

Exoplanètes : dernières nouvelles

Alain Lecavelier des Etangs
Institut d'Astrophysique de Paris

Equation de Drake et exoplanètes

La formule de Drake évalue le nombre moyen N de civilisations présentes dans notre galaxie dont les émissions radio sont détectables. Elle se présente sous la forme d'un produit de sept facteurs :

$$N = R^* f_p n_e f_l f_i f_c L$$

R^* , taux de formation d'étoiles dans la galaxie (par an) ;

f_p , fraction de ces étoiles avec des systèmes planétaires ;

n_e , nombre de planètes, par système planétaire extrasolaire, présentant un environnement favorable à la vie ;

f_l , fraction de n_e sur lesquelles la vie est effectivement apparue ;

f_i , fraction de f_l sur lesquelles une vie intelligente est apparue ;

f_c , fraction de civilisations ayant développé une technologie susceptible d'envoyer des signaux détectables dans l'espace ;

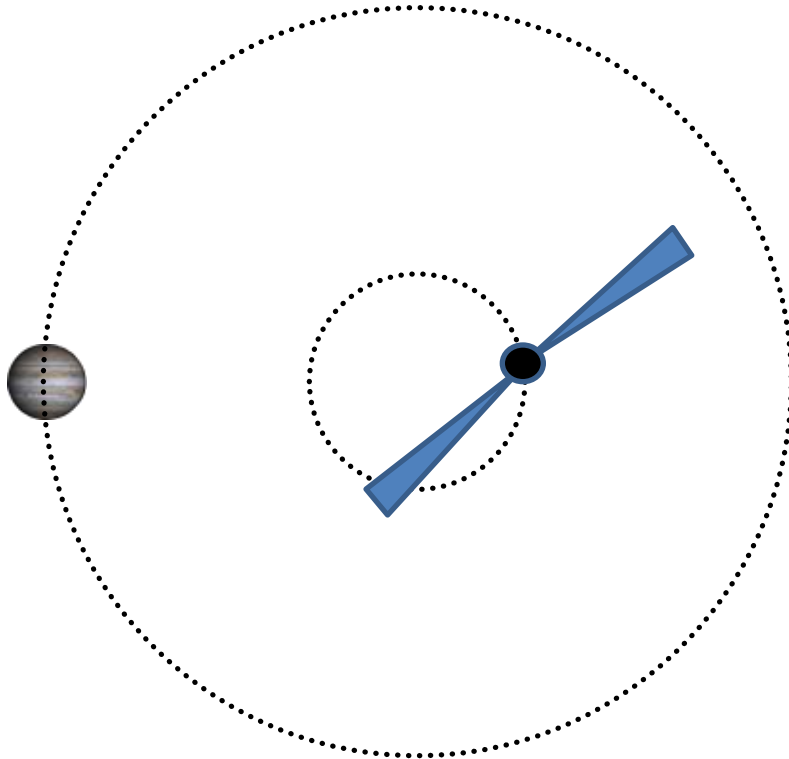
L , durée moyenne (en années) pendant laquelle ces civilisations envoient de tels signaux dans l'espace.

(d'après *SETI 2020, A Roadmap for the Search for Extraterrestrial Intelligence*, SETI Institute, 2002)

Technique de détection

Chronométrage

- Mesure du temps d'arrivée des pulses de l'étoile.
- Variation avec la phase orbitale de la planète



Wolszczan & Frail 1992

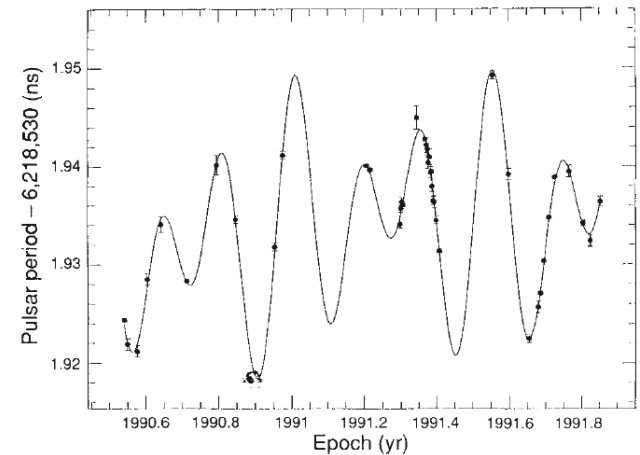
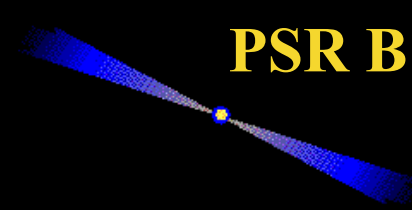


FIG. 3 Period variations of PSR1257+12. Each period measurement is based on observations made on at least two consecutive days. The solid line denotes changes in period predicted by a two-planet model of the 1257+12 system.



Sun



PSR B1257+12

Mercury



Venus



Earth



Planet A



Planet B



Planet C

Technique de détection

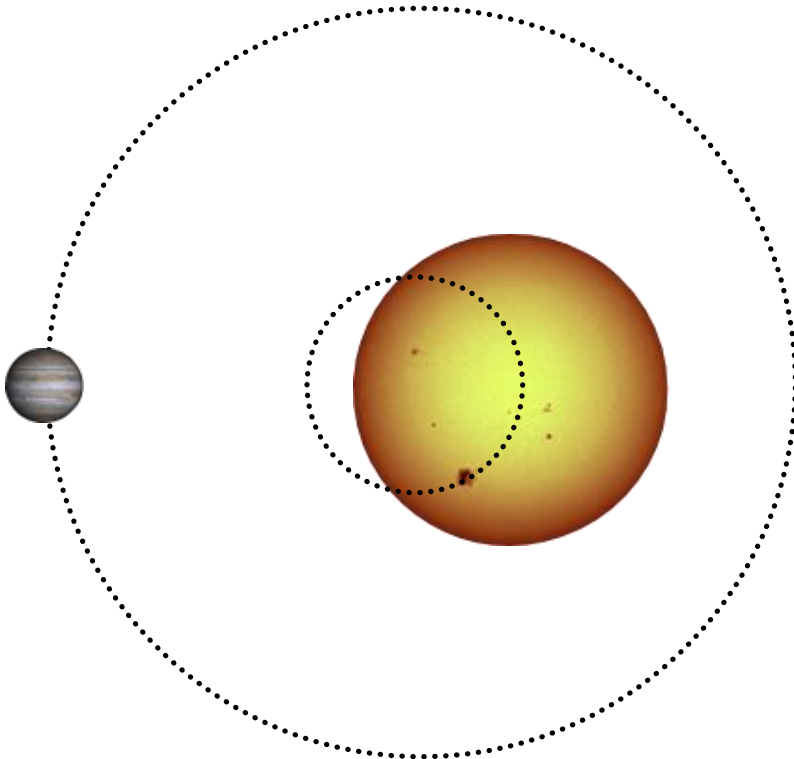
Vitesse radiale

Mesure du décalage Doppler du spectre stellaire :

Détection du mouvement de l'étoile

autour du centre de gravité étoile-planète

➔ Périod et Masse de la planète ($M \sin i$)



Mayor & Queloz 1995

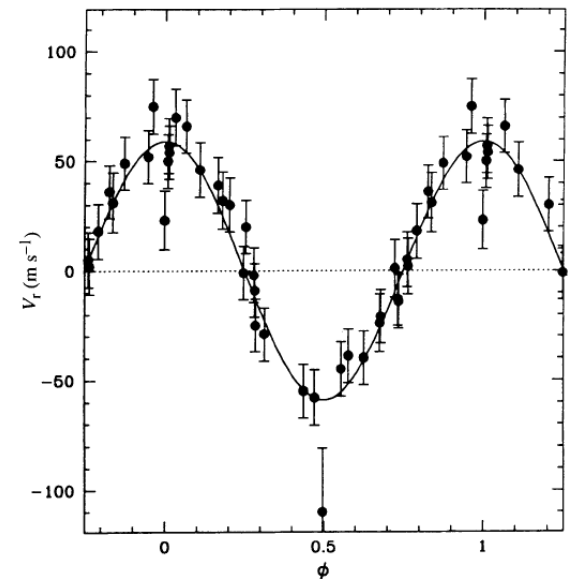


FIG. 4 Orbital motion of 51 Peg corrected from the long-term variation of the γ -velocity. The solid line represents the orbital motion computed

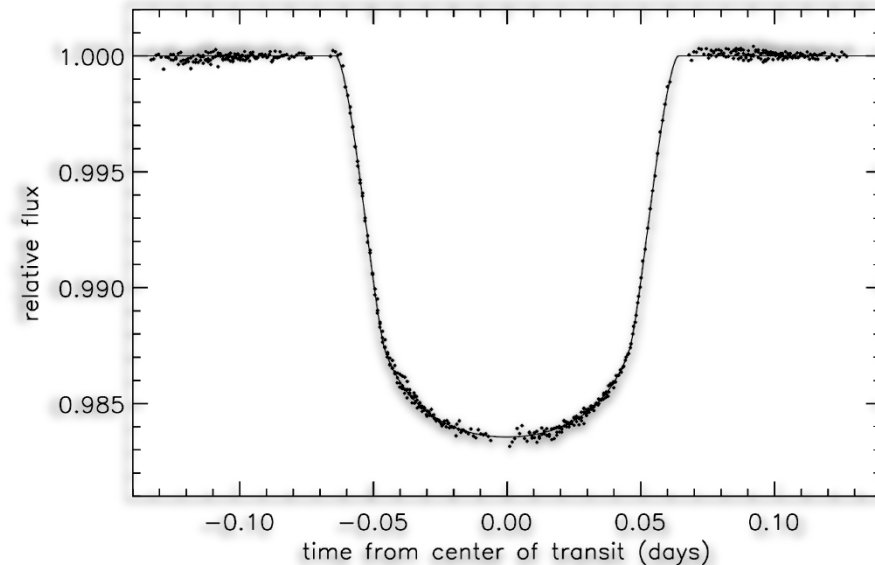
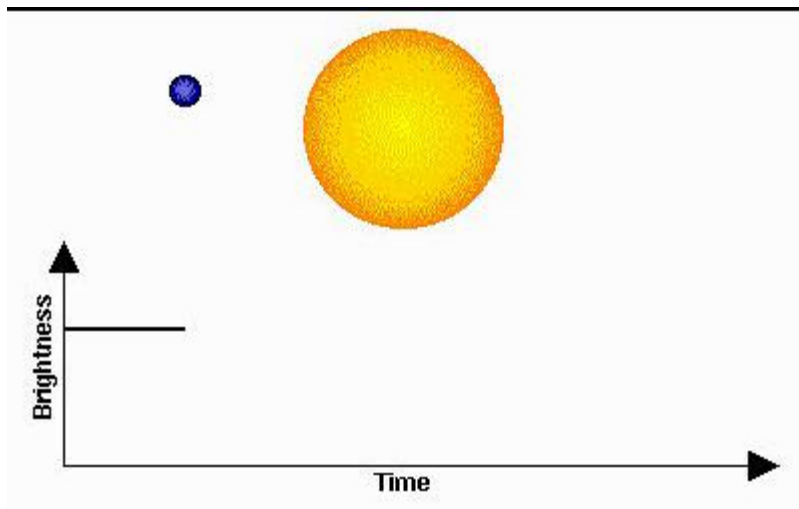
Technique de détection

Photométrie des transits

Mesure de la baisse de lumière pendant le passage (transit)
de la planète devant son étoile :

➔ Période and Rayon de la planète

Brown et al. 2001

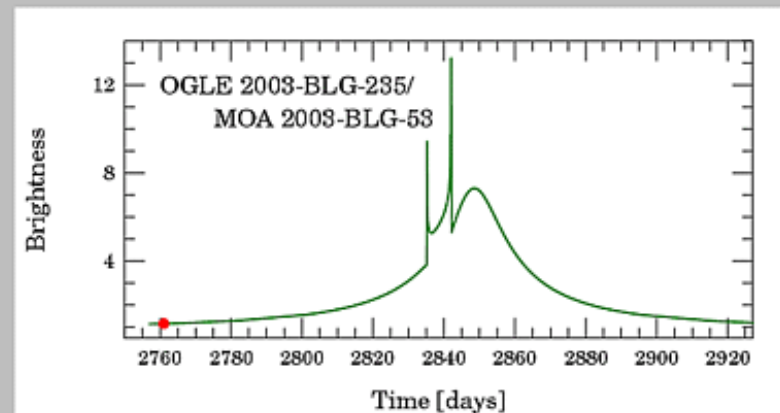
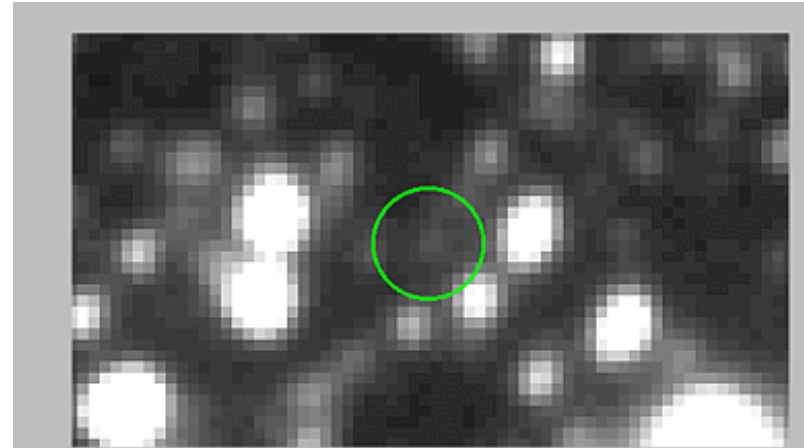
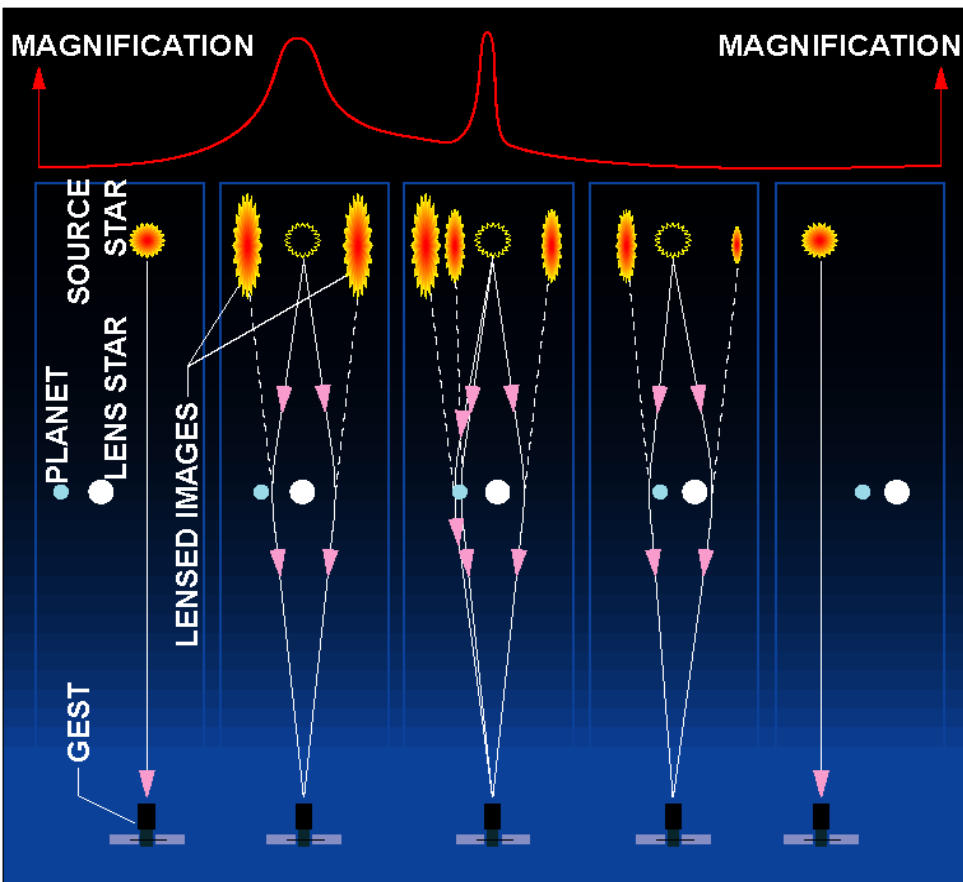


Technique de détection

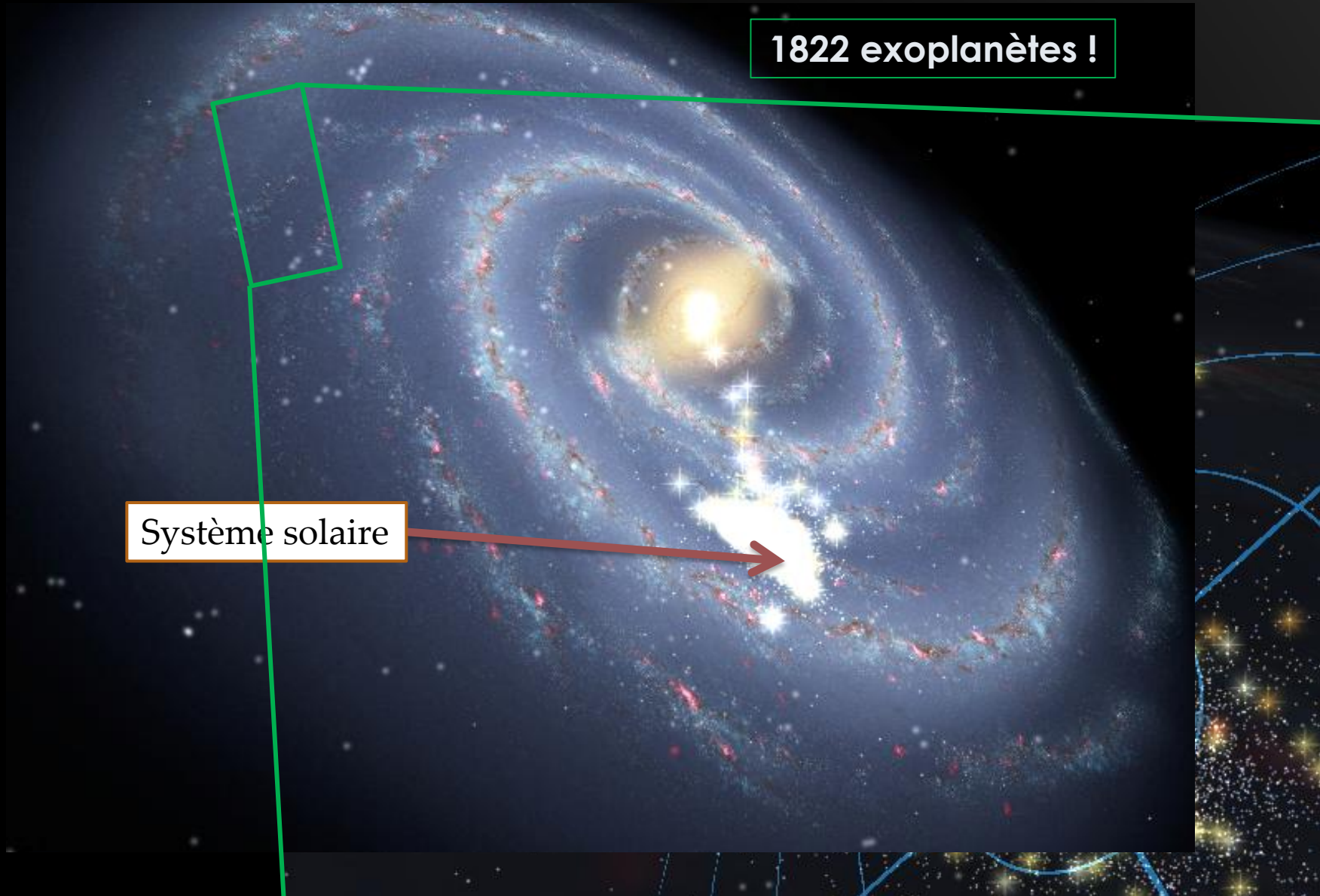
Micro-lentilles

Mesure de l'amplification de lumière d'une étoile de fond :

→ Distance projetée étoile-planète, M_p/M_*



Les exoplanètes de la Galaxie

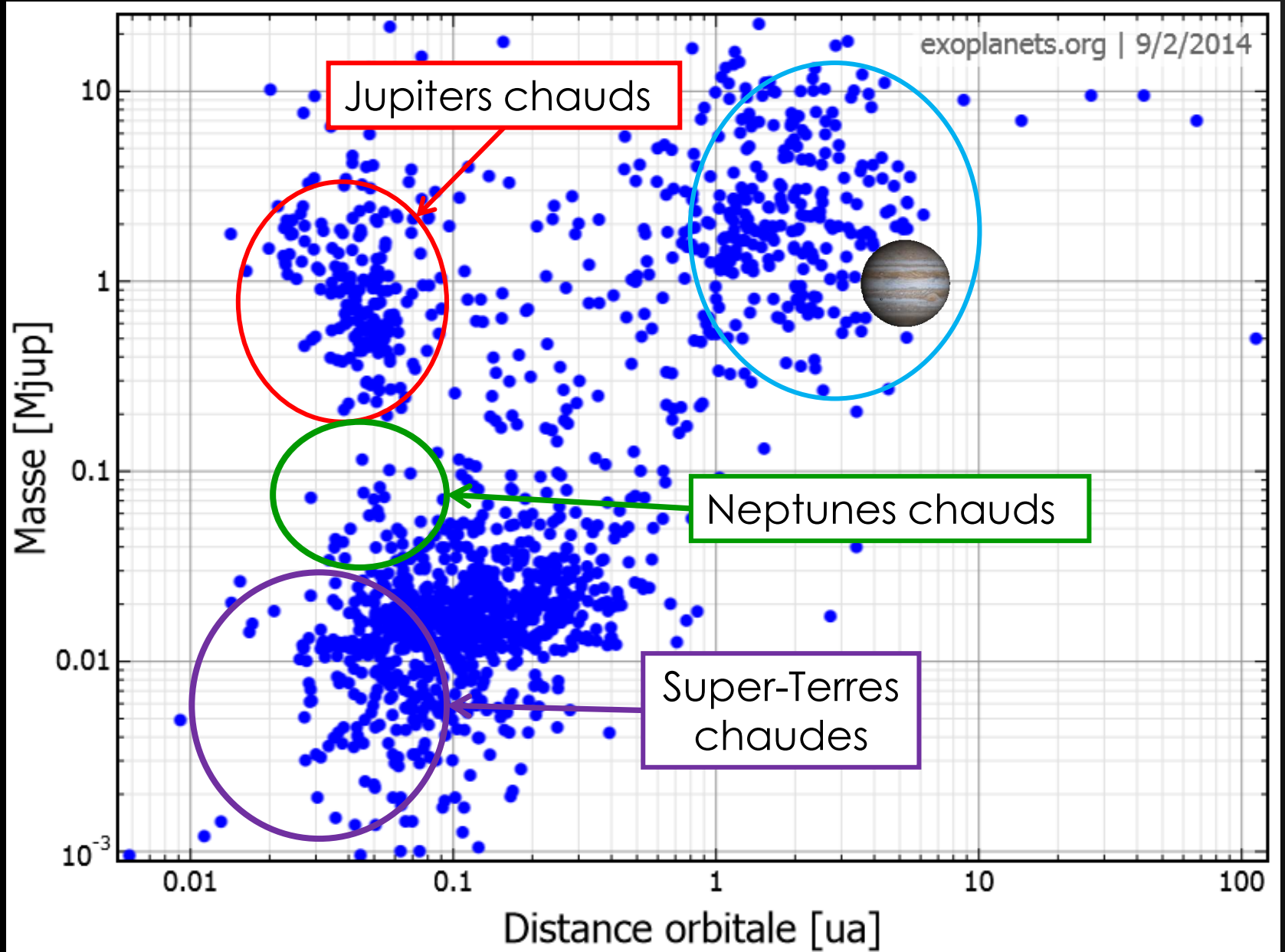


1822 exoplanètes !

Système solaire

Credit: Eyes on Exoplanet (NASA)

Population exoplanétaire



Equation de Drake et exoplanètes

La formule de Drake évalue le nombre moyen N de civilisations présentes dans notre galaxie dont les émissions radio sont détectables. Elle se présente sous la forme d'un produit de sept facteurs :

$$N = R^* f_p n_e f_l f_i f_c L$$

R^* , taux de formation d'étoiles dans la galaxie (par an) ;

f_p , fraction de ces étoiles avec des systèmes planétaires ;

n_e , nombre de planètes, par système planétaire extrasolaire, présentant un environnement favorable à la vie ;

f_l , fraction de n_e sur lesquelles la vie est effectivement apparue ;

f_i , fraction de f_l sur lesquelles une vie intelligente est apparue ;

f_c , fraction de civilisations ayant développé une technologie susceptible d'envoyer des signaux détectables dans l'espace ;

L , durée moyenne (en années) pendant laquelle ces civilisations envoient de tels signaux dans l'espace.

(d'après *SETI 2020, A Roadmap for the Search for Extraterrestrial Intelligence*, SETI Institute, 2002)

stats from radial-velocity results

(mostly for giant planets)

Endl et al. (2006, AJ 649, 436)

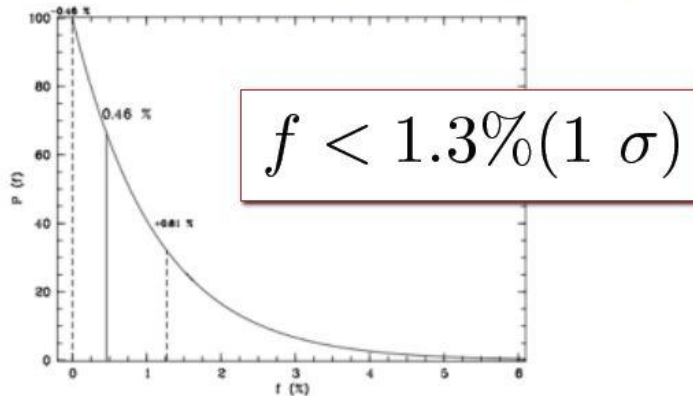
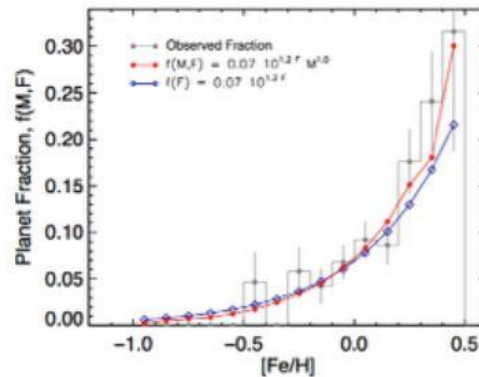
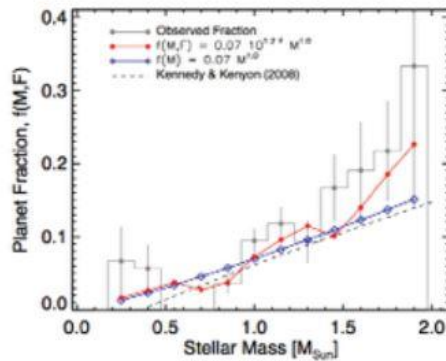


FIG. 2.—Probability function $P(f)$ for the true companion frequency f based on all our M dwarf data (HET, VLT, HJS, and Keck: $N = 89$ stars) and $d = 0$ detections. We find $f = 0.46^{+0.81}_{-0.46}$ percent. The dashed lines delimit the area of 68% integrated probability ($\approx 1 \sigma$ Gaussian error).

Johnson et al. (2010, PASP)



$$f(M_*, [Fe/H]) = 0.07 \pm 0.01 \times (M_*/M_\odot)^{1.0 \pm 0.3} \times 10^{1.2 \pm 0.2 [Fe/H]}$$

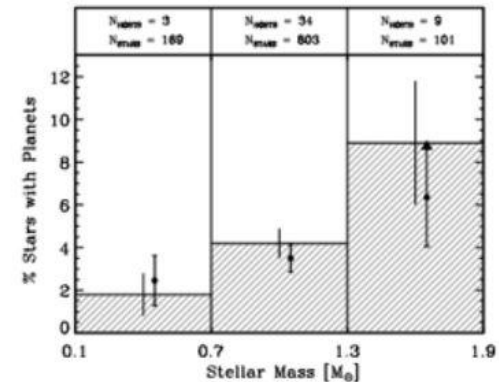
Butler et al. (2006, AJ 649, 436)

$$f = 1.8 \pm 1.2\% (> 0.4 M_{\text{Jup}}; < 2.5 \text{AU})$$

Cumming et al. (2008, PASP 120, 531)

> 1 M_{Jup} are x5-10 times under abundant compared to Sun-like stars
 $f \sim 1\%$ (<5.4% @ 2-sigma)

Johnson et al. (2007, AJ 670, 833)

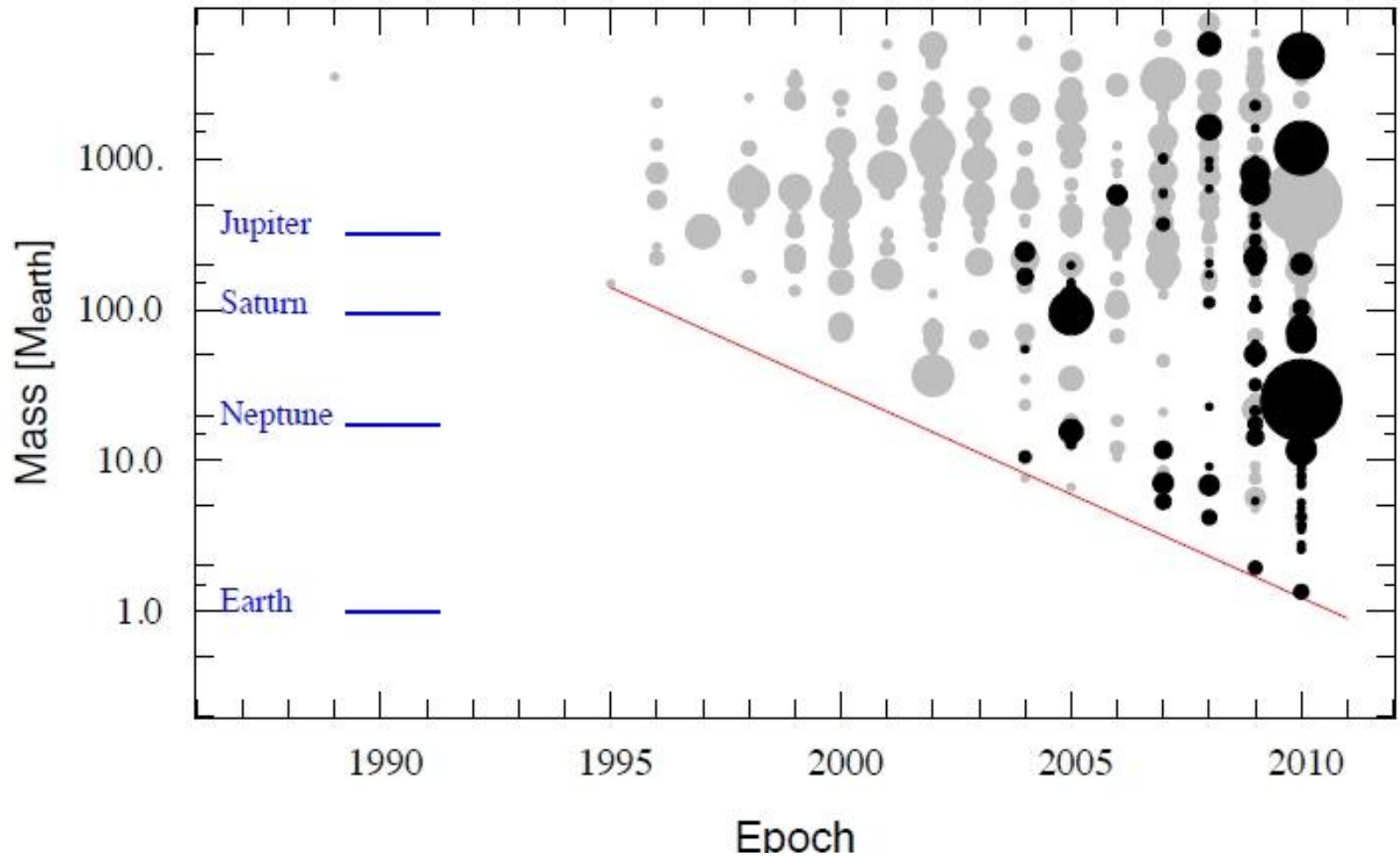


Bonfils et al. (2007, A&A 474, 293)

$$f_{\text{hot Nept.}} > f_{\text{hot Jup}} \quad (> 97\% \text{ probability})$$

Statistique des exoplanètes

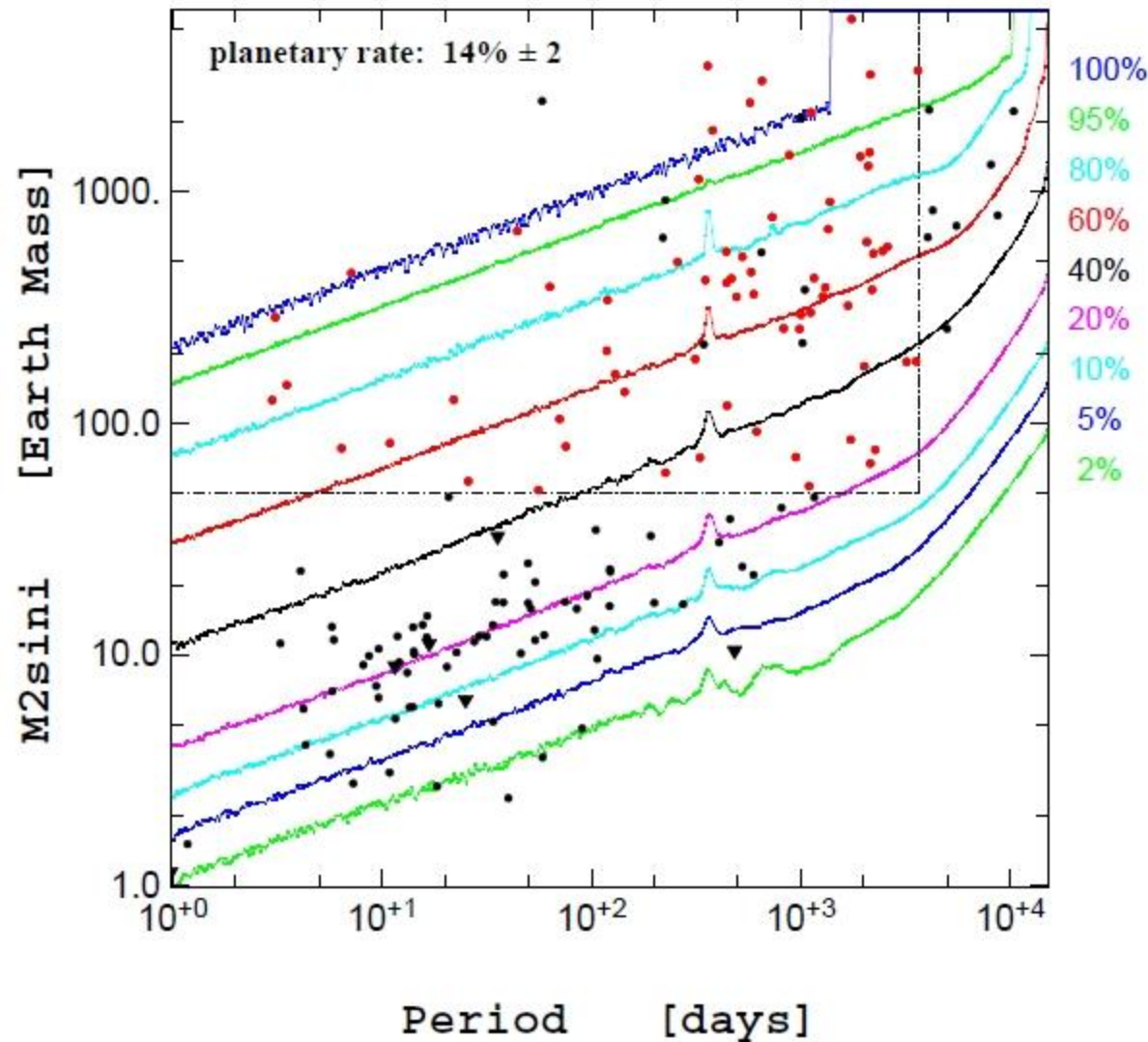
Mayor et al. 2011



Masse des planètes découvertes par vitesse radiale. Les planètes Harp sont en noir.
La taille des points indique le demi-grand axe.

Statistique des exoplanètes

Mayor et al. 2011

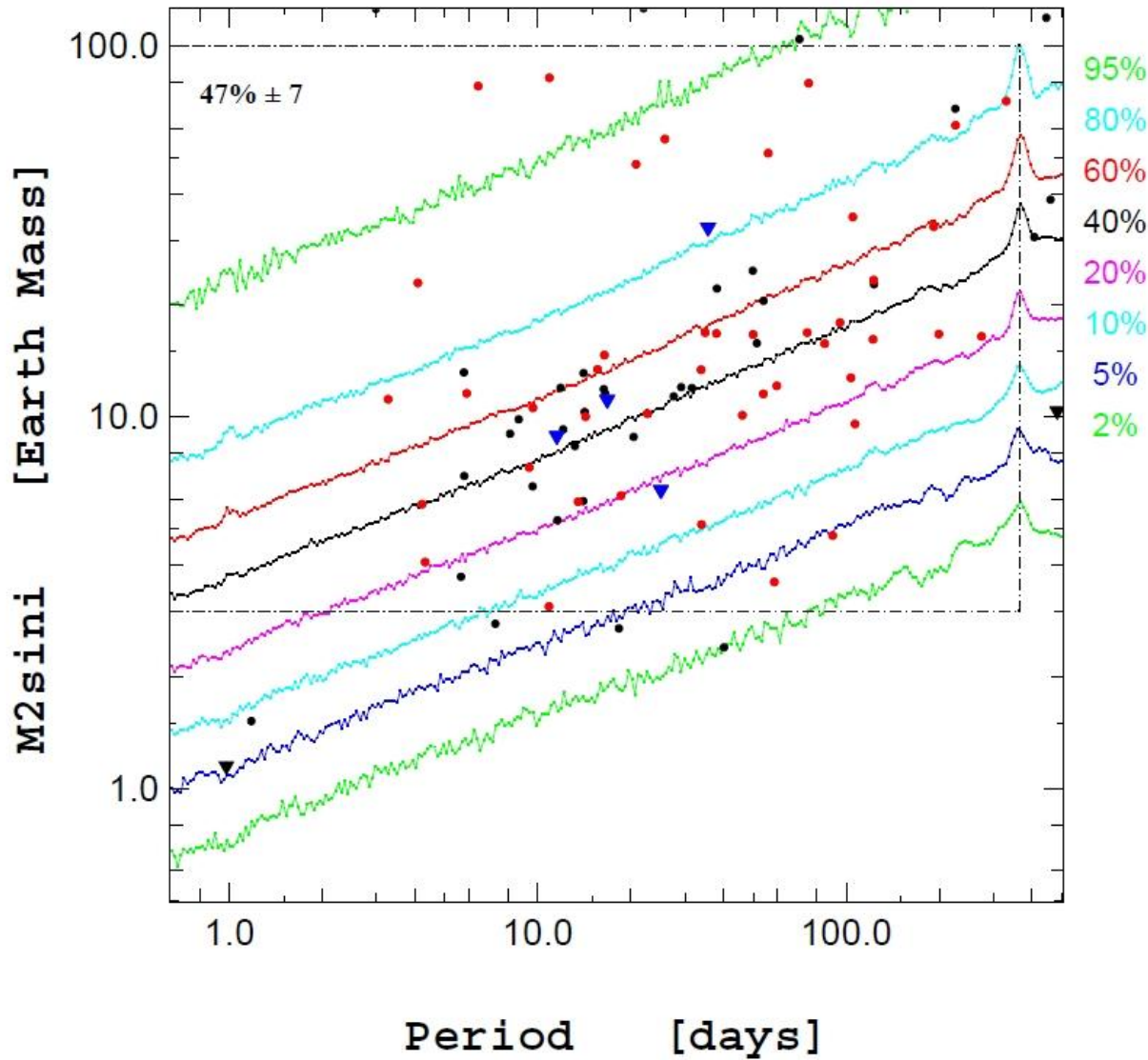


$$M_p > 30 M_E$$
$$P_{\text{period}} < 10 \text{ an}$$

$$\Rightarrow f = 14\% \pm 2\%$$

Statistique des exoplanètes

Mayor et al. 2011

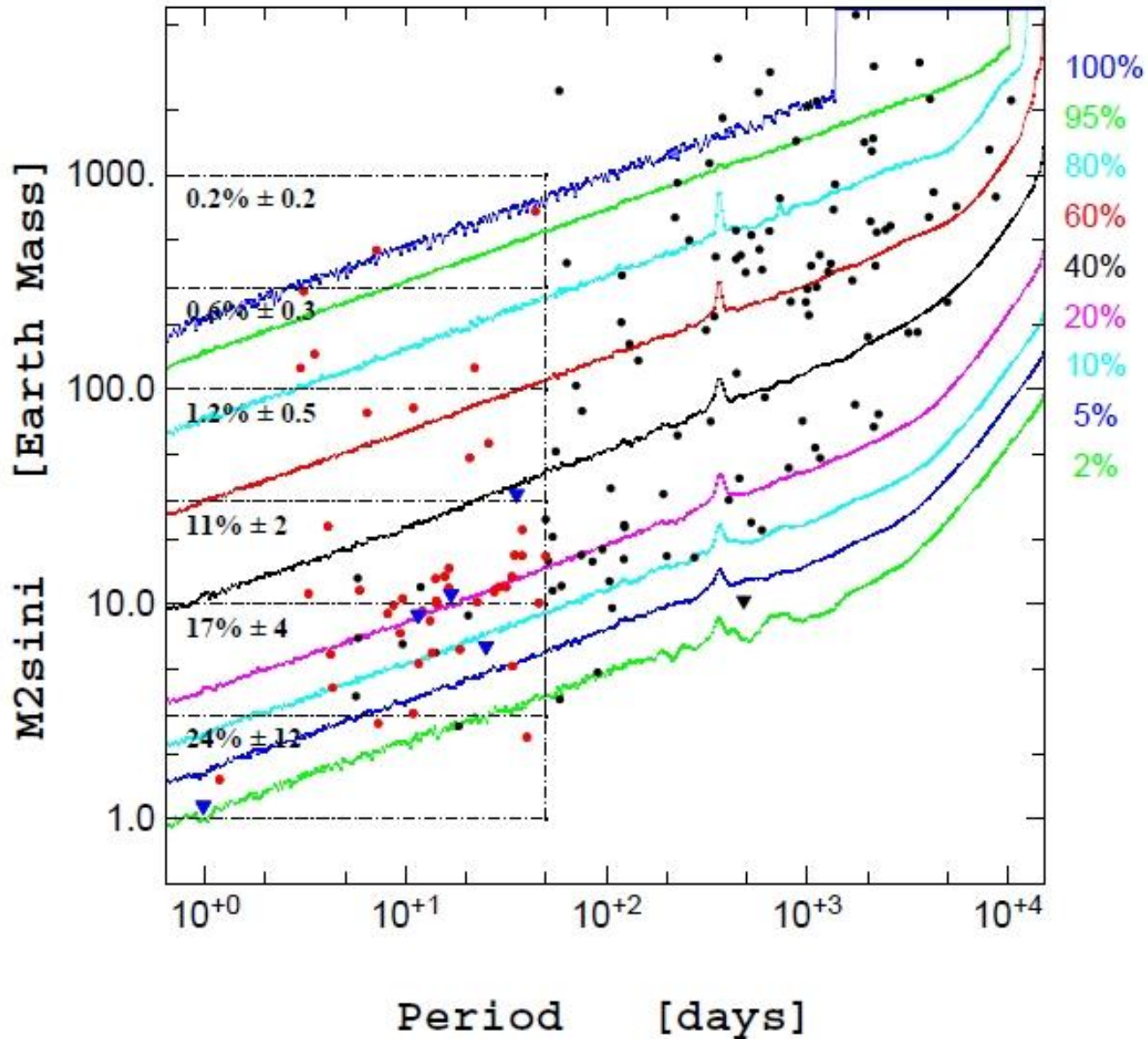


$$3 M_E < M_p < 100 M_E$$
$$P_{\text{period}} < 1 \text{ an}$$

$$\Rightarrow f = 47\% \pm 7\%$$

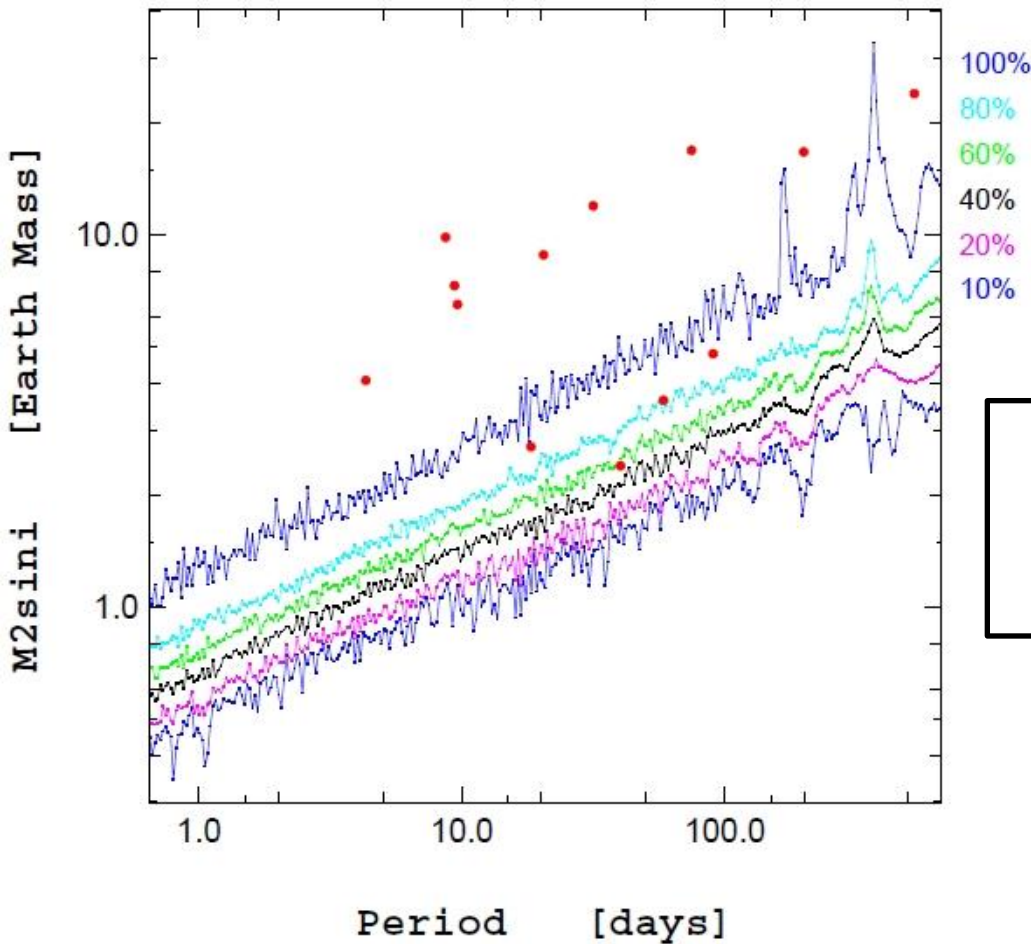
Statistique des exoplanètes

Mayor et al. 2011



Statistique des exoplanètes

Mayor et al. 2011



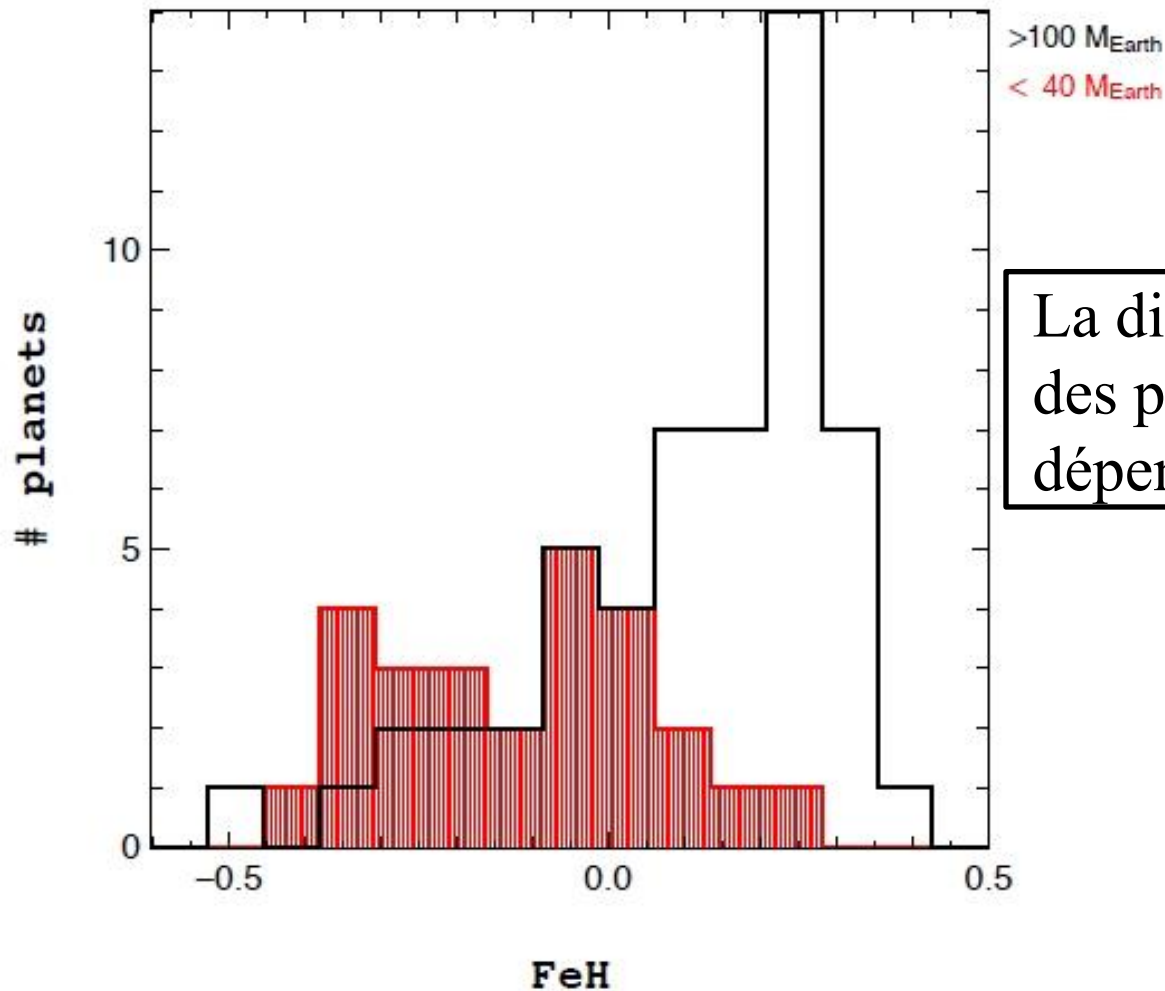
Mesures haute-précision

$$\rightarrow n_p/n_* > 2,9$$

Fig. 18. The figure illustrates the limits of detection for very low-mass planets based on only the 10 stars of the HARPS sample with more than 165 HARPS measurements per star. Note that 29 planets have been discovered orbiting these ten stars!

Statistique des exoplanètes

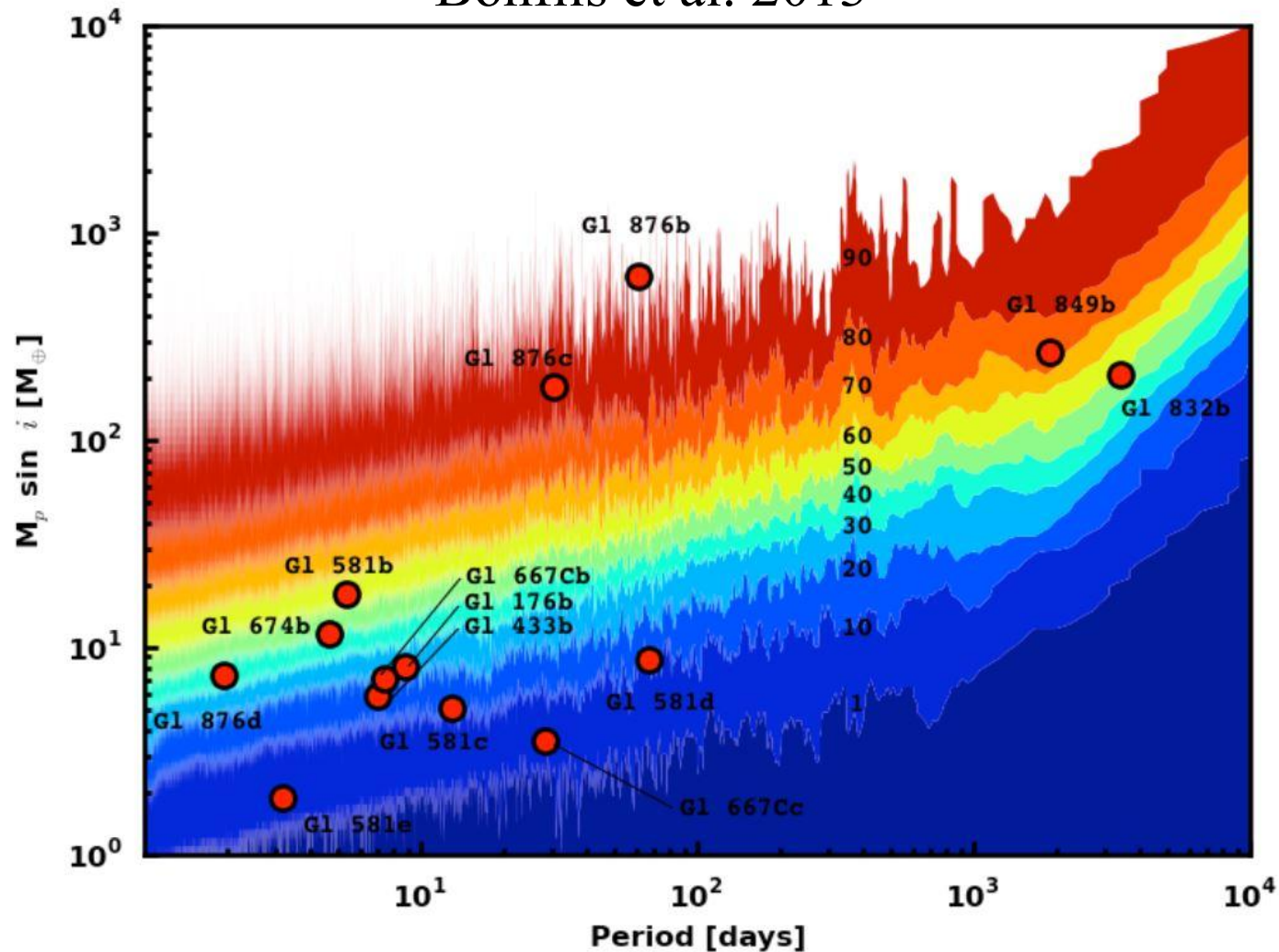
Mayor et al. 2011



La distribution en masse
des planètes (découvertes)
dépend de la métallicité

Les planètes autour des étoiles M

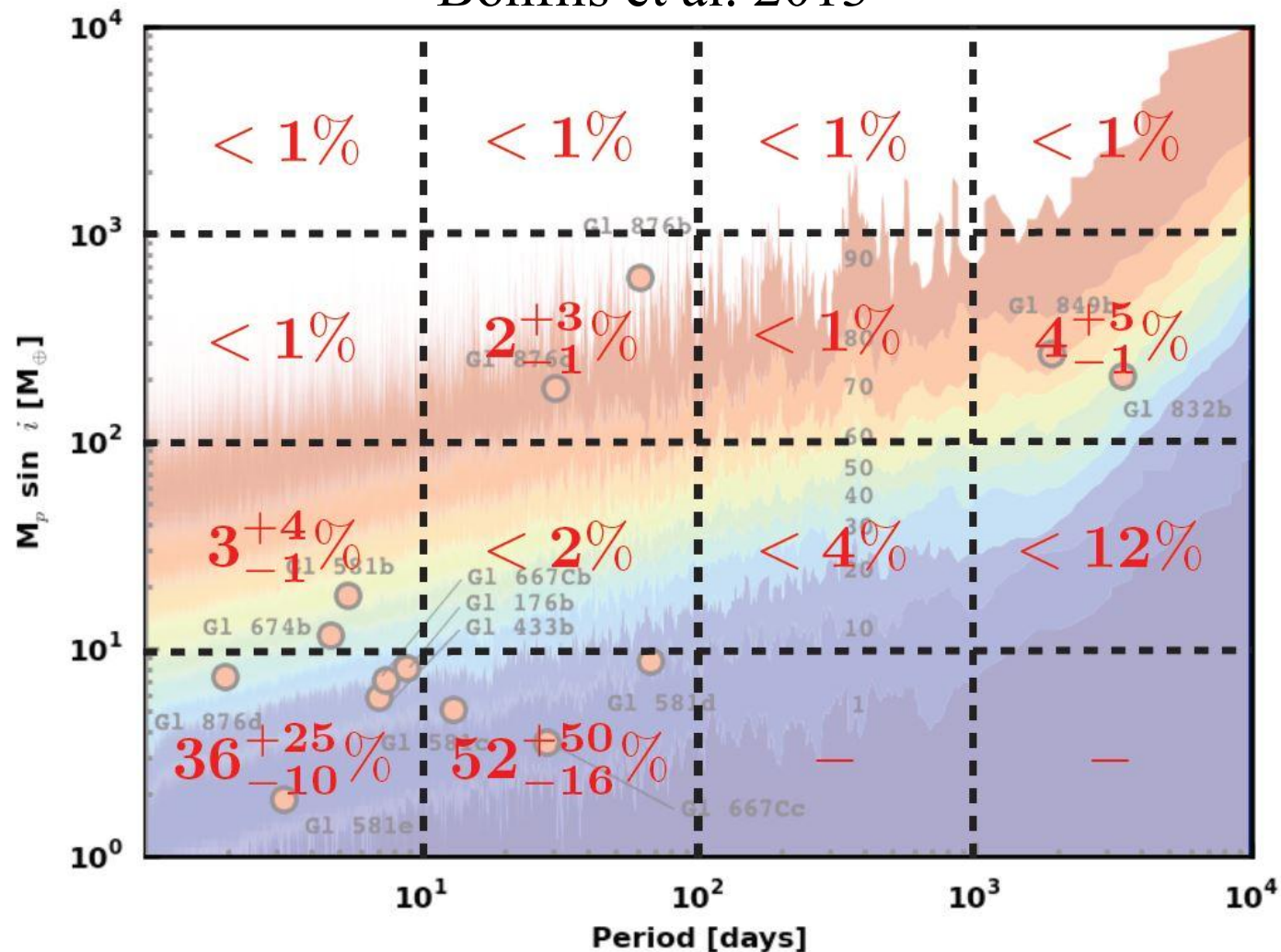
Bonfils et al. 2013



Bonfils et al. (2013)
astro-ph/1111.5019B

Les planètes autour des étoiles M

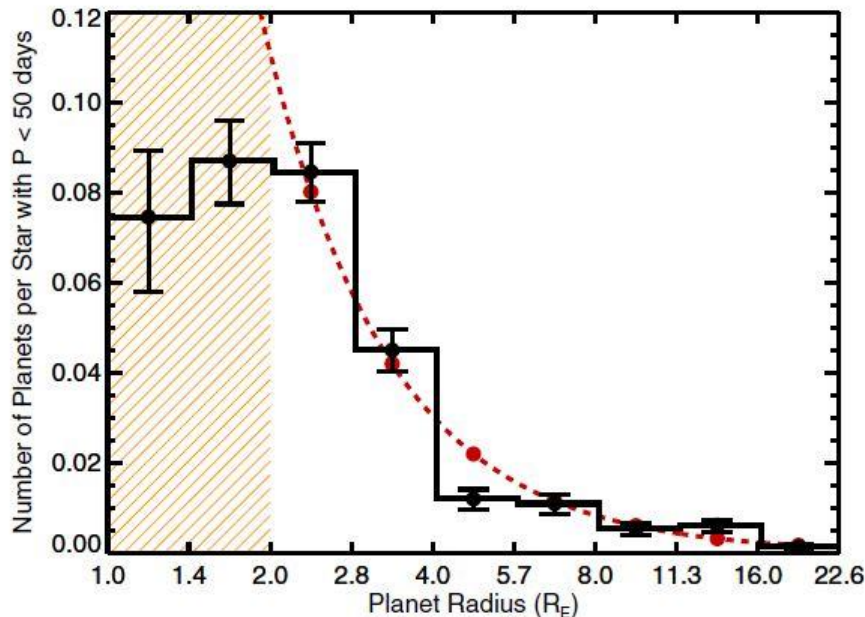
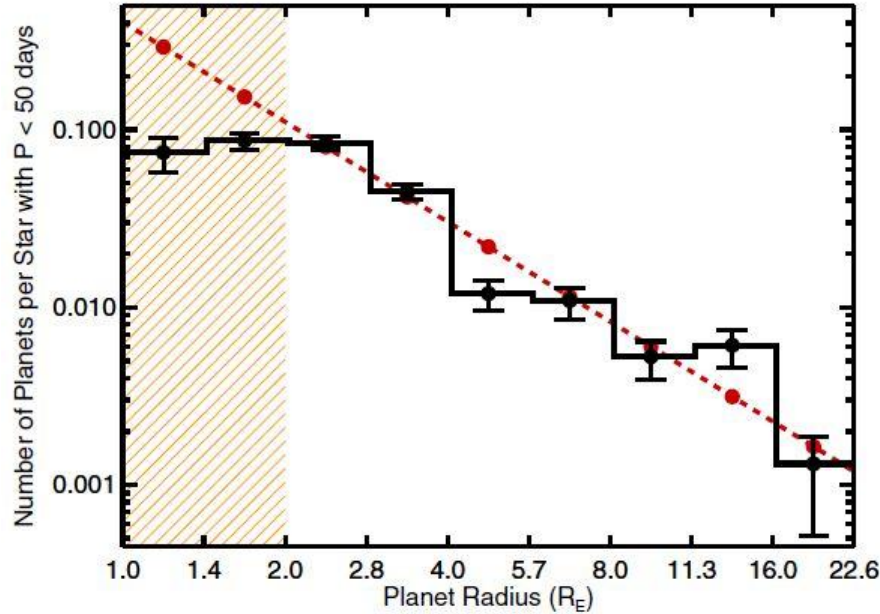
Bonfils et al. 2013



Bonfils et al. (2013)
astro-ph/1111.5019B

Observations de la mission Kepler

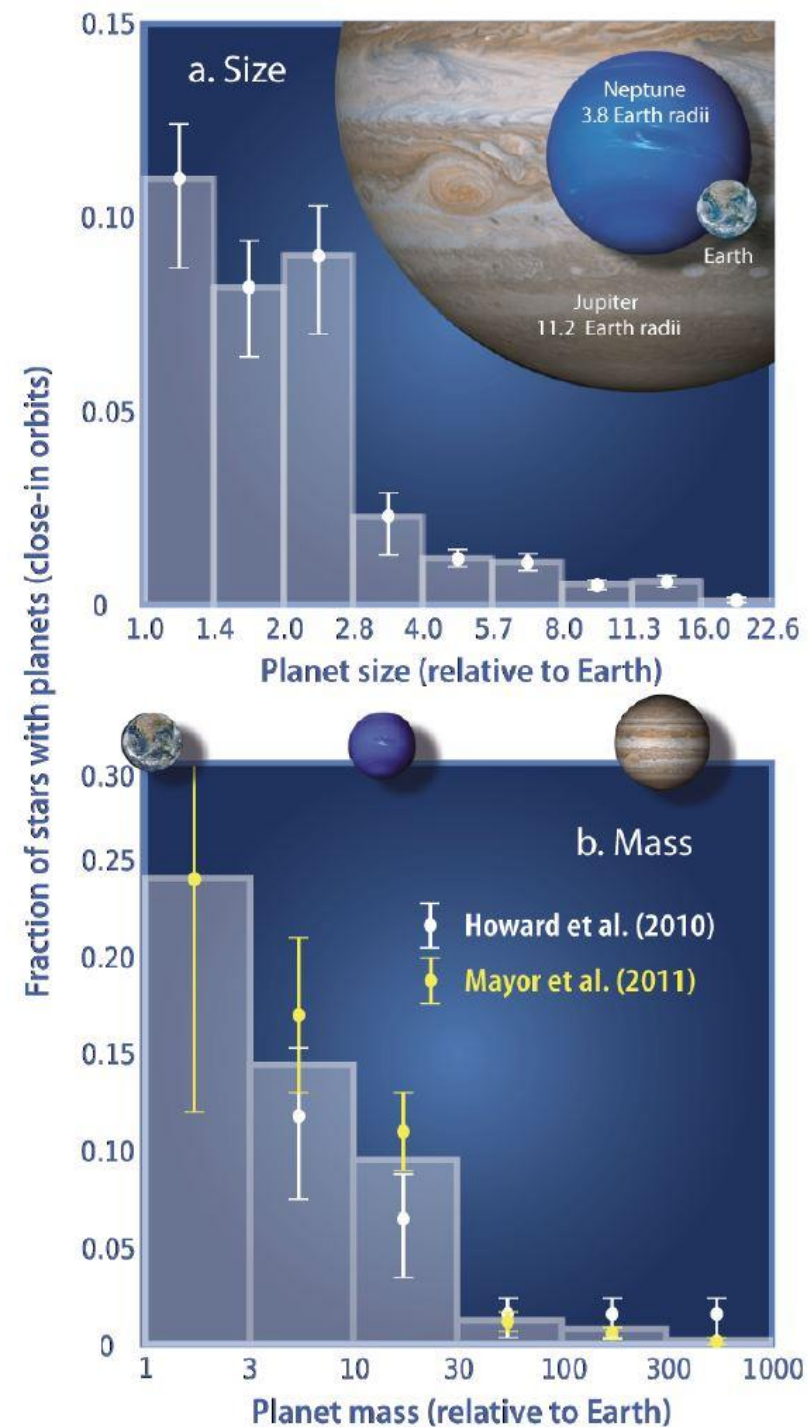
(Howard et al. 2012)

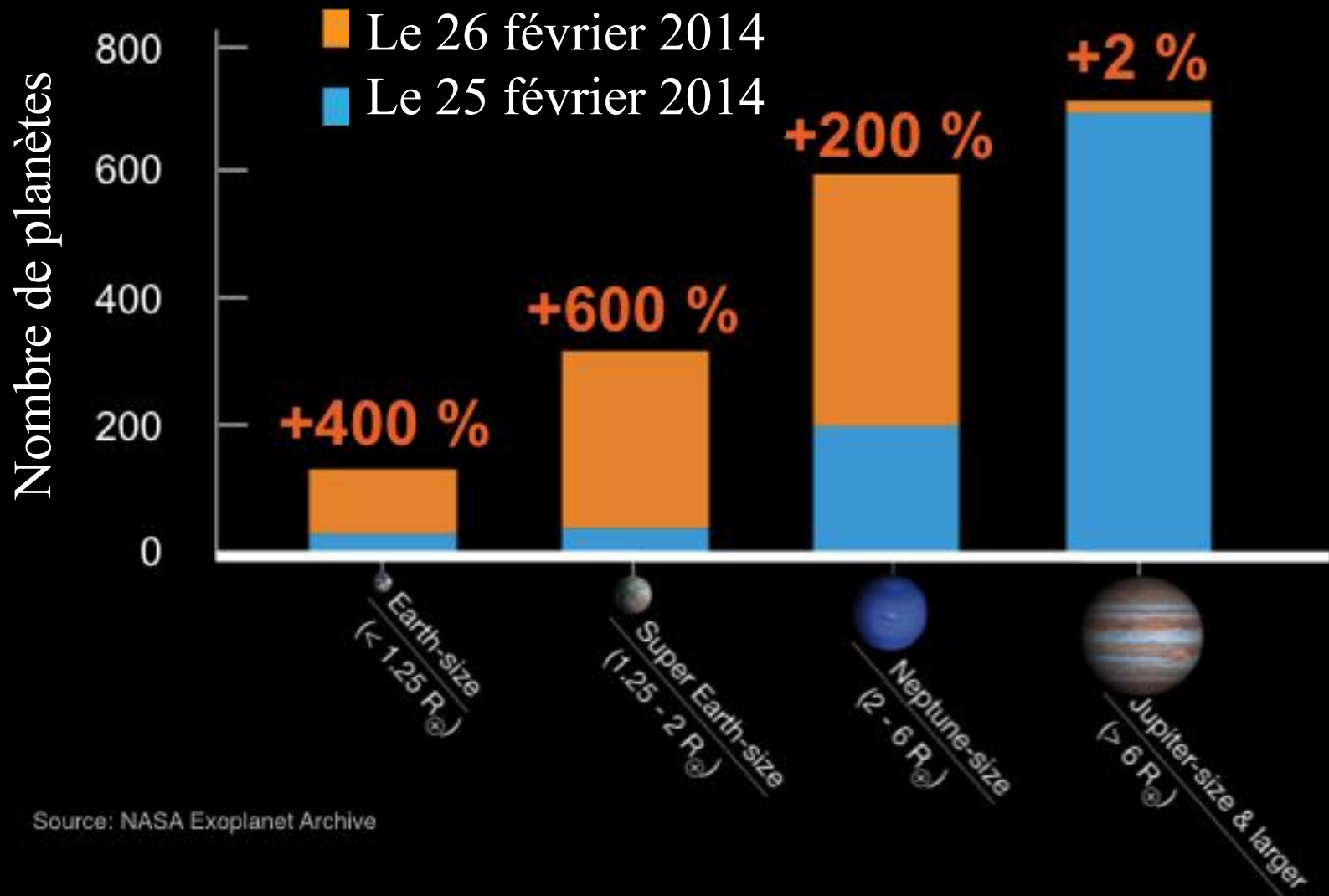


Observations Kepler + Vitesses radiales

Howard 2013,
Science 340, 572, 2013

$a < 0.25$ ua
 $P < 50$ jours





Advances in Exoplanet Science from Kepler

Lissauer, Dawson, & Tremaine

Soumis à Nature, septembre 2014

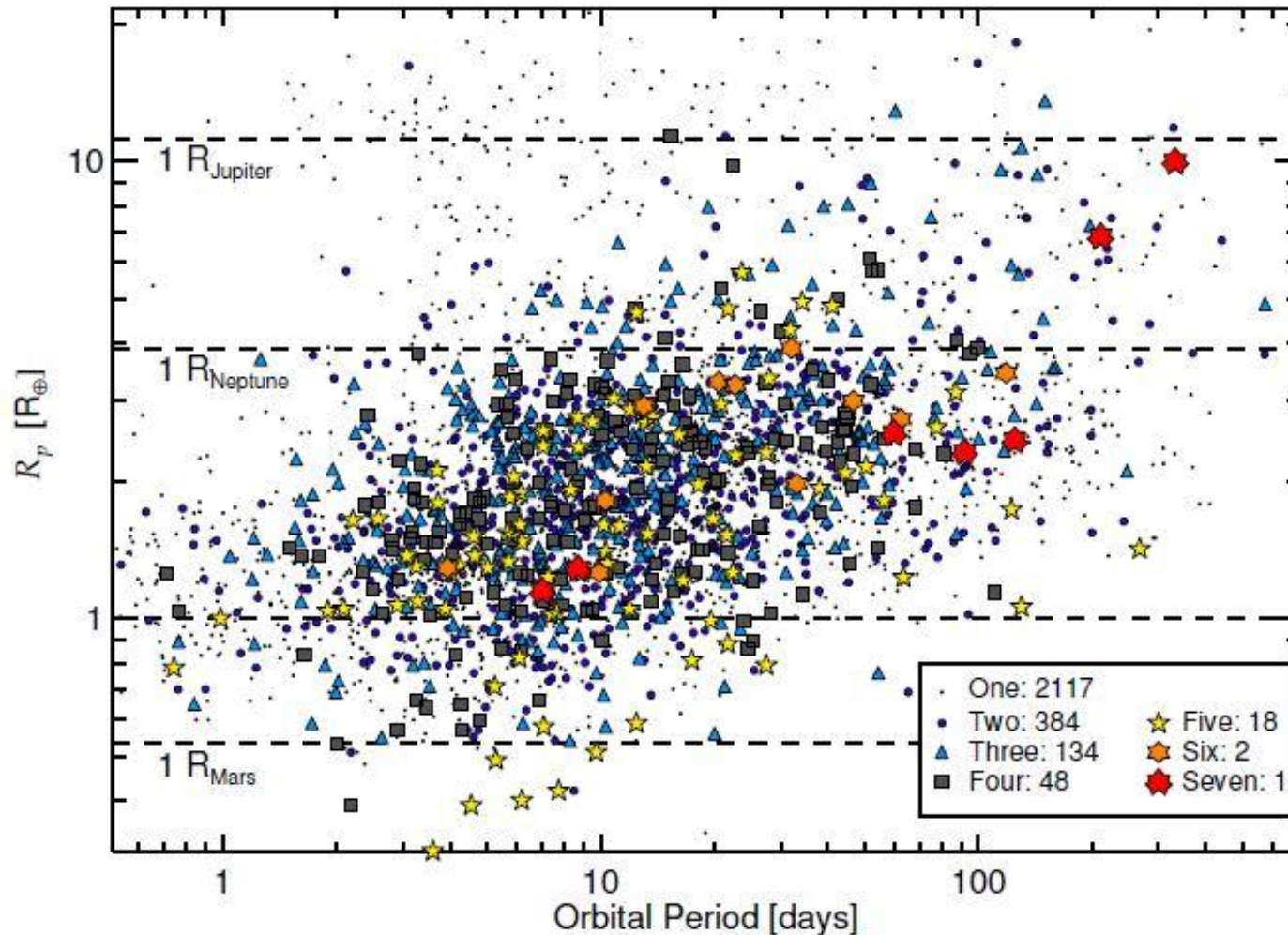


Fig. 1.— Orbital period versus planetary radius for planetary candidates found by analyzing the

Advances in Exoplanet Science from Kepler

Lissauer, Dawson, & Tremaine

Soumis à Nature, septembre 2014

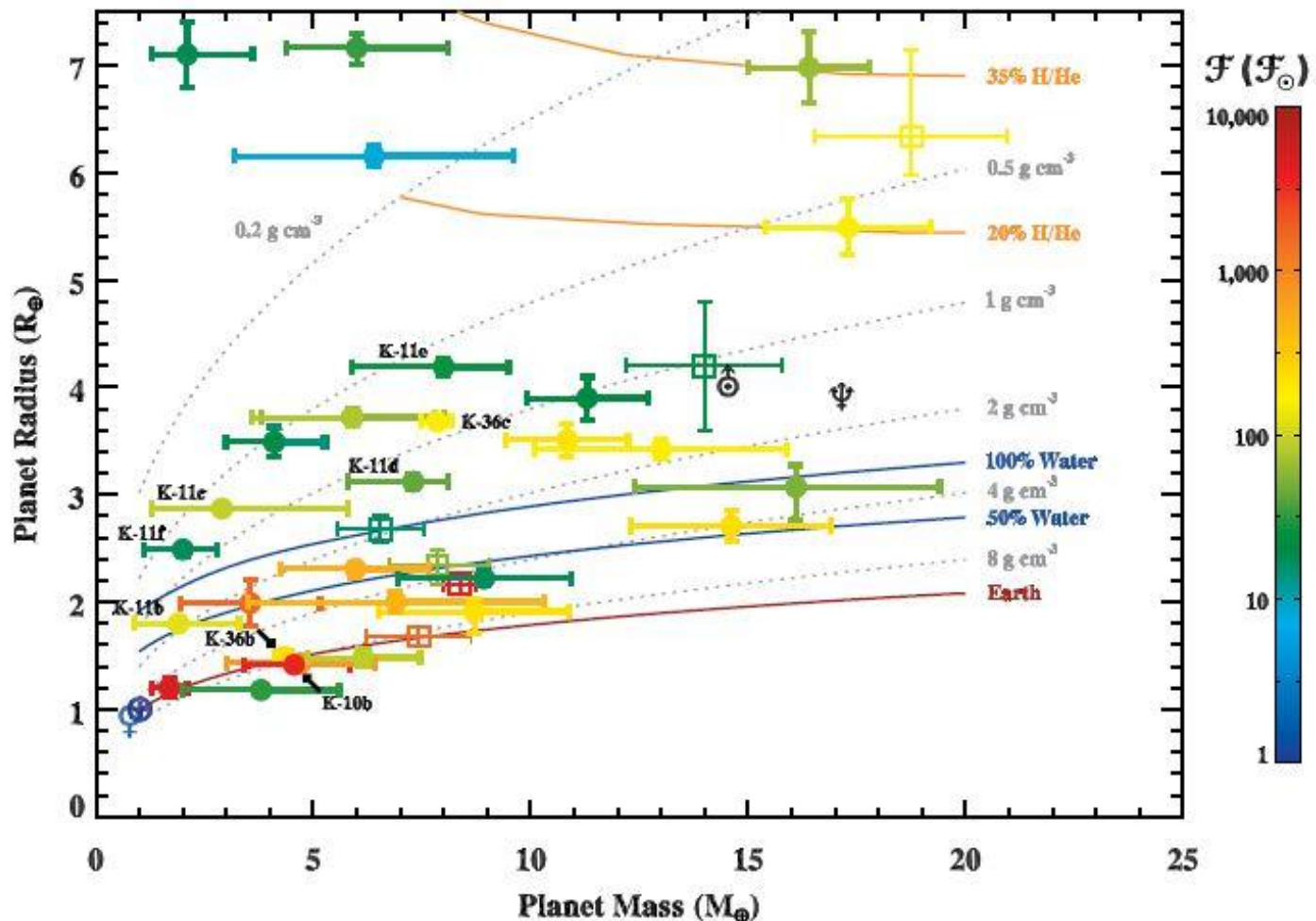


Fig. 2.— Mass-radius diagram for transiting exoplanets with measured masses less than $20 M_{\oplus}$,

Equation de Drake et exoplanètes

La formule de Drake évalue le nombre moyen N de civilisations présentes dans notre galaxie dont les émissions radio sont détectables. Elle se présente sous la forme d'un produit de sept facteurs :

$$N = R^* f_p n_e f_l f_i f_c L$$

R^* , taux de formation d'étoiles dans la galaxie (par an) ;

f_p , fraction de ces étoiles avec des systèmes planétaires ;

n_e , nombre de planètes, par système planétaire extrasolaire, présentant un environnement favorable à la vie ;

f_l , fraction de n_e sur lesquelles la vie est effectivement apparue ;

f_i , fraction de f_l sur lesquelles une vie intelligente est apparue ;

f_c , fraction de civilisations ayant développé une technologie susceptible d'envoyer des signaux détectables dans l'espace ;

L , durée moyenne (en années) pendant laquelle ces civilisations envoient de tels signaux dans l'espace.

(d'après *SETI 2020, A Roadmap for the Search for Extraterrestrial Intelligence*, SETI Institute, 2002)



MAPPING THE HABITABLE UNIVERSE

phl.upr.edu

Planetary Habitability Laboratory

University of Puerto Rico at Arecibo

Search this site

Content

[Home](#)
[Projects](#)
[LabNotes](#)
[Press Releases](#)
[In the News](#)
[Outreach](#)
[Media](#)
[Library](#)
[Software Tools](#)
[Data](#)
[Opportunities](#)
[Calendars](#)
[Centers](#)
[About](#)

Main Projects

[Habitable Exoplanets](#)
[Visible Paleo-Earth](#)

Related Sites



Virtual Planetary
Laboratory



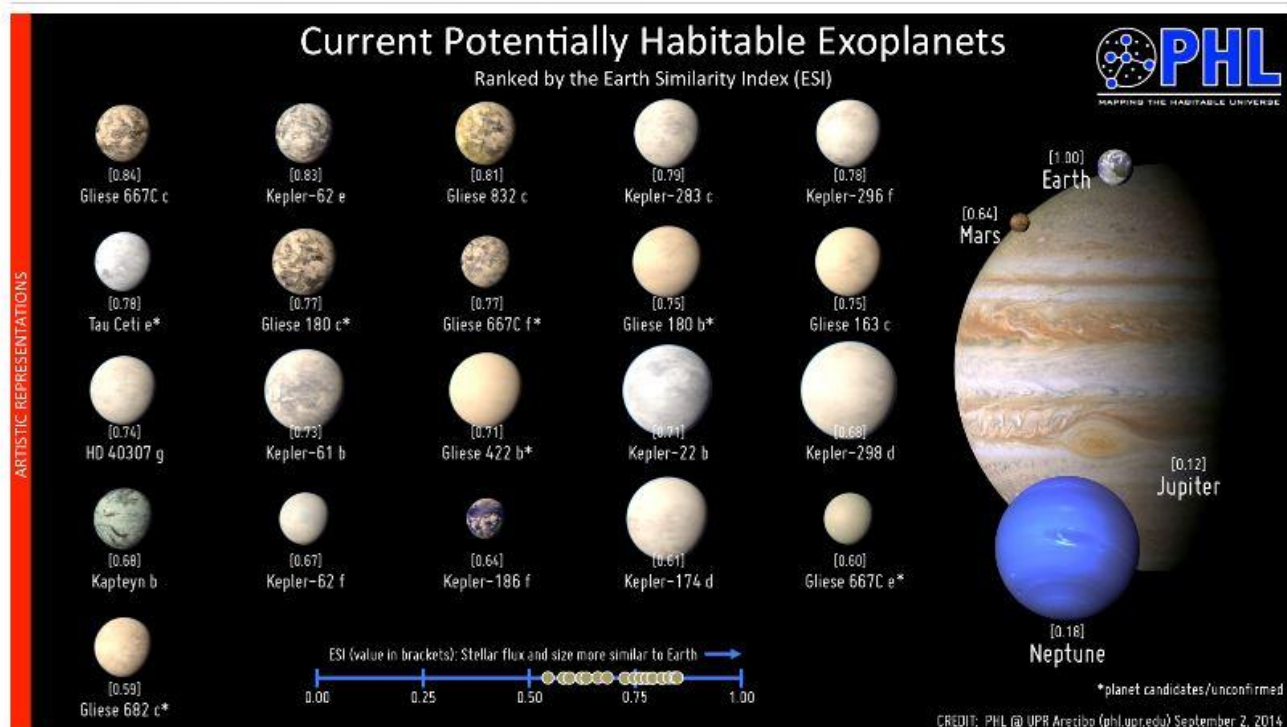
[Projects > The Habitable Exoplanets Catalog >](#)

HEC: Graphical Catalog Results

Last Update: September 2, 2014

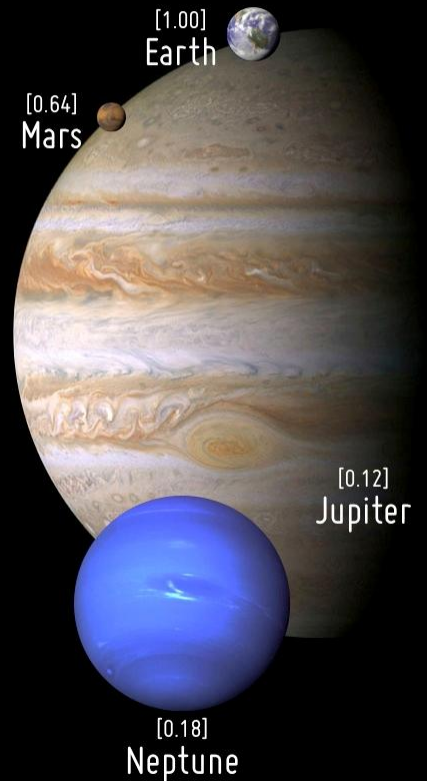
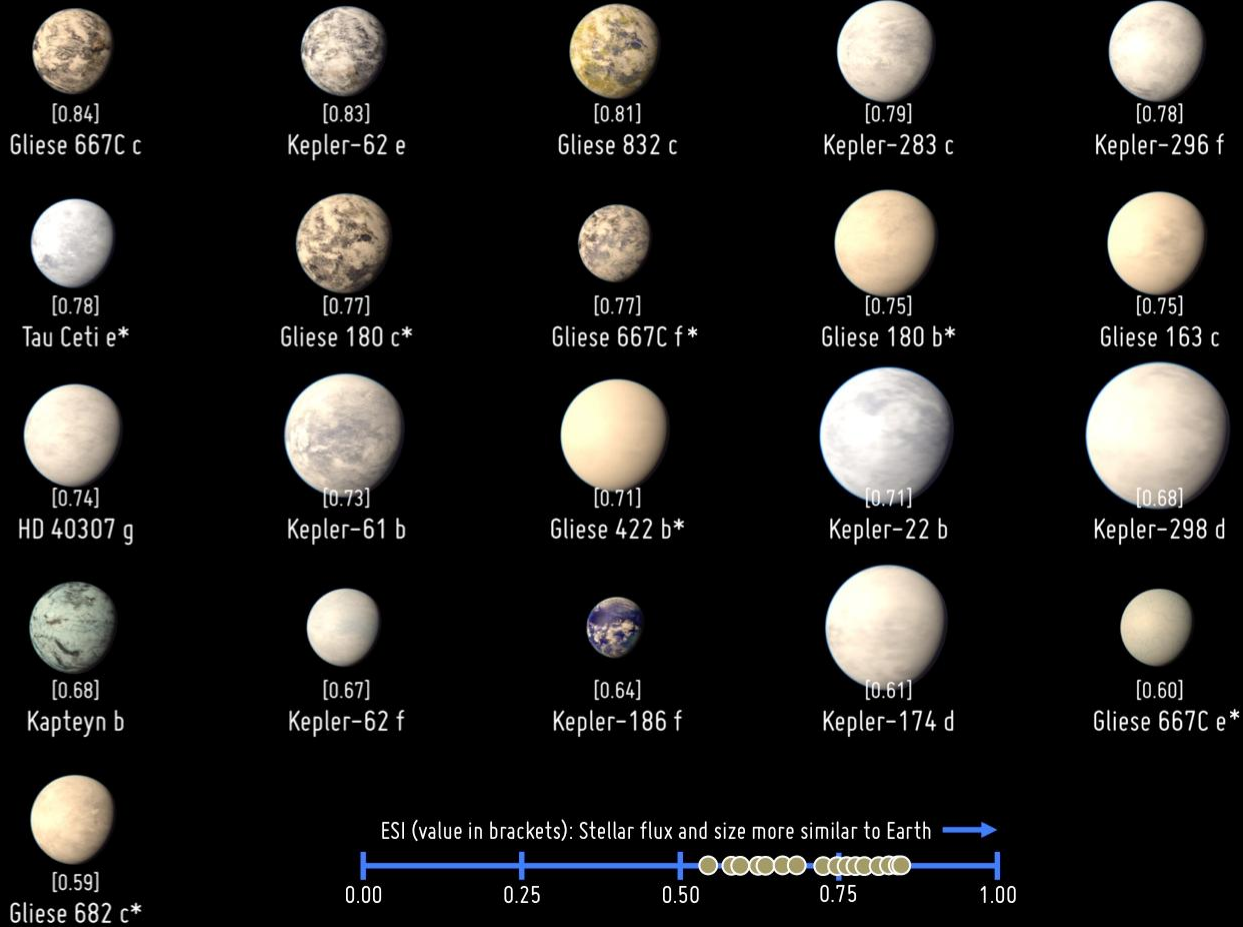
The Habitable Exoplanets Catalog (HEC) list a selection of all known exoplanets with any potential to support life, including some unconfirmed planets. The catalog tries to be as open as possible as not to exclude any object of interest. The selection can be narrowed down as desired using more conservative criteria based on different habitability metrics. The [Data](#) section has more technical details. Check the [Methods](#) section for an explanation of the metrics and classifications used here.

Ranked by the Earth Similarity Index (ESI)



Current Potentially Habitable Exoplanets

Ranked by the Earth Similarity Index (ESI)



*planet candidates/unconfirmed

CREDIT: PHL @ UPR Arcibo (phl.upr.edu) September 2, 2014



Earth

Conservative Selection of Potentially Habitable Exoplanets

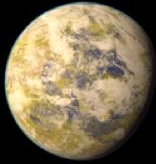
0.1 to 10 Earth Masses or 0.5 to 2.0 Earth Radii, Conservative Habitable Zone for Super-Earth Planets

Confirmed

Unconfirmed



Gliese 667C c



Gliese 832 c



Kepler-283 c



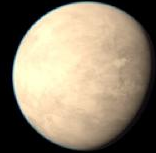
HD 40307 g



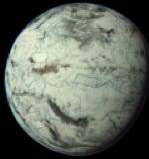
Gliese 180 c



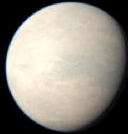
Gliese 422 b



Gliese 682 c



Kapteyn b



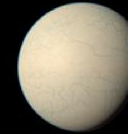
Kepler-62 f



Kepler-186 f



Gliese 667C f



Gliese 667C e

Gliese 667C c ::

$$M = 4,4 M_{\oplus}$$

$$P = 28,14 \text{ jours} \quad ; ; a = 0.125 \text{ au}$$

$$T \sim 280 \text{ K} ?$$

CREDIT: PHL @ UPR Arecibo (phl.upr.edu) September 2, 2014



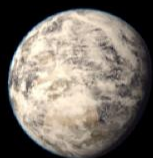
Earth

Optimistic Selection of Potentially Habitable Exoplanets

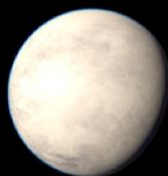
0.1 to 10 Earth Masses or 0.5 to 2.5 Earth Radii, Optimistic Habitable Zone



Confirmed



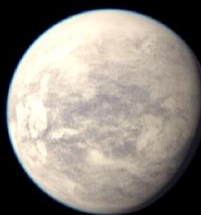
Kepler-62 e



Kepler-296 f



Gliese 163 c



Kepler-61 b



Kepler-22 b



Kepler-298 d

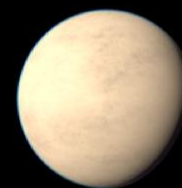


Kepler-174 d

Unconfirmed



Tau Ceti e

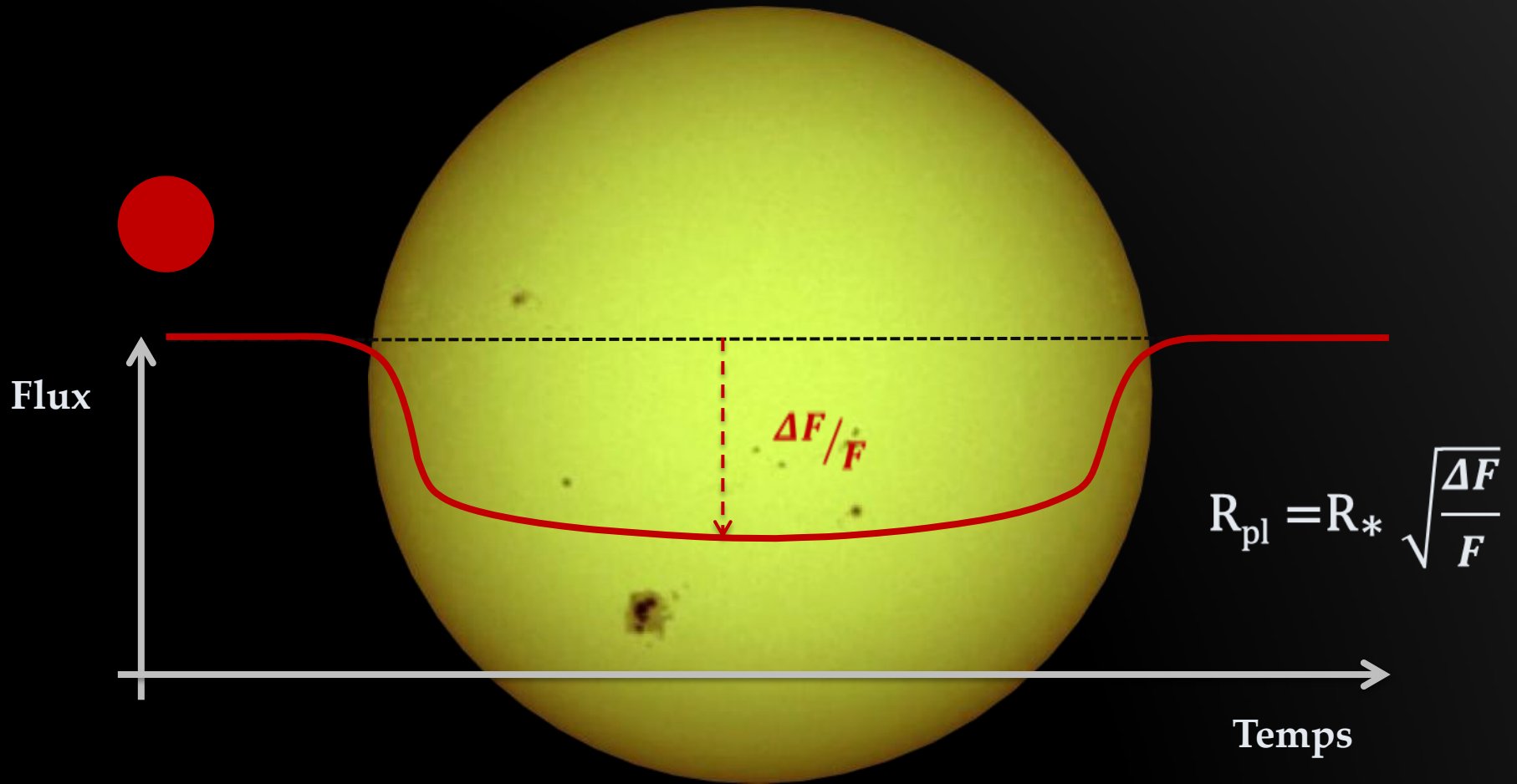


Gliese 180 b

Caractérisation des exoplanètes

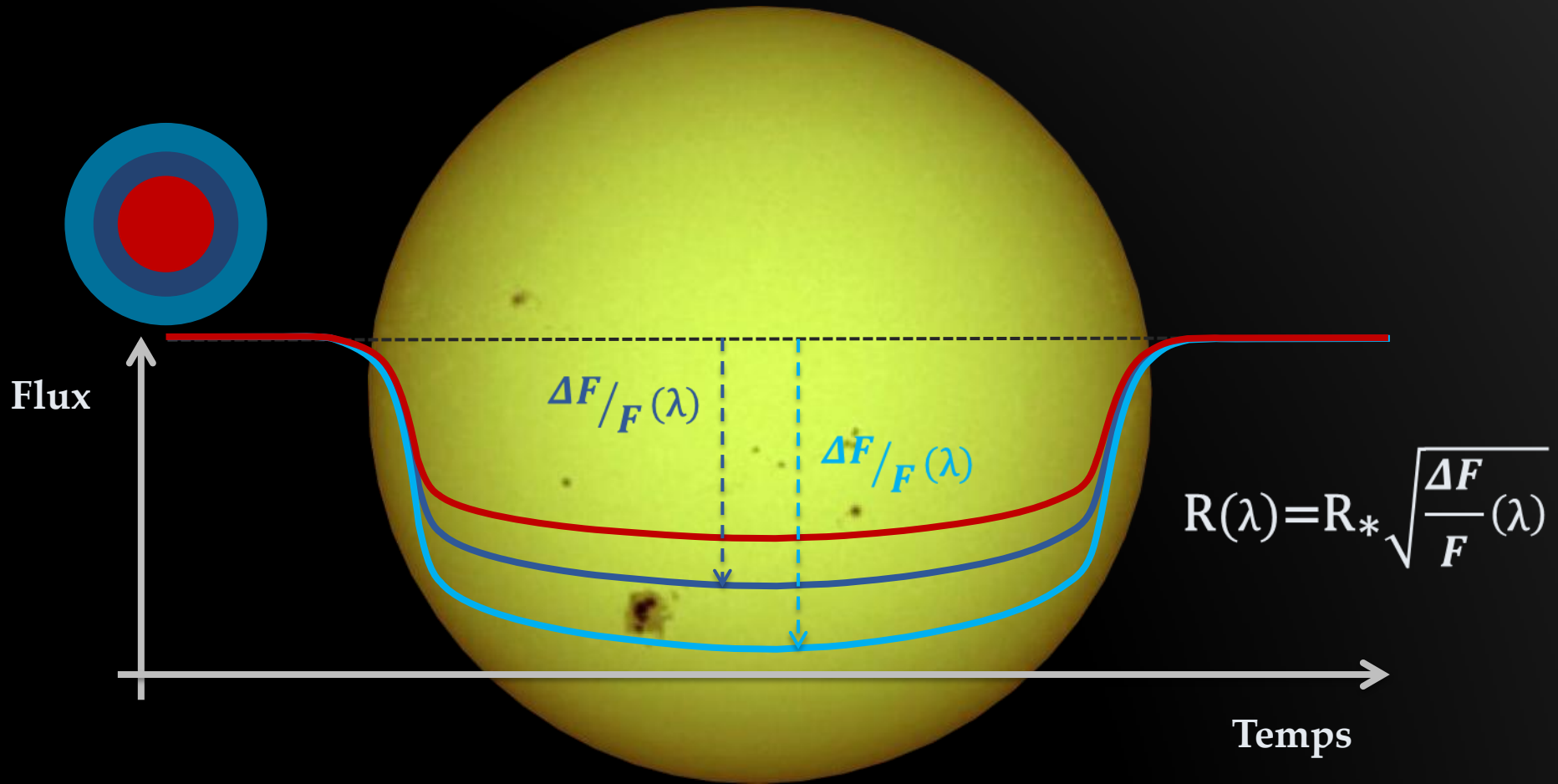
- Les atmosphères
- Et aussi:
 - Champs magnétiques
 - Rotation

Méthode du transit



Rayon, Inclinaison, Période orbitale

Méthode du transit



Spectroscopie du transit $\longrightarrow$ Étude de l'atmosphère

Détections dans les atmosphères d'exoplanètes

UV

- HI 121.6 nm
- OI 130.5 nm CII 133.5 nm
- SiIV 139.8 nm
- SiIII 140.1 nm
- Mg II 280.0 nm, MgI 285.3 nm

visible

- Rayleigh H₂ 300-500 nm
- Haze (MgSiO₃ / Al₂O₃) 300-2000 nm
- Na I 589.2-589.8 nm
- K I 768.4 nm
- TiO-VO 600-800 nm

IR

- CH₄ 1.6 - 2.3 - 3.3 - 3.5-8 μm
- H₂O 1.4 - 6-8 μm
- CO₂ 4 μm
- CO 2.3 - 4.5 μm

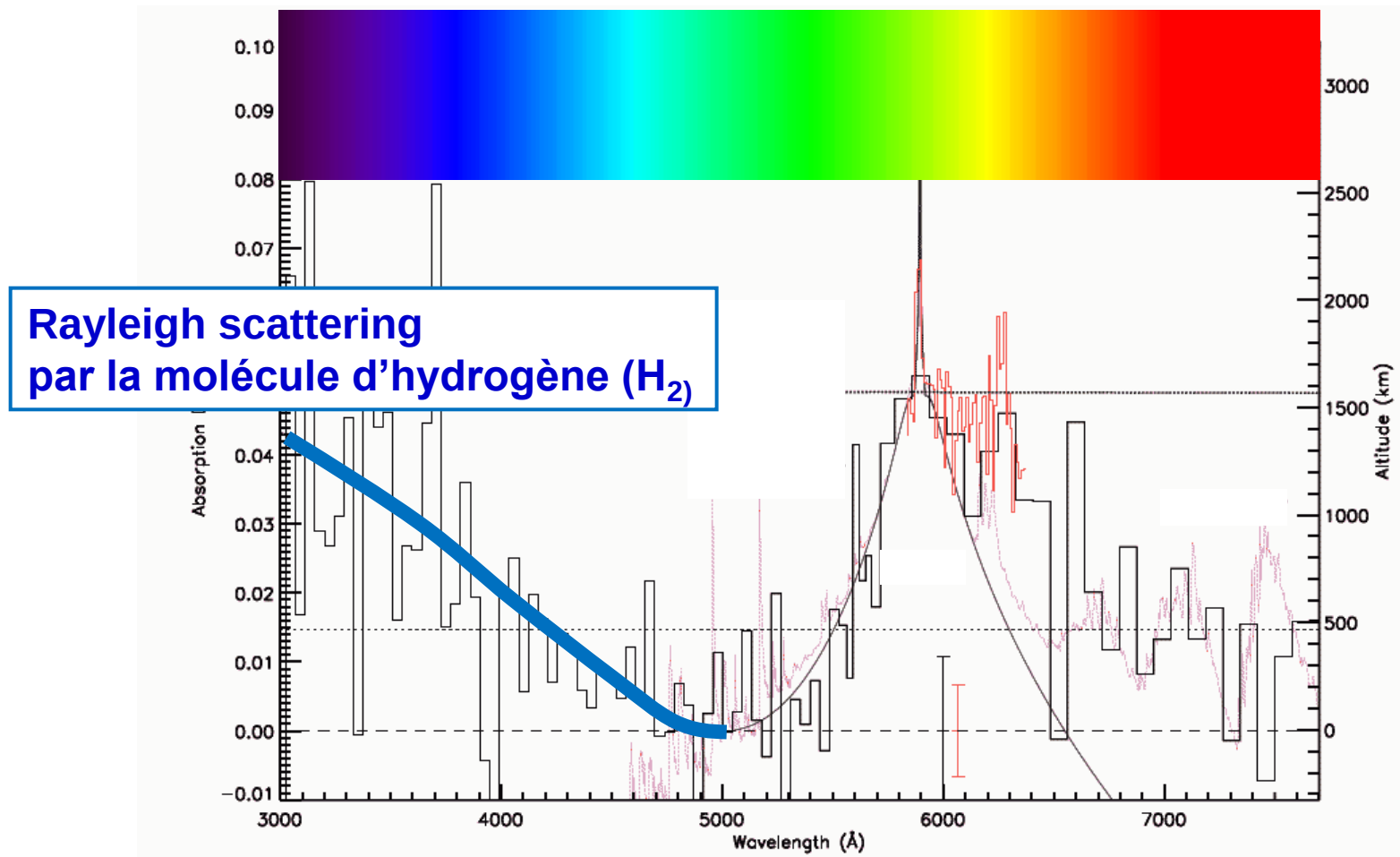
Mesures physiques/Caractérisation

- Présence/Absence d'éléments chimiques
- Température (T)
- Pression (P)
- Variation de température avec l'altitude (dT/dz)
- Variation d'abondance avec l'altitude (dN/dz)
- Abondance relative en absorption (N_1/N_2)
- Taux d'échappement (dM/dt)
- Vents au terminateur jour-nuit (V)
- Vitesse de rotation (Ω_p)
- Abondance/Profile T-P en émission ($N/T(P)$)

HD209458b (Osiris):

Spectre de l'atmosphère de l'UV à l'IR

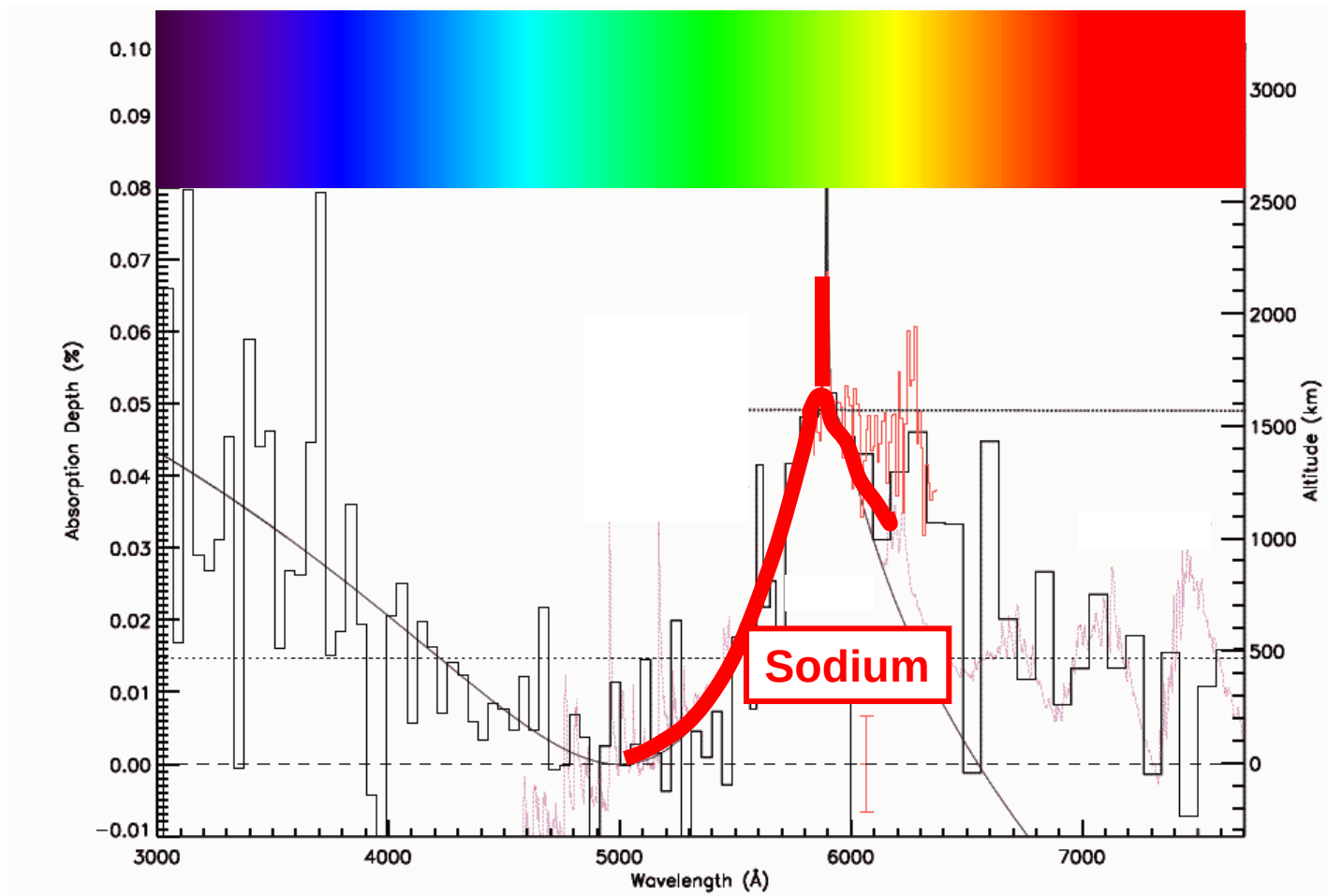
(Sing et al. 2008a, 2008b, Désert et al. 2008, Lecavelier et al. 2008)



HD209458b (Osiris):

Spectre de l'atmosphère de l'UV à l'IR

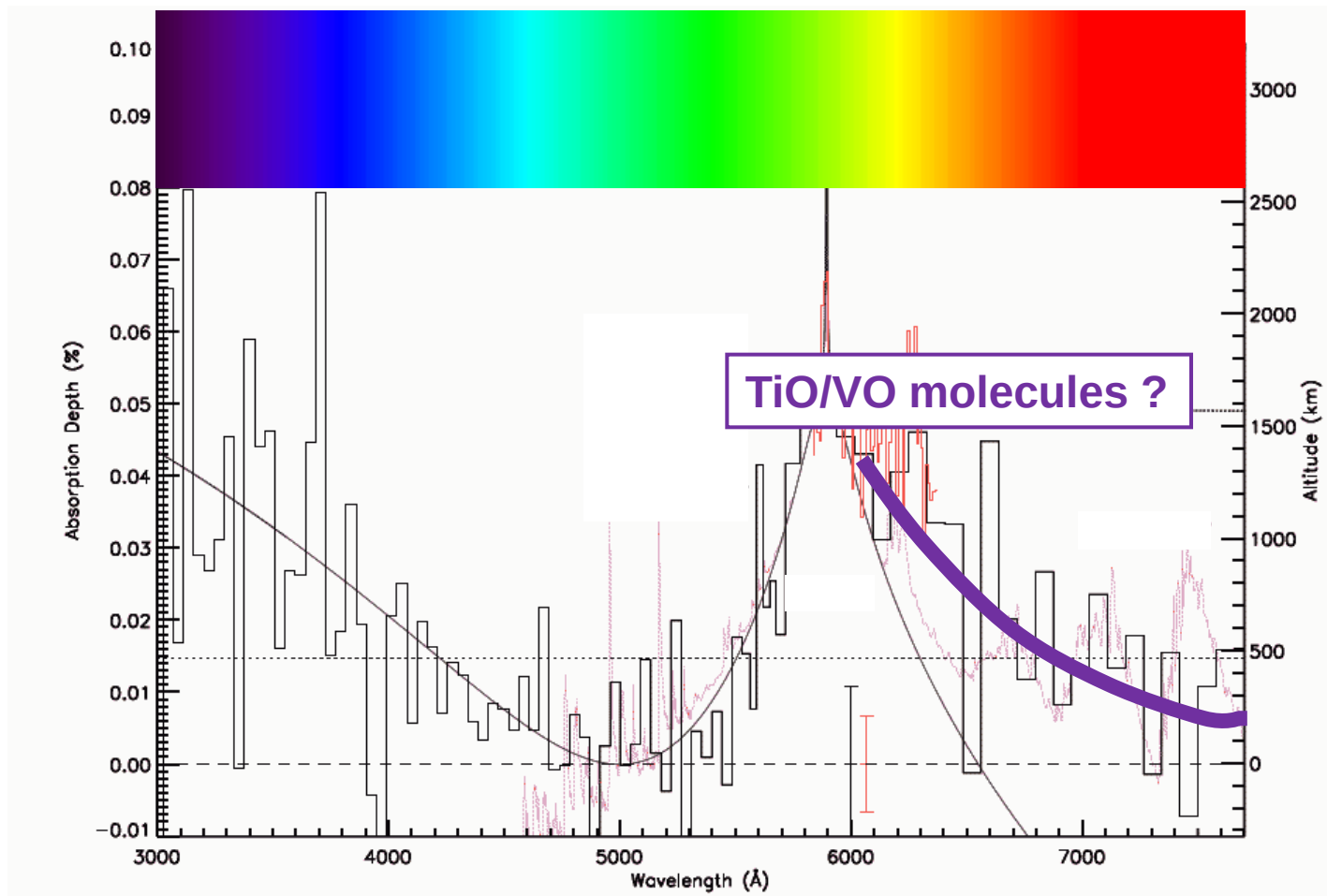
(Sing et al. 2008a, 2008b, Désert et al. 2008, Lecavelier et al. 2008)



HD209458b (Osiris):

Spectre de l'atmosphère de l'UV à l'IR

(Sing et al. 2008a, 2008b, Désert et al. 2008, Lecavelier et al. 2008)



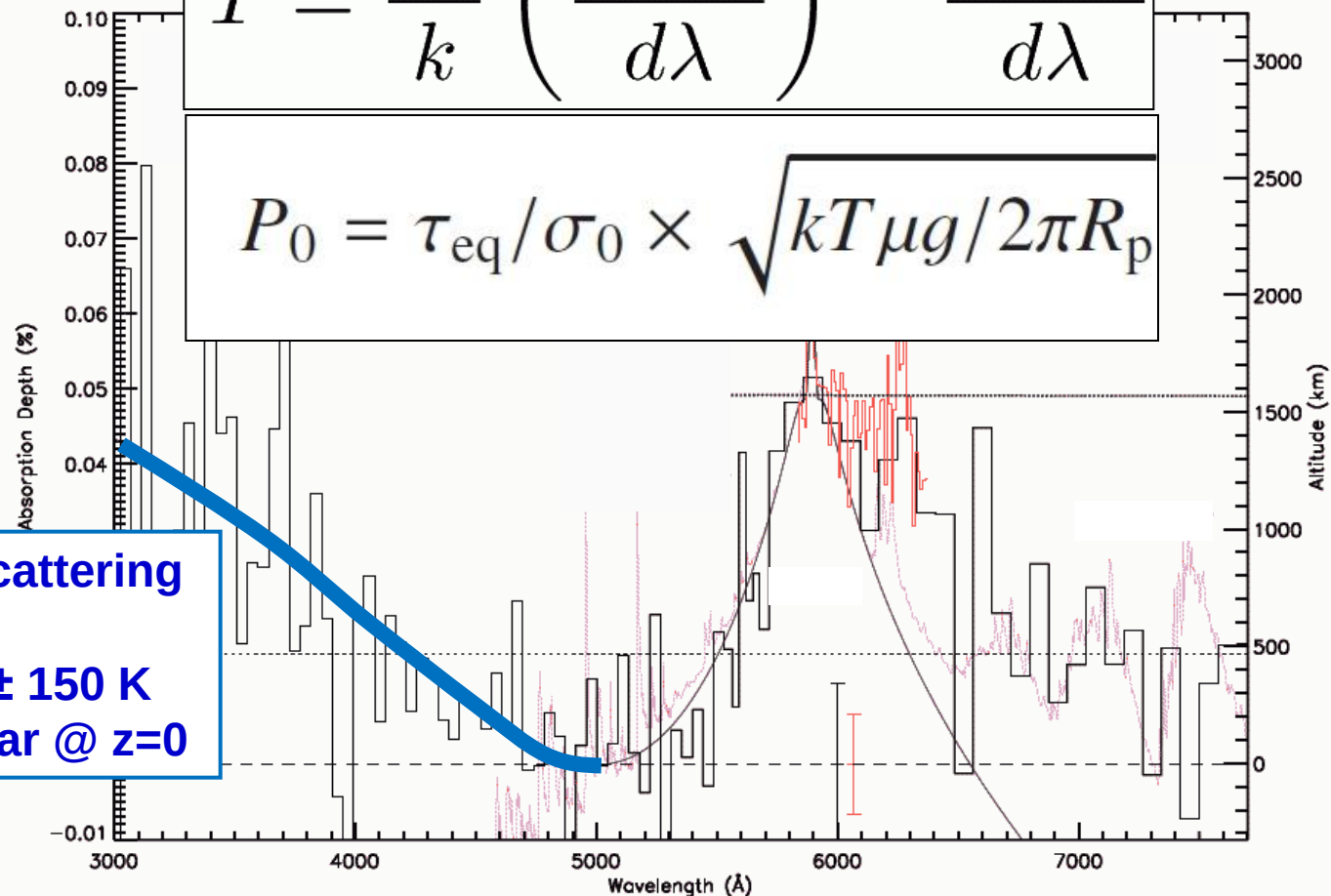
Rayleigh scattering:

Mesure de la température et de la pression de H₂

(Lecavelier des Etangs et al. 2008)

$$T = \frac{\mu g}{k} \left(\frac{d \ln \sigma}{d \lambda} \right)^{-1} \frac{dz(\lambda)}{d \lambda}$$

$$P_0 = \tau_{\text{eq}} / \sigma_0 \times \sqrt{k T \mu g / 2 \pi R_p}$$



Rayleigh scattering

→ $\alpha = -4$

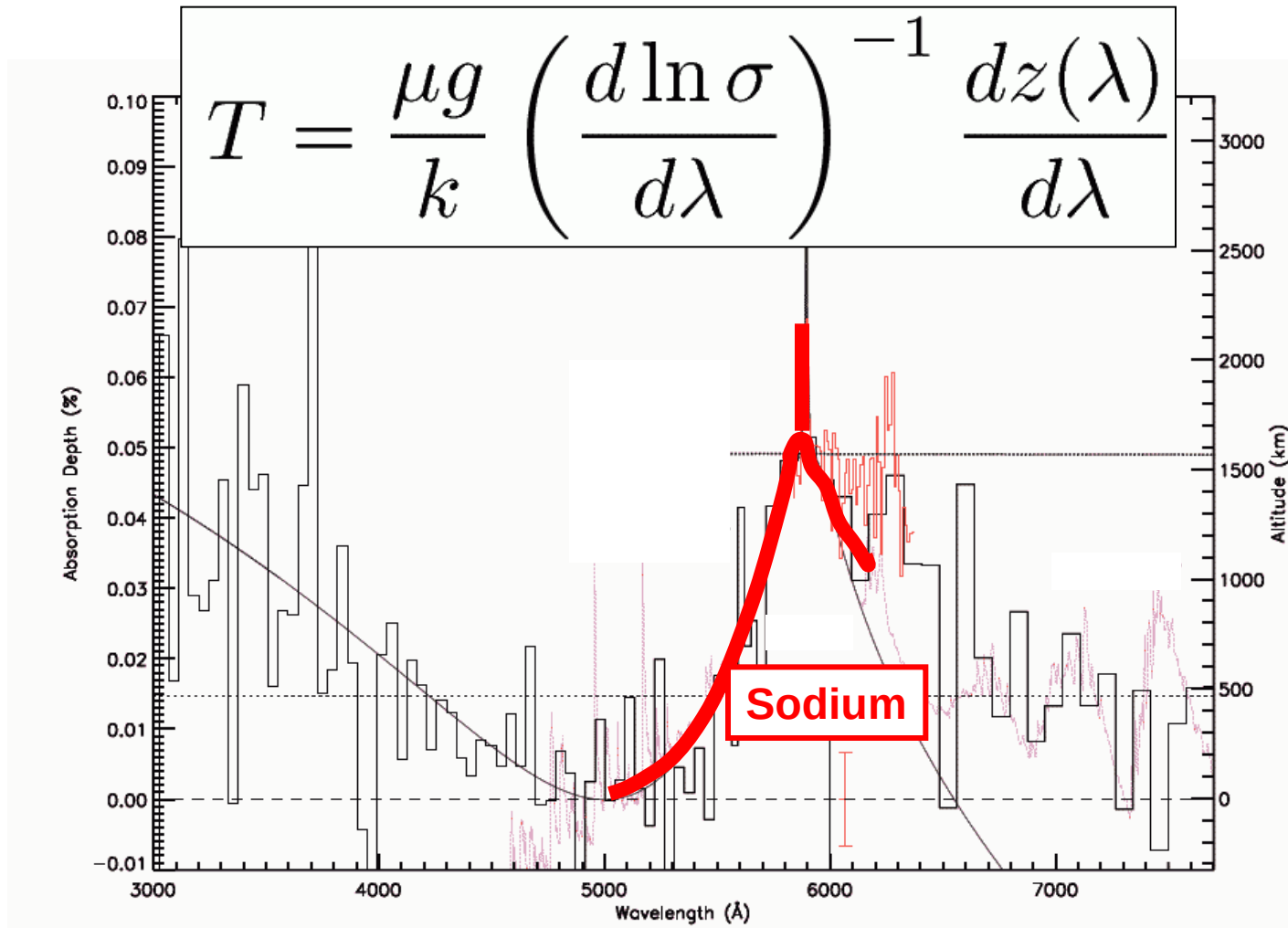
→ $T = 2350 \pm 150$ K

→ $P = 32$ mbar @ $z = 0$

HD209458b (Osiris):

Spectre de l'atmosphère de l'UV à l'IR

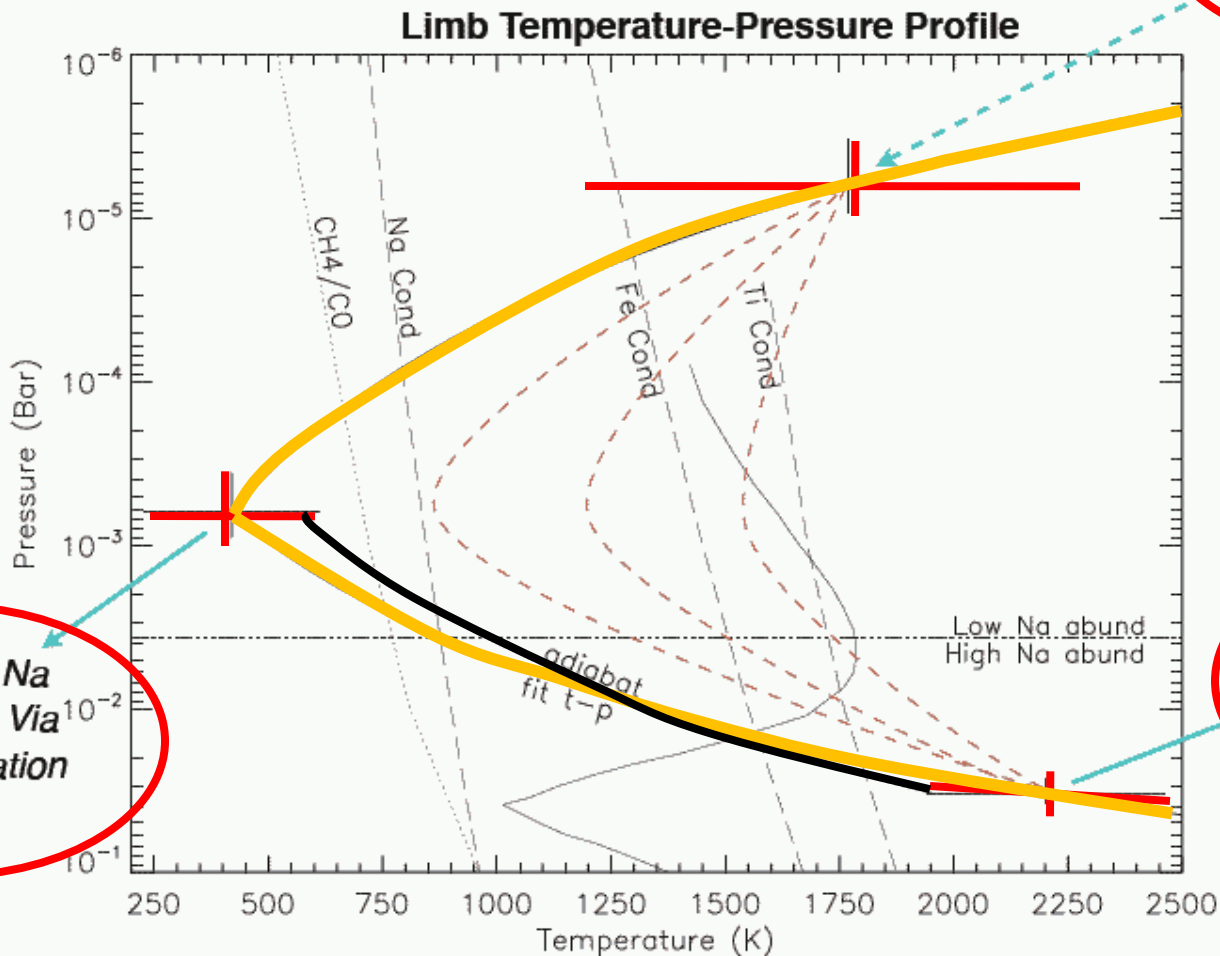
(Sing et al. 2008a, 2008b, Désert et al. 2008, Lecavelier et al. 2008)



Profil Température-Pression 10 mbar-10 μ bar

(Sing et al. 2008a; 2008b)

Na core indicates
hot high-altitude
temperatures



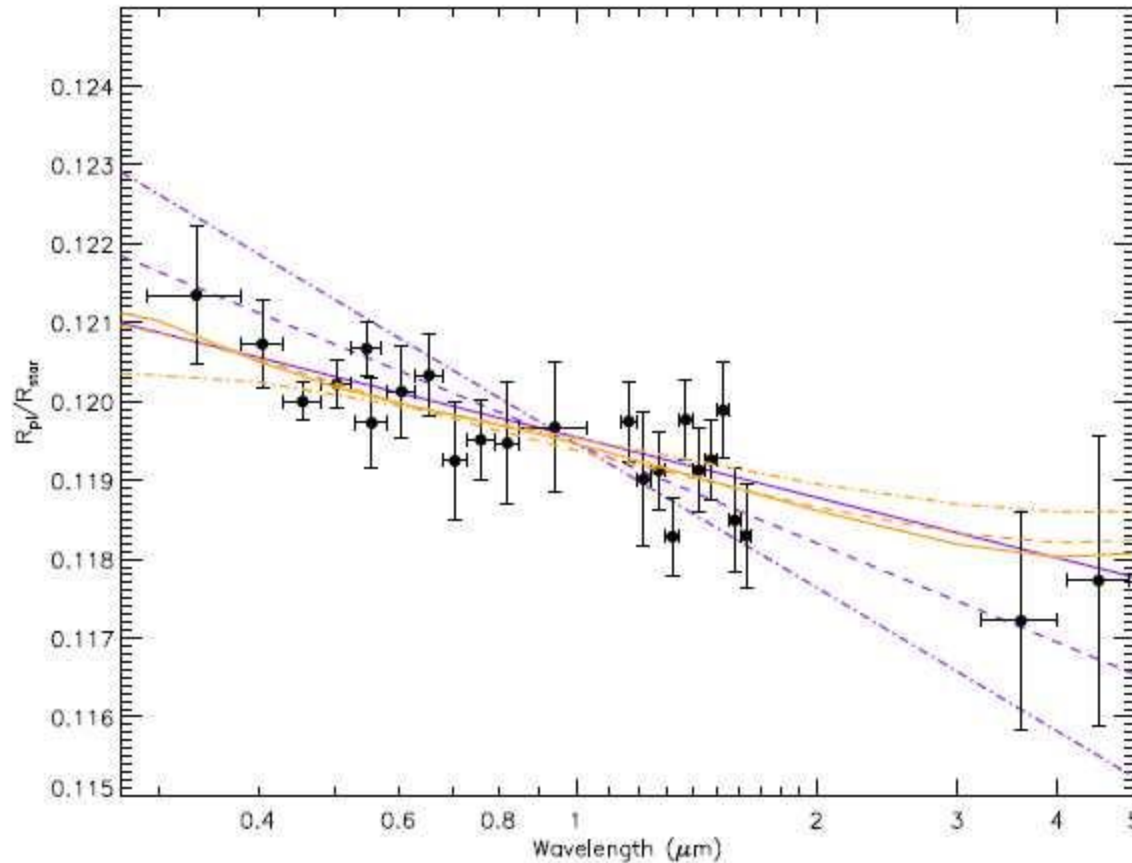
HD209458b

Assumes Na
Depletion Via
Condensation

Measured By H₂
Rayleigh Scattering.

Observation de Wasp-12 avec HST

(Sing, Lecavelier et al. 2013)



Pure Rayleigh

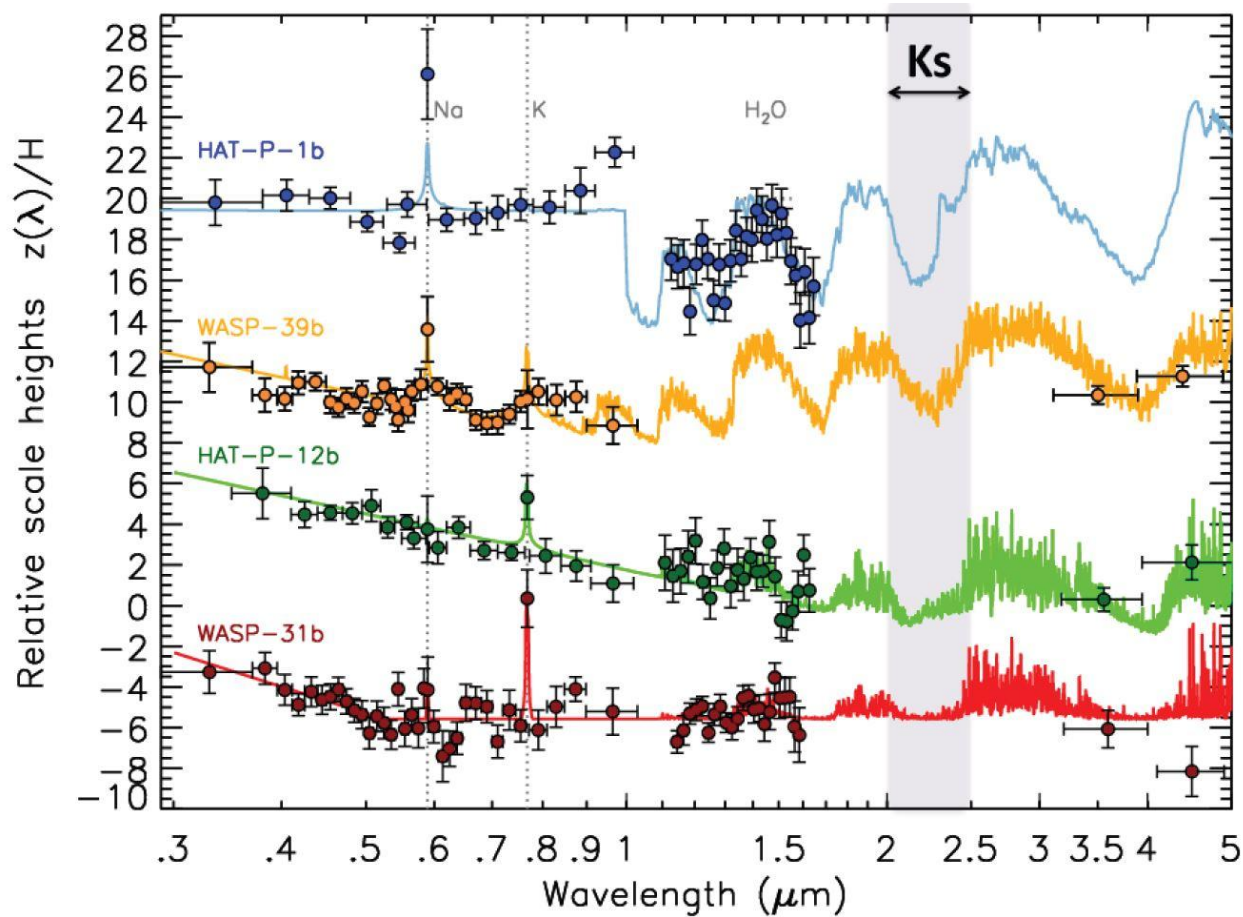
→ $T \sim 880 \pm 170 \text{ K}$

Al_2O_3

→ $T = 1400 \pm 400 \text{ K}$

Figure 14. Rayleigh scattering (purple) and Mie scattering Al_2O_3 models (orange) plotted at different assumed atmospheric temperatures of 968 K (solid), 1450 K (dashed), and 2100 K (dot-dashed). Al_2O_3 Mie scattering models can provide good fits at a wide variety of temperature ranges, while Rayleigh scattering models fit best at temperatures of $882 \pm 164 \text{ K}$.

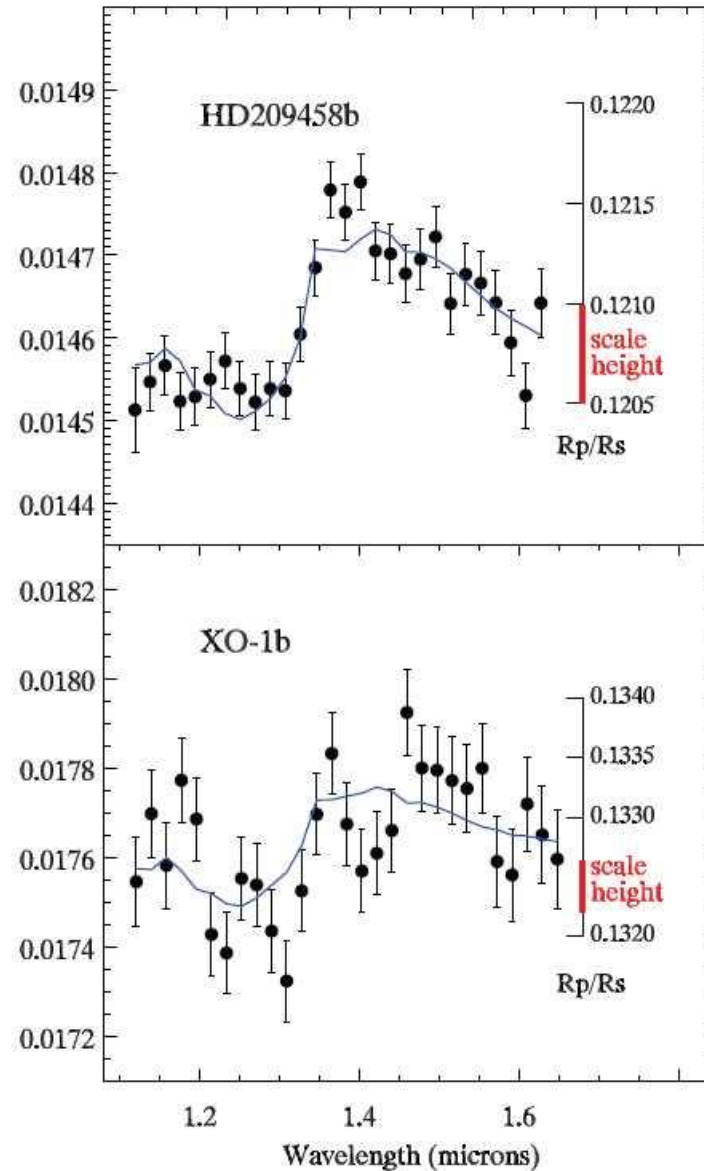
Observations HST des atmosphères des Jupiters-chauds



Sing, Lecavelier et al., 2013; Huitson et al. 2013;
Nikolov et al. 2014; Wilson et al. 2014

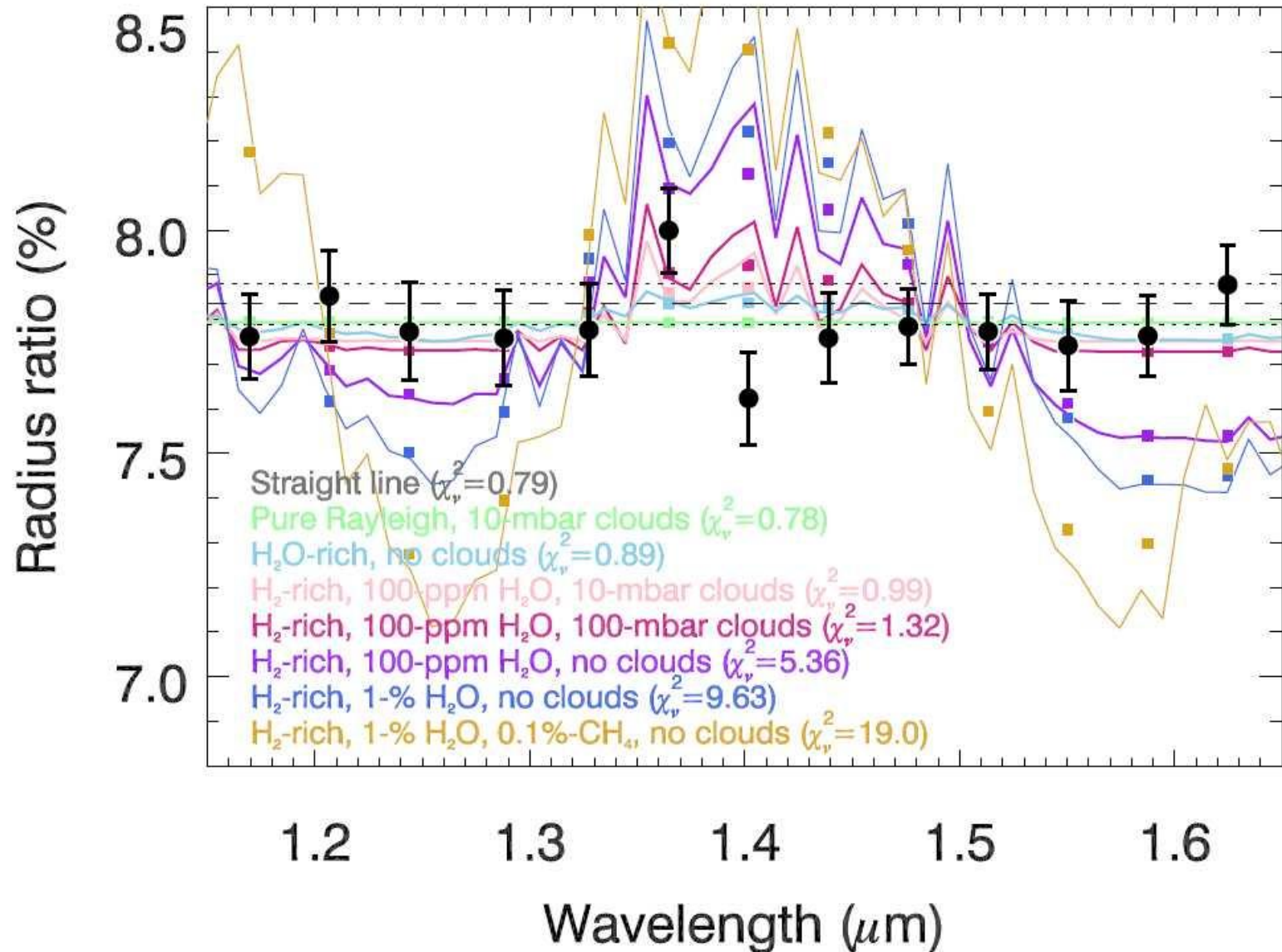
Observation de H₂O avec HST/WFC-3

(e.g., Deming et al. 2013; Ehrenreich et al. 2014)



H₂O dans GJ 3470b avec HST/WFC-3

(Ehrenreich et al. 2014)



Water vapour absorption in the clear atmosphere of a Neptune-sized exoplanet

Jonathan Fraine^{1,2,3}, Drake Deming^{1,4}, Bjorn Benneke³, Heather Knutson³, Andrés Jordán², Néstor Espinoza², Nikku Madhusudhan⁵, Ashlee Wilkins¹ & Kamen Todorov⁶

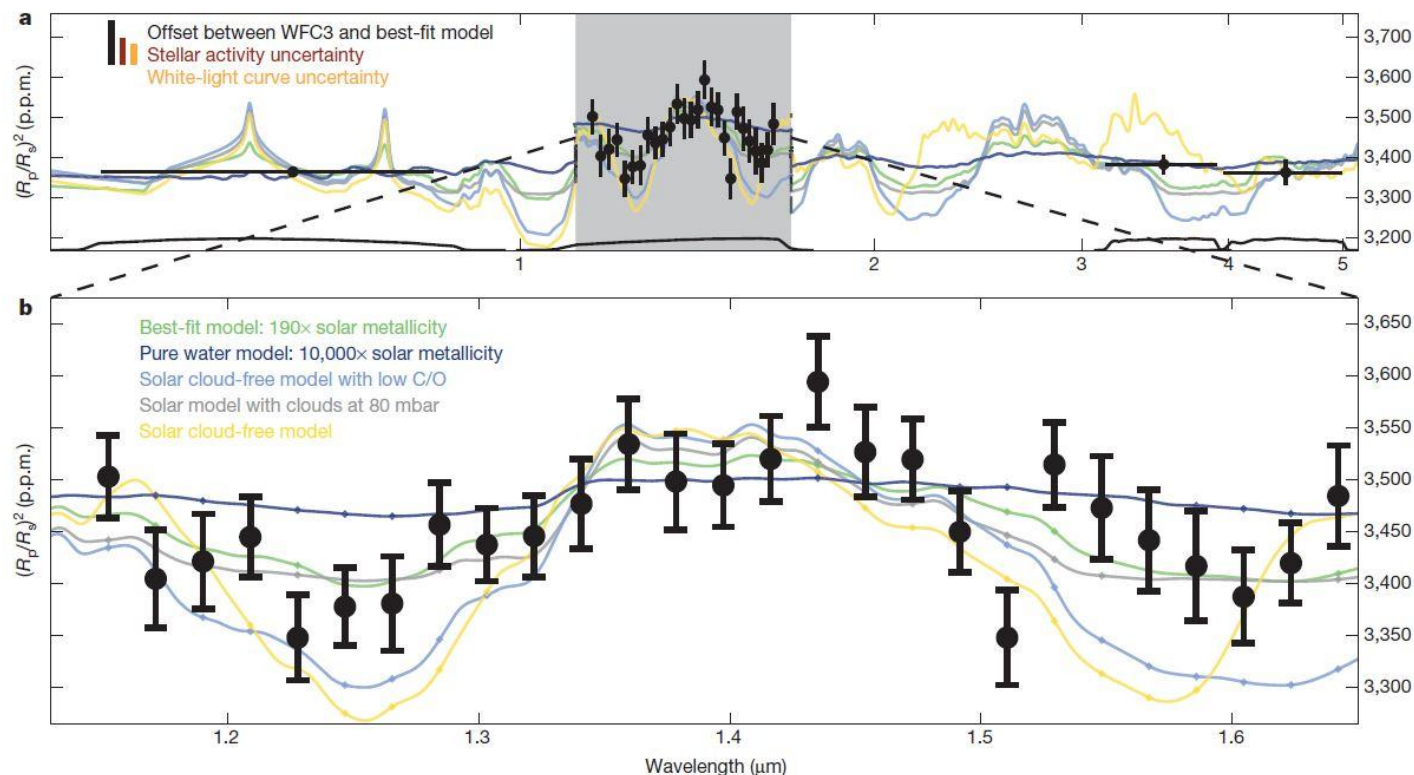


Figure 2 | The transmission spectrum of HAT-P-11b. **a**, Our WFC3 observations show transit depth variations in agreement with a hydrogen-dominated atmosphere. The coloured, solid lines^{23,24} correspond to matching markers displayed in Fig. 3. The error bars represent the standard deviations over the uncertainty distributions. An atmosphere with a high mean molecular

mass (dark blue line) is ruled out by our observations by $>3\sigma$. The WFC3 spectrum was allowed to shift, as a unit, over these uncertainties. R_s , stellar radius. **b**, Detailed view of our WFC3 spectrum. For the purposes of visually comparing the spectral significance, we shifted all of the models by 93 p.p.m. in the grey region in **a** and **b**.

Recherche d'émission radio : le Neptune-chaud HAT-P-11



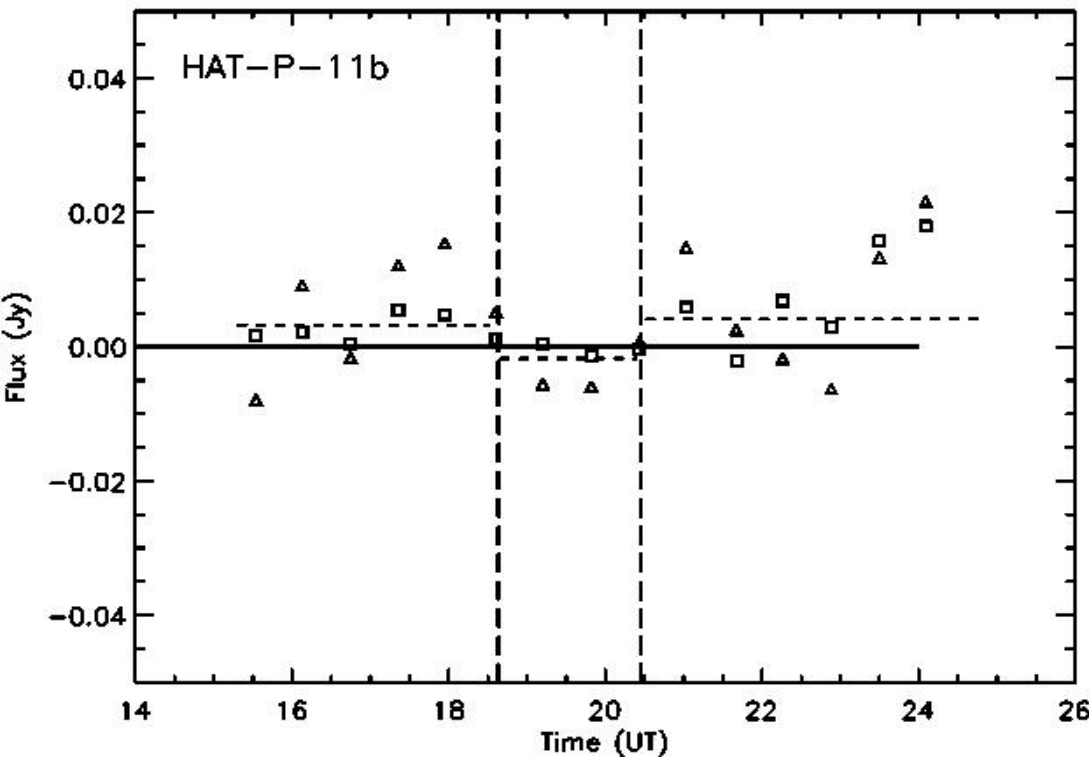
Le GMRT : 30 antennes de 45m, Khodad, Inde

Recherche d'émission radio : le Neptune-chaud HAT-P-11

Signature d'un transit secondaire ??

Détection non confirmée, variabilité ??

(Lecavelier, Sirothia, et al., 2013)



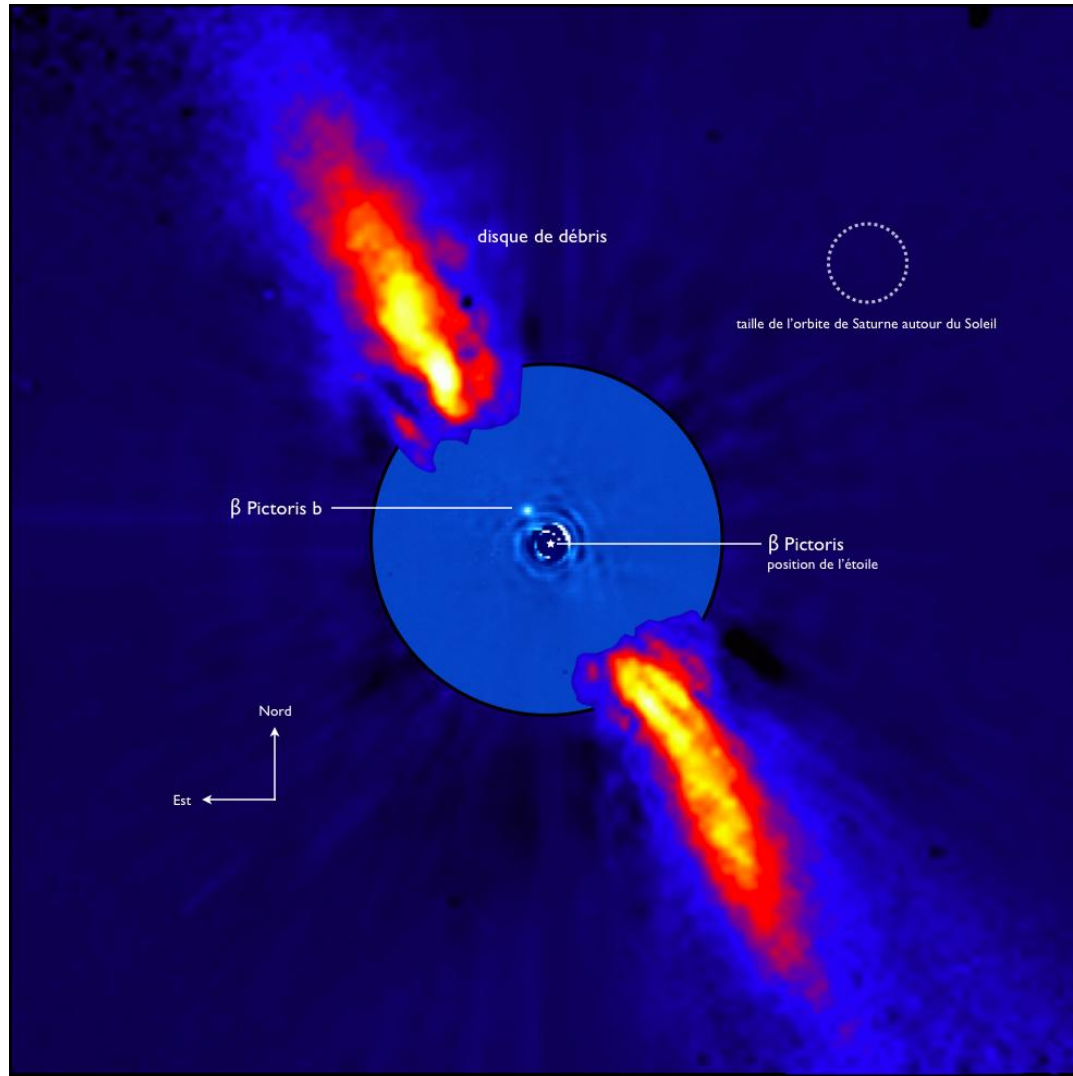
- 3- σ detection
 3.7 ± 1.2 mJy
- 7% false probability

$$f_g = 2.8 (B_p / 1 \text{ G})$$

150 MHz $\rightarrow$ 50 G
(14 G for Jupiter).

Caractérisation des exoplanètes

- Rotation de la planète: β Pictoris b





The Fast Spin of β Pic b

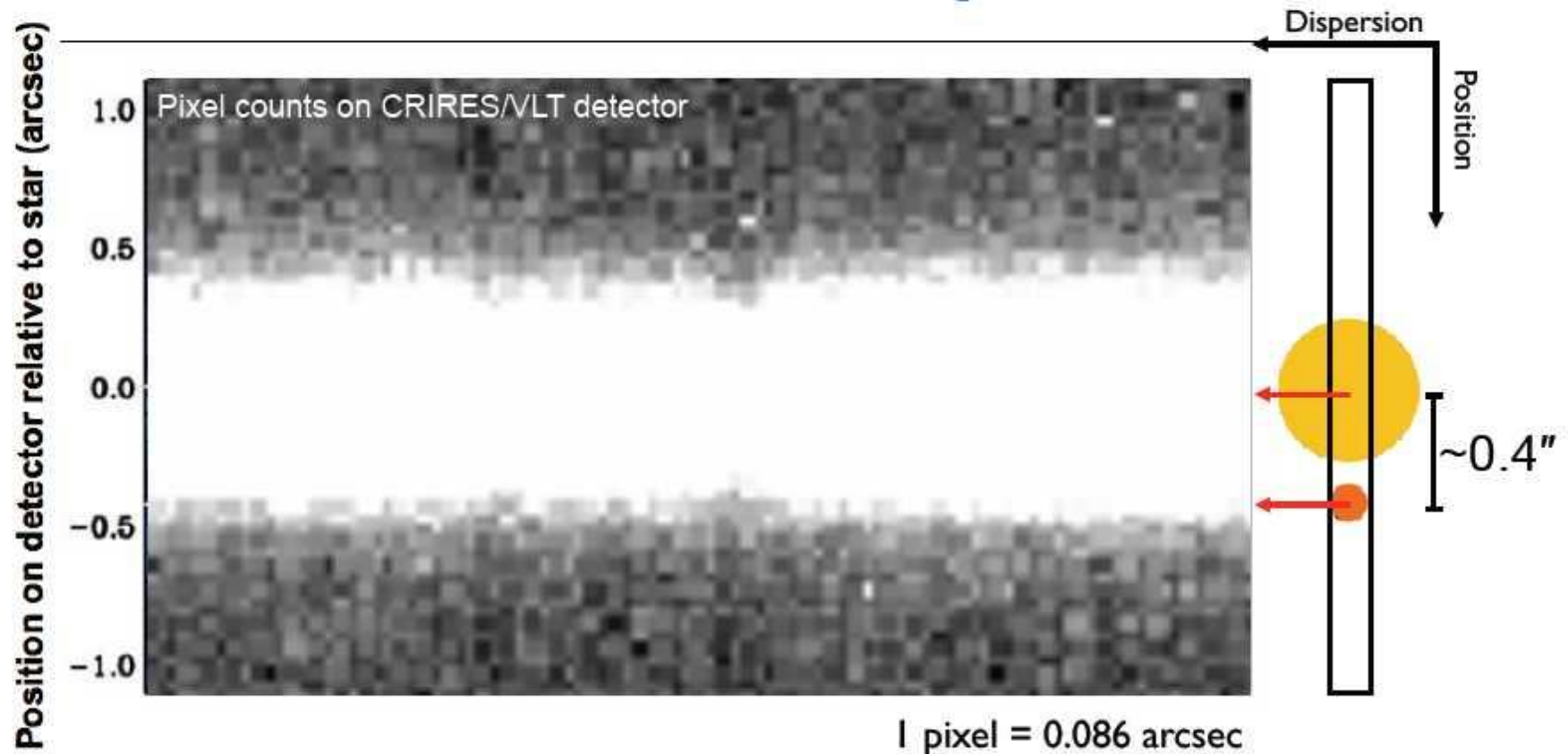
Jayne Birkby^{1,2,*}

Ignas Snellen², Bernhard Brandl², Remco de Kok², Matteo Brogi², Henriette Schwarz²

¹Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, USA; ²Leiden Observatory, The Netherlands; *NASA Sagan Fellow

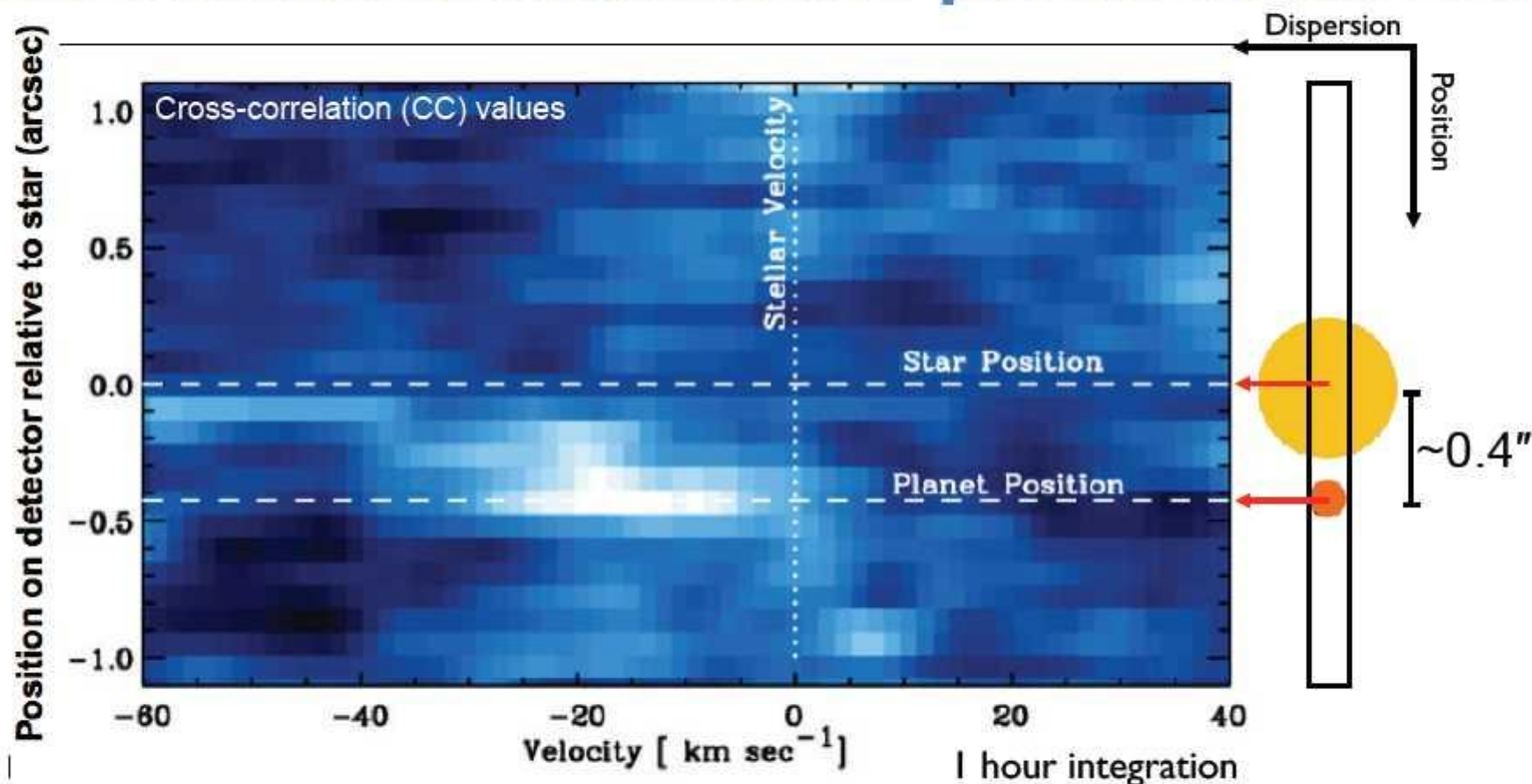
Snellen et al., *Nature*, 509, 7498 (2014) arXiv:1404.7506

Spectra extracted at every position along the slit and stellar/telluric profile removed



Residual spectra were cross-correlated with model atmospheres containing CO (and H₂O) at different abundances for a range of temperature-pressure profiles.

Spectra extracted at every position along the slit and stellar/telluric profile removed



CO detected in β Pic b! Strongest CC at $RV = -15.4 \pm 1.7$ km/s at $\sim 0.4''$

Consistent with position from direct imaging and with a circular orbit. H_2O only seen at $SNR \sim 2$. No methane.

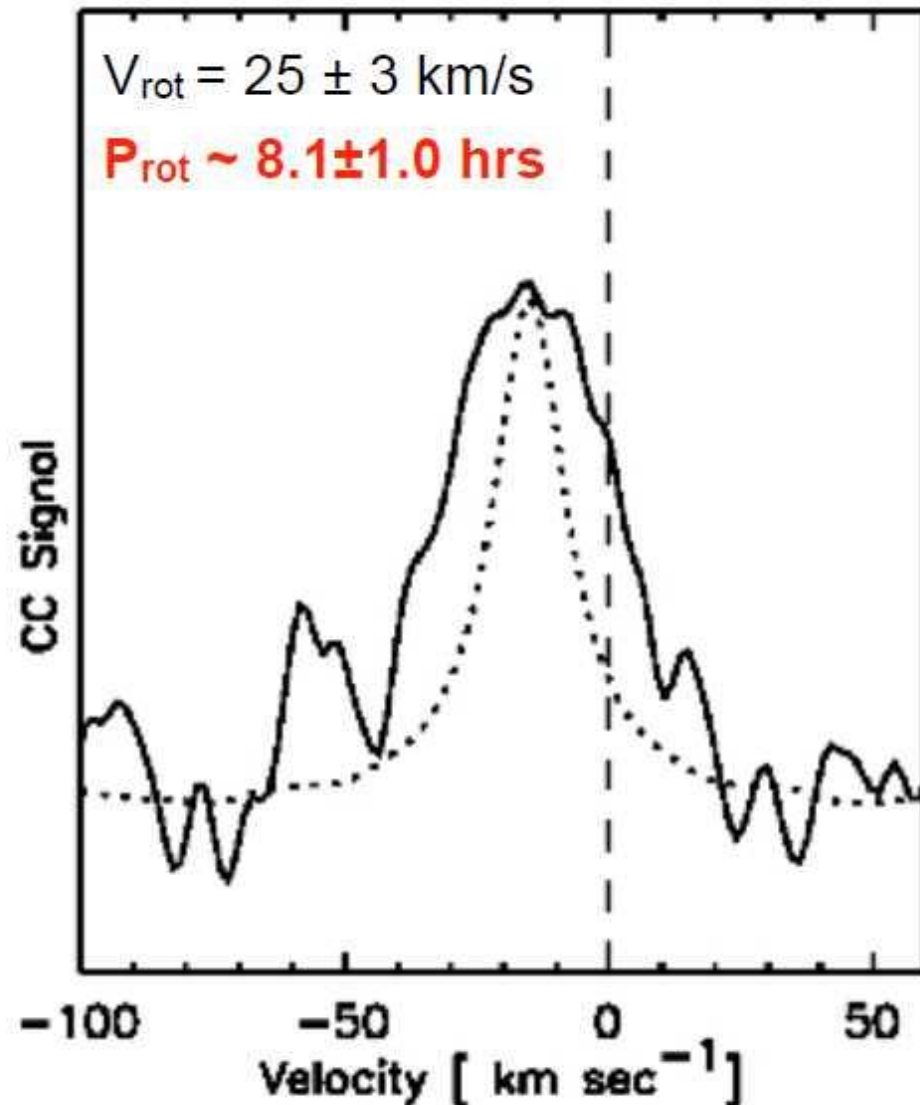
CC at planet position is rotationally broadened

..... = instrument profile

Assumed:

- $M_p = 1.1 \pm 0.5 M_J$
- $R_p = 1.65 \pm 0.06 R_J$
- Small obliquity

(Radius from Currie et al. 2013)



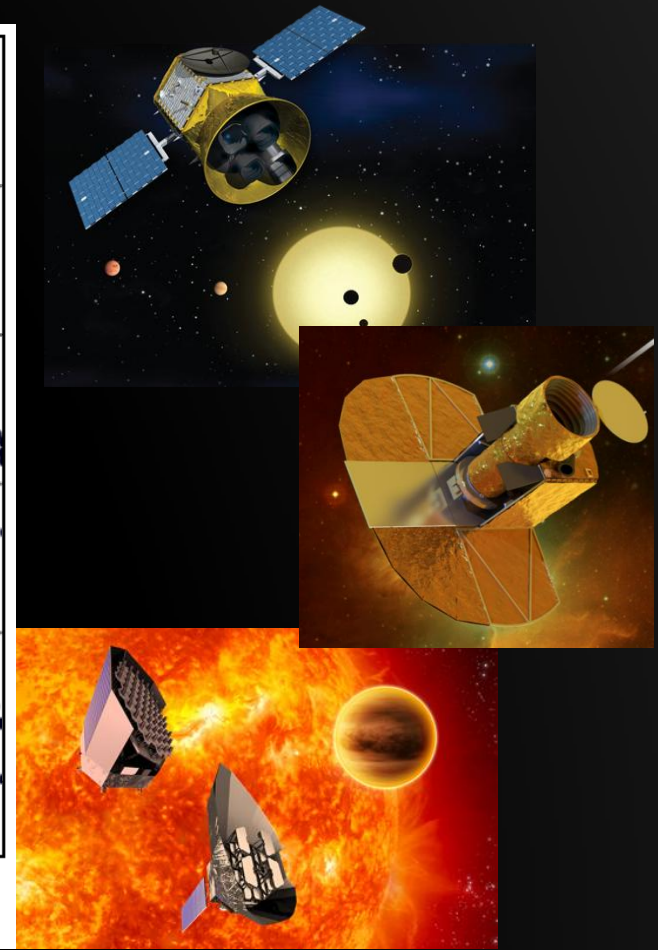
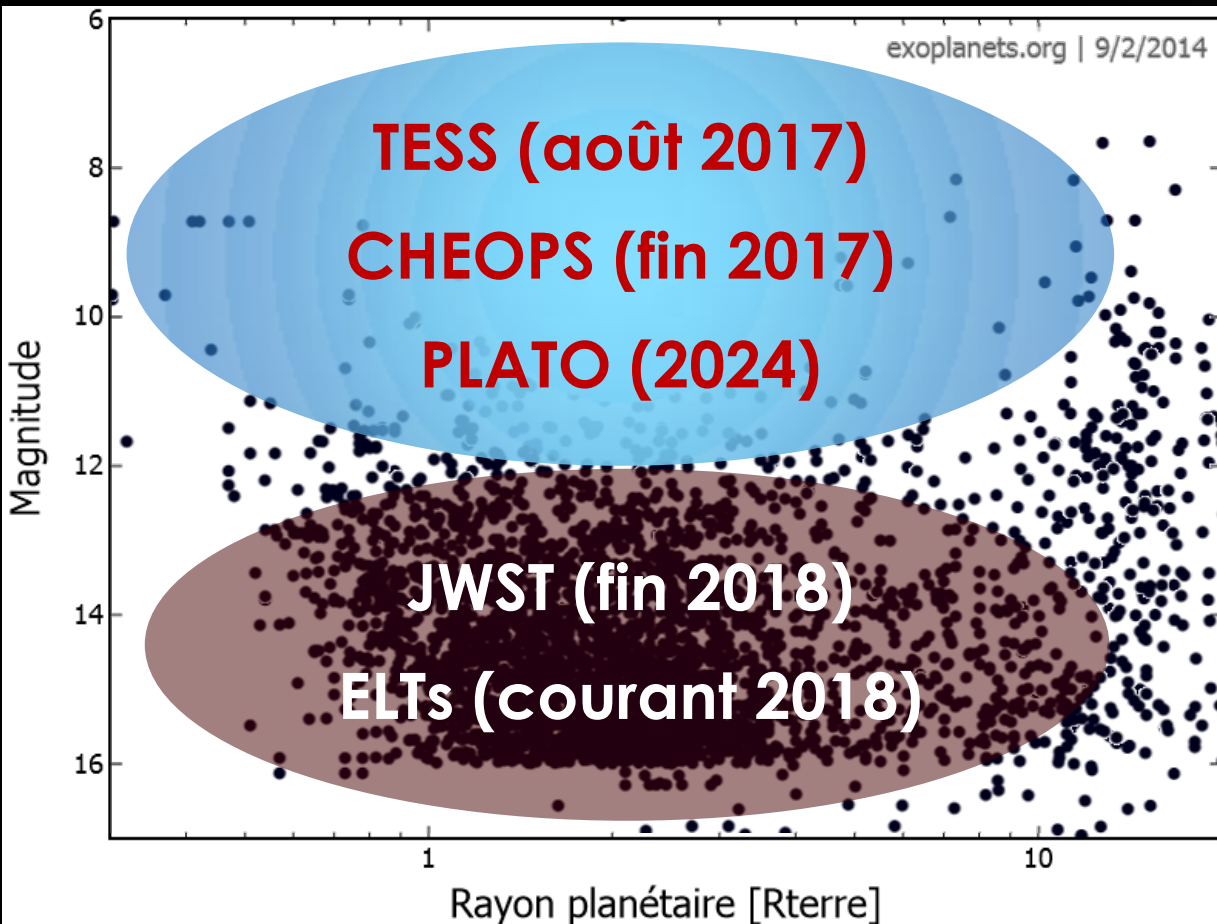
Perspectives : la puissance de la spectroscopie du transit

➤ Histoire des systèmes planétaires

- Formation planétaire
- Migration planétaire
- Interactions planète/étoile
- ...

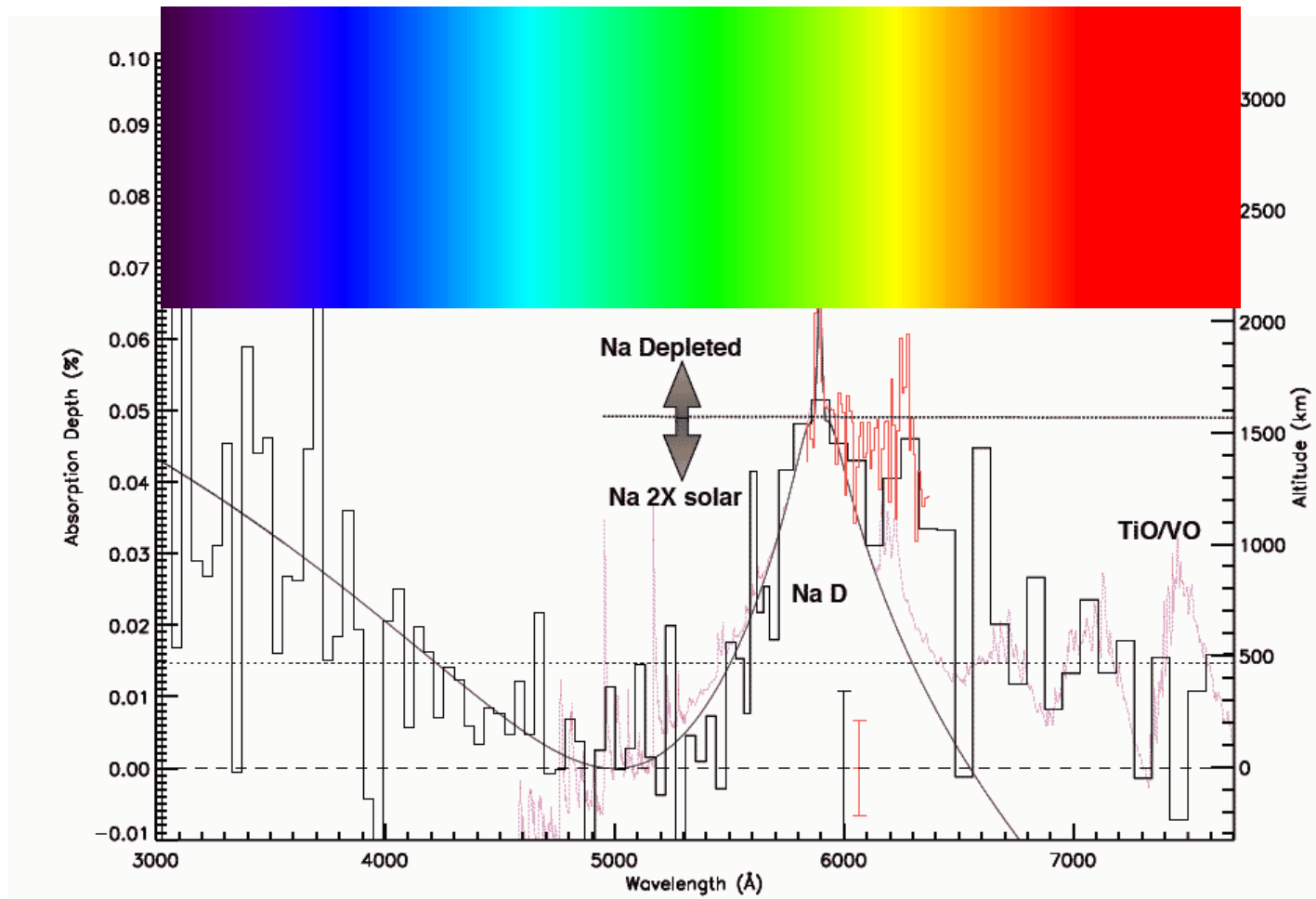
➤ Caractérisation des atmosphères

- Composition, profils T-P
- Vents, nuages
- Evaporation
- ...



The end

HD209458b (Osiris): l'atmosphère de 3000 à 7500 Å (Sing et al. 2008)



HD209458b (Osiris): l'atmosphère de 3000 à 7500 Å (Sing et al. 2008)

→ On peut calculer
les couleurs du ciel
vu d'Osiris.



