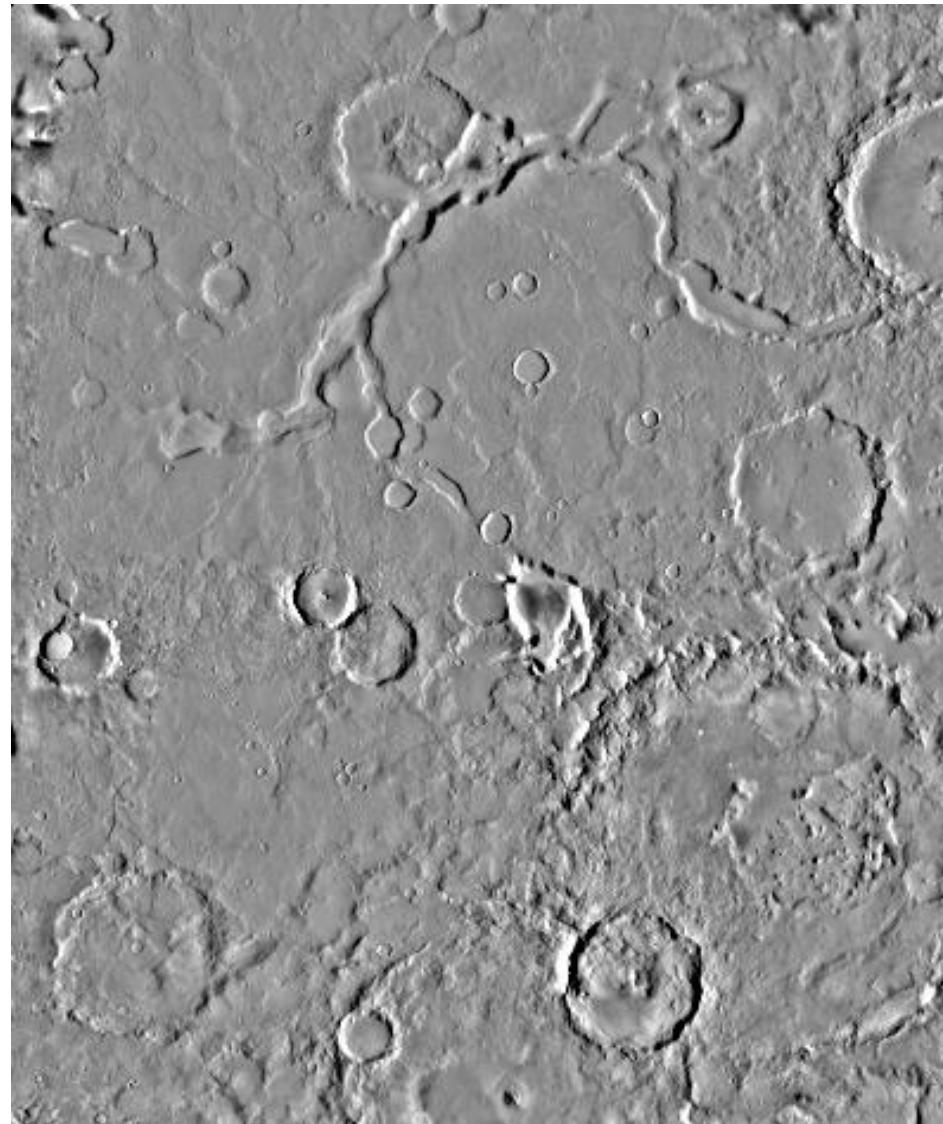
Champs de dunes

# Topographie de Mars



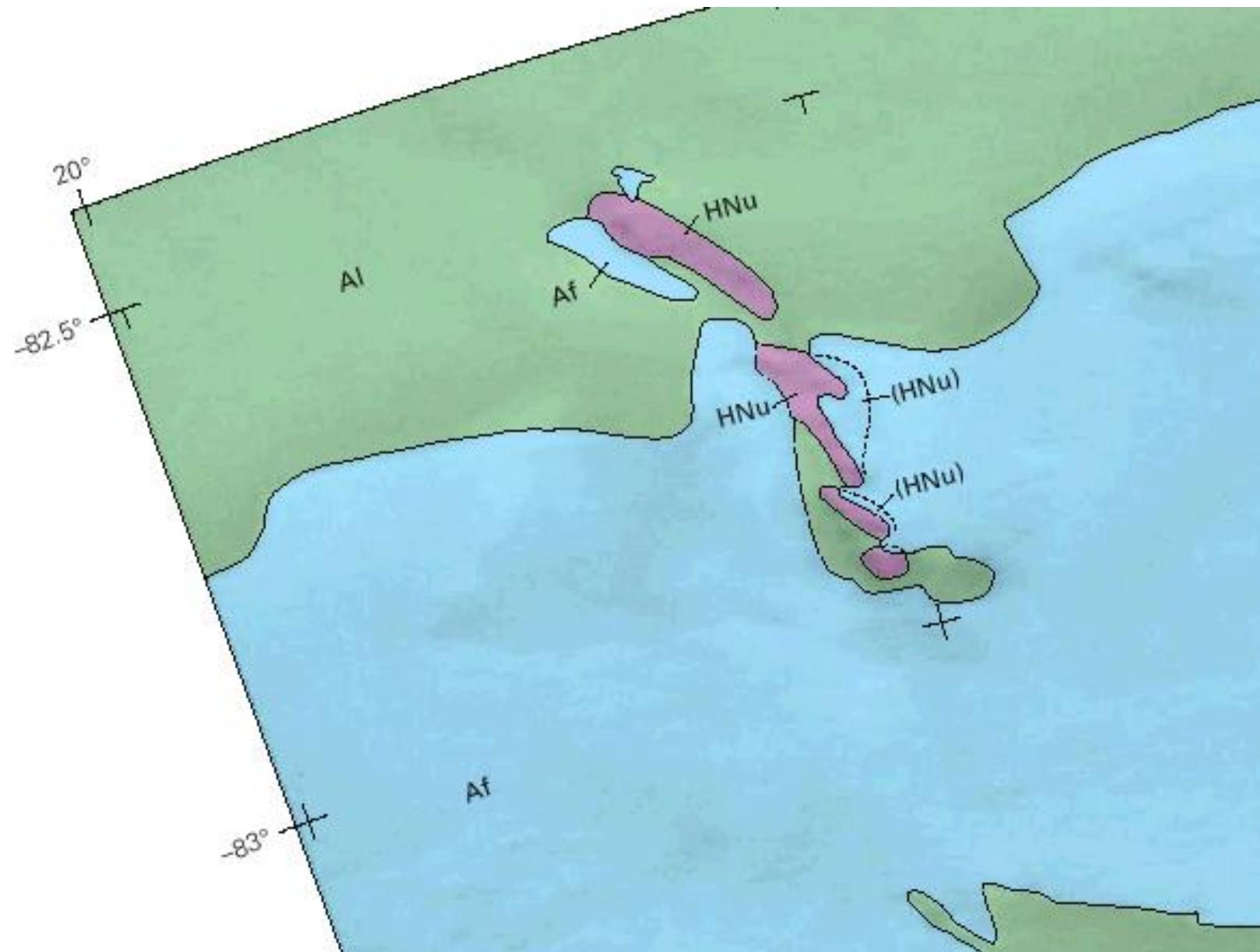
Paysage de désert

# Mars



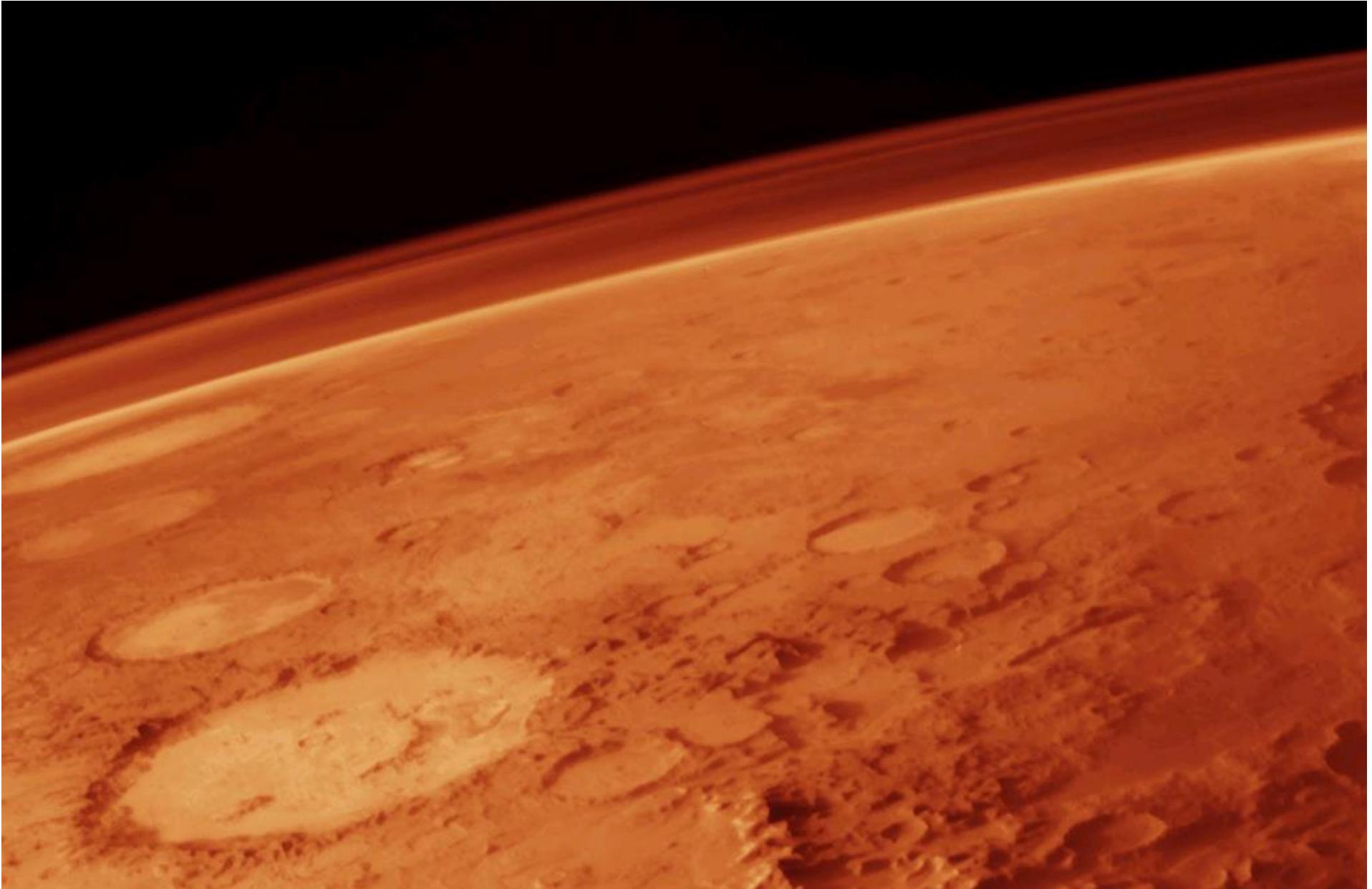
## Cartographié

# Mars



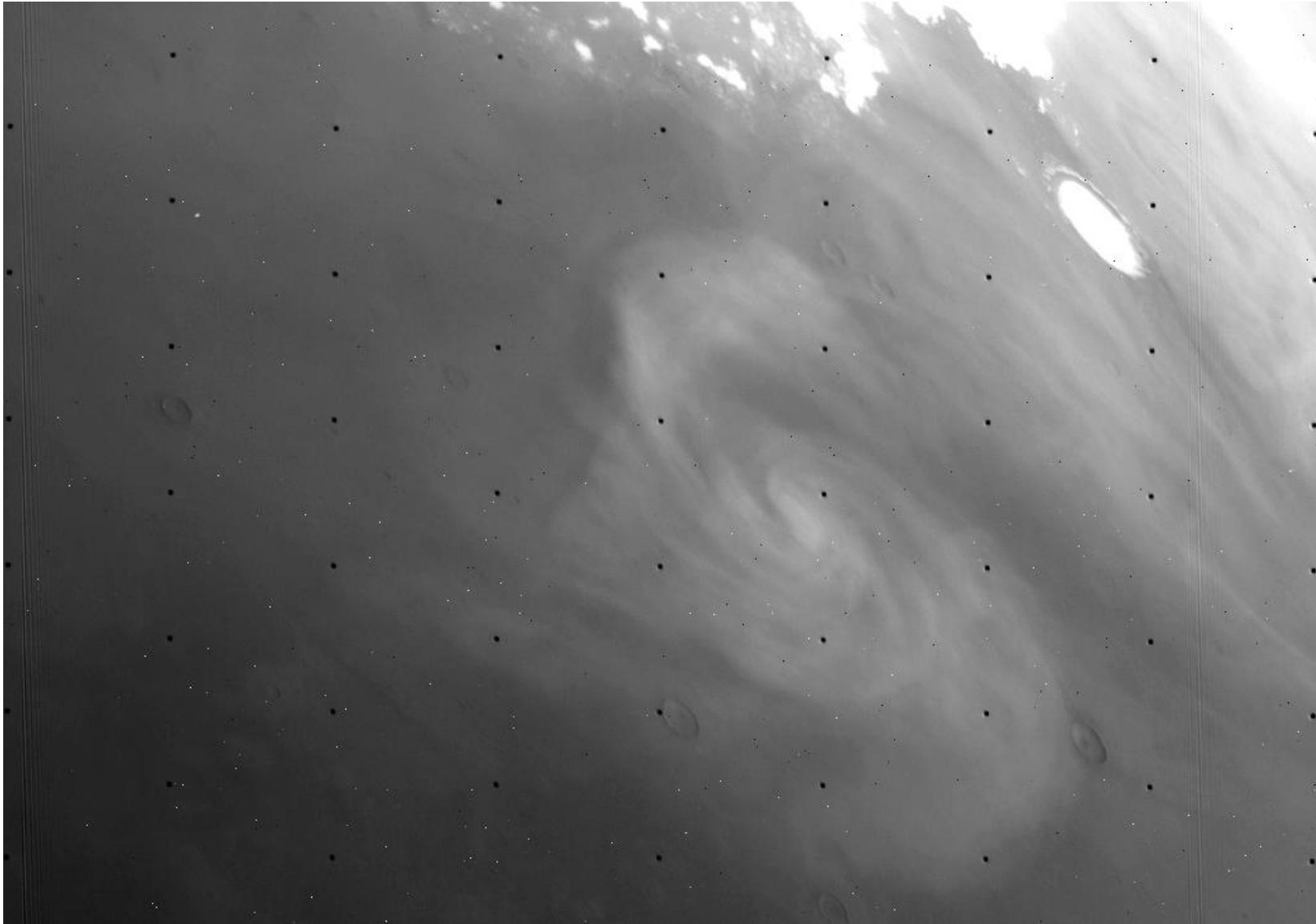
Cartographié

# Mars



Atmosphère

# Mars



Dépression près du pôle Nord de Mars  
Cliché Viking Orbiter 1

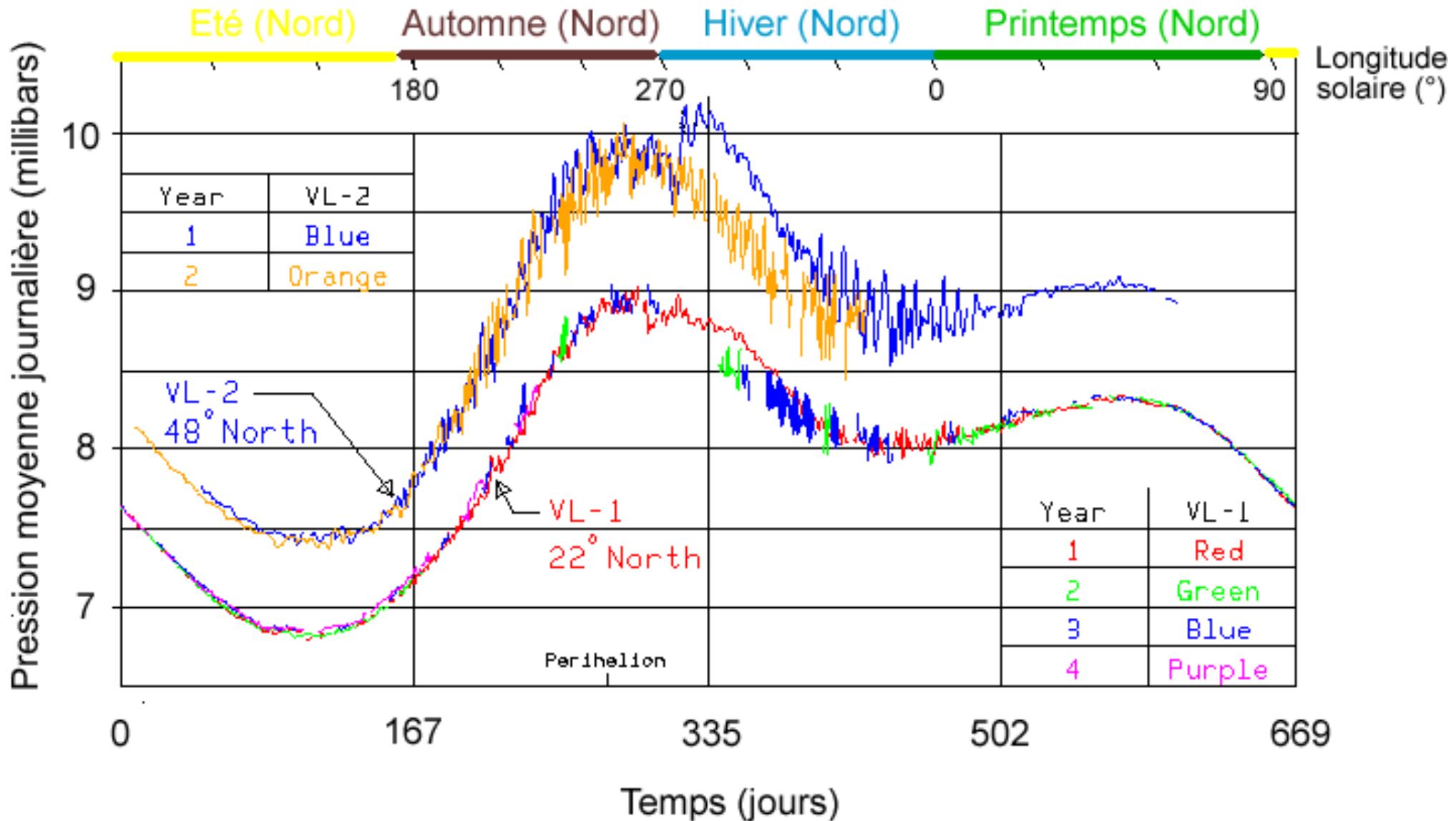
# Mars

## Atmosphère

Pression 0,008 bars

~ Pression atmosphérique  
sur Terre  
à 35.000 m  
d'altitude

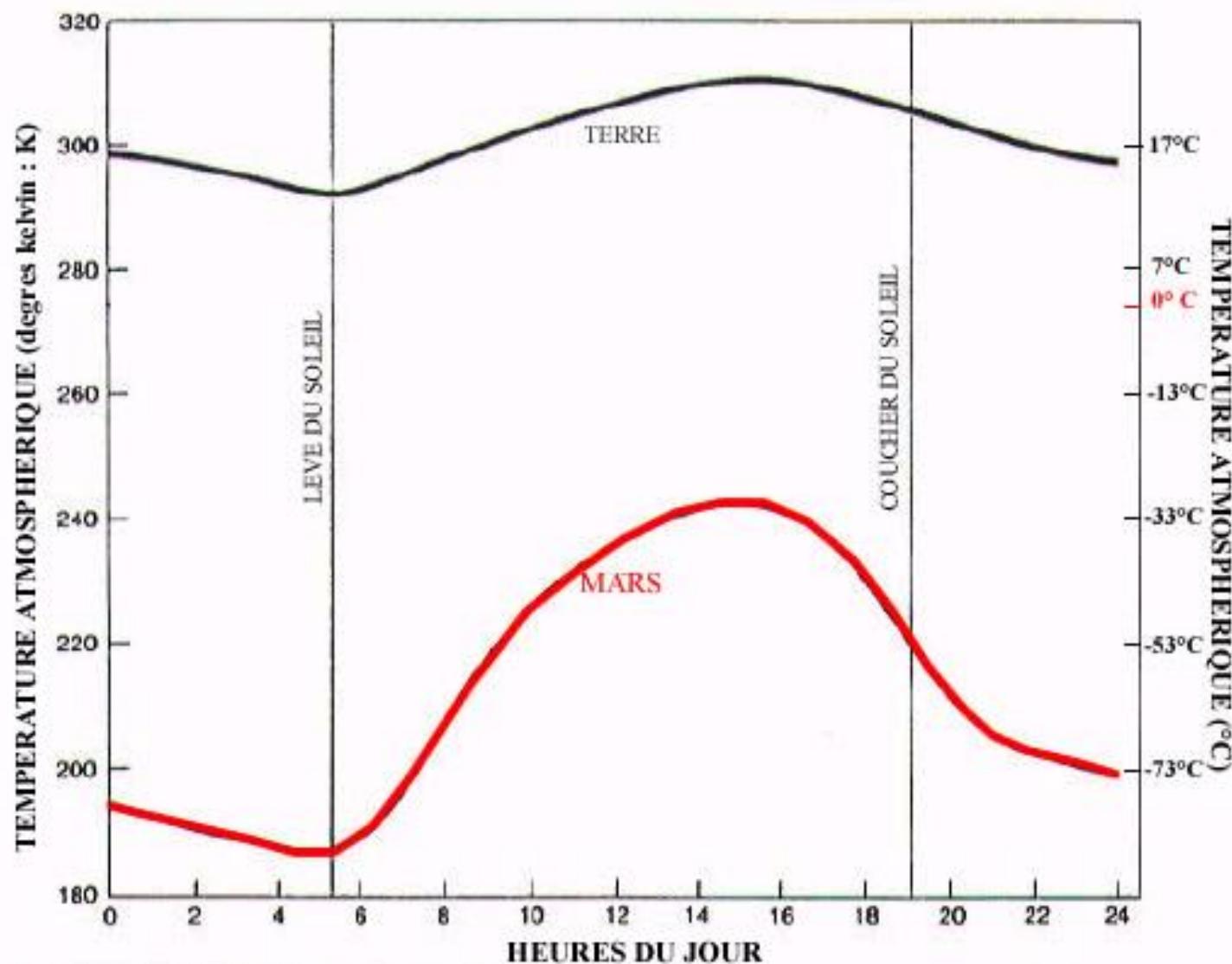
# Mars



# Mars

Dioxyde de carbone (CO <sub>2</sub> )	95,32	%
Azote (N <sub>2</sub> )	2,7	%
Argon (Ar)	1,6	%
Oxygène (O <sub>2</sub> )	0,13	%
Monoxyde de carbone (CO)	0,07	%
Eau (H <sub>2</sub> O)	0,03	%

# Mars

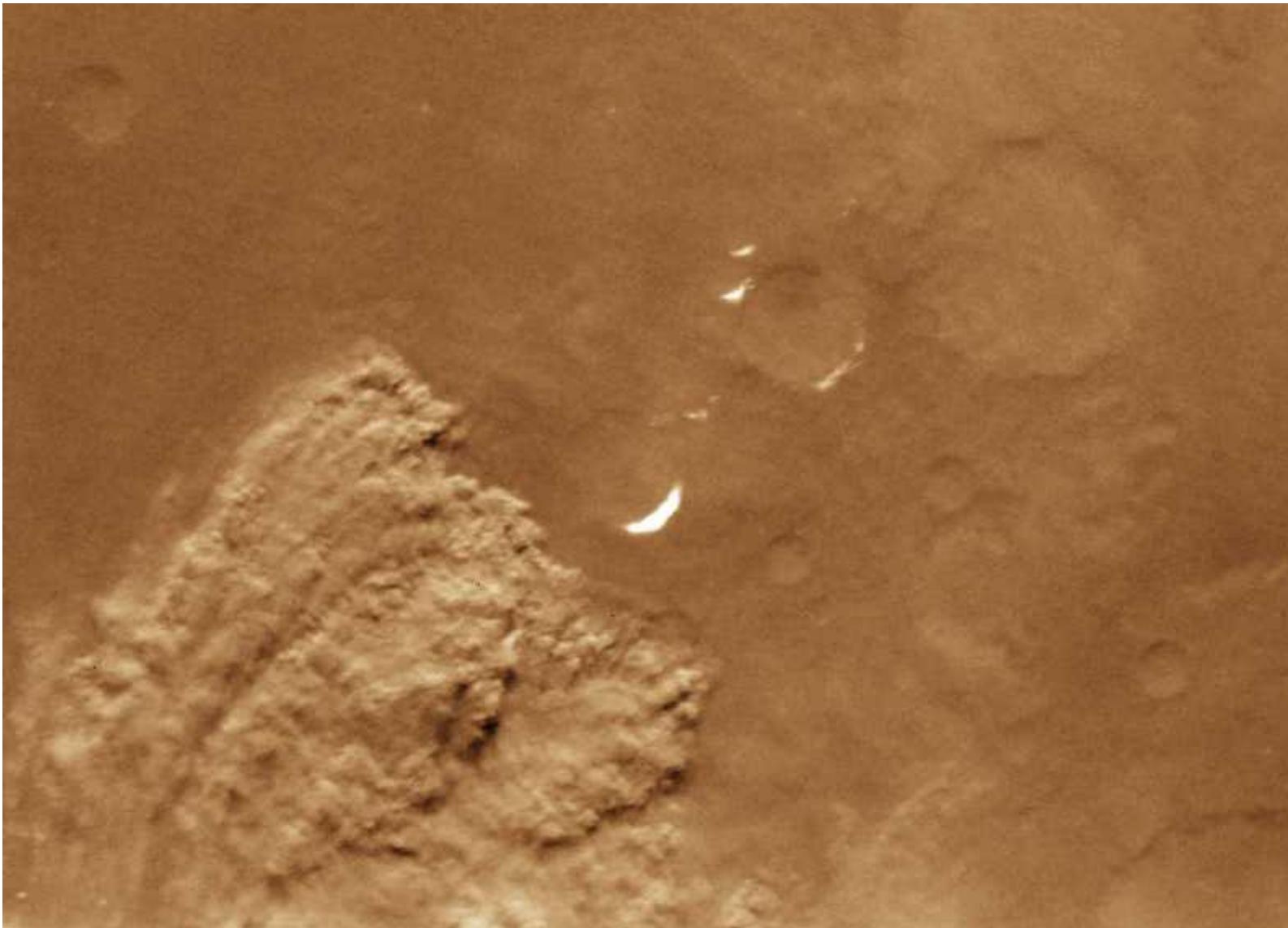


Température  
Sur le site de Viking 1

# Mars

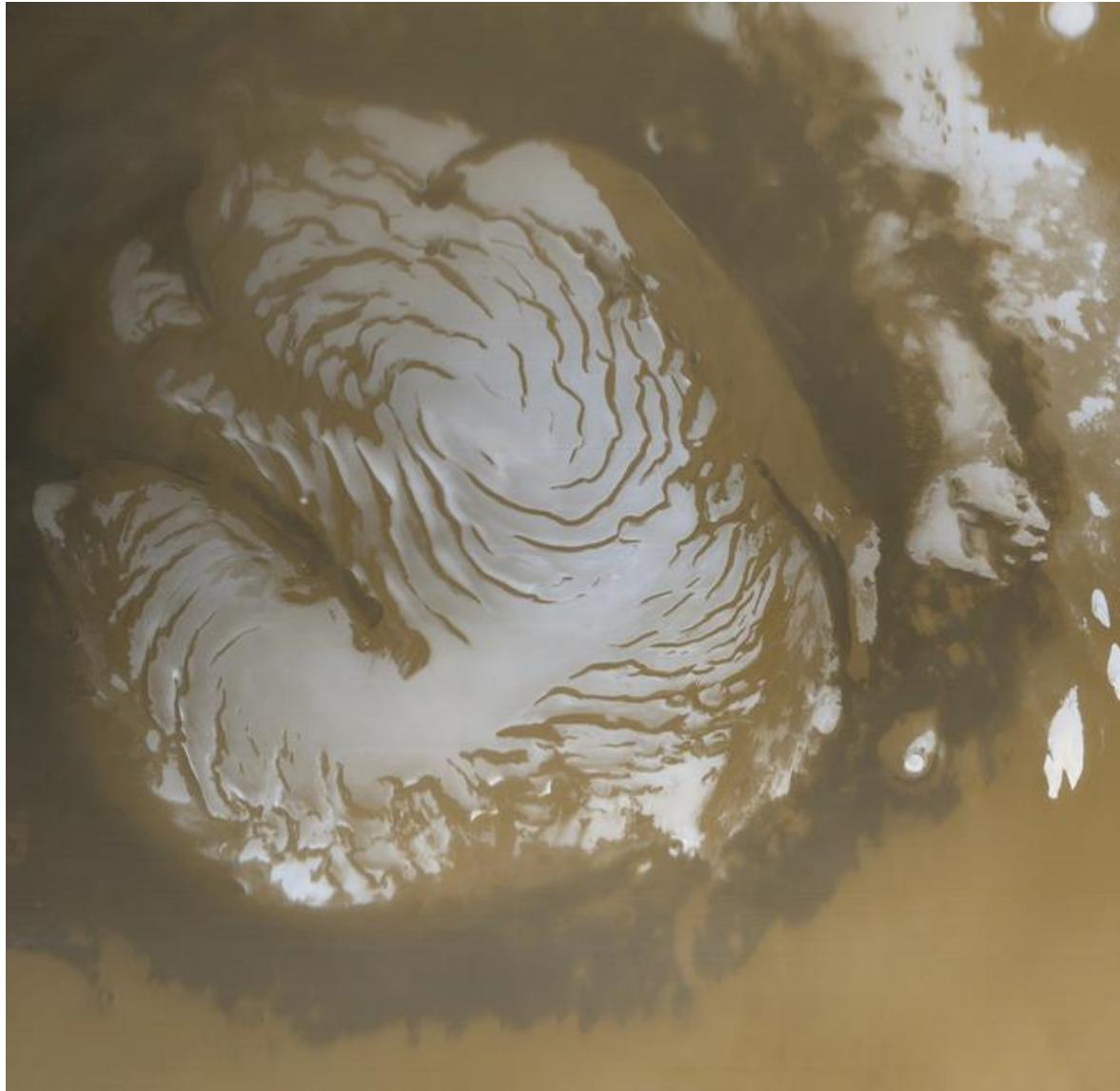
A l'équateur  
en été  
la température  
varie de  
 $+20^{\circ}\text{C}$  à  $-80^{\circ}\text{C}$

# Mars



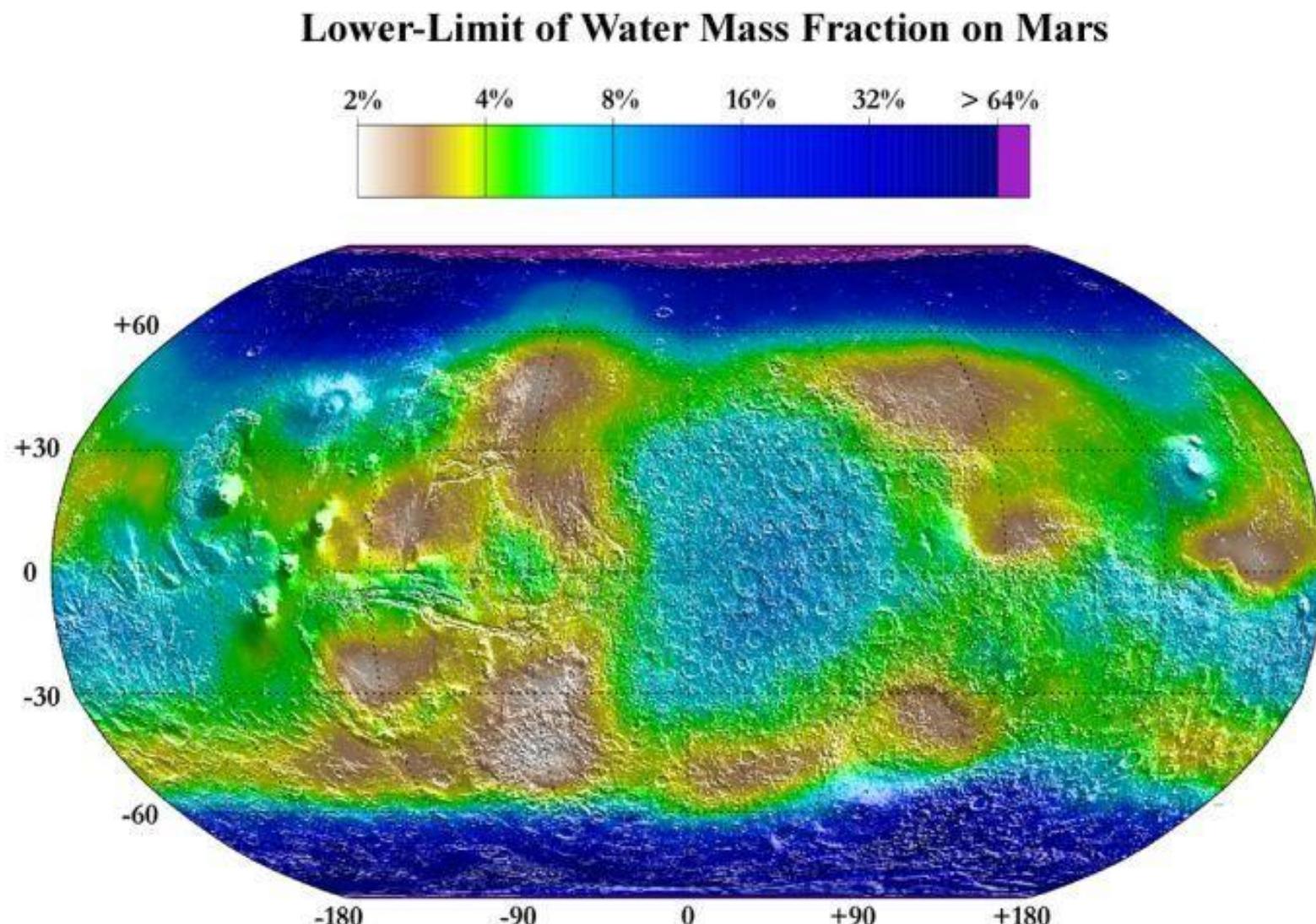
Tempêtes de poussières  
Vent modelant la surface

# L'eau sur Mars



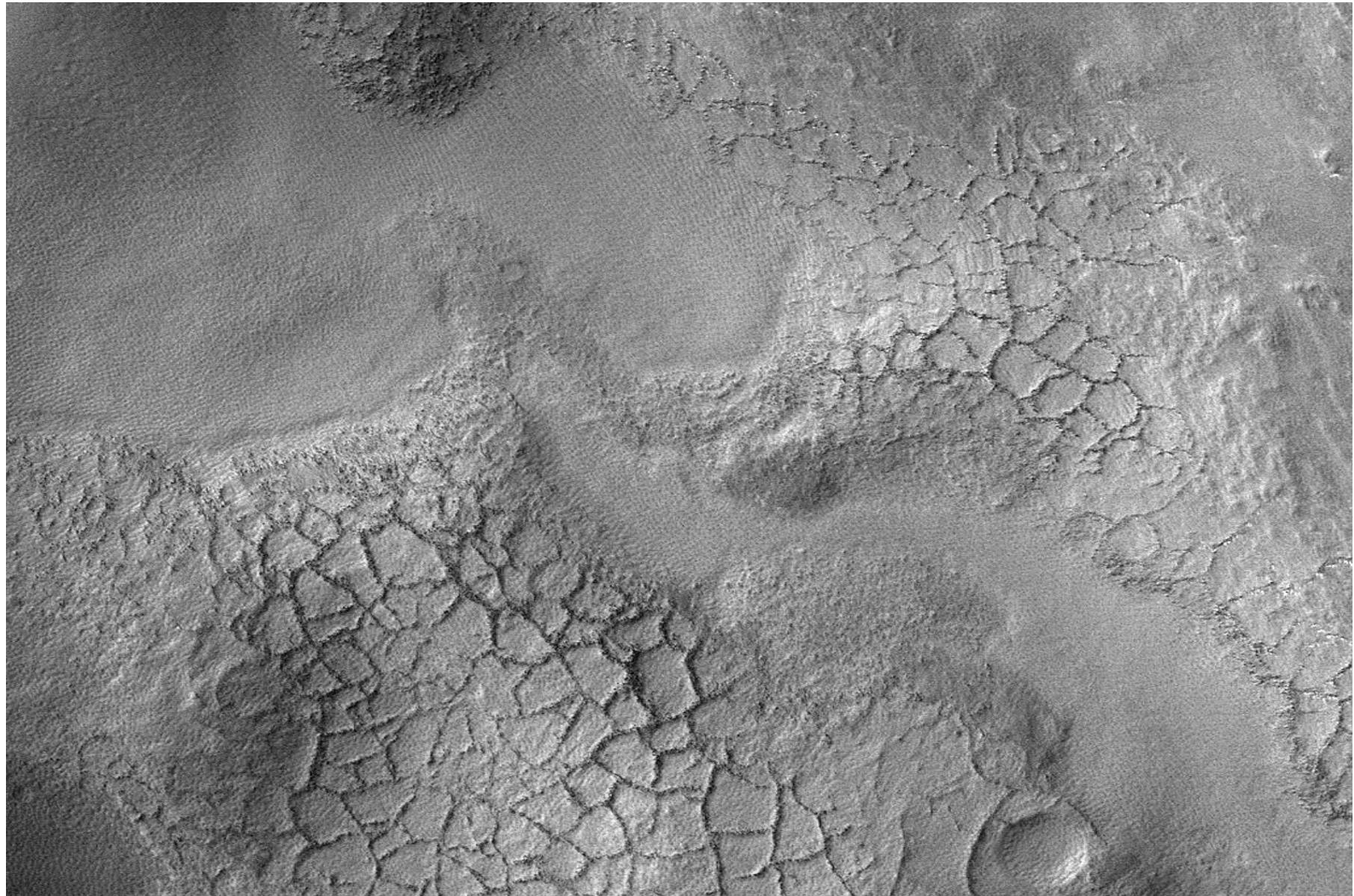
Calotte polaire  
Neige carbonique  $CO_2$  avec de l'eau

# L'eau sur Mars



Beaucoup d'eau dans le sol superficiel de Mars ( <1m )

# Eau liquide ?



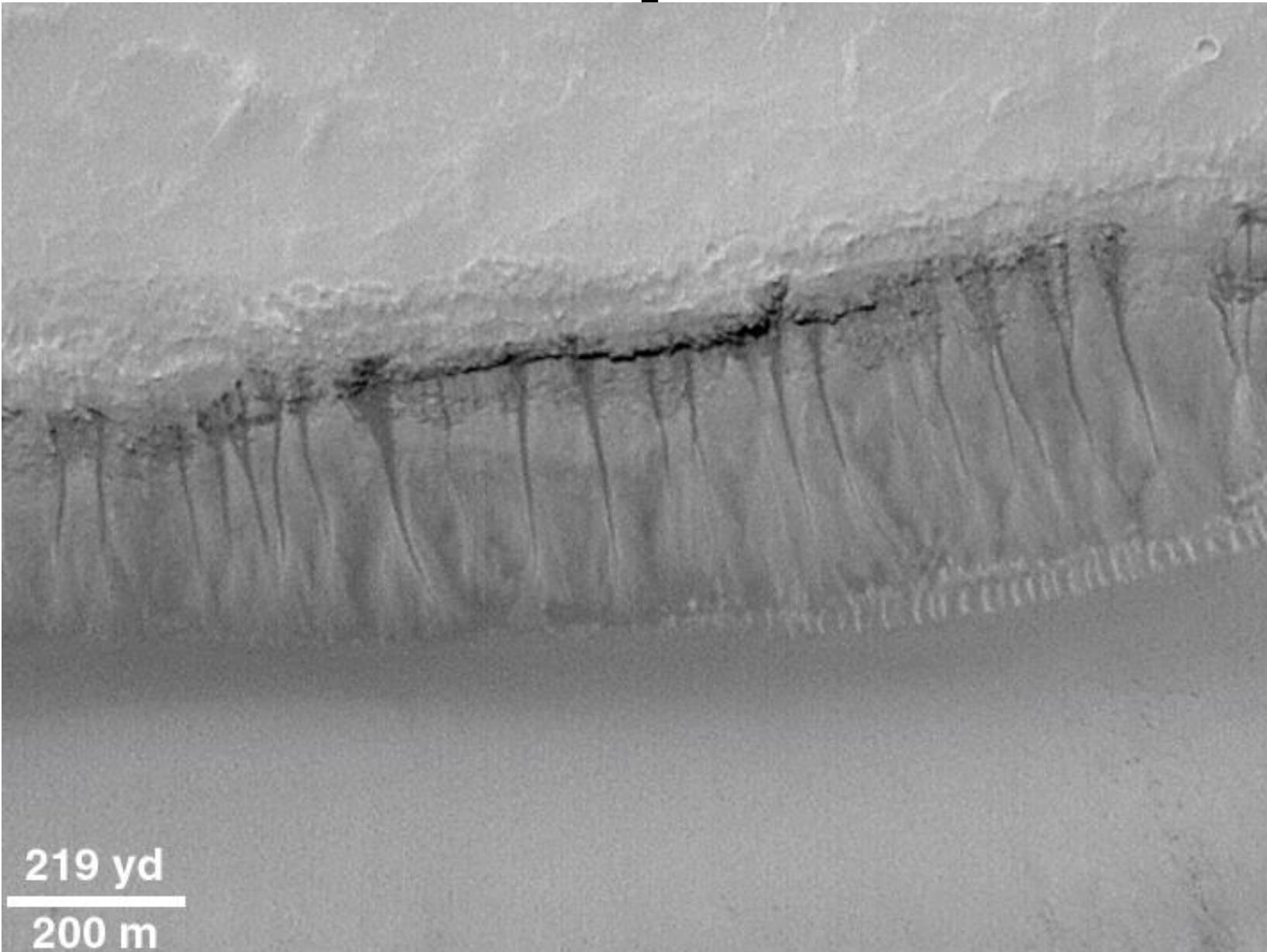
Sols polygonaux

# Eau liquide ?



Ecoulements

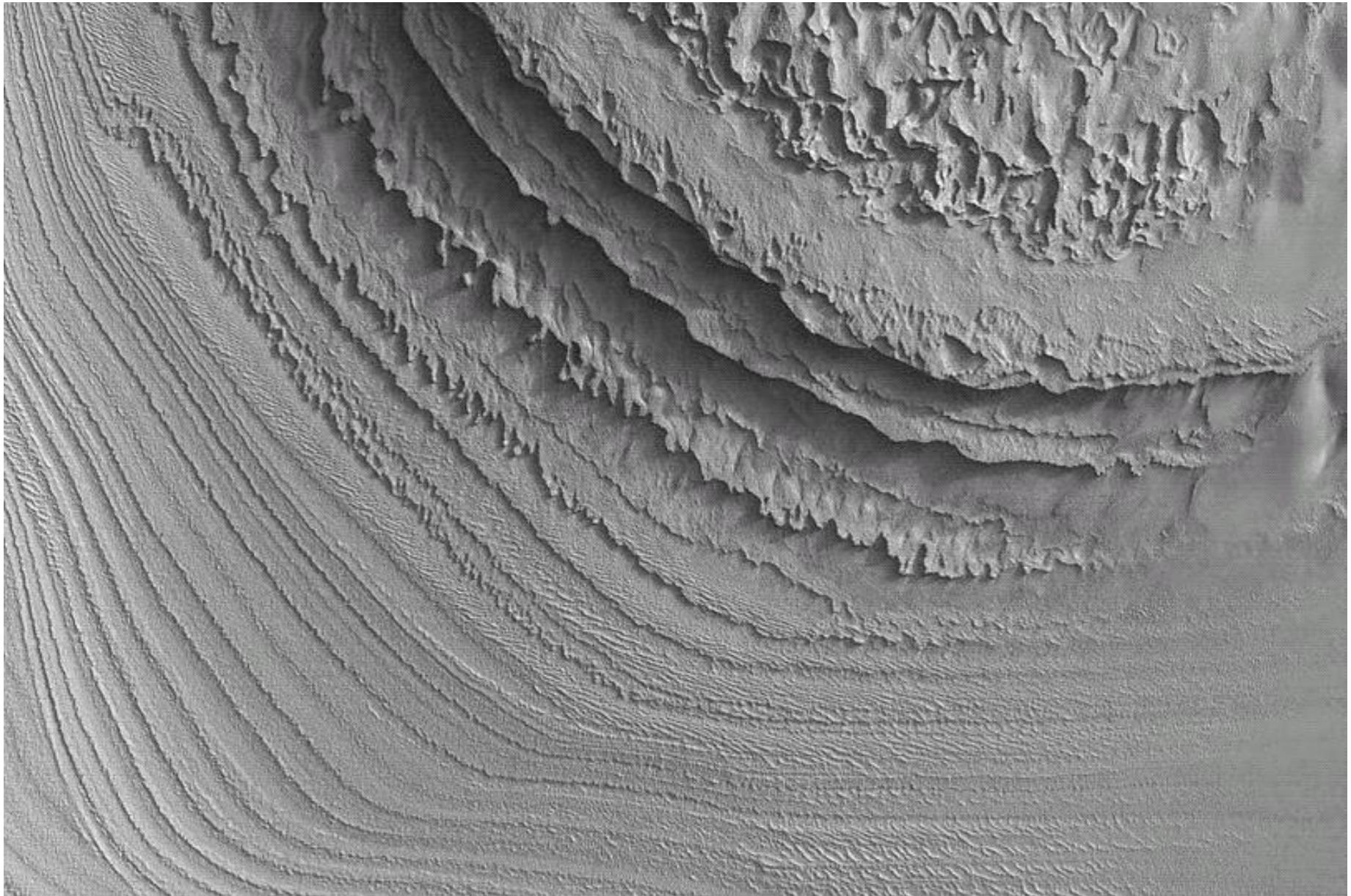
# Eau liquide ?



219 yd  
—  
200 m

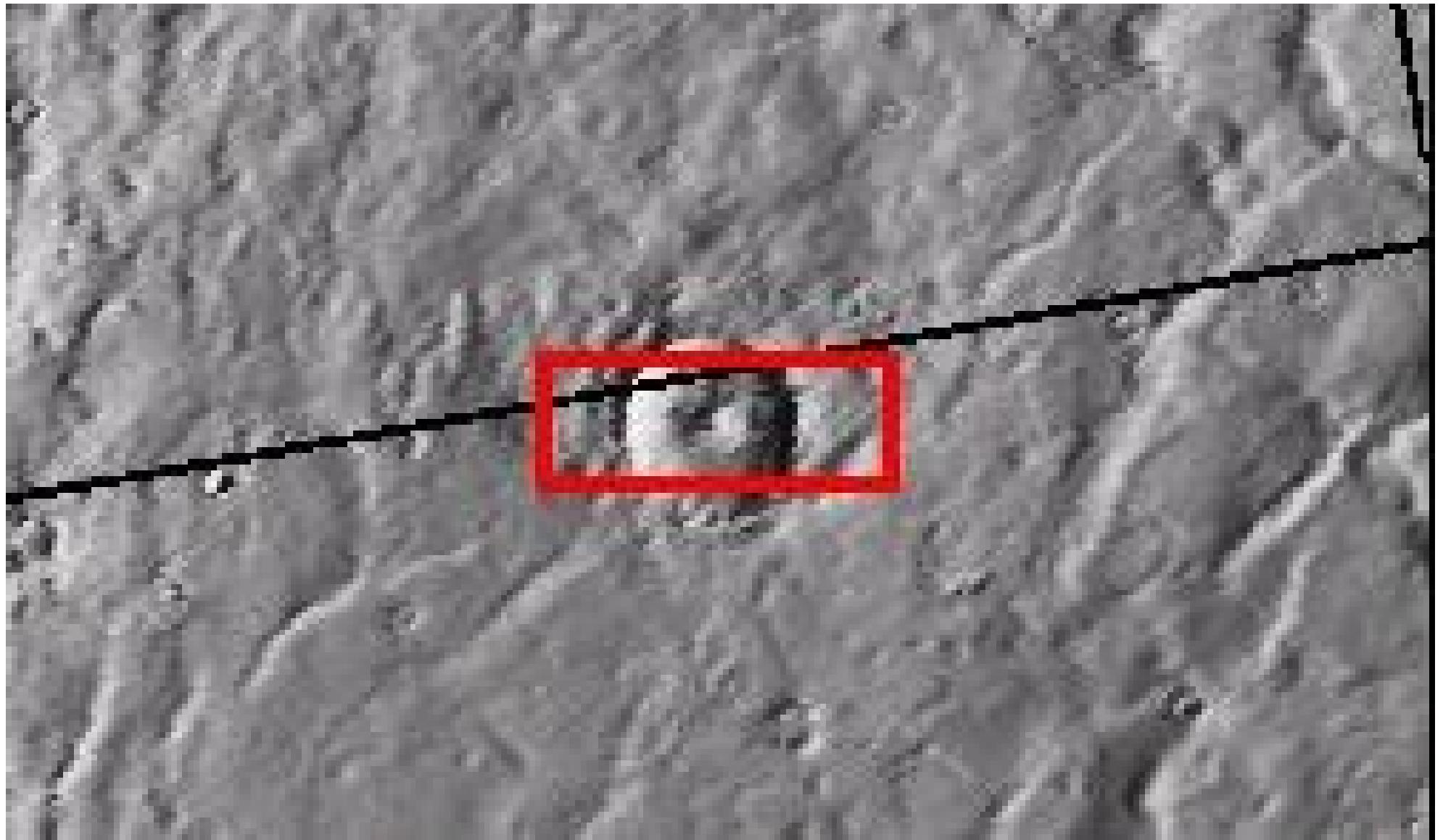
Ecoulements

# Eau liquide ?



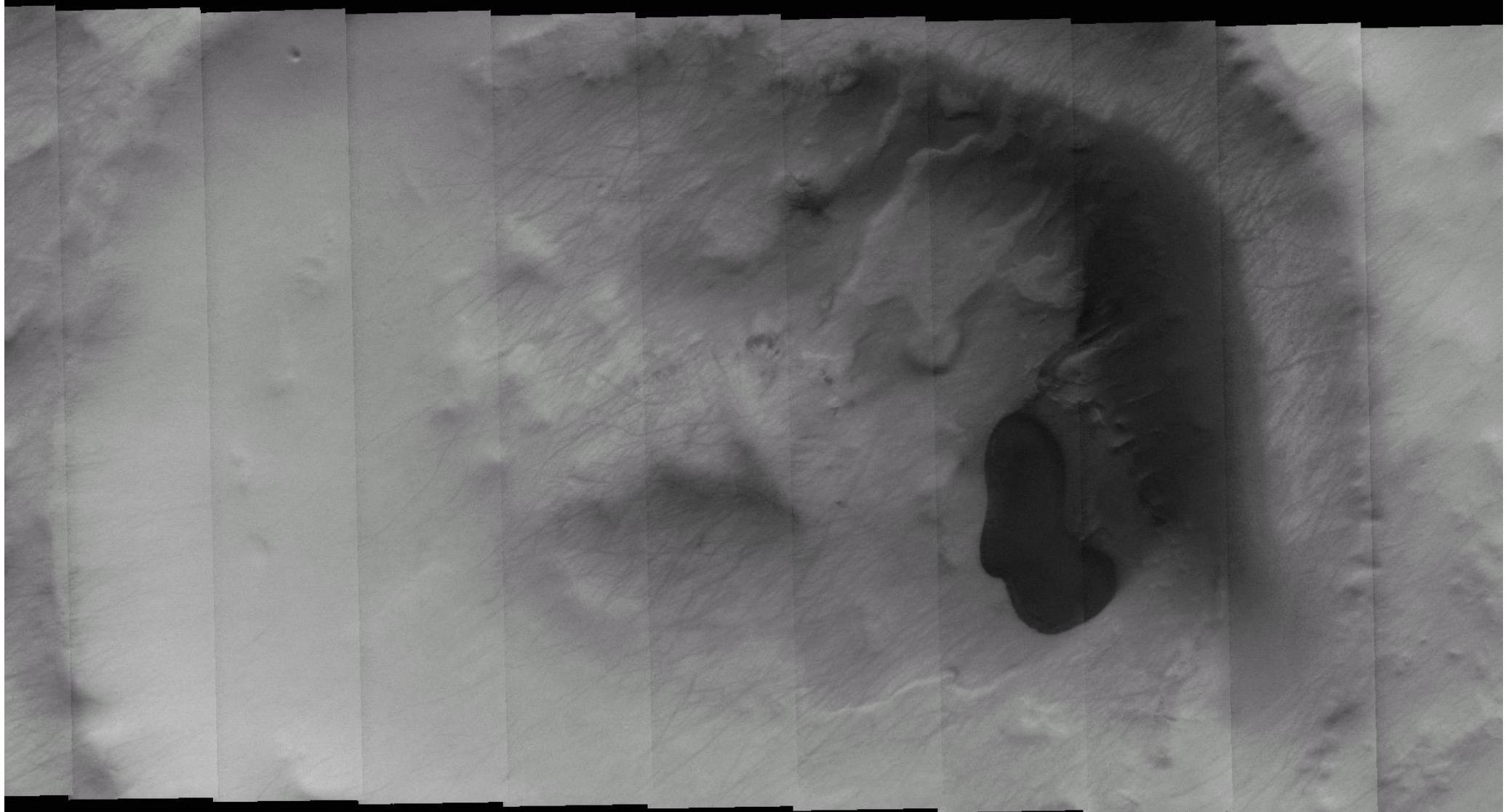
Dépôts sédimentaires

# Eau liquide ?



Mars Odyssey - 22 avril 2004

# Eau liquide ?



Lac ?

# Eau liquide ?



# Lac ?

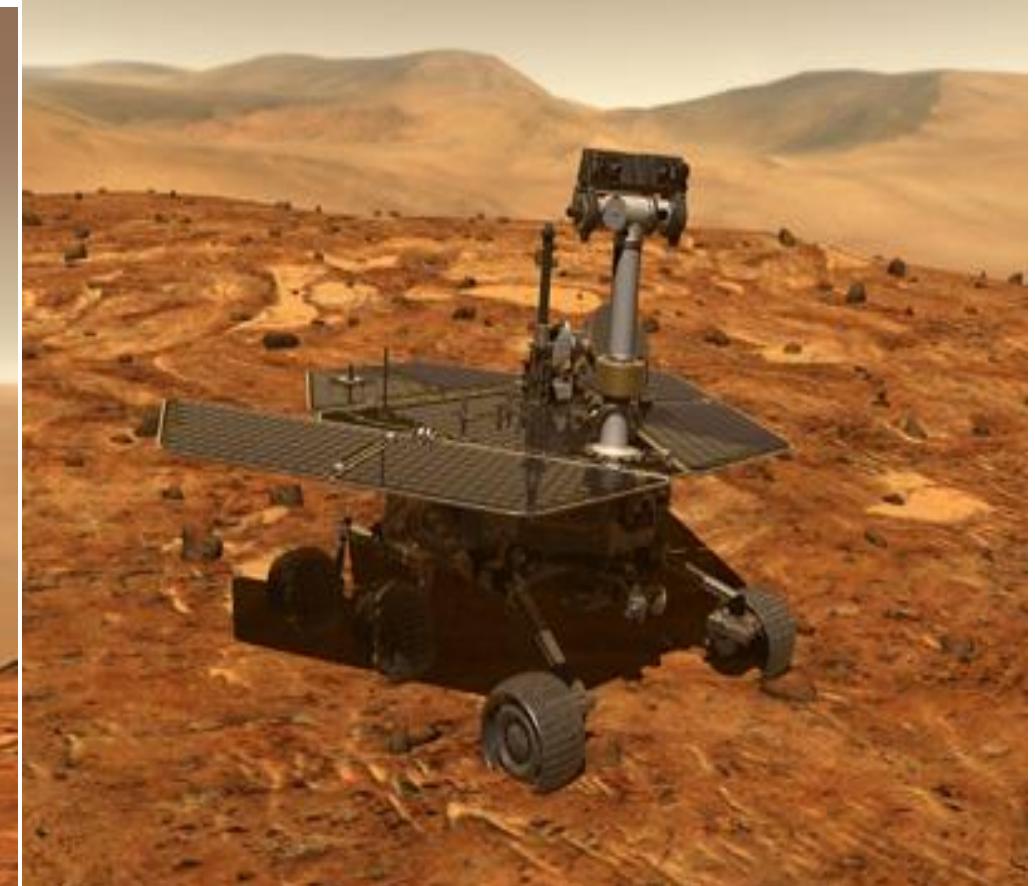
# La vie sur Mars

?

# Mars



Spirit



Opportunity

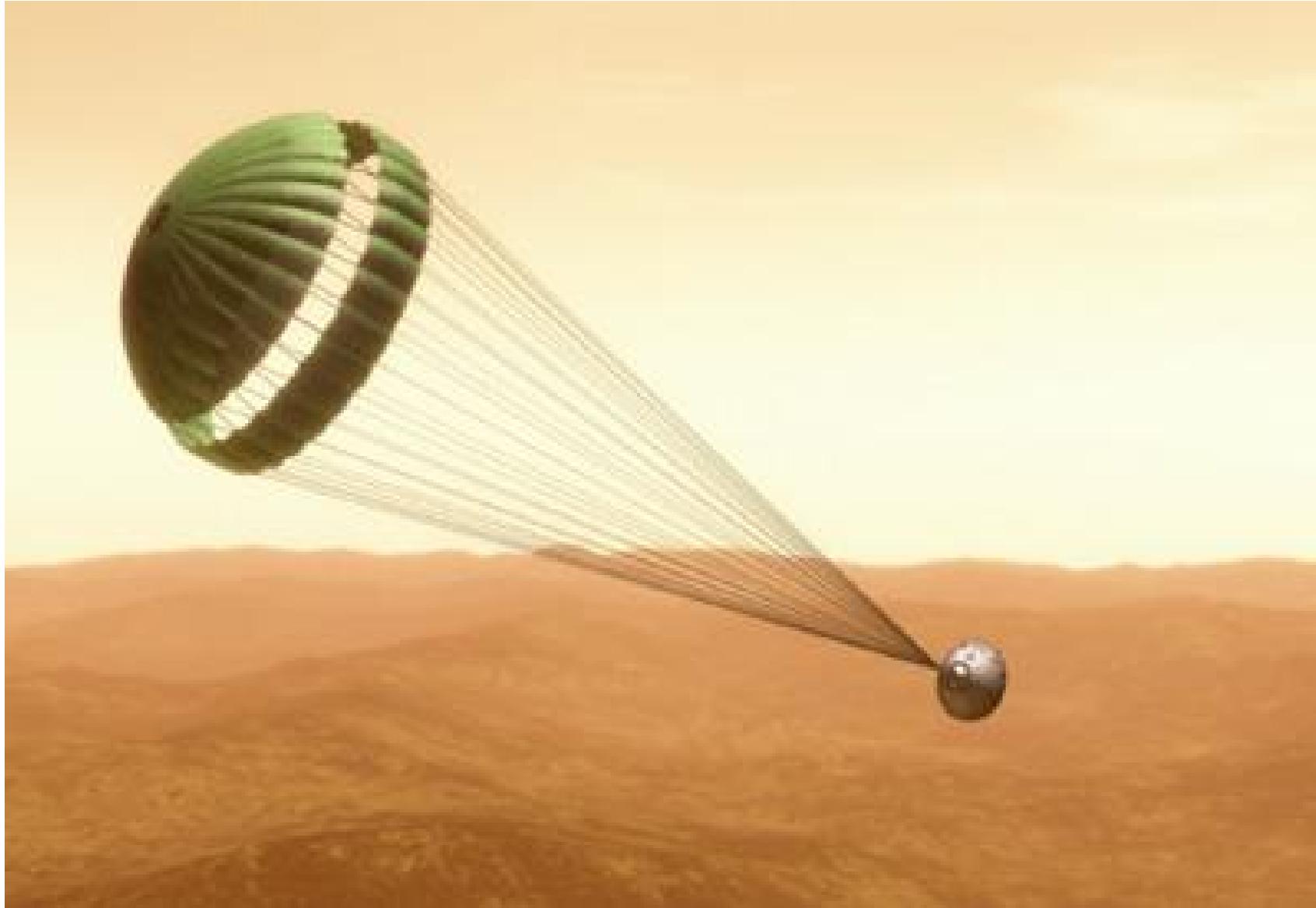
2 sondes américaines

# Mars



2 sondes américaines

# Mars



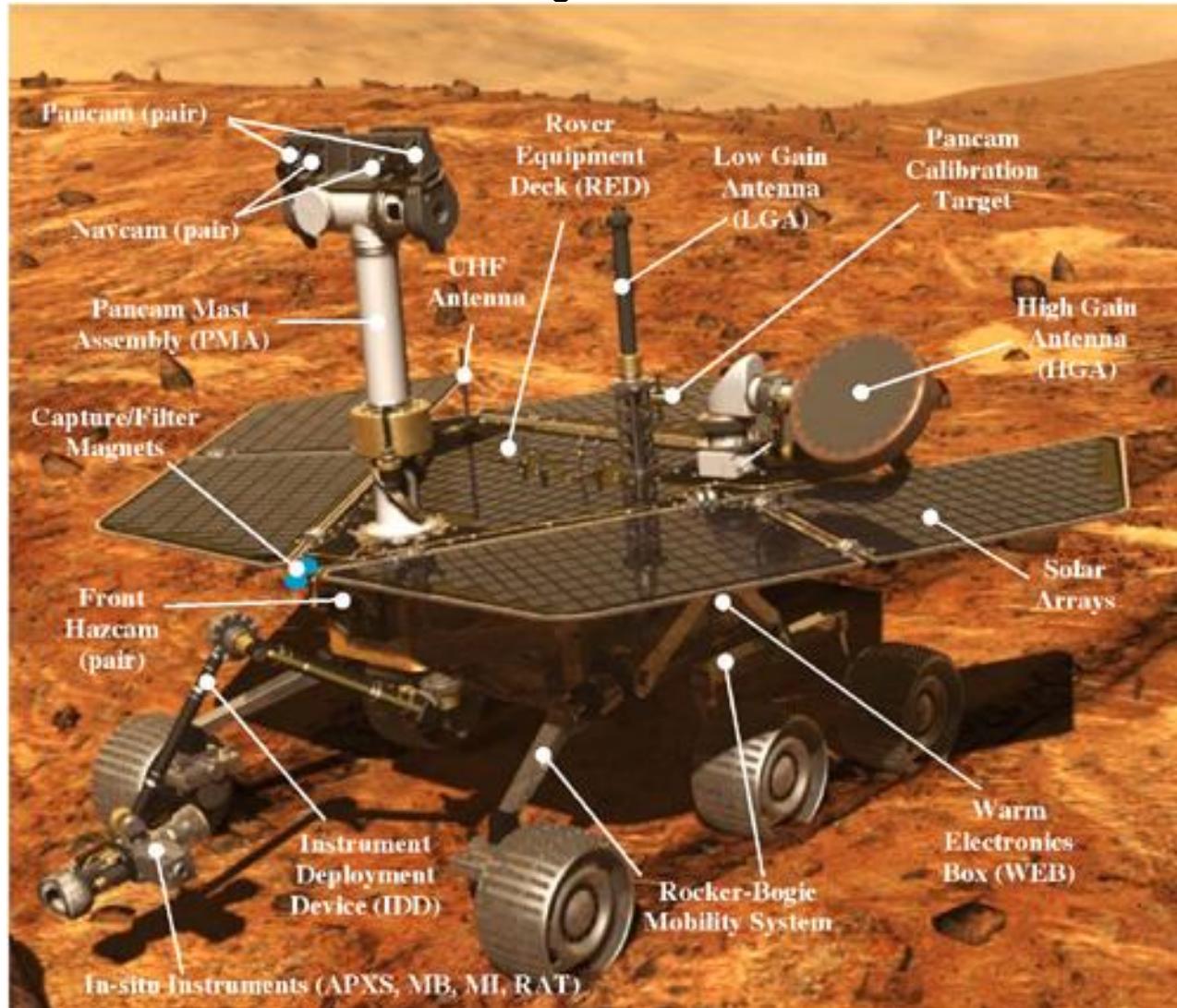
2 sondes américaines

# Mars



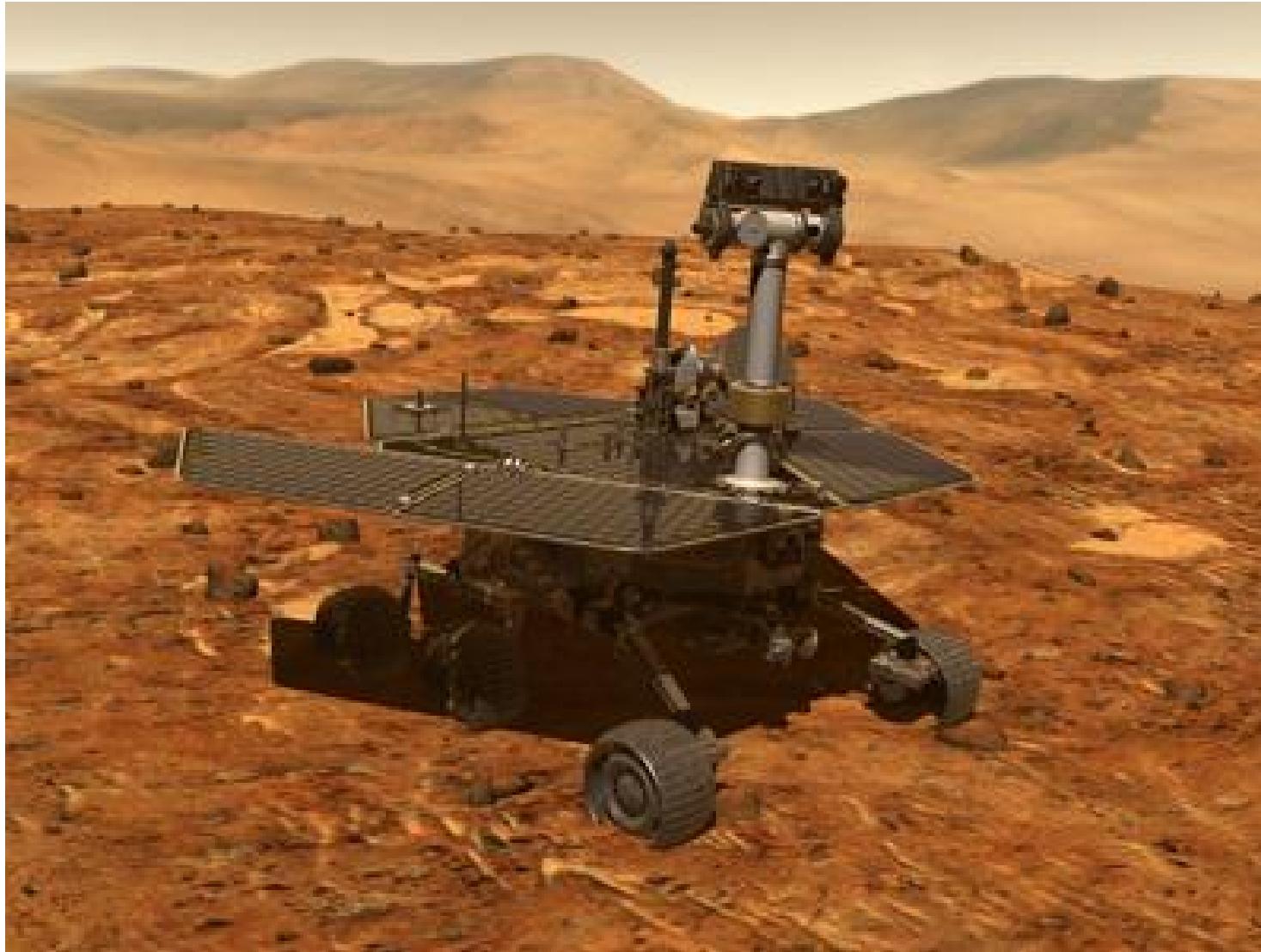
2 sondes américaines

# Spirit



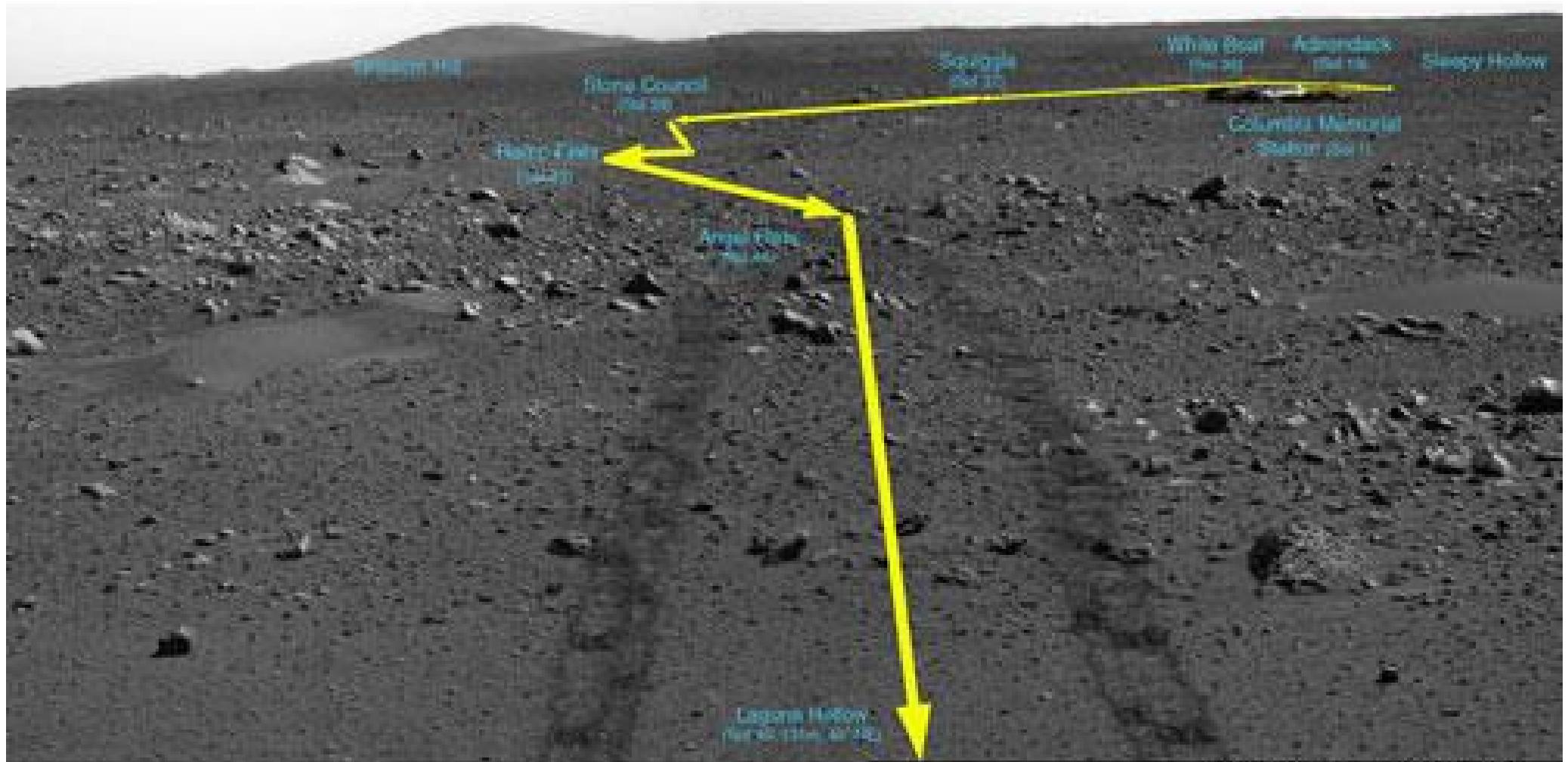
Arrivée sur Mars le 4 janvier 2004  
Active jusqu'au 25 mai 2011

# Opportunity



Arrivée sur Mars le 25 janvier 2004  
Active jusqu'au 10 juin 2018

# Mars



Spirit Rover Traverse - Laguna Hollow (Sol: 45)  
Mapping and GIG - Laramie, CO

# Spirit

# Spirit

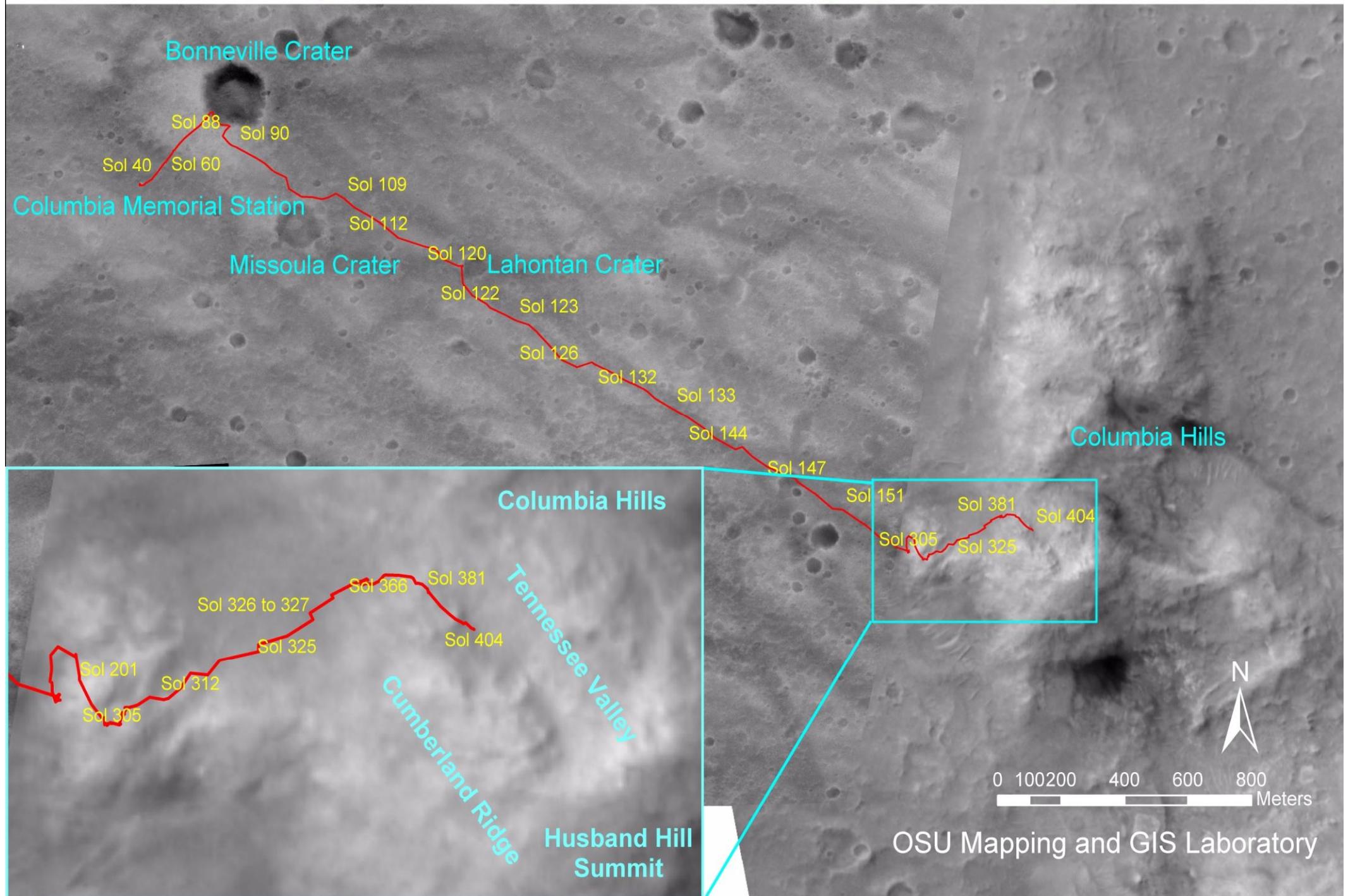
## MER

### Spirit Navcam

sols: 365, 366, 367,  
381, 382, 386, 388, 390

animated GIF

# Spirit Rover Traverse Map (Sol 404)

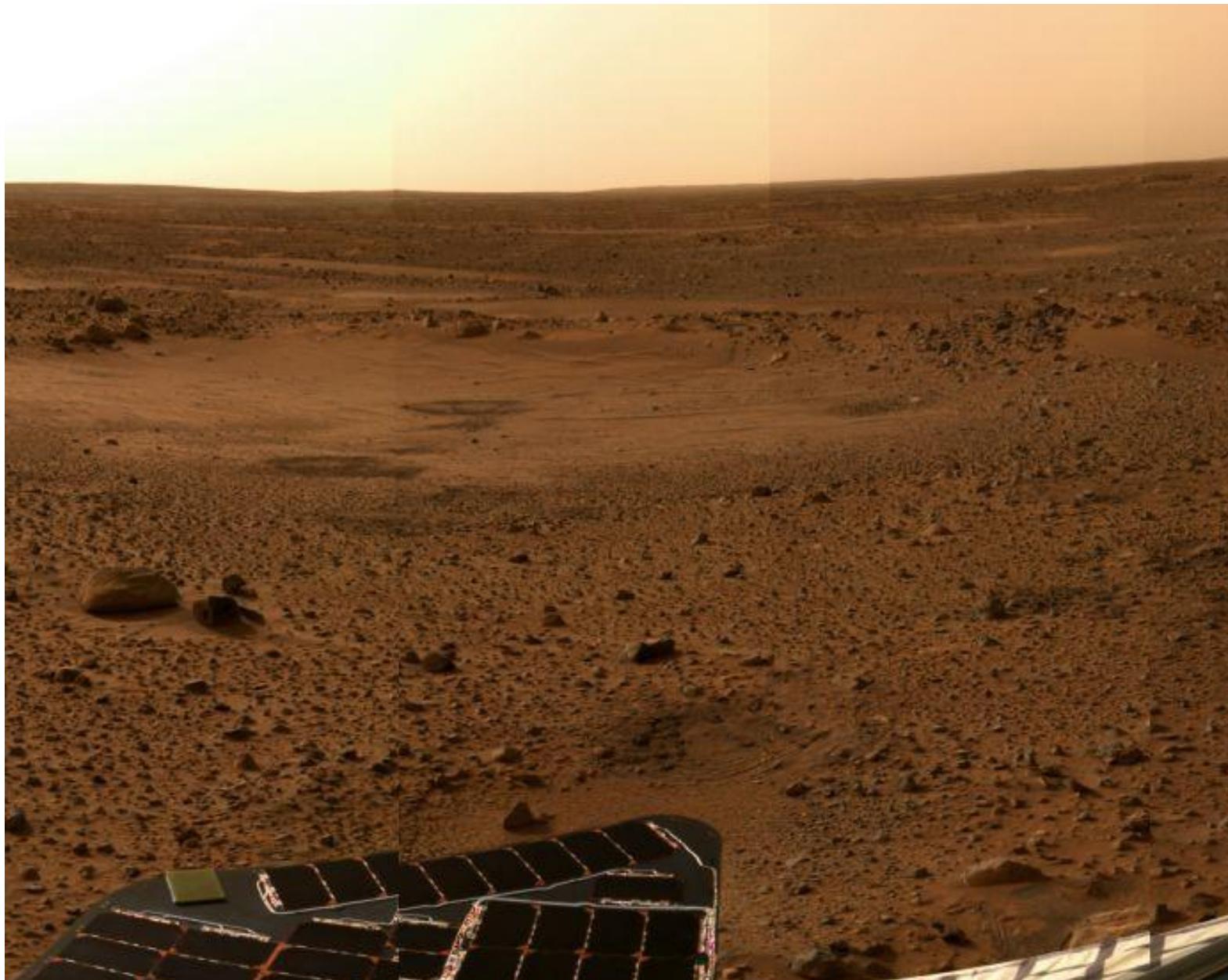


# Mars



# Spirit

# Mars



# Spirit

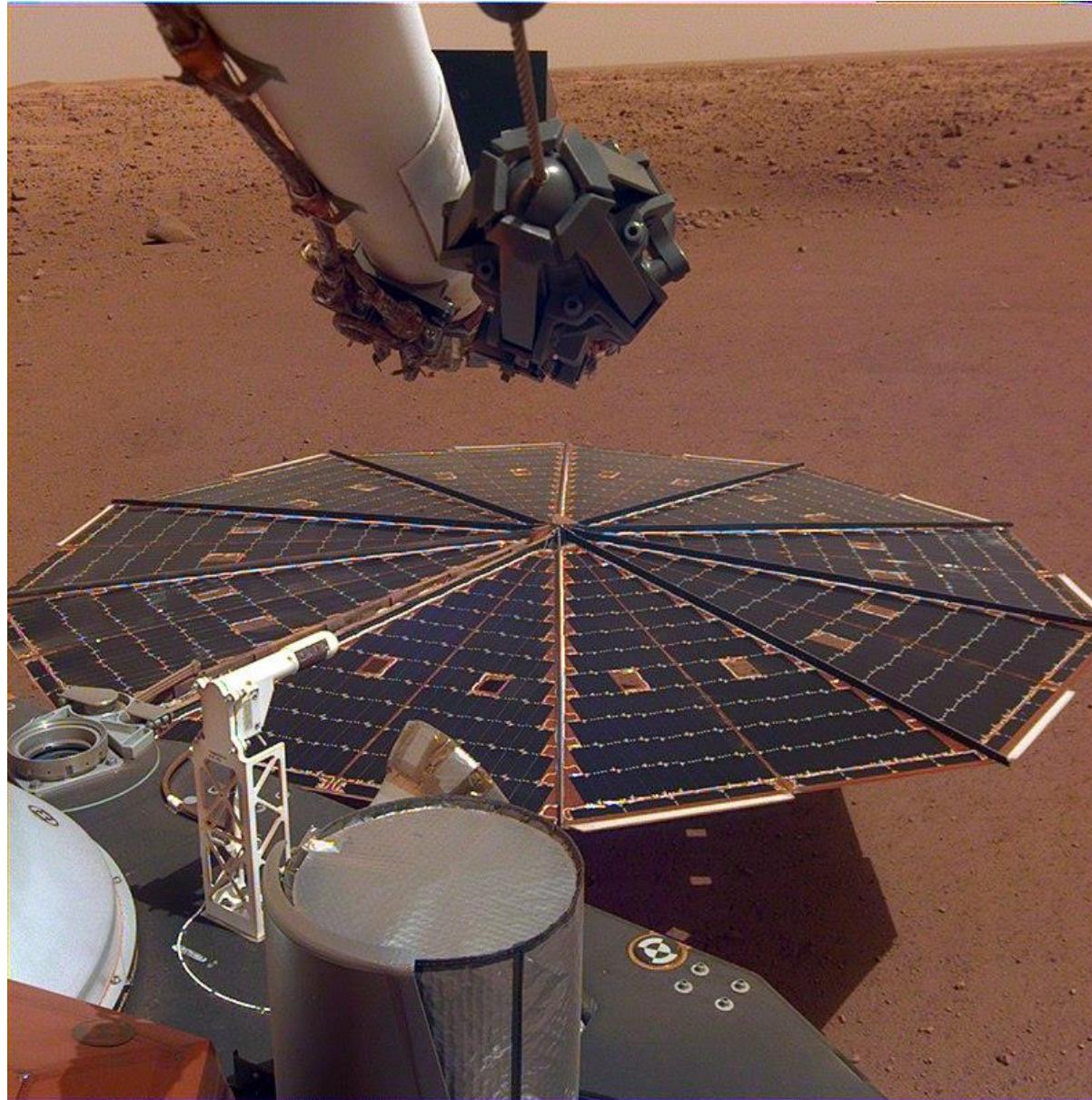
# Mars



# Mars

<https://mars.nasa.gov/mer>

# Mars

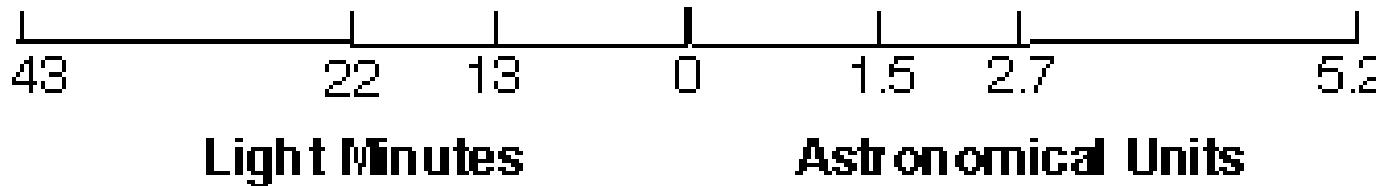
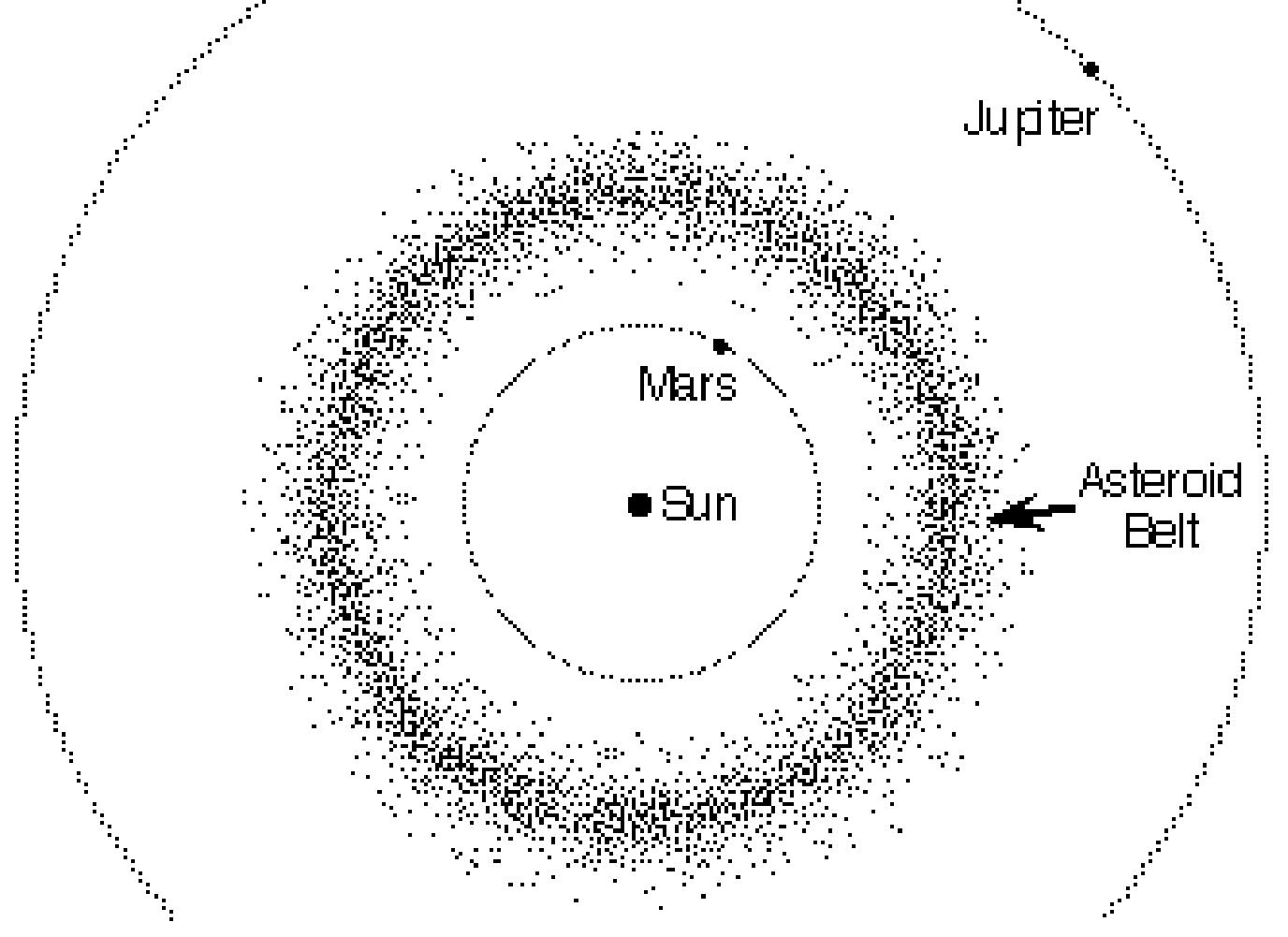


Insight - Arrivée le 26 novembre 2018

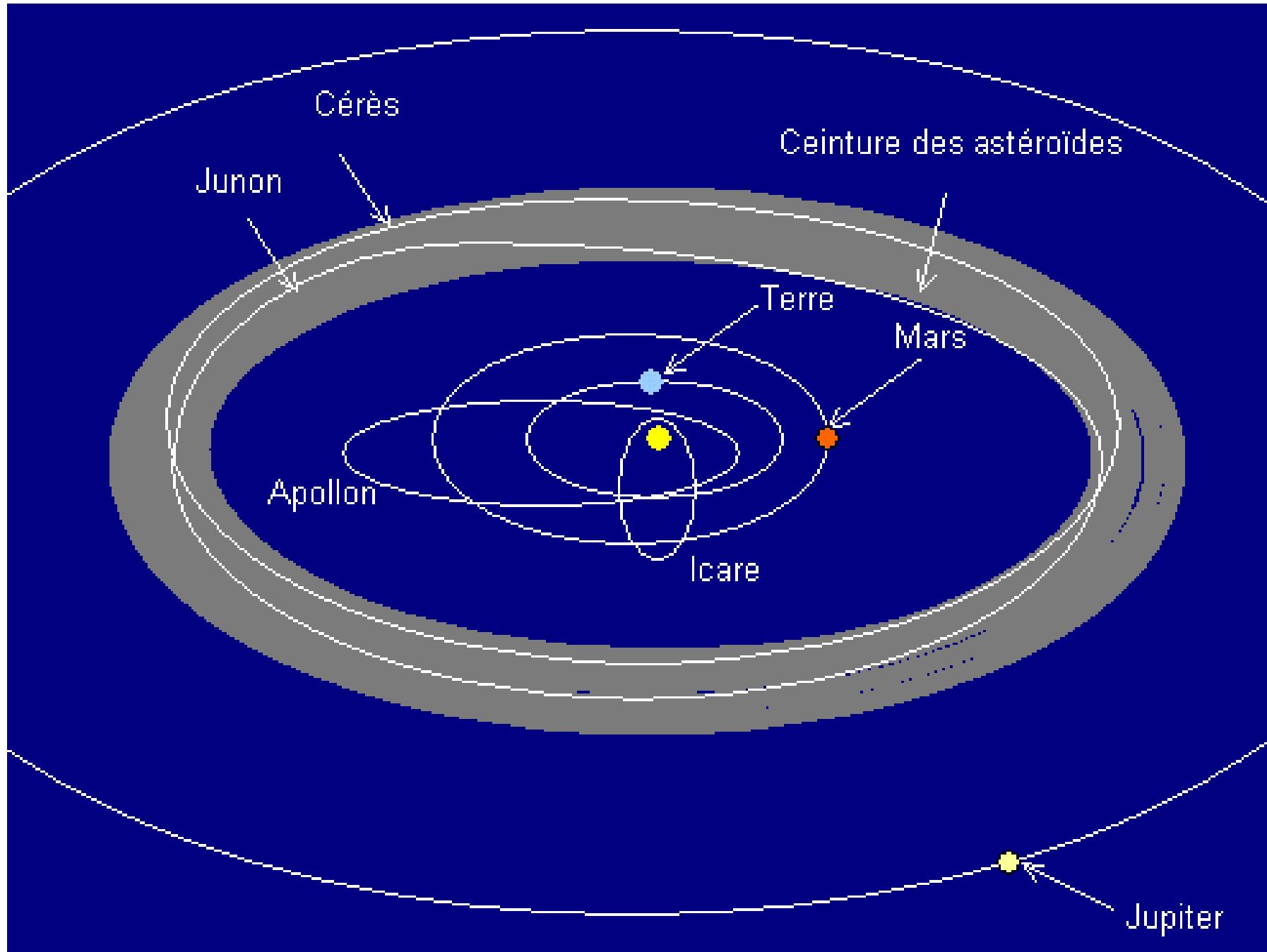
# Les astéroïdes

The Main Asteroid Belt

(Orbits drawn approximately to scale)



# Les astéroïdes



# Les astéroïdes

Cérès	1025 km
Pallas	608 km
Junon	195 km
Vesta	530 km
Eunomia	260 km

# Astéroïdes



**Mathilde vu par la sonde Near  
Taille 59 x 47 km**

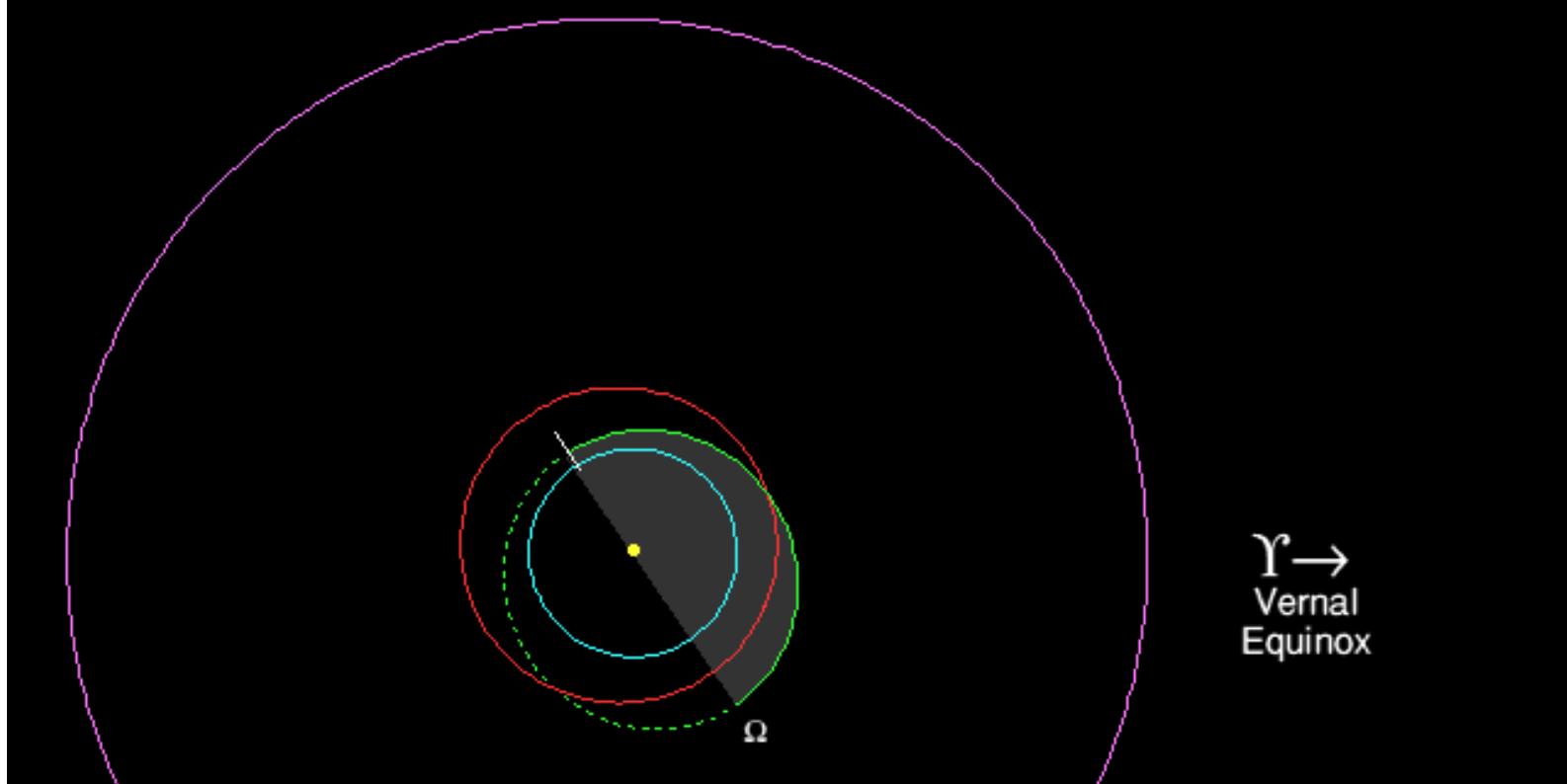
# Astéroïdes

## (433) Eros

Ecliptic View Along The Asc.-Desc. Nodal Line



North Ecliptic Polar View



EROS destination de la sonde NEAR

# Astéroïdes



Taille 13 x 13 x 33 km

# Astéroïdes

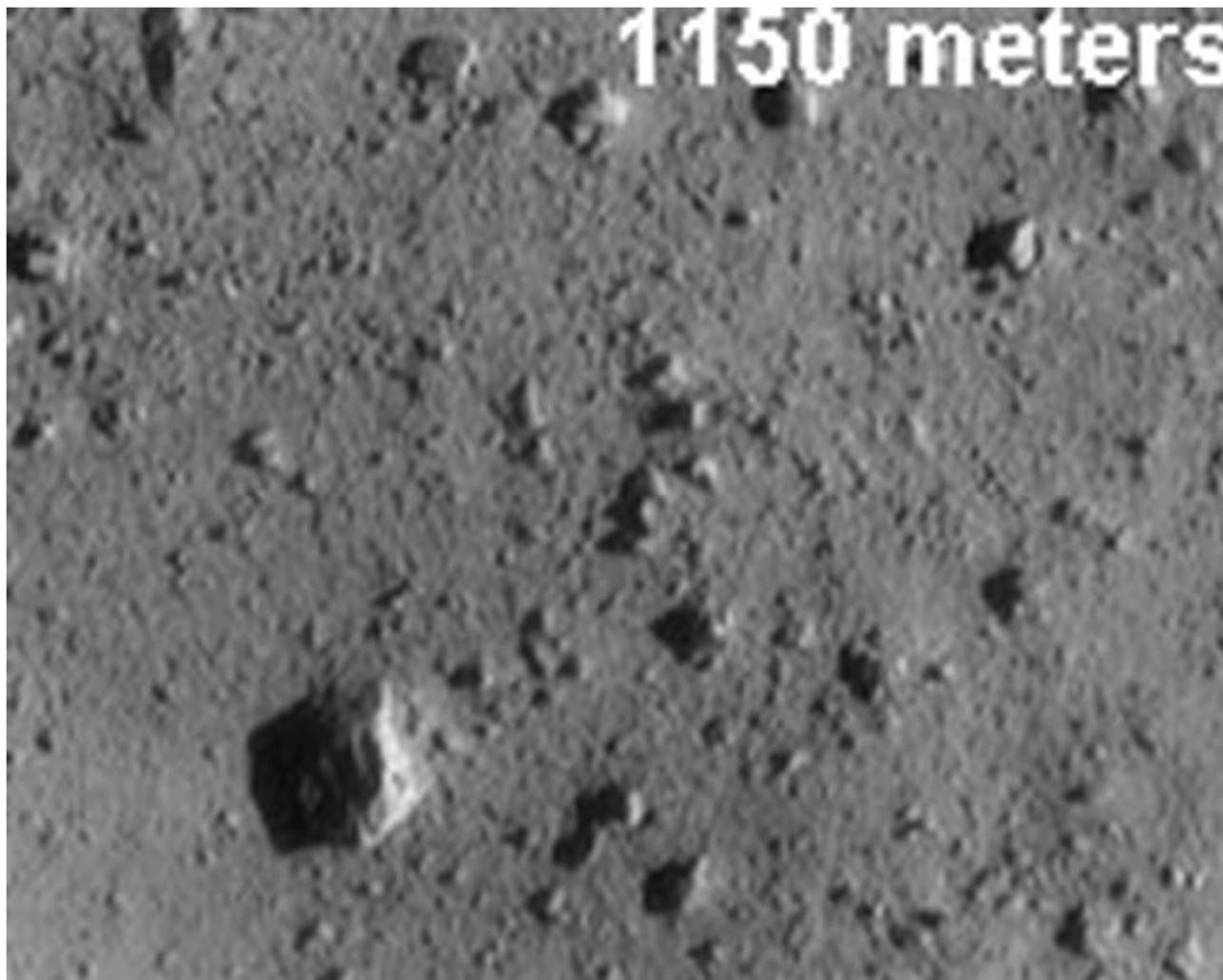
NEAR – 433 Eros



Feb 12 2000 00:58:00

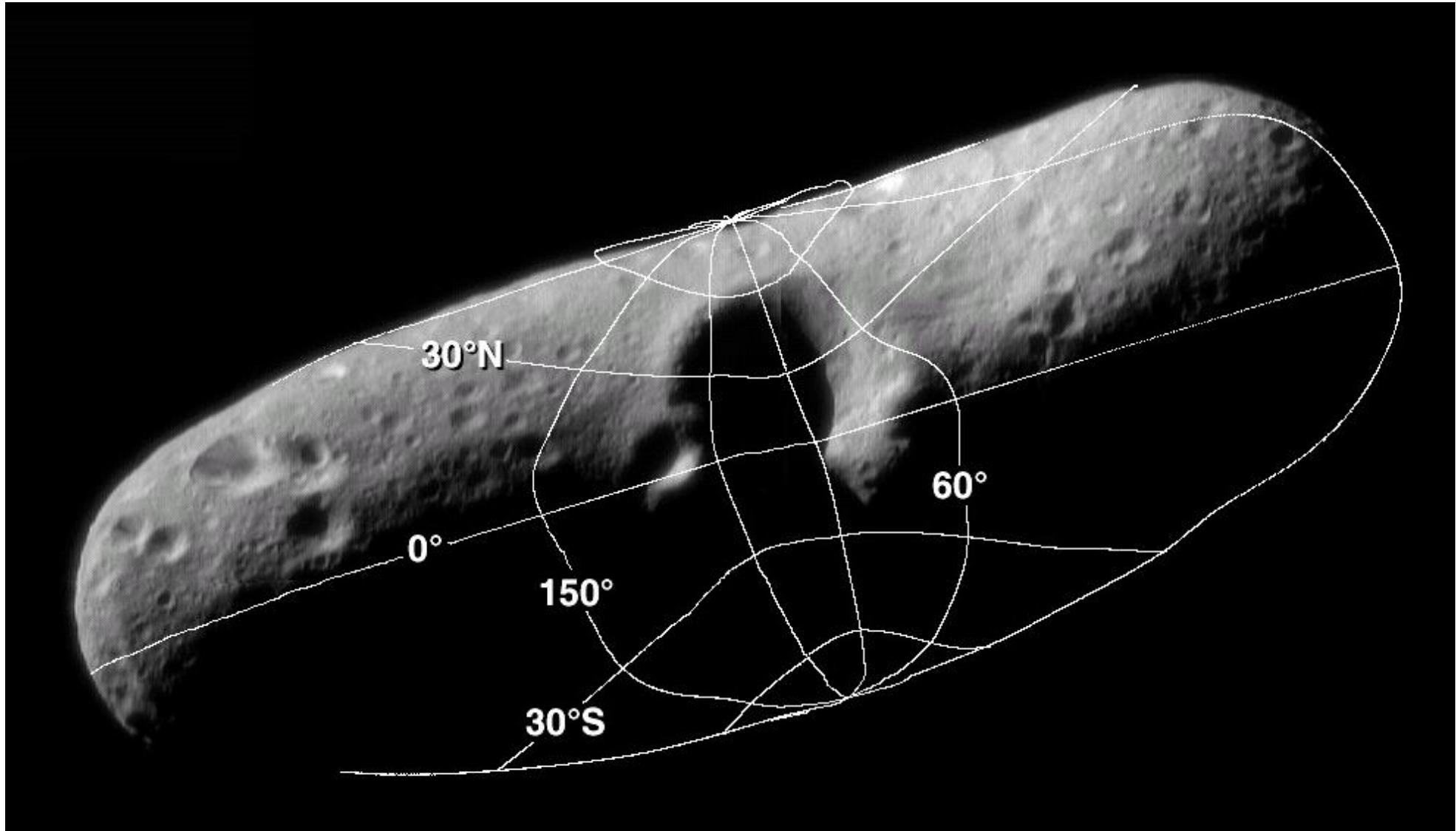
L'astéroïde EROS vu par  
la sonde NEAR

# Astéroïdes



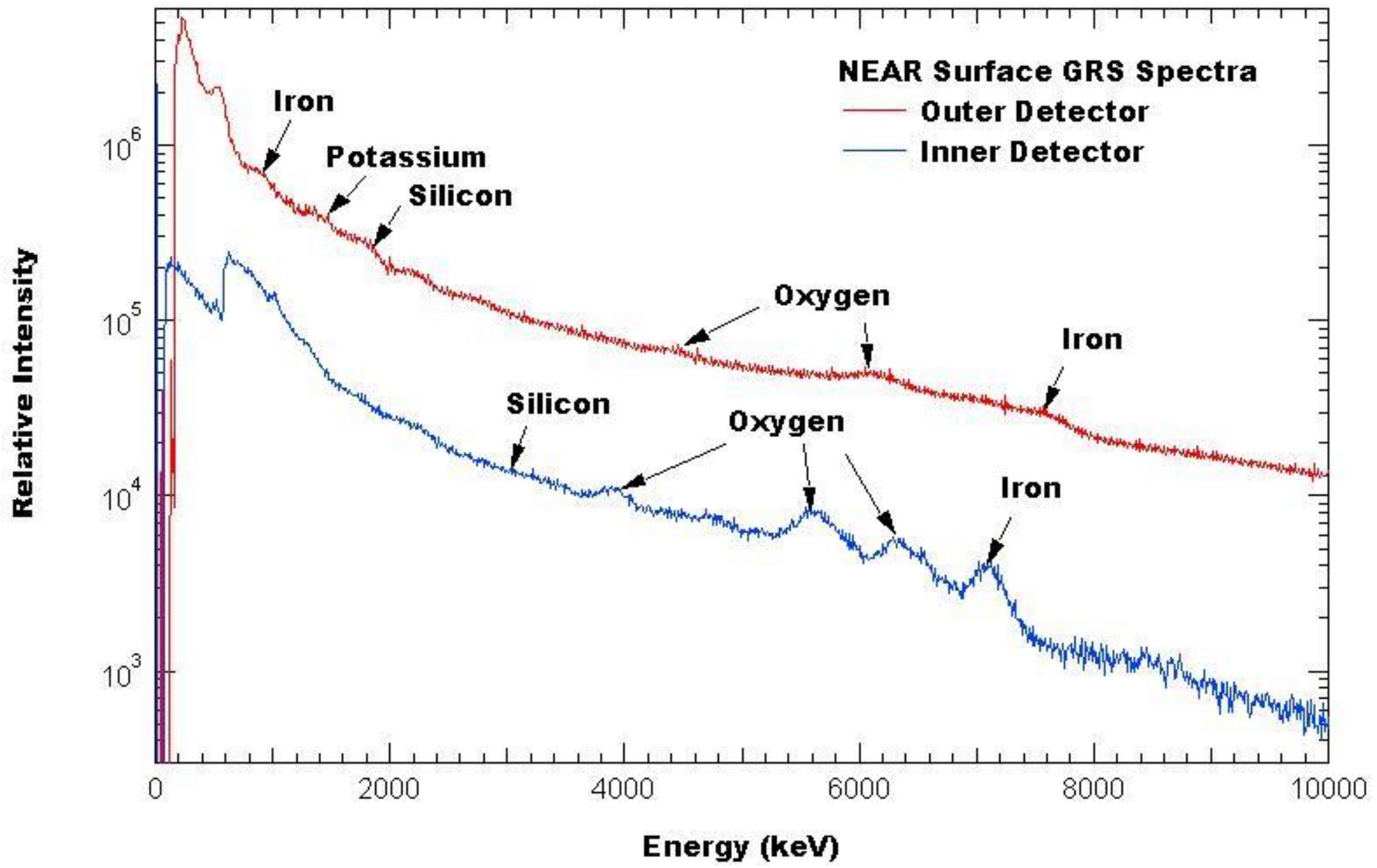
Atterrissage de la sonde NEAR sur  
l'astéroïde EROS

# Astéroïdes



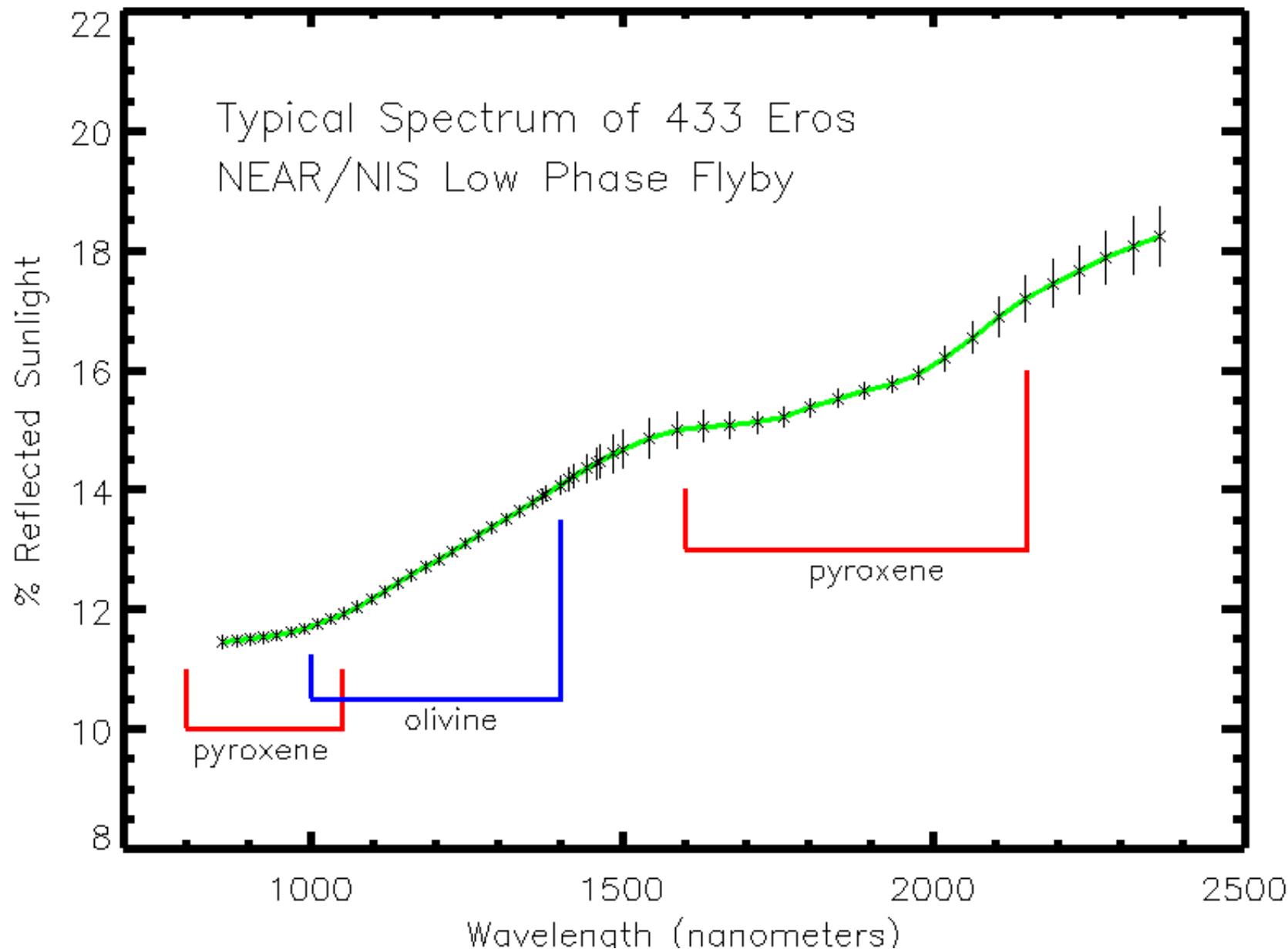
Eros cartographié

# Astéroïdes



## Nature du sol

# Astéroïdes



Nature du sol

# Astéroïdes



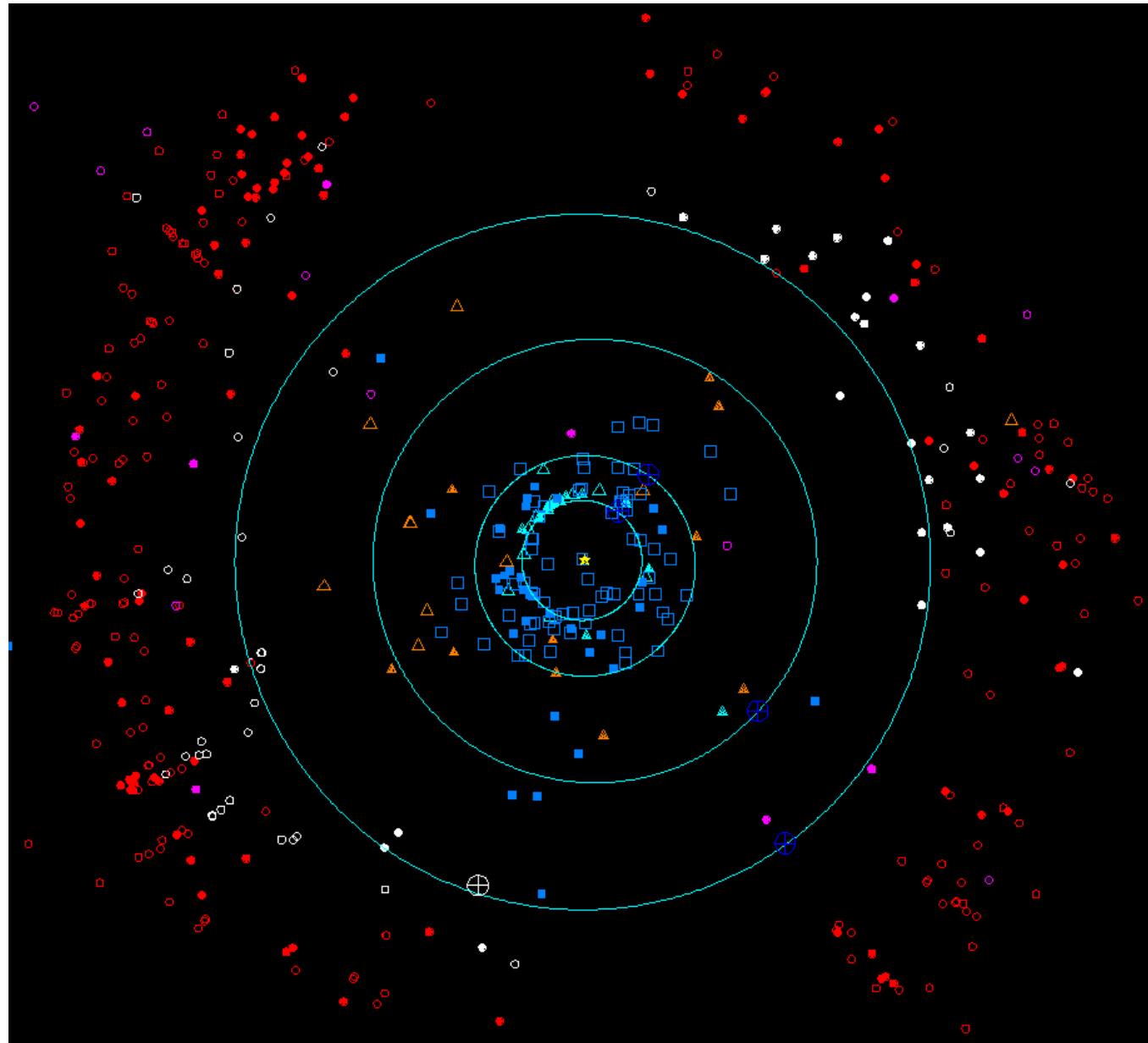
L'astéroïde double Antiope

# Astéroïdes



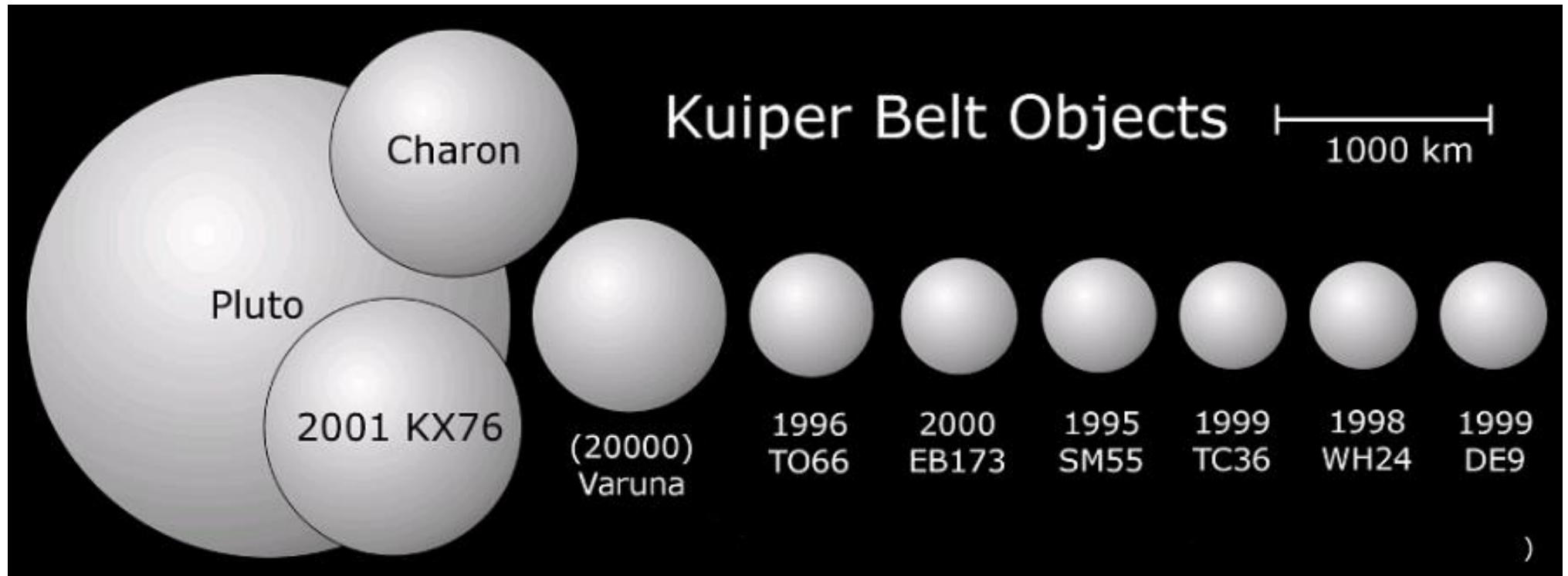
L'astéroïde Ida  $70 \times 25$  km  
et son satellite Dactyl 1,5 km

# Astéroïdes



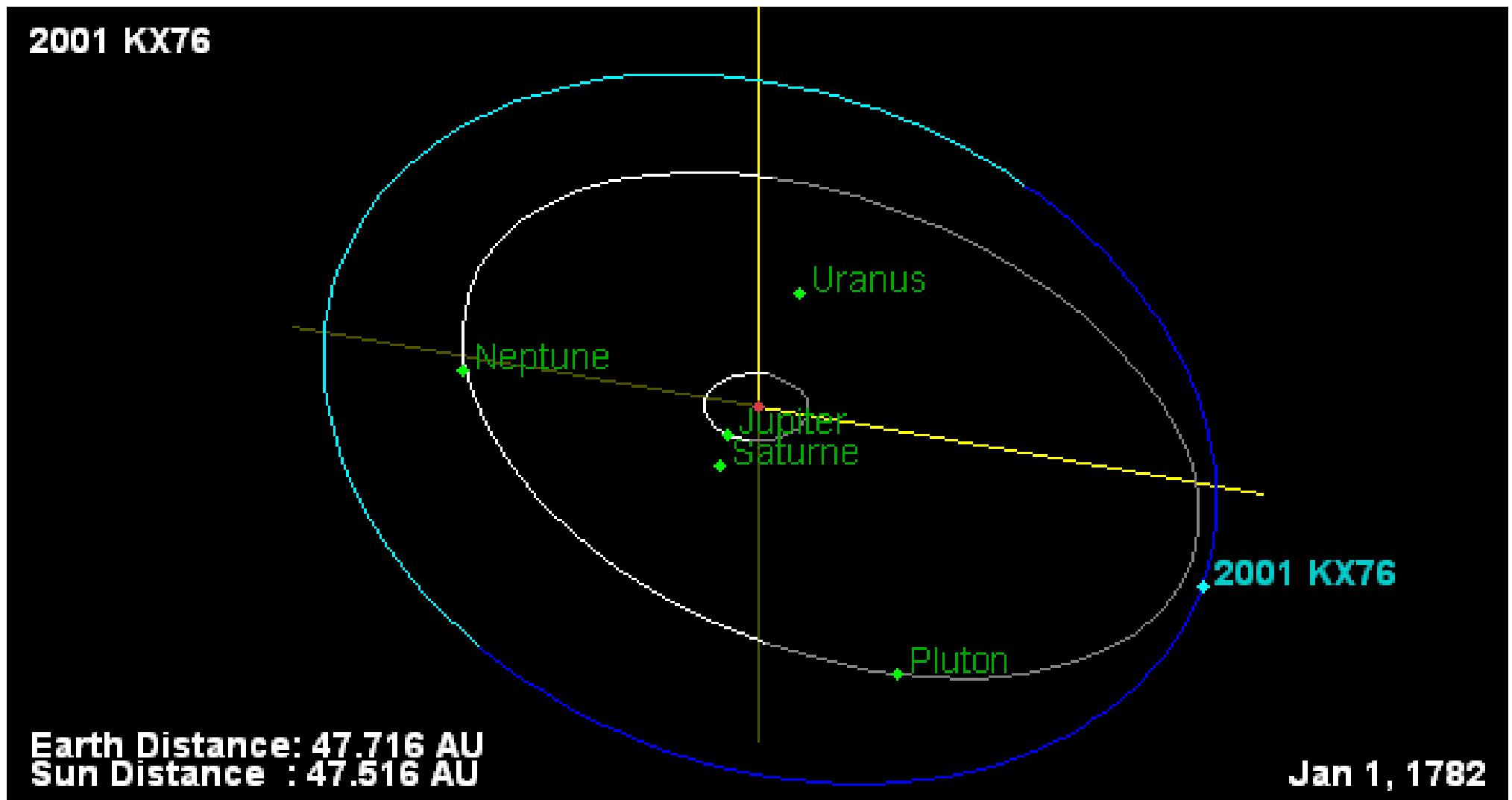
Les objets de Kuiper connus

# Astéroïdes



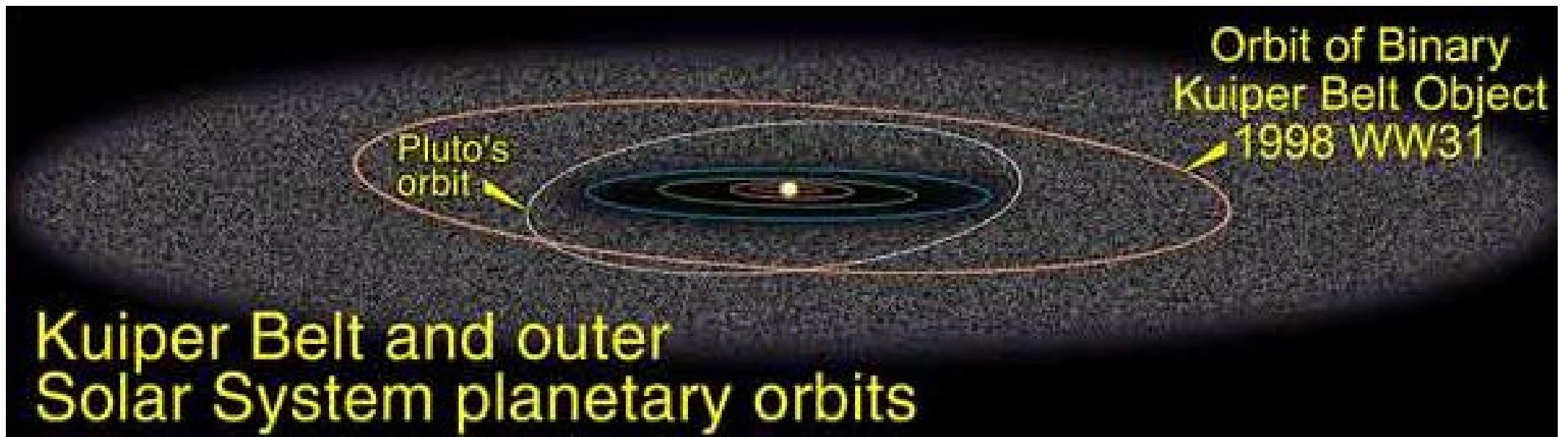
Les objets de Kuiper

# Astéroïdes



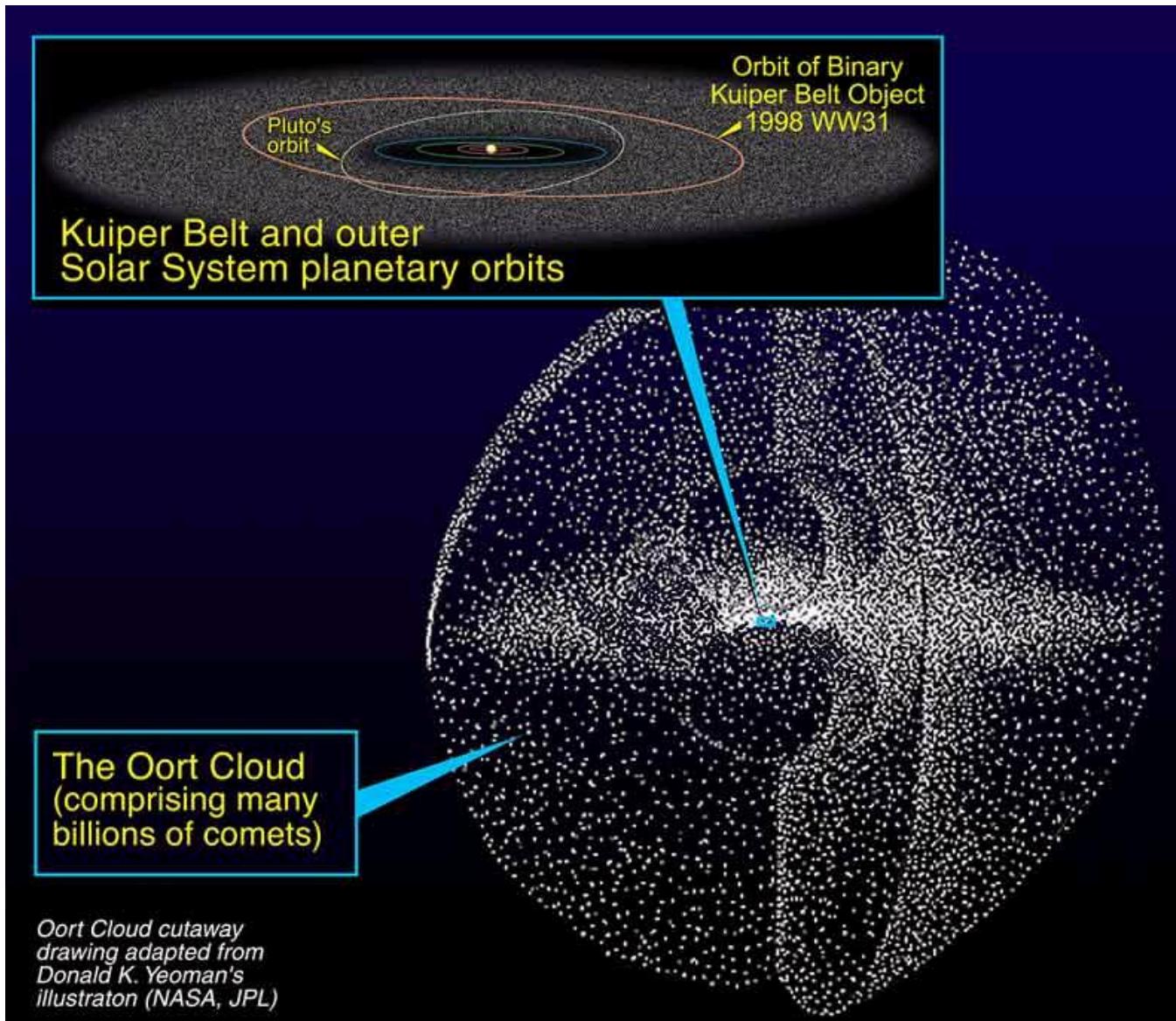
Les objets de Kuiper

# Astéroïdes



Les objets de Kuiper

# Astéroïdes



## Le nuage de Oort

# Astéroïdes

4 janvier	2110	2003 MK4	270.000 km
5 nov	2069	Toutatis	2.969.000 km
28 juin	2028	2001 WN5	248.000 km
22 mars	2019	2019 EA2	288.000 km

Quelques rencontres proches

# Astéroïdes

789 000 astéroïdes référencés

Rencontres proches prévues

# Astéroïdes

## (4179) Toutatis

Ecliptic View Along The Asc.-Desc. Nodal Line

North Ecliptic Polar View

$\Upsilon \rightarrow$   
Vernal  
Equinox

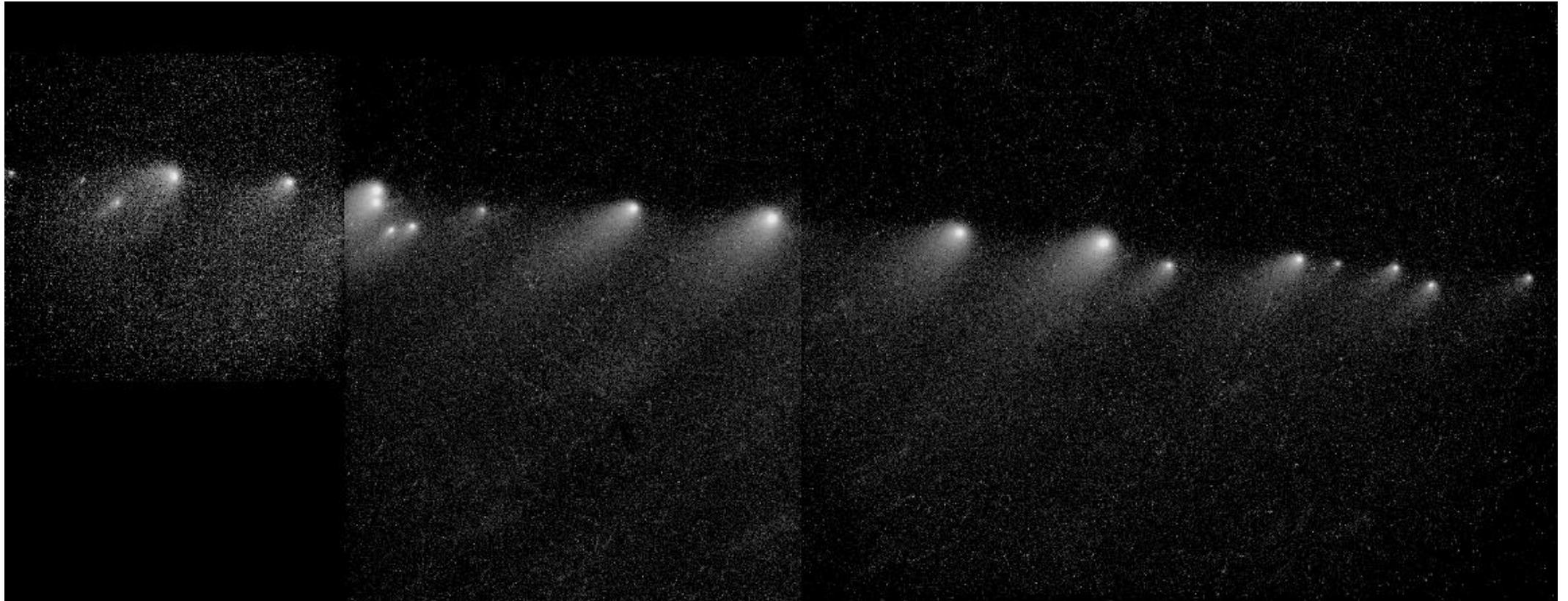
Mars  
Earth      Minor Planet  
Jupiter

# Impacts d'astéroïdes



Comète Shoemaker-Levy 9  
découverte le 24 mars 1993

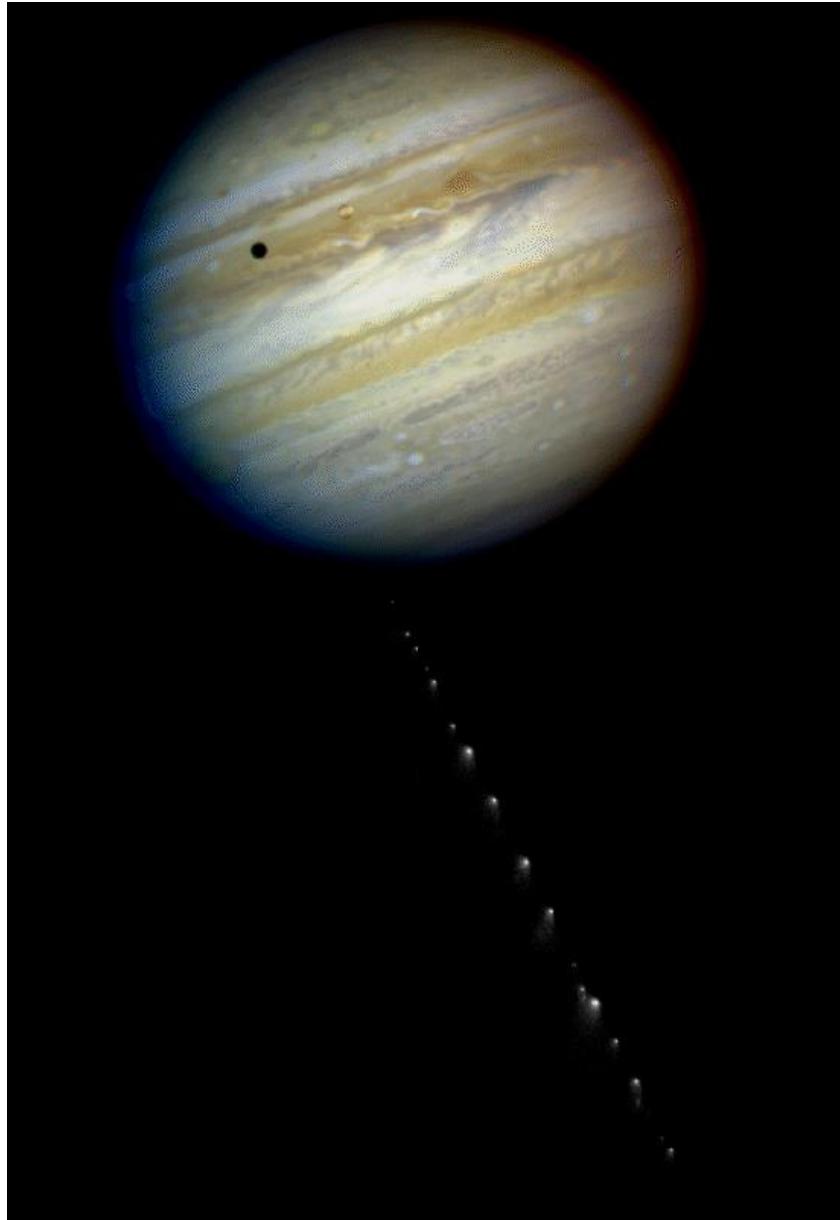
# Impacts d'astéroïdes



Fragmentation

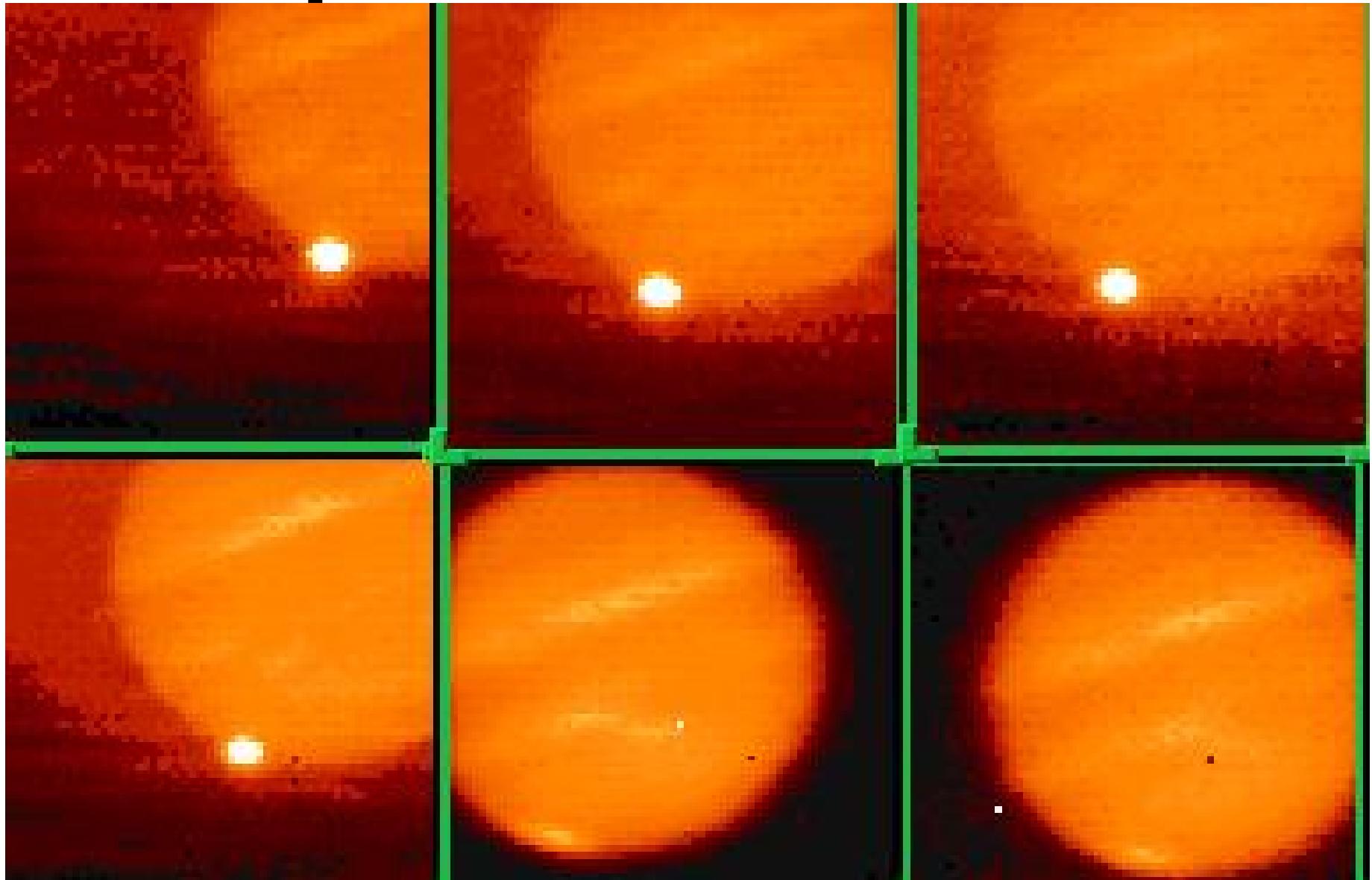
Vitesse 60 km/s - 3 km de diamètre

# Impacts d'astéroïdes



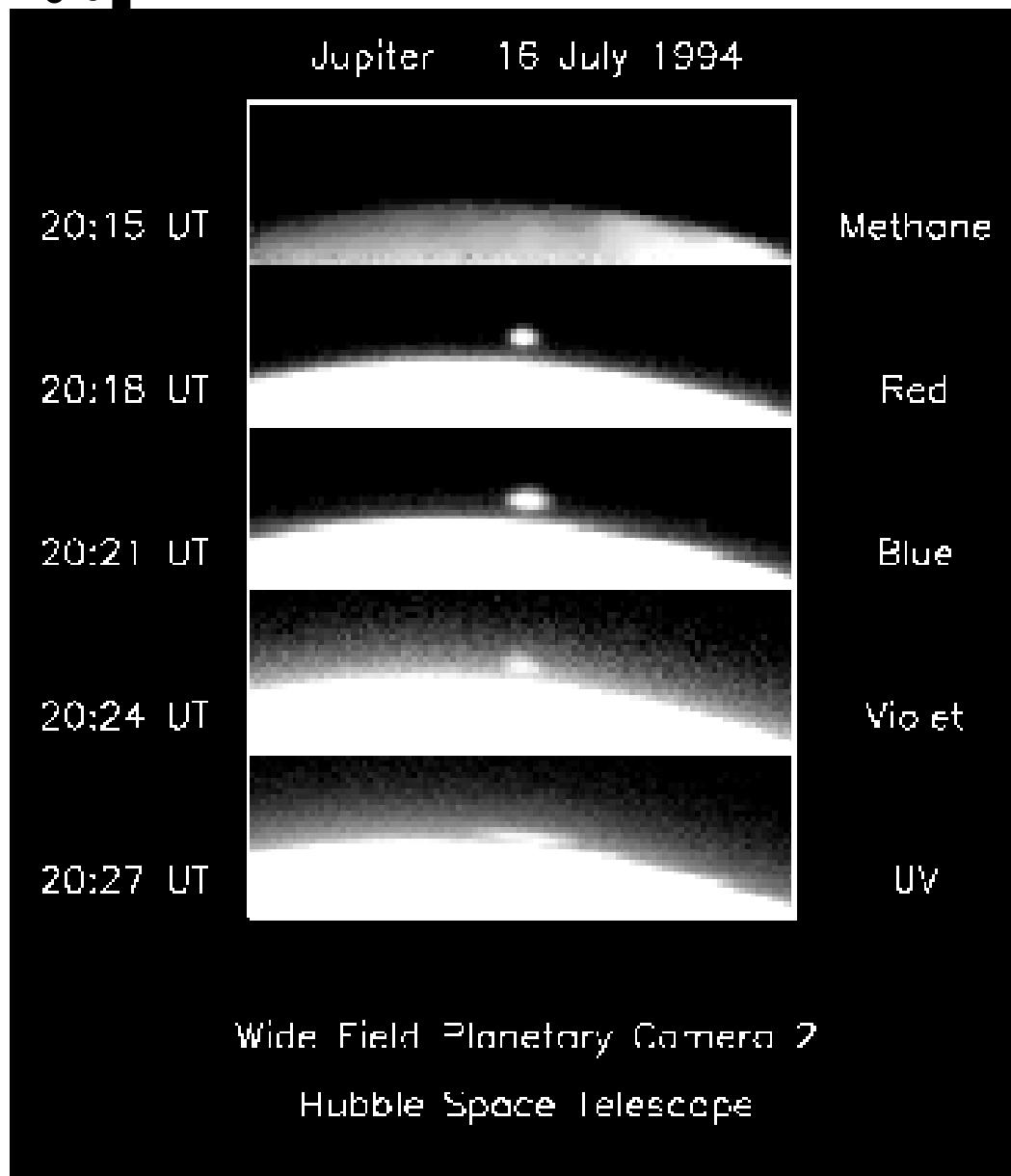
7 juillet 1994

# Impacts d'astéroïdes



16 juillet 1994 Impact fragment A

# Impacts d'astéroïdes



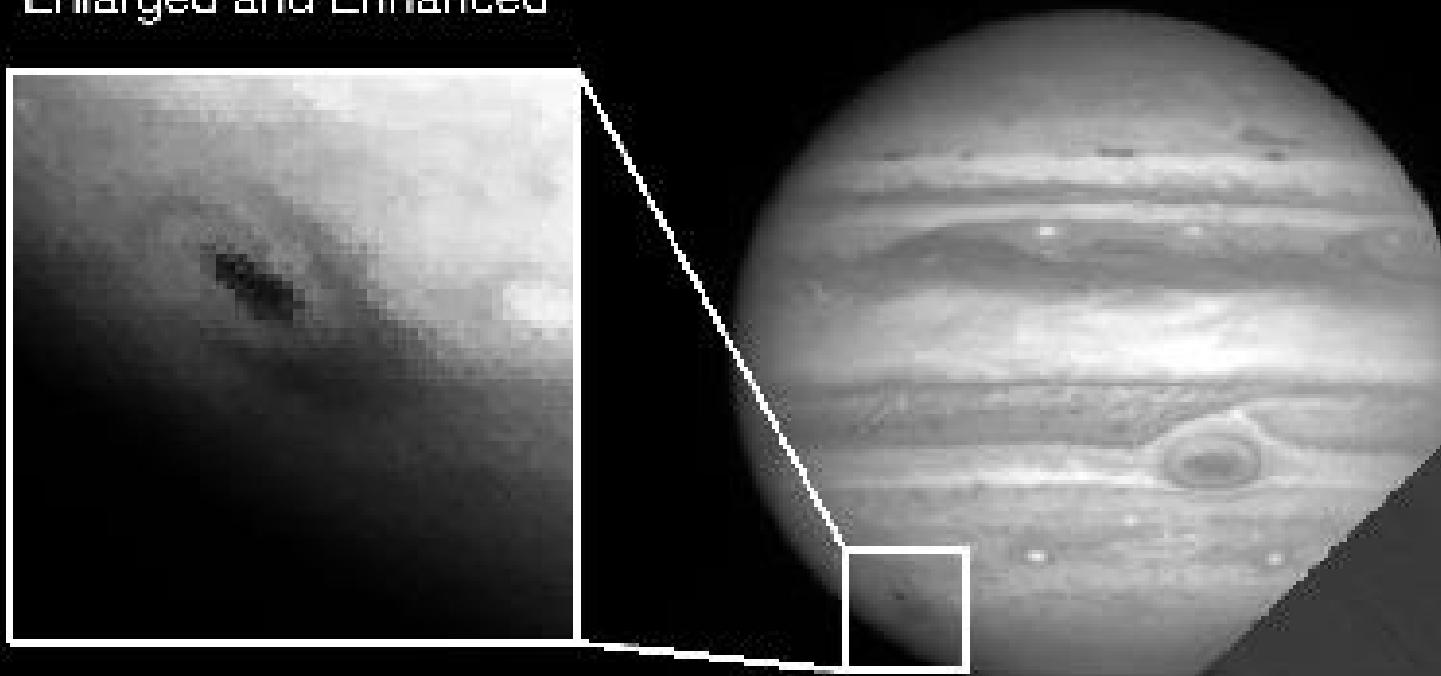
16 juillet 1994 Impact fragment A

# Impacts d'astéroïdes

Jupiter

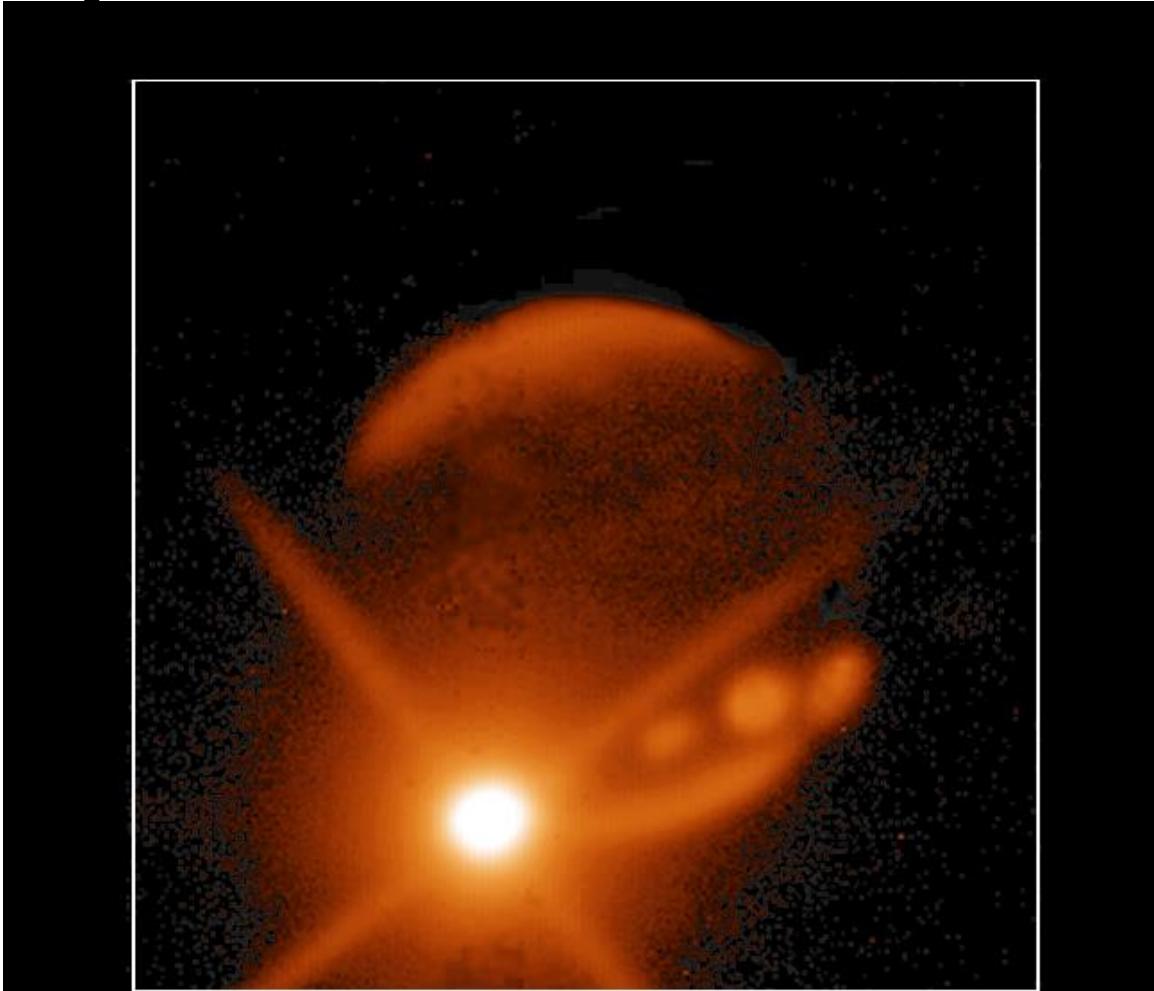
July 16, 1994

After  
Impact site  
Enlarged and Enhanced



Hubble Space Telescope  
Wide Field Planetary Camera 2

# Impacts d'astéroïdes

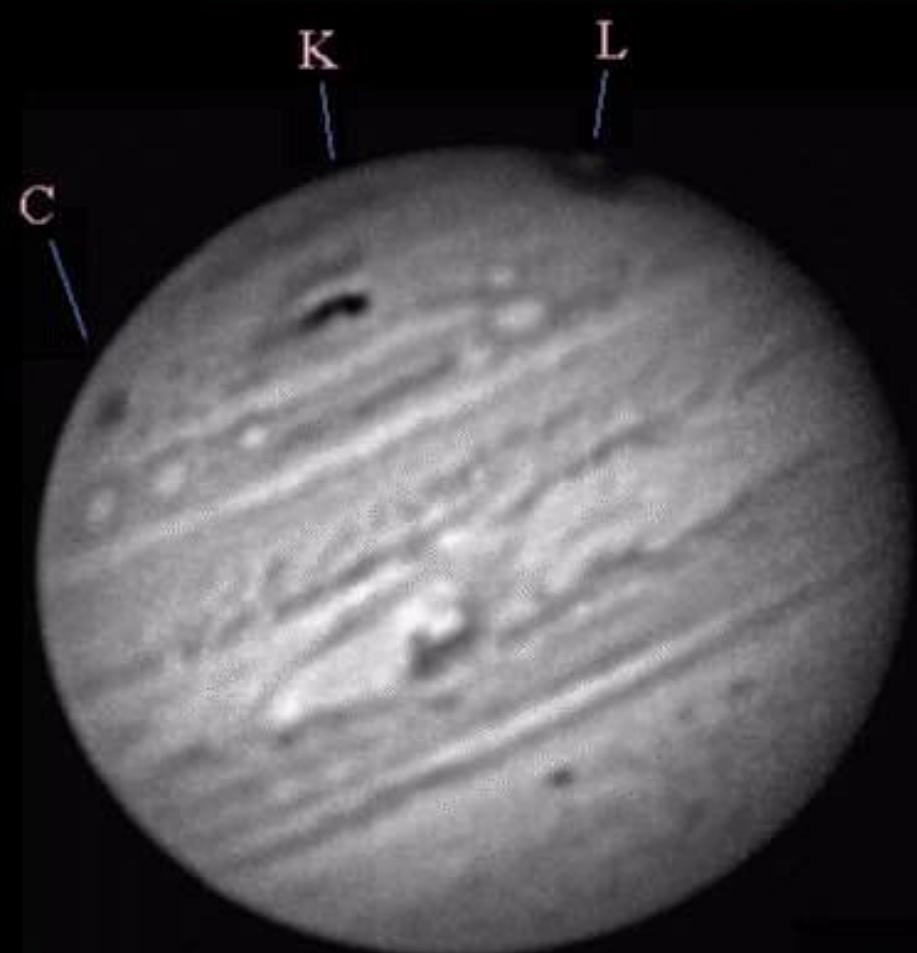


**Impact of Fragment K of Comet Shoemaker-Levy on Jupiter.**  
The scars of three previous impacts can be seen on the planetary disk.

Image from Peter McGregor and Mark Allen, ANU 2.3m telescope.  
Instrument: CASPIR at  $2.34\mu\text{m}$ . Colour image Mt Stromlo Observatories.

# Impacts d'astéroïdes

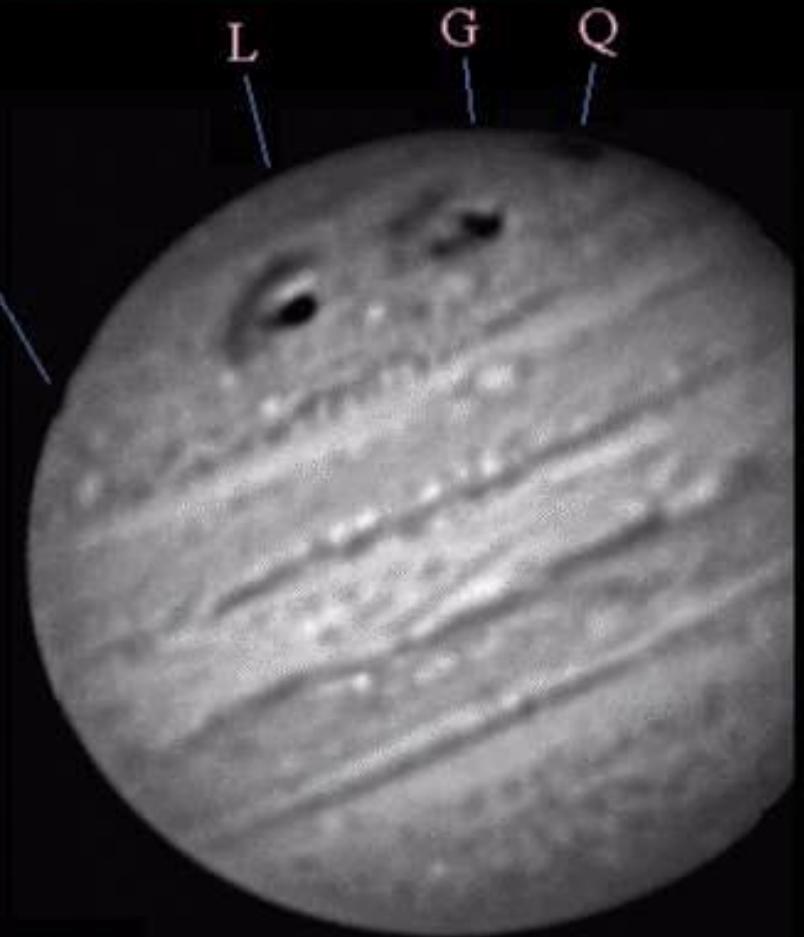
OBSERVATION DES IMPACTS DE LA COMÈTE  
SHOEMAKER-LEVY 9 SUR JUPITER



18 h 56 UT

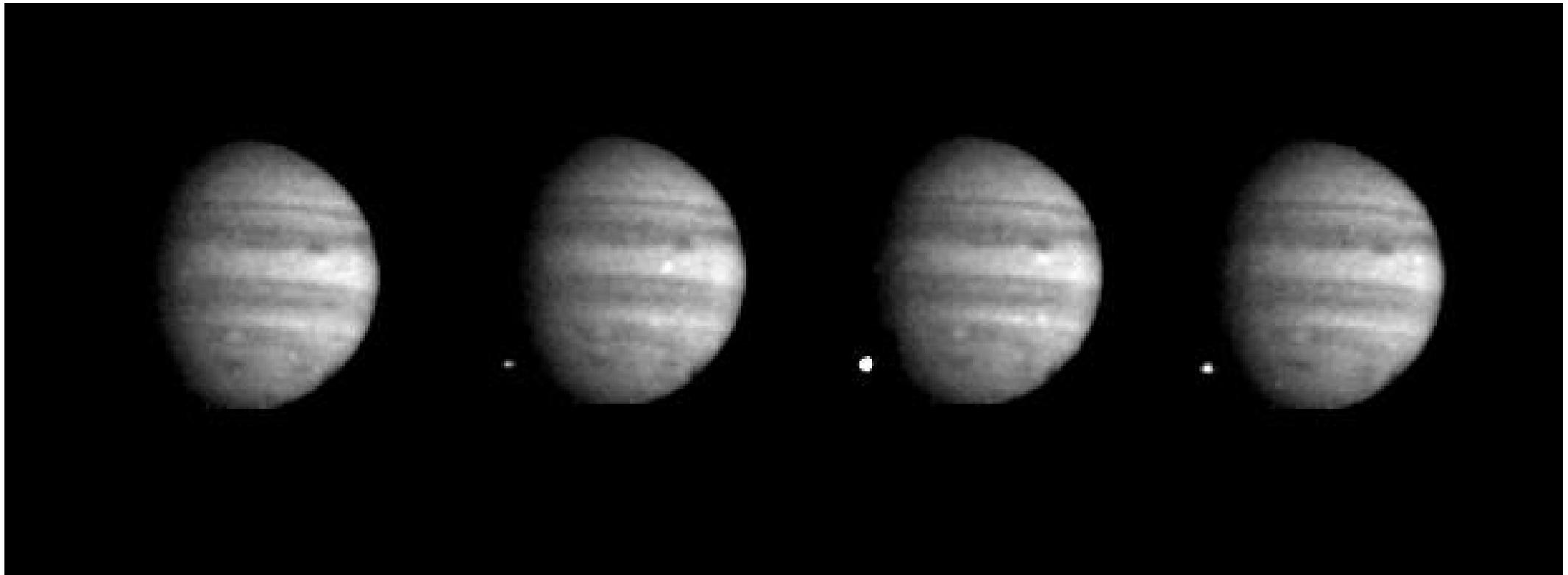


20 Juillet 1994  
Télescope de 1 mètre  
du Pic du Midi



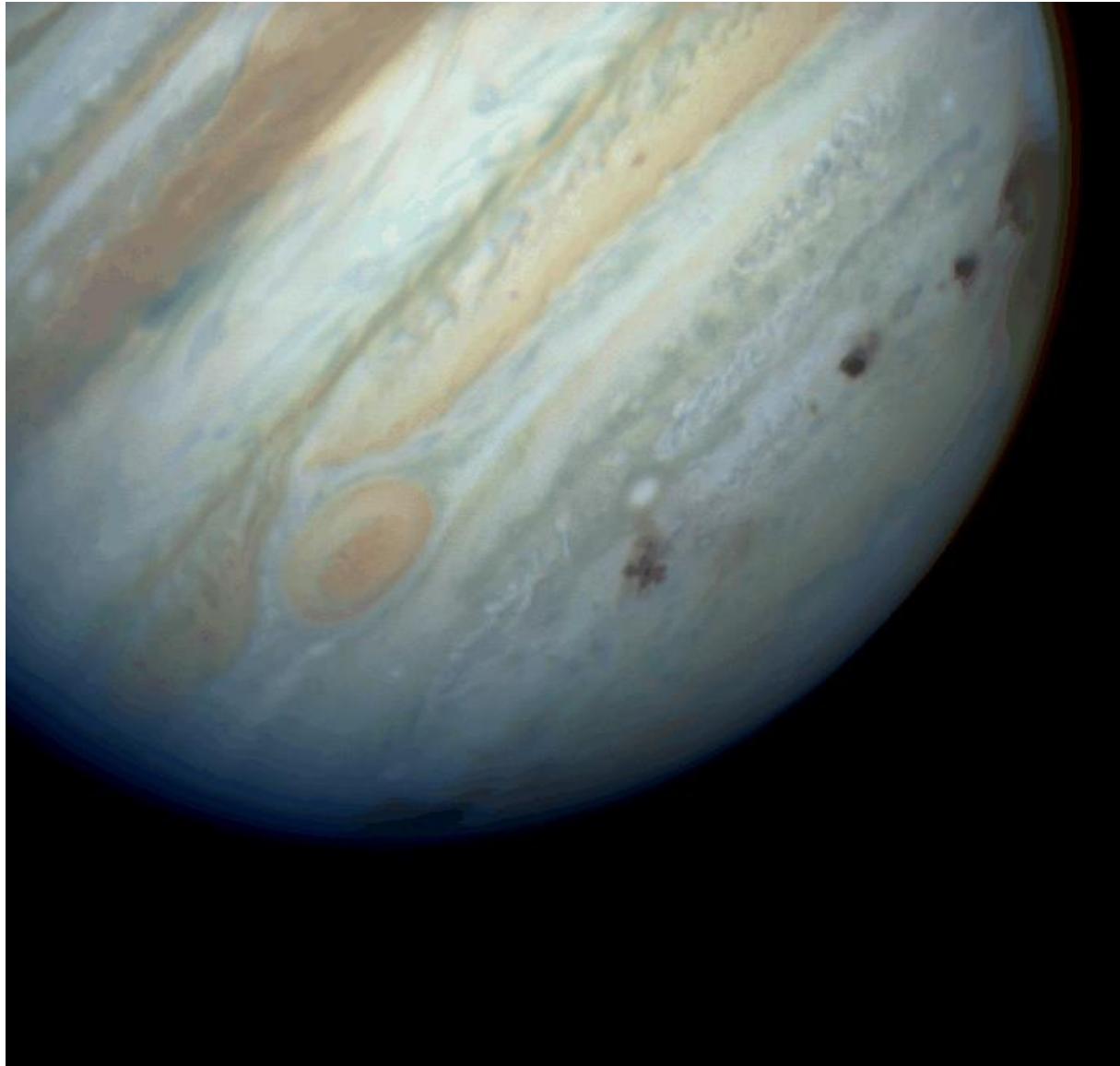
20 h 11 UT

# Impacts d'astéroïdes



22 juillet 1994  
Dernier Impact  
Fragment W observé  
par la sonde Galileo  
sur la face obscure de Jupiter

# Impacts d'astéroïdes



22 juillet 1994 - Dernier Impact

# Impacts d'astéroïdes

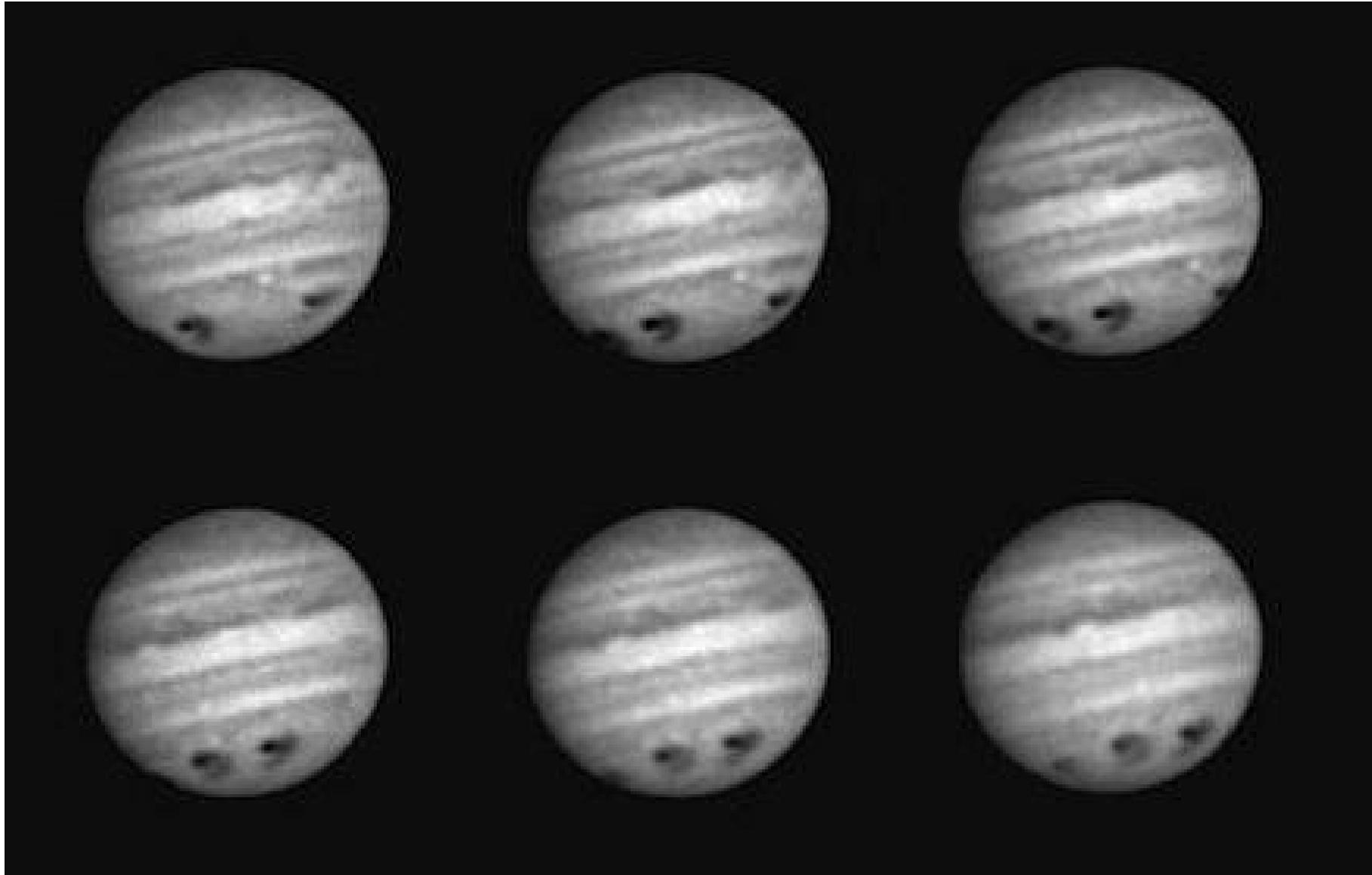
*Earth 100 minutes after a G-Sized impact*



*G impact scar reprojected onto Earth, to scale*

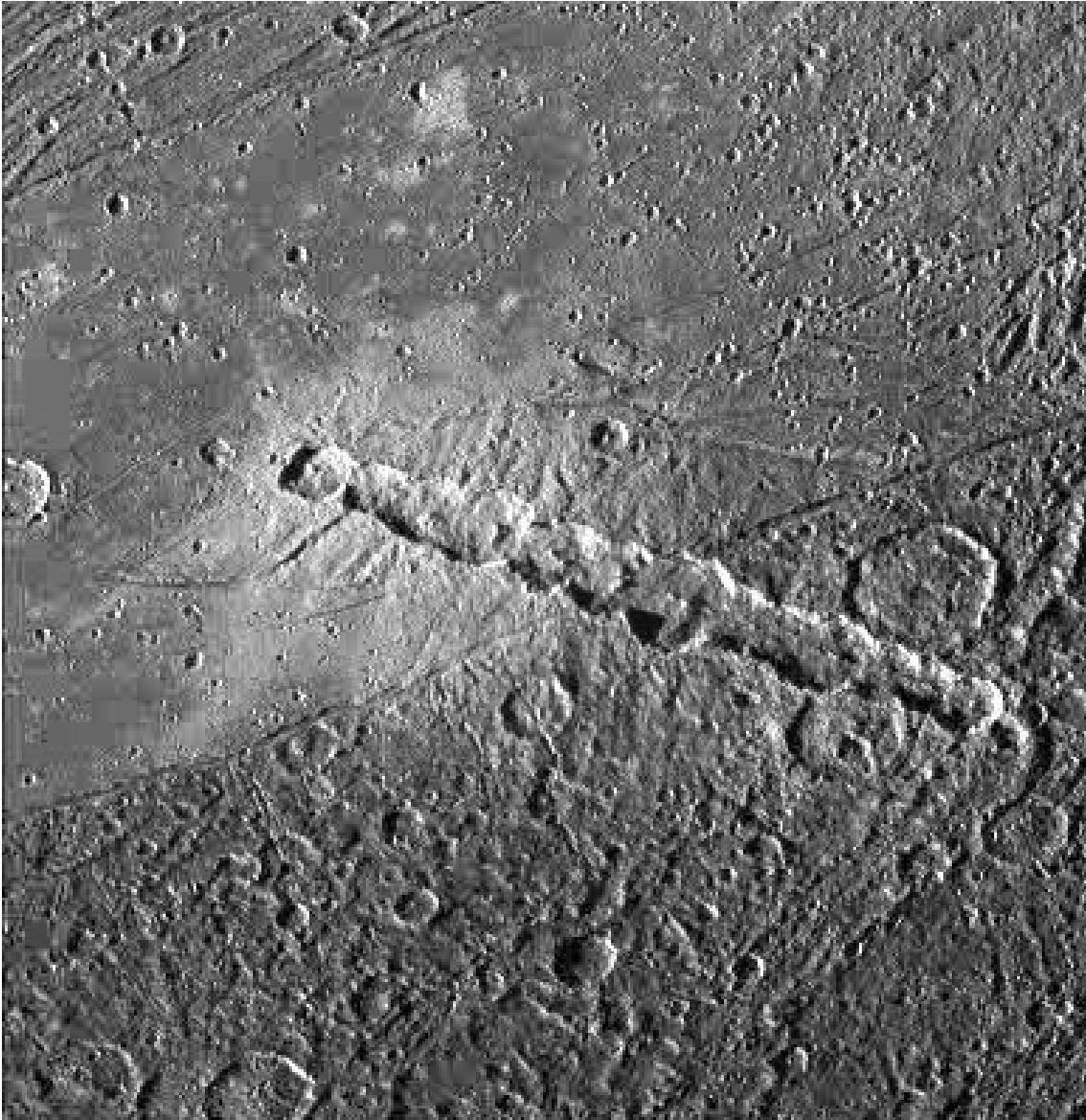
A l'échelle de la Terre

# Impacts d'astéroïdes



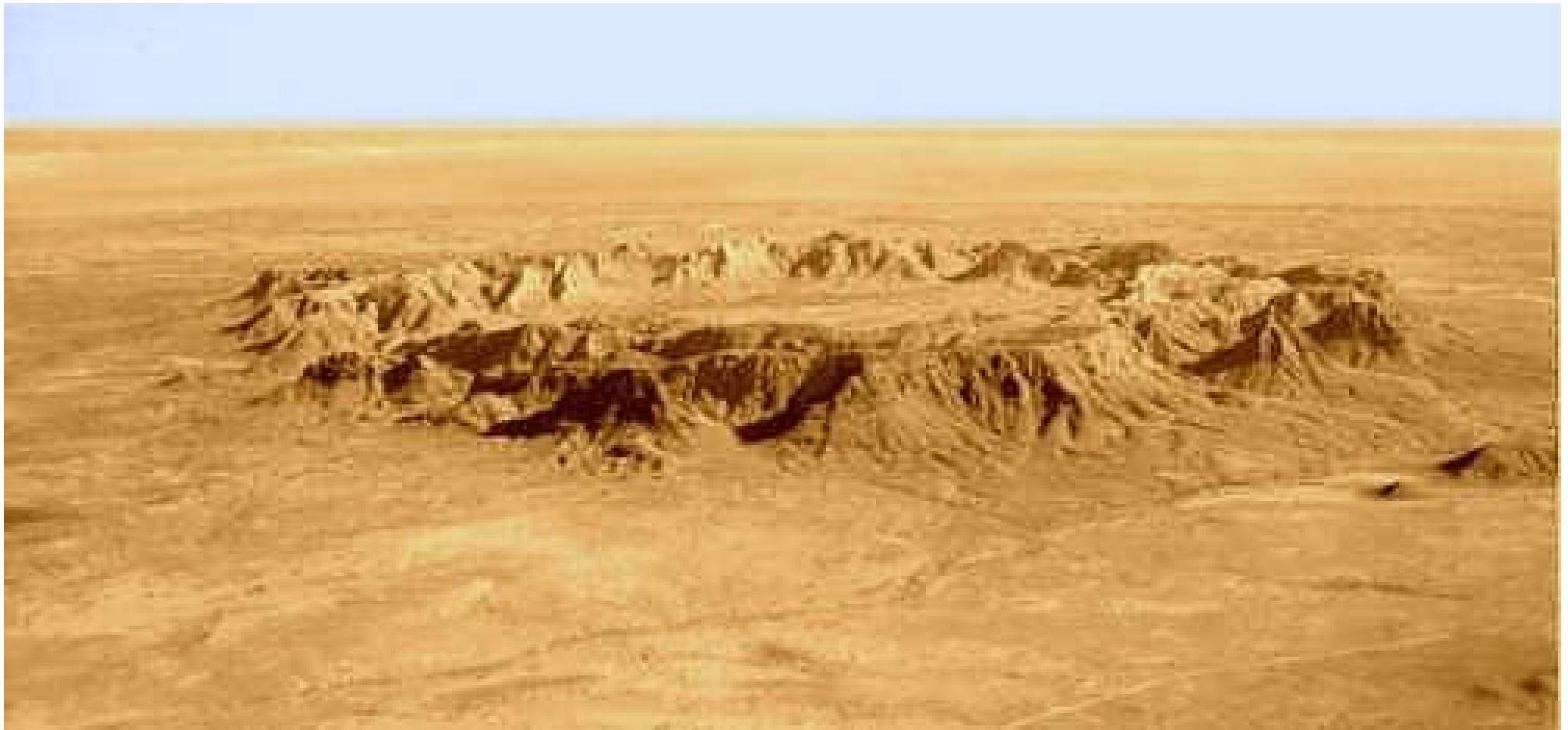
Pendant des mois

# Impacts d'astéroïdes



Impact multiple sur Ganymède

# Impacts d'astéroïdes sur Terre



Gosses Bluff, 22 km, SO Australie

# Impacts d'astéroïdes sur Terre



Wolfe Creek, 875m, O. Australie

# Impacts d'astéroïdes sur Terre



Meteor crater (Barringer), 1186 m,  
Arizona

# Impacts d'astéroïdes sur Terre



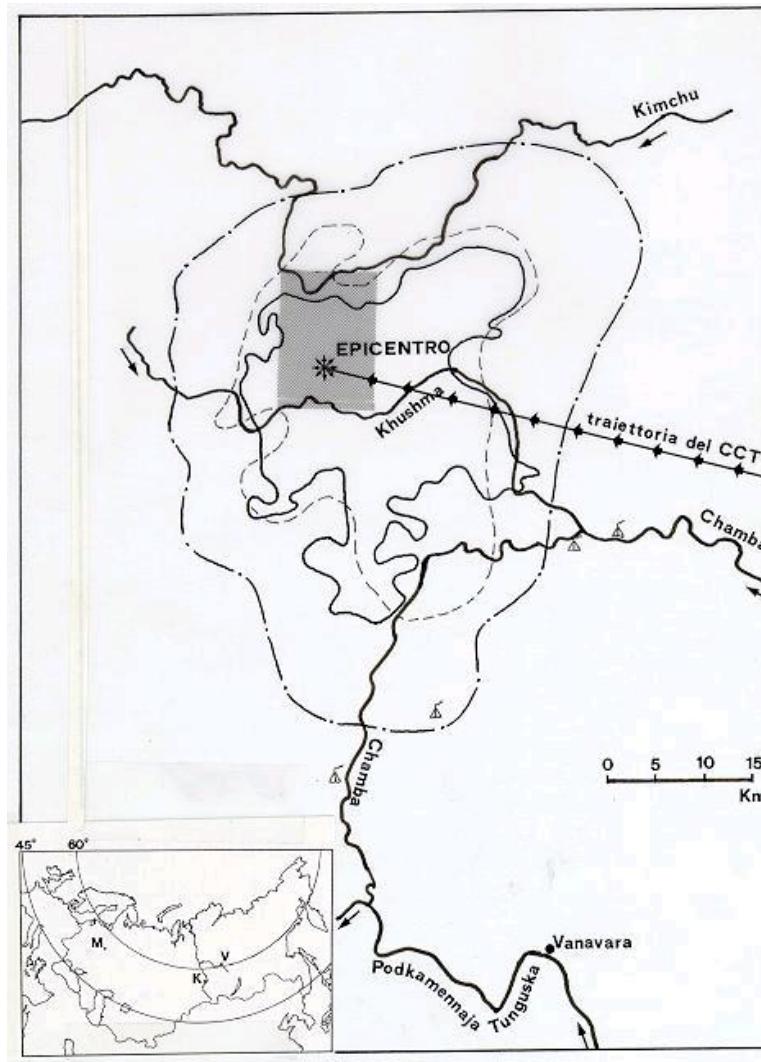
Sibérie, 30 juin 1908

# Impacts d'astéroïdes sur Terre



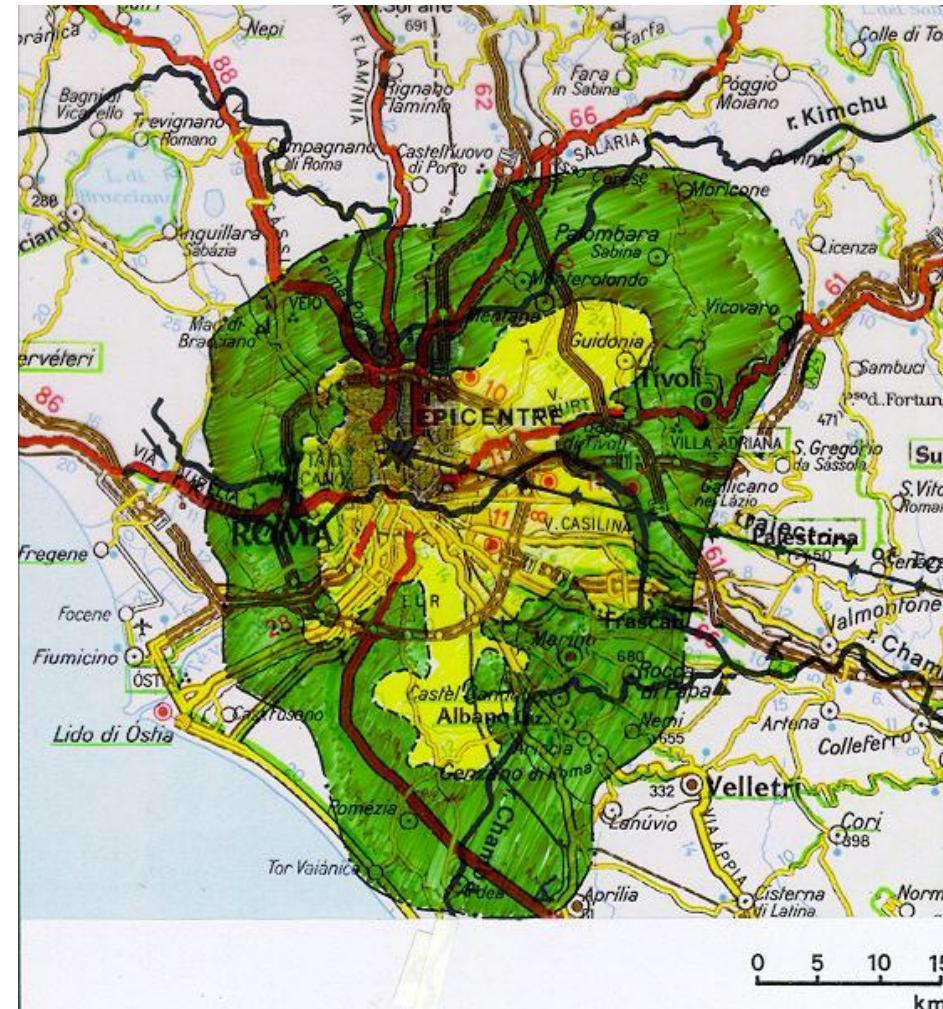
Equivalent à une bombe atomique de 20 MT

# Impacts d'astéroïdes sur Terre



Tunguska, Sibérie, 30 juin 1908

# Impacts d'astéroïdes sur Terre



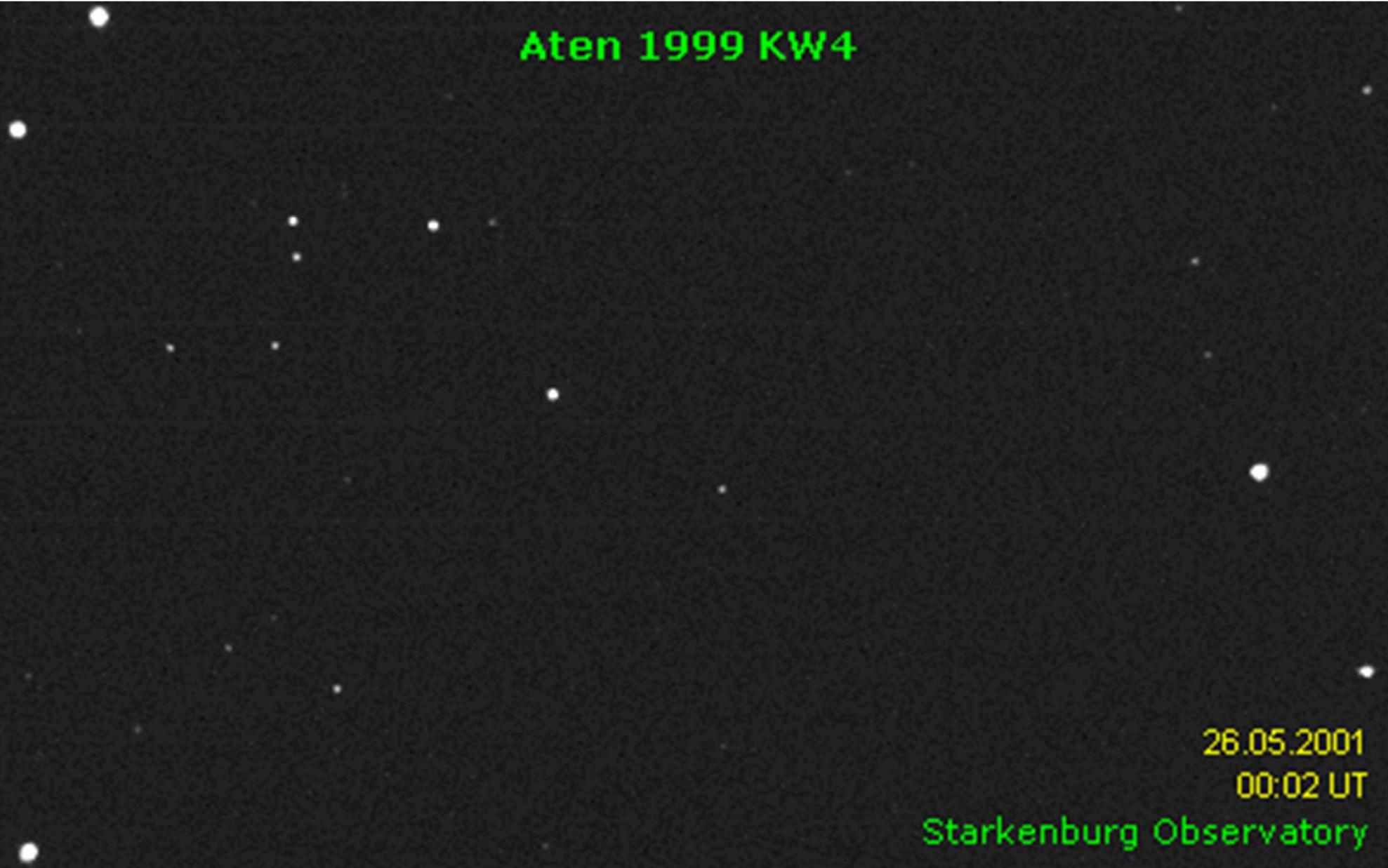
Destruction totale sur 2150 km<sup>2</sup>

# Impacts d'astéroïdes sur Terre



Le site aujourd'hui

# Le repérage des astéroïdes



Aten 1999 KW4

26.05.2001  
00:02 UT

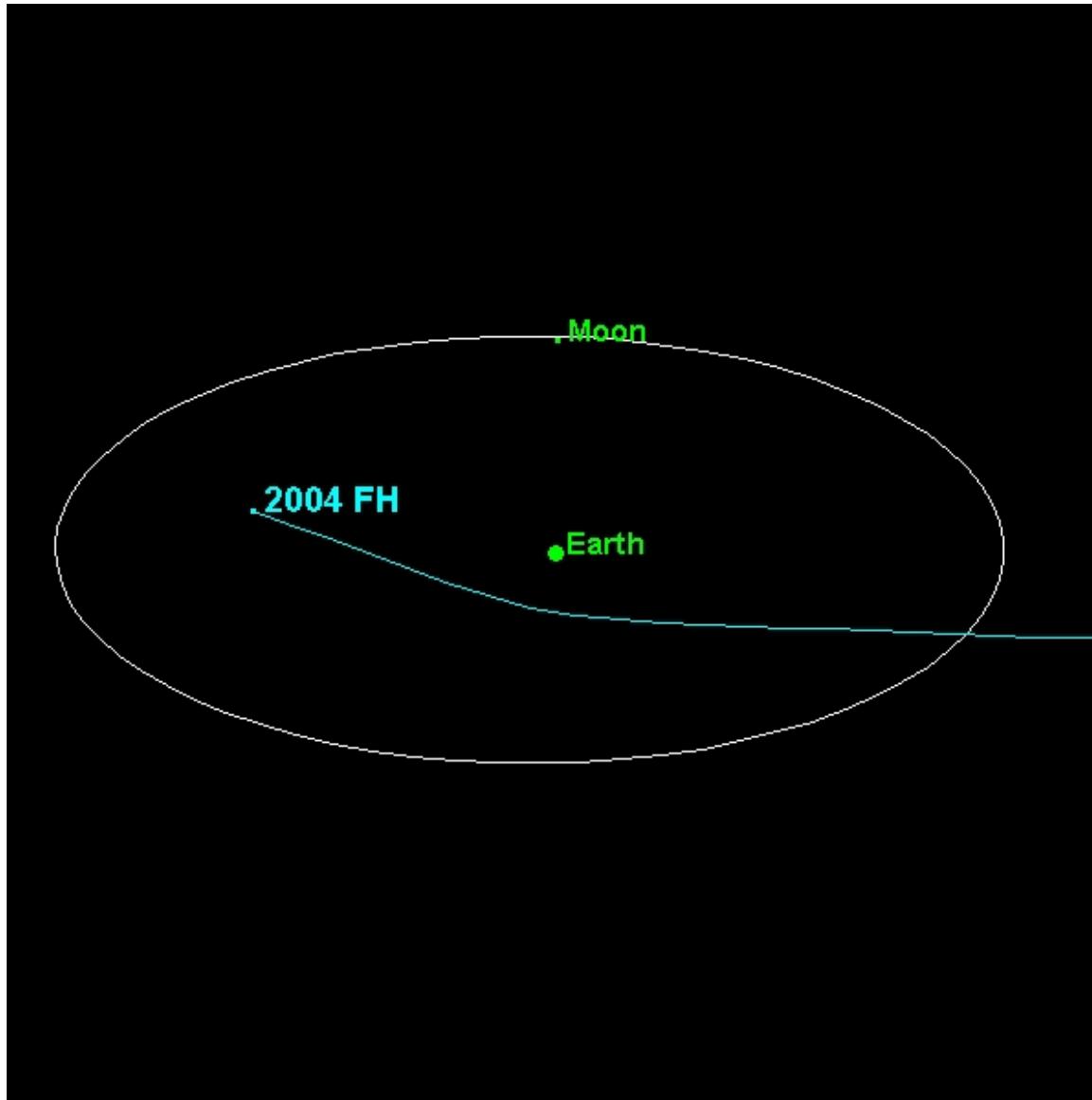
Starkenburg Observatory

# Le repérage des astéroïdes



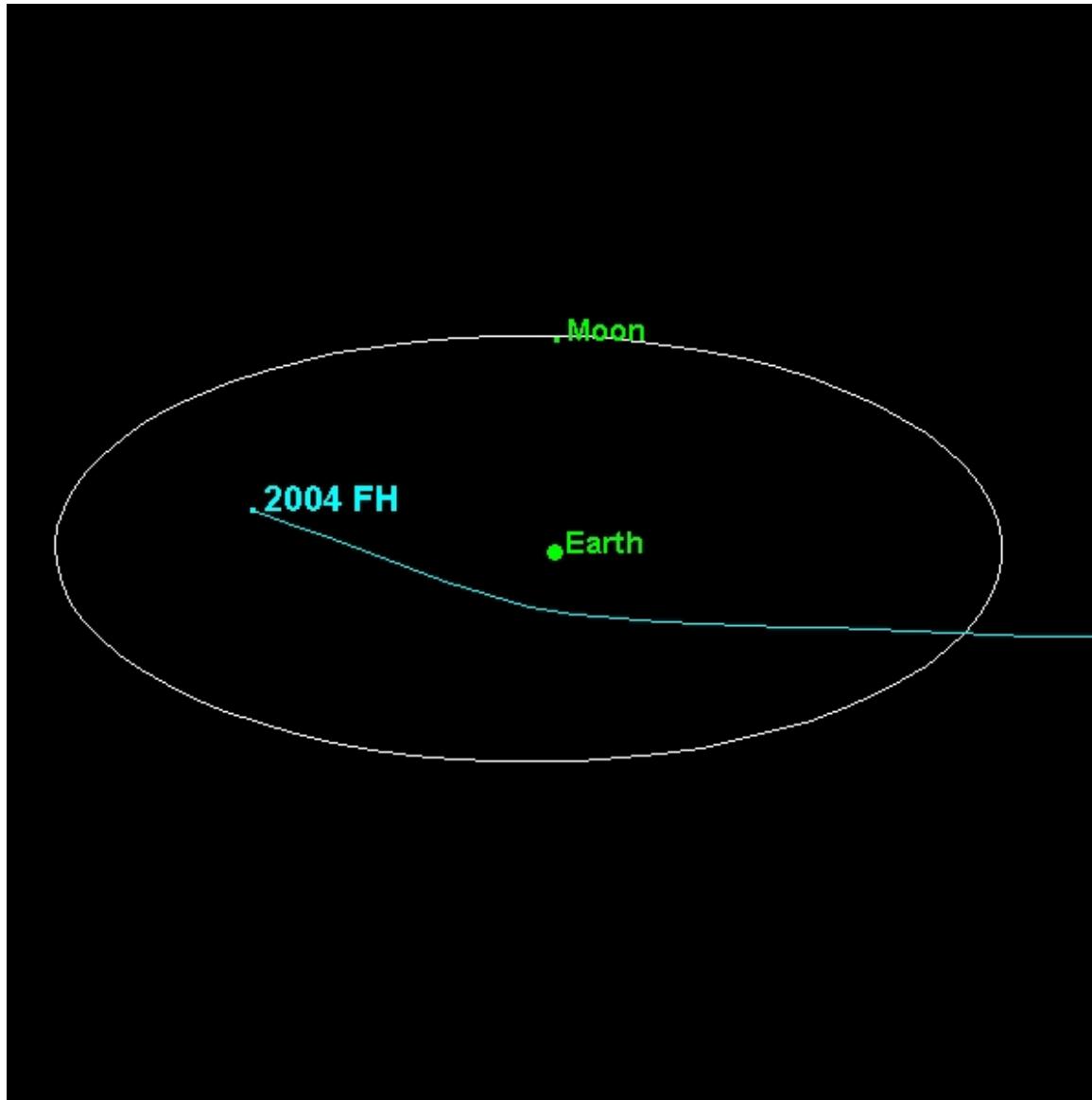
Near Earth Object Program de la NASA

# Astéroïdes



Record 2004 FH, diamètre 30 mètres  
est passé à 43.000 km

# Astéroïdes



[www.minorplanetcenter.net](http://www.minorplanetcenter.net)