

# Planètes d'ici et d'ailleurs

Sergio Ilovaisky  
Observatoire de Haute-Provence

Cavaillon, 9 avril 2011



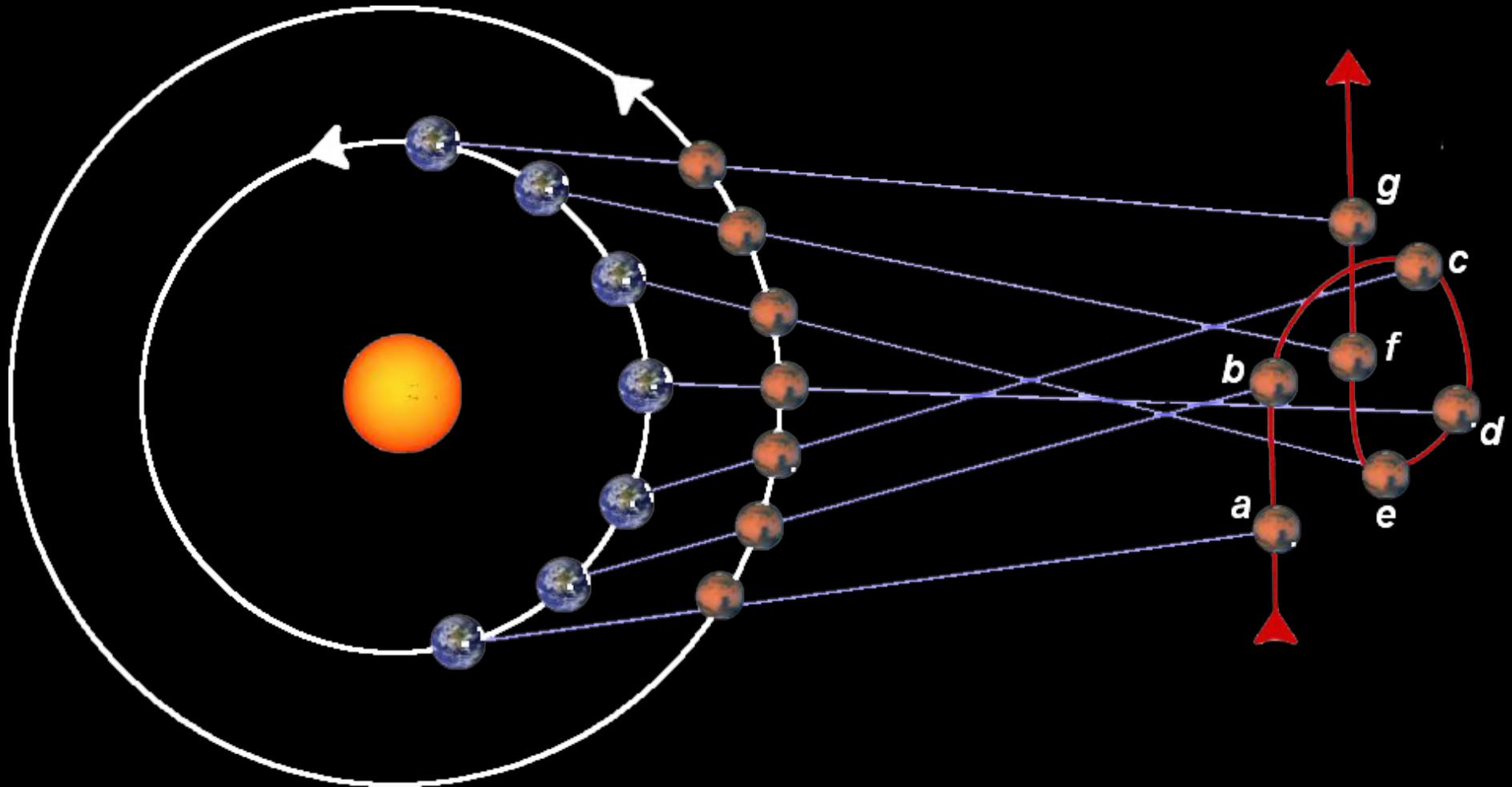
# **Les planètes d'ici**

# Origine du mot planète ?



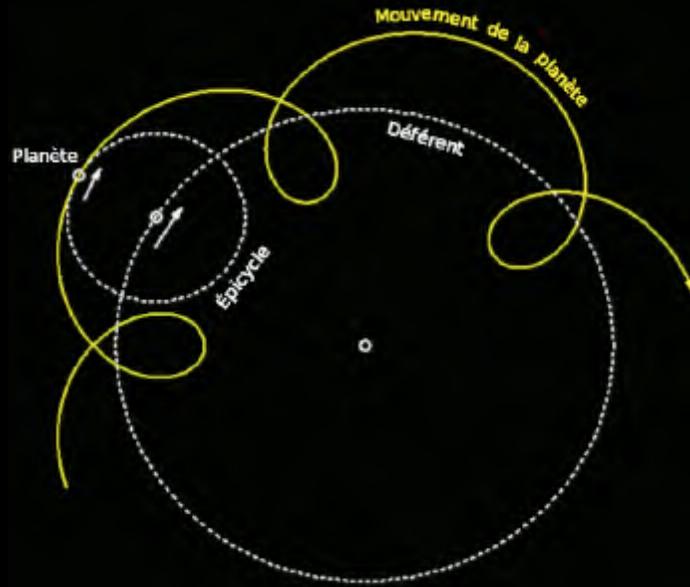
Le mot vient du grec  
« planètes astêres »  
(πλανήτης αστήρης)  
ou « **astre errant** »  
par opposition aux  
étoiles qui apparaissent  
immobiles sur la voûte  
céleste

# Pourquoi ces boucles ?



On observe une planète en mouvement depuis une autre aussi en mouvement !

# On tourne autour de qui ?



L'idée que la Terre tourne autour du Soleil remonte à plus de 2400 ans (au grec **Aristarque**), mais **Ptolémée** (romain vivant en Egypte au II<sup>ème</sup> siècle) proposa que la Terre était au centre de l'Univers et que tous les planètes tournaient autour.

Pour expliquer les « boucles » il inventa les « épicycles ». Ses idées perdurèrent.

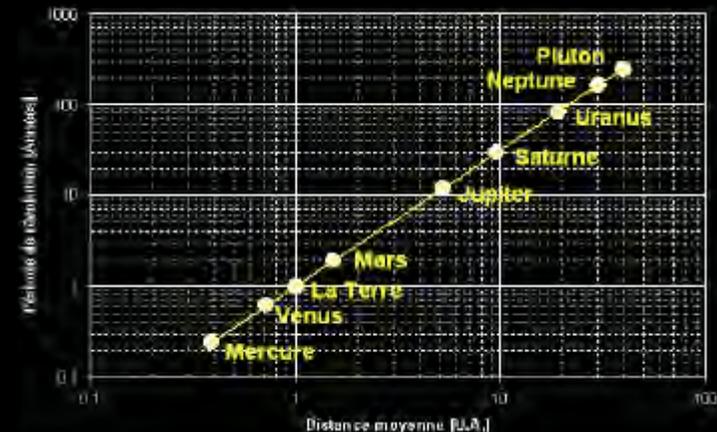
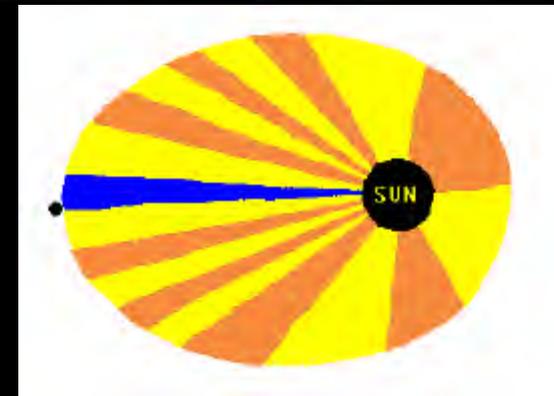
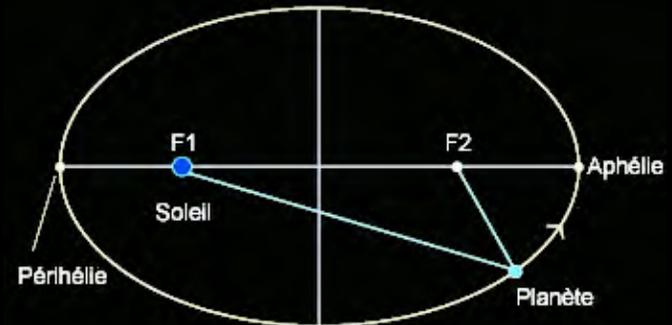
On a dû attendre le 16<sup>ème</sup> siècle pour que le polonais **Copernique** remette le système l'héliocentrique à sa juste place.



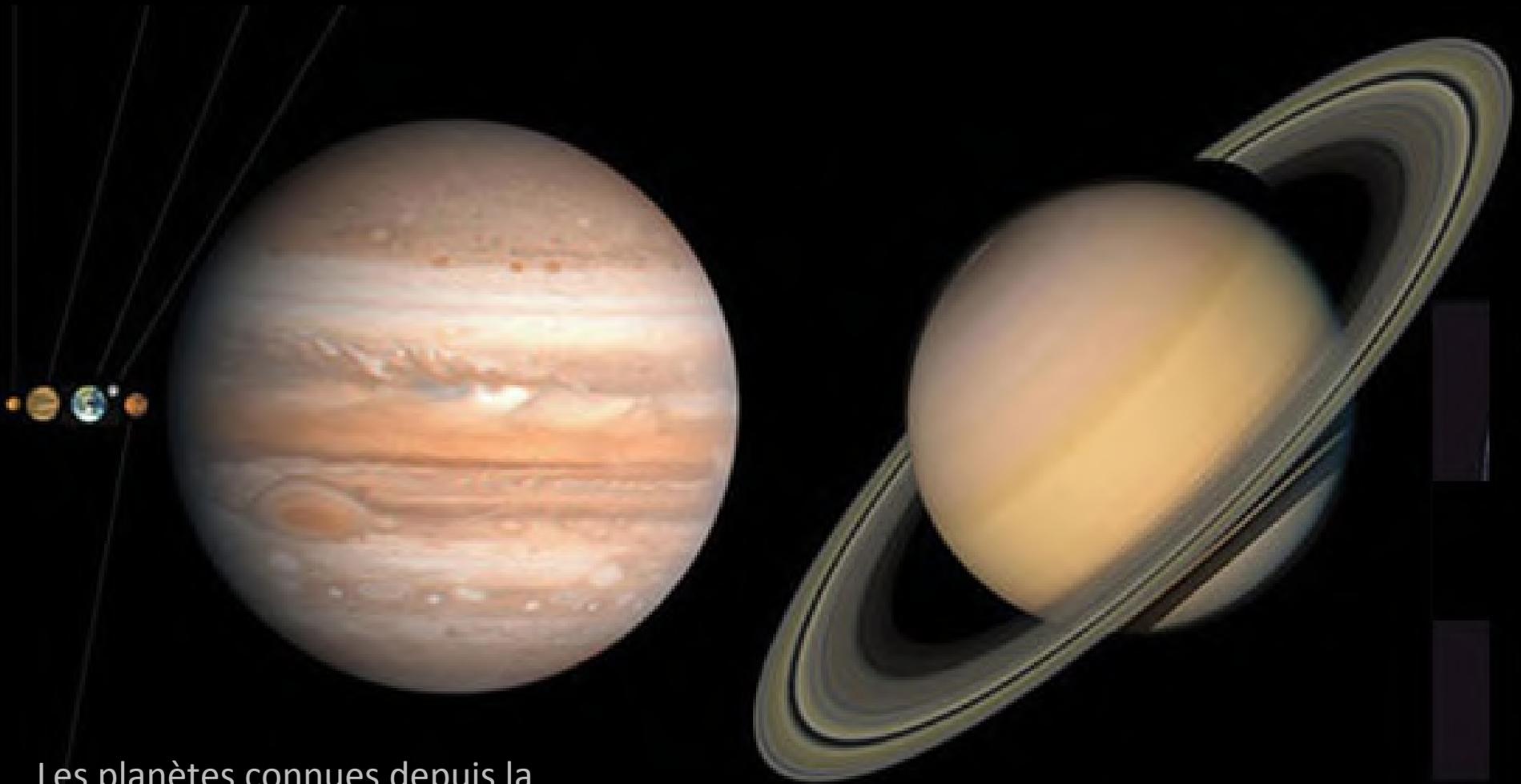
Au 17<sup>ème</sup> siècle l'allemand **Kepler** et l'italien **Galilée** et plus tard au 18<sup>ème</sup> siècle l'anglais **Newton** ont établi les bases de la mécanique céleste qui décrit le mouvement des planètes, suivi à la fin du 18<sup>ème</sup> par le français **Laplace**.

# Lois de Kepler

- 1<sup>ère</sup> Loi : Les orbites des planètes sont des ellipses et le Soleil est à l'un des foyers
- 2<sup>ème</sup> Loi : Les aires sont balayées en temps égaux
- 3<sup>ème</sup> Loi : Le carré de la période est proportionnel au cube du demi-grand axe



# Les planètes des anciens



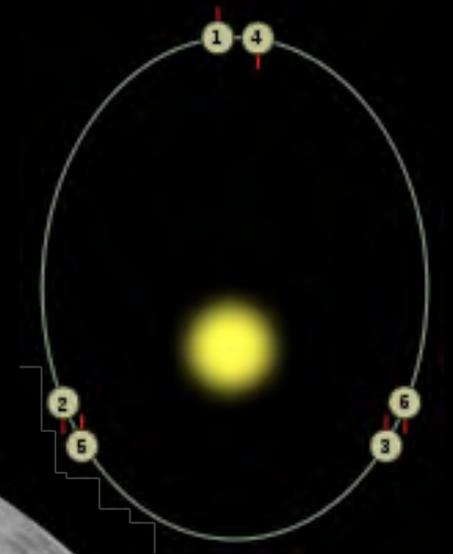
Les planètes connues depuis la préhistoire : **Vénus, Mars, Jupiter et Saturne. Mercure**, plus difficile à observer, était déjà connue des Sumériens (il y a 4000 ans).

Mercure (dieu du commerce), Venus (déesse de la beauté), Mars (dieu de la guerre), Jupiter (dieu du Ciel, de la Lumière, de la Foudre et du Tonnerre), Saturne (dieu du temps chez les grecs, dieu des paysans chez les romains)

# Mercure

Période de révolution : 88 jours  
Distance au Soleil : 0.39 UA  
Période de rotation : 58.6 jours  
Diamètre : 4900 km (38% de la Terre)  
Densité : 5.4 g/cm<sup>3</sup> (Terre : 5.5)  
Masse : 5.5 % de la Terre  
Inclinaison orbite : 7°  
Excentricité : 0.21  
Inclinaison axe rotation : 2'

Pas d'atmosphère, mais une exosphère  
Température de surface : -173° à +427° C  
Structure rocheuse : Cœur, Manteau, Croûte



\* 1 Unité Astronomique (UA) est la distance Terre-Soleil : 150 millions de km

# Vénus



Période de révolution : 225 jours

Distance au Soleil : 0.72 UA

Période de rotation : **-243 jours**

Diamètre : 12100 km (95% la Terre)

Densité : 5.2 g/cm<sup>3</sup>

Masse : 82 % de la Terre

Inclinaison orbite : 3.4°

Excentricité : 0.007 (Terre : 0.017)

Inclinaison axe rotation : **177°**

Epaisse atmosphère : 96.5 % CO<sub>2</sub>, 3.5% N<sub>2</sub> + etc.

Effet de serre : +470° C à la surface !

Structure : comparable à celle de la Terre

# Mars

Période de révolution : 1.9 ans

Distance au Soleil : 1.5 UA

Période de rotation : 24.6 h

Diamètre : 6800 km (53% de la Terre)

Densité : 3.9 g/cm<sup>3</sup>

Masse : 11 % de la Terre

Inclinaison orbite : 1.9°

Excentricité : 0.09

Inclinaison axe rotation : 25°

2 satellites : Phobos et Deimos

Atmosphère : 95% CO<sub>2</sub>, 3% N<sub>2</sub>, 1.6% Ar + etc

Température de surface : entre -3° et -133° C

Structure : cœur Fer+Sulfur, manteau siliceux, croûte



# Jupiter

Période de révolution : 12 ans

Distance au Soleil : 5.2 UA

Période de rotation : 10 h

Diamètre : 140 000 km (11 fois la Terre)

Densité : 1.3 g/cm<sup>3</sup>

Masse : 318 fois la Terre

Inclinaison orbite : 13°

Excentricité : 0.05

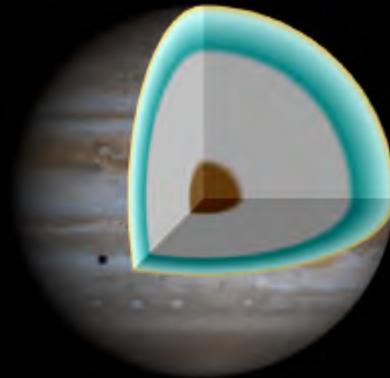
Inclinaison axe rotation : 3°

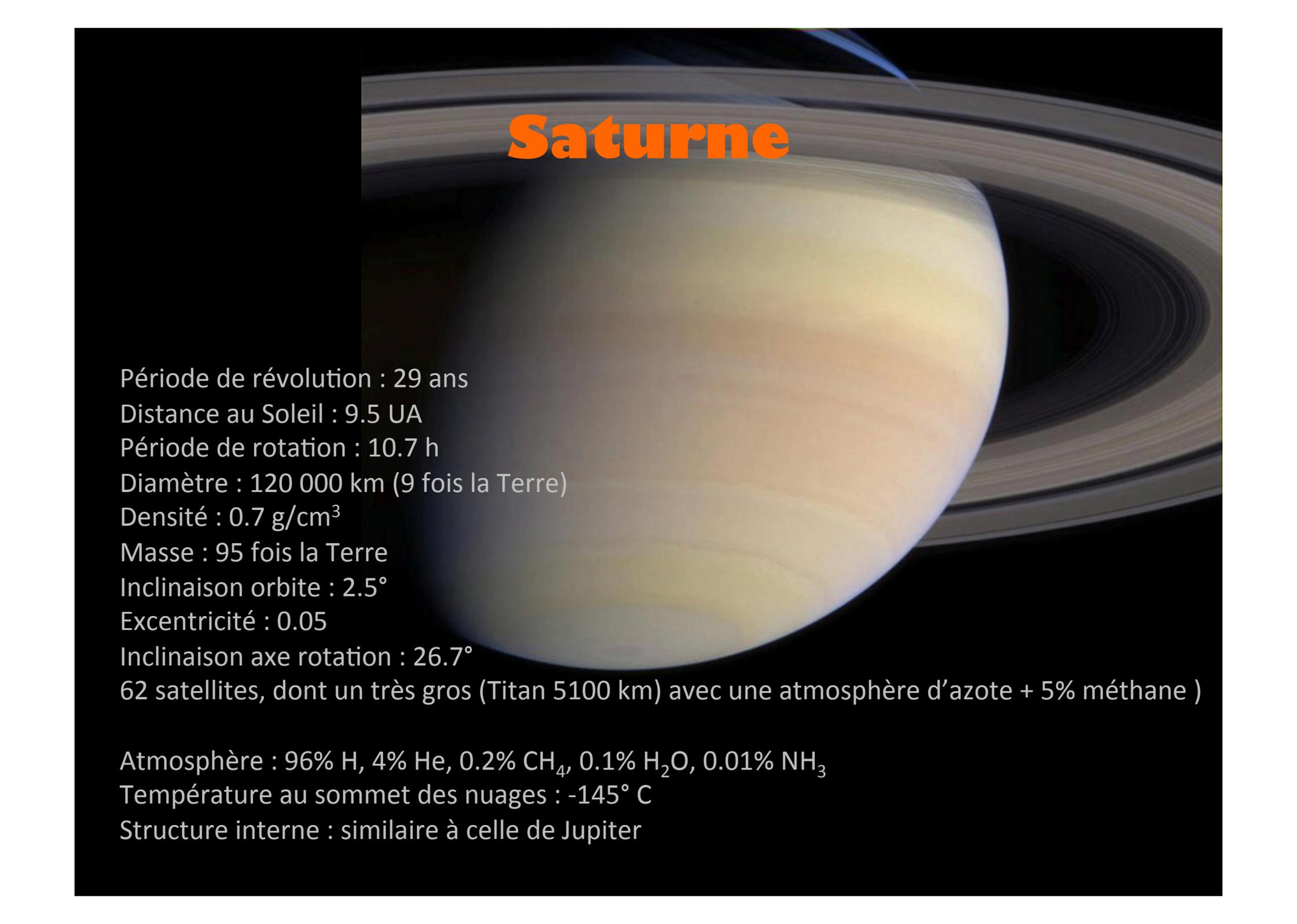
63 satellites dont 4 gros (3000-5000 km)

Atmosphère : 86 % H, 13% He, 0.1% NH<sub>4</sub>,  
0.1% H<sub>2</sub>O, 0.02% NH<sub>3</sub>

Temperature au sommet  
des nuages : -145° C

Structure : petit noyau  
rocheux, épais manteau  
d'hydrogène métallique  
puis liquide.





# Saturne

Période de révolution : 29 ans

Distance au Soleil : 9.5 UA

Période de rotation : 10.7 h

Diamètre : 120 000 km (9 fois la Terre)

Densité : 0.7 g/cm<sup>3</sup>

Masse : 95 fois la Terre

Inclinaison orbite : 2.5°

Excentricité : 0.05

Inclinaison axe rotation : 26.7°

62 satellites, dont un très gros (Titan 5100 km) avec une atmosphère d'azote + 5% méthane )

Atmosphère : 96% H<sub>2</sub>, 4% He, 0.2% CH<sub>4</sub>, 0.1% H<sub>2</sub>O, 0.01% NH<sub>3</sub>

Température au sommet des nuages : -145° C

Structure interne : similaire à celle de Jupiter

# La première découverte



Uranus fut découverte visuellement, par hasard, par l'astronome anglais William Herschel en 1781, aidée par sa sœur Caroline, grâce à un petit télescope de sa propre fabrication (15cm de diamètre et 2m de focale).

Elle avait été vue en 1690 par l'anglais Flamsteed et en 1750 et 1769 par le français Lemonnier, mais prise pour une étoile.

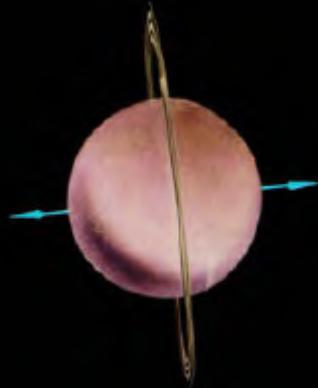
# Uranus

Distance : 19 UA\*

Période de révolution : 84 ans

Inclinaison axe de rotation : **98°**

Densité 1.27 g/cm<sup>3</sup>



Masse : 14.5 fois la Terre

Inclinaison orbite : 0.8°

Cœur rocheux, épais manteau de glaces et atmosphère d'hydrogène et d'hélium avec traces d'eau, ammoniac et méthane

27 satellites naturels, dont 4 assez gros (1200-1500 km)



Température au sommet des nuages : -220° C

# D'autres découvertes



Un astre nouveau fut découvert visuellement par accident par l'italien Giuseppe Piazzi en 1801 à Palerme (Sicile), nommé **Céres** (déesse de l'agriculture, des moissons et de la fécondité), situé entre les orbites de Mars et de Jupiter.

Au début il fut considéré comme une nouvelle planète. Mais par la suite, trois autres objets similaires furent découverts entre 1802 et 1807 : **Pallas**, **Juno** et **Vesta**, situés à la même distance du Soleil.

Autant d'objets ensemble conduirent les astronomes à les désigner par le nom astéroïde, «comme une étoile».

On connaît actuellement plus d'un demi-million d'objets dans cette zone, appelée la **ceinture des astéroïdes**.

Céres est maintenant classée « planète naine ».

# Céres : une planète naine

Diamètre : 950 km  
Période : 4,6 ans  
Distance : 2,8 UA  
Masse : 5% de la Lune



# Une découverte calculée



Neptune fut découverte par le calcul. Les perturbations dans le mouvement d'Uranus permirent au français **Urbain Le Verrier** de prédire l'existence d'une nouvelle planète plus lointaine qui fut effectivement observée en 1846 par l'allemand **Galle** à Berlin.

Elle avait été vue par Galilée en 1612 et 1613 mais prise pour une étoile.

Des très petites irrégularités dans le mouvement d'Uranus et de Neptune paraissaient indiquer que d'autres objets plus lointains pouvaient exister...

# Neptune



Distance : 30 UA

Période de révolution :  
165 ans

Inclinaison axe de  
rotation : 30°

Masse : 17 fois la Terre

Inclinaison orbite : 1.7°

Température au sommet des nuages : -220° C

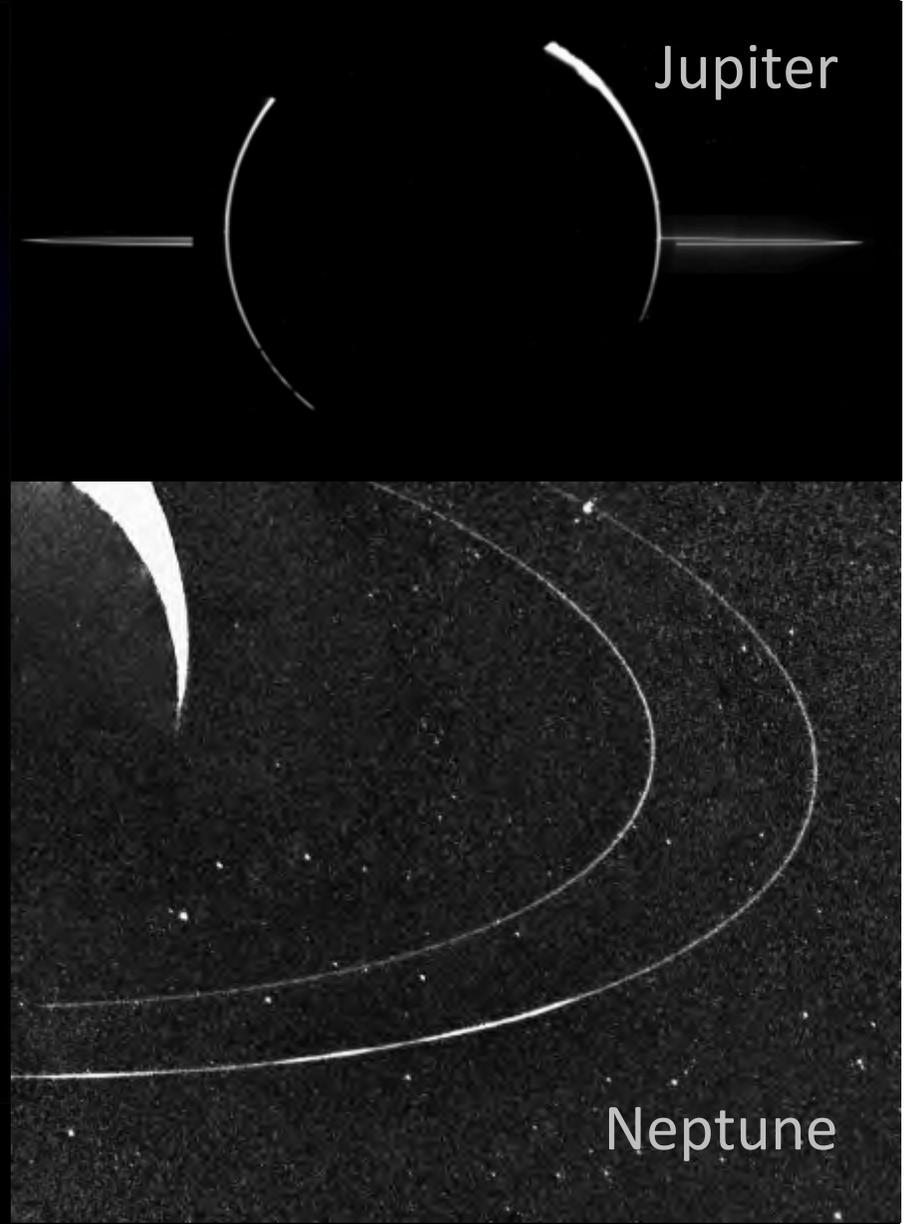
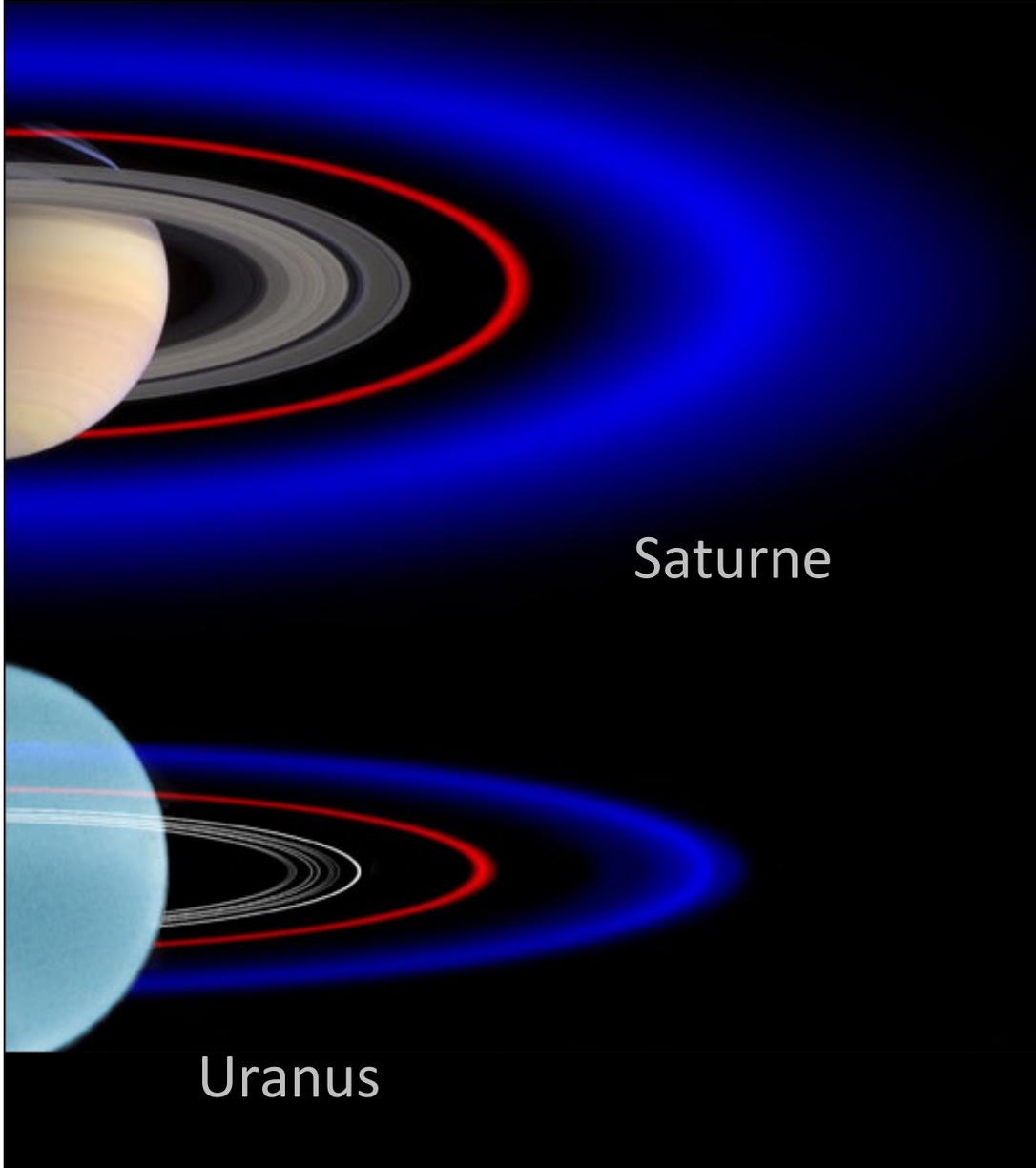
Densité 1.64 g/cm<sup>3</sup>

Même structure  
interne que celle  
d'Uranus :

Cœur rocheux, épais  
manteau de glaces et  
atmosphère  
d'hydrogène et  
helium avec traces  
d'eau, ammoniacque  
et méthane

13 satellites naturels  
dont Triton est de  
loin le plus gros (2700  
km)

# Les anneaux



# Pluton est une planète naine



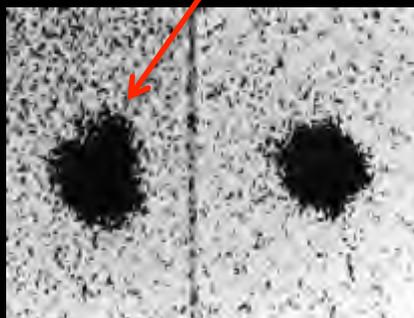
Pluton fut découverte en 1930 lors d'une recherche systématique du ciel par l'américain **Clyde Tombaugh** pour trouver l'hypothétique planète suspectée de provoquer les irrégularités du mouvement de Neptune

Depuis 1992, plusieurs autres objets à la même distance du Soleil que Pluton ont été découverts, dans ce qu'on appelle la **ceinture de Kuiper**.

Pluton est maintenant classée « planète naine »

# Pluton : petite mais pas seule

Image de Pluto (à gauche)  
lors de la découverte de  
**Charon** en 1978 avec un  
téléscope en Arizona



Charon

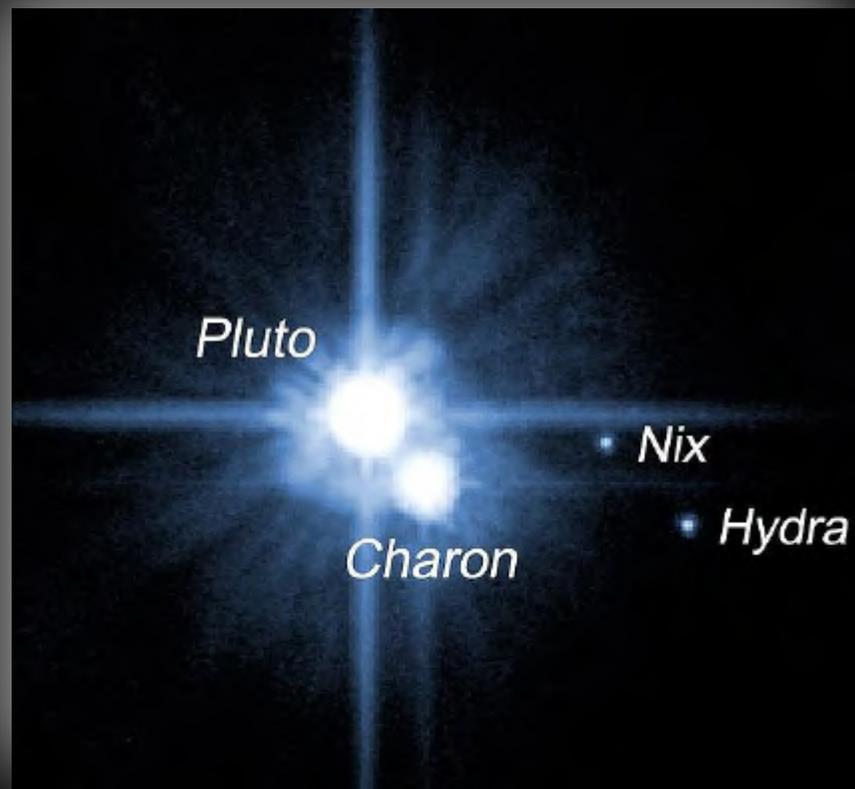


Masse : 2.2% de la Lune  
Période(s) : 6.39 jours  
Inclinaison orbite : 99°

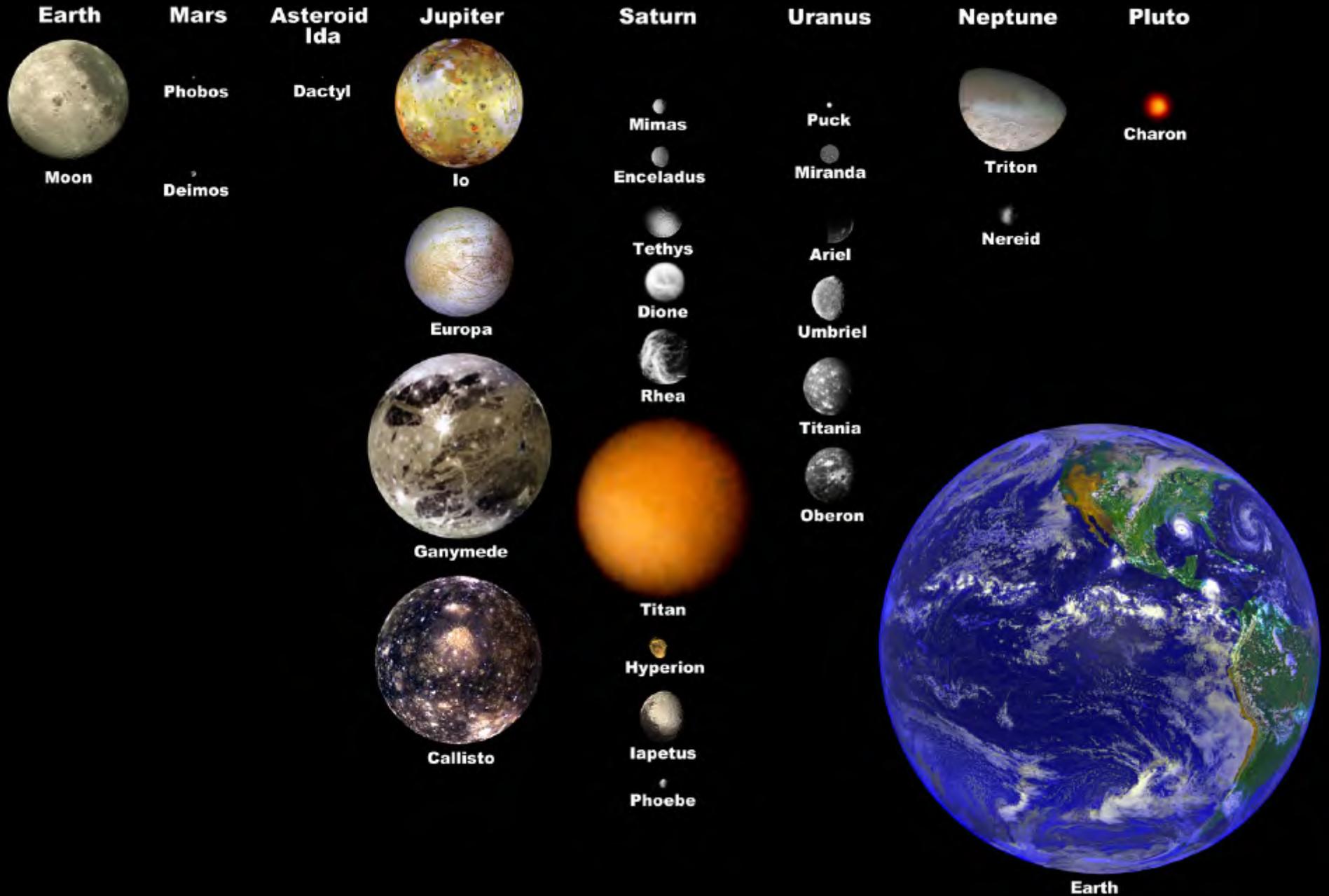


Pluton

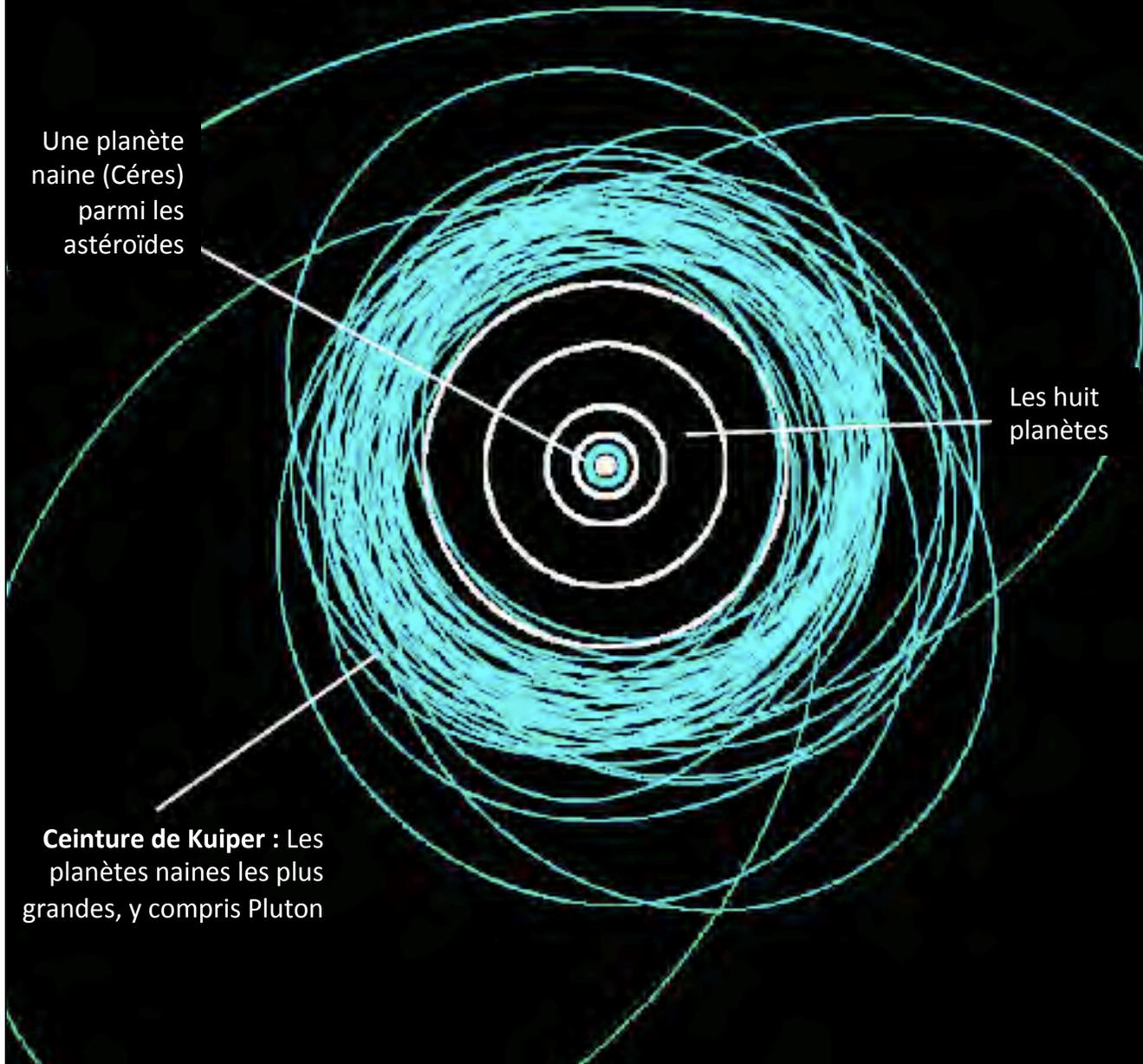
Période orbitale : 248 ans  
Distance : 39 UA  
Excentricité : 0.25  
Inclinaison orbite : 17°  
Diamètre : 2320 km (18% de la Terre)  
Masse : 18 % de la Lune  
Densité : 2.0 g/cm<sup>3</sup>  
Période de rotation : 6.39 jours  
Inclinaison axe rotation : 120°



# Les satellites



# Les planètes naines



La **ceinture de Kuiper** est une zone située au delà de l'orbite de Neptune, entre 30 et 55 UA, semblable à la ceinture des astéroïdes mais 20 fois plus étendue.

Elle pourrait contenir plus de 70 000 objets. C'est là que se trouvent les planètes naines.

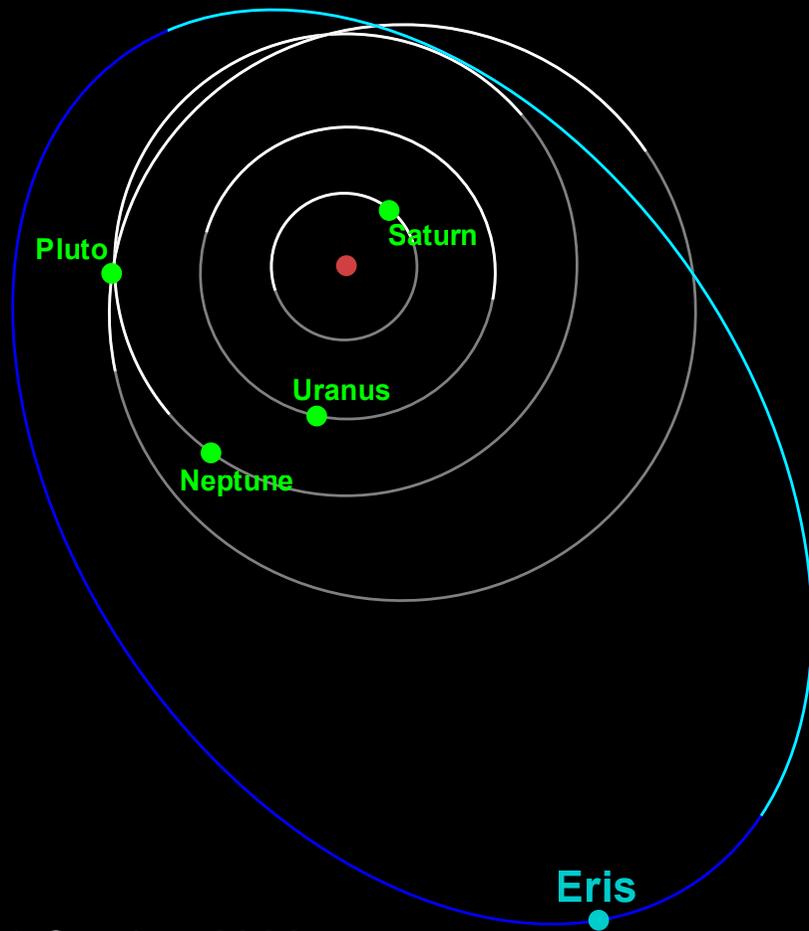
On appelle aussi ces objets des *Objets Trans Neptuniens*. On en connaît plus d'une centaine.

La ceinture de Kuiper est probablement aussi la source des comètes périodiques.

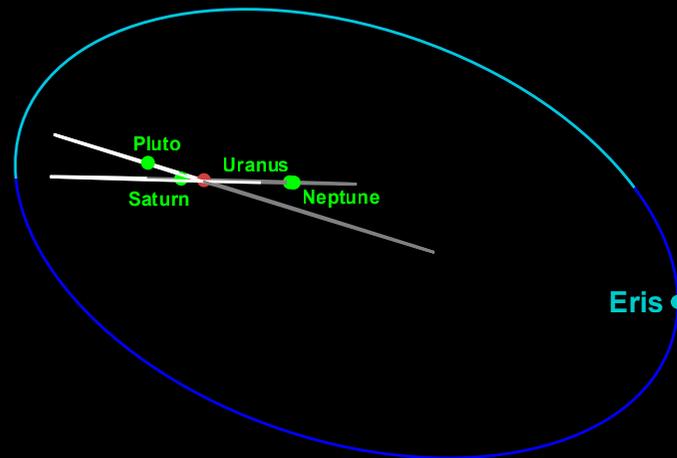
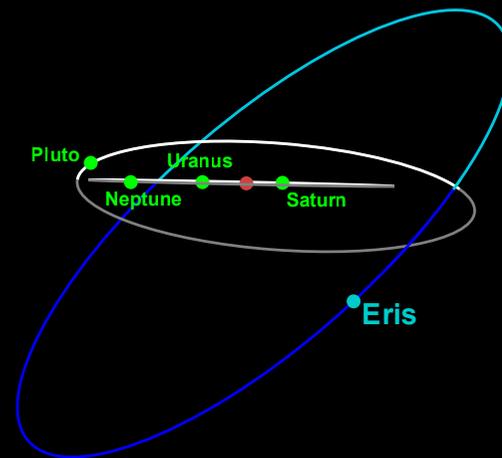
# Les principales planètes naines

Nom	Distance (AU)	Diamètre (km)	Période (ans)	Incl. (°)	Exc.	Déité (peuple)
Orcus	39.34	1100	245.2	20.6	0.23	Enfer (Romains)
Pluton	39.53	2300	248.1	17.1	0.25	Enfer (Grecs)
Ixion	39.65	980	250.0	19.6	0.24	Grecque
Huya	39.76	480	247.7	15.5	0.28	Pluie (Wayuu)
Varuna	42.90	780	283.2	17.2	0.06	Hindoue
Haumea	43.31	2000	284.8	28.2	0.19	Fertilité (Hawaii)
Quaoar	43.58	1290	285.7	8.0	0.04	Création (Tongva)
Makemake	45.66	1600	308	29.0	0.15	Création (Rapa Nui)
Eris	67.69	2300	557	44.2	0.44	Discorde (Grecs)
Sedna	486.0	1800	10500	11.9	0.85	Mer (Inuit)

# Orbite d'Eris



11 October 2006



## Orbit of Eris

(136199 Eris)

Perihelion: 37.77 AU

Aphelion: 97.56 AU

Orbital period: 557 years

Eccentricity: 0.44

Inclination: 44°

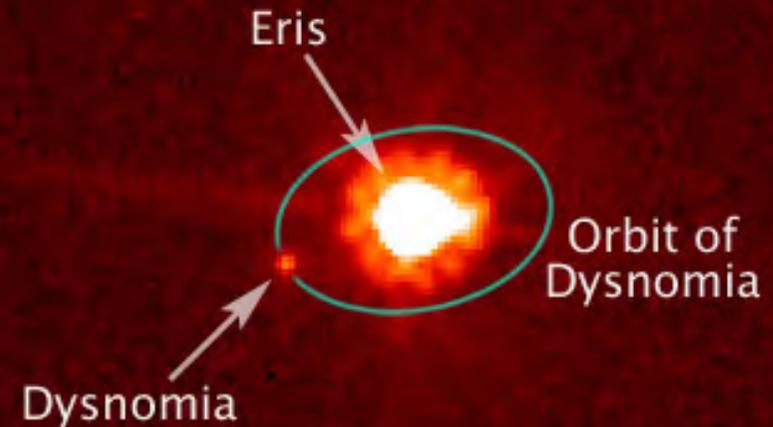
# Dysnomia : satellite d'Eris

Dwarf Planet Eris and Satellite Dysnomia • August 30, 2006

HST • ACS/HRC



Période de Dysnomia : 15.77 jours  
Masse d'Eris : 23 % de la Lune



50,000mi  
70,000km 1"



# Occultation d'Eris par une étoile



Cette occultation, observée le 6 novembre 2010, a permis de déterminer la taille d'Eris (2320-2350 km), guère plus petit que Pluton

# Les plus grands objets transneptuniens connus



**Éris**



**Pluton**



**Makemake**



**Haumea**



**Sedna**



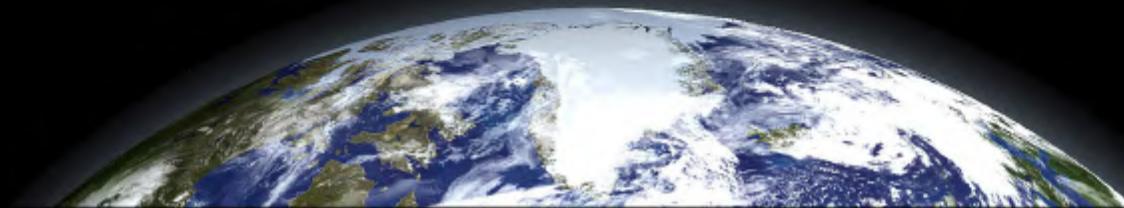
**Orcus**



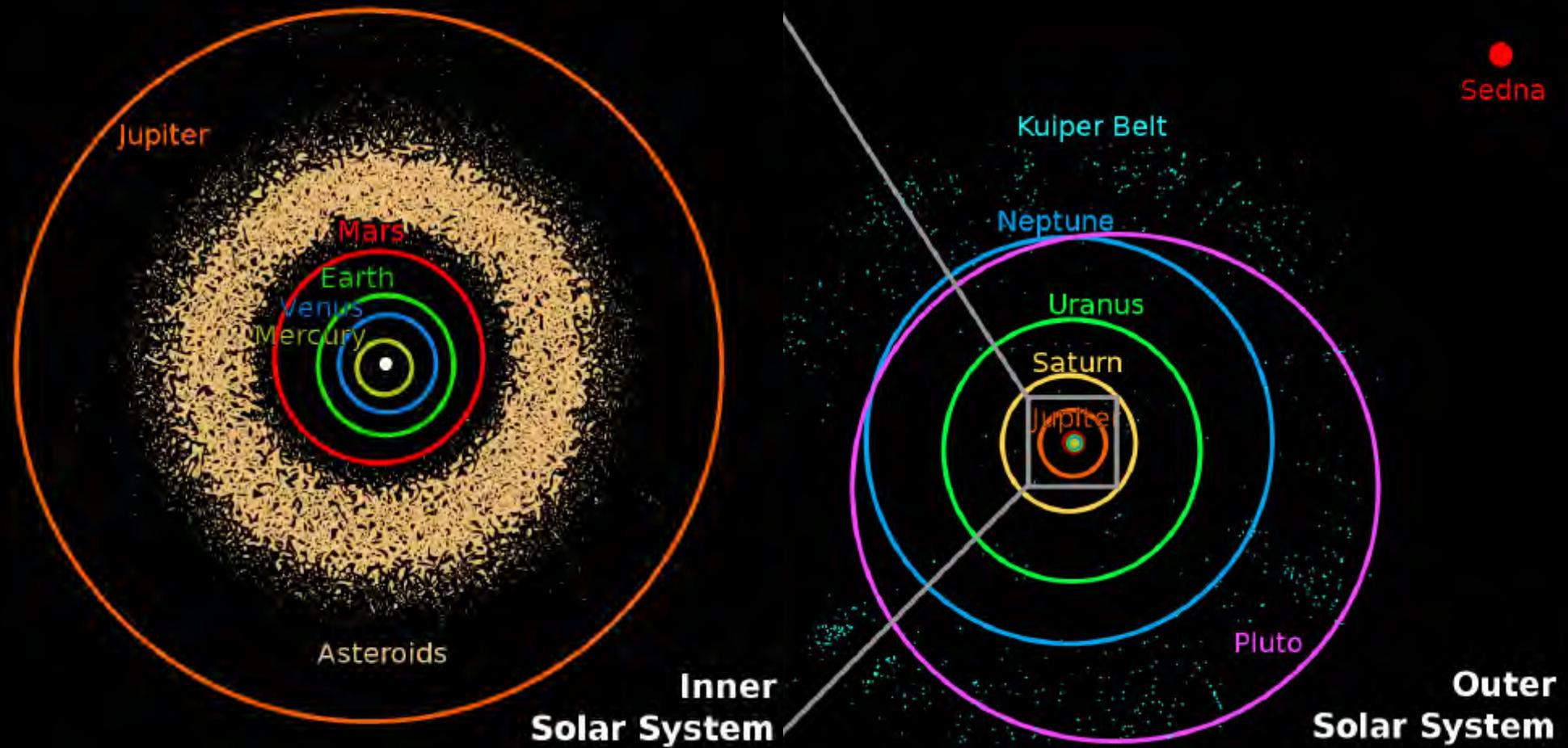
**Quaoar**



**Varuna**



# Vue de notre système solaire



# Sedna



Période : 10500 - 12000 ans

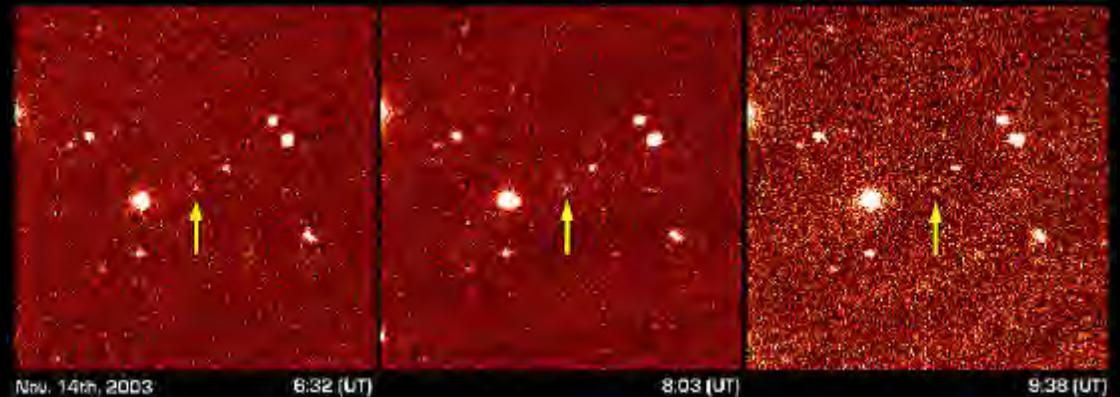
Distance : 76- 961 UA

Inclinaison :  $12^\circ$

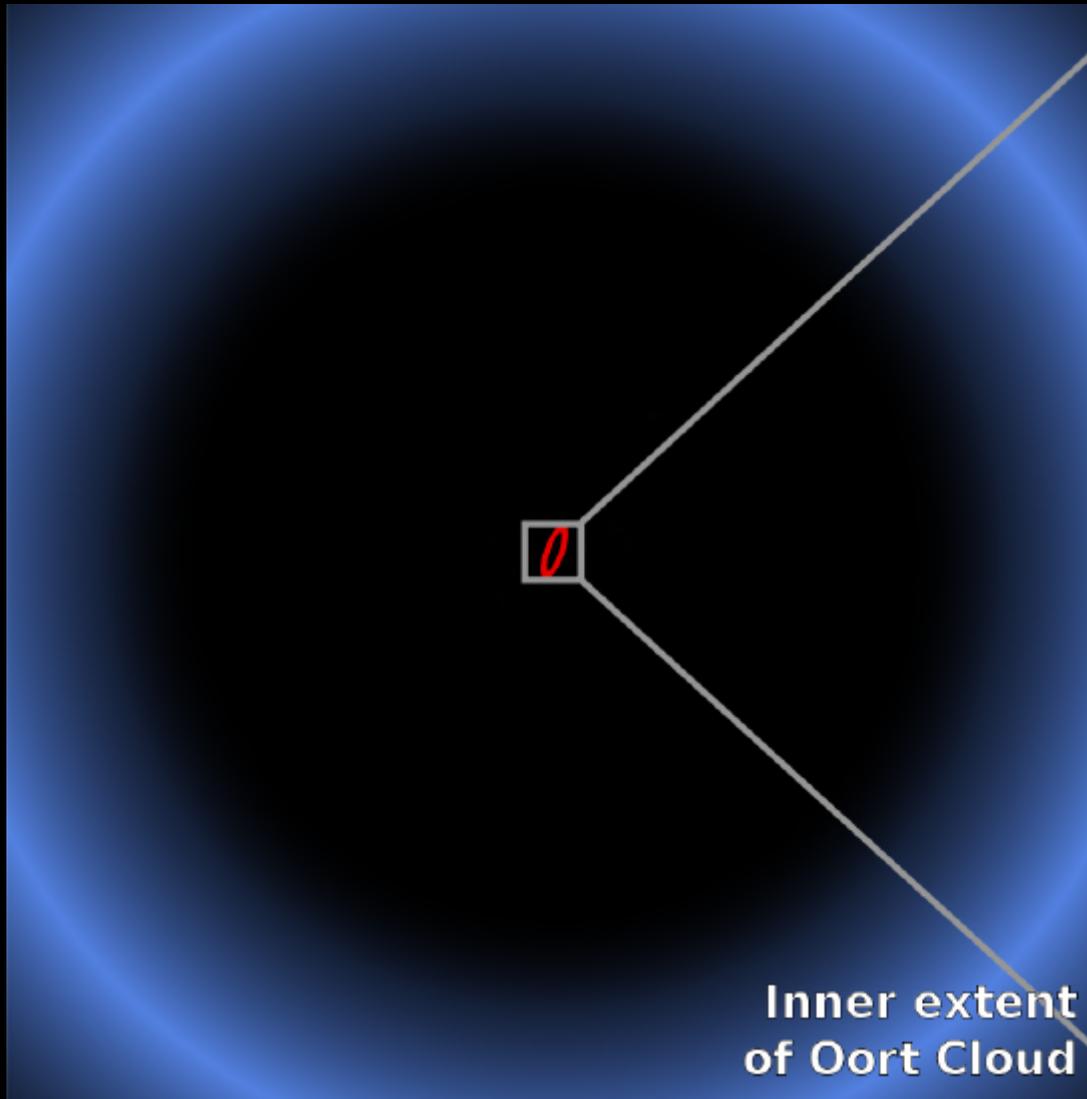
Excentricité : 0.86

Diamètre :  $\sim 1800$  km

Masse : 5% de la Lune



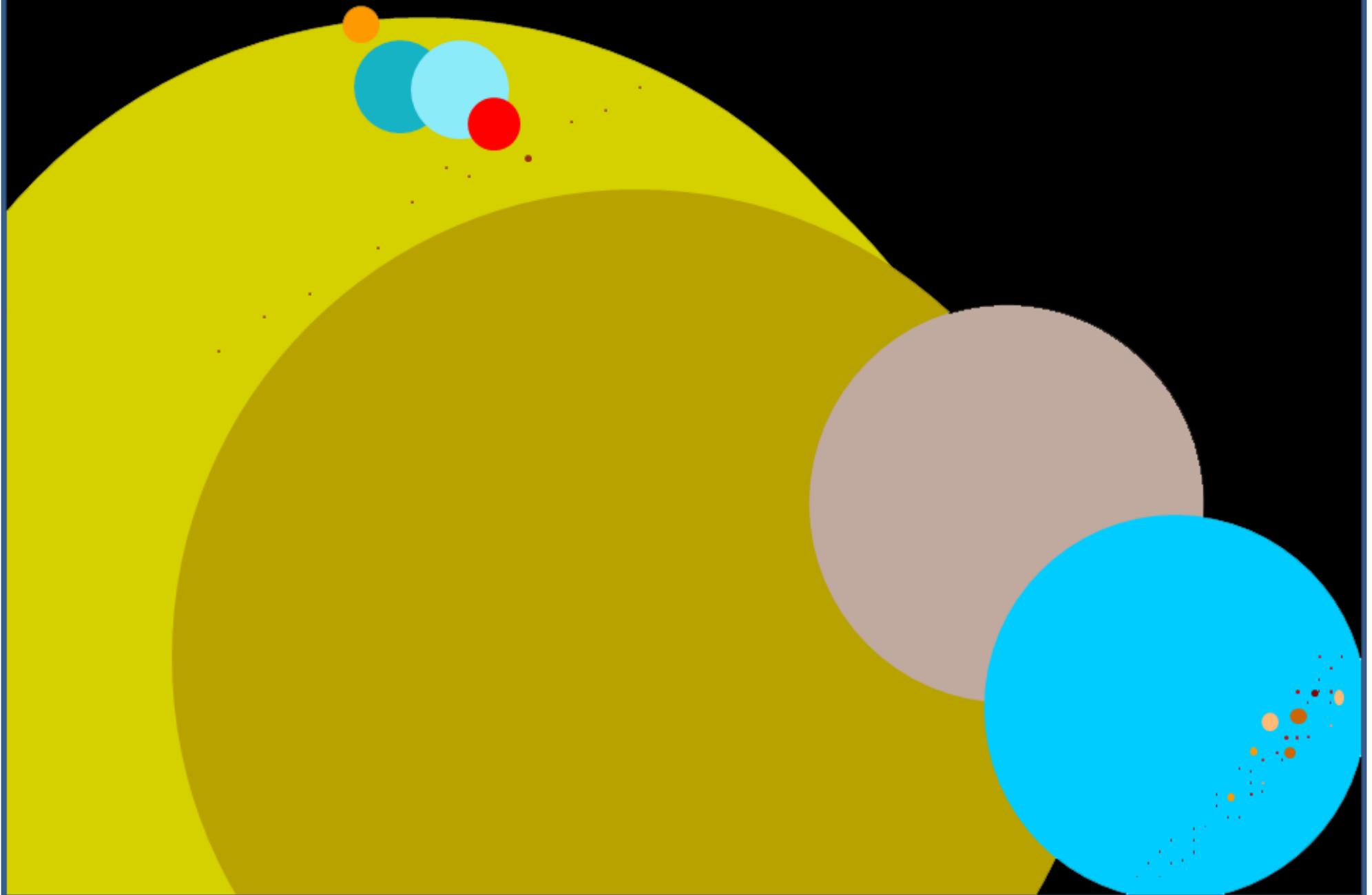
# Le Nuage de Oort et les comètes



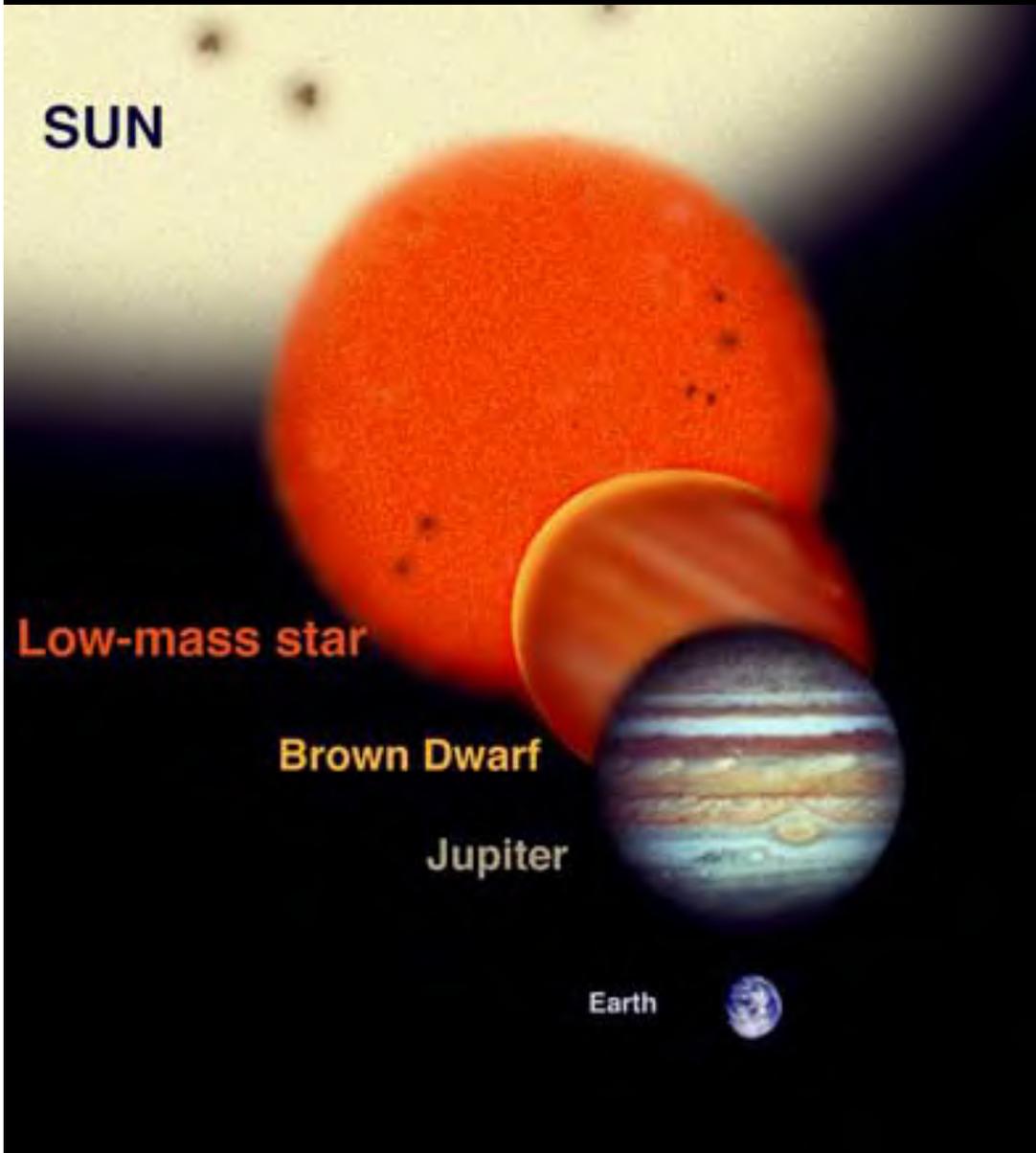
C'est un hypothétique **réservoir de comètes** à longue période situé au delà de la **ceinture de Kuiper**, entre 5000 et 100000 Unités Astronomiques (UA : la distance Soleil-Terre = 150 millions de km).

La partie externe serait la limite de la zone d'influence gravitationnelle du Soleil donc aussi exposée à l'influence d'autres étoiles.

# Tailles respectives des planètes



# Entre étoiles et planètes



Les étoiles produisent de l'énergie dans leur intérieur par de réactions thermonucléaires (fusion de l'hydrogène pour produire de l'hélium).

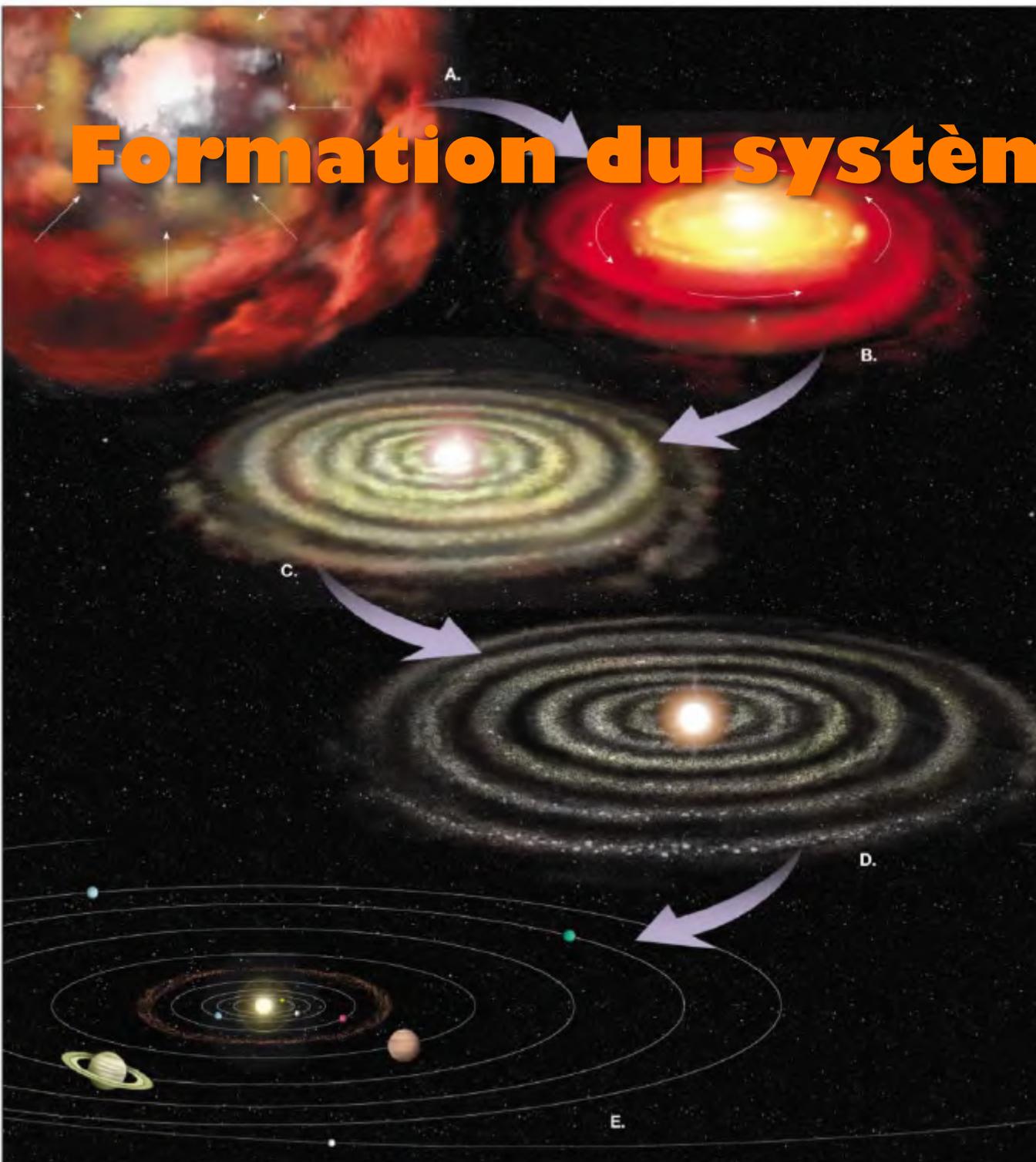
Les planètes n'ont pas de source interne d'énergie autre que la contraction gravitationnelle ou la radioactivité.

Les étoiles les plus petites sont appelées naines brunes. Elles brûlent du deutérium à la place de l'hydrogène.

Elles peuvent avoir une masse entre 80 et 13 fois celle de Jupiter.

Tout objet moins massif que 13 fois Jupiter est considéré comme une planète.

# Formation du système solaire



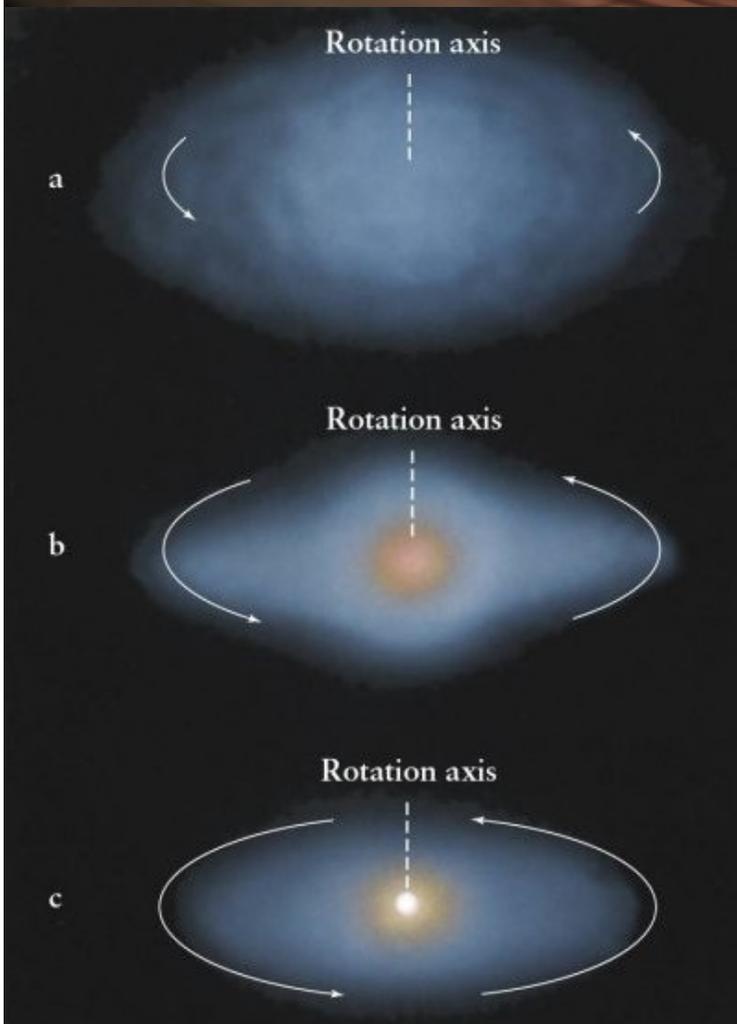
La formation d'une étoile s'accompagne de celle de ses planètes.

Condensation à partir d'un nuage de gaz interstellaire, hypothèse formulée par Laplace au 18<sup>ème</sup> siècle.

Formation d'un disque avec une proto-étoile au centre.

Condensation de la matière du disque en granules, puis en proto-planètes.

# Tourner dans le même sens



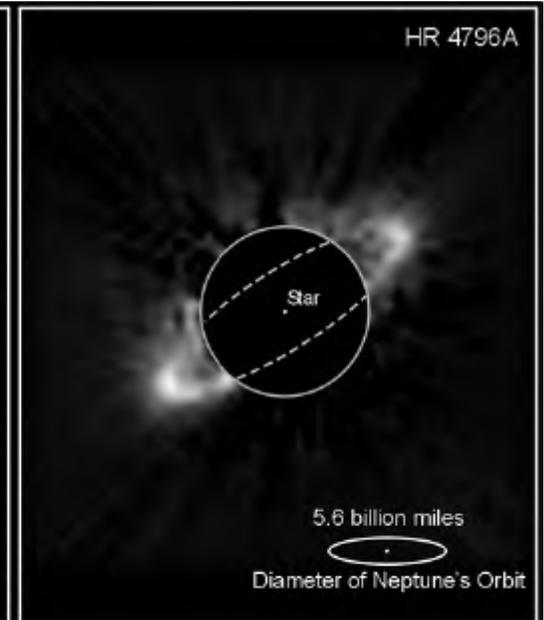
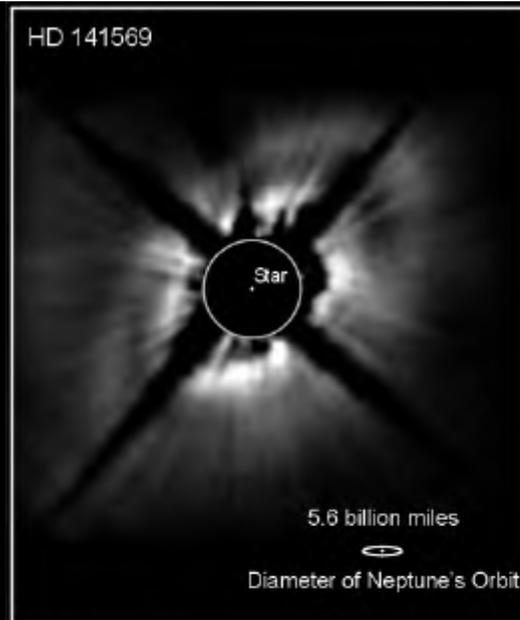
Toutes les planètes se déplacent sur leurs orbites dans le même sens.

A deux exceptions près (Venus et Uranus) elles tournent sur leur axe aussi dans ce même sens.

Et le Soleil tourne autour de son axe également dans le même sens.

Ces faits sont expliqués par le modèle de formation à partir d'un disque en rotation.

# On observe des disques autour des étoiles



## Dust Disks around Stars

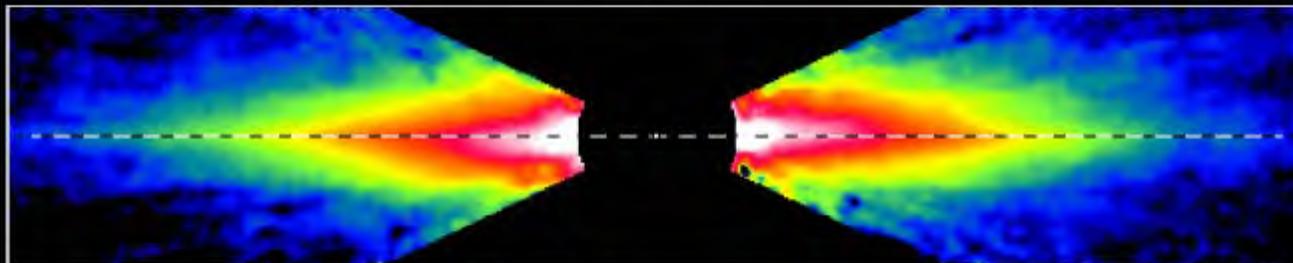
PRC99-03 • STScI OPO • January 8, 1999  
 B. Smith (University of Hawaii), G. Schneider (University of Arizona),  
 E. Becklin and A. Weinberger (UCLA) and NASA

HST • NICMOS



Size of Pluto's Orbit

Ce sont des disques ayant des tailles typiques de systèmes planétaires.



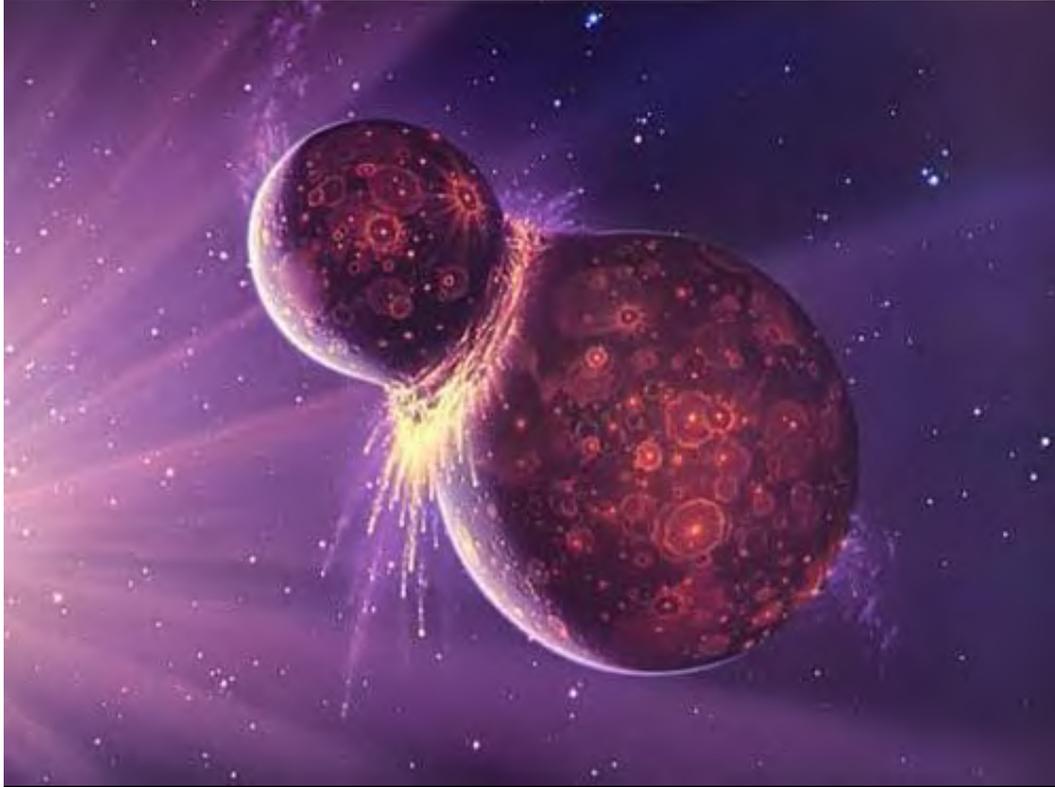
## Warped Disk • Beta Pictoris

HST • WFPC2

PRC96-02 • ST ScI OPO • January 17, 1995 • C. Burrows and J. Krist (ST ScI), WFPC2 IDT, NASA

Résultats de collisions ou des planètes en cours de formation ?

# Rôle des collisions



# Astéroïdes sculptés

Dactyl  
1.2 km  
Galileo, 1993

243 Ida - 58.8 × 25.4 × 18.6 km  
Galileo, 1993

9969 Braille  
2.1 × 1 × 1 km  
Deep Space 1, 1999

5535 Annefrank  
6.6 × 5.0 × 3.4 km  
Stardust, 2002

2867 Steins  
5.9 × 4.0 km  
Rosetta, 2008



433 Eros - 33 × 13 km  
NEAR, 2000

25143 Itokawa  
0.5 × 0.3 × 0.2 km  
Hayabusa, 2005



253 Mathilde - 66 × 48 × 44 km  
NEAR, 1997



951 Gaspra - 18.2 × 10.5 × 8.9 km  
Galileo, 1991



21 Lutetia - 132 × 101 × 76 km  
Rosetta, 2010



1P/Halley - 16 × 8 × 8 km  
Vega 2, 1986



19P/Borrelly  
8 × 4 km  
Deep Space 1, 2001



9P/Tempel 1  
7.6 × 4.9 km  
Deep Impact, 2005



81P/Wild 2  
5.5 × 4.0 × 3.3 km  
Stardust, 2004

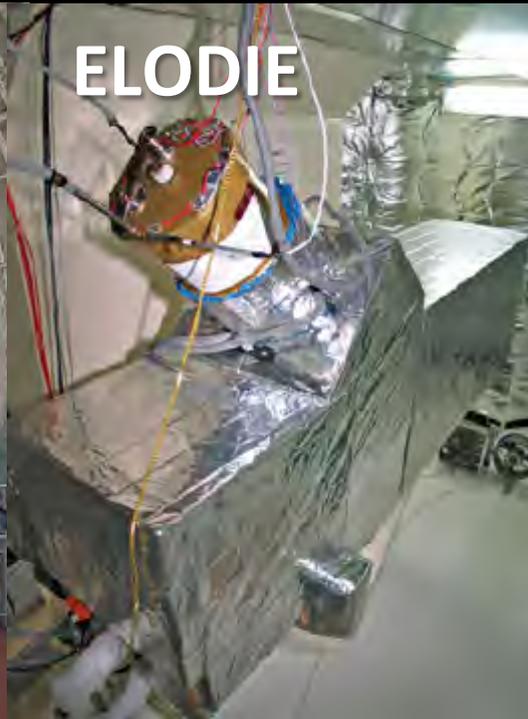
# La sonde NEAR près d'Eros



Dimensions : 33 x 13 x 13 km  
Période de rotation : 5h 16m

# **Les planètes d'ailleurs**

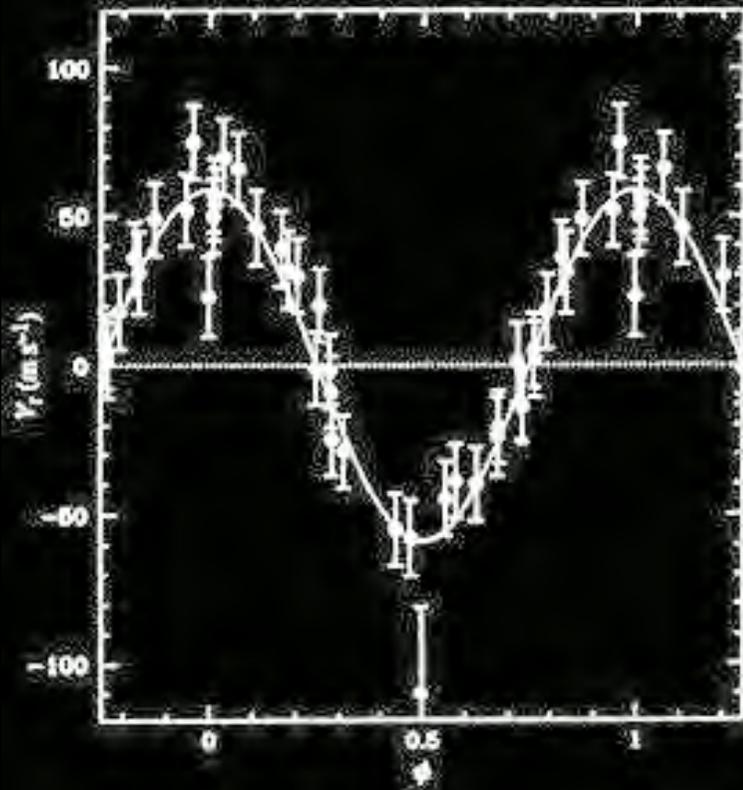
# La première planète extra-solaire



En 1995 les astronomes suisses Michel Mayor et Didier Queloz découvrent la première planète autour d'une autre étoile que le Soleil avec le spectrographe ELODIE au télescope de 193cm de l'Observatoire de Haute-Provence

# 51 Pégase b

Ils ont détecté, par effet Doppler spectroscopique, le mouvement réflex périodique de l'étoile 51 dans la constellation de Pégase dû à la présence d'un objet invisible proche ayant une masse comparable à celle de Jupiter, mais sur une orbite plus petite que celle de Mercure autour du Soleil. La période de révolution de l'exoplanète est de 4.2 jours



L'étoile 51 Peg, de magnitude 5.5, visible à l'œil nu sous un ciel pur sans pollution lumineuse, est très semblable à notre Soleil

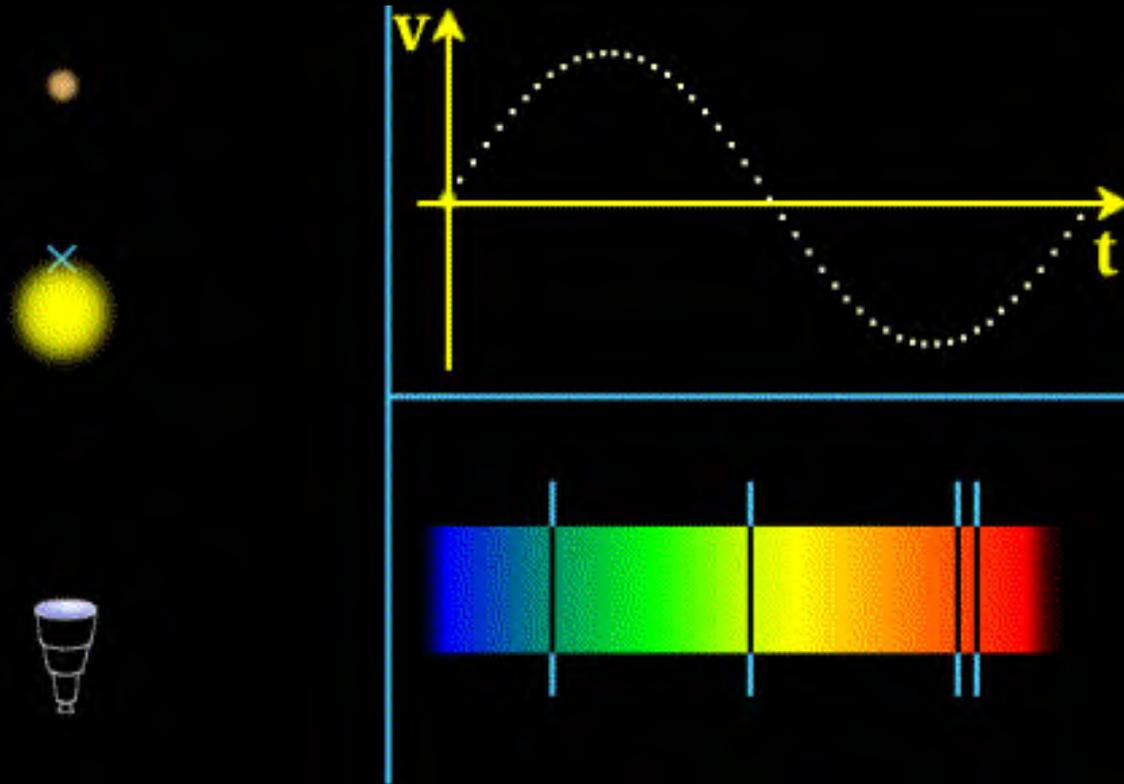
# SOPHIE

ELODIE n'existe plus. Les meilleurs spectrographes conçus pour la recherche d'exoplanètes actuellement en service sont SOPHIE à l'OHP et HARPS à l'ESO au Chili



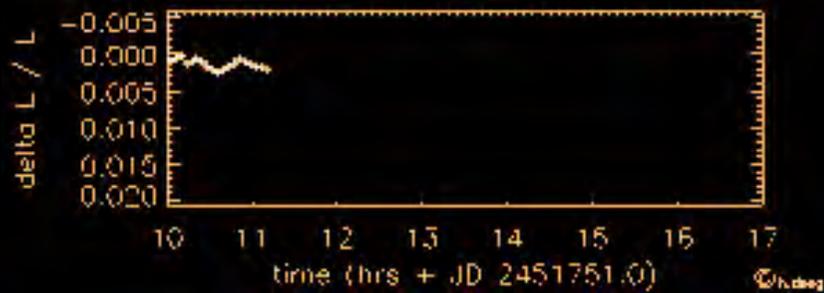
# HARPS

# Vitesses radiales

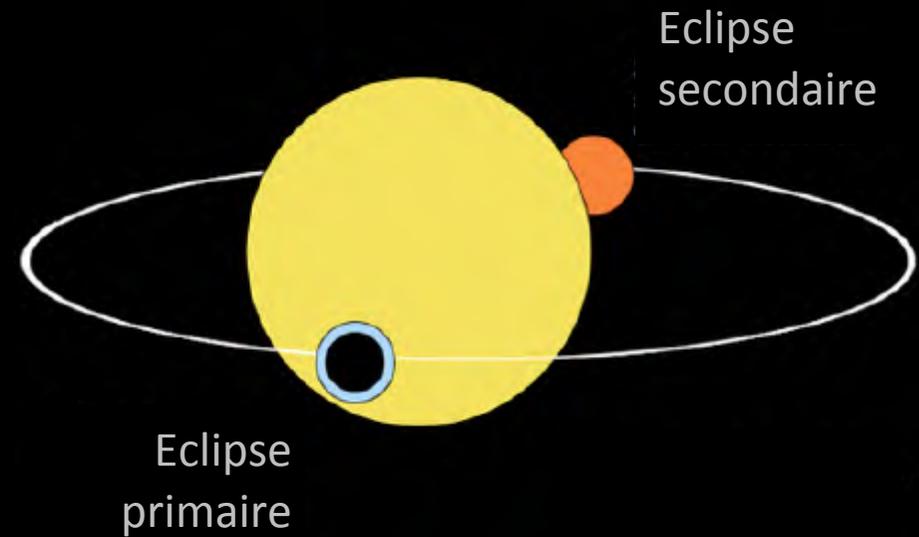
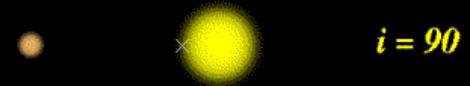


L'effet Doppler (le même principe utilisé par la police pour mesurer les excès de vitesse) est utilisé pour suivre le mouvement de l'étoile autour du centre de gravité étoile-planète

# Transits

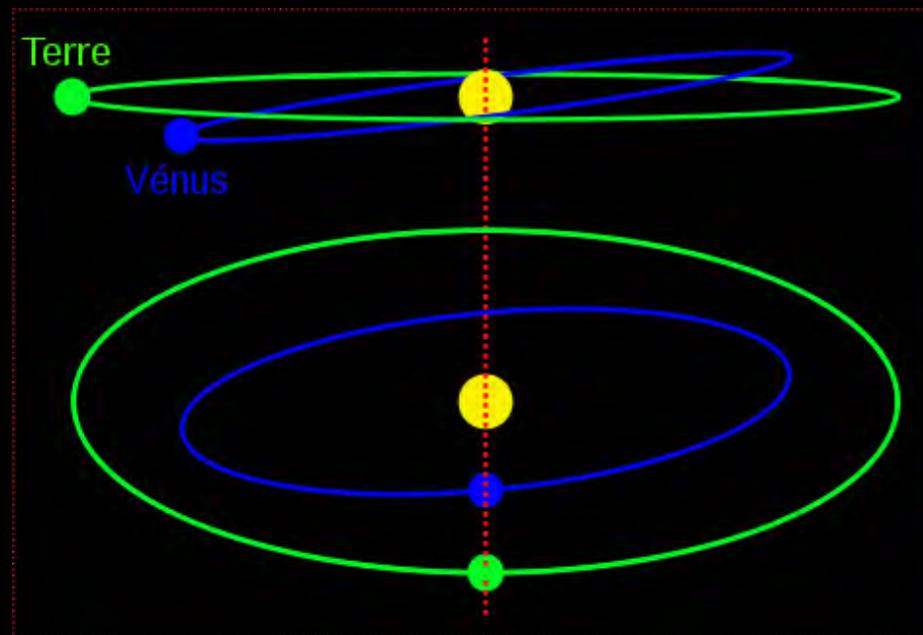
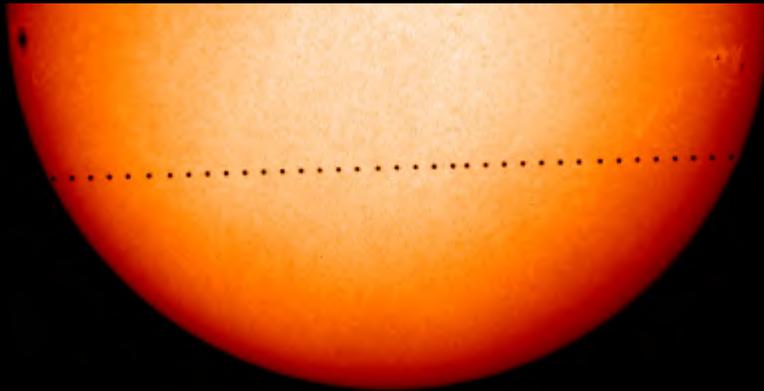


Simulation du transit d'une exoplanète sur son étoile



# Transits de Mercure et Vénus

Transit de Mercure le 8 novembre 2006

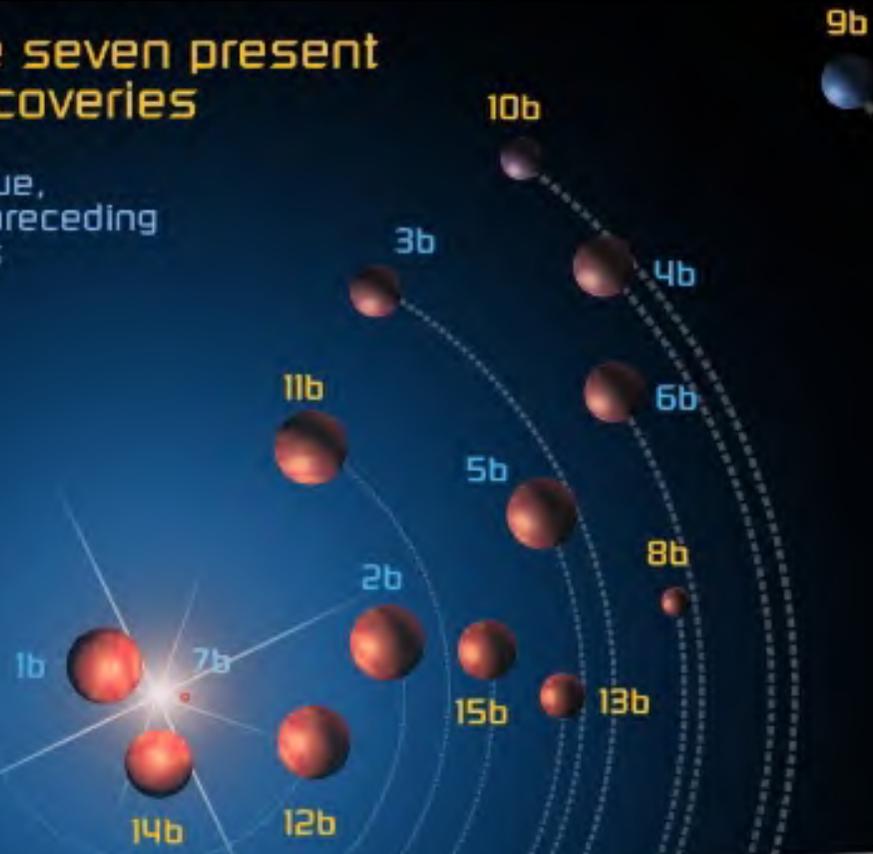


Transit de Vénus le 8 juin 2004  
*le prochain : 6 juin 2012*

# La mission CoRoT

The seven present discoveries

in blue,  
the preceding ones



# Moisson de CoRoT

Plusieurs Jupiters chauds, géants gazeux avec périodes  $< 4$  j  
CoRoT-1 b, CoRoT-2 b, CoRoT-5 b, CoRoT-11 b, CoRoT-12 b, CoRoT-13 b

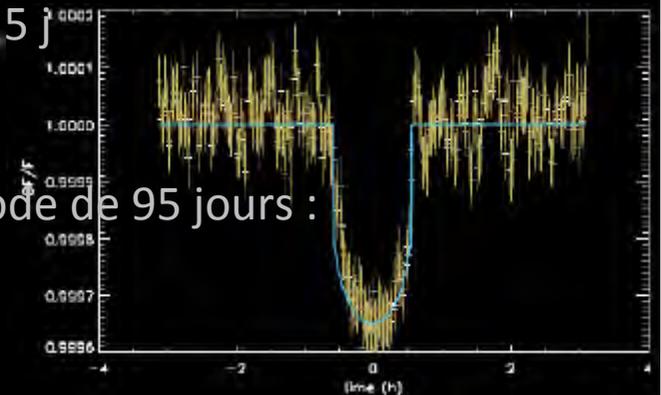
Les premières naines brunes en transit :  
CoRoT-3 b, CoRoT-15 b

La première super-Terre en transit :  
CoRoT-7 b (1.8 fois la Terre, mais à  $1000^{\circ}\text{C}$  !) Période : 20.4h

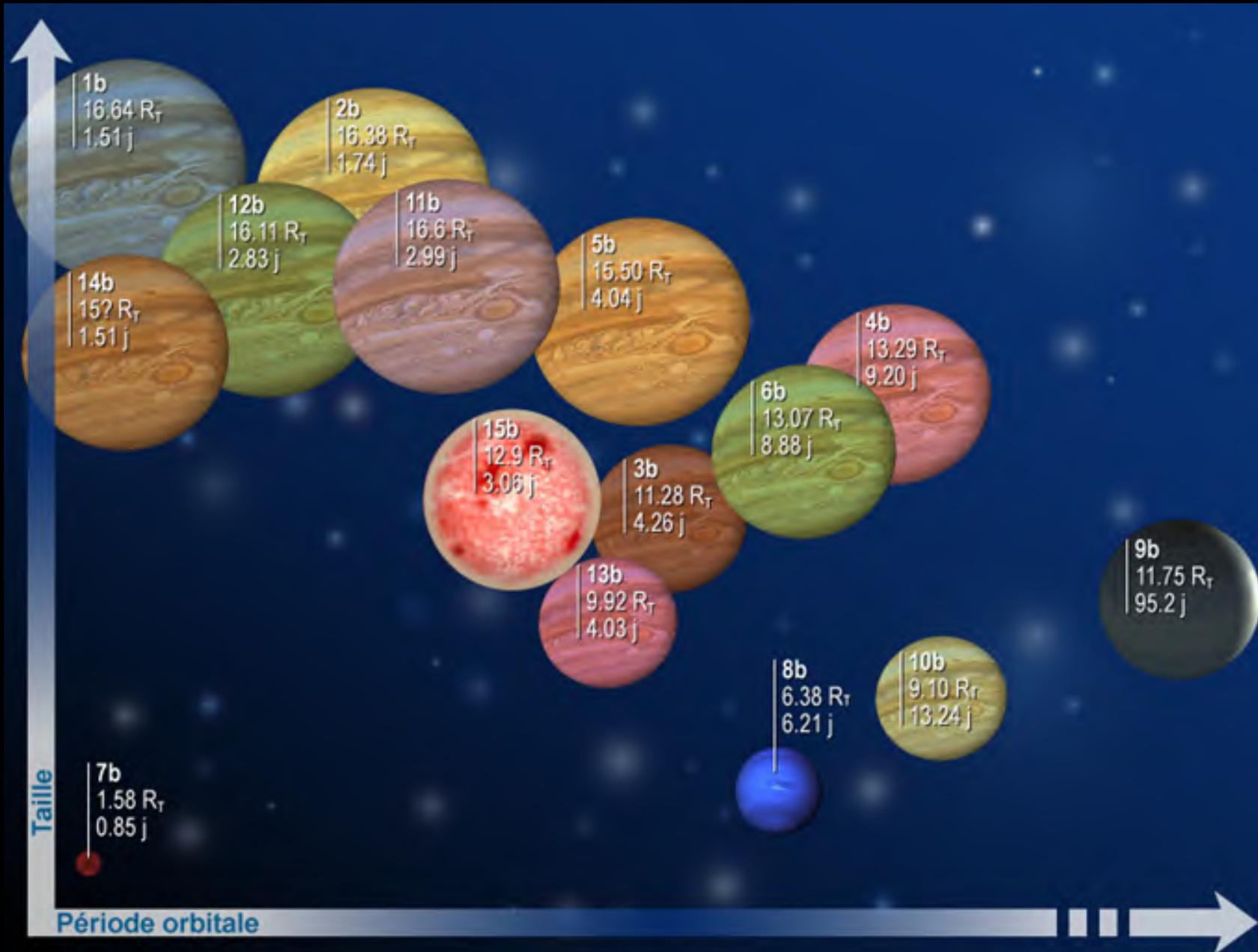
Un sous-Saturne dense et chaud :  
CoRoT-8 b

Plusieurs Jupiters tièdes, géants gazeux avec périodes  $> 5$  j  
CoRoT-4 b, CoRoT-6 b, CoRoT-10 b

Exoplanète ayant une température modérée, avec période de 95 jours :  
CoRoT-9 b



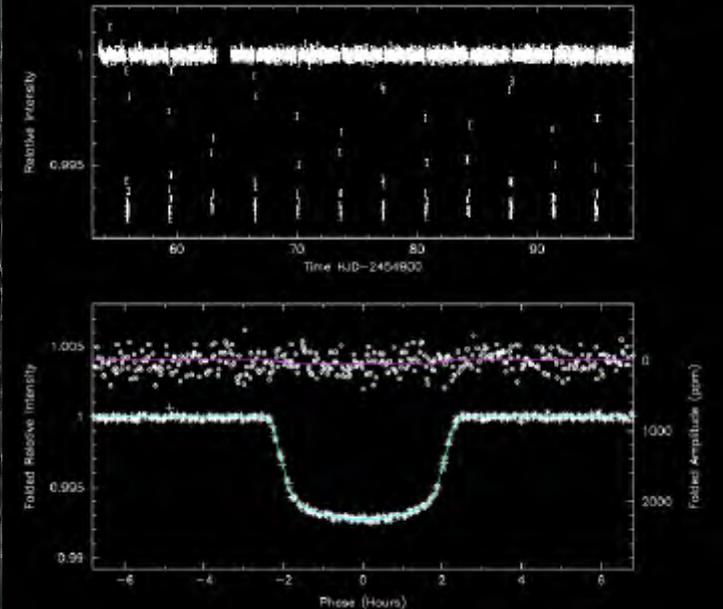
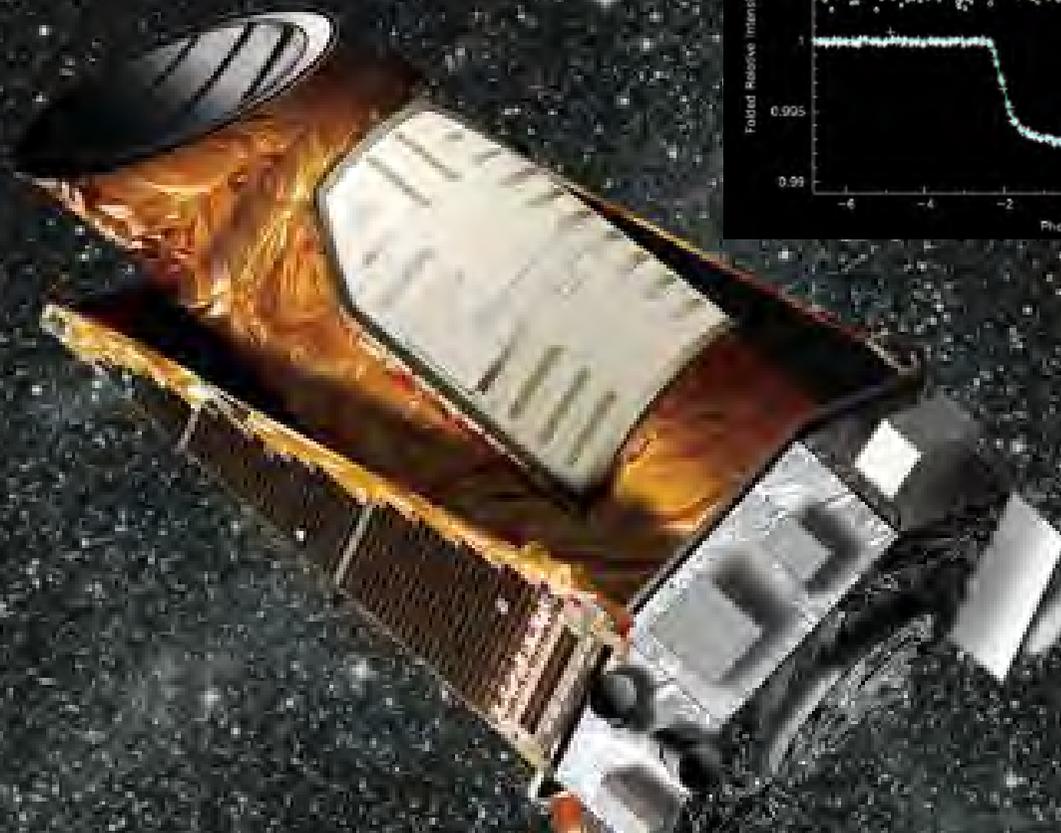
# Les planètes trouvées par CoRoT



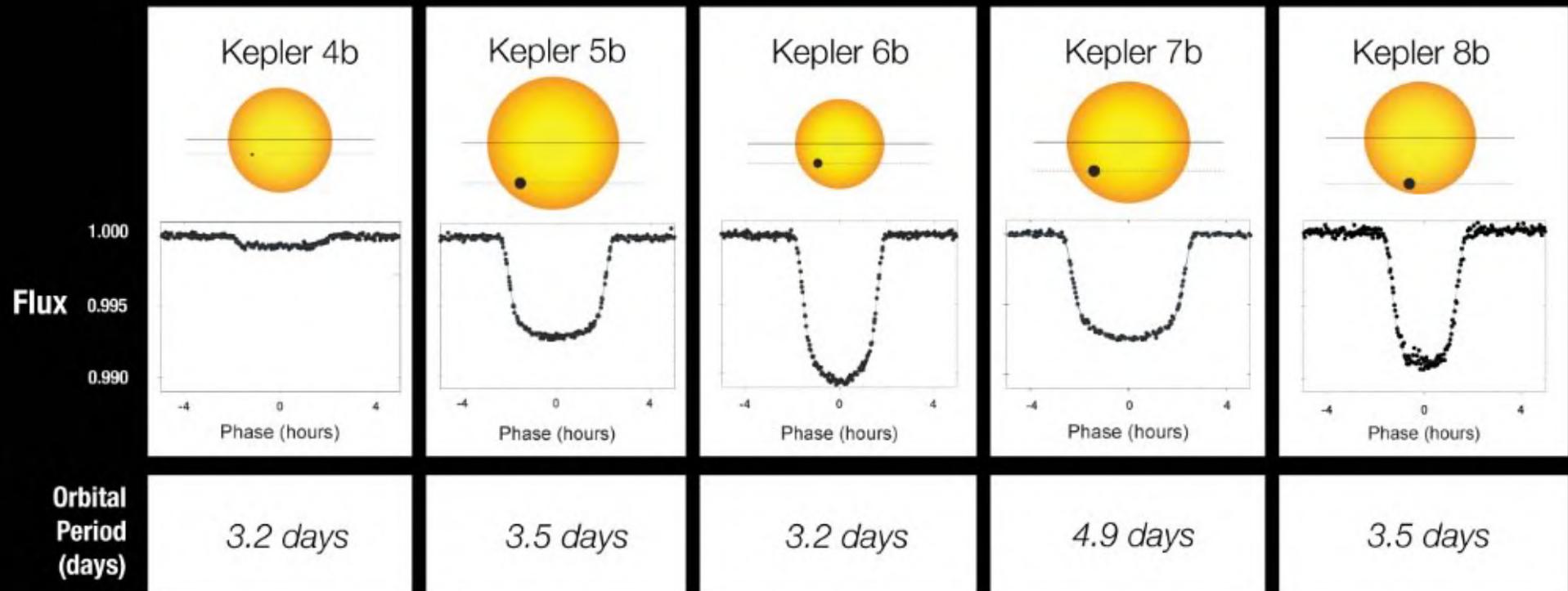
# La mission Kepler

Plus de 150 000 étoiles surveillées

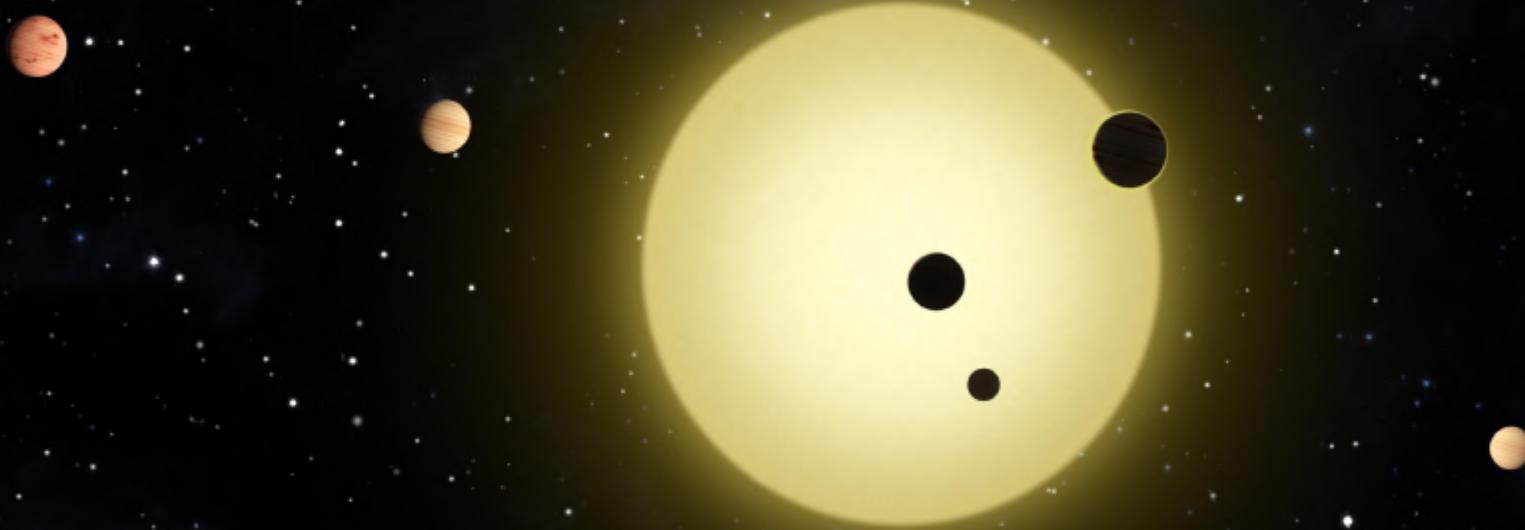
*Kepler*



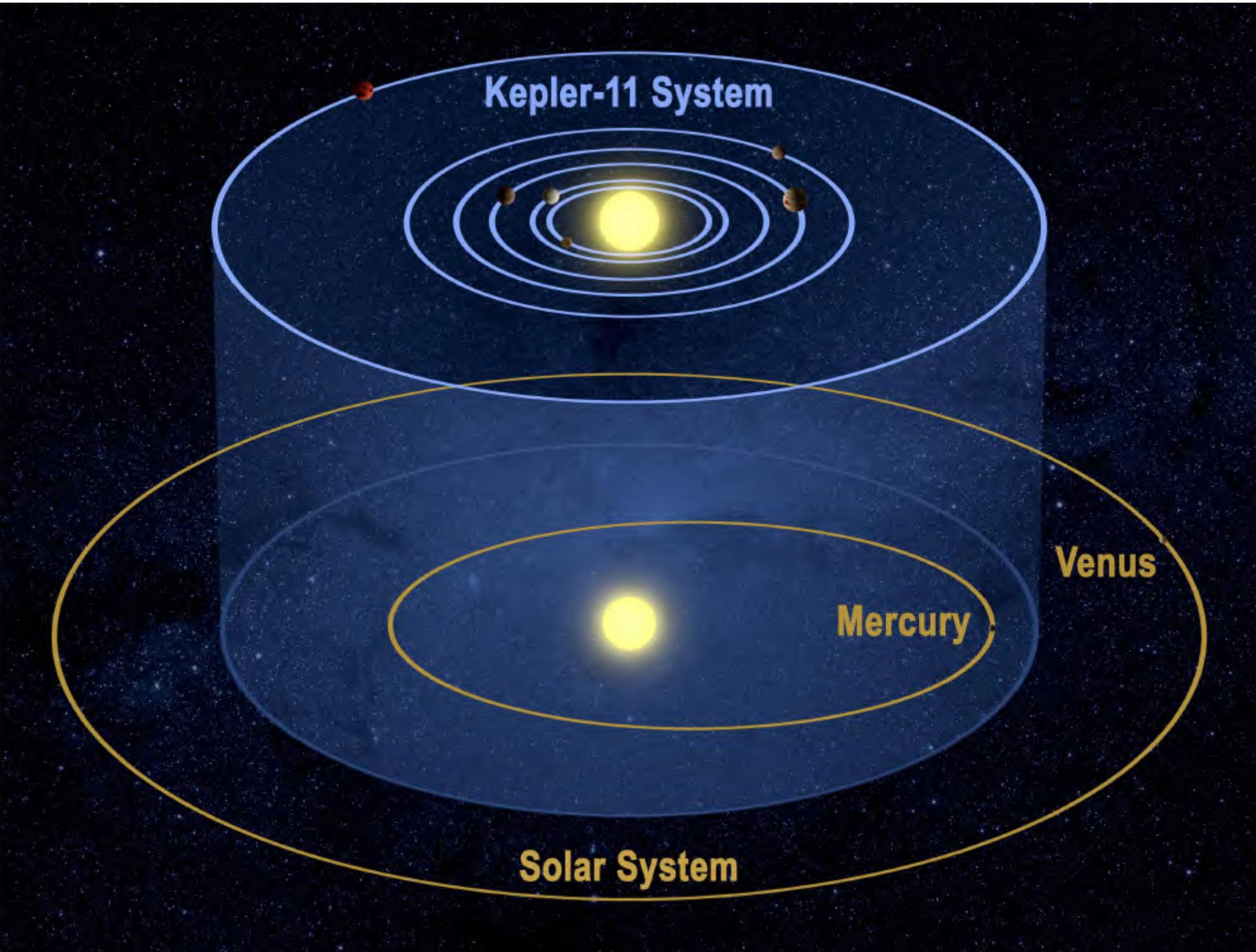
# Transits observés par Kepler



# **Le système Kepler-11 (vue d'artiste)**



SIX ou peut-être SEPT planètes !



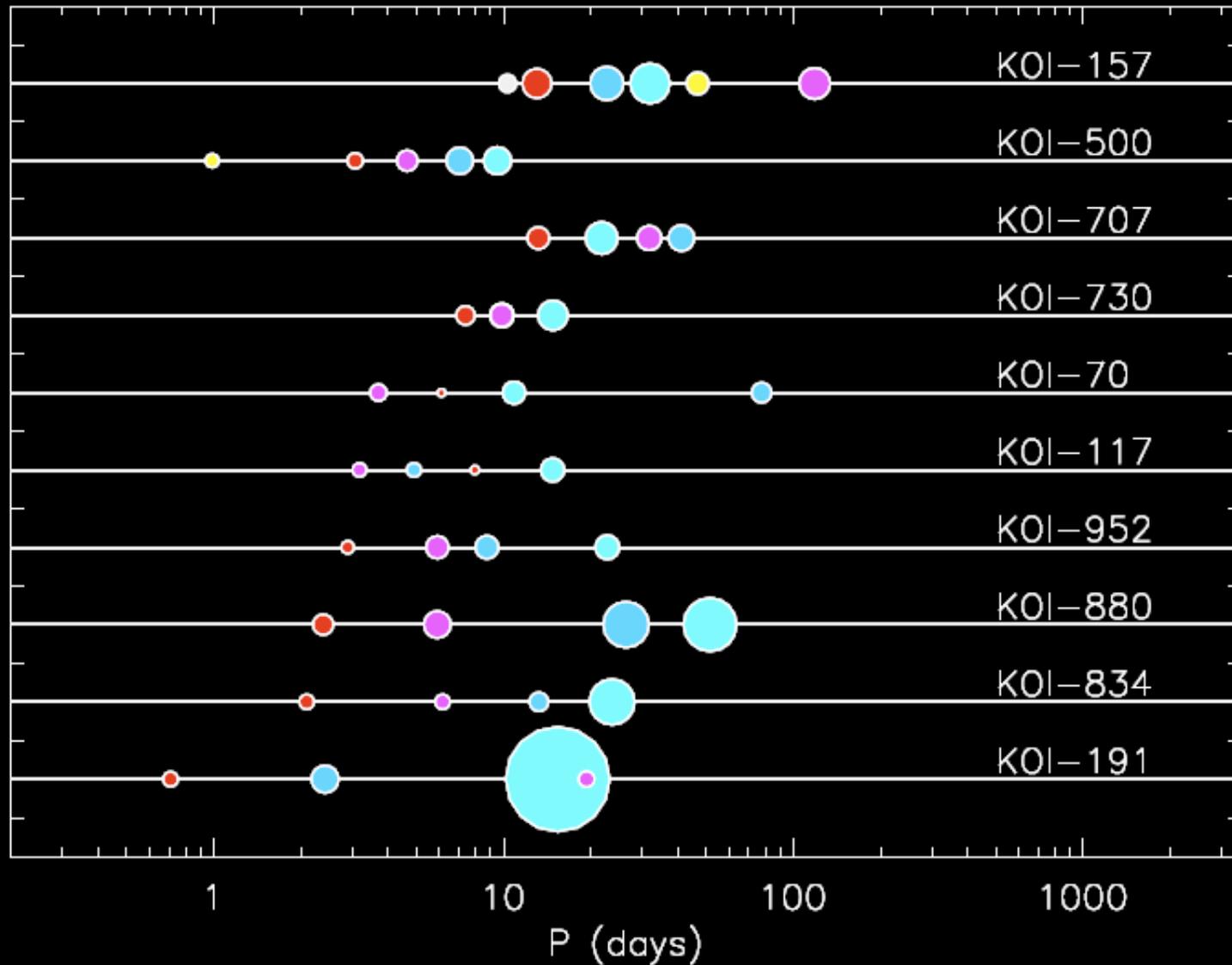
**Kepler-11 System**

**Venus**

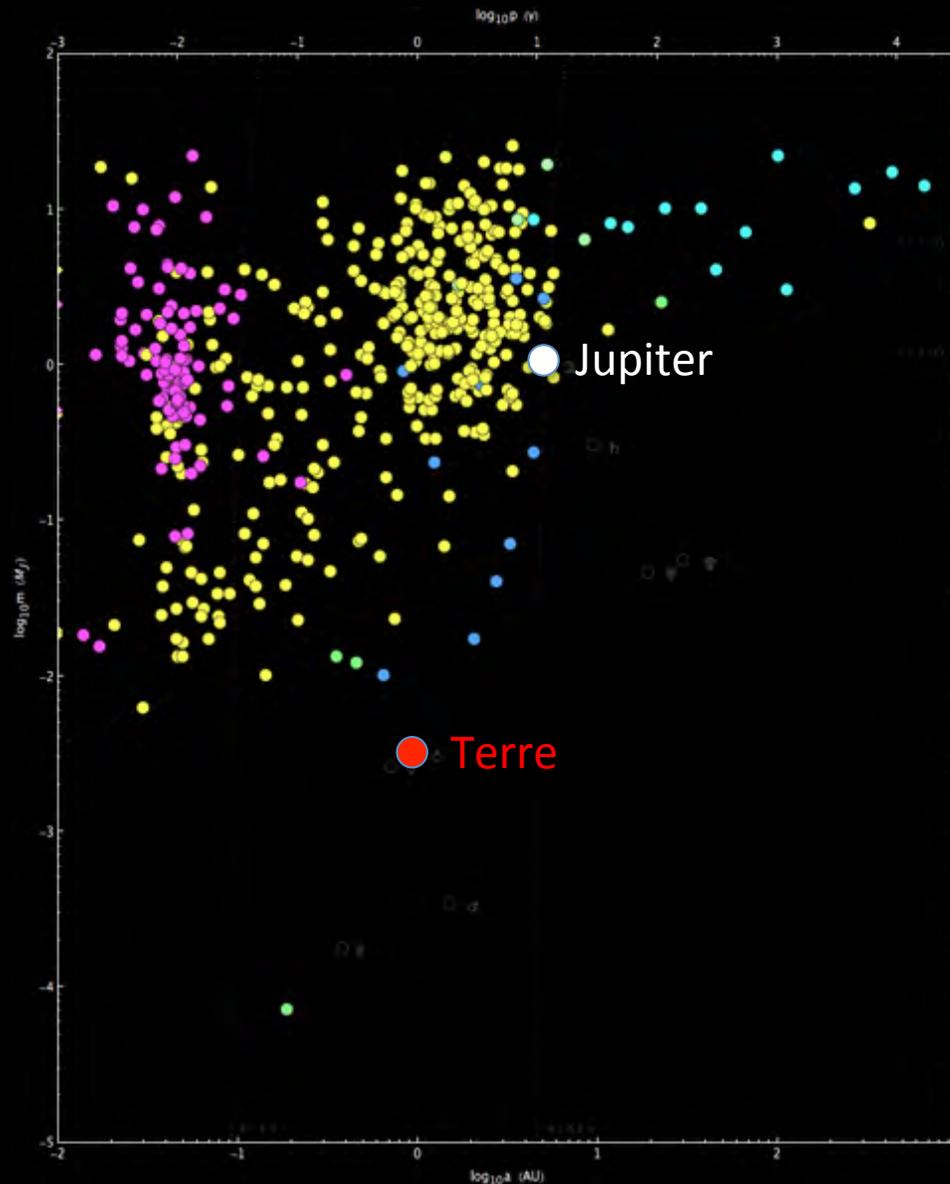
**Mercury**

**Solar System**

# Kepler : Candidats multi-planètes



# Les exoplanètes connues



Les exoplanètes connus actuellement sont des objets de la taille de Jupiter, mais beaucoup plus proches de leur étoile, d'où le nom de *Jupiters Chauds*.

Ceci est la conséquence naturelle d'un biais d'observation : on détecte d'abord les objets les plus gros avec les périodes les plus courtes.

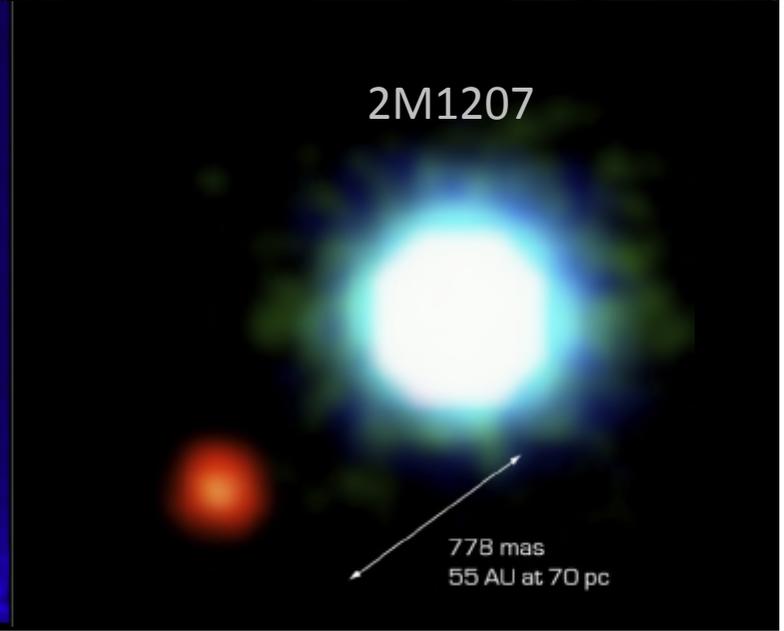
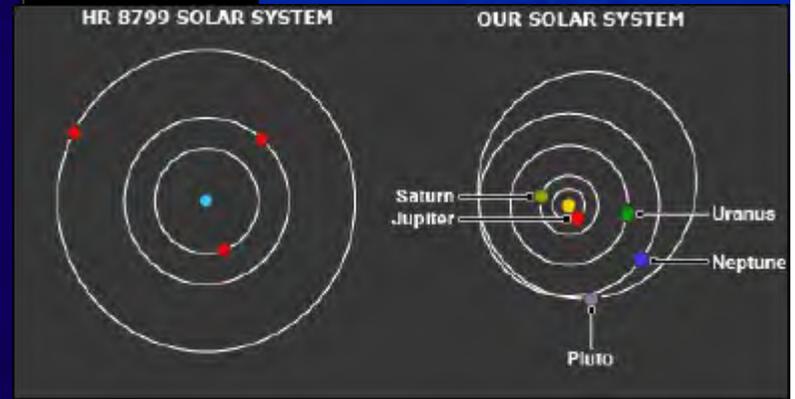
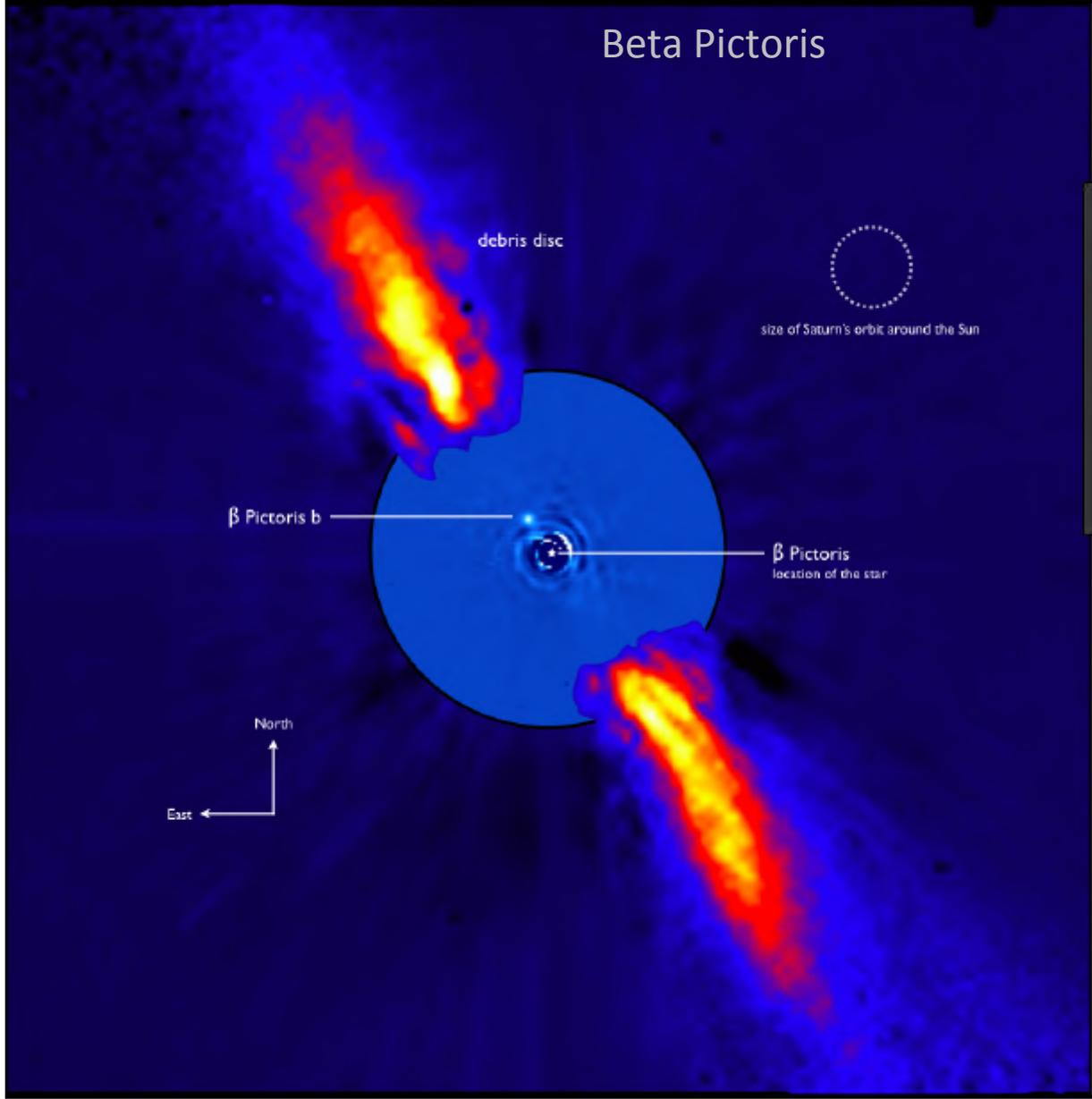
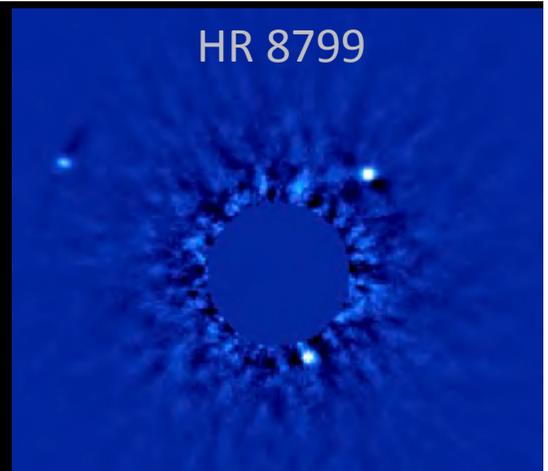
Pour les autres il faut observer plus longtemps avec des instruments plus puissants !

Rose : Transits

Jaune : Vitesse Radiale

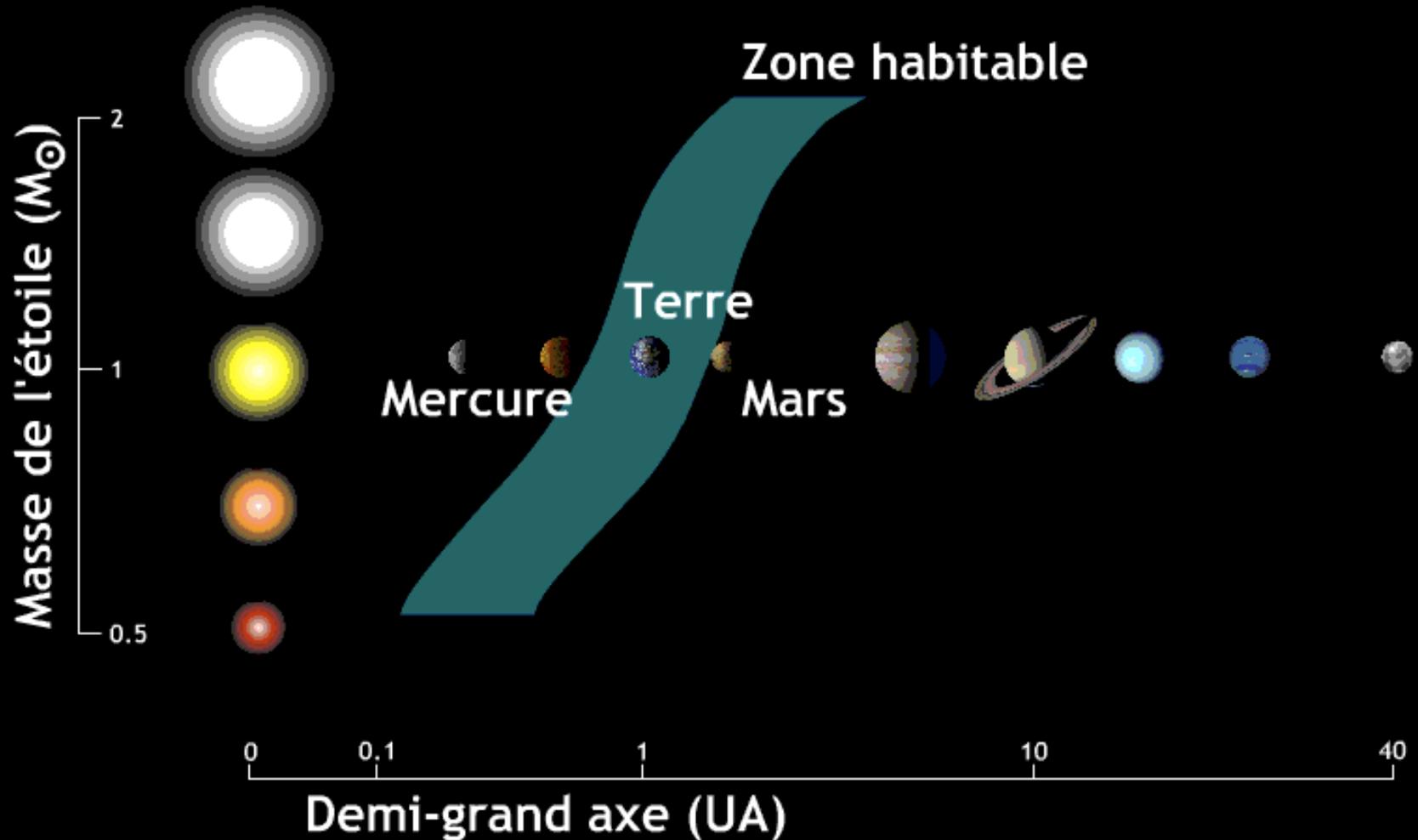
Bleu : Imagerie Directe

# Détection directe

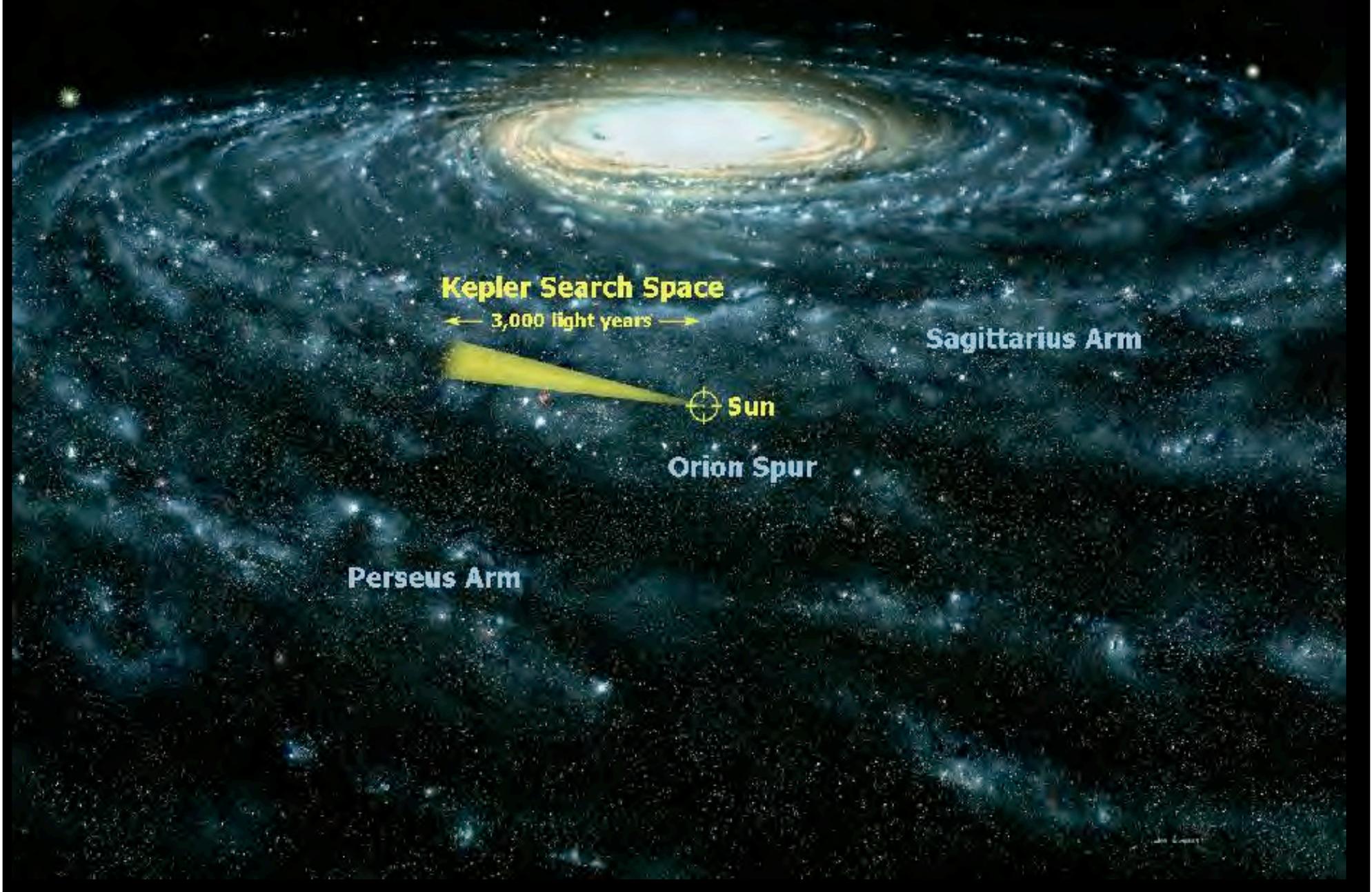


# Zone habitable

*La zone où l'eau peut-être à l'état liquide et la vie de type terrestre pourrait se développer*



# La zone surveillée par Kepler



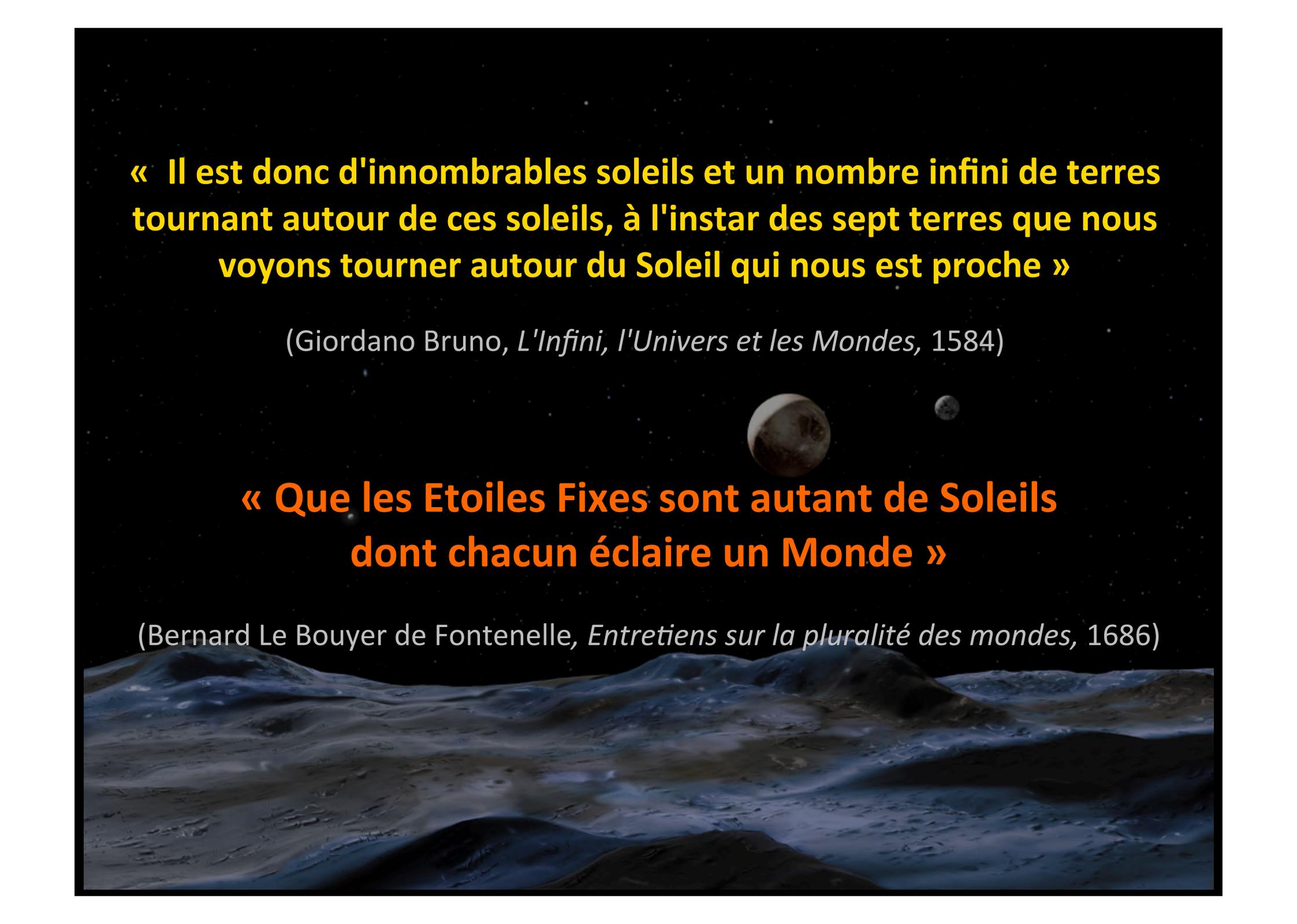
# La pluralité des mondes

Sur 156 453 étoiles surveillées par le satellite **Kepler** dans une petite région du ciel, les premiers résultats indiquent qu'environ 1235 montrent des transits, et qu'un tiers de ceux-ci sont des systèmes multiples.

Si l'on généralise à l'ensemble du ciel (en tenant compte que l'on ne voit des transits que sur une partie des systèmes) il est possible qu'il y ait plus d'exoplanètes que d'étoiles dans notre Galaxie, qui contient 200 milliards d'étoiles !

MAIS combien d'exoplanètes sont situées dans la zone habitable et dotées d'une atmosphère favorable à l'apparition de la vie ?  
Personne n'a la réponse.

Mais on tente de la chercher...



**« Il est donc d'innombrables soleils et un nombre infini de terres tournant autour de ces soleils, à l'instar des sept terres que nous voyons tourner autour du Soleil qui nous est proche »**

(Giordano Bruno, *L'Infini, l'Univers et les Mondes*, 1584)

**« Que les Etoiles Fixes sont autant de Soleils dont chacun éclaire un Monde »**

(Bernard Le Bouyer de Fontenelle, *Entretiens sur la pluralité des mondes*, 1686)

