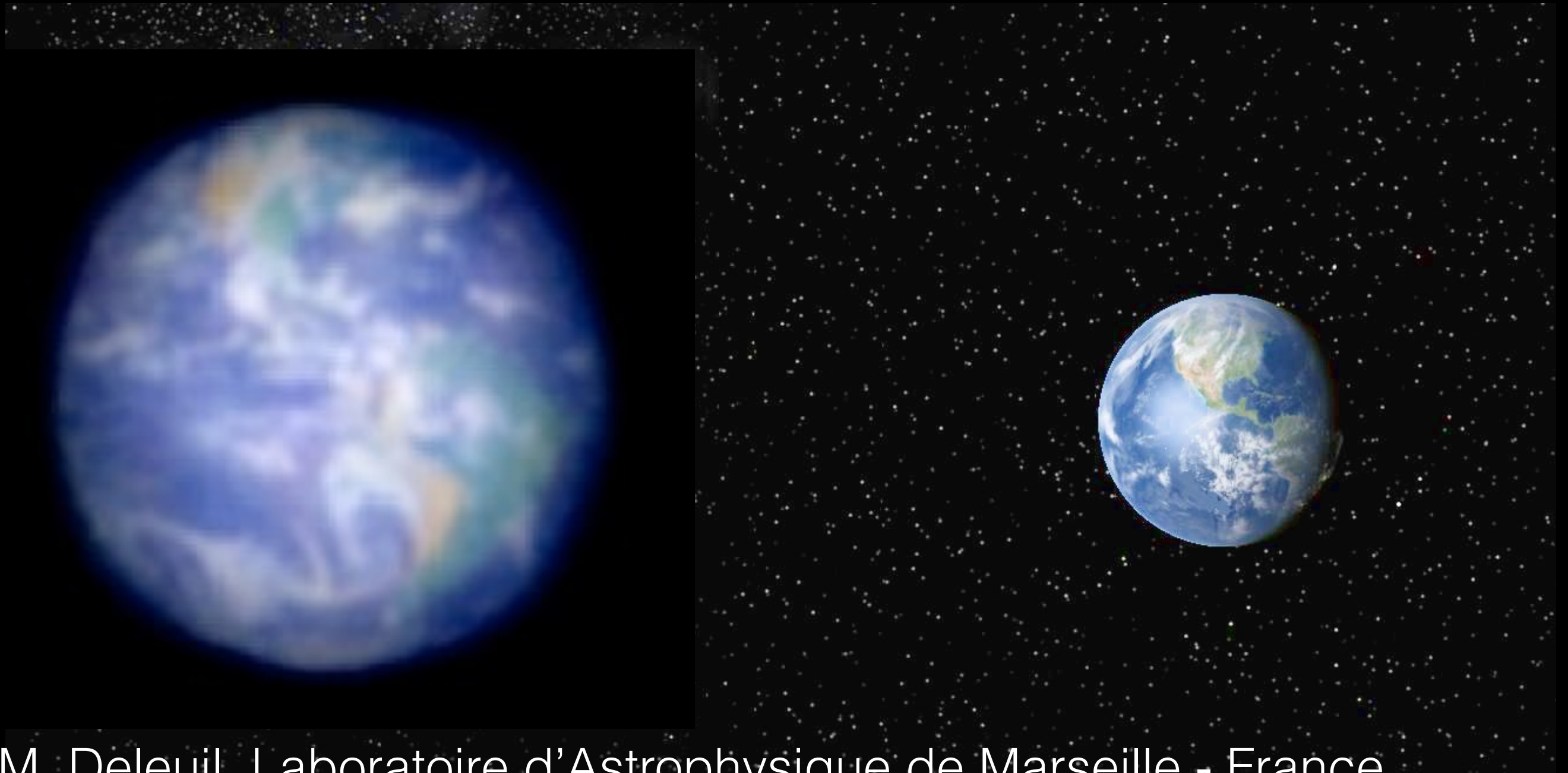
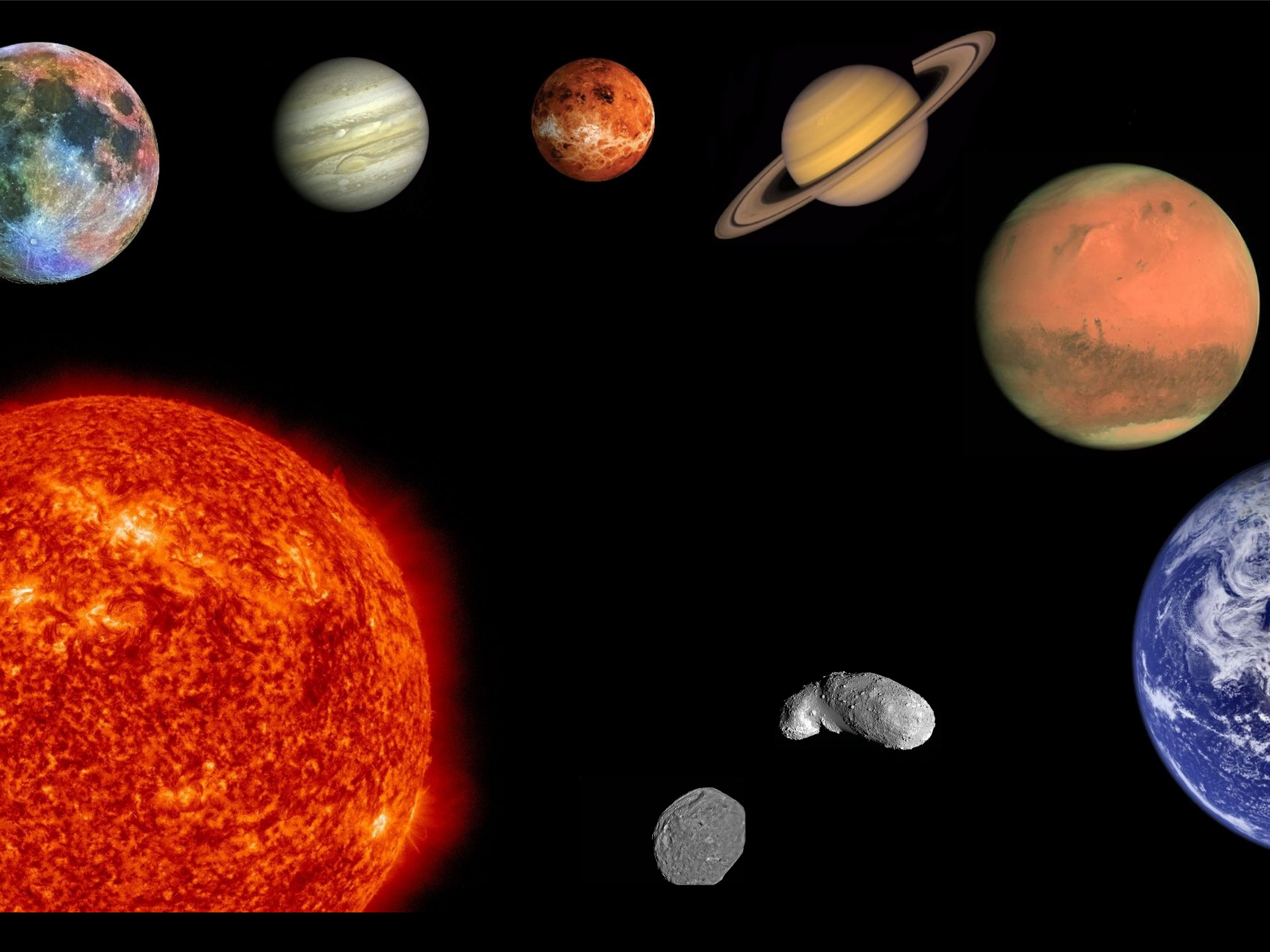


Exoplanètes: contraintes observationnelles pour l'habitabilité



M. Deleuil, Laboratoire d'Astrophysique de Marseille - France



Planètes par imagerie

Difficultés:

1. Le contraste étoile/planète
2. la proximité
3. vérifier que le compagnon est bien lié à l'étoile.



contraste

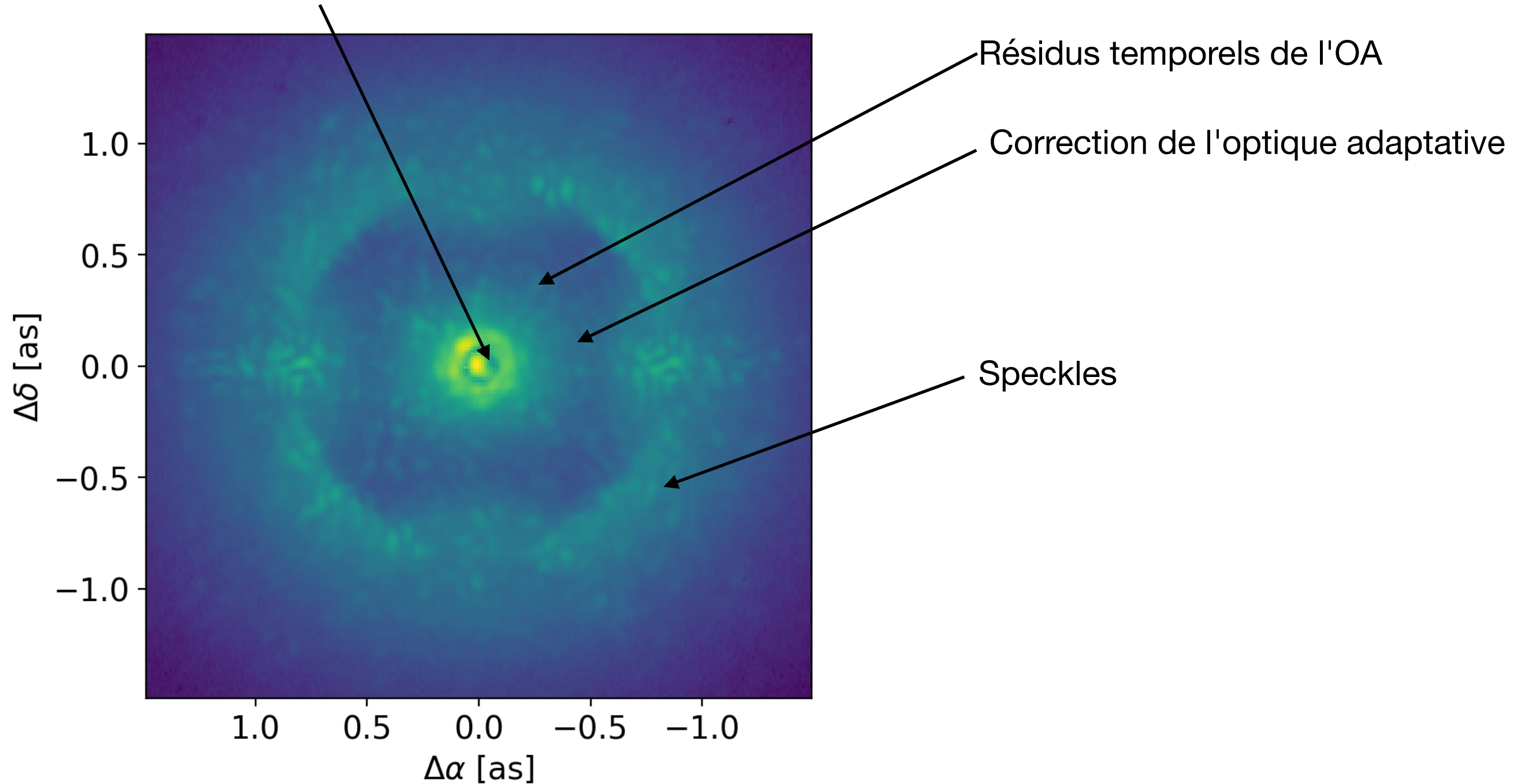
30 cm

vers luisant

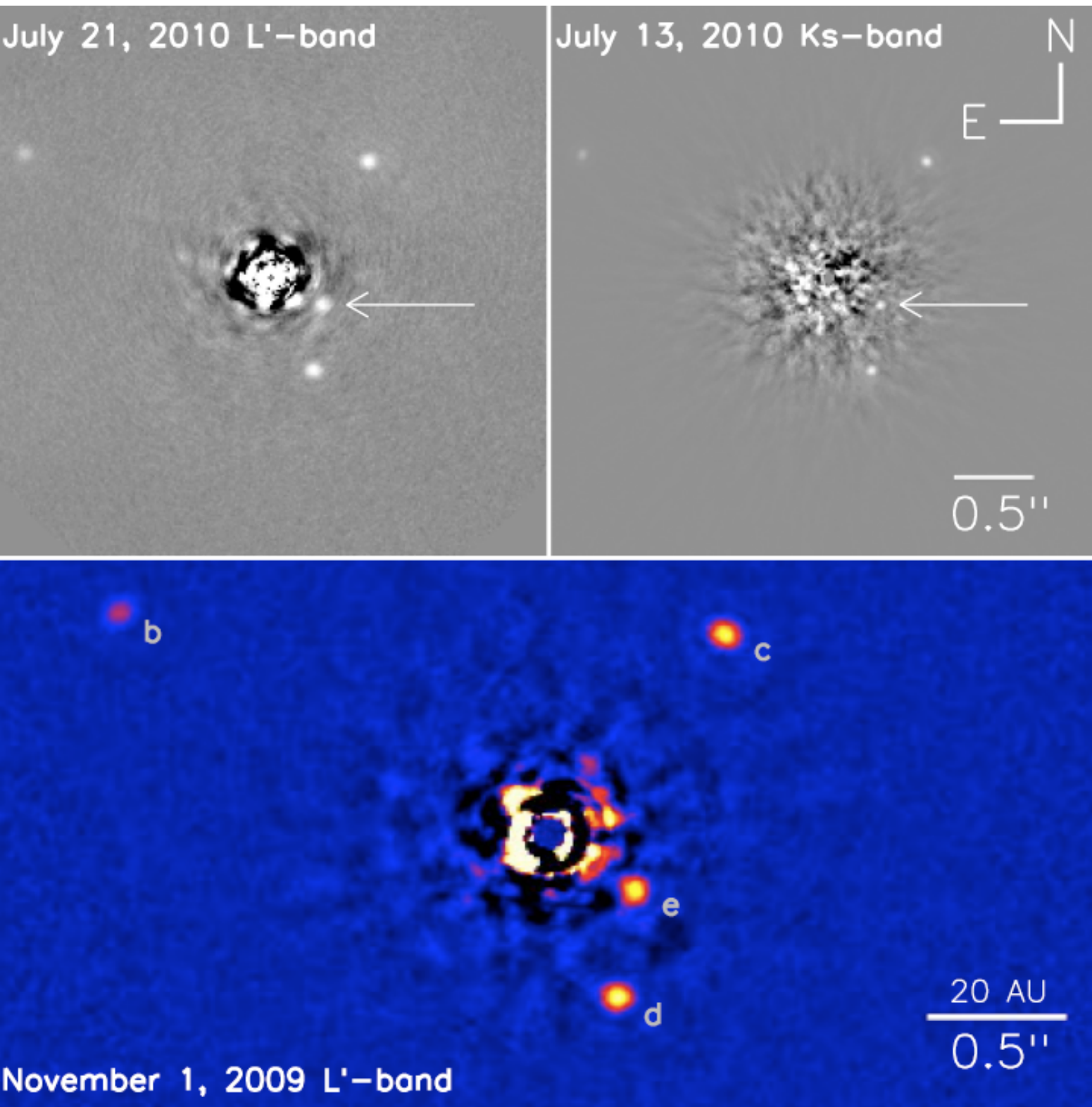
Une planète comme la Terre à 32 a.l. (308 567 milliards de km)

Imagerie à haut contraste

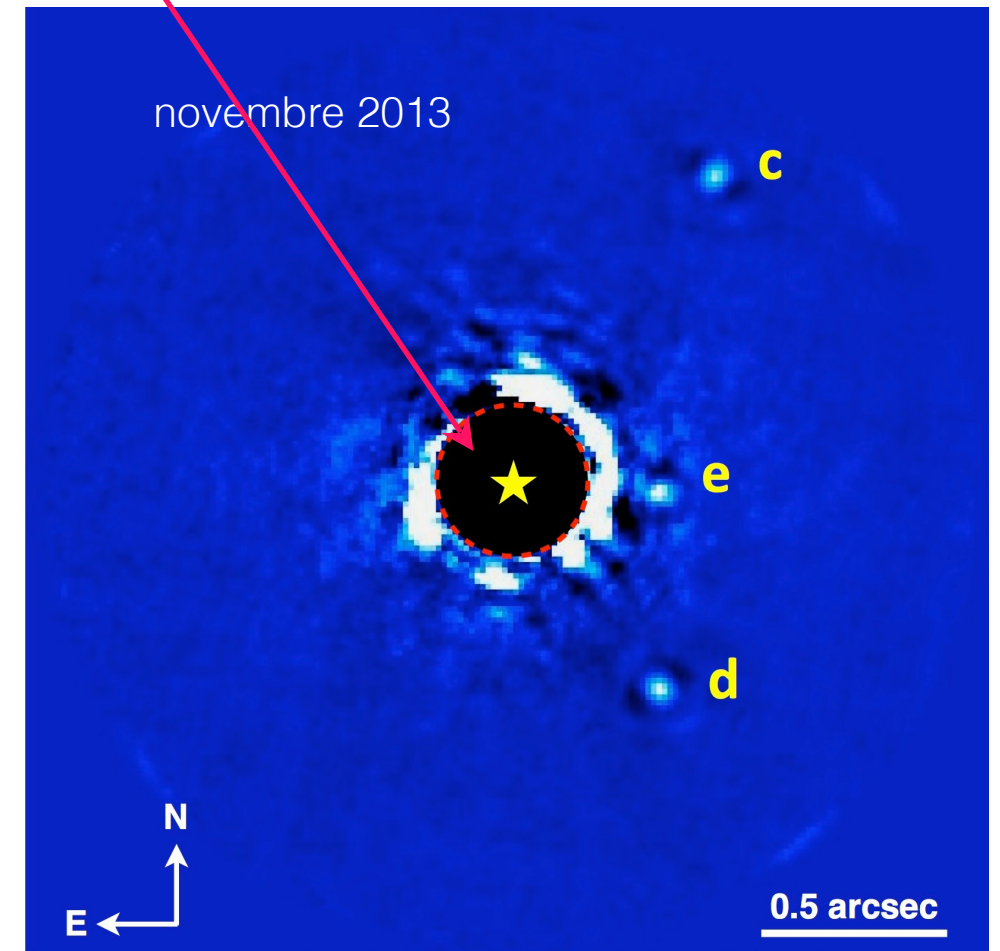
Masque coronagraphique opaque



Le système de HR 8799



étoile masquée



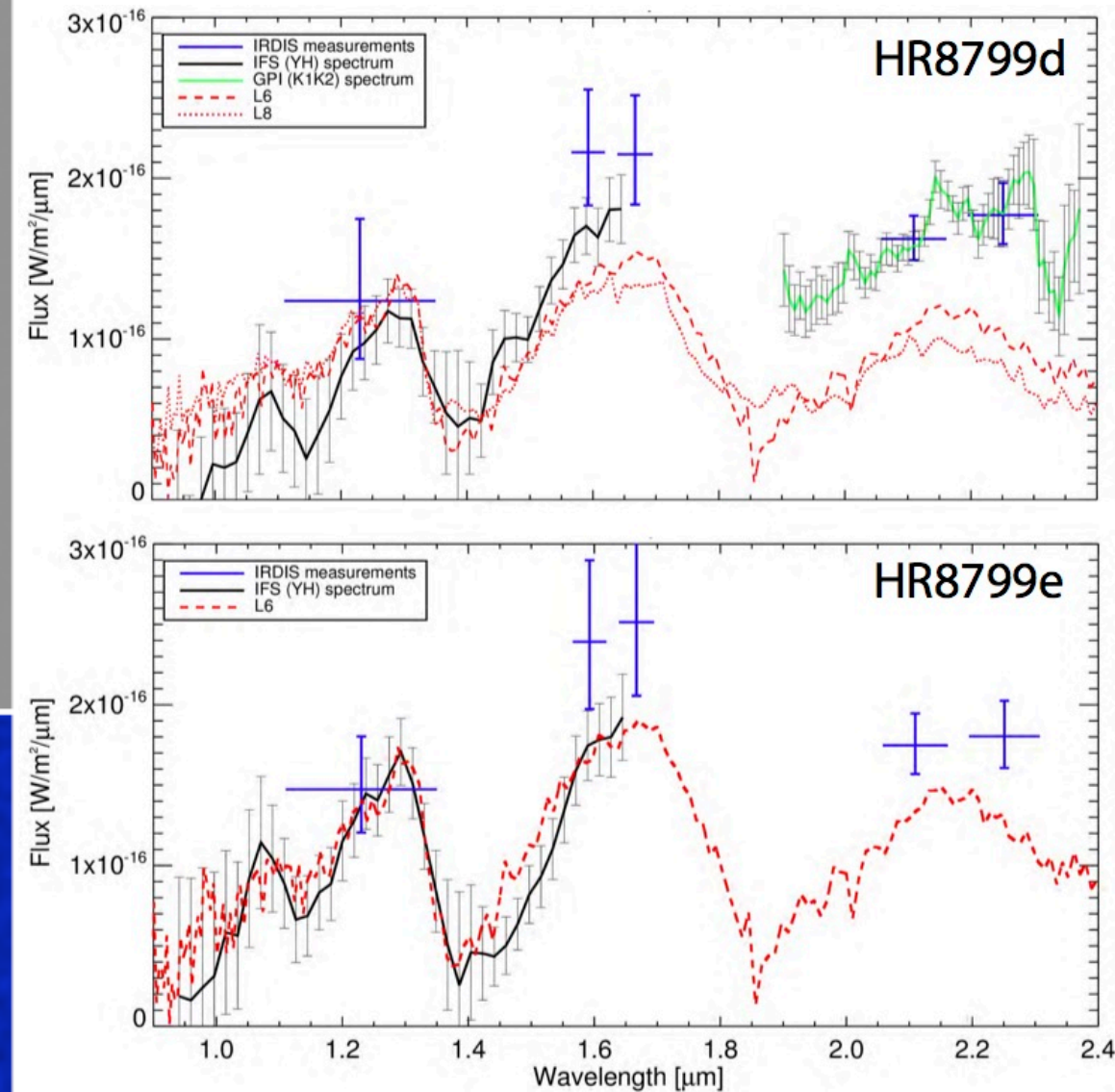
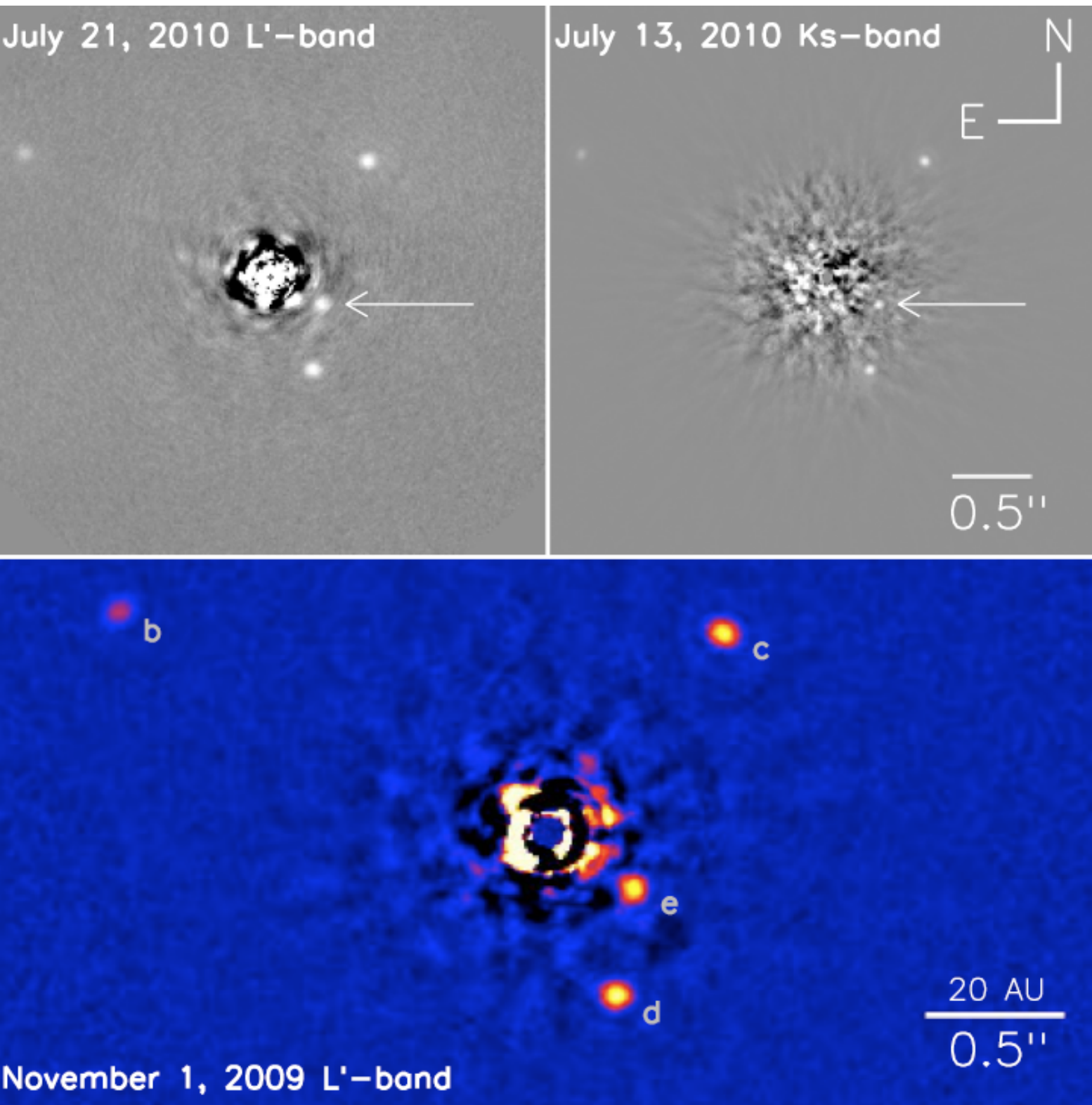
Marois et al. 2008, 2010

Système à 39.4 ± 1.0 pc

Etoile hôte: $1.5 M_{\odot}$ star

Planètes 5 à 13 fois la masse de Jupiter
distance: de ~ 15 à 68 ua

Le système de HR 8799

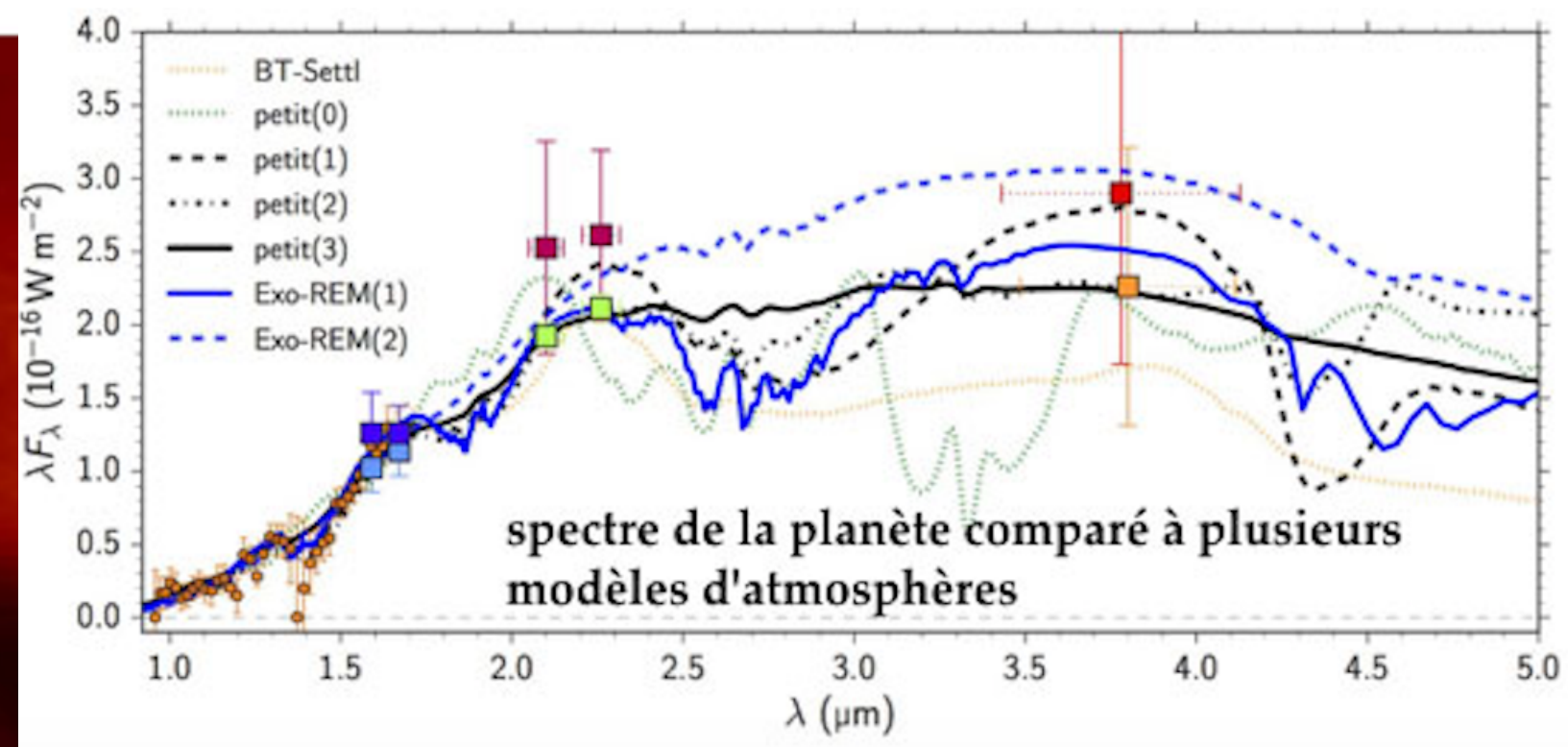
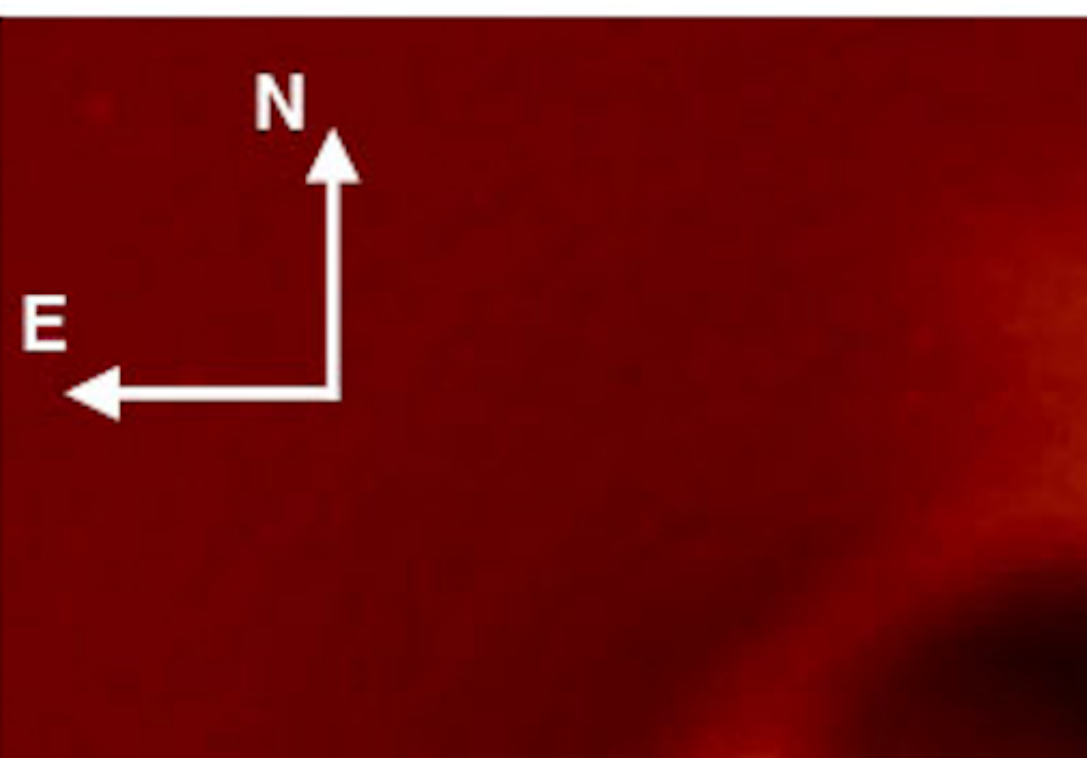


Zurlo et al., 2016; Bonnefoy et al., 2016

Système à 39.4 ± 1.0 pc

Etoile hôte: $1.5 M_{\odot}$ star

Planètes 5 à 13 fois la masse de Jupiter
distance: de ~15 à 68 ua



Keppler et al. 2018;
Müller et al., 2018

22 AU - $P_{\text{orb}} = 120$ ans

5 à 10 fois la masse de Jupiter

Comparaison d'images en 2015, 2016 et 2018
+ archives sur d'autres instruments

planète PDS70b

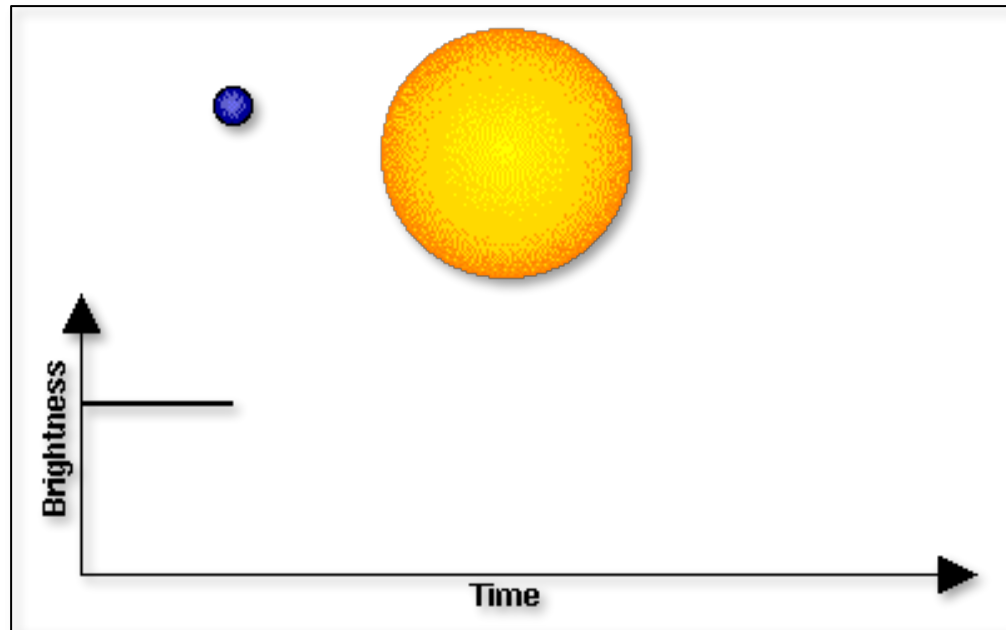
cavité

image de PDS70 obtenue par
SPHERE en Février 2018



Autres méthodes de détection

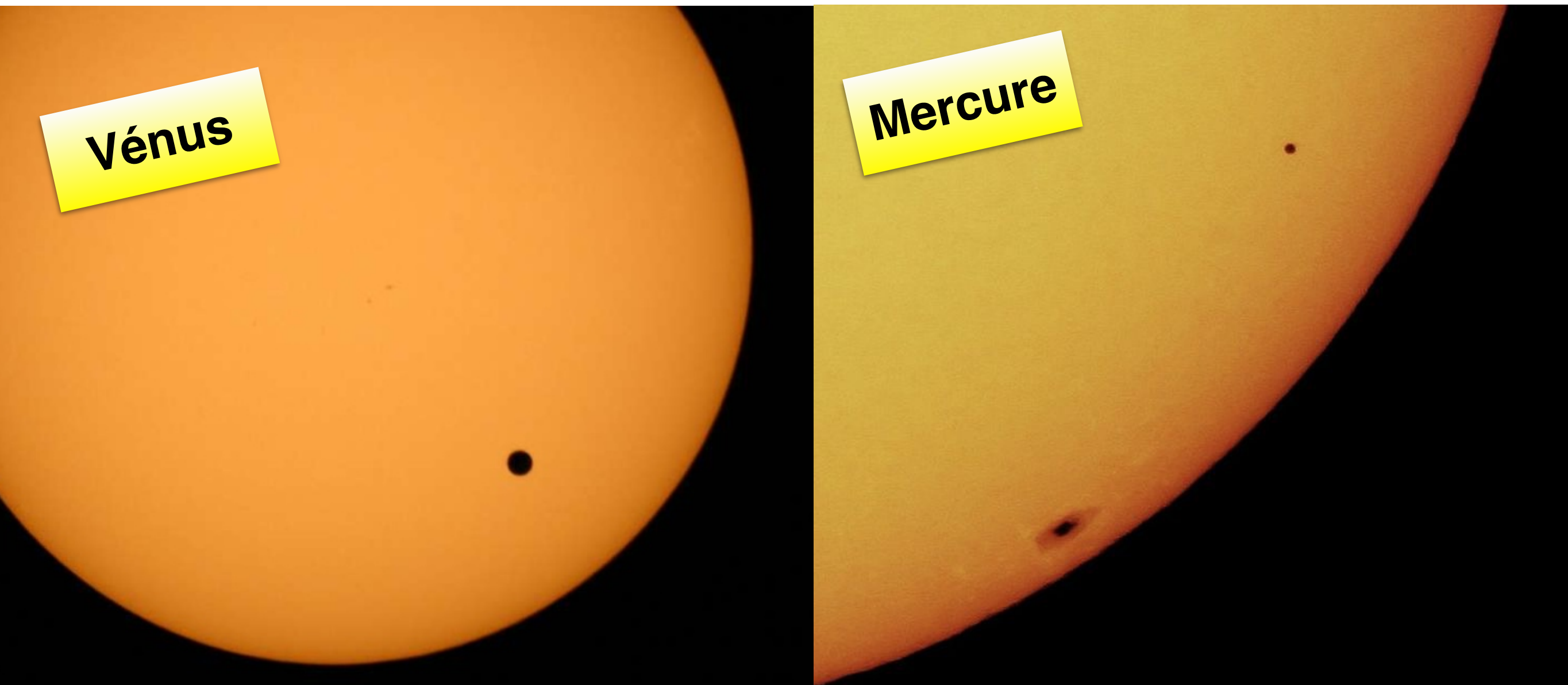
Transits



$$\frac{\Delta F}{F} = \left(\frac{R_p}{R_*} \right)^2$$

Transits dans le système solaire

Variations de luminosité très faibles $\sim 1/100$ à $\sim 1/10000$
1 révolution orbitale = 1 transit

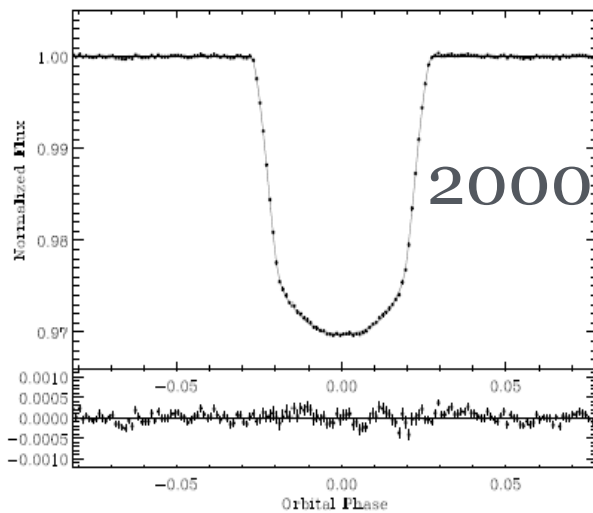




Combiner les méthodes

$$\frac{\Delta F}{F} = \left(\frac{R_p}{R_*} \right)^2$$

$$k = \frac{28.4 \text{ ms}^{-1}}{\sqrt{1-e^2}} \frac{m_p \sin i}{M_{Jup}} \left(\frac{P}{1 \text{ yr}} \right)^{-1/3} \left(\frac{m_*}{1 M_\odot} \right)^{-2/3}$$

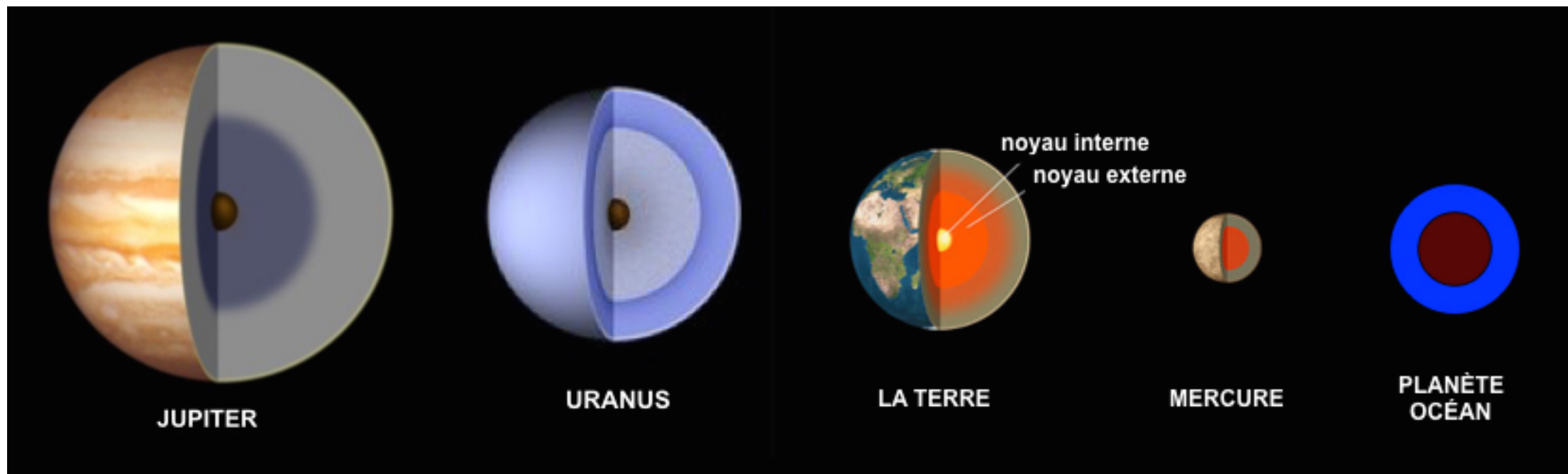
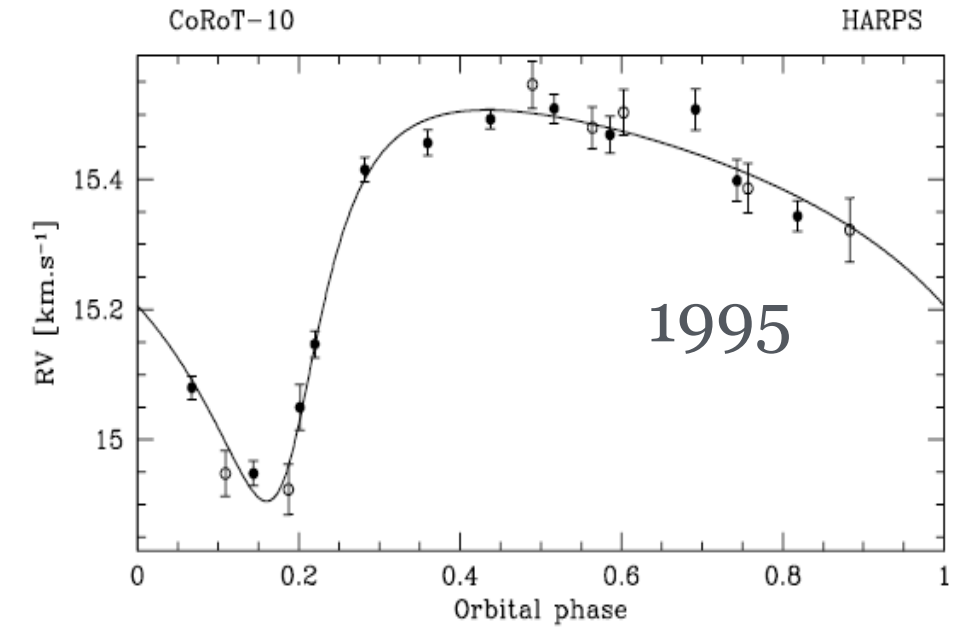


Transits & radial velocity:

$$R_p + M_p \rightarrow \rho_p$$

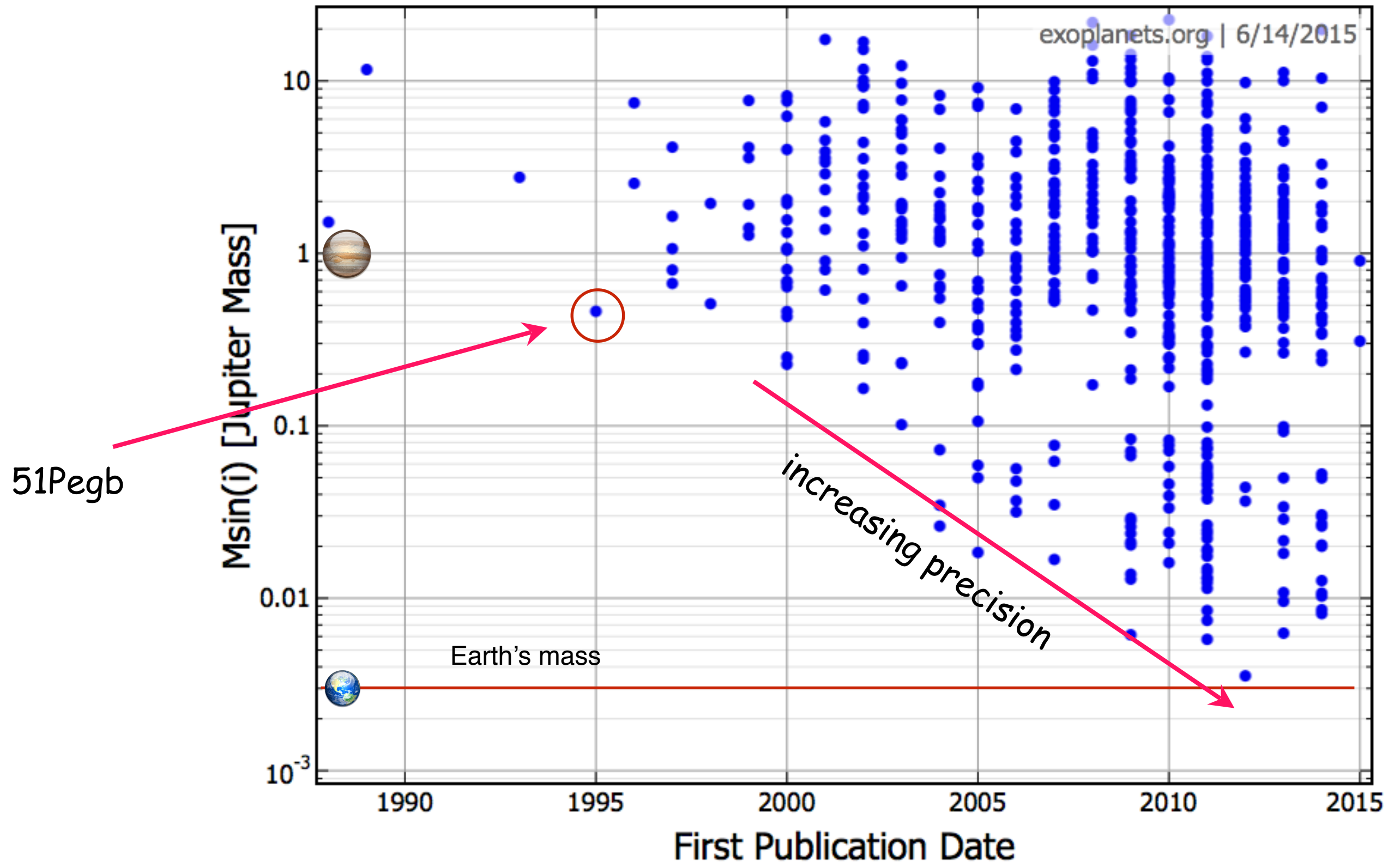
orbital parameters :
period, eccentricity, inclination

..





Vitesse radiales - performances





Exemple: HD20003

184 mesures
13 ans d'observations

11.8496 days

$K=3.82$ m/s

$11.48 M_{\oplus}$

$e=0.38$

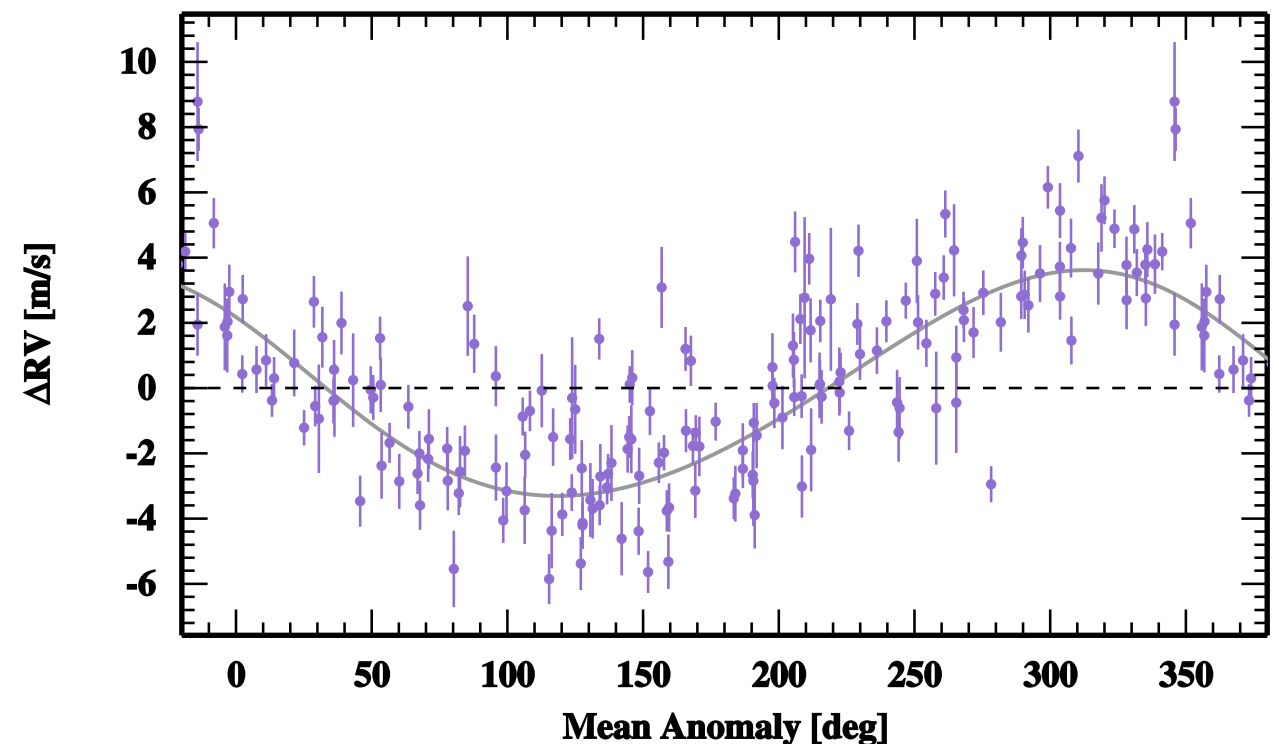
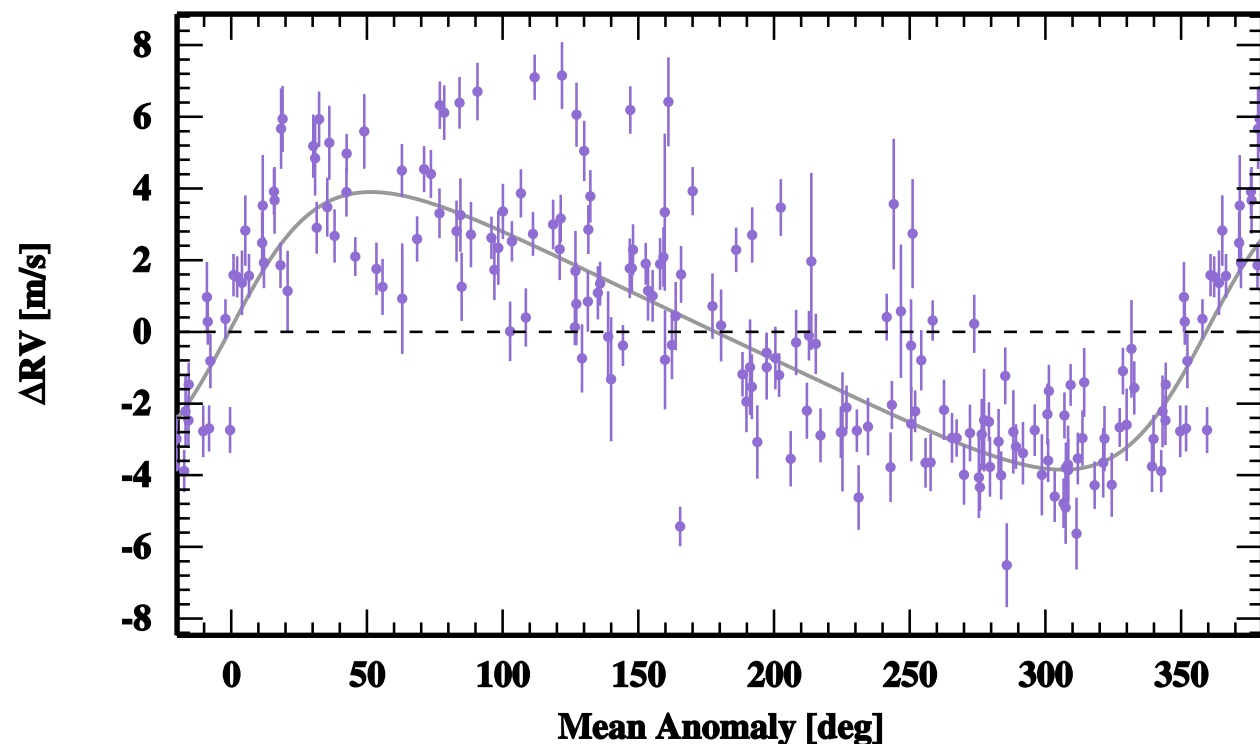
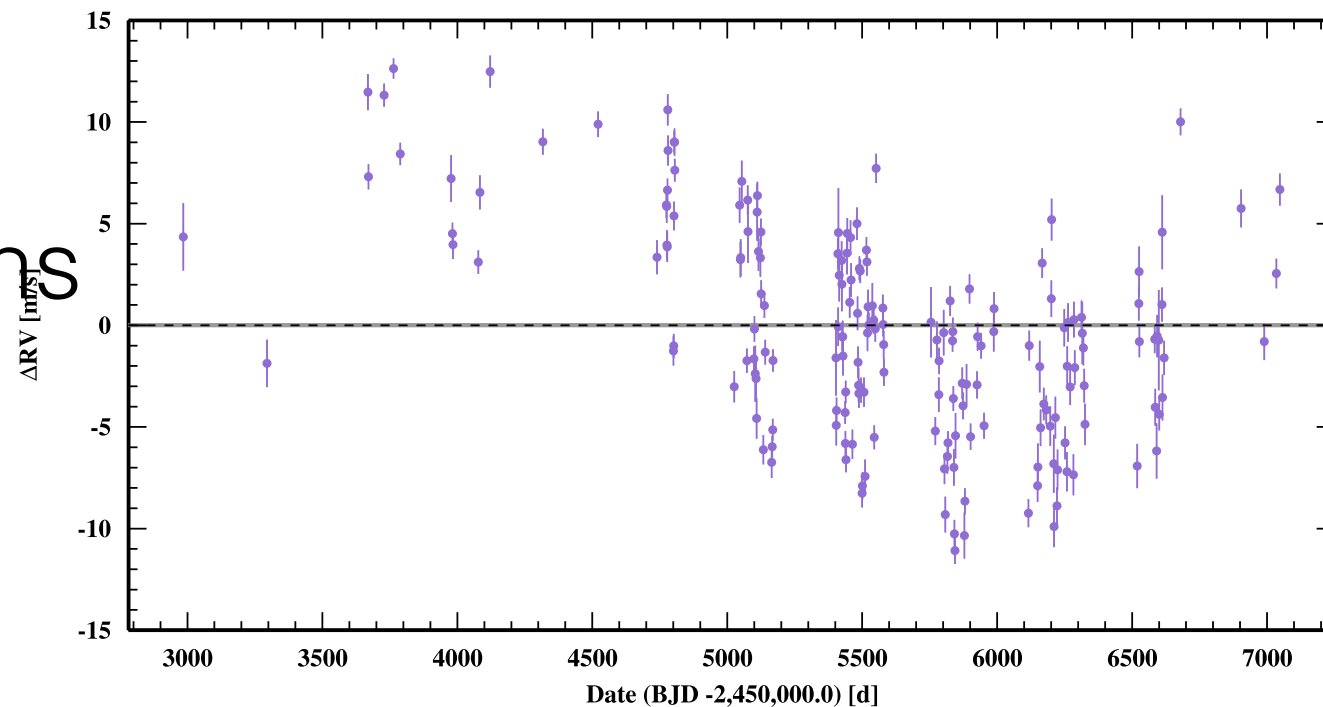
Udry et al., subm.

33.8994 days

$K=3.19$ m/s

$14.68 M_{\oplus}$

$e=0.06$



2 planètes de type Neptune à courte période orbitale proches de la
résonnance 3:1

Recherche depuis l'espace

CoRoT: Mission du **CNES**

Programme Scientifique :

- structure interne des étoiles - astérosismologie
- recherche de planètes - transits
- physique stellaire

Opérations: 01/2007 - 10/2012

FOV $\sim 4^\circ$ (la moitié après 2009)

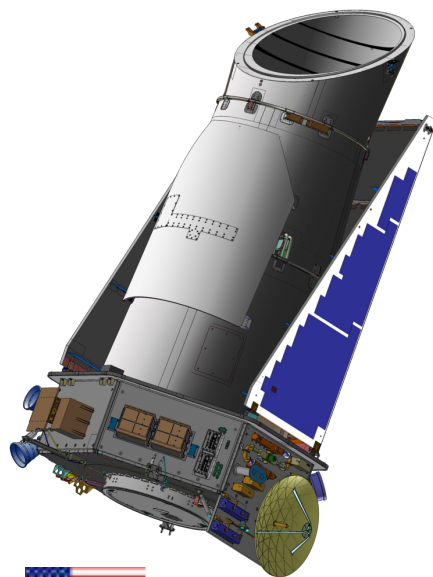
$11.5 \leq r\text{-mag} \leq 16$.

Précision photométrique 700 ppm/hr

26 champs stellaires observés - 21 jours à 150 jours

169 967 courbes de lumière

échantillonnage temporel : 512 sec ou 32 sec



Kepler/K2 : mission NASA

Objectif scientifique : détecter des analogues à la Terre

Opérations: 03/2009 - 05/2013

FOV $\sim 105^\circ$

$9 \leq Kp\text{-mag} \leq 15$

Précision photométrique: 80 ppm/hr

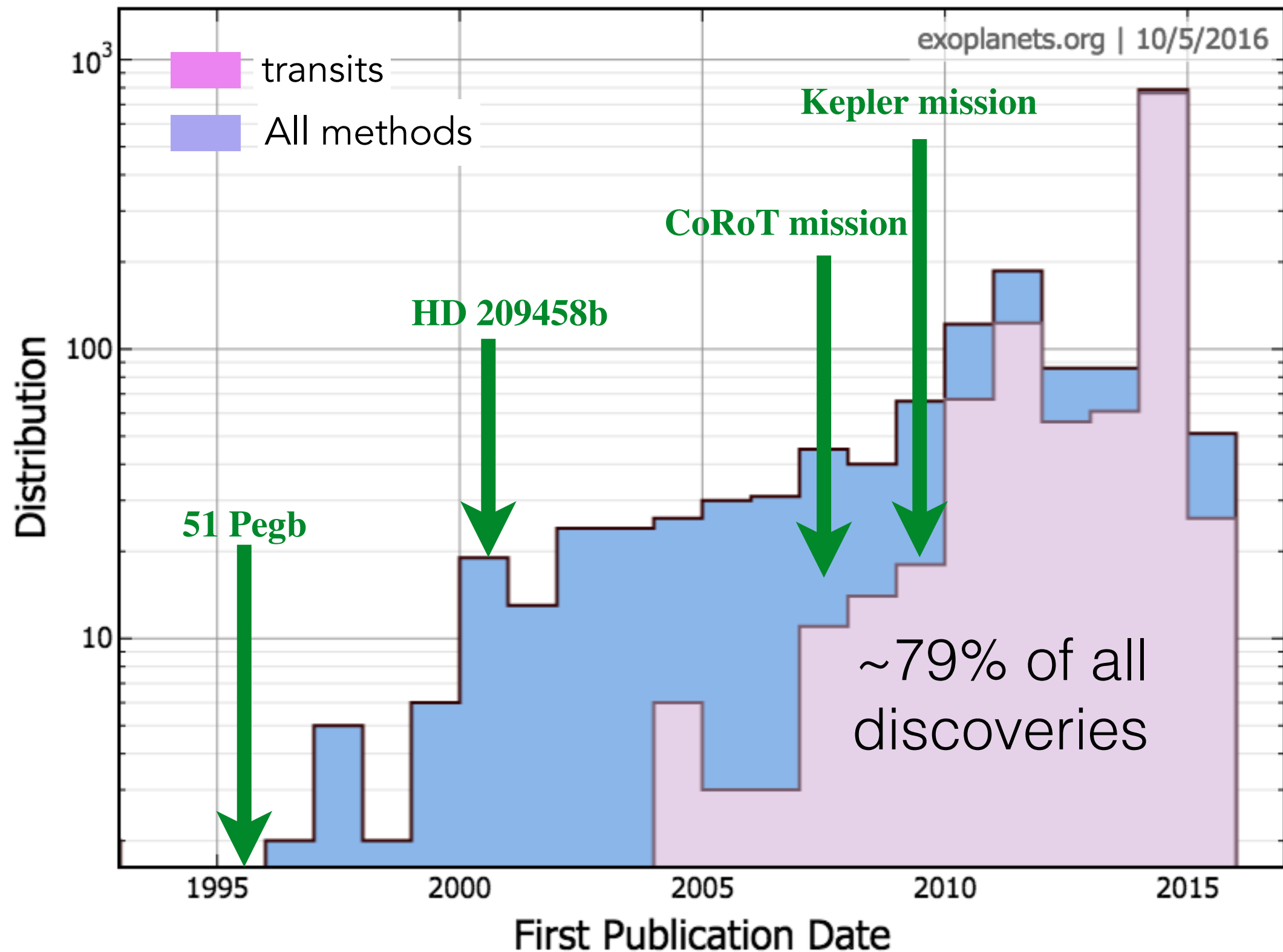
1 seul champ stellaire observé

160 000 courbes de lumière

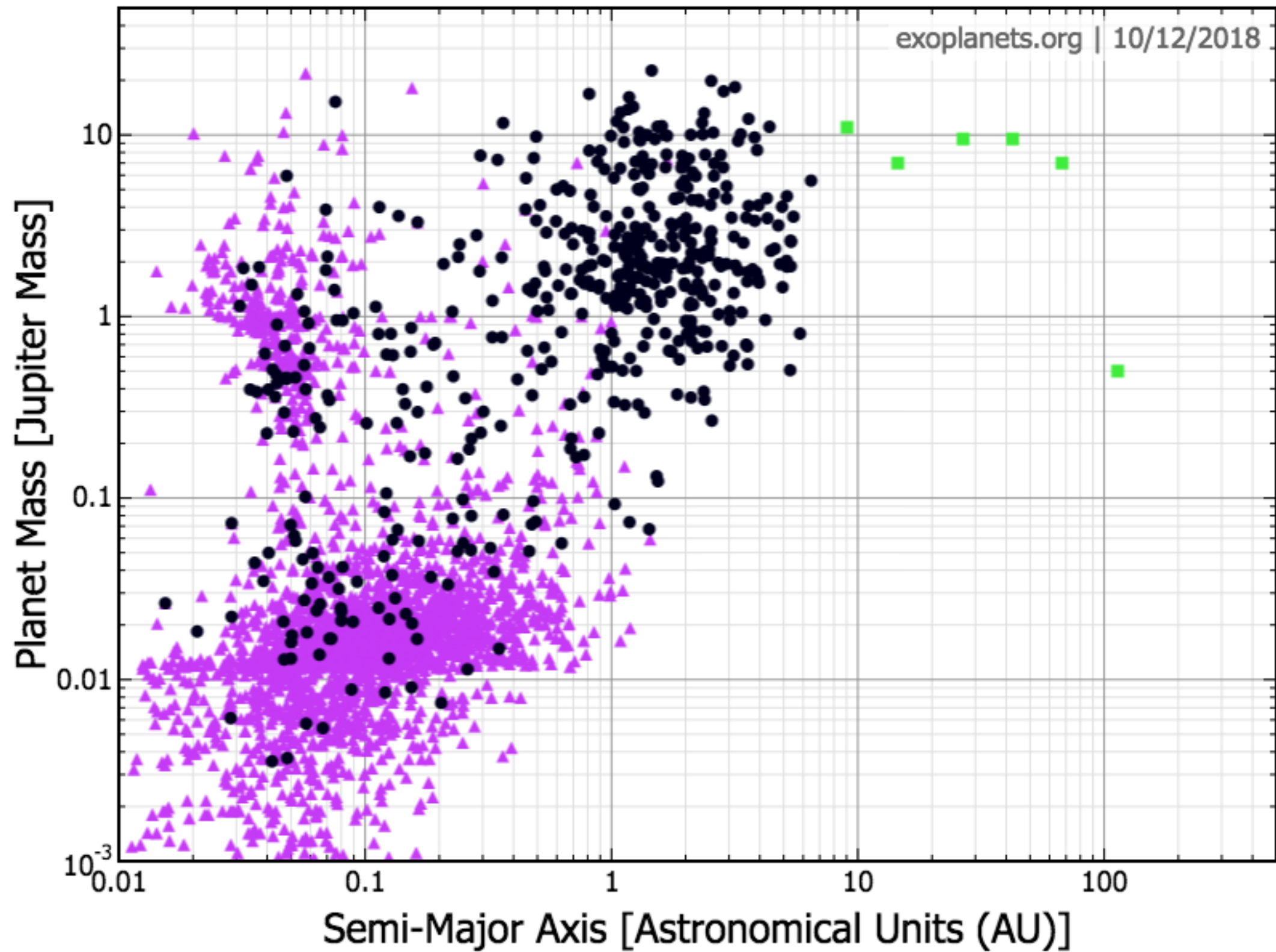
échantillonnage temporel: 30 min ou 1 min



Nombre de détections



Etat des lieux



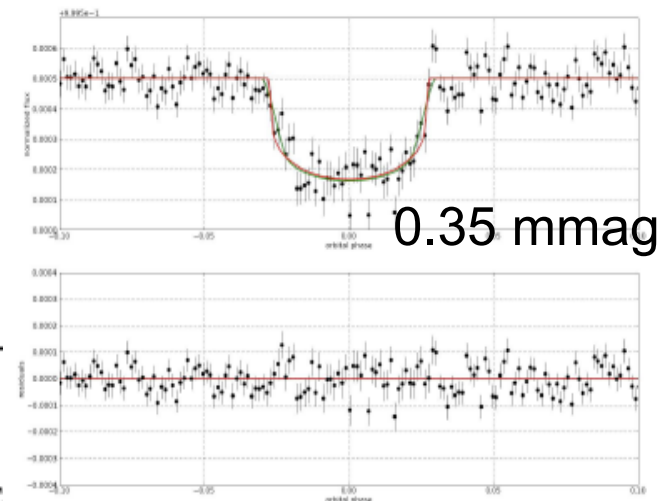
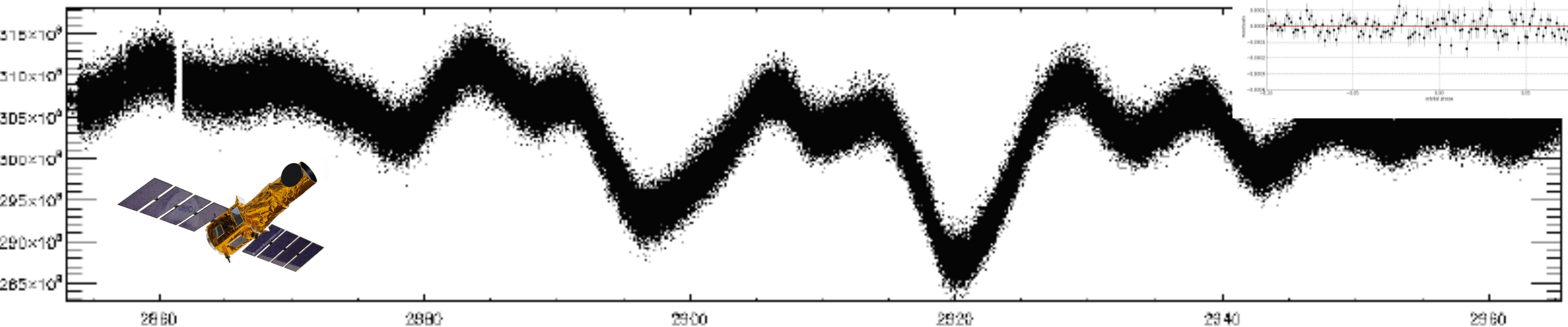


CoRoT-7b première super Terre

CoRoT-7 :

KoV

$[Fe/H] = 0.12 \pm 0.06$



Léger, Rouan, Schneider et al., 2009

Queloz et al., 2009

Hatzes et al., 2010

Bruntt et al., 2010

Lanza et al., 2010

Pont et al., 2010

Boisse et al., 2011

Hatzes et al., 2011

Ferraz-Mello et al. 2011

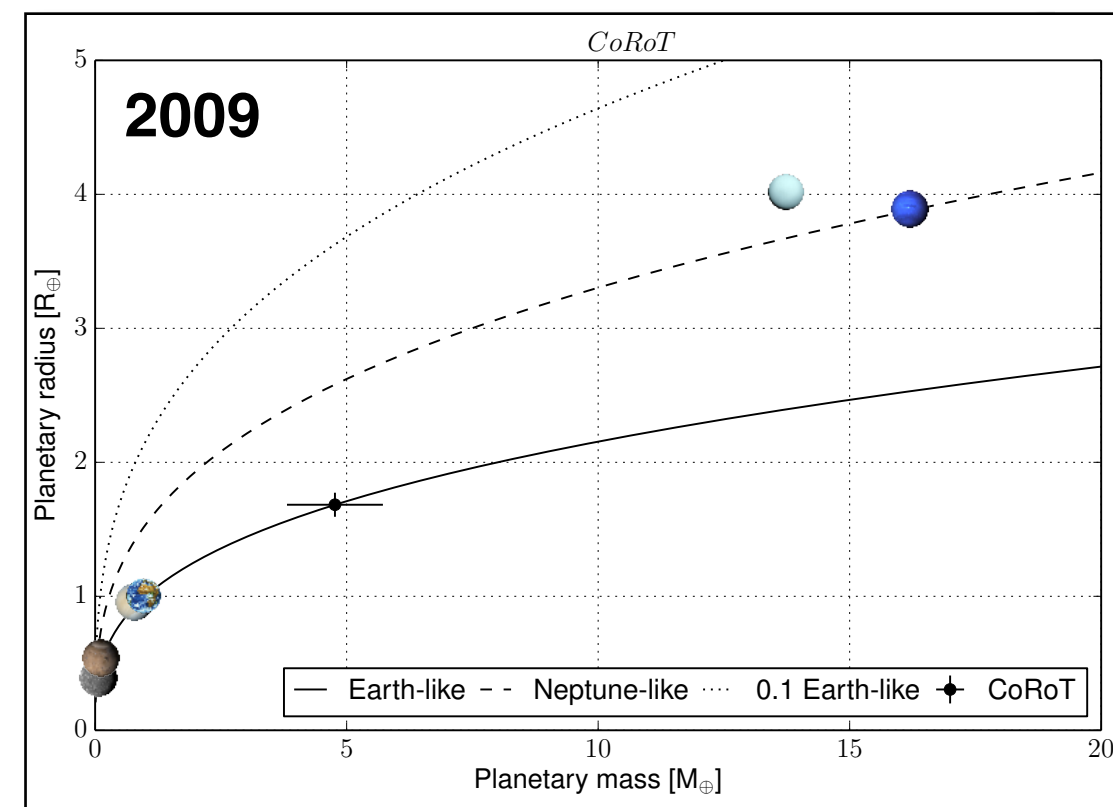
Haywood et al., 2014

Barros et al., 2014

$$R_p = 1.585 \pm 0.064 R_{\oplus},$$

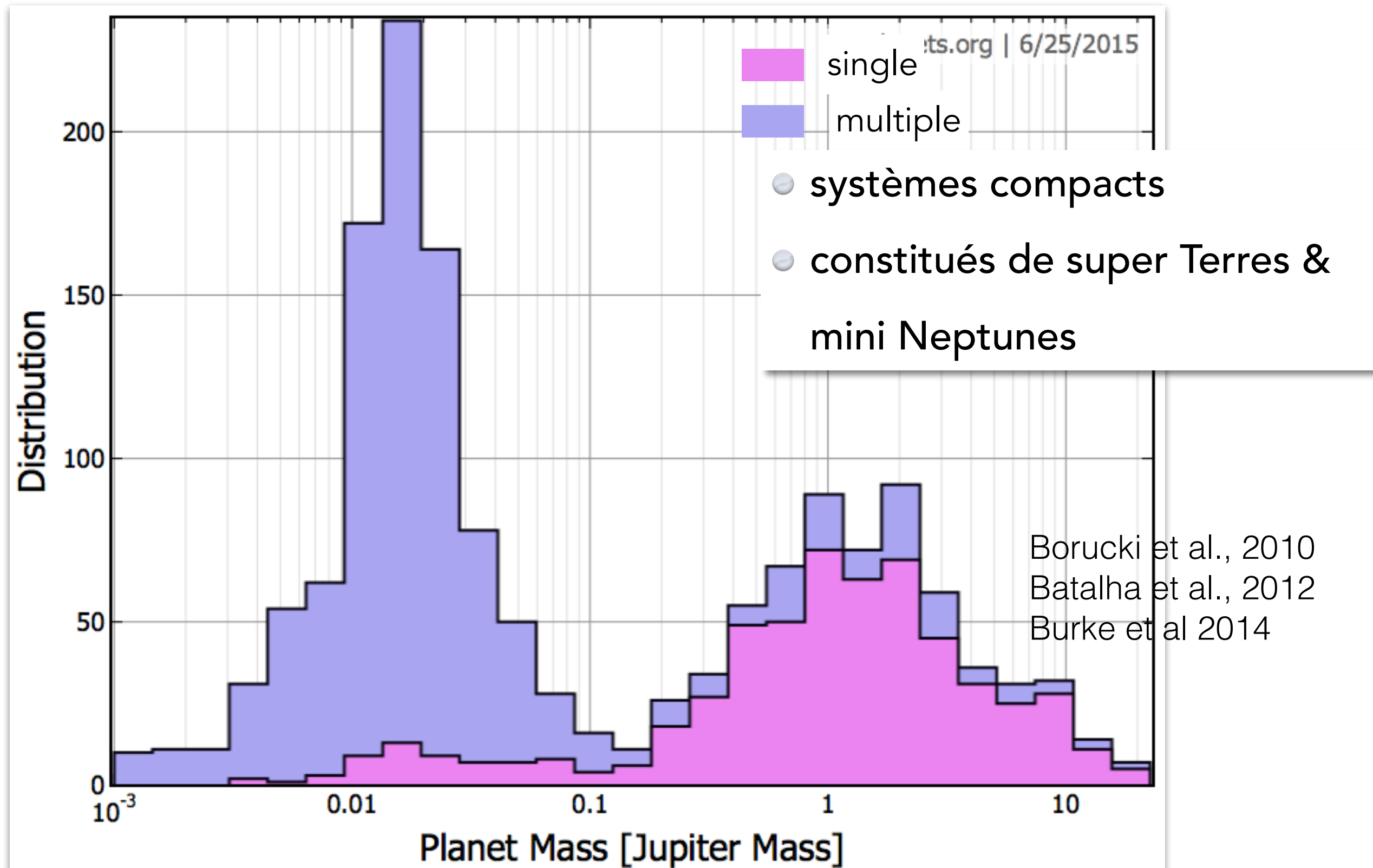
$$M_p = 4.73 \pm 0.95 M_{\oplus}$$

$$\text{Période} = 0.85365 \text{ jours}$$



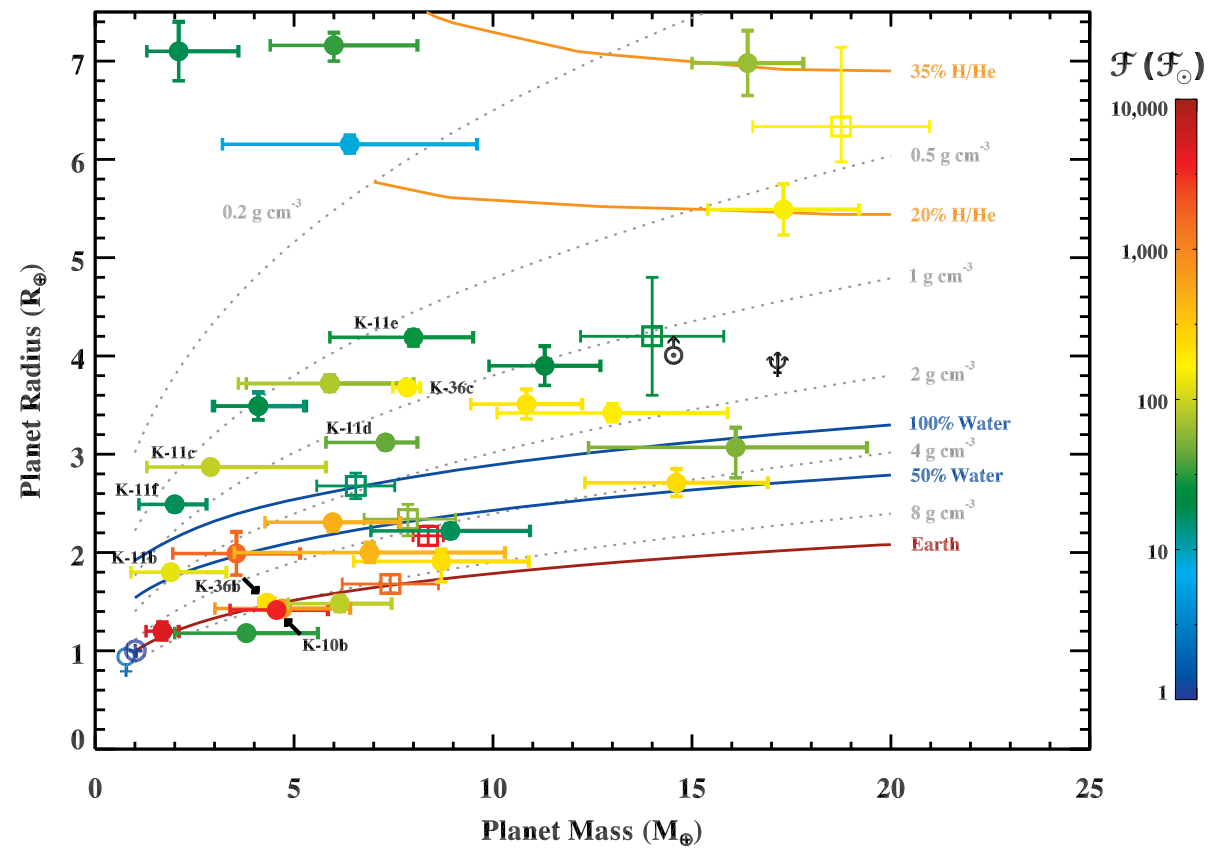


Systèmes de petites planètes



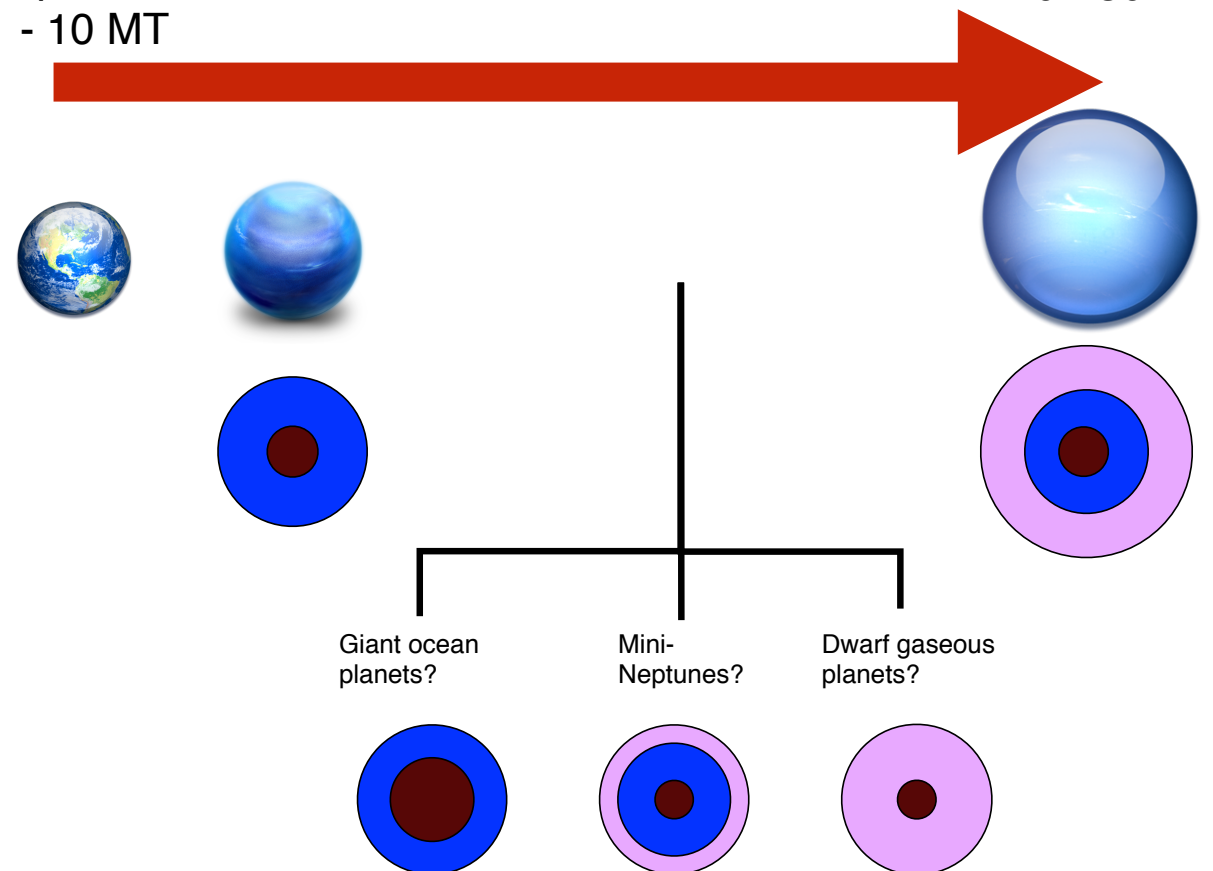


Petites planètes: diversité



Super-Earths:
1 - 10 MT

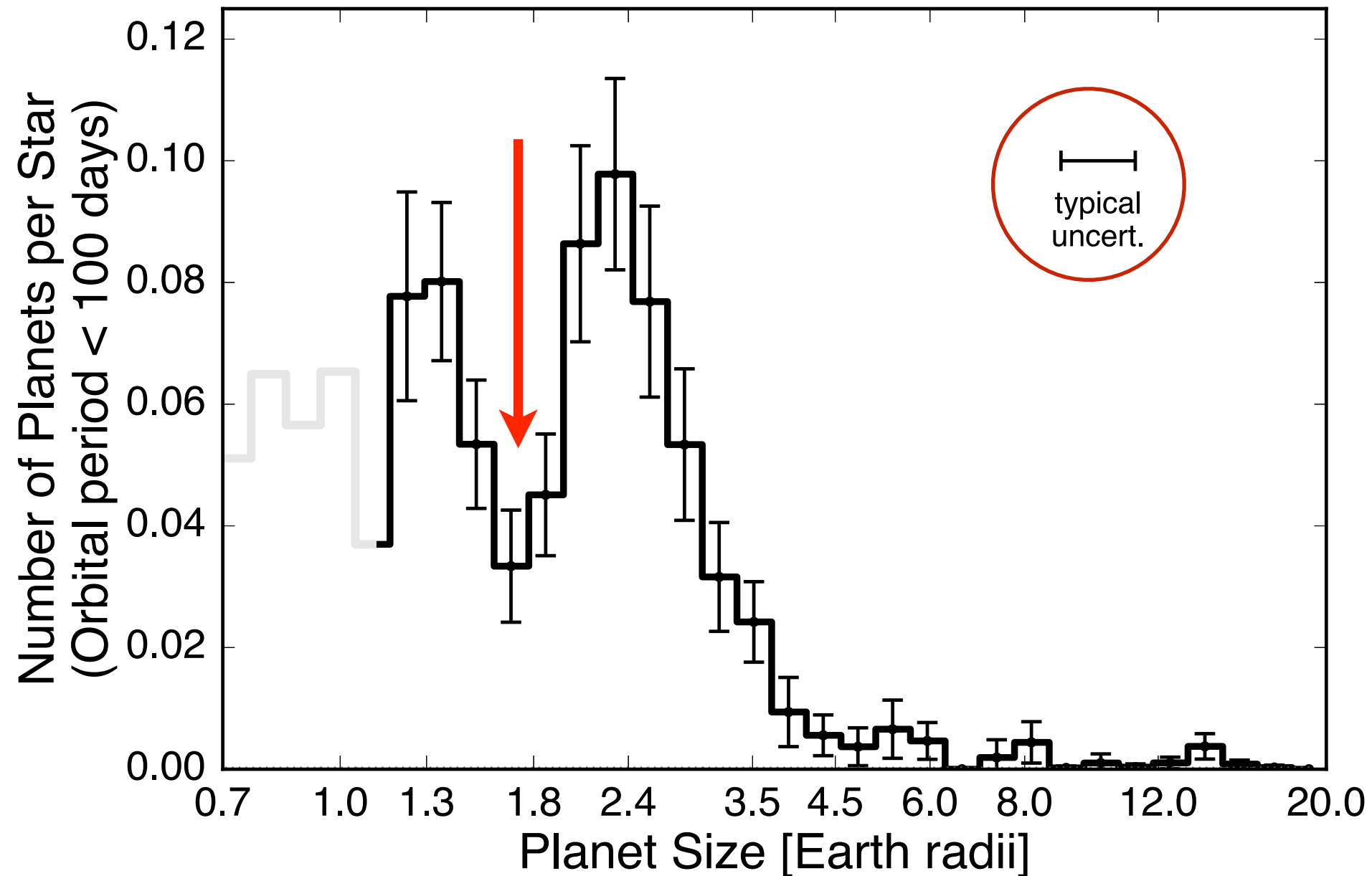
Neptunes:
10 - 30 MT





Petites planètes: populations

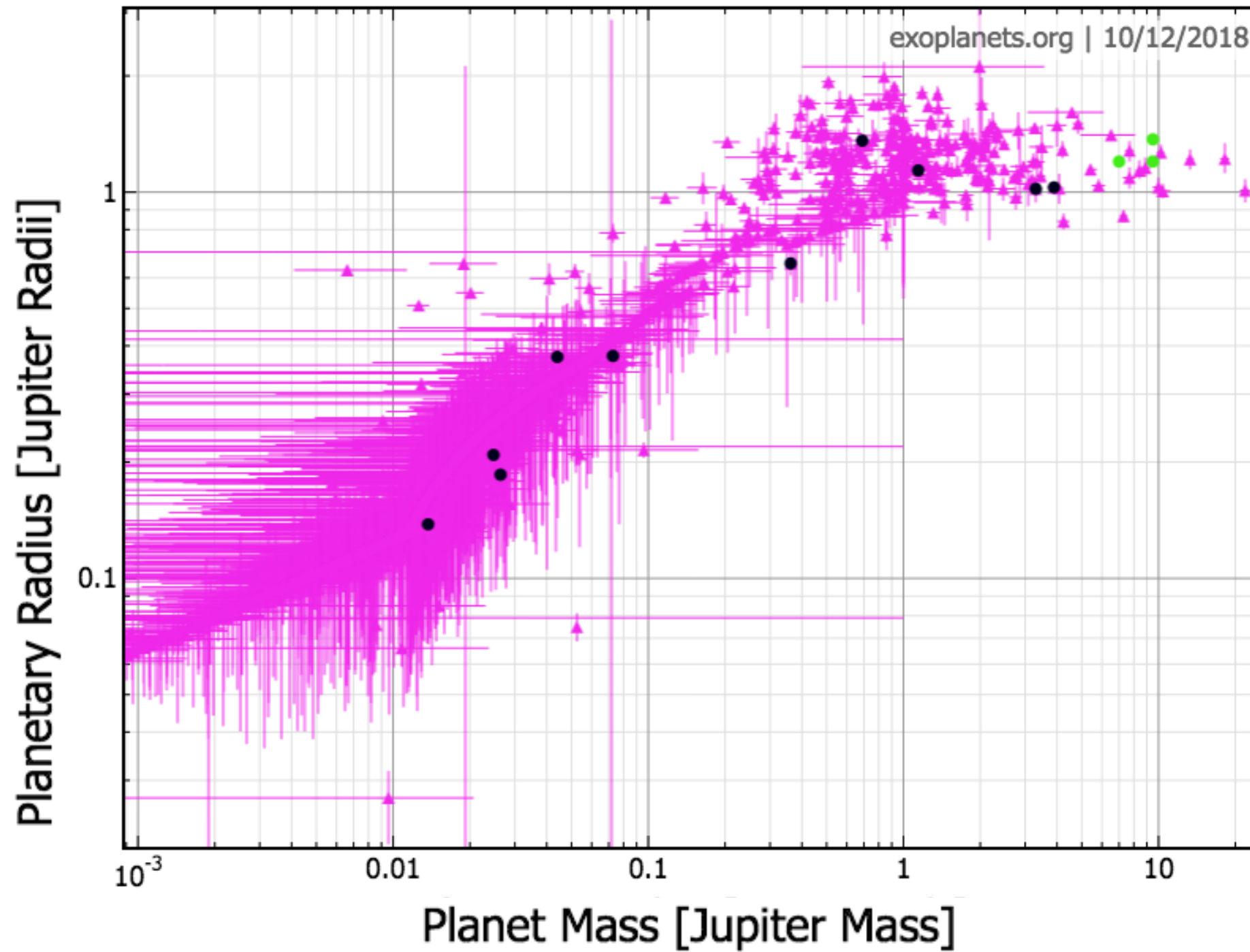
$P_{\text{orb}} < 100$ jours



Fulton et al., 2017

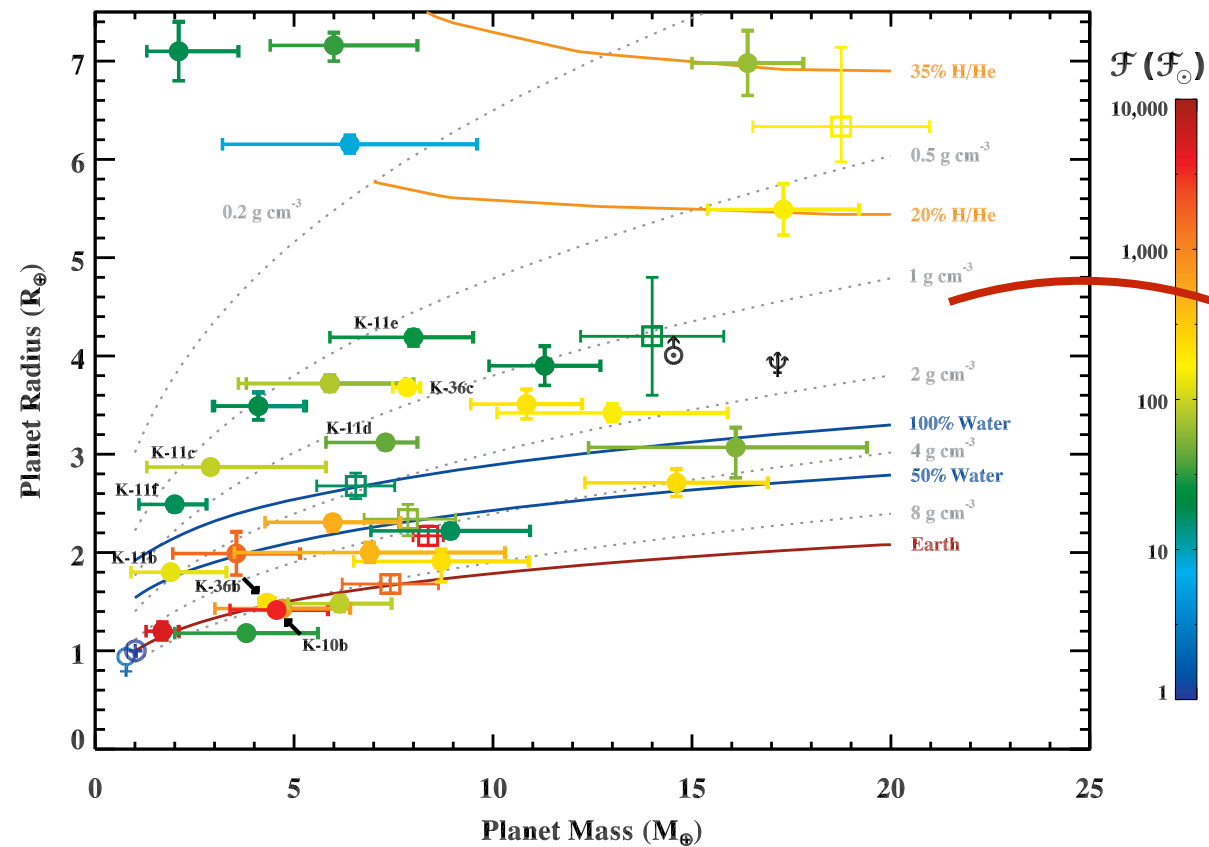


Petites planètes: limitations

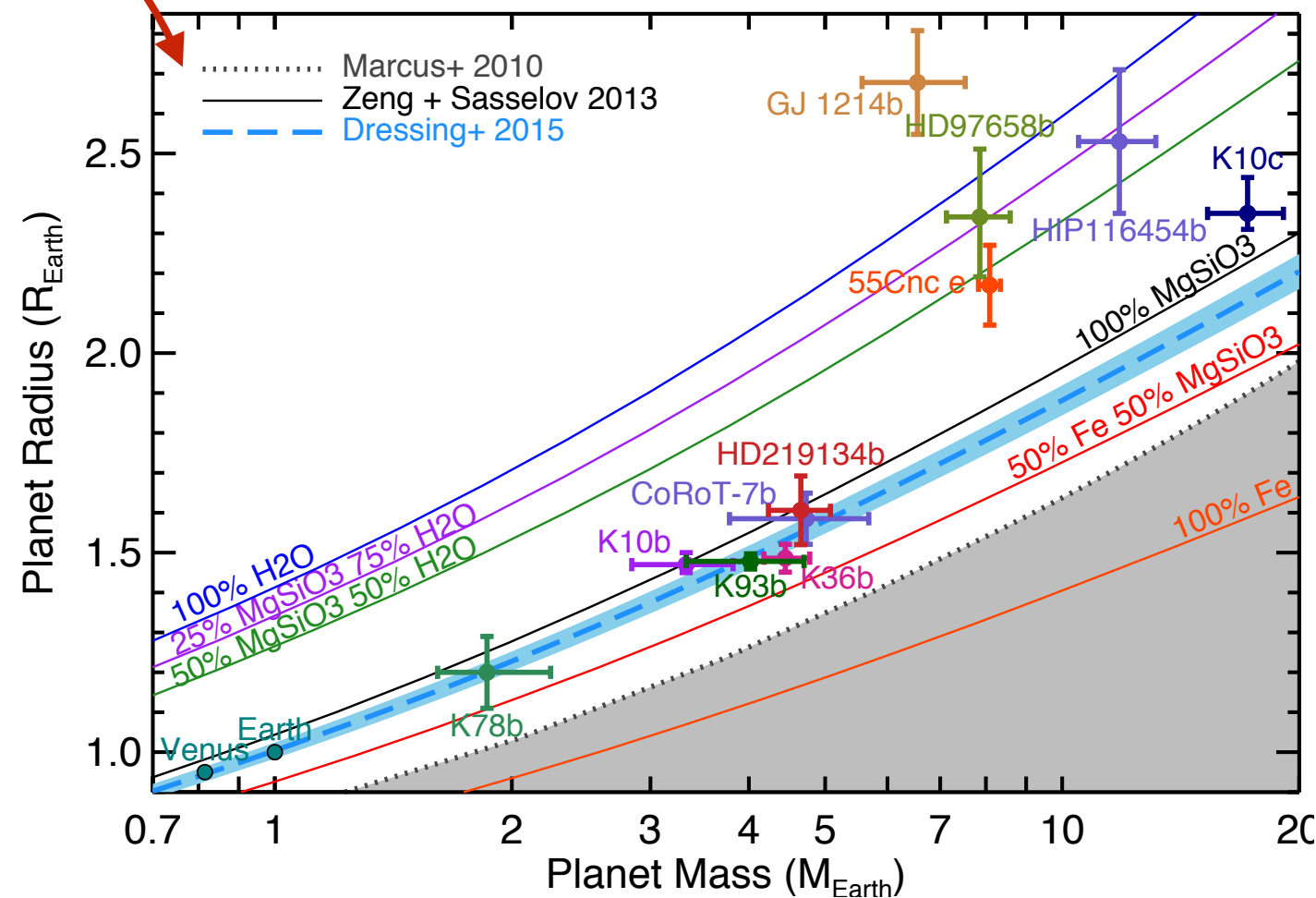




Petites planètes: limitations



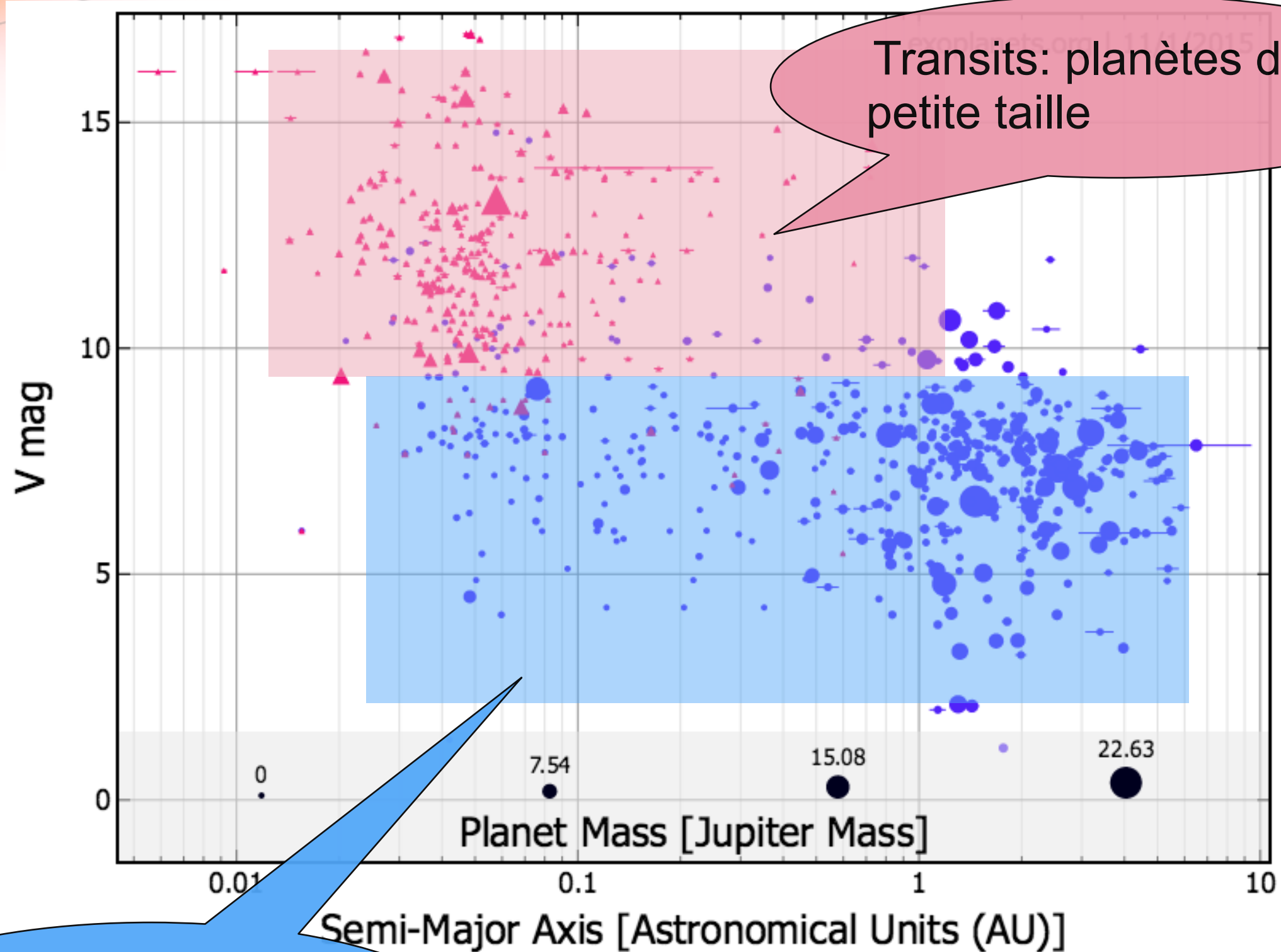
masses mesurées avec une
précision $> 20 \%$



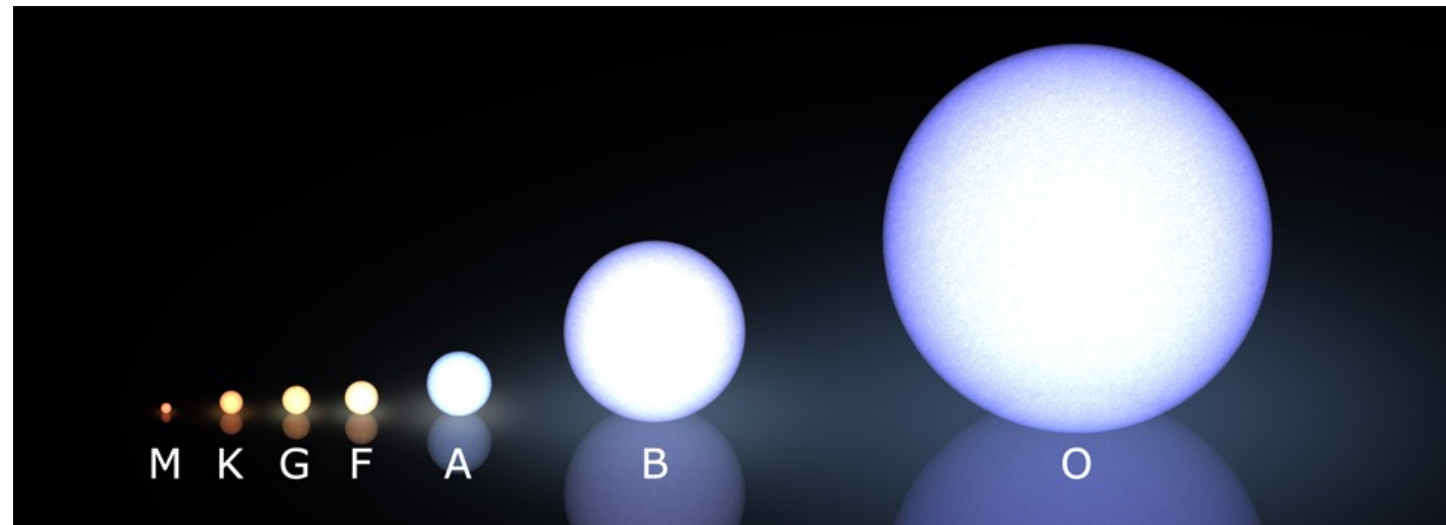
Batalha et al., 2010
Pepe et al., 2013
Howard et al, 2013
Marcy et al. 2014

Dumusque et al., 2014
Dressing et al., 2015;
Motalebi et al., 2015

Difficulté 1: la magnitude



Difficulté 2: l'étoile



Caractériser les exoplanètes ...

- Masse + rayon → densité moyenne
gaseuse vs rocheuse, structure interne
- Composition → formation
- Propriété de l'atmosphère
habitabilité
- Age → évolution

excellente connaissance
de l'étoile requise !

⇐ masse et rayon de l'étoile

⇐ composition de l'étoile

⇐ propriétés de l'étoile, insolation

⇐ age de l'étoile

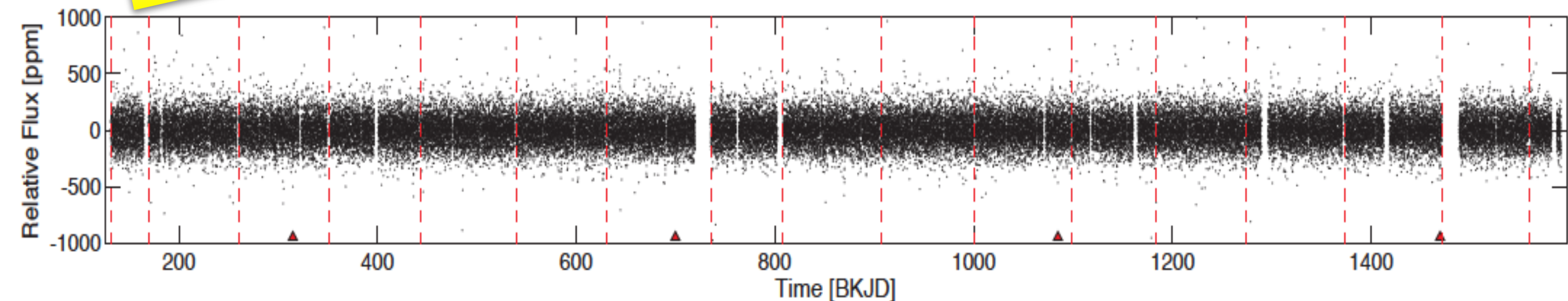
→ évolution des systèmes planétaires



Super Terre à grande période orbitale

Type spectral G2
Période orbitale ~ 385 jours

Jenkins et al 2015



Kepler-452b :

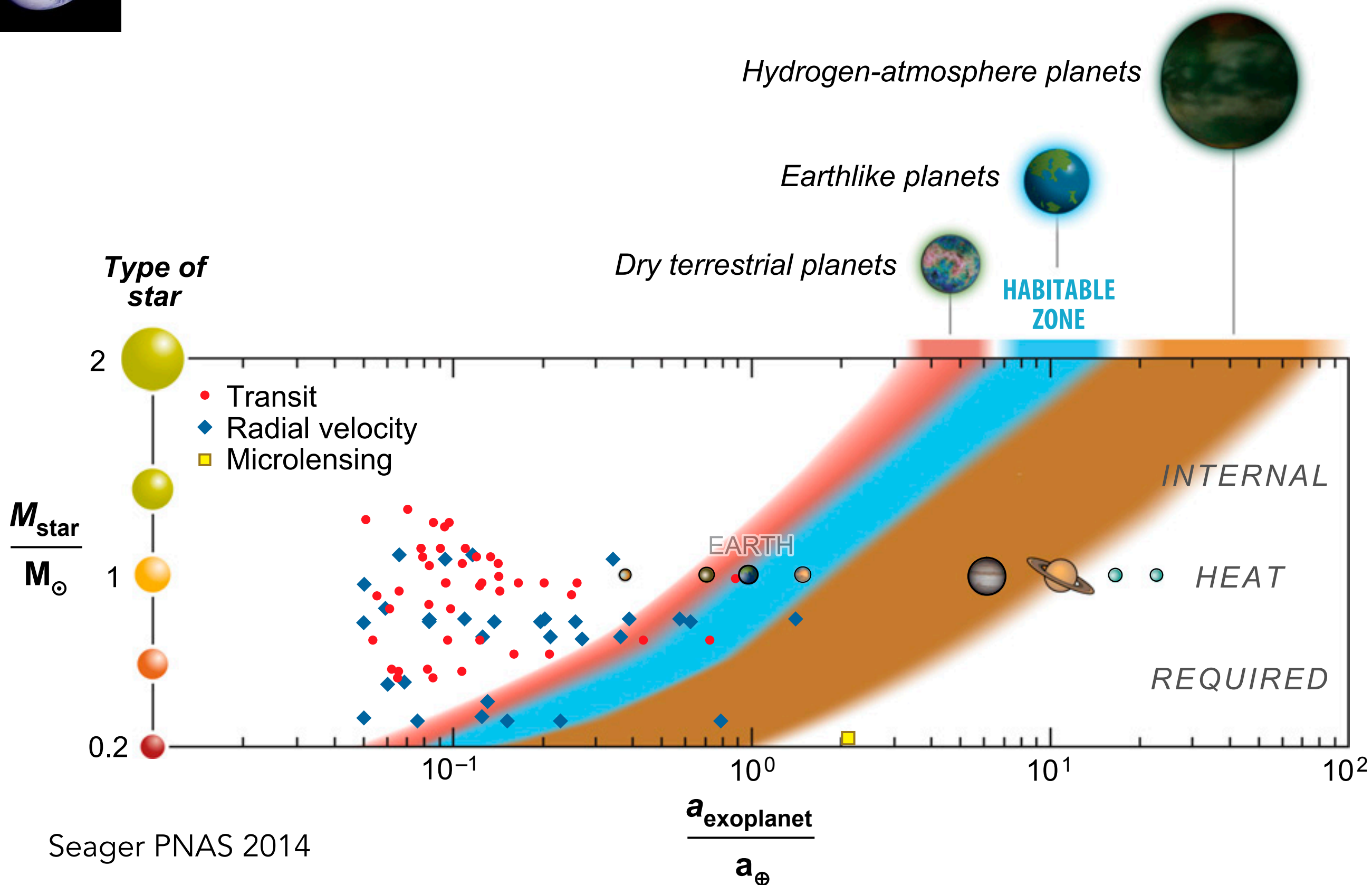
$R_p \sim 1.6 R_{\oplus}$

Masse ???

Conditions de surface???



Zone Habitable



Seager PNAS 2014

Critère de base: insolation



Valeurs de η -Earth

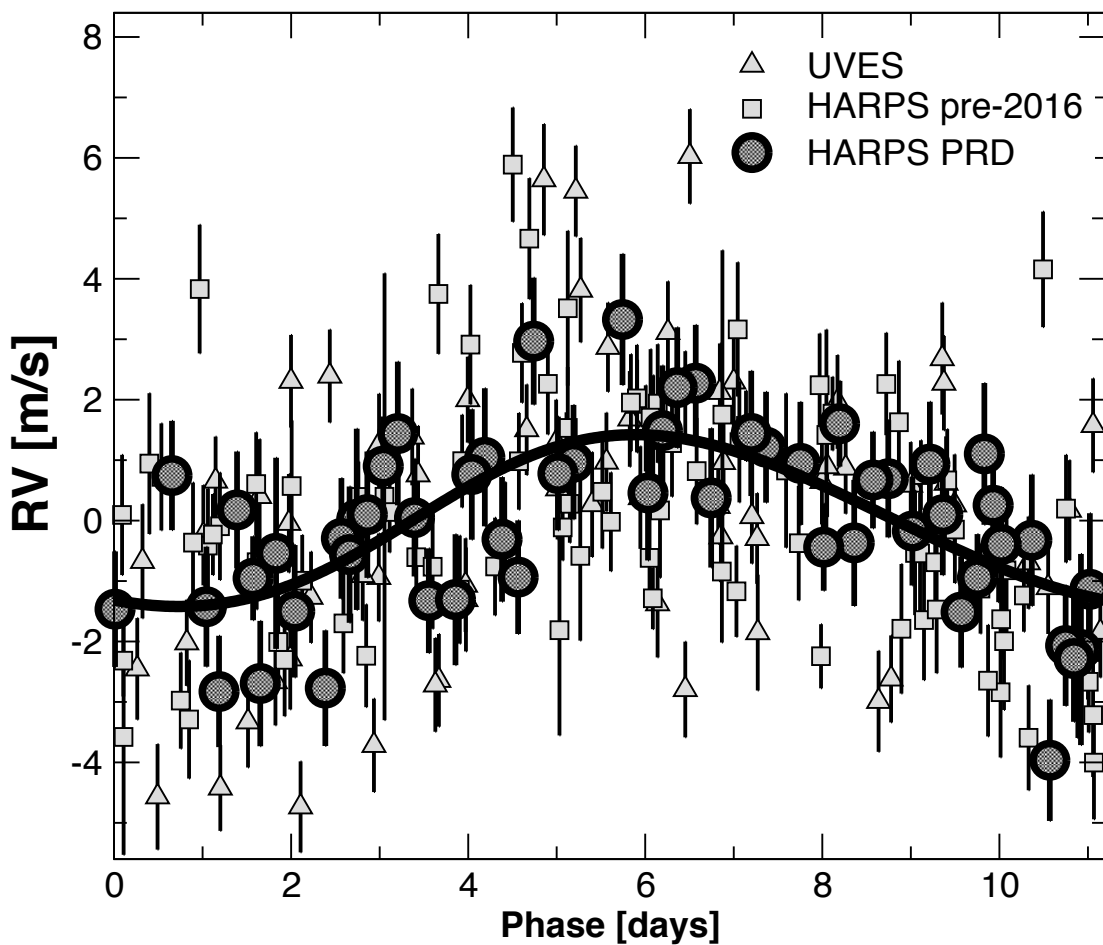
Référence	Fréquence	étoile hôte	source
Catanzarite & Shao, 2011	0.8% - 4.7%	Sun-like	Kepler
Traub, 2012	34 ± 14 %	FGK	Kepler
Gaidos, 2013	31% - 64 % (46%)	étoiles naines	Kepler
Petigura et al. 2013	11 ± 4 %	Sun-like	Kepler
Bonfils et al., 2013	28% - 95% (41%)	naines M	vit. radiales
Kopparapu, 2013	24% - 60% (48%)	naines M	Kepler
Dressing et al. 2013	9% - 31% (15%)	naines M	Kepler
Silburt et al., 2015	5.3% - 9.8% (6.4%)	Solar-type	Kepler

Statistiques basées sur des petits nombres, extrapolations, systématiques, définitions plus ou moins optimistes (complexes) de la ZH ...

→ La fréquence des (super)-Terres dans la zone habitable des étoiles reste inconnue.



Proxima Cen b



Anglada-Escudé et al., 2016

Etoile hôte:

M5.5 ($0.12 M_{\odot}$)

4.2 a.l.

Planète:

$P = 11.86$ jours

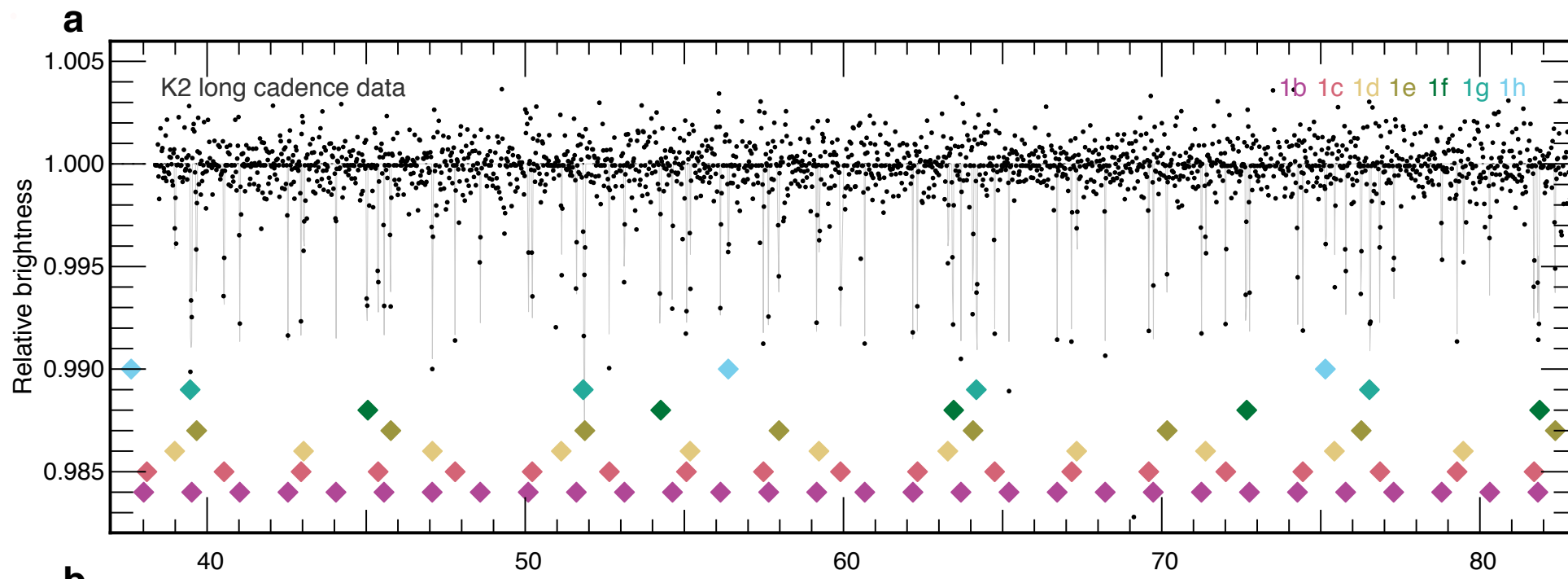
$a = 0.0485$

$m_p \sin i = 1.27 \text{ ME} [1.10, 1.46]$

Masse minimale
(l'inclinaison du plan orbital n'est pas connue)

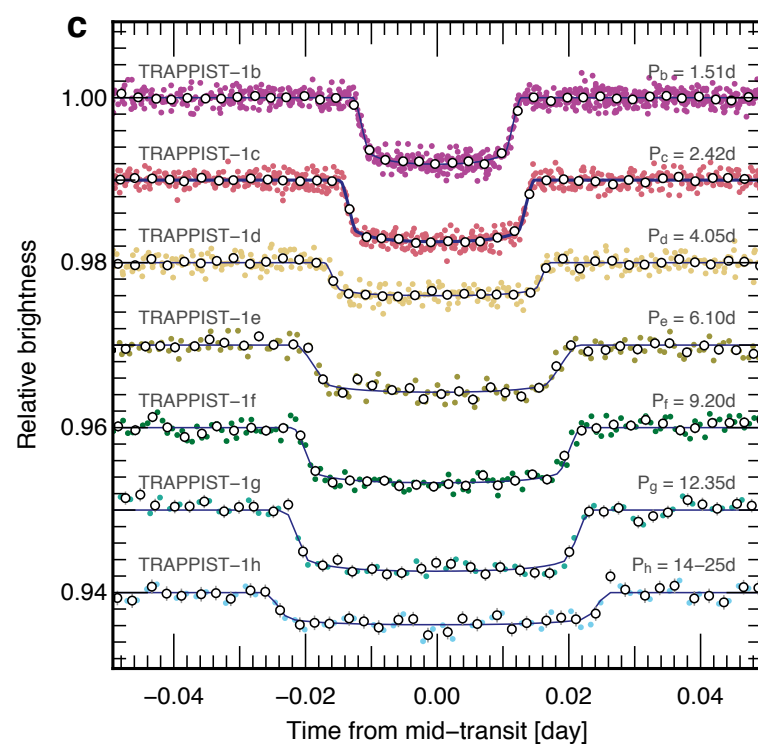


Le système de Trappist-1

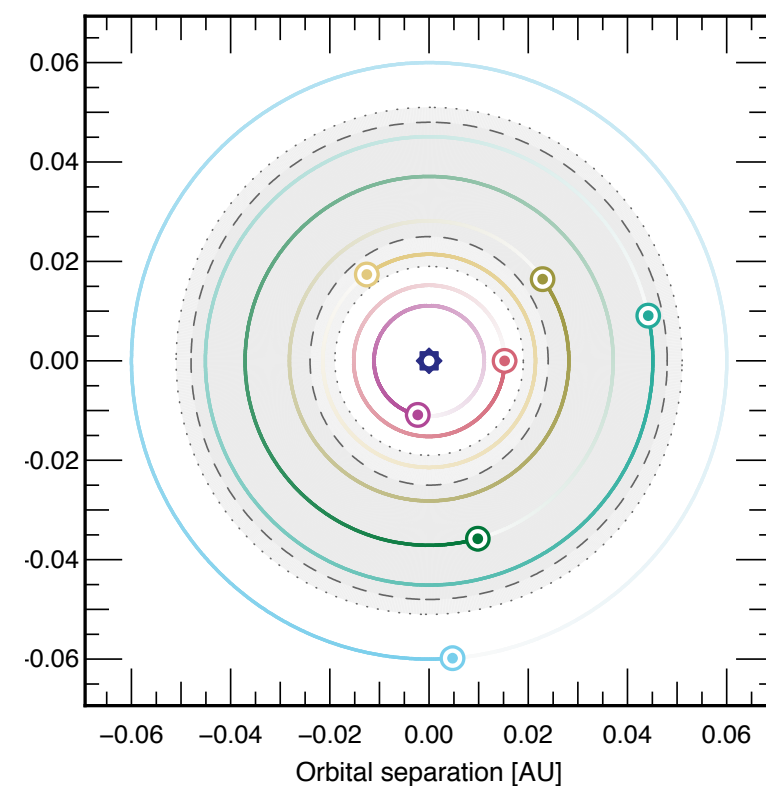


Gillon et al., 2016
Gillon et al., 2017
Luger et al., 2017

7 planètes en transit



Etoile hôte:
 $M = 0.08 M_{\odot}$
39.1 a.l.

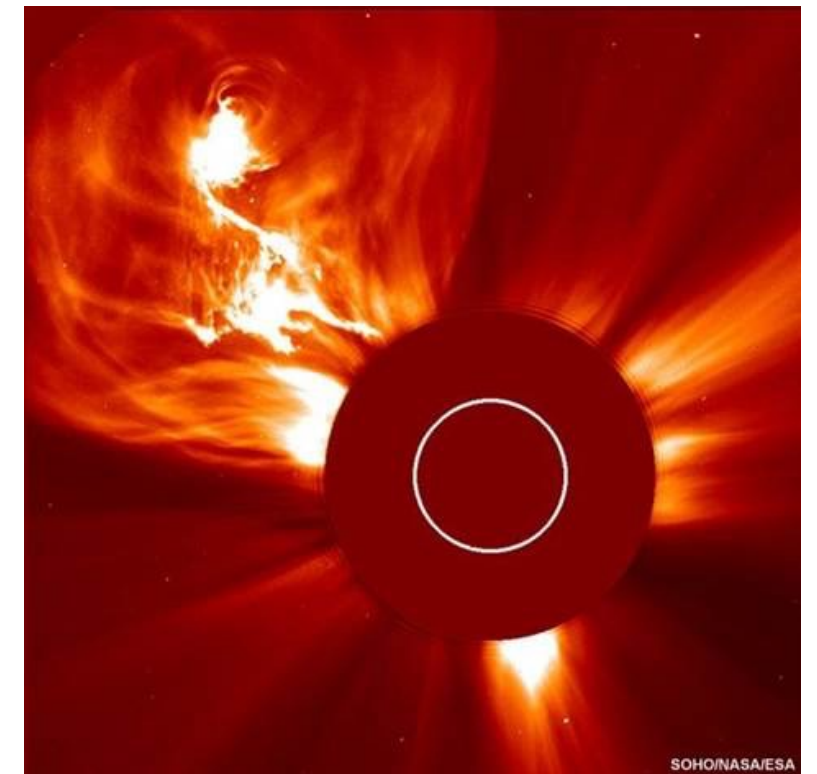
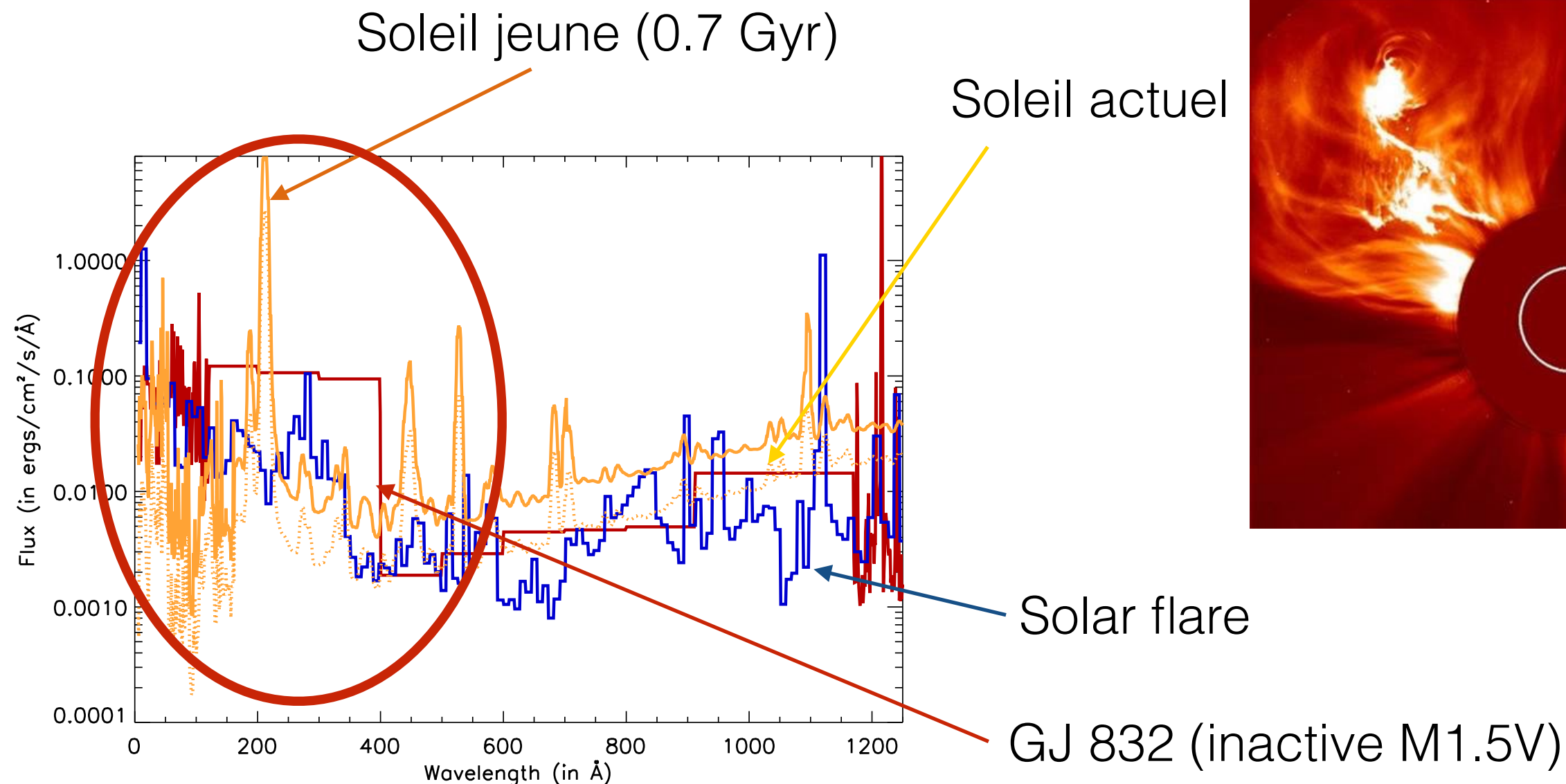


Périodes orbitales: 1.51 à 18.764 jours



Habitabilité des naines M?

Les rayons X et UV, ou l'activité stellaire (flares, et éjections coronale) peuvent éroder l'atmosphère de l'exoplanète → dissociation puis fuite des molécules d'hydrogène et d'oxygène, les deux composants de l'eau.

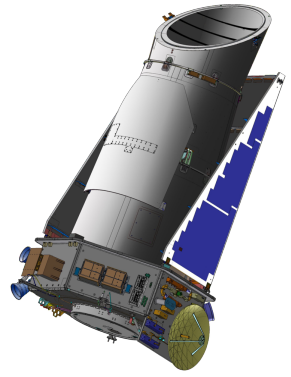


SOHO/NASA/ESA

Figure 1. Spectral energy distribution (SED); reconstructed for the solar X5.4 flare (blue curve) and the young Sun's SED (orange curve) and the quiet Sun at the average magnetic activity (dotted orange curve) scaled to 1 au and GJ 832 SED (red curve) scaled to 0.16 au.



Conclusions



- Fascinante diversité des populations de planètes dans toutes les gammes de masse - mécanismes de formation plus complexes.
- Domaine des atmosphères des planètes géantes (jeunes) est ouvert, celui des petites planètes rocheuse ne l'est pas.
- Précision de mesure (sur la planète et sur son étoile): limitation sérieuse pour déterminer la nature exacte des petites planètes et être assuré de son caractère "tellurique".
- Nombreuses missions spatiales (TESS, CHEOPS, PLATO, ARIEL) → déterminer les propriétés des différentes populations de planètes et préparer les futures missions pour la détection de bio signatures.
- Zone habitable: comment la définir, en particulier lorsqu'on considère des étoiles très différentes du Soleil, ou lorsqu'on s'intéresse à des effets d'évolution?
- Les meilleurs candidats dans la ZH de leur étoile orbitent des étoiles très différentes du Soleil
- Quels critères pour reconnaître la vie en l'absence de mesures in situ?
←extremophiles sur Terre et recherches dans le système solaire