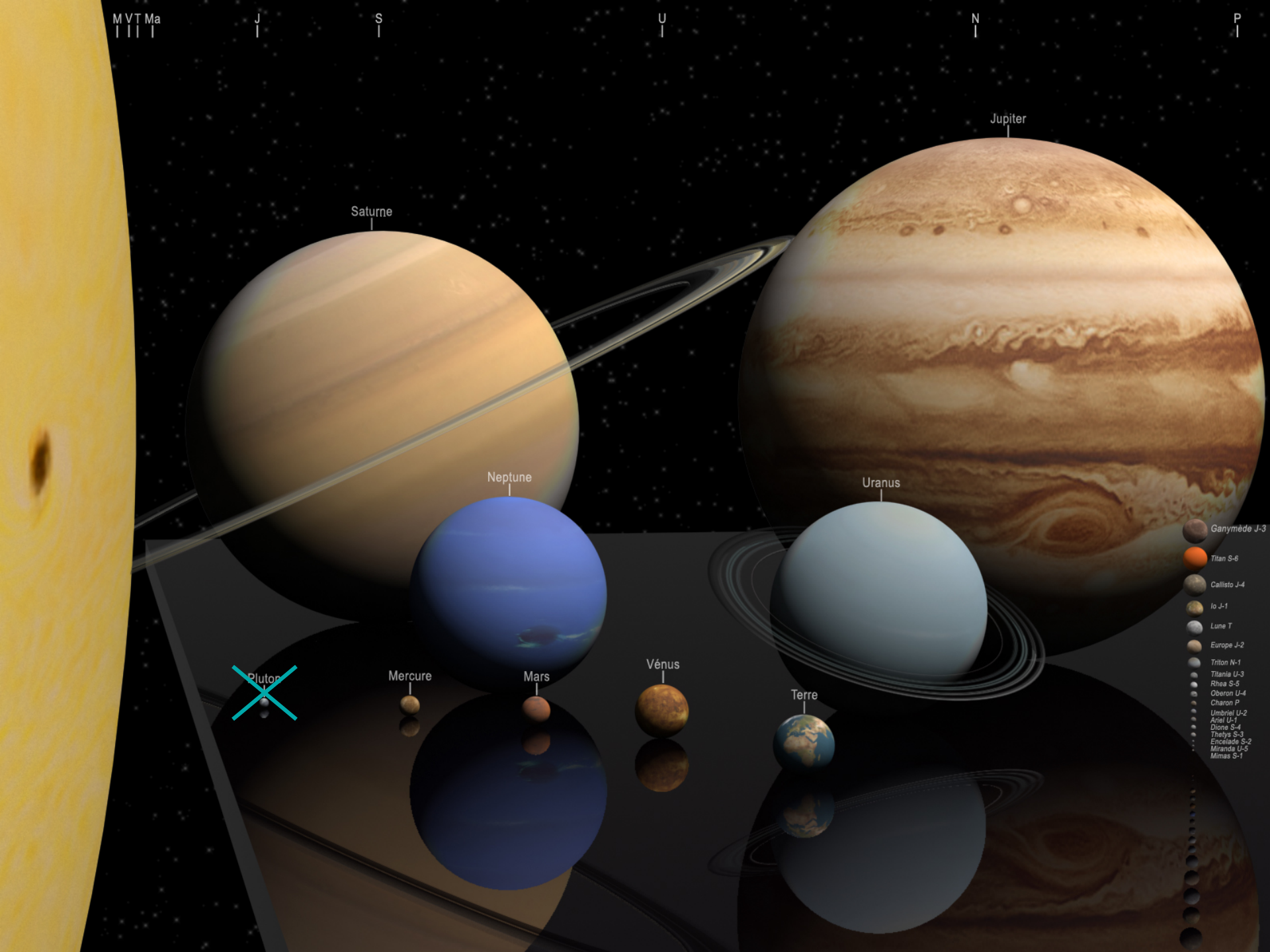
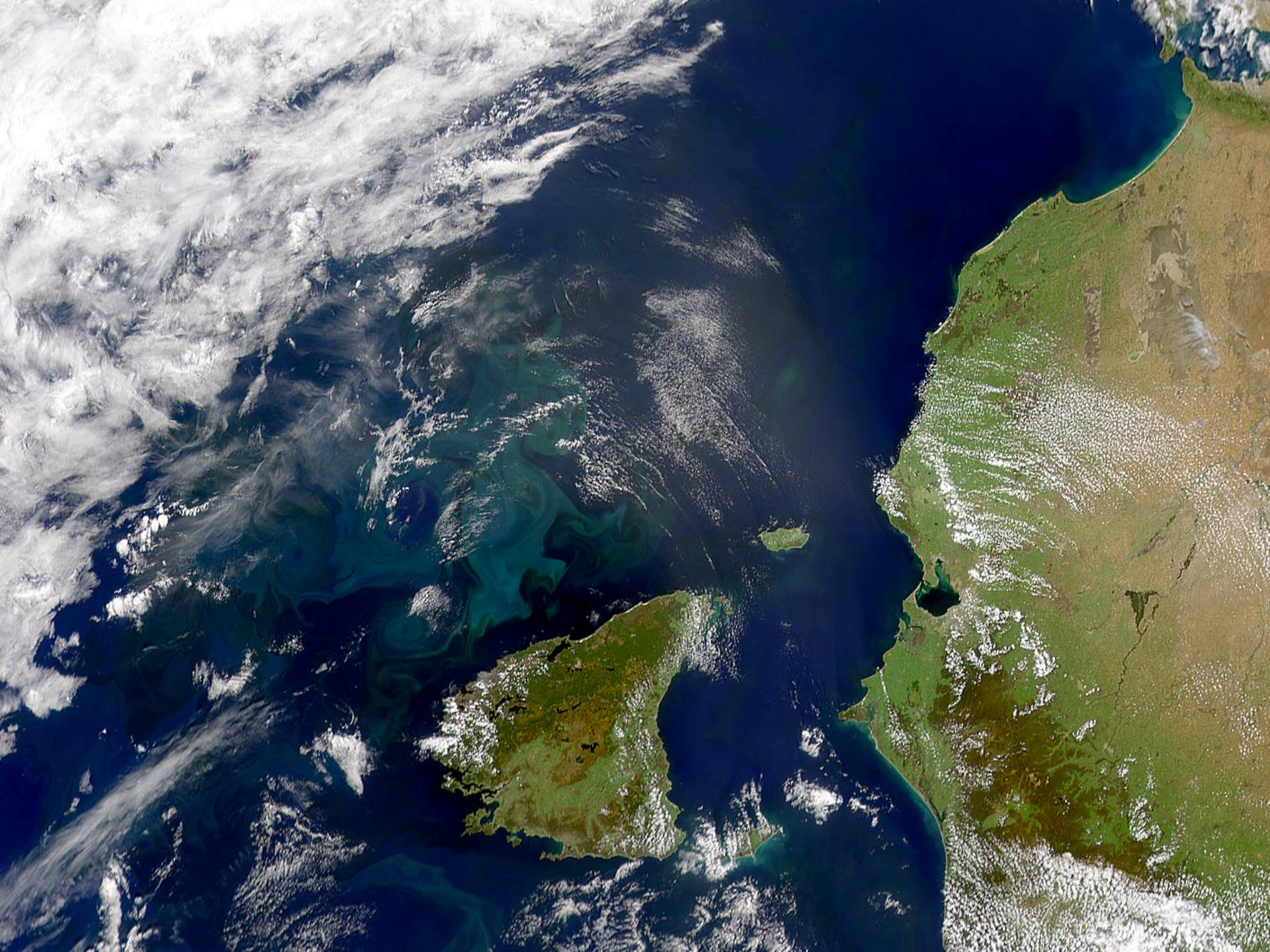
La révolution des exoplanètes

3 août 2014
Festival d'astronomie de Fleurance

Guillaume Hébrard
CNRS
Institut d'astrophysique de Paris
Observatoire de Haute-Provence


M V T Ma
J
S
U
N
P
Jupiter
Saturne
Neptune
Uranus
Pluton
Mercure
Mars
Vénus
Terre
Ganymède J-3
Titan S-6
Callisto J-4
Io J-1
Lune T
Europe J-2
Triton N-1
Titania U-3
Rhea S-5
Oberon U-4
Charon P
Umbriel U-2
Ariel U-1
Dione S-4
Thetys S-3
Encelade S-2
Miranda U-5
Mimas S-1



Comment détecter une planète extra-solaire ?

La détection directe

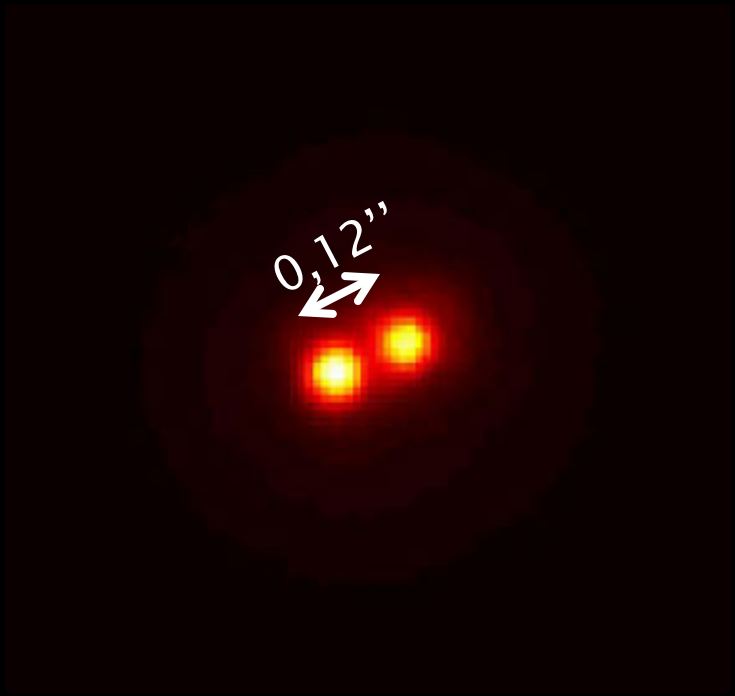
2 énormes difficultés

1. Une séparation angulaire minuscule

Soleil–Jupiter à 4 années-lumière
→ 4 secondes d'angle (= 1/900 degré)
→ 1 main vue à 3 km !

Soleil–Jupiter à 100 années-lumière
→ 0,15’’ (= 1/24 000 degré)
→ 1 main vue à 200 km !!

Soleil–Terre à 100 années-lumière
→ 0,03’’
→ 1 main vue à 1000 km !!!



Soleil–Jupiter à 100 années-lumière
→ 0,15'' (= 1/24 000 degré)
→ 1 main vue à 200 km !!

Soleil–Terre à 100 années-lumière
→ 0,03''
→ 1 main vue à 1000 km !!!

La détection directe

2 énormes difficultés

1. Une séparation angulaire minuscule
2. Un gigantesque contraste en luminosité

L’étoile est jusqu’à 10 000 000 000 plus brillante que la planète !

1995 : Observatoire de Haute-Provence

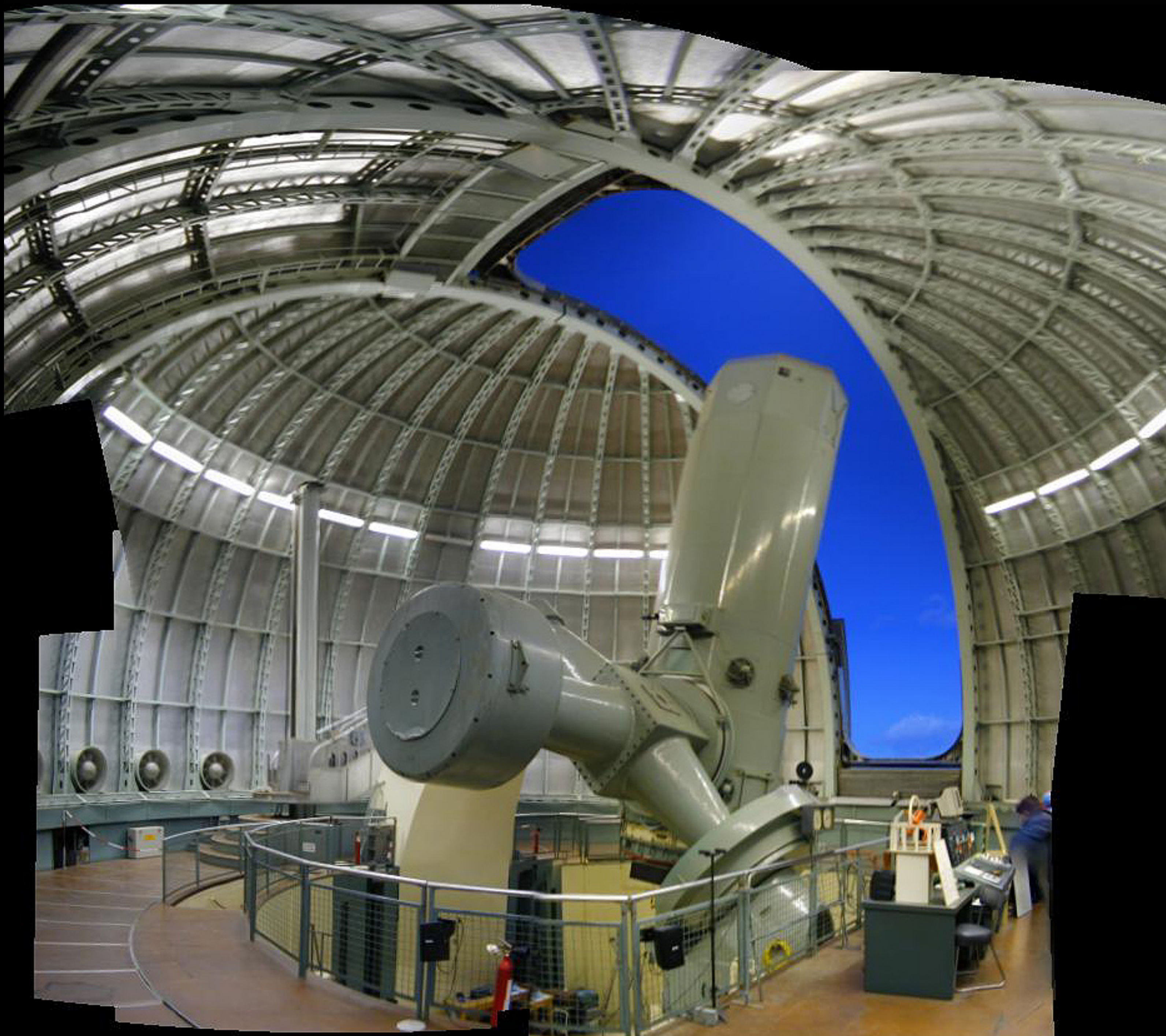


Photo : Hervé Dole

La détection indirecte

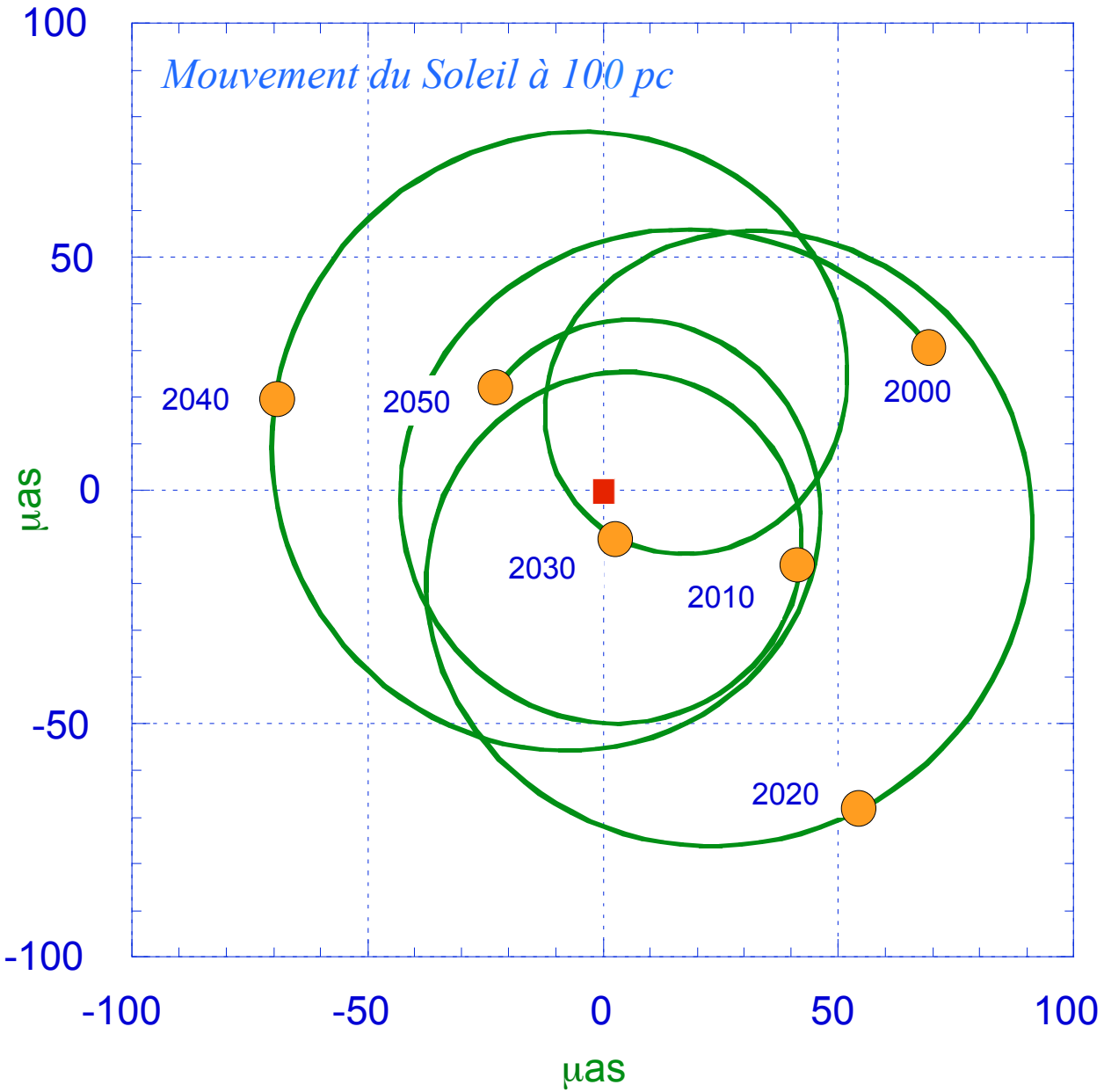
« l’étoile perturbée »

L’étoile perturbée

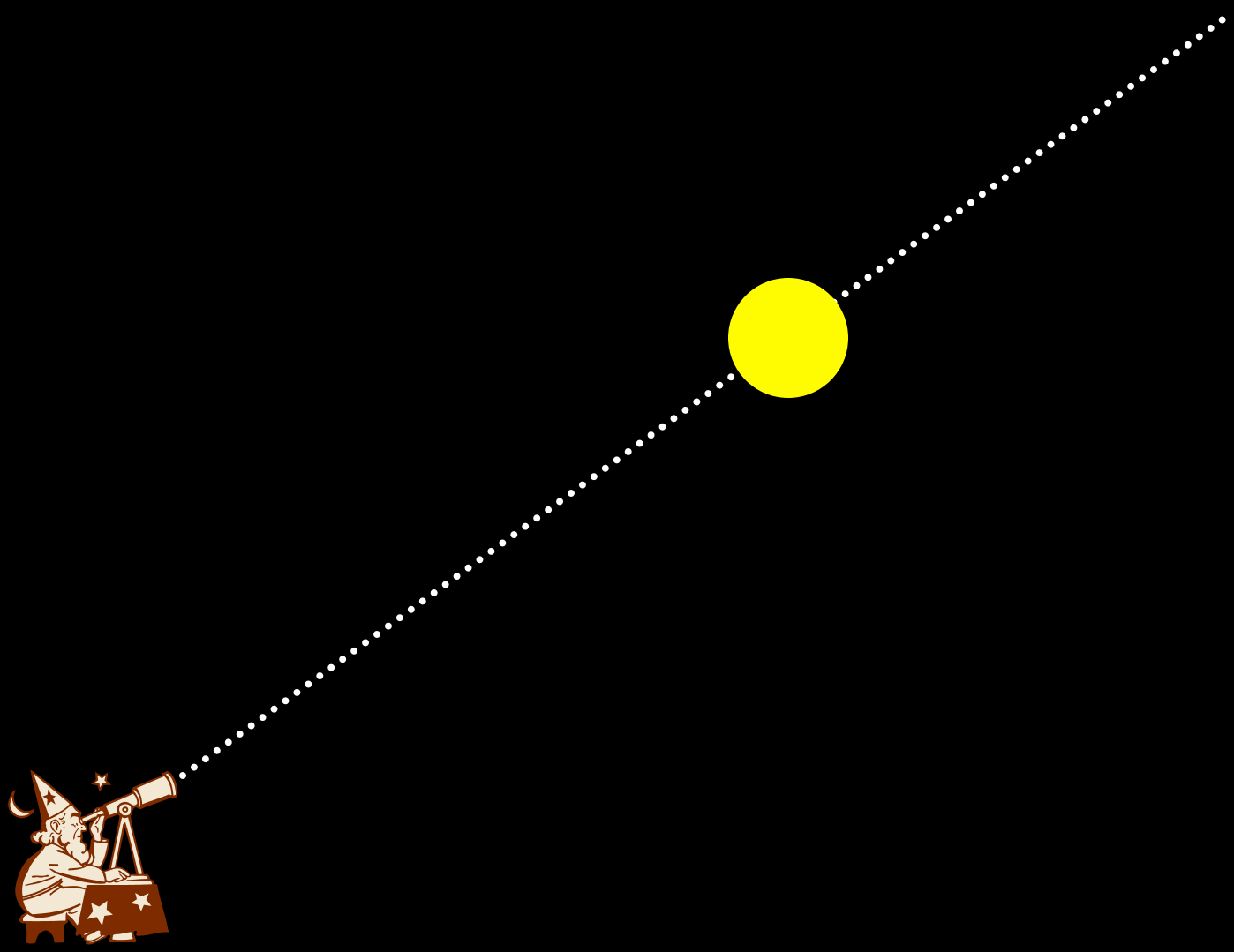
mesurer la perturbation gravitationnelle induite par la planète sur son étoile

➲le lanceur de marteau

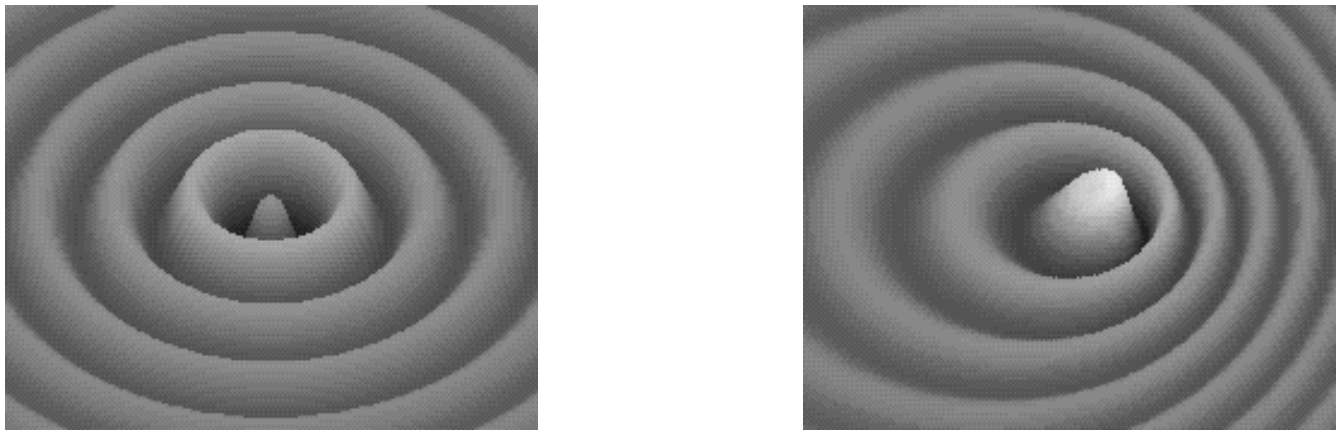
Mark Thiessen - Lance Deal - *National Geographic* (décembre 2004)


Mouvement du Soleil à 100 pc
100
50
0
-50
-100
µas
-100
-50
0
50
100
µas
2040
2050
2000
2030
2010
2020

L’étoile perturbée



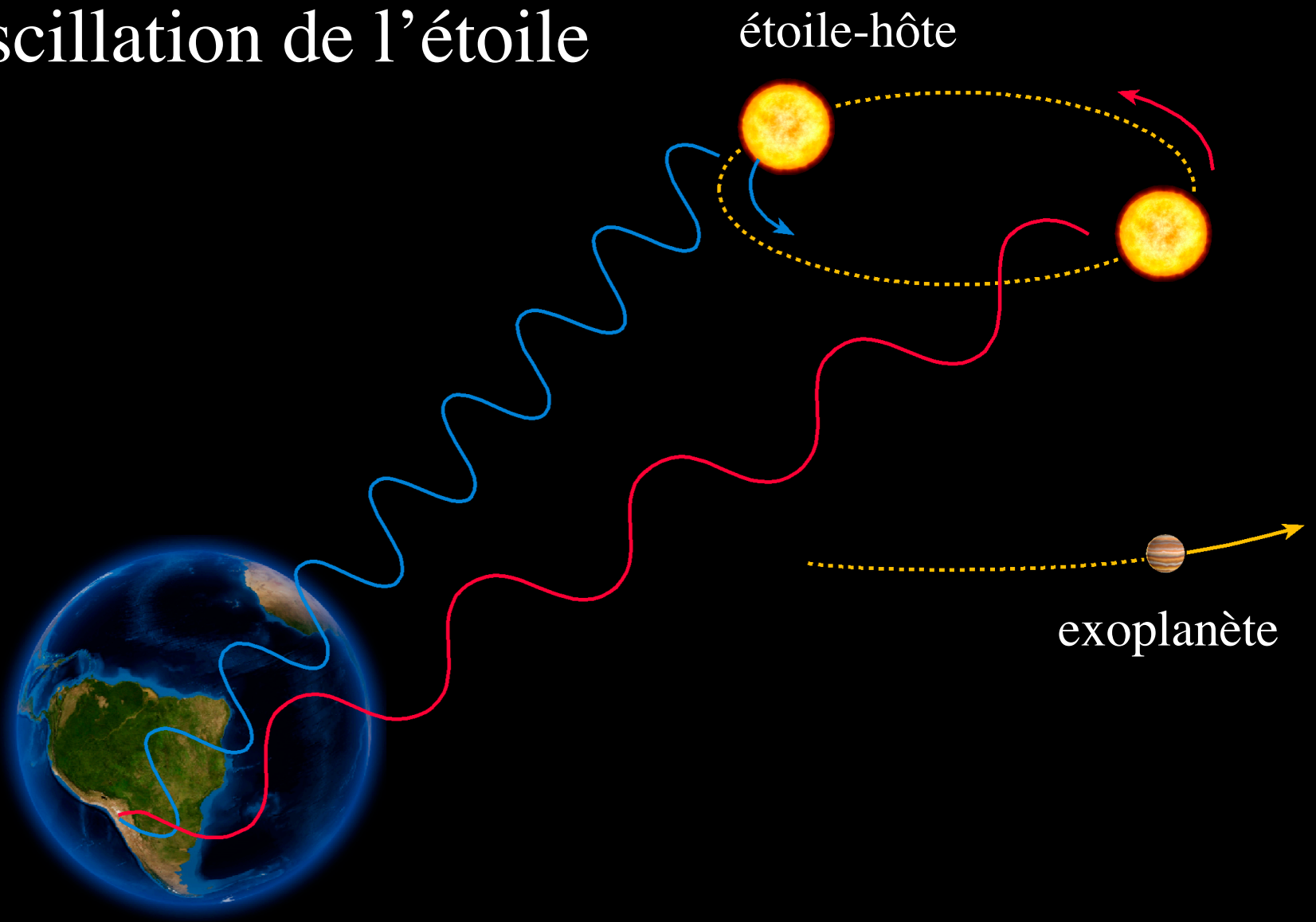
Effet Doppler : mesure de la vitesse des astres



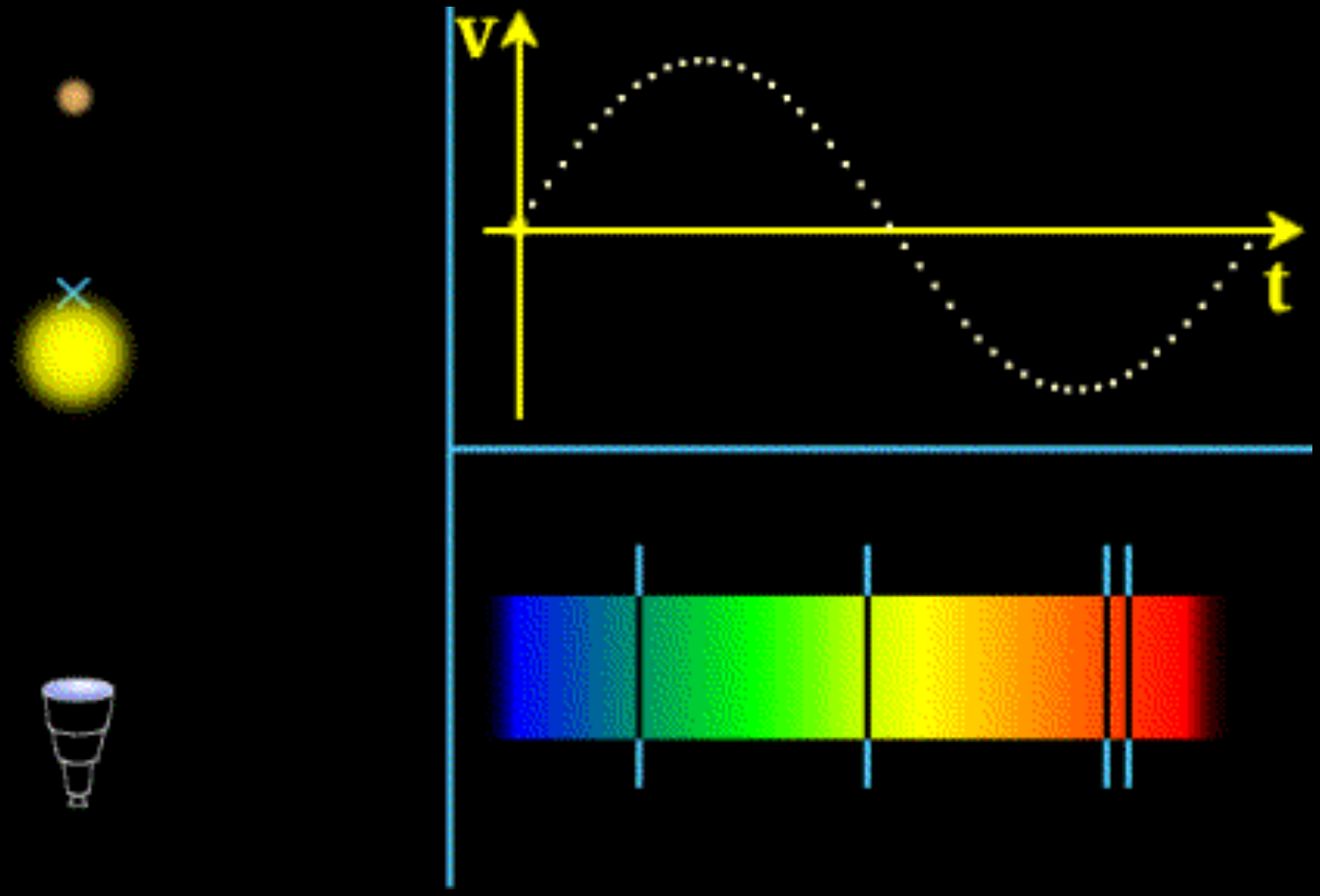
L'effet Doppler

Δf est proportionnel à la variation de vitesse radiale de l'étoile
la variation de vitesse radiale de l'étoile est proportionnelle à la masse de la planète

Décalage Doppler dû à l'oscillation de l'étoile

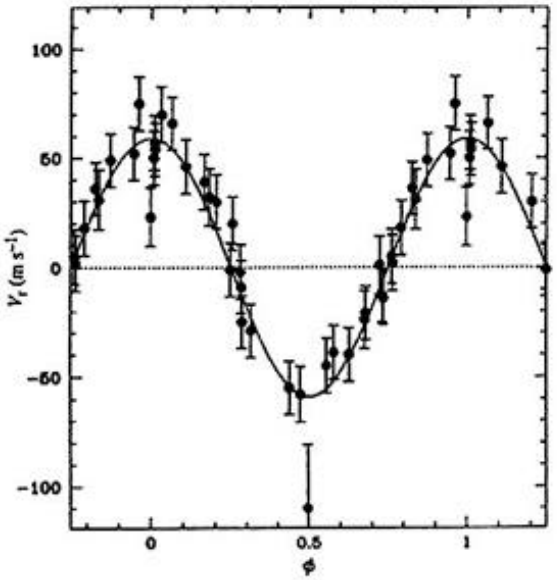


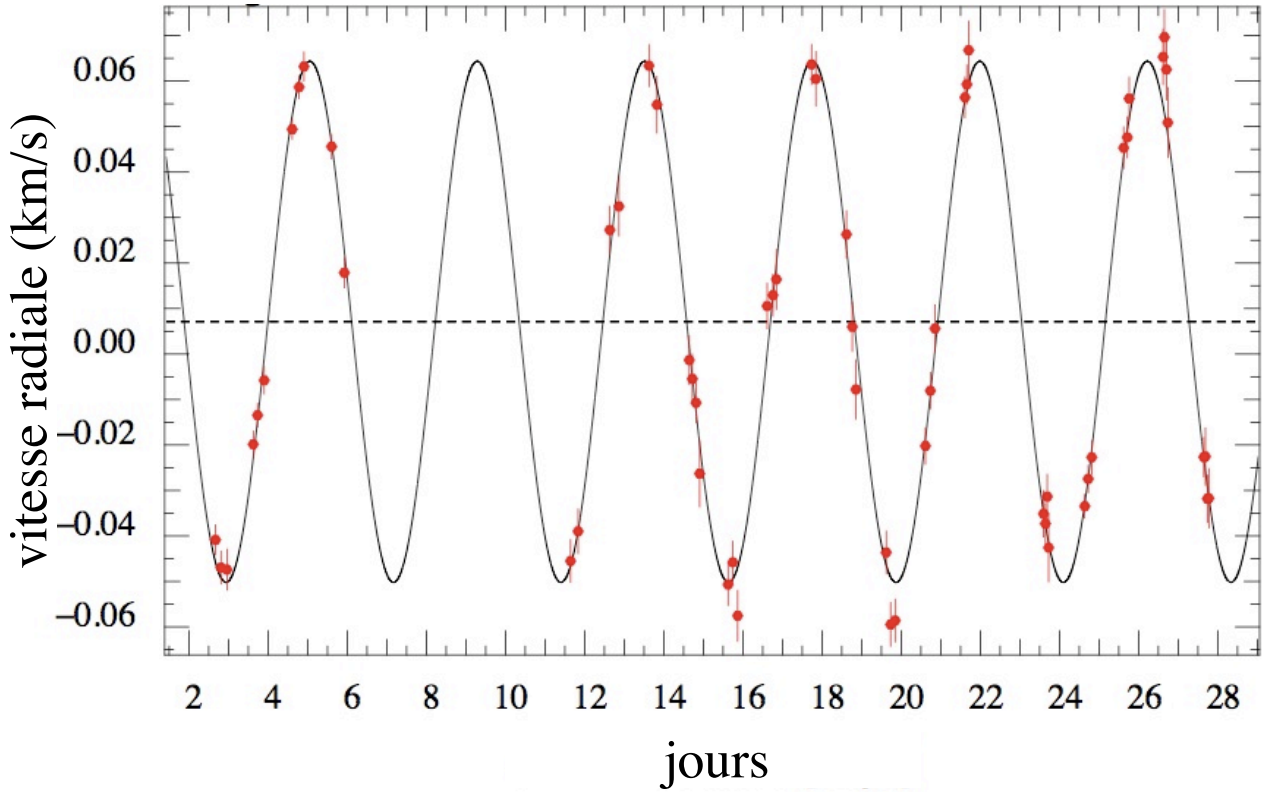
Décalage Doppler dû à l'oscillation de l'étoile



1995 : Michel Mayor & Didier Queloz

51 Pegasi b

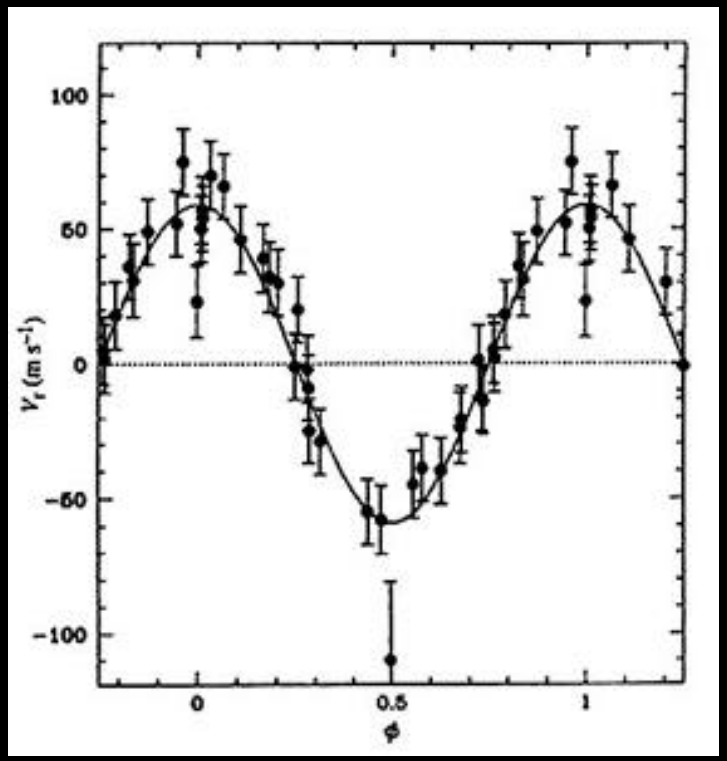





“jupiters chauds”

Méthode des vitesses radiales

Décalage Doppler dû aux oscillations de l'étoile



$$K = \frac{m \sin i}{\left(M_* + m\right)^{2/3}} \times \frac{\left(2\pi G\right)^{1/3}}{P^{1/3}\sqrt{1-e^2}}$$

$m << M_*$ et $e = 0$:

$$K = 203 \frac{m \sin i}{M_*^{2/3} P^{1/3}}$$

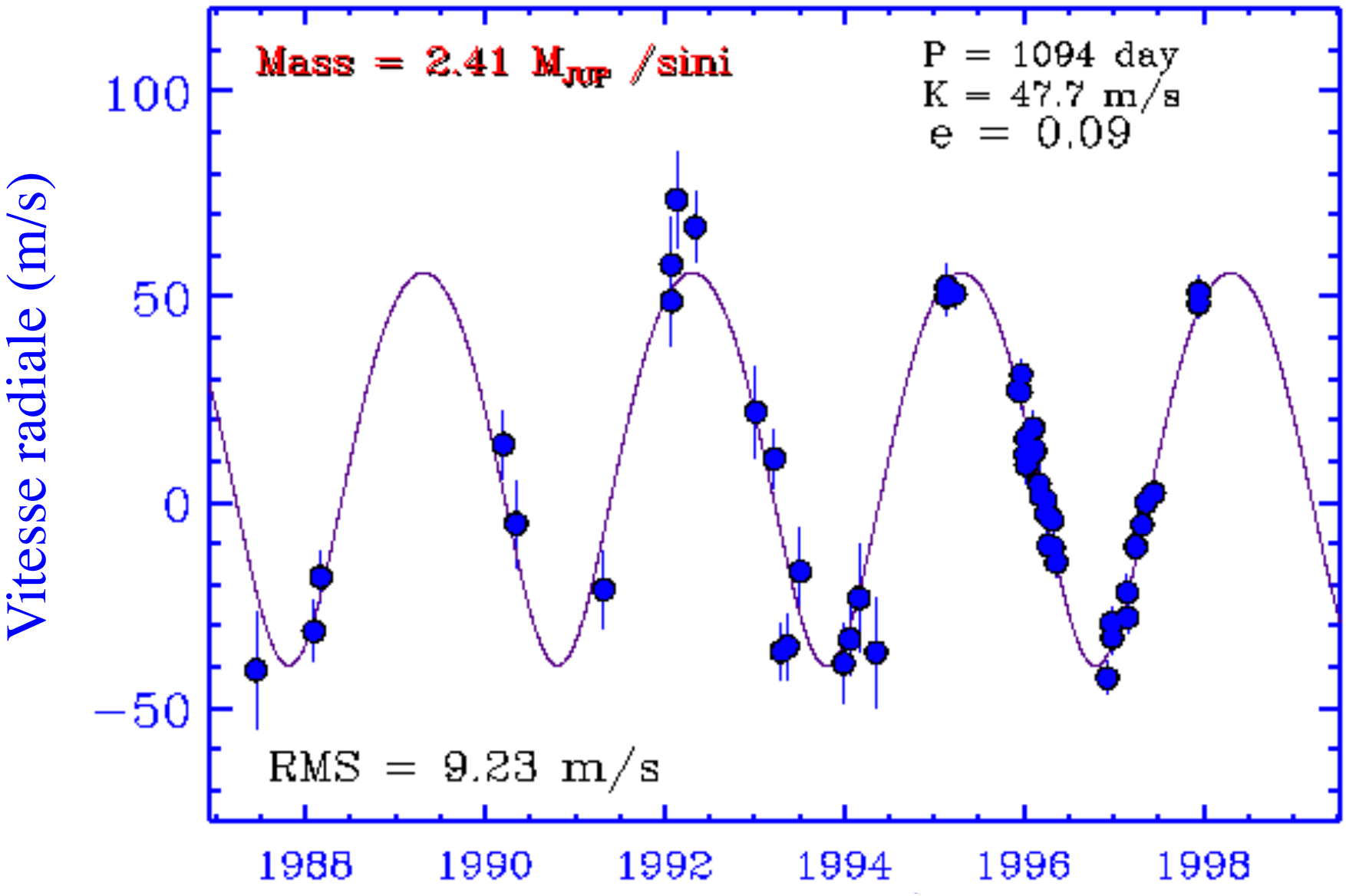
K(m/s) m(M_{Jup}) M_*(M_{Sun}) P(jours)

Jupiter chaud : +/- 100 m/s sur quelques jours

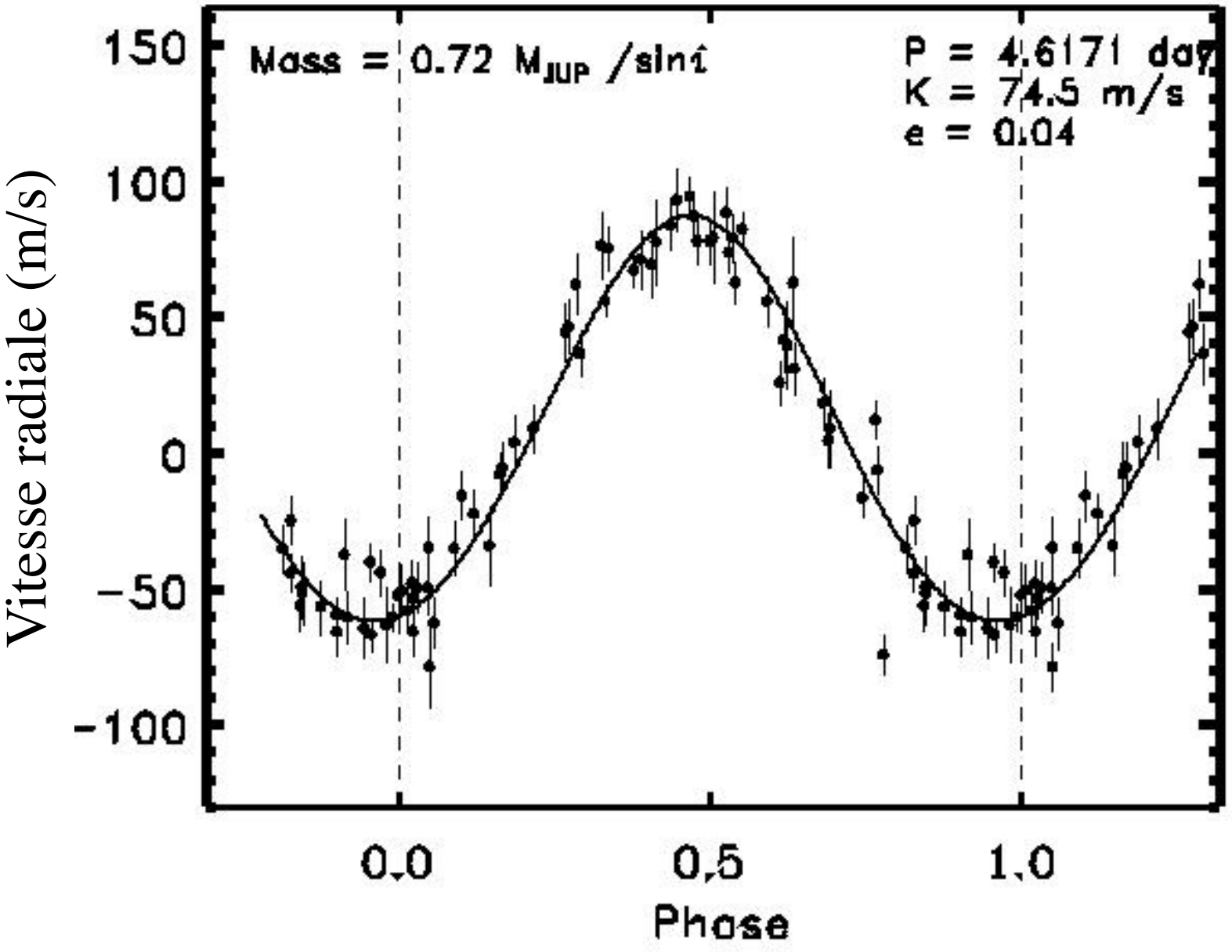
Jupiter : +/- 12 m/s sur 12 ans

Terre : +/- 9 cm/s sur 365 jours

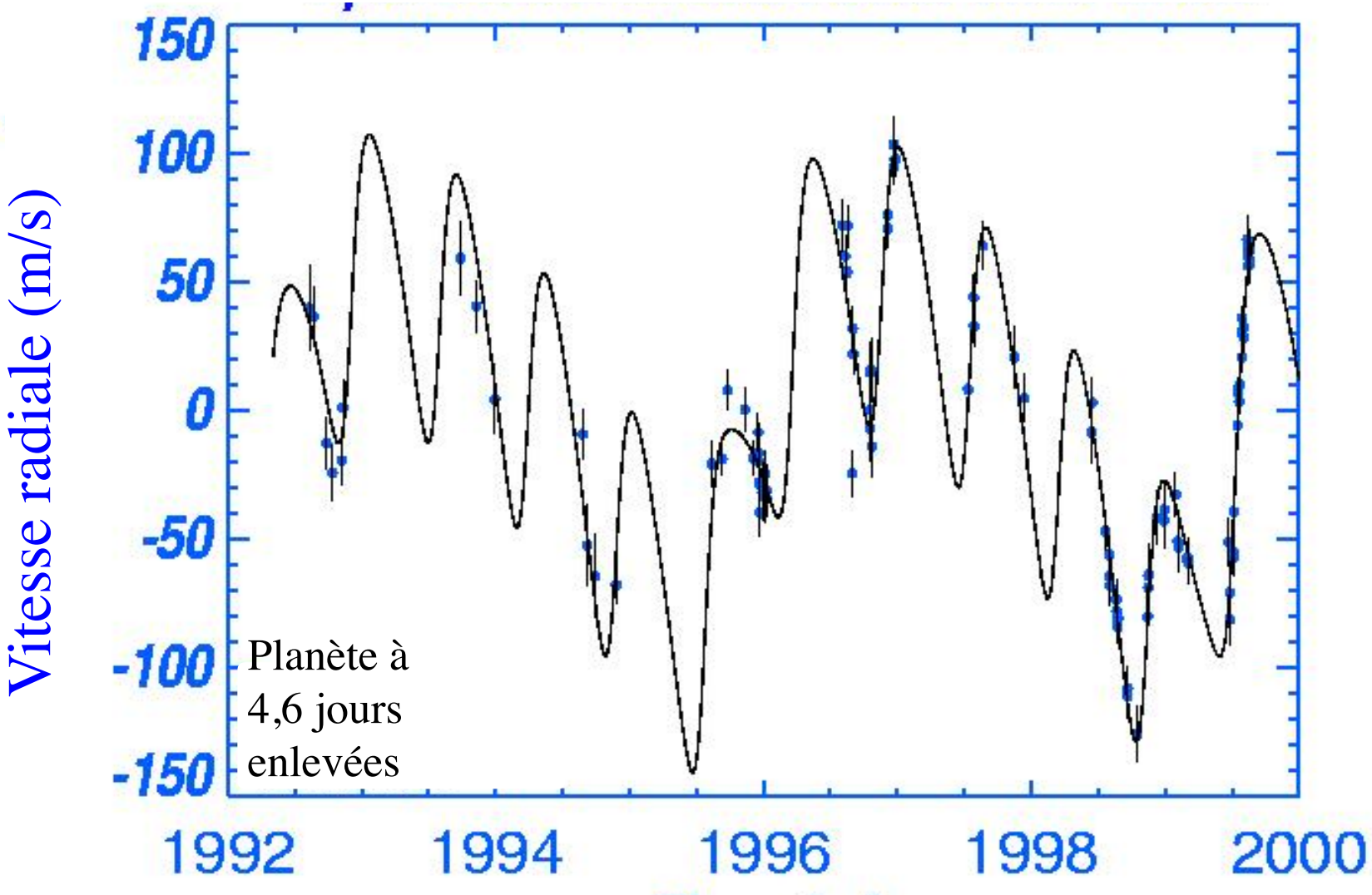
47 UMa

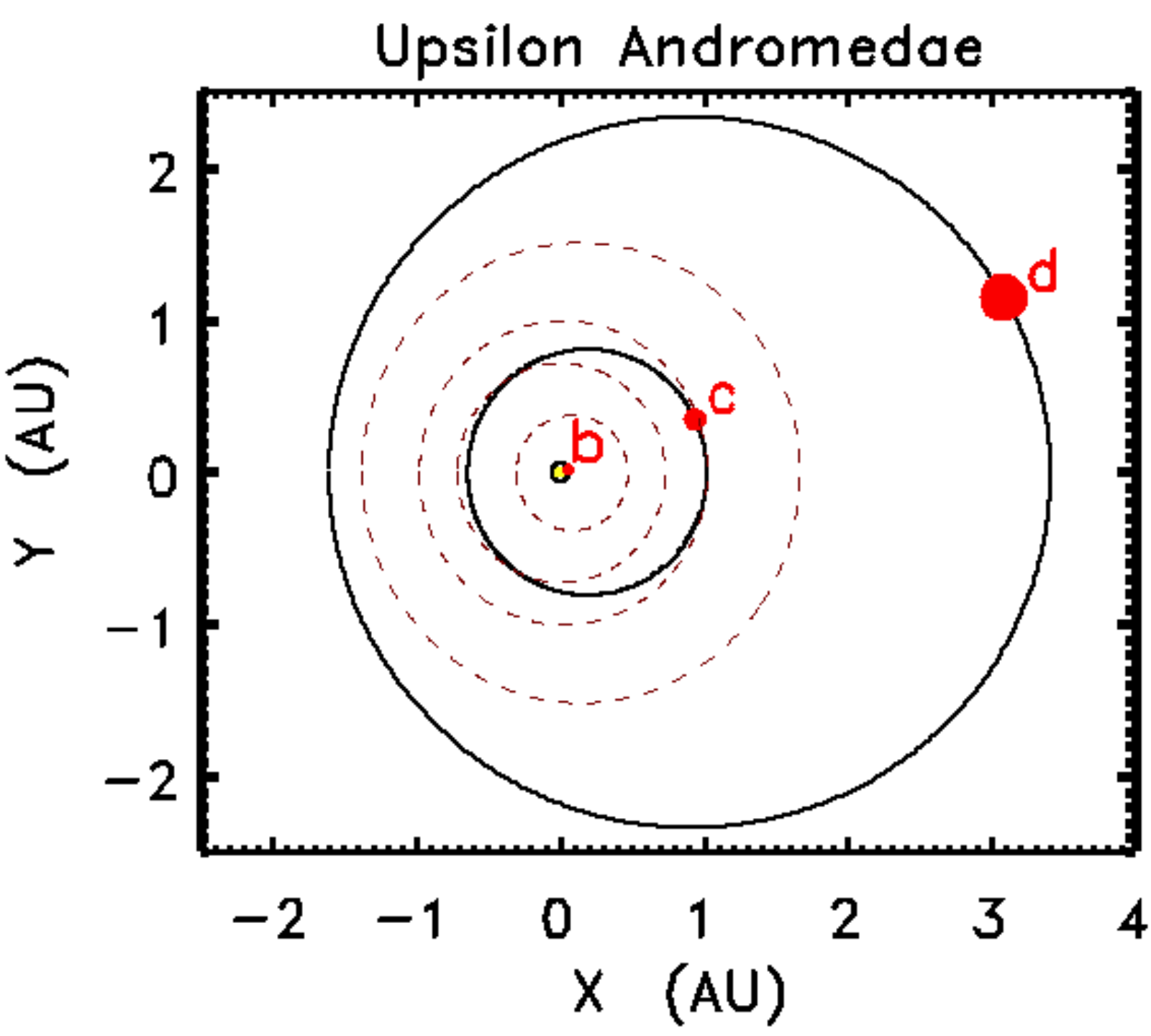

Mass = 2.41 M_{JUP} /sini
P = 1094 day
K = 47.7 m/s
e = 0.09
RMS = 9.23 m/s
Vitesse radiale (m/s)
100
50
0
−50
1988
1990
1992
1994
1996
1998

Upsilon Andromedae b



Upsilon Andromedae c, d : les deux planètes externes

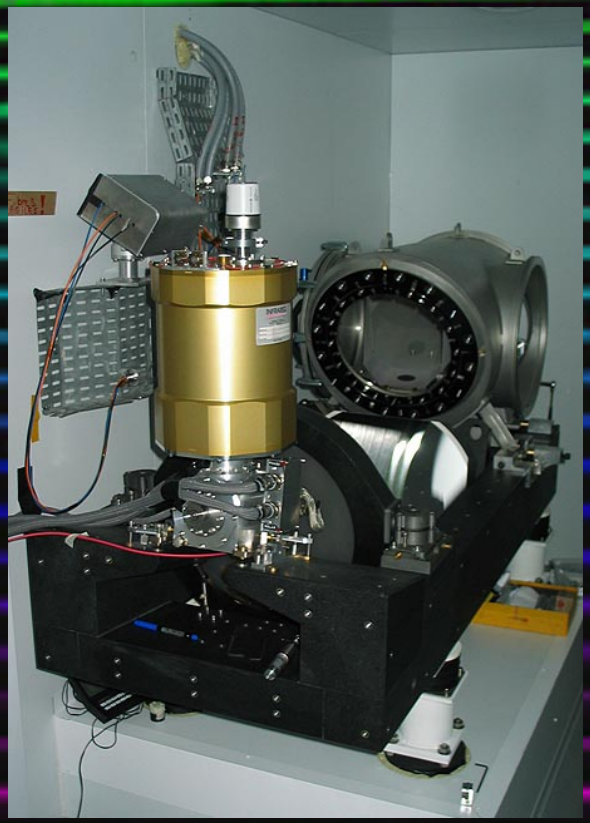



Upsilon Andromedae
Y (AU)
X (AU)
2
1
0
−1
−2
−2
−1
0
1
2
3
4
b
c
d

Le spectrographe HARPS

SOPHIE

le spectrographe
de l'Observatoire de Haute-Provence



OHP
Observatoire de
Haute-Provence

Il pleut des planètes !

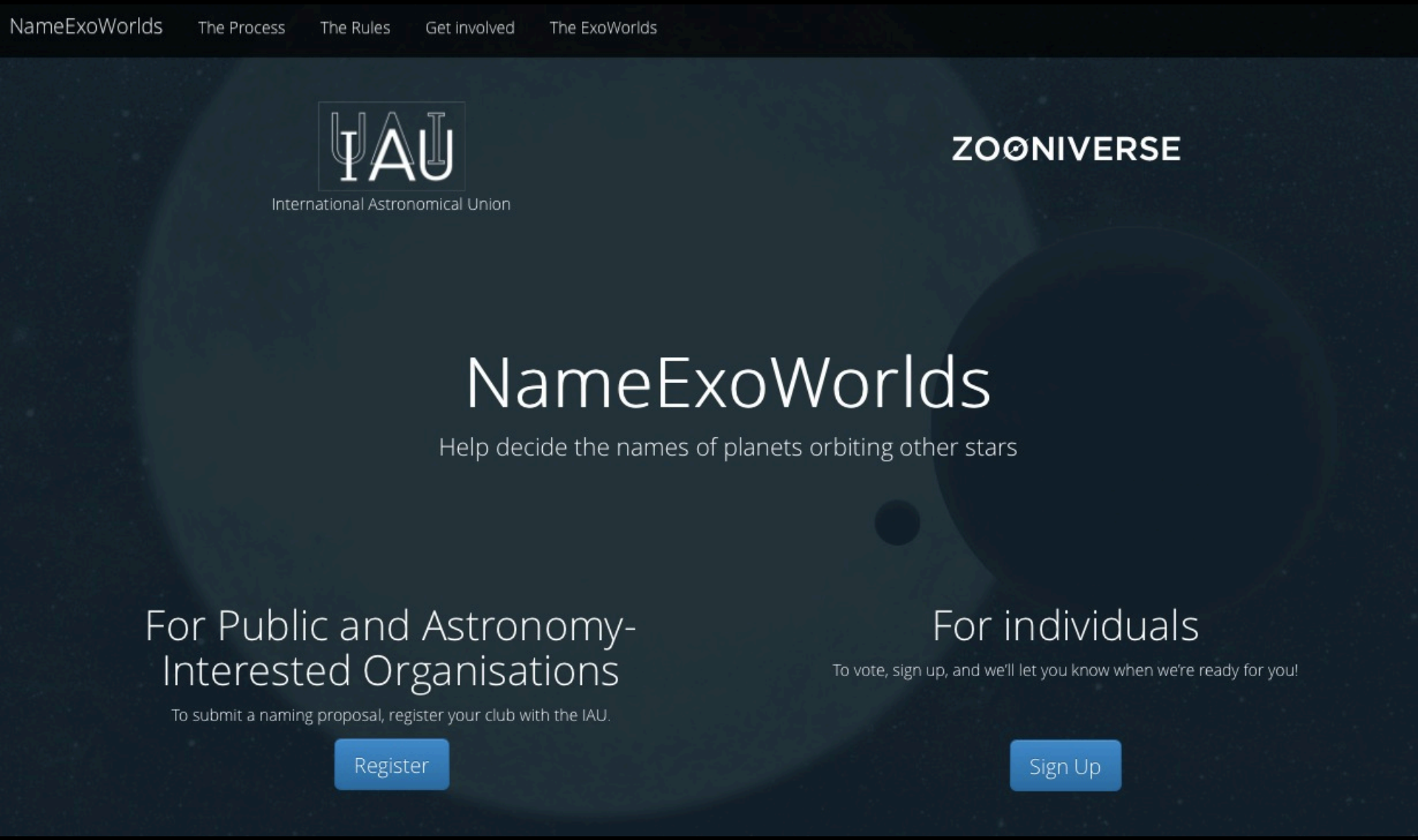
1811 exoplanètes

1126 systèmes exoplanétaires

466 systèmes multiples

3 août 2014

http://nameexoworlds.org



CIEL & ESPACE

CIEL & ESPACE

LE MAGAZINE DE L'ASTRONOMIE

Octobre 2013

L'INCROYABLE MOISSON D'EXOPLANÈTES

ET DE 1000 !

ÉVÉNEMENT

NOVA DU DAUPHIN, UN CATACLYSME SOUS SURVEILLANCE

REPORTAGE

LE PLAT PAYS SÉDUIT PAR LES NUITS MAROCAINES

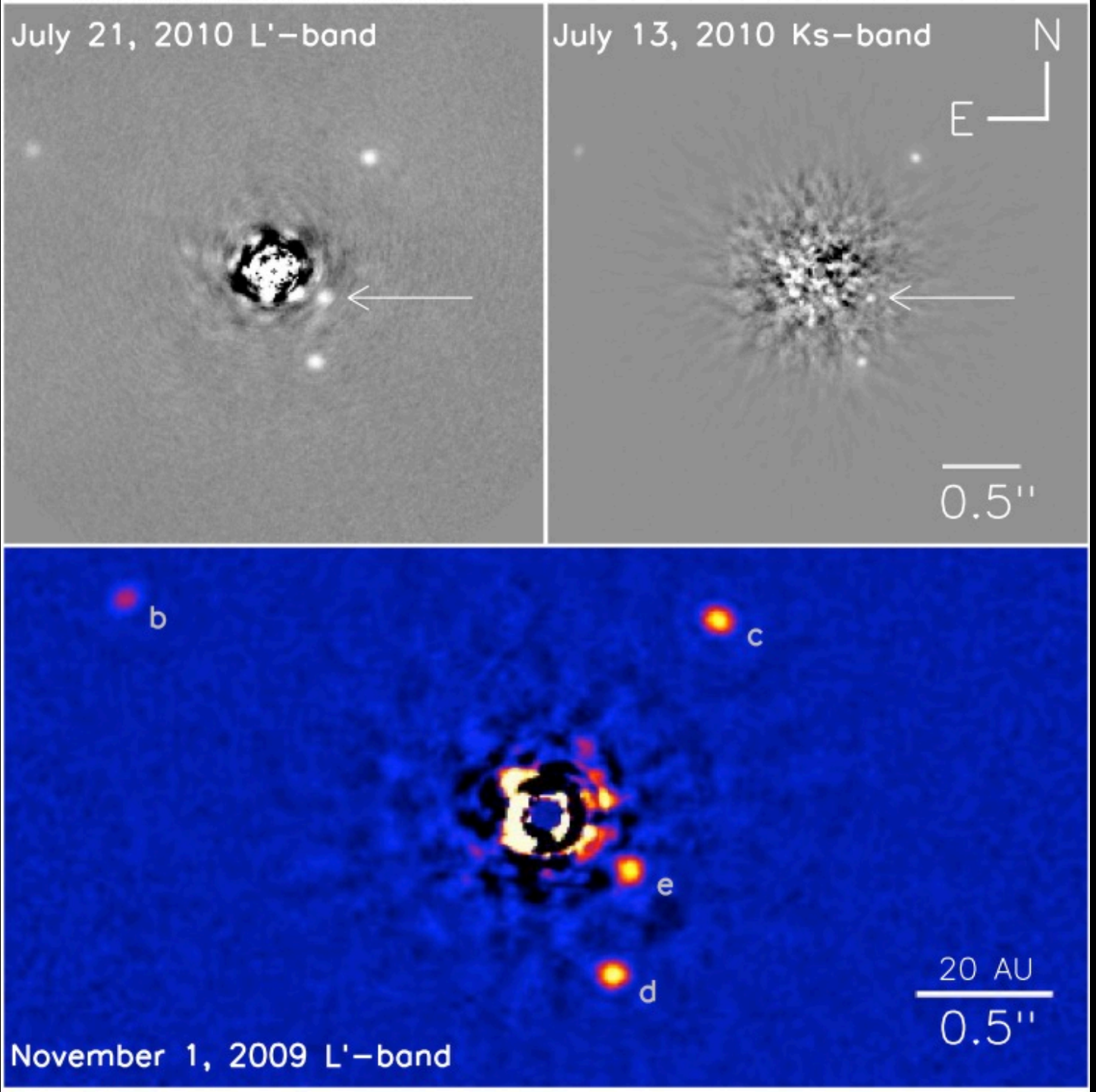
LE GUIDE D'OBSERVATION

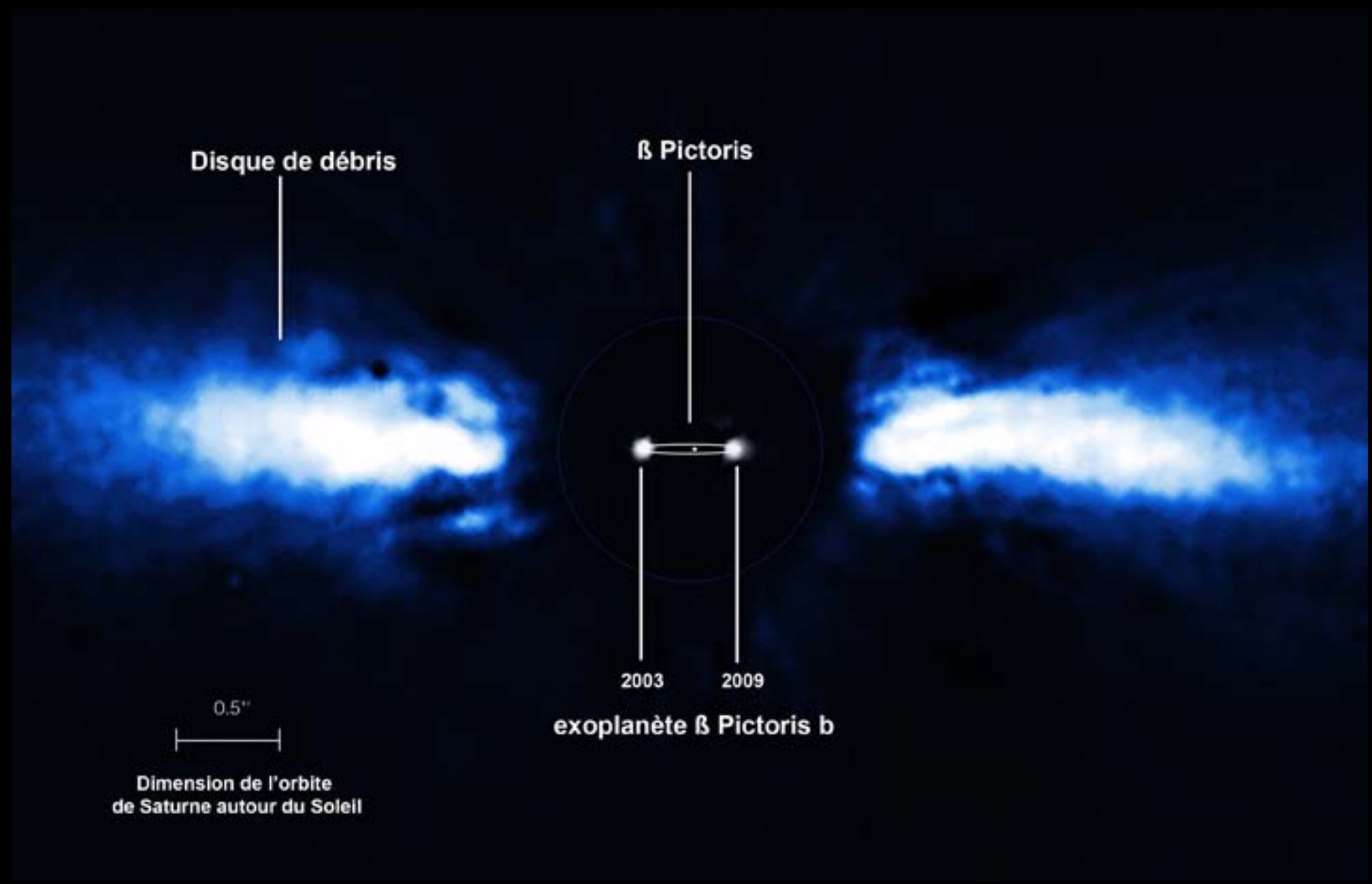
TROIS FAÇONS D'OBSERVER URANUS

PREMIERS PAS : RÉGLEZ VOTRE SCHMIDT-CASSEGRAIN

THÉMA

JUPITER
PLANÈTE DES NUAGES


July 21, 2010 L'−band
July 13, 2010 Ks−band
N
E
0.5''
b
c
e
d
20 AU
0.5''
November 1, 2009 L'−band

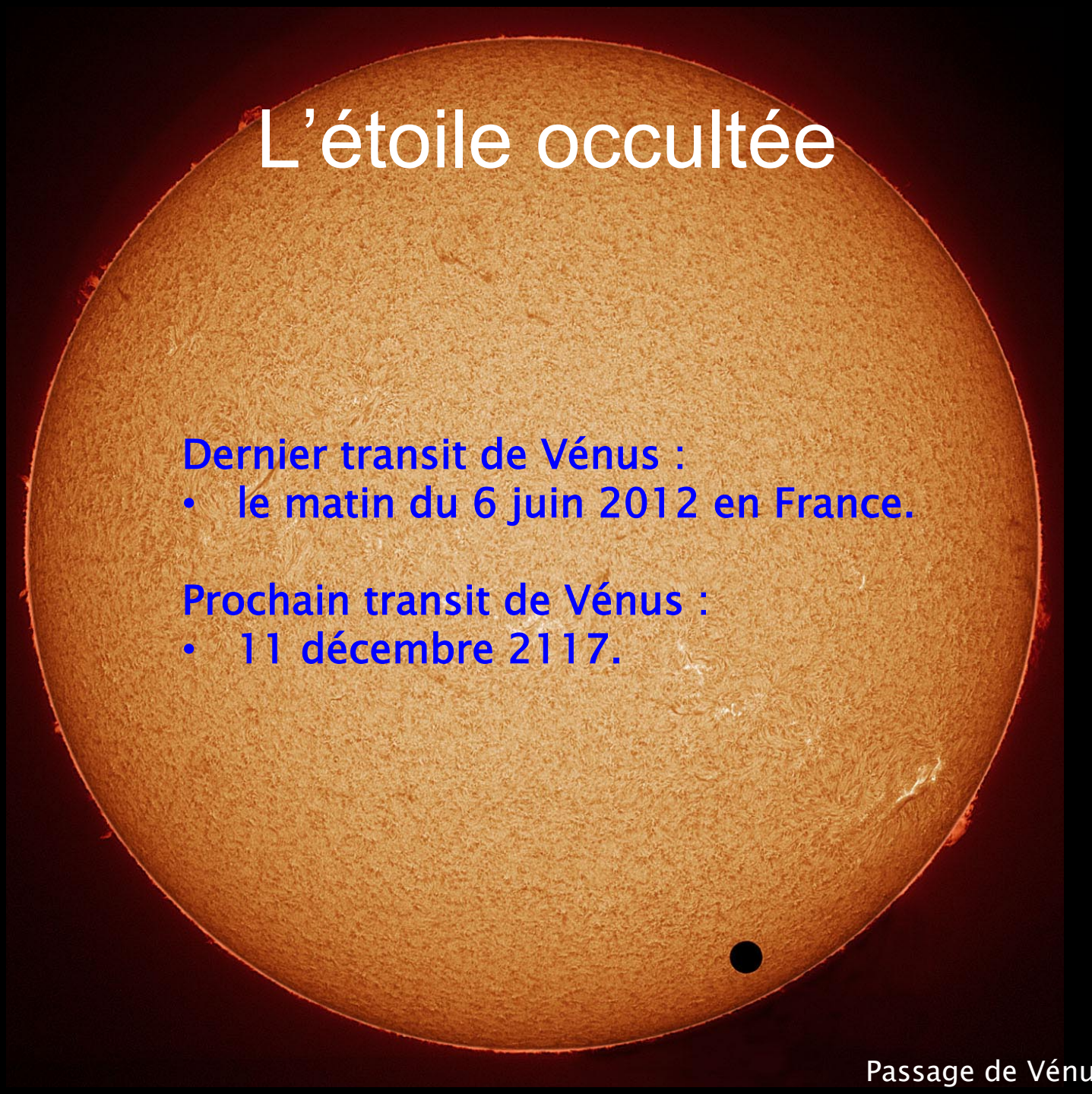

Disque de débris
ß Pictoris
2003
2009
exoplanète ß Pictoris b
0.5''
Dimension de l'orbite
de Saturne autour du Soleil

L’étoile occultée

Éclipse d’une étoile,
passage, occultation ou *transit*
d’un objet devant une étoile

Éclipse de Soleil, ou passage de la Lune, 5 octobre 2005

L’étoile occultée



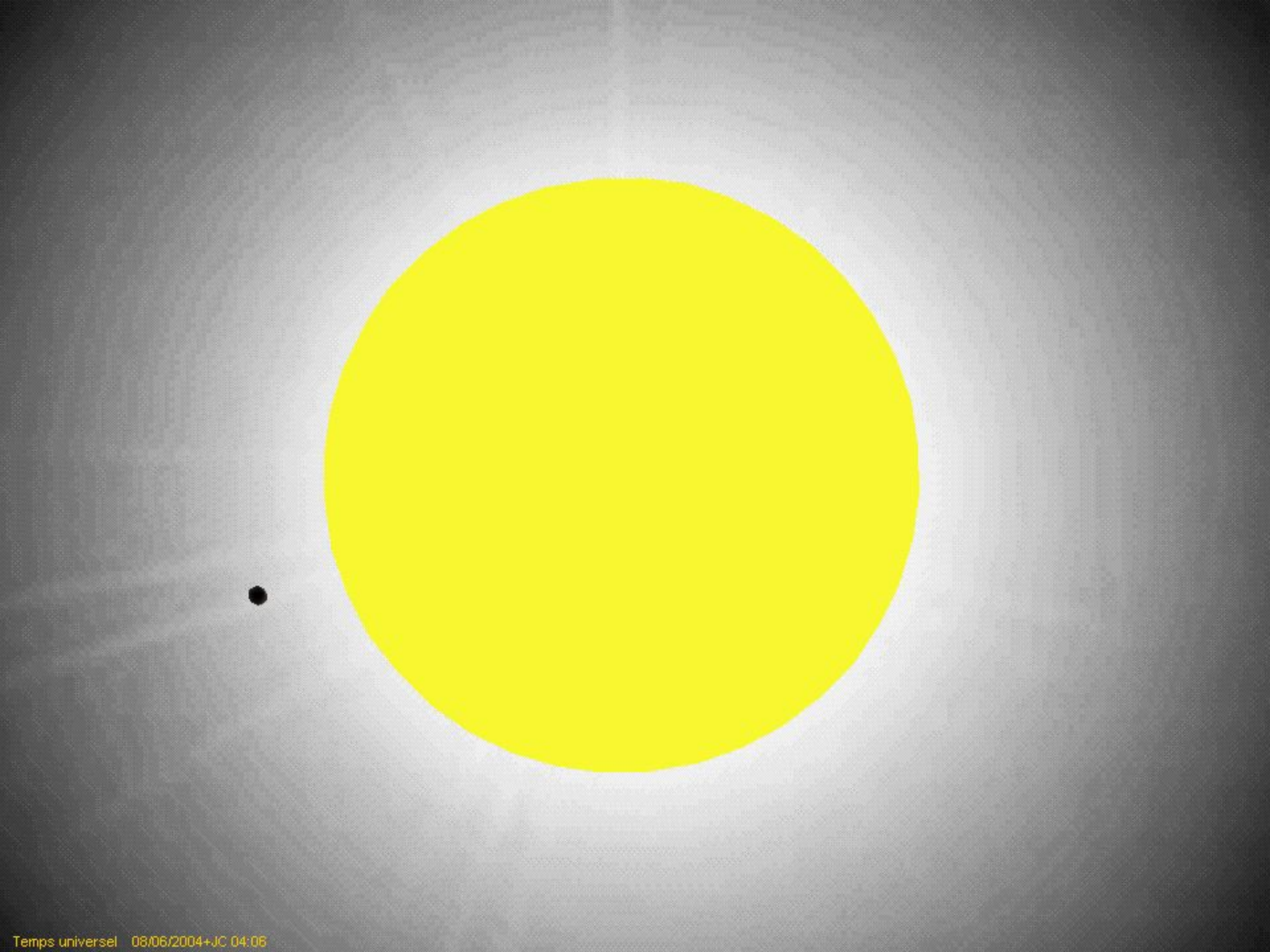
Dernier transit de Vénus :

- le matin du 6 juin 2012 en France.

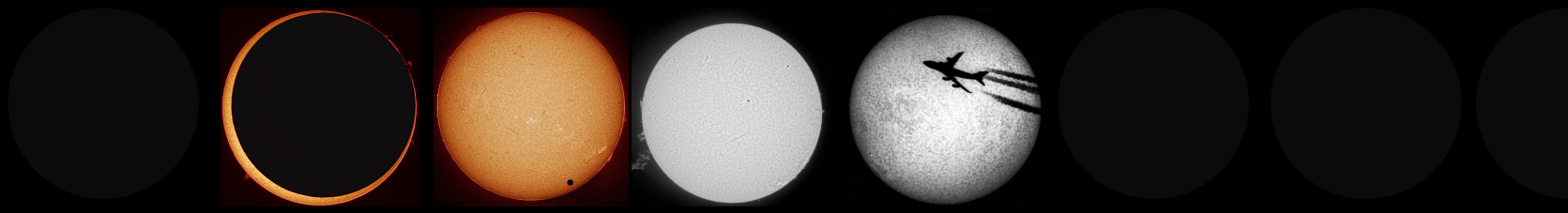
Prochain transit de Vénus :

- 11 décembre 2117.

Passage de Vénus, juin 2004


Temps universel 08/06/2004+JC 04:06

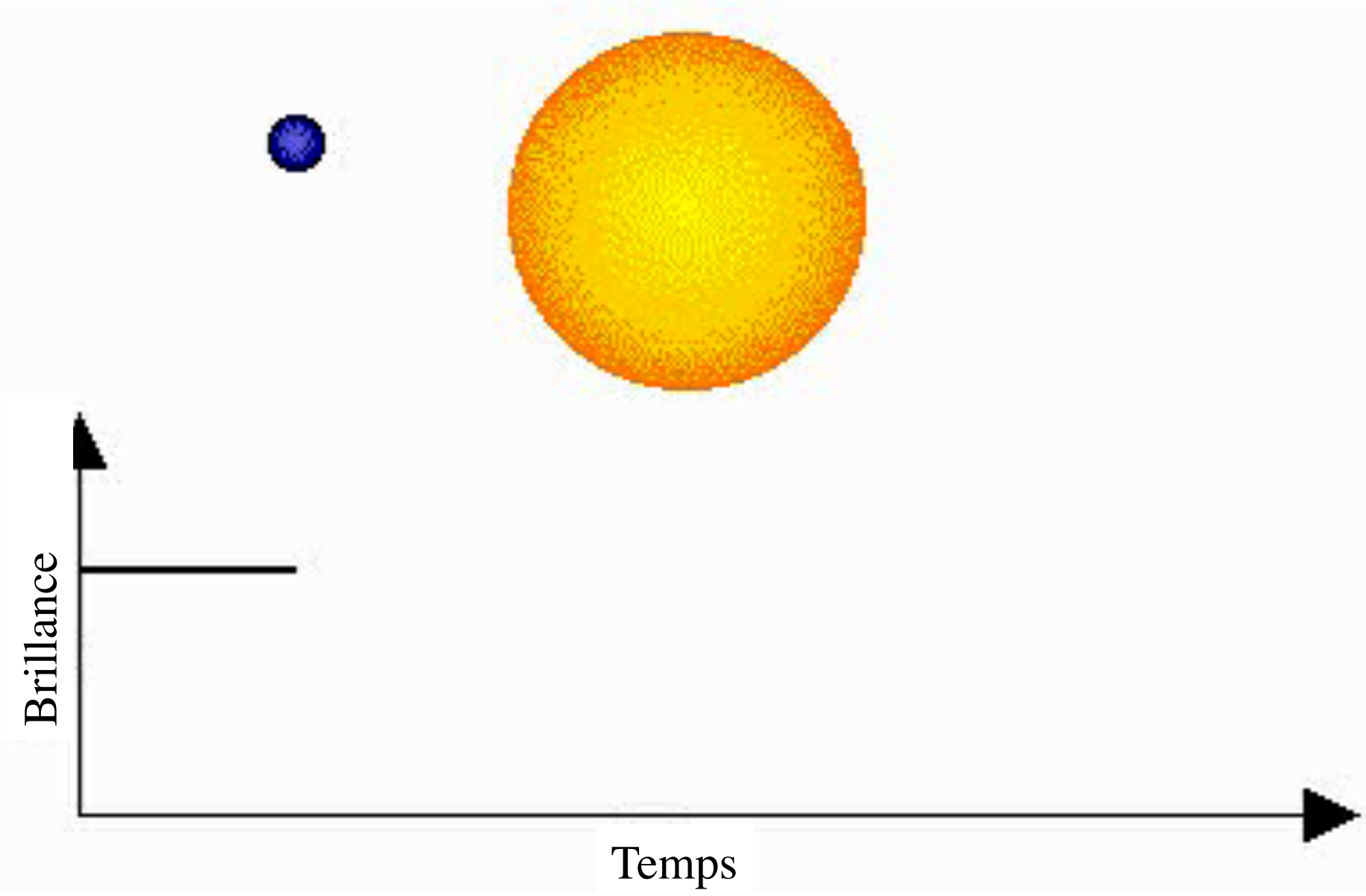
L’étoile occultée



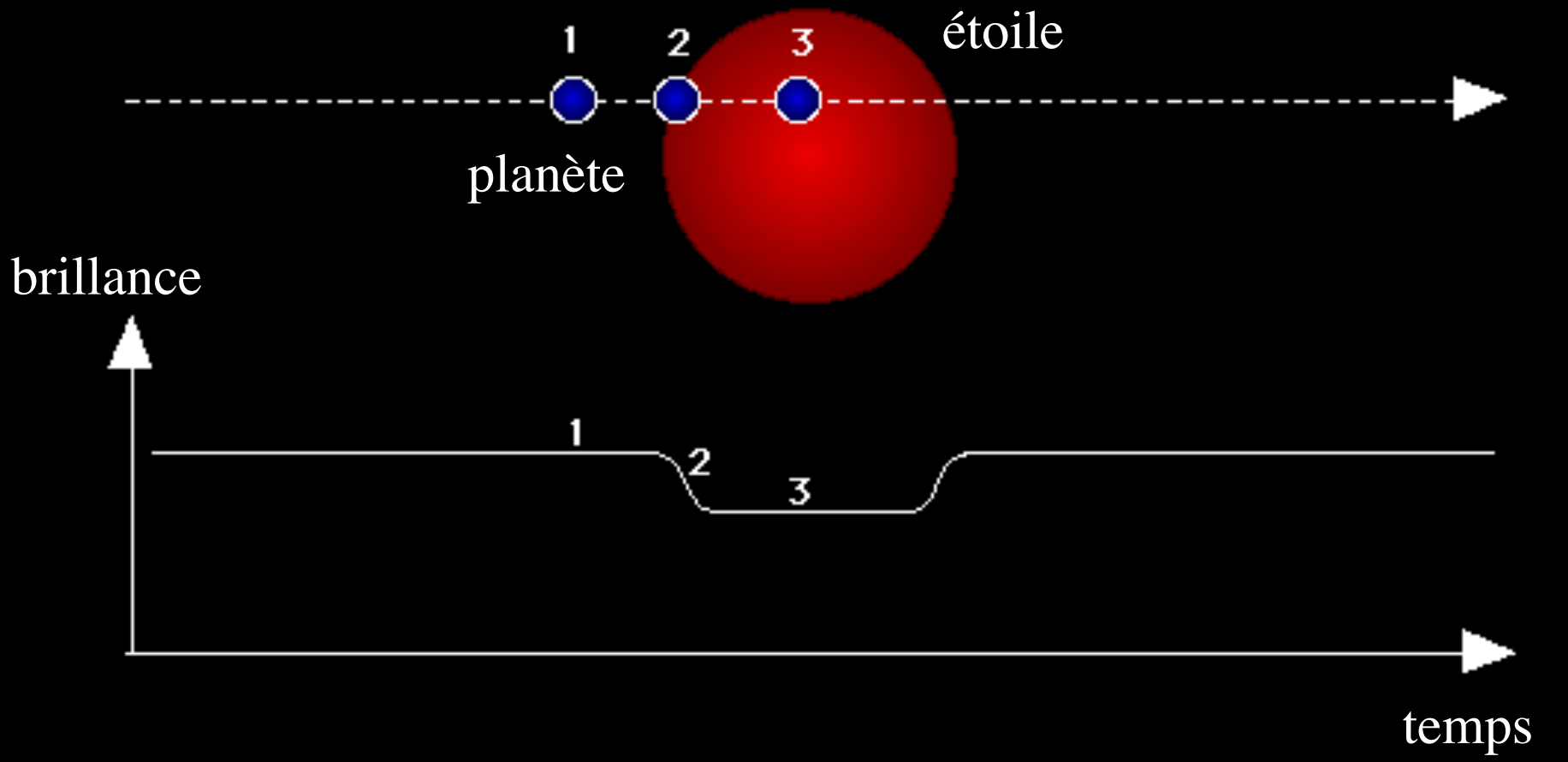
L’étoile apparaît
moins brillante
lors d’une occultation

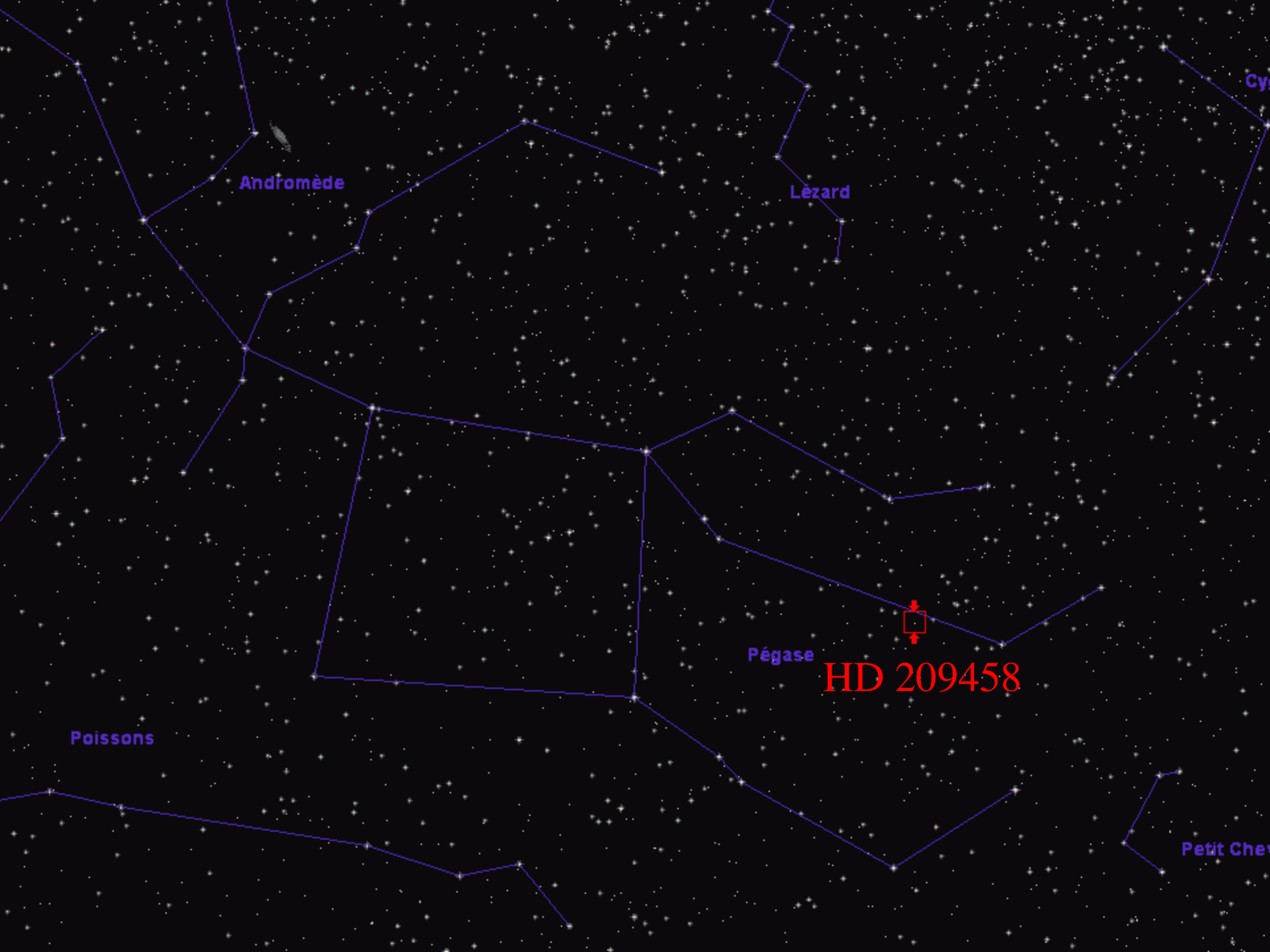
L’étoile occultée

Transits

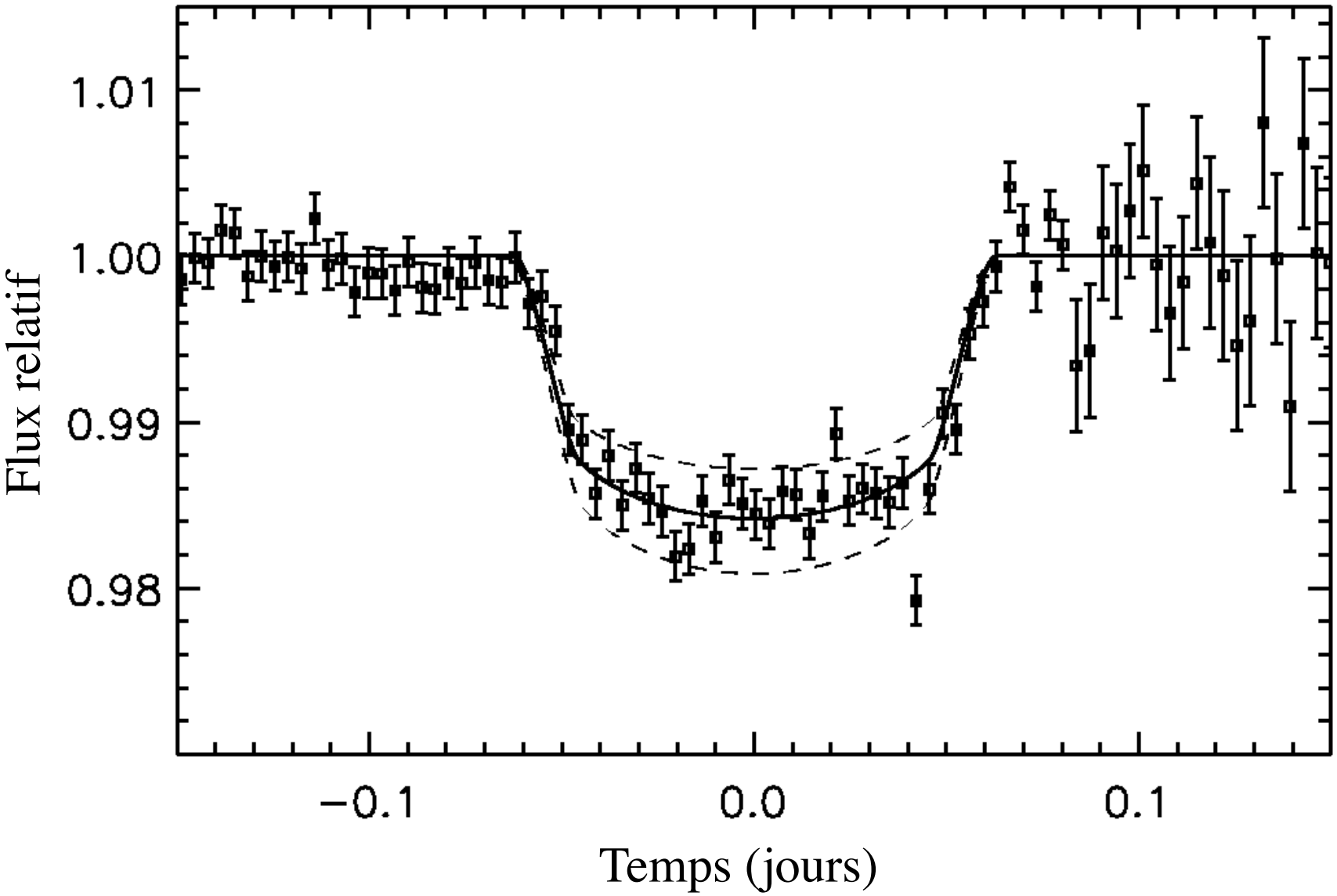


Transits

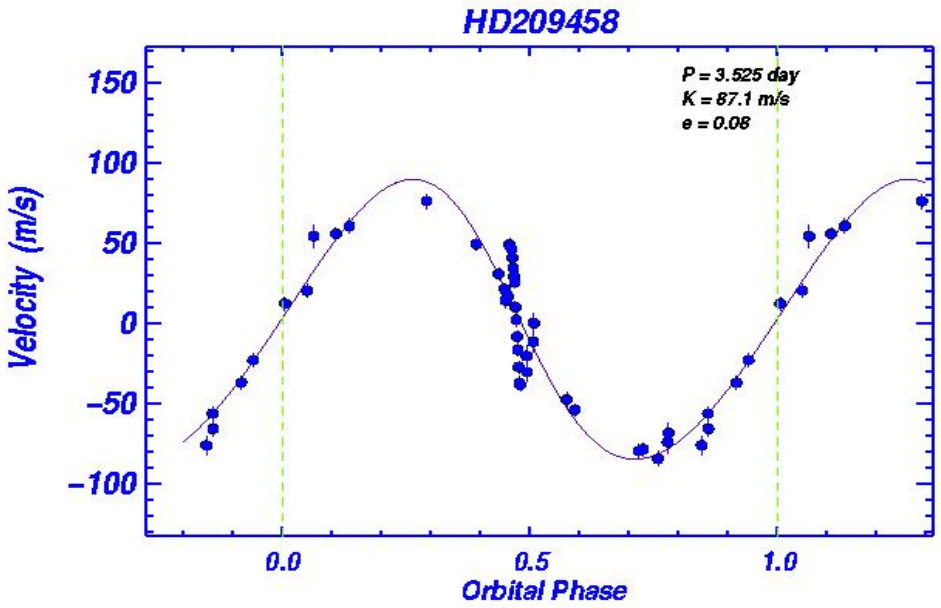


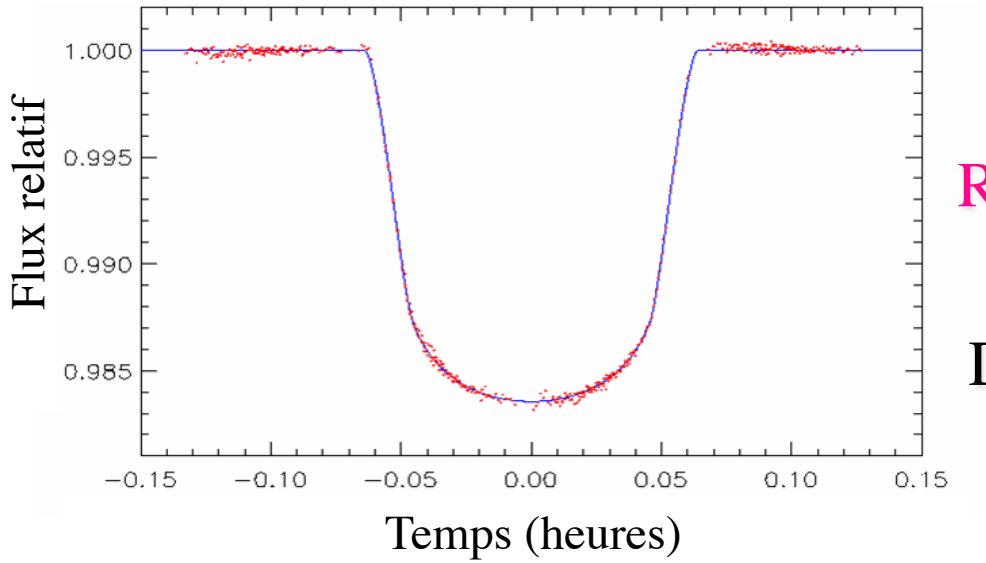

Andromède
Lézard
Pégase
HD 209458
Poissons
Petit Che

Occultation de HD 209458



Vitesse radiale / Occultations





HD 209458b

Période = 3,524738 jours

Masse = 0,69 ± 0,05 $M_{Jupiter}$

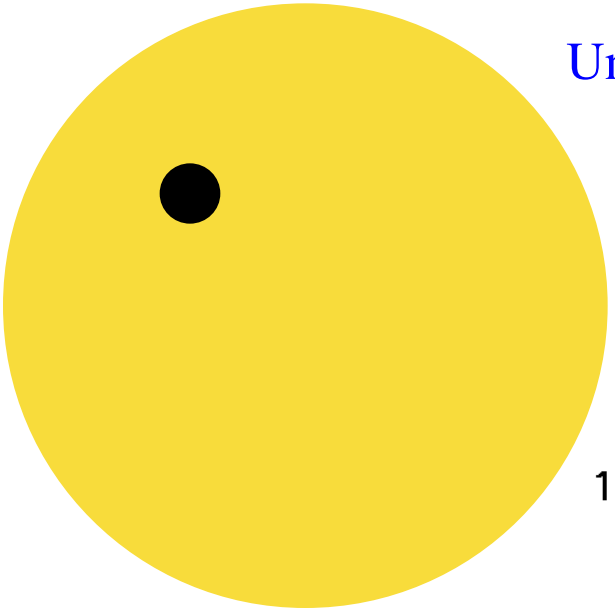
Rayon = 1,35 ± 0,04 $R_{Jupiter}$

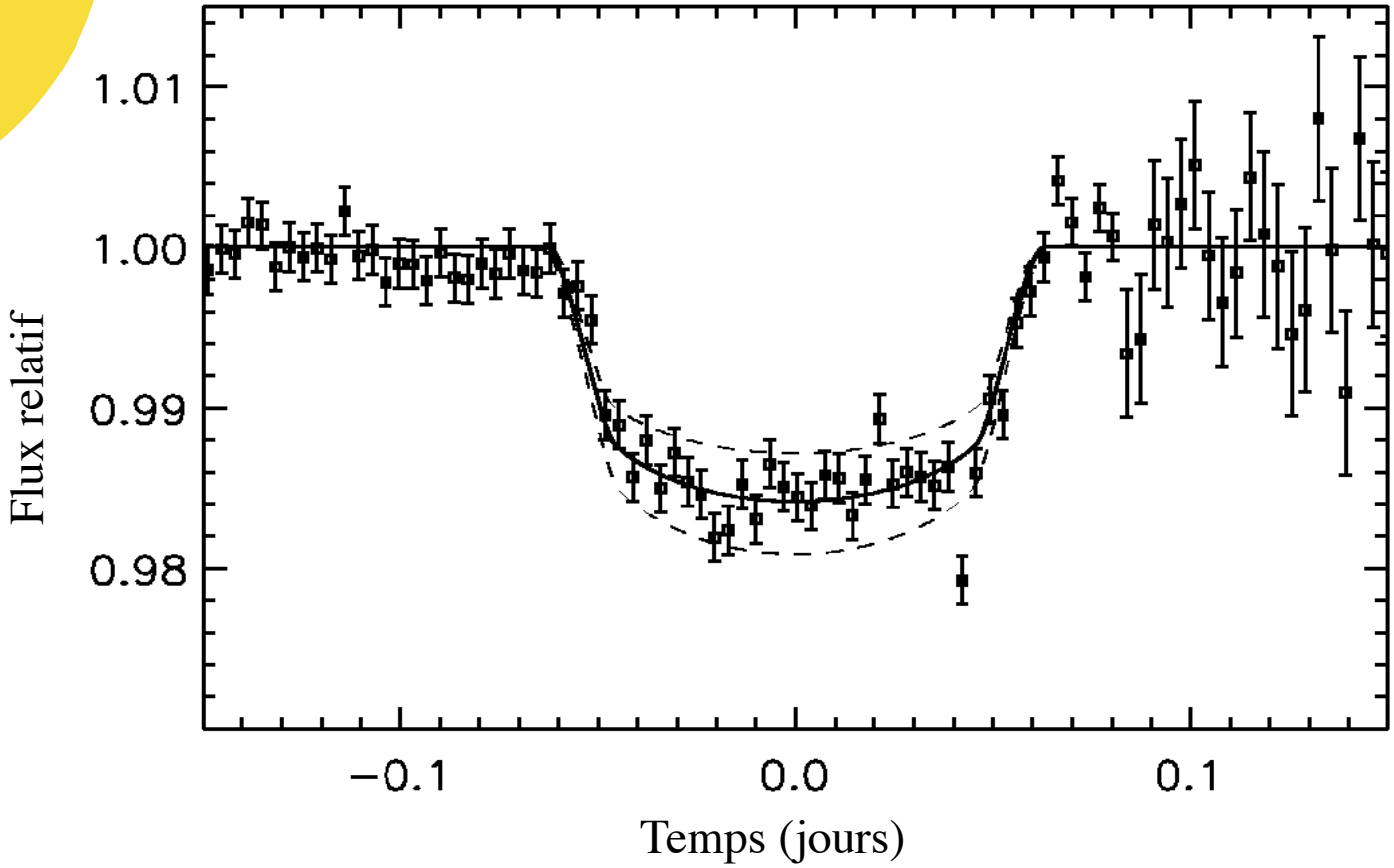
Densité = 0,35 ± 0,05 g/cm^3

Profondeur du transit ?

1 %

Un Jupiter devant un Soleil ➔ $R_{Jupiter} = 0{,}1\ R_{Soleil}$





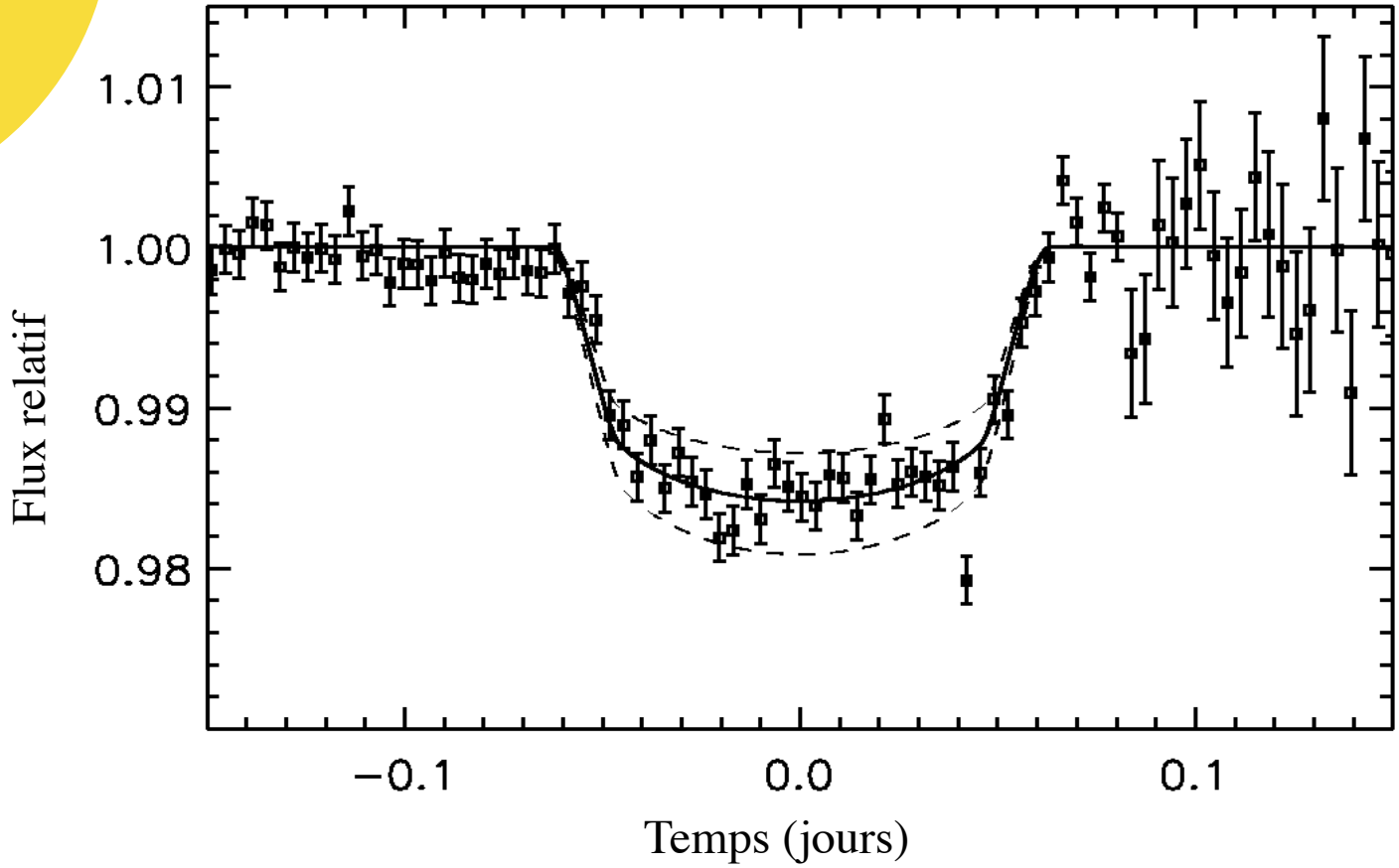
Profondeur du transit ?

1 %

Un Jupiter devant un Soleil ➔ $R_{Jupiter} = 0{,}1\ R_{Soleil}$

Une Terre devant un Soleil ➔ $R_{Terre} = 0{,}01\ R_{Soleil}$

0,01 %



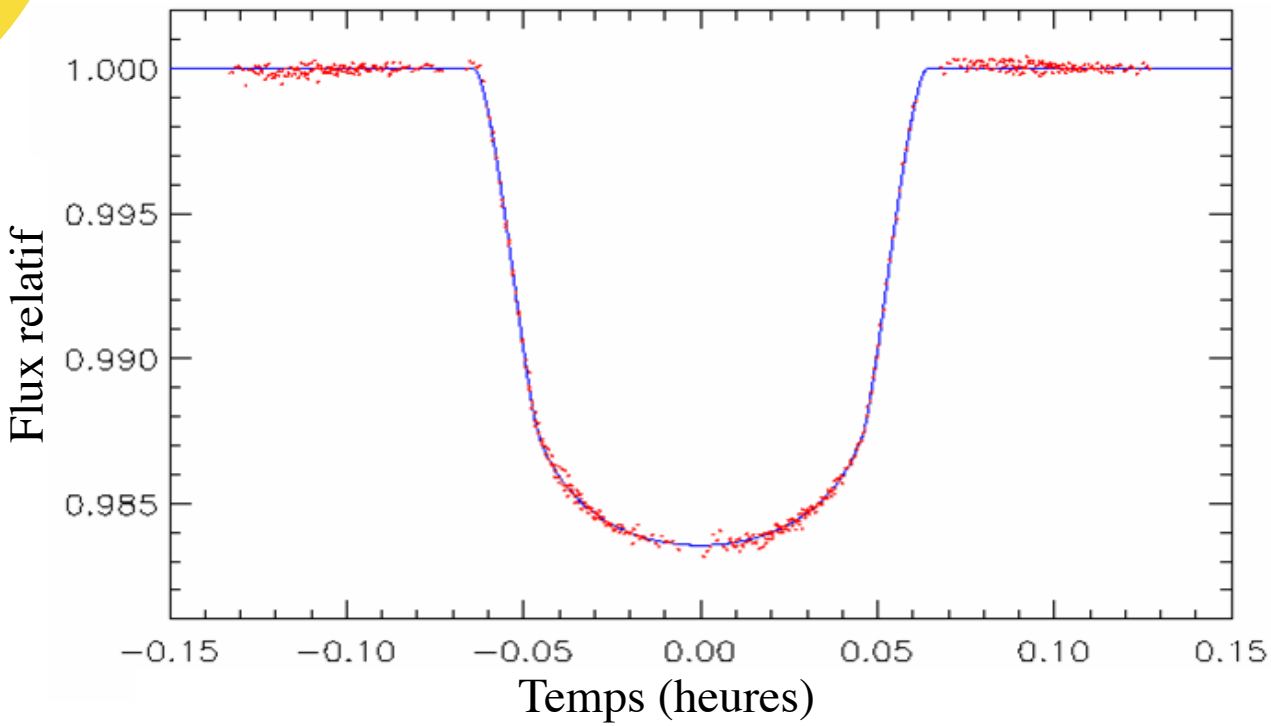
Profondeur du transit ?

1 %

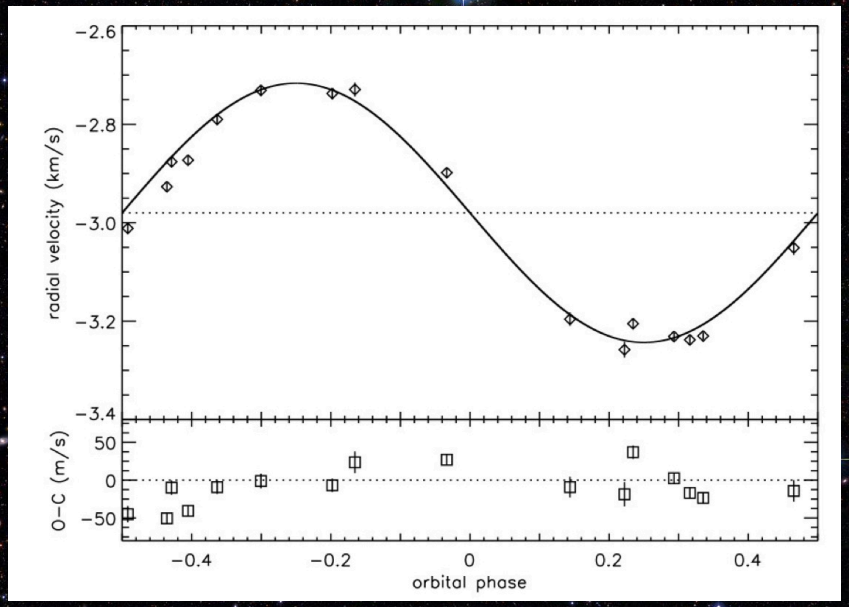
Un Jupiter devant un Soleil ➔ $R_{Jupiter} = 0{,}1\ R_{Soleil}$

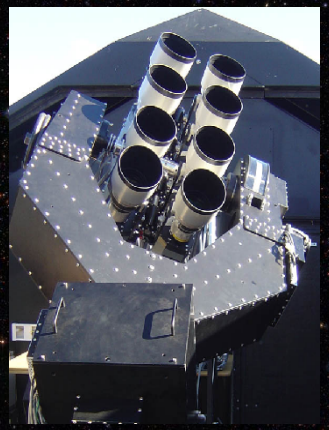
Une Terre devant un Soleil ➔ $R_{Terre} = 0{,}01\ R_{Soleil}$

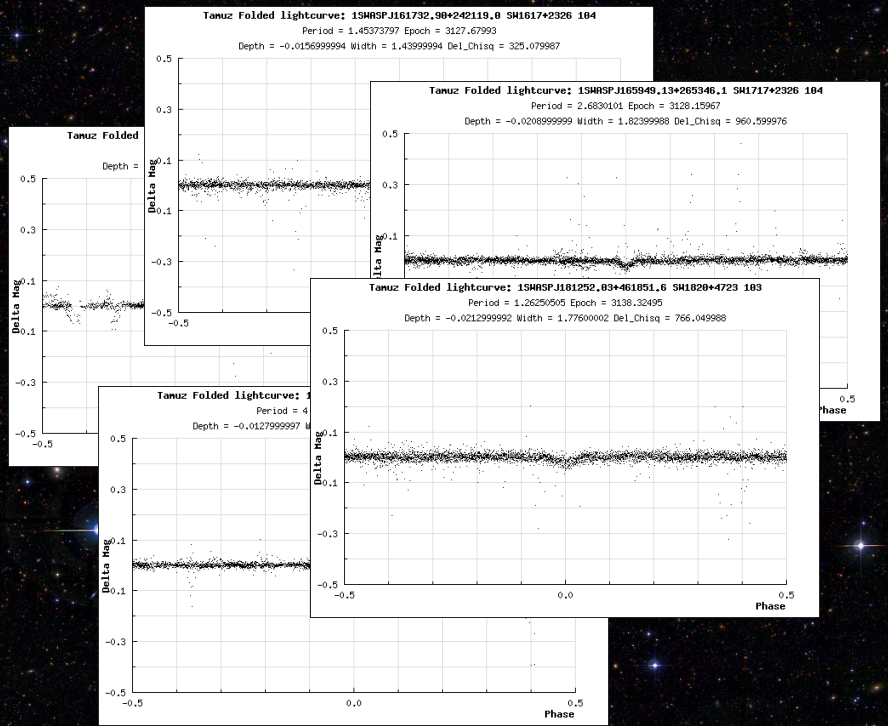
0,01 %

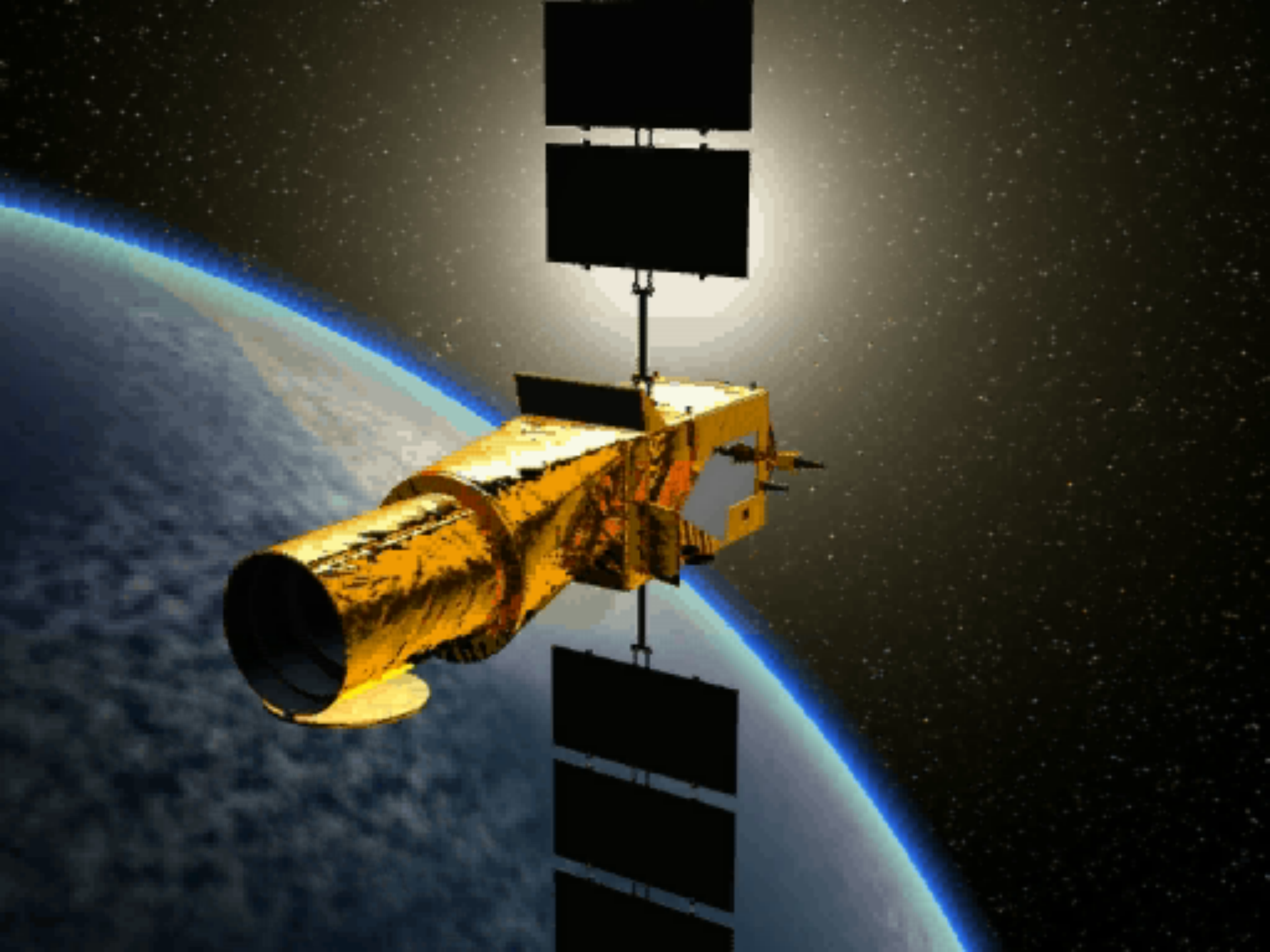


Sondages photométriques au sol pour rechercher des planètes en transits

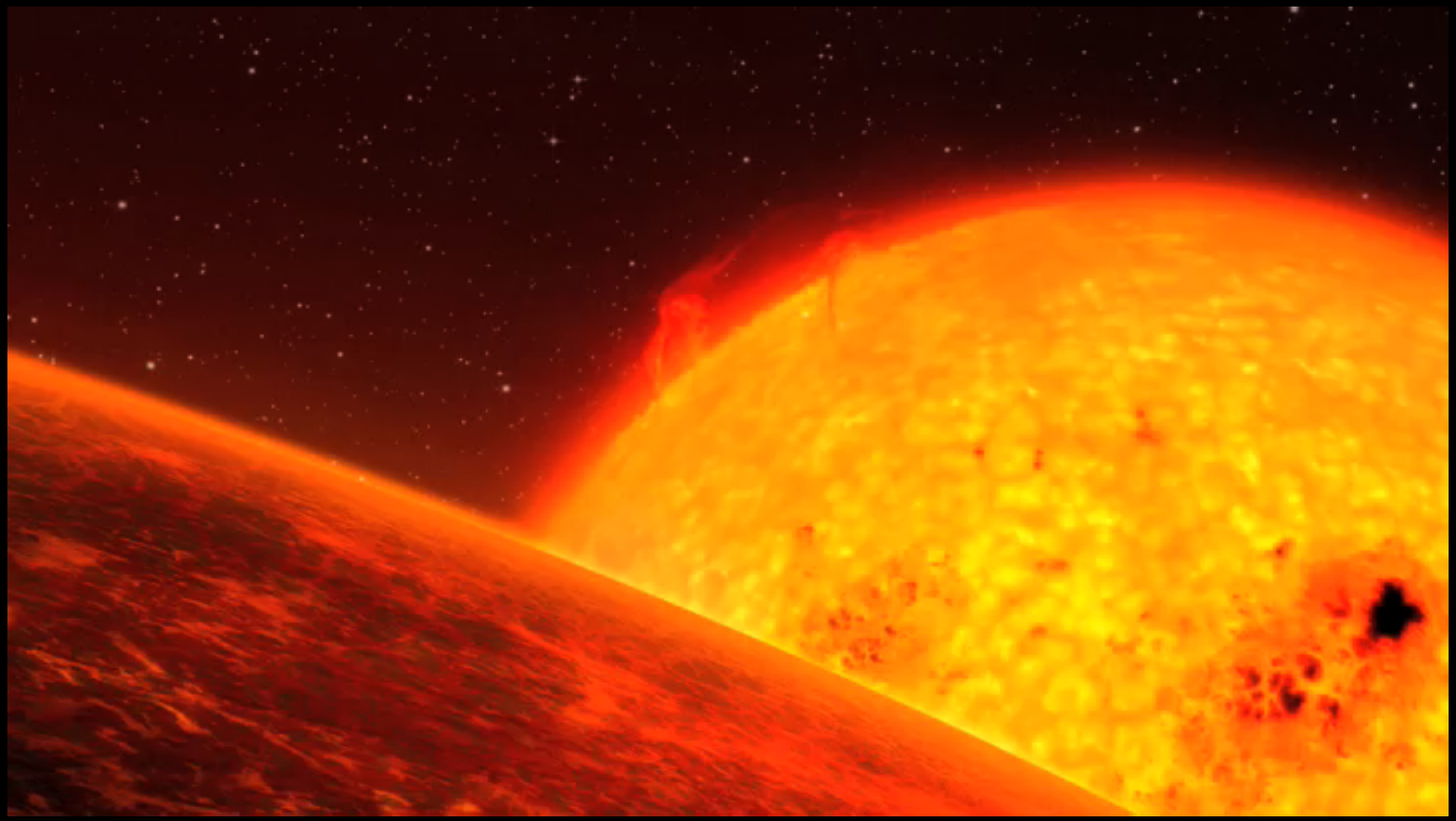








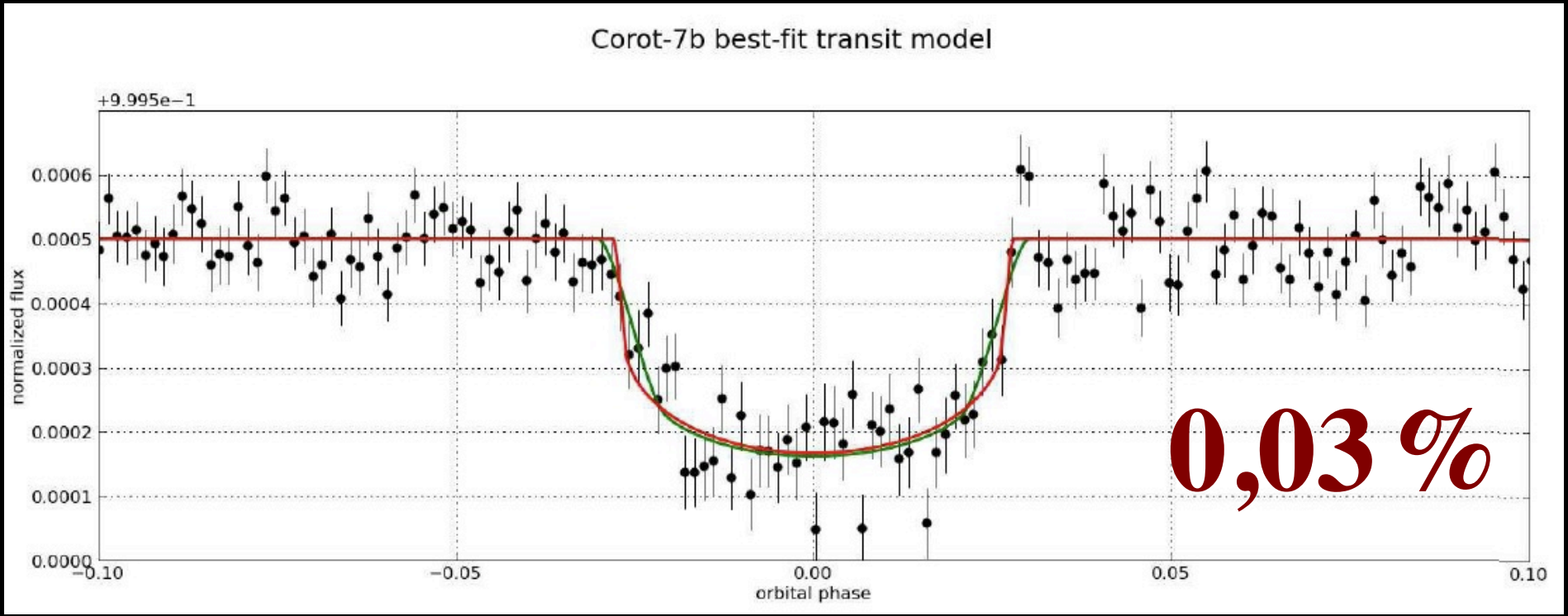
CoRoT-7b :
première super-Terre avec mesure de masse et de rayon



5 masses terrestres **1,7 rayon terrestre**

Densité : 5,5 g/cm³ (Jupiter : 1,3 / Terre : 5,5)

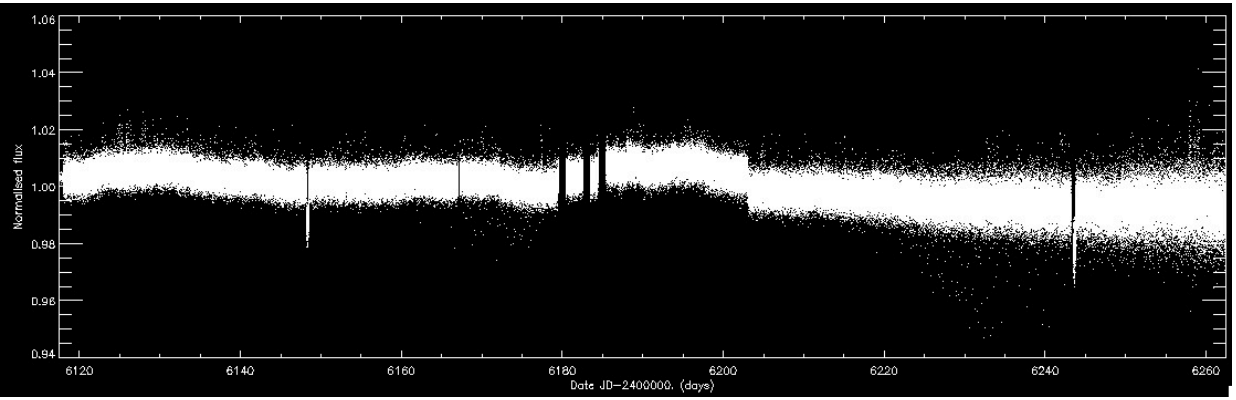
CoRoT-7b :
première super-Terre avec mesure de masse et de rayon

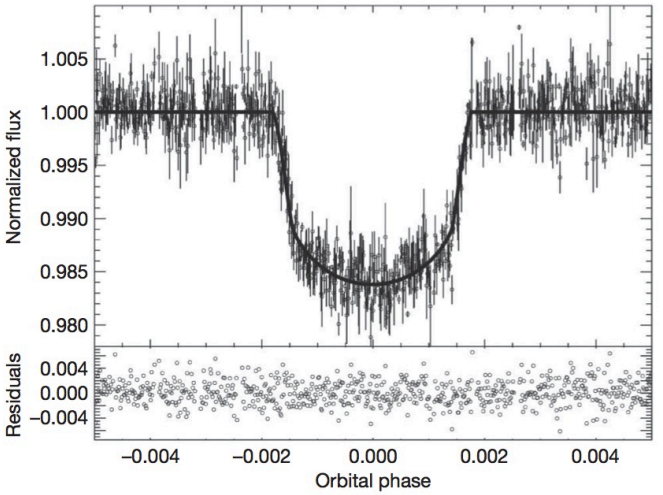


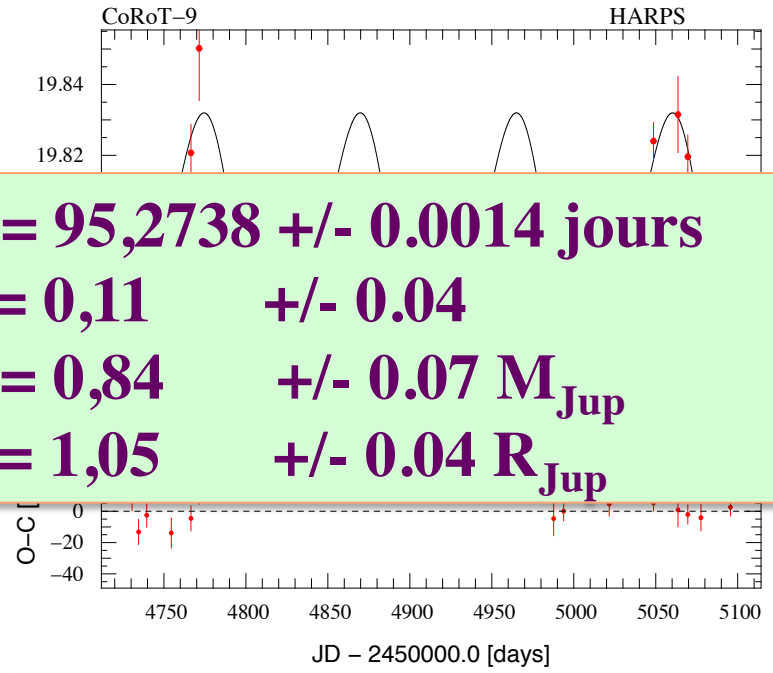
5 masses terrestres **1,7 rayon terrestre**

Densité : 5,5 g/cm³ (Jupiter : 1,3 / Terre : 5,5)

CoRoT-9b :
un Jupiter en transit sur une orbite similaire à celle de Mercure





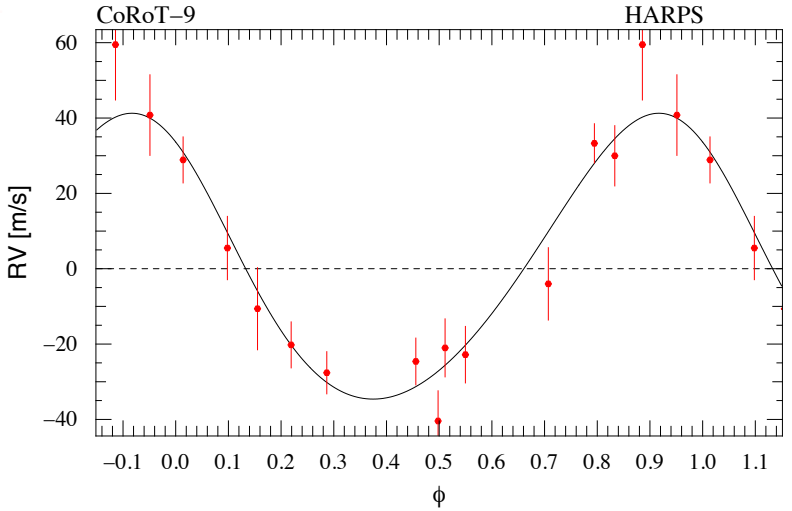


P = 95,2738 +/- 0.0014 jours

e = 0,11 +/- 0.04

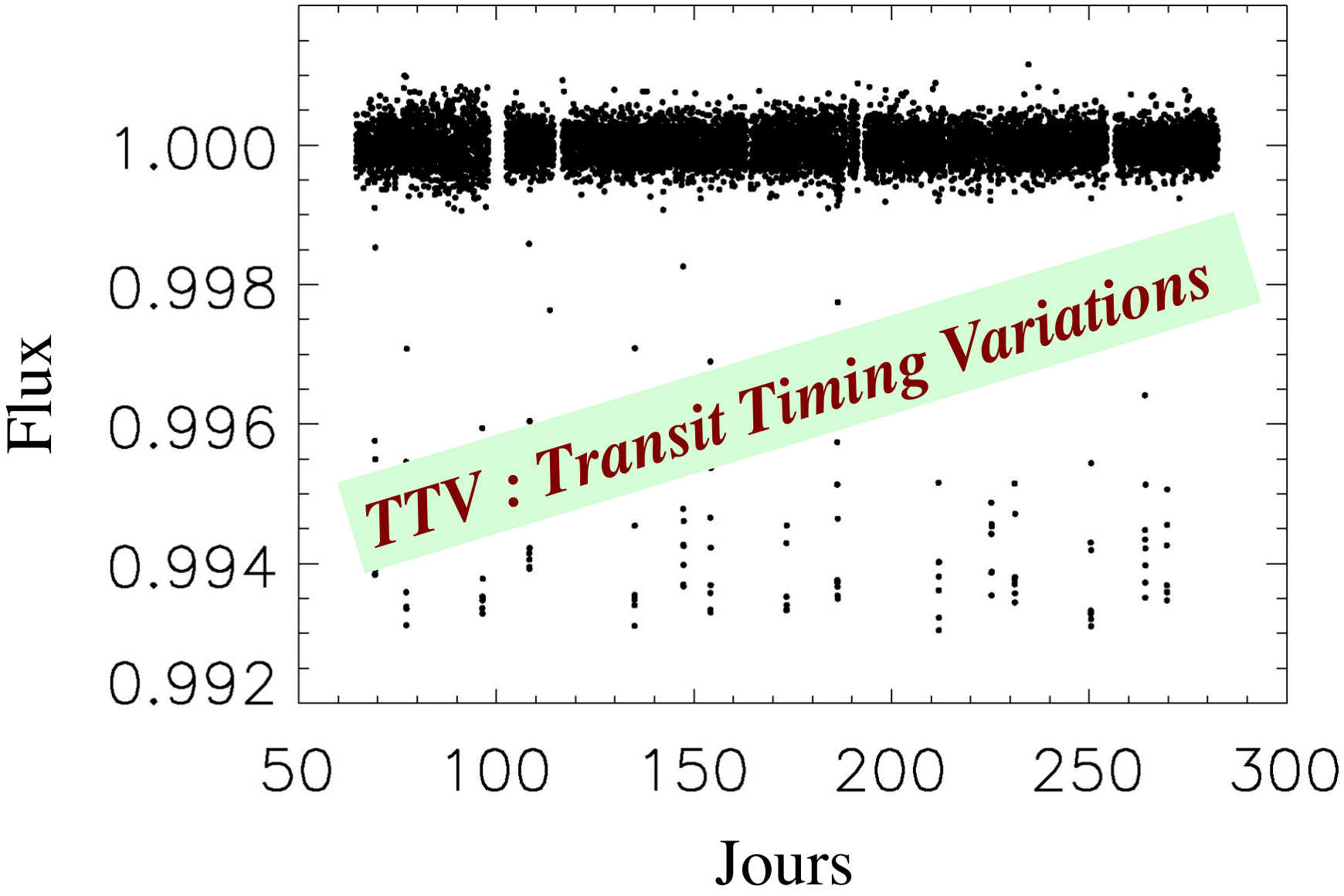
M_p = 0,84 +/- 0.07 M_{Jup}

R_p = 1,05 +/- 0.04 R_{Jup}

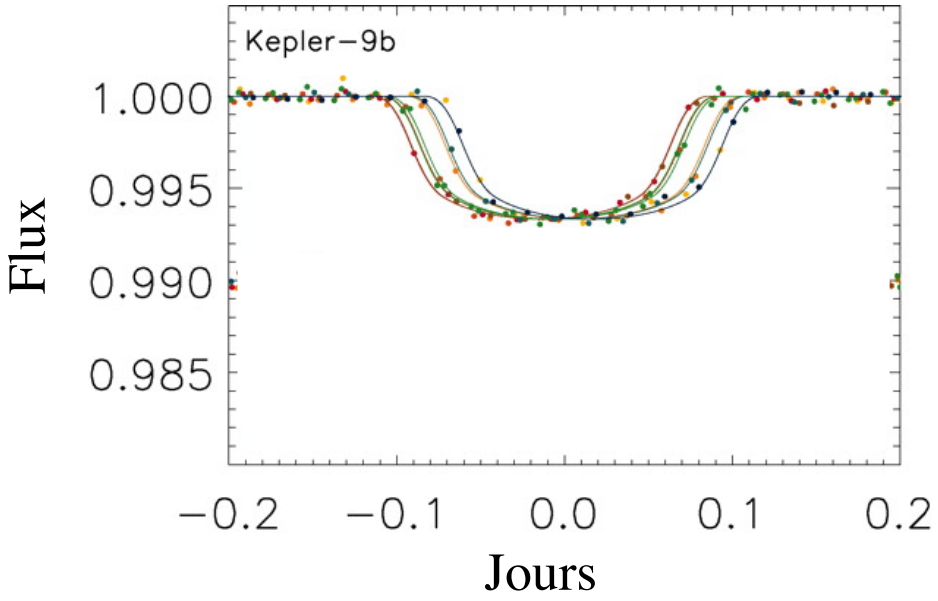


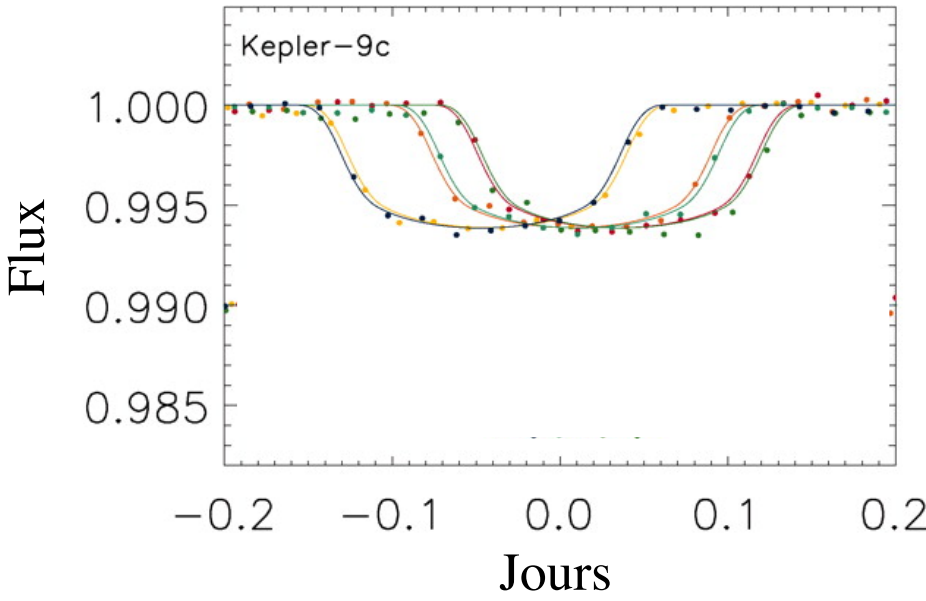
Le satellite *Kepler*

Kepler-9


1.000
0.998
0.996
0.994
0.992
Flux
50
100
150
200
250
300
Jours
TTV : Transit Timing Variations

Kepler-9b et c



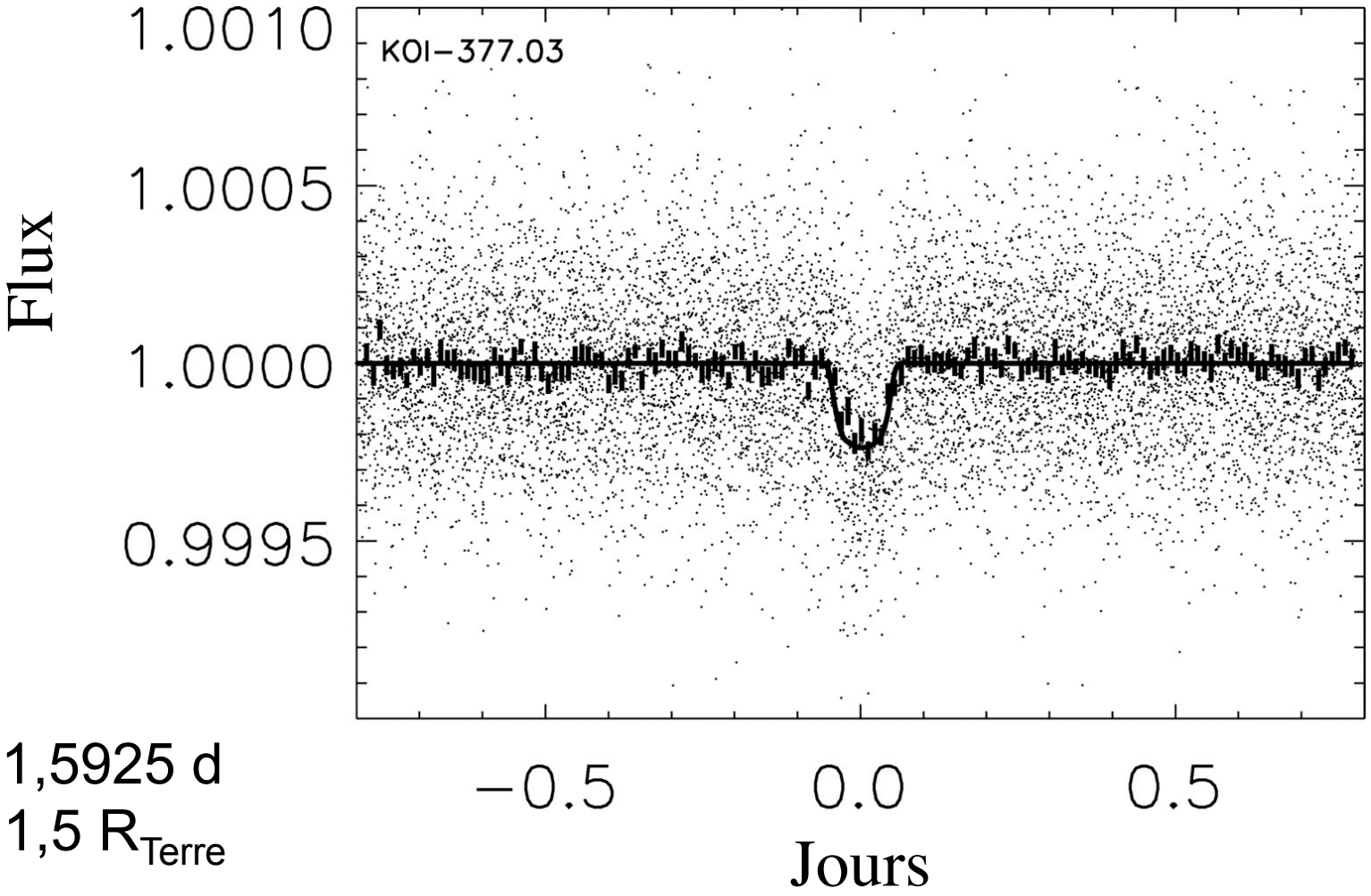


P = 19,2 jours
r_p = 0,84 R_{Jup}
m_p = 0,25 M_{Jup}

P = 38,9 jours
r_p = 0,82 R_{jup}
m_p = 0,17 M_{Jup}

2:1

Kepler-9d



P = 1,5925 d

r_p = 1,5 R_{Terre}

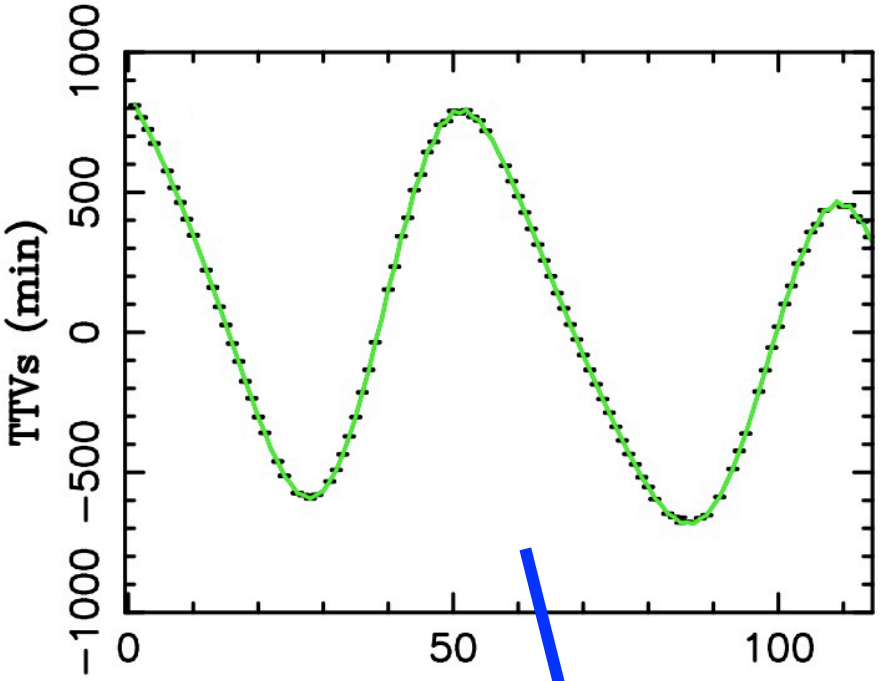
K = 1,5 m/s ?

0,025 %

KOI-142 : la reine des TTV

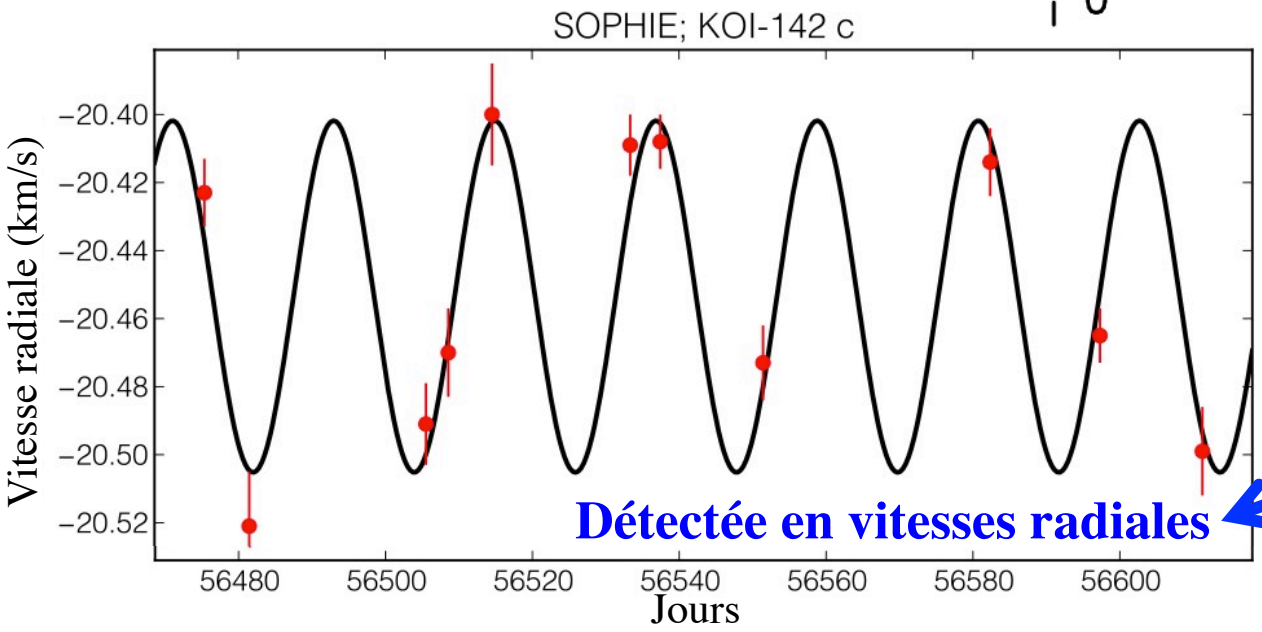
KOI-142b : super-Terre en transit, de 10,95 jours de période.

Énormes TTVs



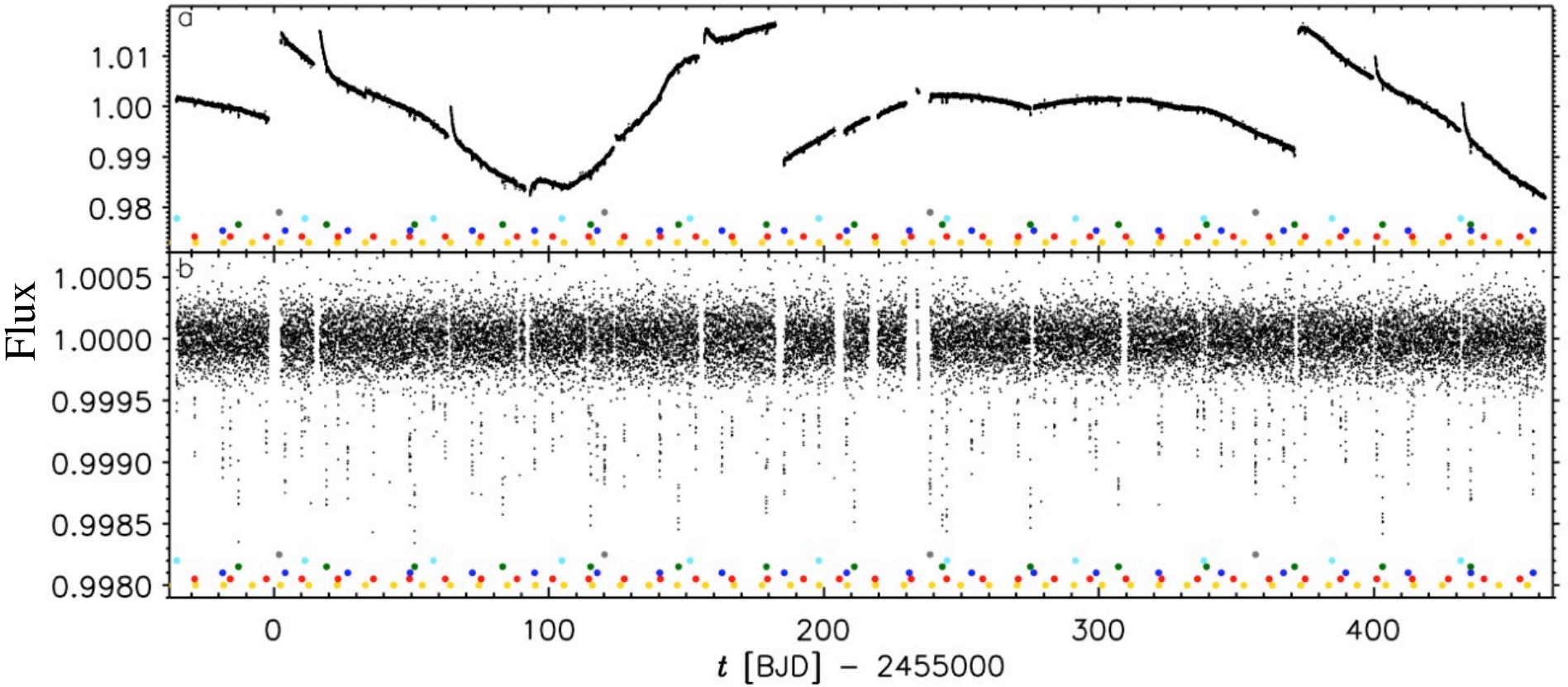
Prédiction de KOI-142c

(*P*=22,34j & 0,7 M_{Jup})



Détectée en vitesses radiales

Kepler-11


a
b
1.01
1.00
0.99
0.98
1.0005
1.0000
0.9995
0.9990
0.9985
0.9980
Flux
0
100
200
300
400
t [BJD] − 2455000

P = 10,3 j
r_p = 2,0 R_{Terre}
m_p = 4,3 M_{Terre}

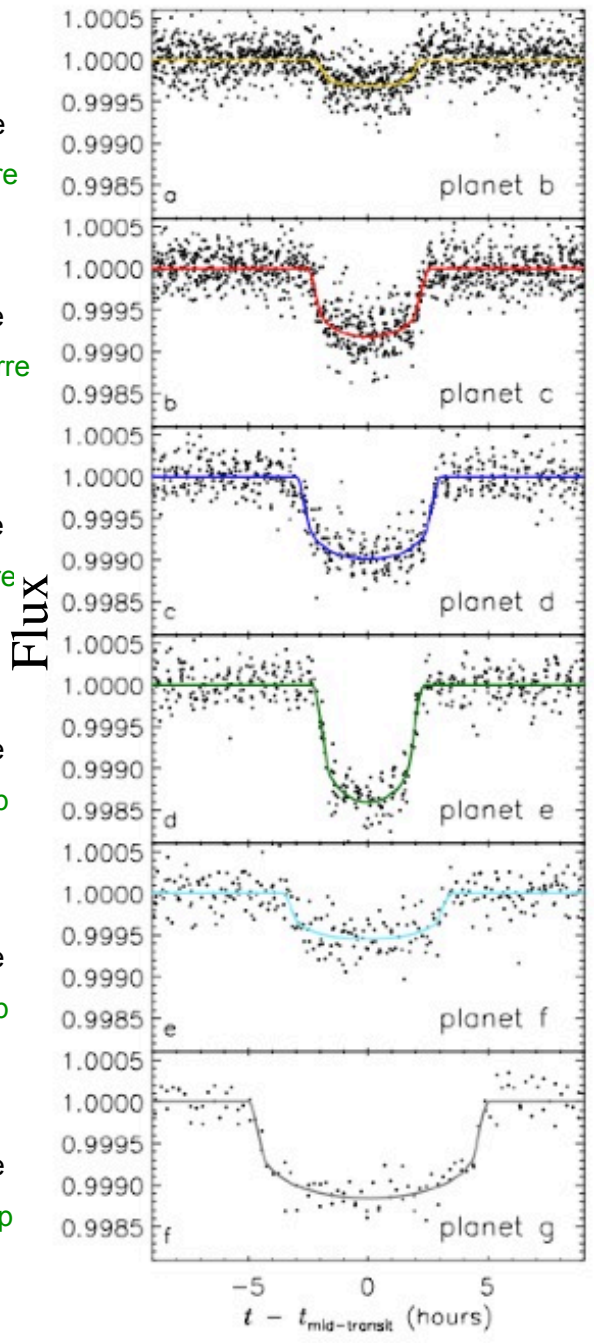
P = 13,0 j
r_p = 3,1 R_{Terre}
m_p = 13,5 M_{Terre}

P = 22,7 j
r_p = 3,4 R_{Terre}
m_p = 6,1 M_{Terre}

P = 32,0 j
r_p = 4,5 R_{Terre}
m_p = 8,4 M_{Jup}

P = 46,7 j
r_p = 2,6 R_{Terre}
m_p = 2,3 M_{Jup}

P = 118,3 j
r_p = 3,7 R_{Terre}
m_p < 300 M_{Jup}



0,03 %

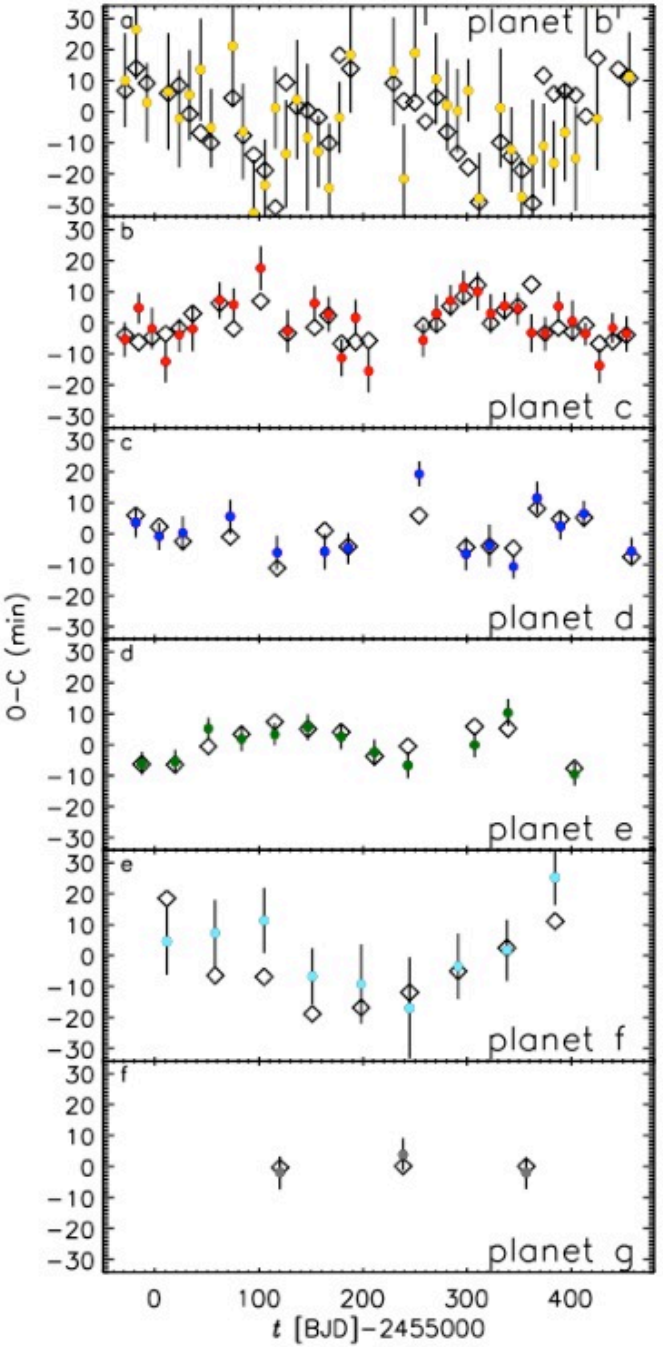
0,08 %

0,10 %

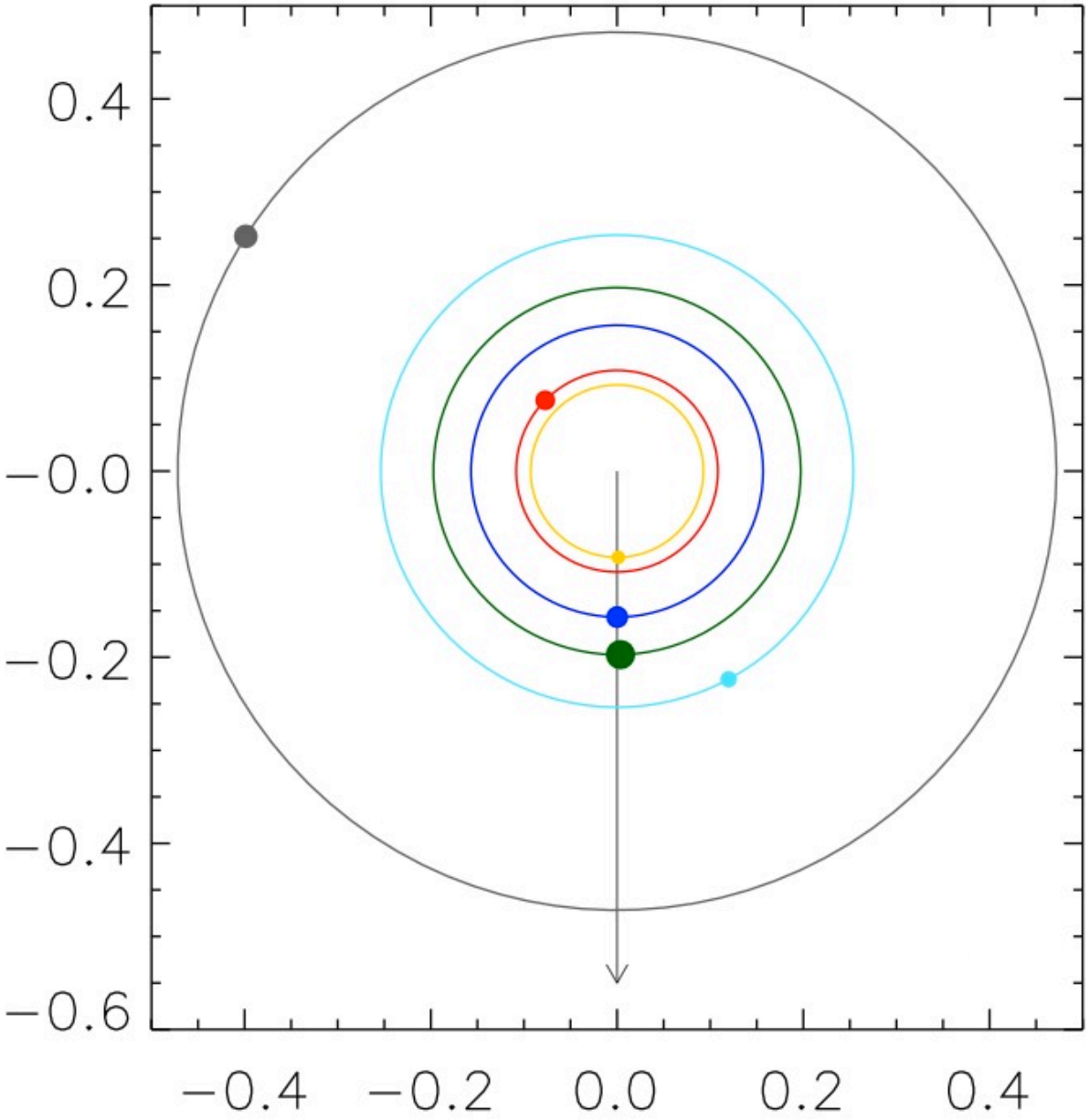
0,14 %

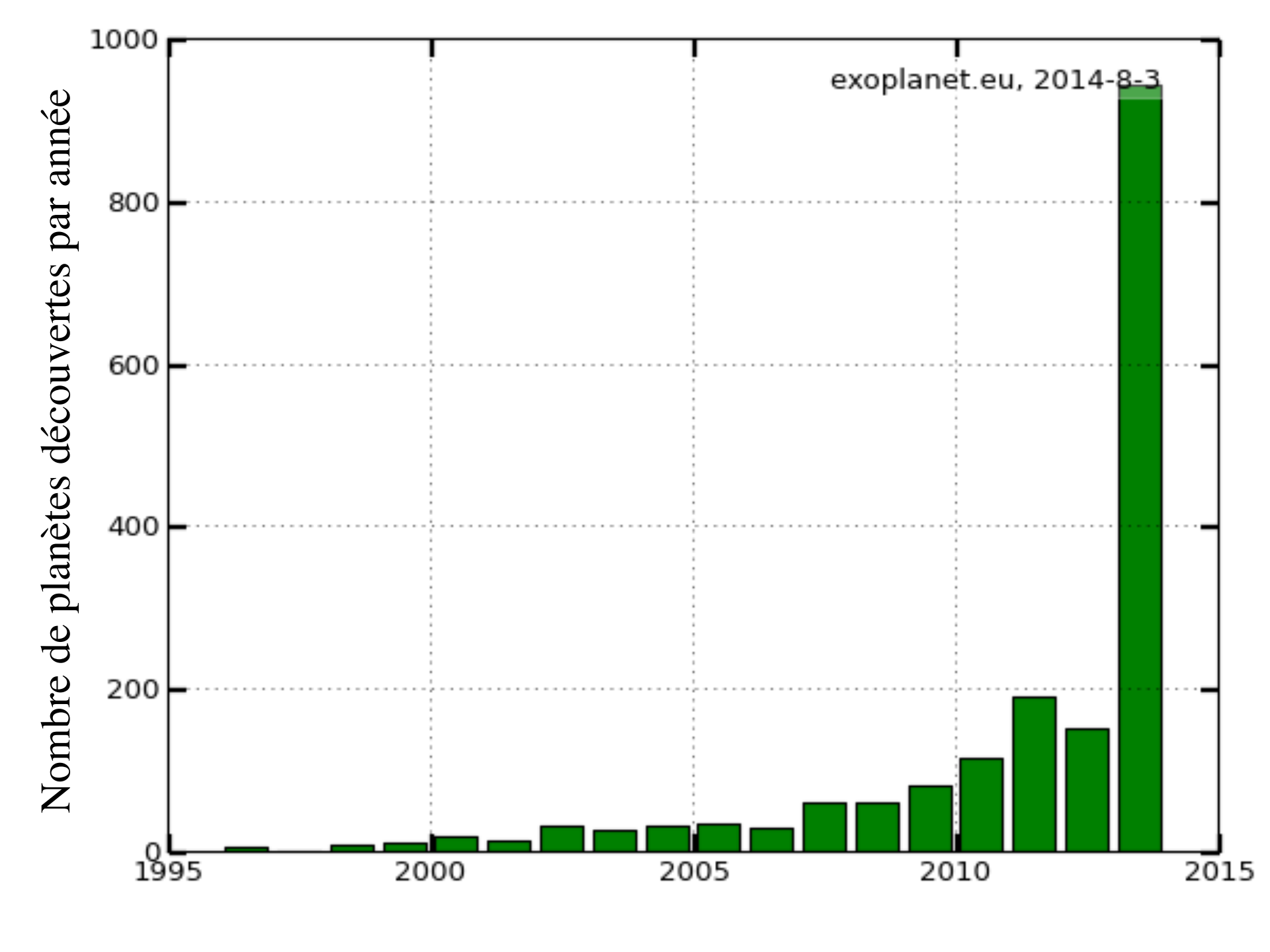
0,05 %

0,12 %



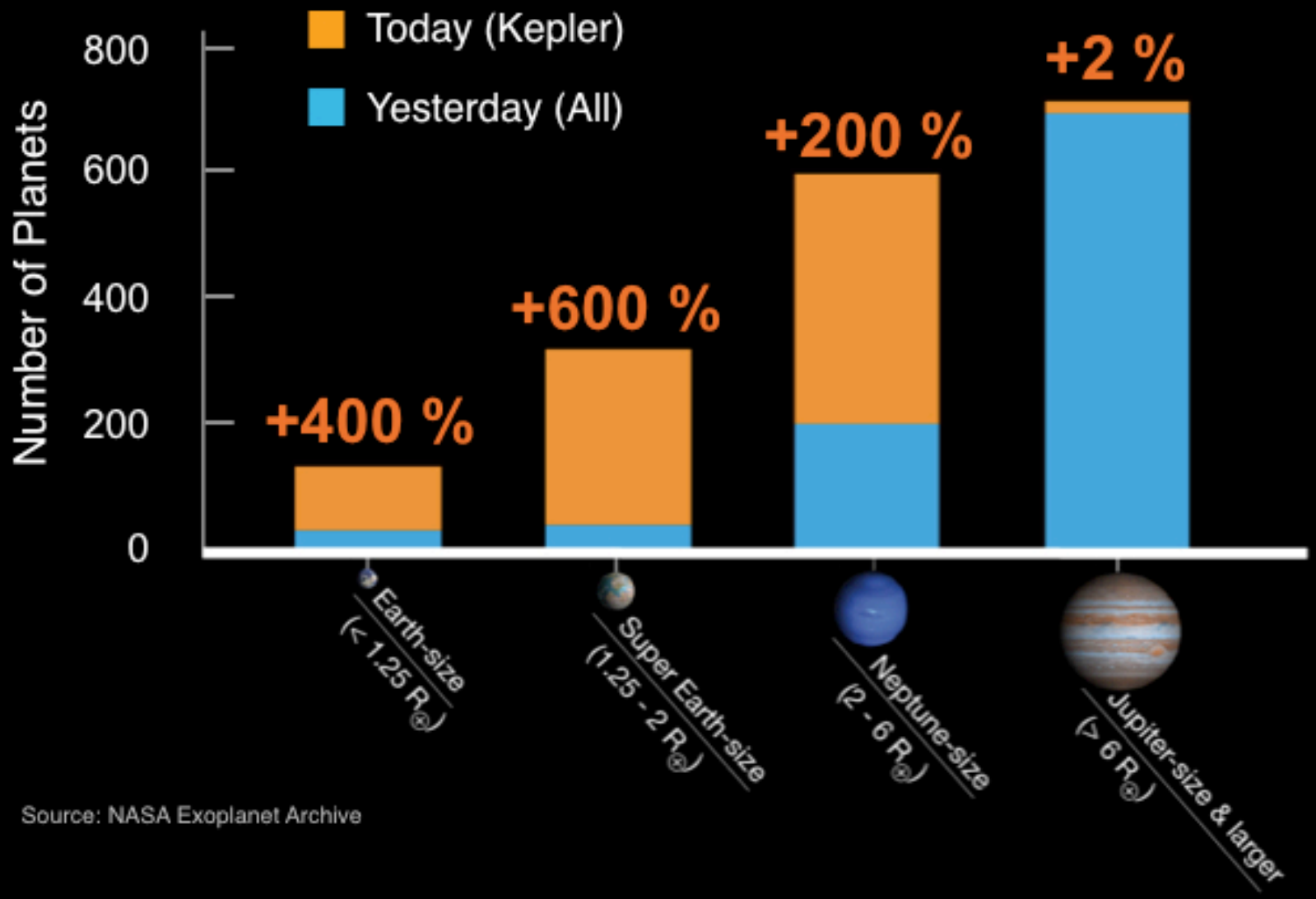
Kepler-11



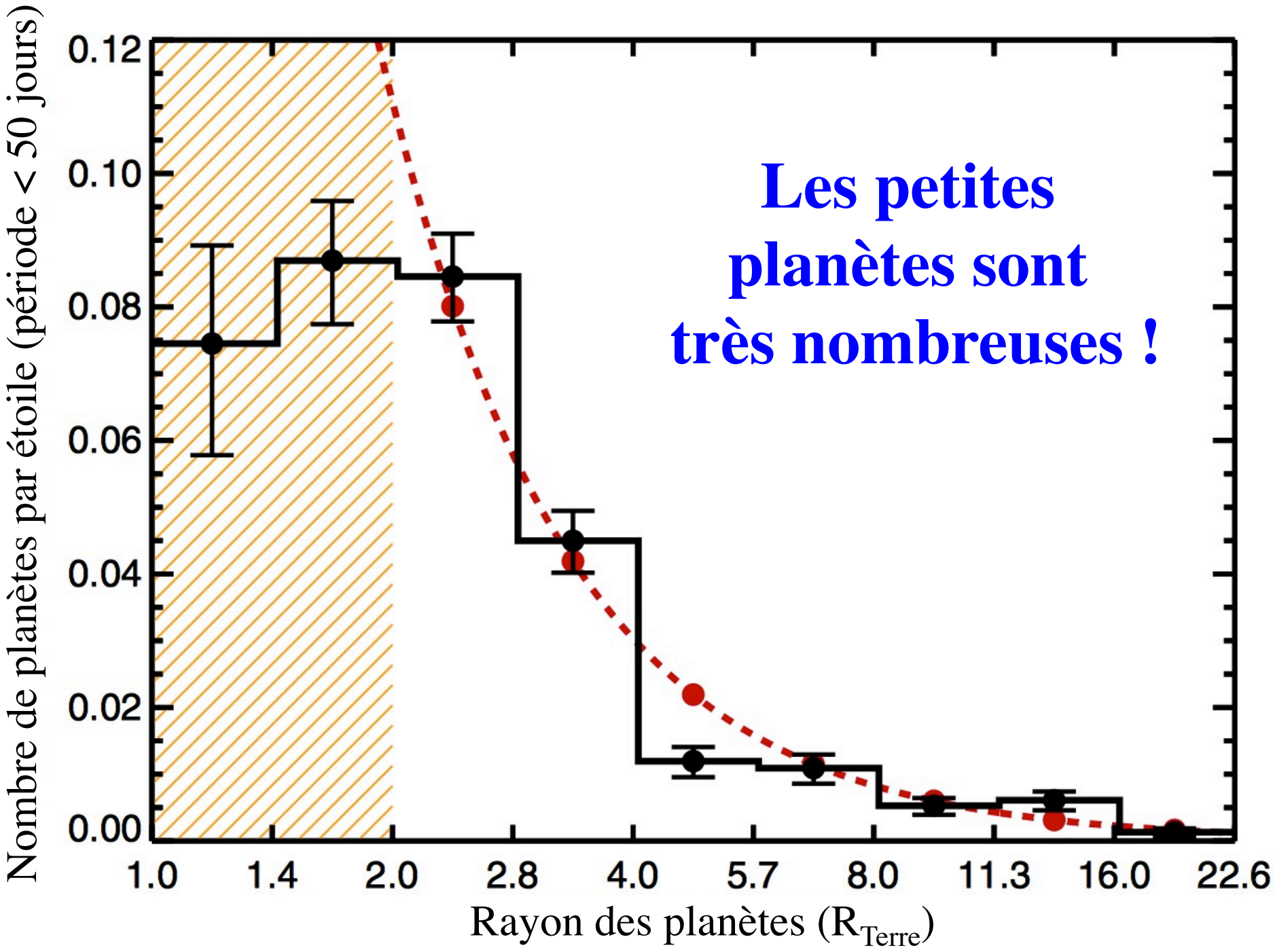

Nombre de planètes découvertes par année
exoplanet.eu, 2014-8-3
1000
800
600
400
200
0
1995
2000
2005
2010
2015

Sizes of Known Exoplanets

As of February 26, 2014

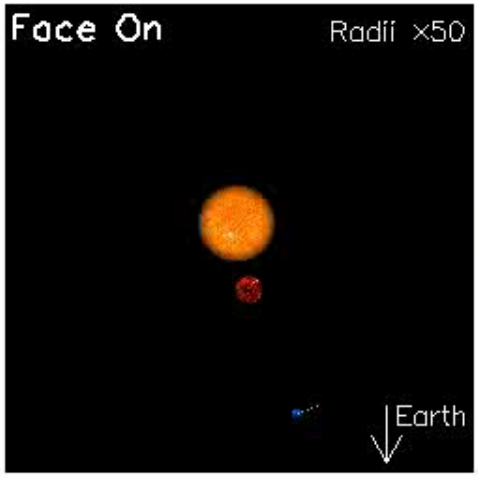


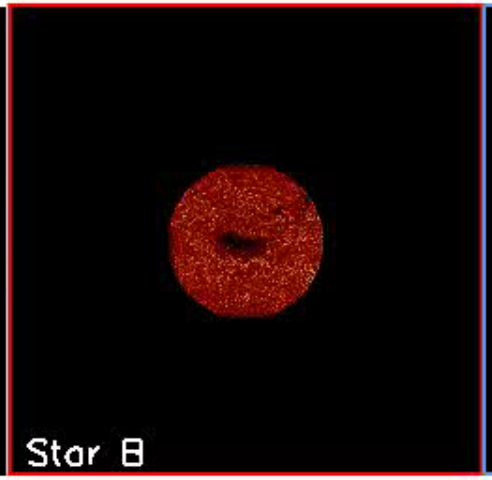
Source: NASA Exoplanet Archive

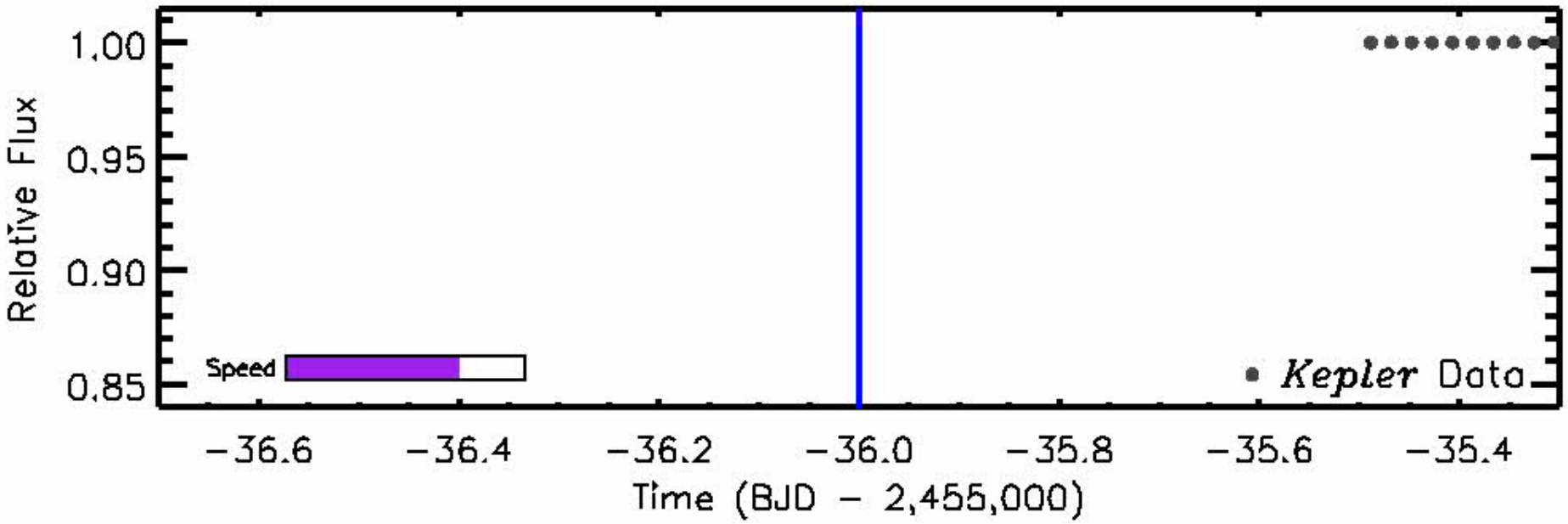

Les petites planètes sont très nombreuses !
Nombre de planètes par étoile (période < 50 jours)
0.12
0.10
0.08
0.06
0.04
0.02
0.00
1.0
1.4
2.0
2.8
4.0
5.7
8.0
11.3
16.0
22.6
Rayon des planètes (R_{Terre})

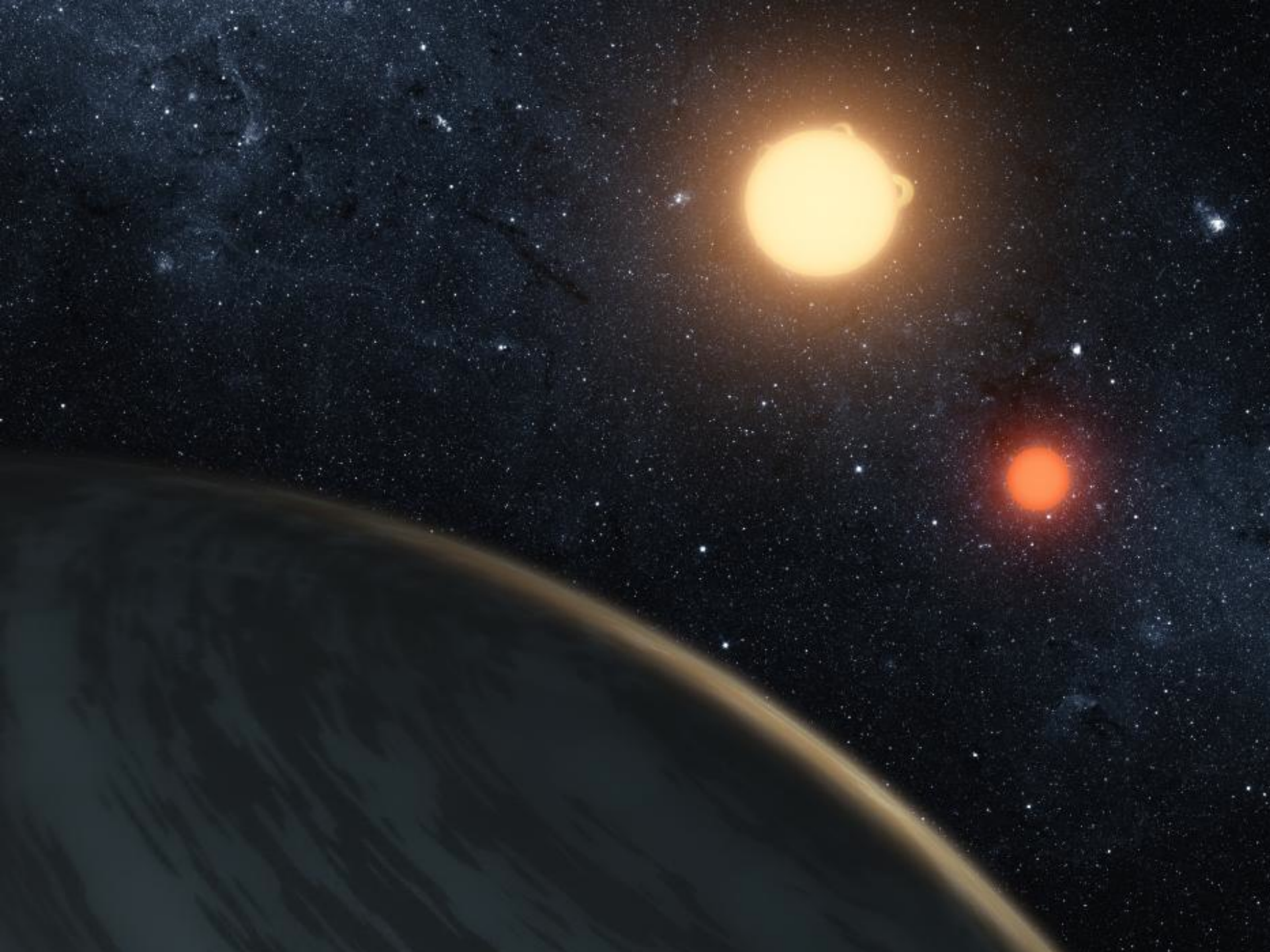
Kepler−16

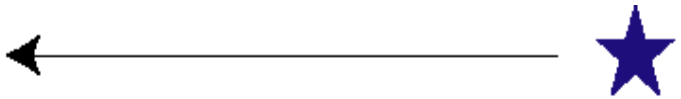
credit: J. Carter

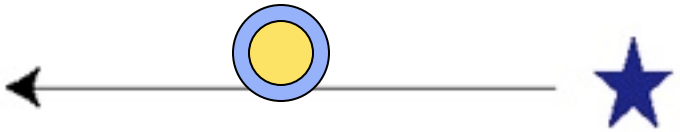


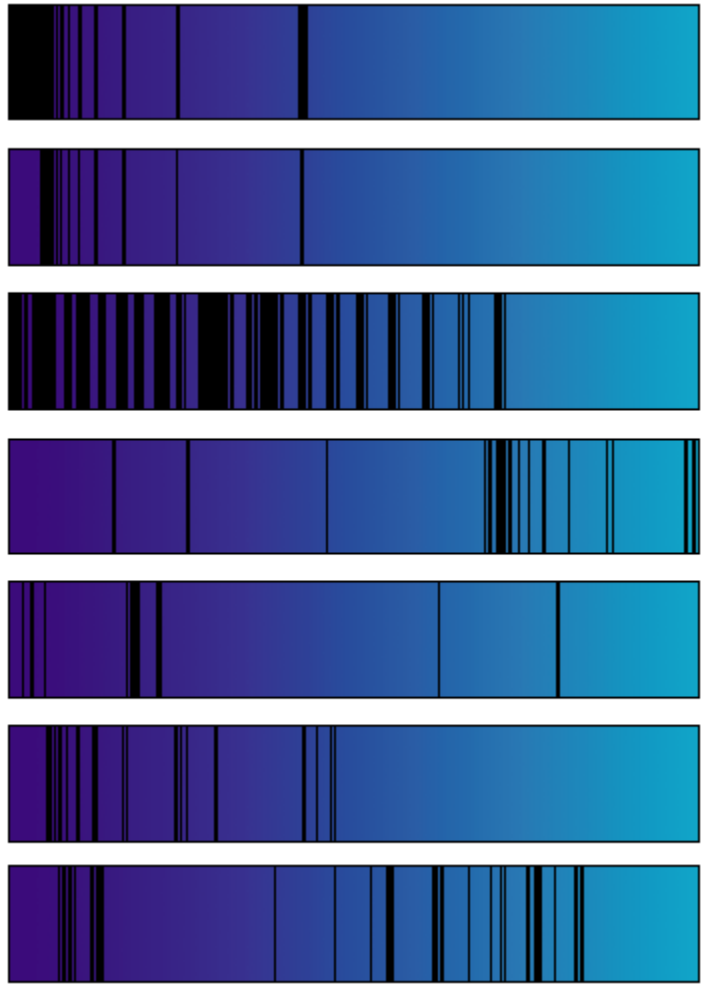




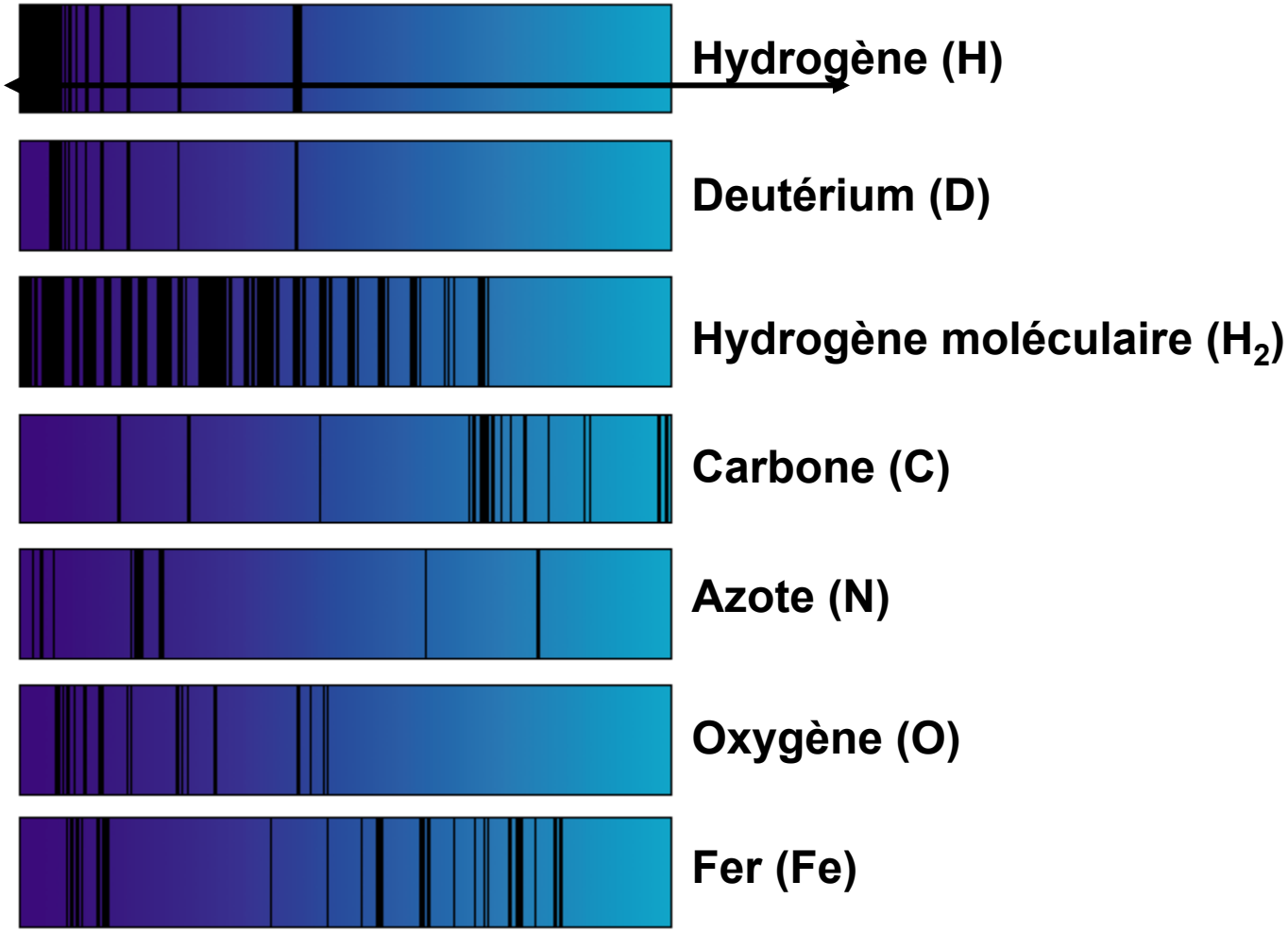


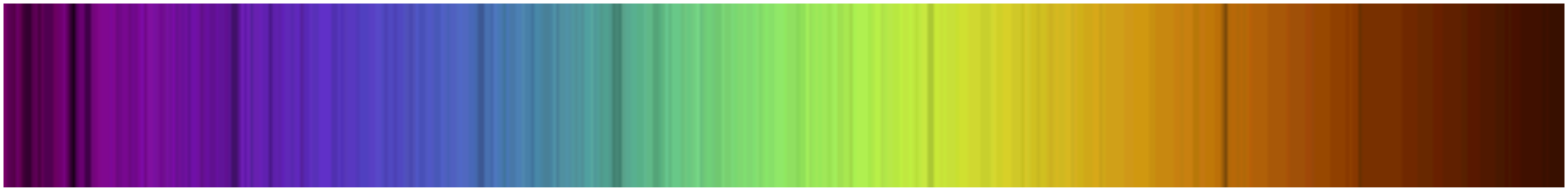




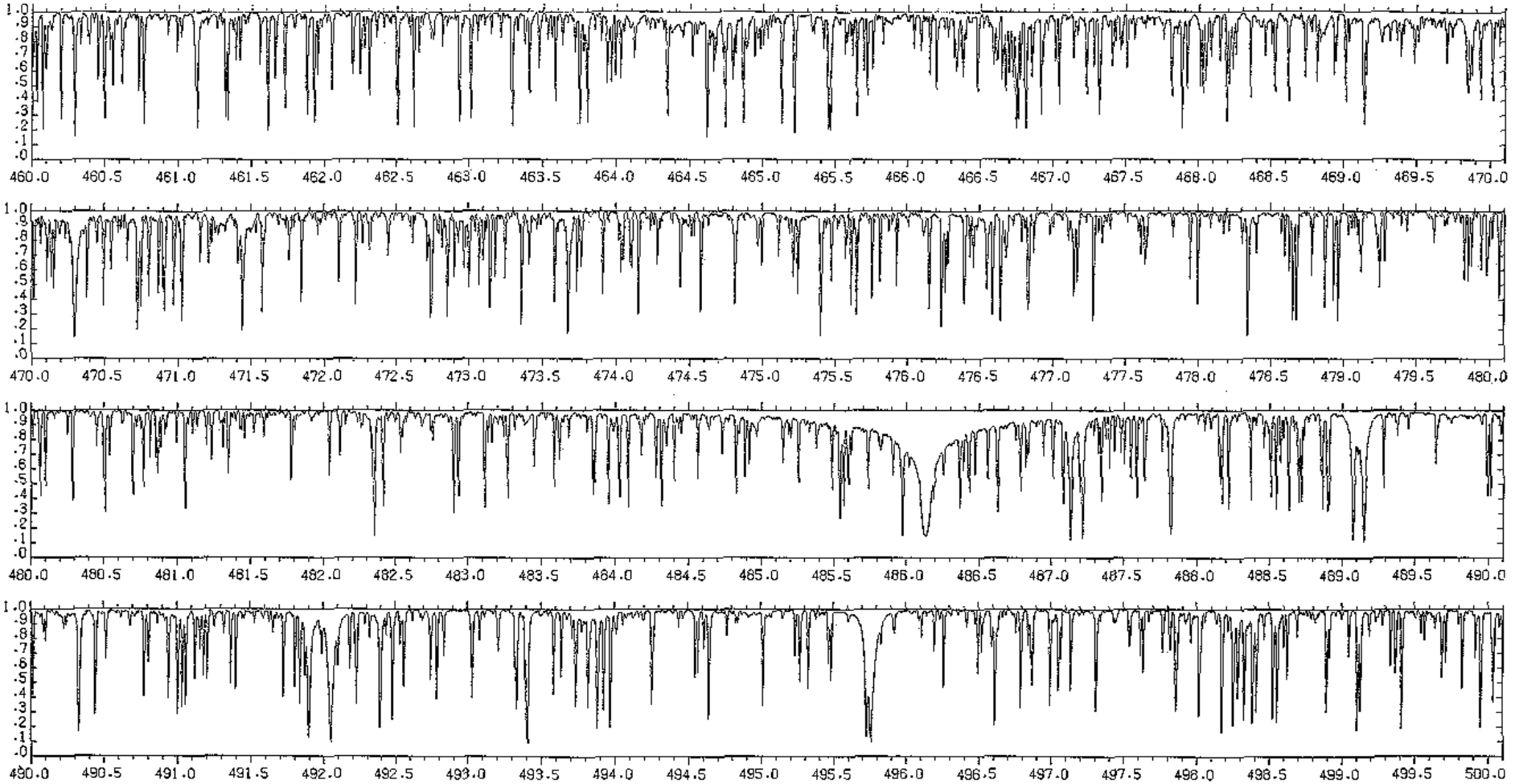

Hydrogène (H)
Deutérium (D)
Hydrogène moléculaire (H_2)
Carbone (C)
Azote (N)
Oxygène (O)
Fer (Fe)

H + O + C + N

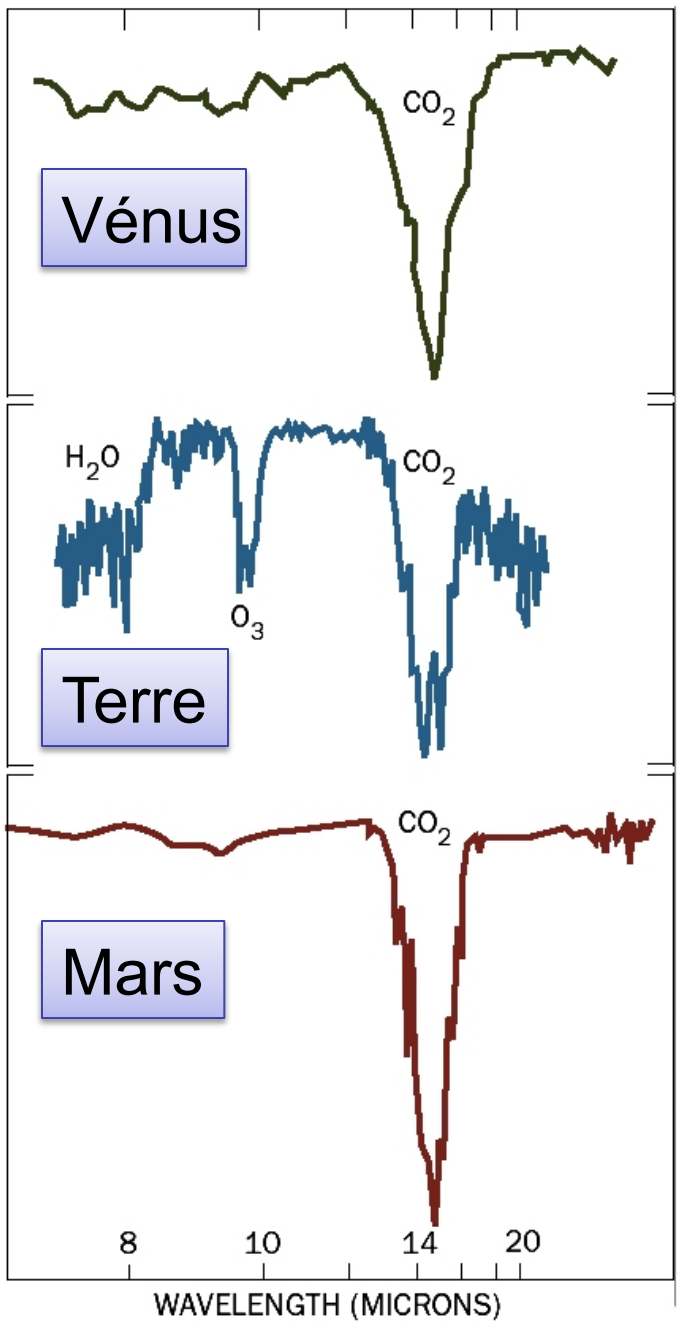




Spectre du Soleil

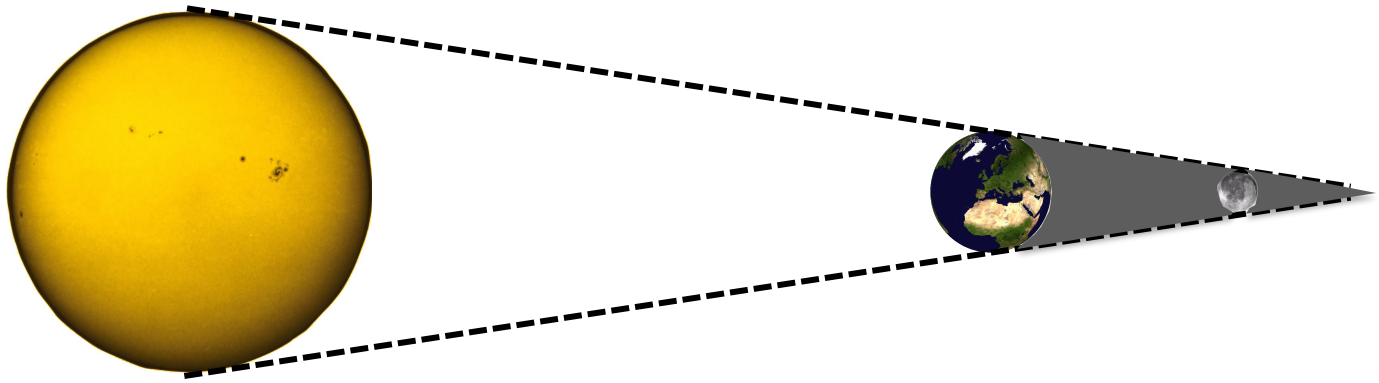


Spectre du Soleil

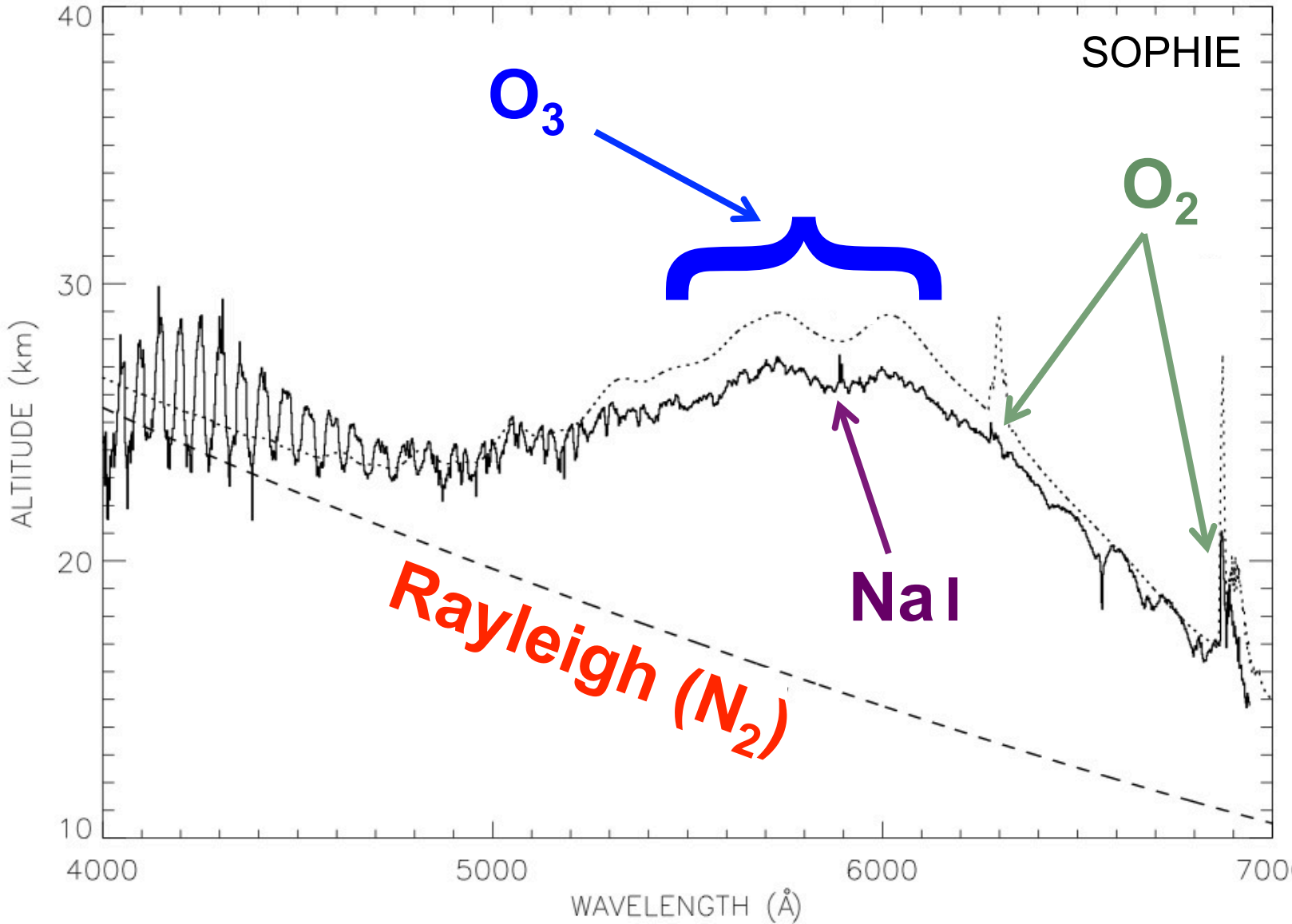

Vénus
CO_2
Terre
H_2O
O_3
CO_2
Mars
CO_2
8
10
14
20
WAVELENGTH (MICRONS)

La Terre vue comme une exoplanète

Éclipse de Lune



La Terre vue comme une exoplanète



Éclipse de Lune du 16 août 2008

Futurs instruments