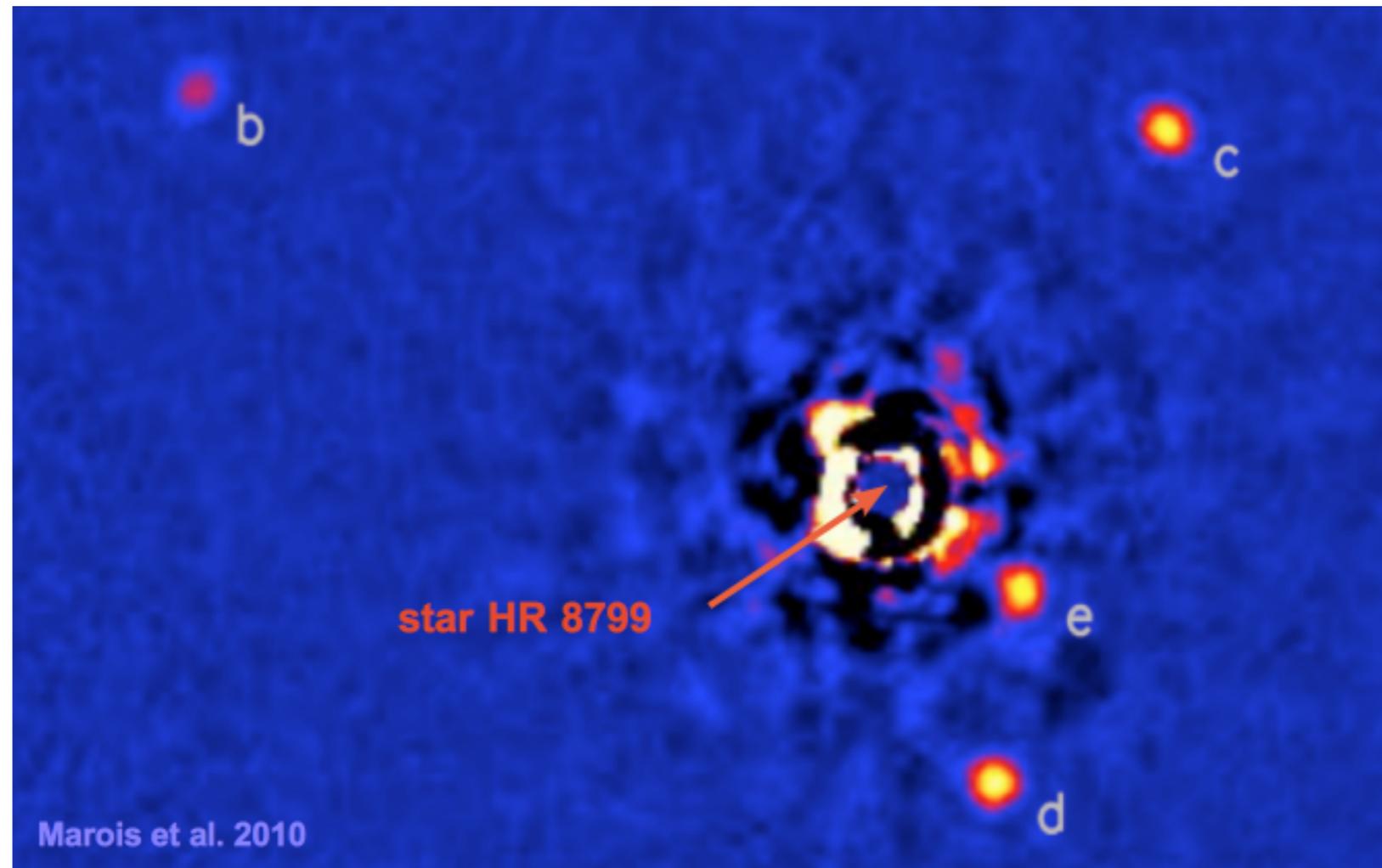


Les systèmes planétaires extrasolaires

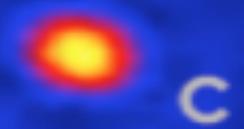


Clément Baruteau

CNRS / Institut de Recherche en Astrophysique et Planétologie

École d'été OCEVU, LAM, 15/06/2018

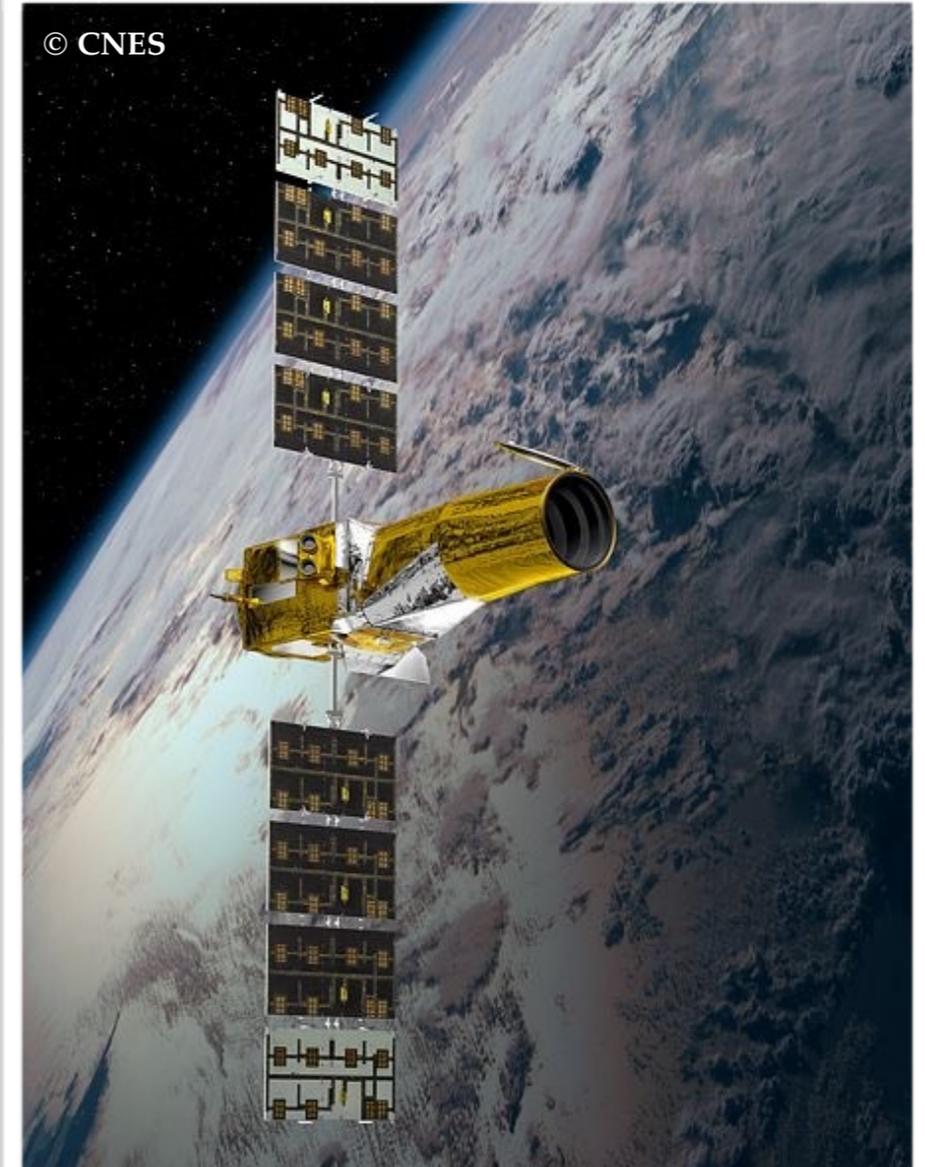
Plan



- Méthodes de détection des exoplanètes
- Caractérisation des exoplanètes
- Formation et évolution des systèmes planétaires



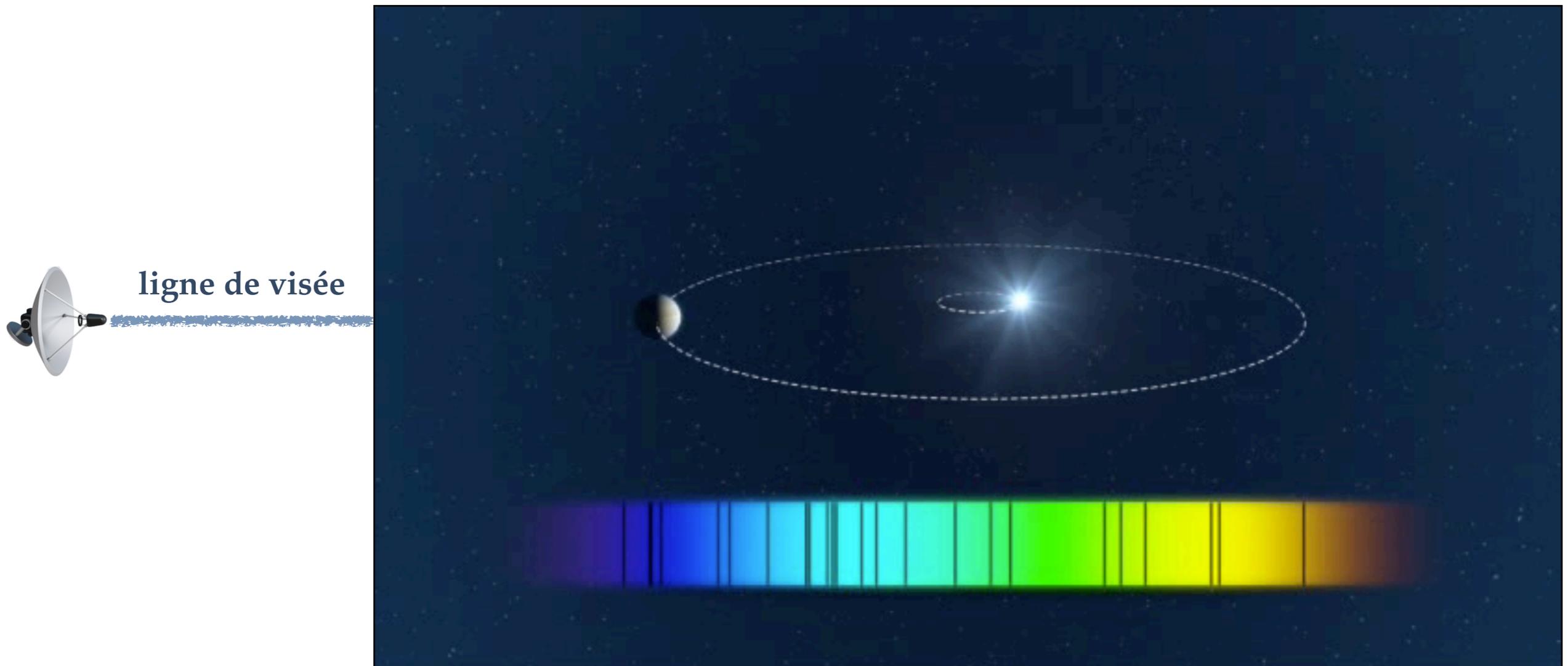
Télescope de 193 cm à l'Observatoire de Haute Provence



Télescope spatial CoRoT

MÉTHODES DE DÉTECTION DES EXOPLANÈTES

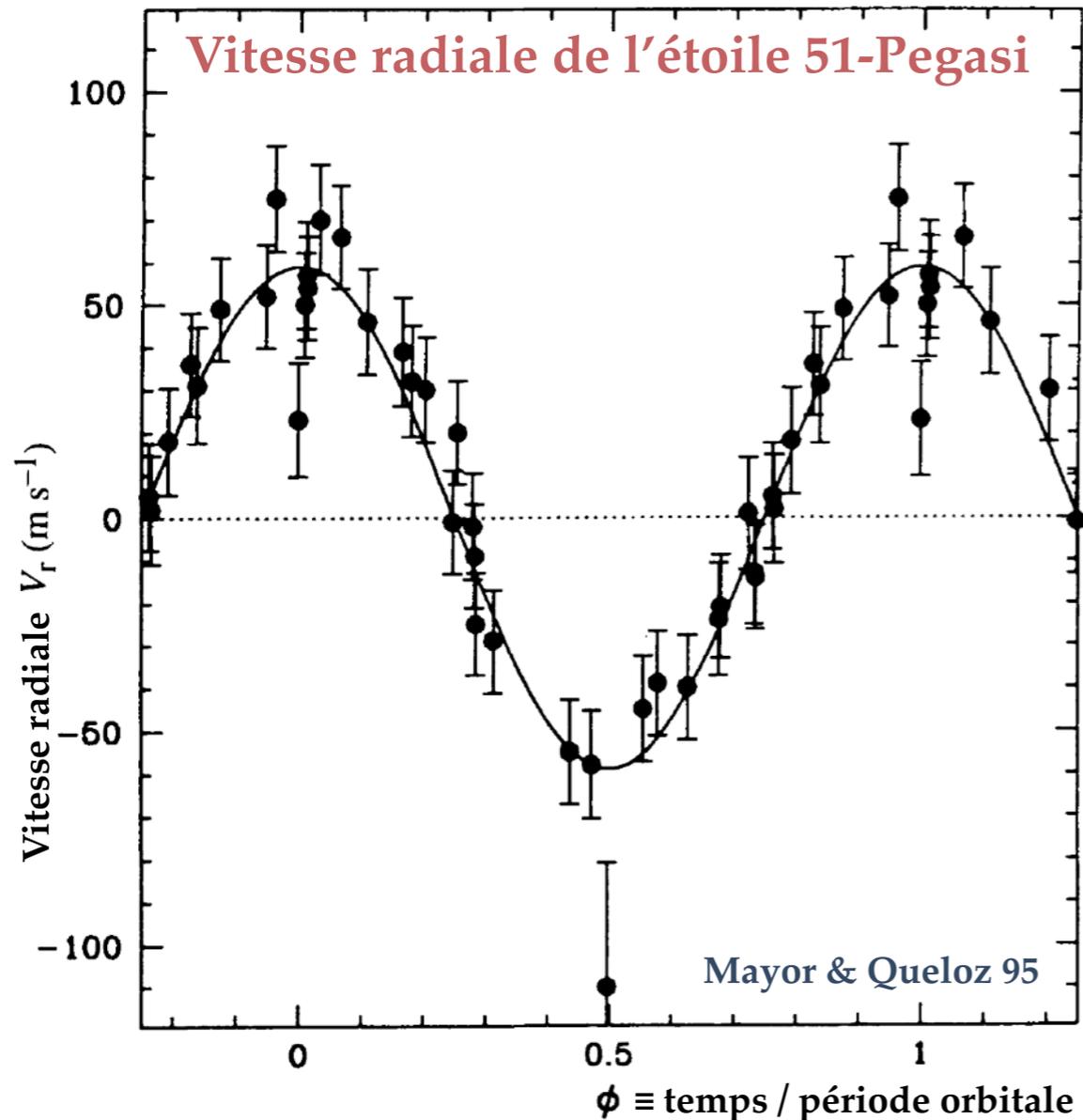
Détecter les exoplanètes par le spectre de leur étoile



© ESO

- Les planètes et leur étoile tournent autour du centre de masse du système planétaire:
 - **Décalage Doppler** périodique des lignes d'absorption du spectre de l'étoile
 - **Vitesse radiale** de l'étoile le long de la ligne de visée
 - **Masse minimale, période orbitale et excentricité** de la / des planètes

Détecter les exoplanètes par le spectre de leur étoile



→ companion planétaire 51-Pegasi-b:

- masse minimale $\sim 0.5 M_{\text{Jupiter}}$
- demi-grand axe $\sim 0.05 \text{ UA}$
- période orbitale $\sim 4 \text{ jours!}$
- excentricité ~ 0.01

→ 51-Pegasi-b est un "Jupiter chaud"
(température de surface $\sim 1300\text{K}$)

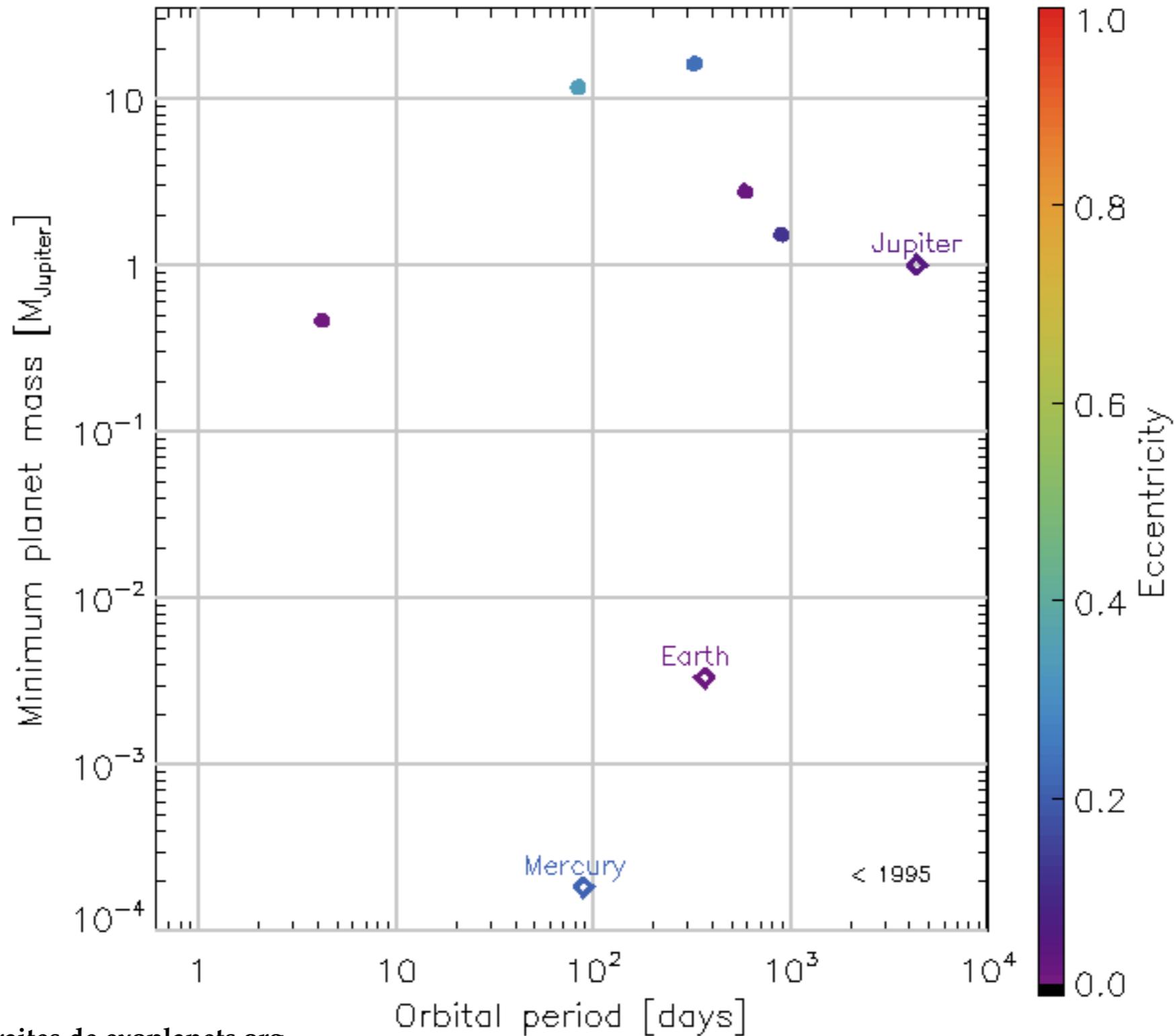
51-Peg 51-Peg-b

Sun

Mercury

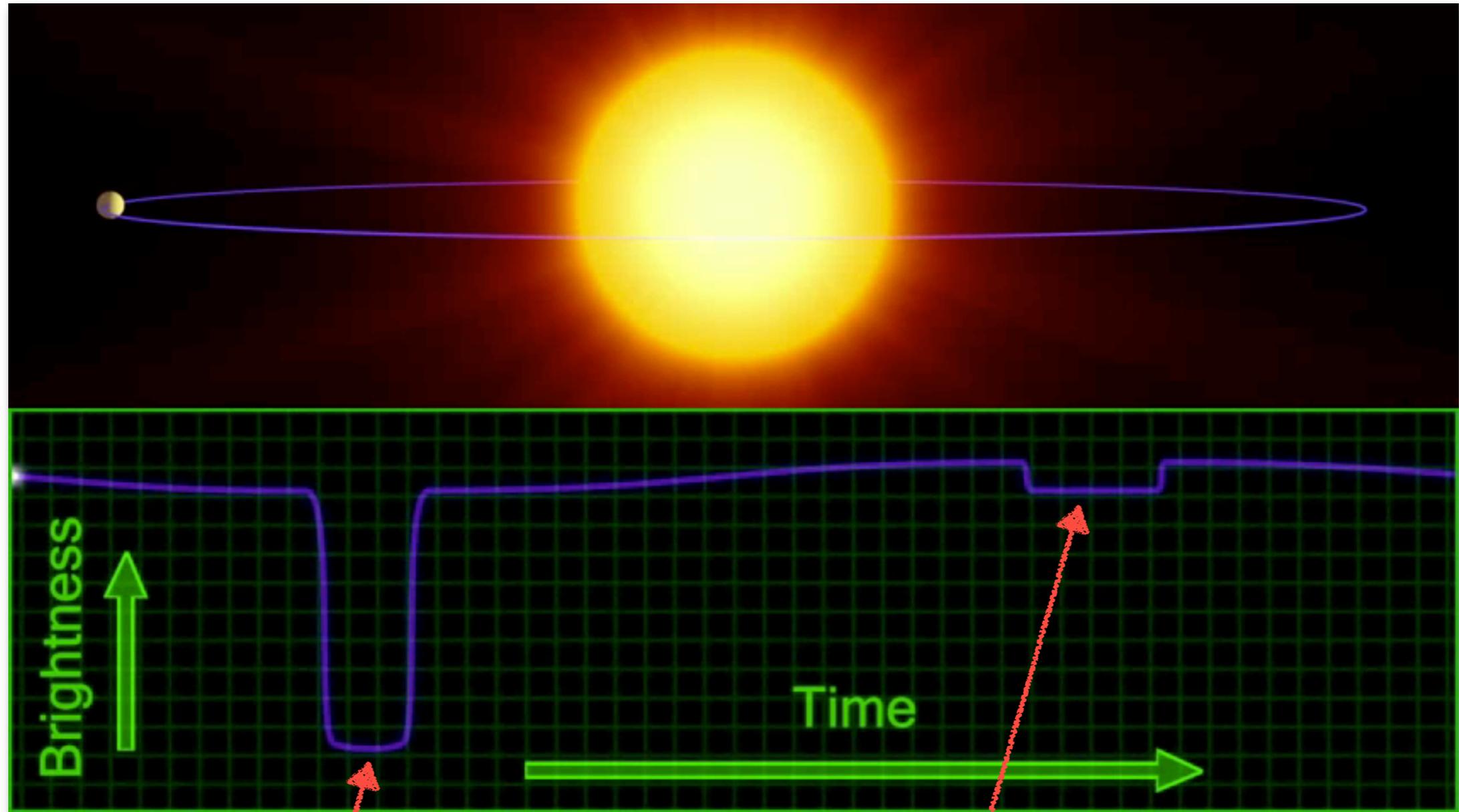
Venus

Détecter les exoplanètes par le spectre de leur étoile



données extraites de exoplanets.org

Détecter les exoplanètes par le transit de leur étoile



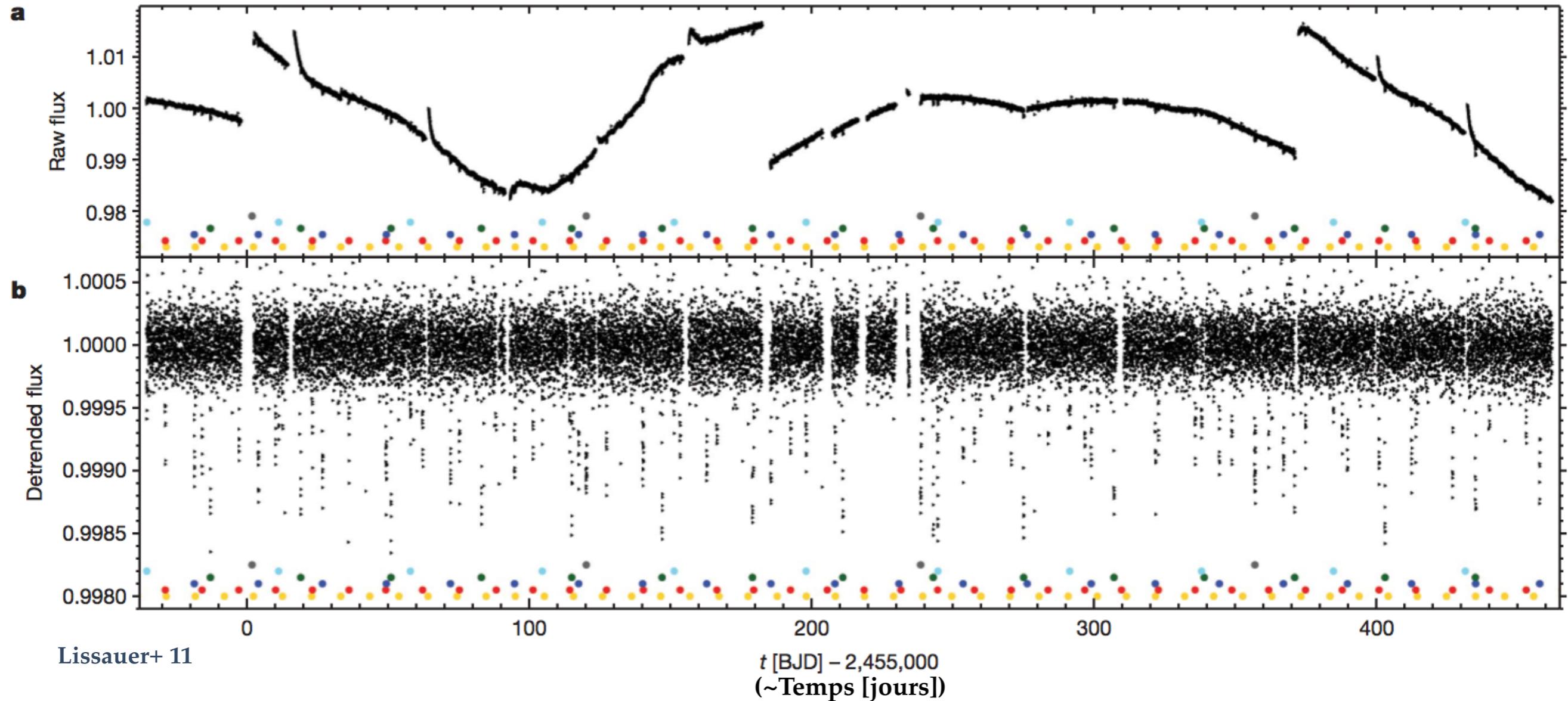
© Spitzer Space Telescope Website

transit

éclipse secondaire

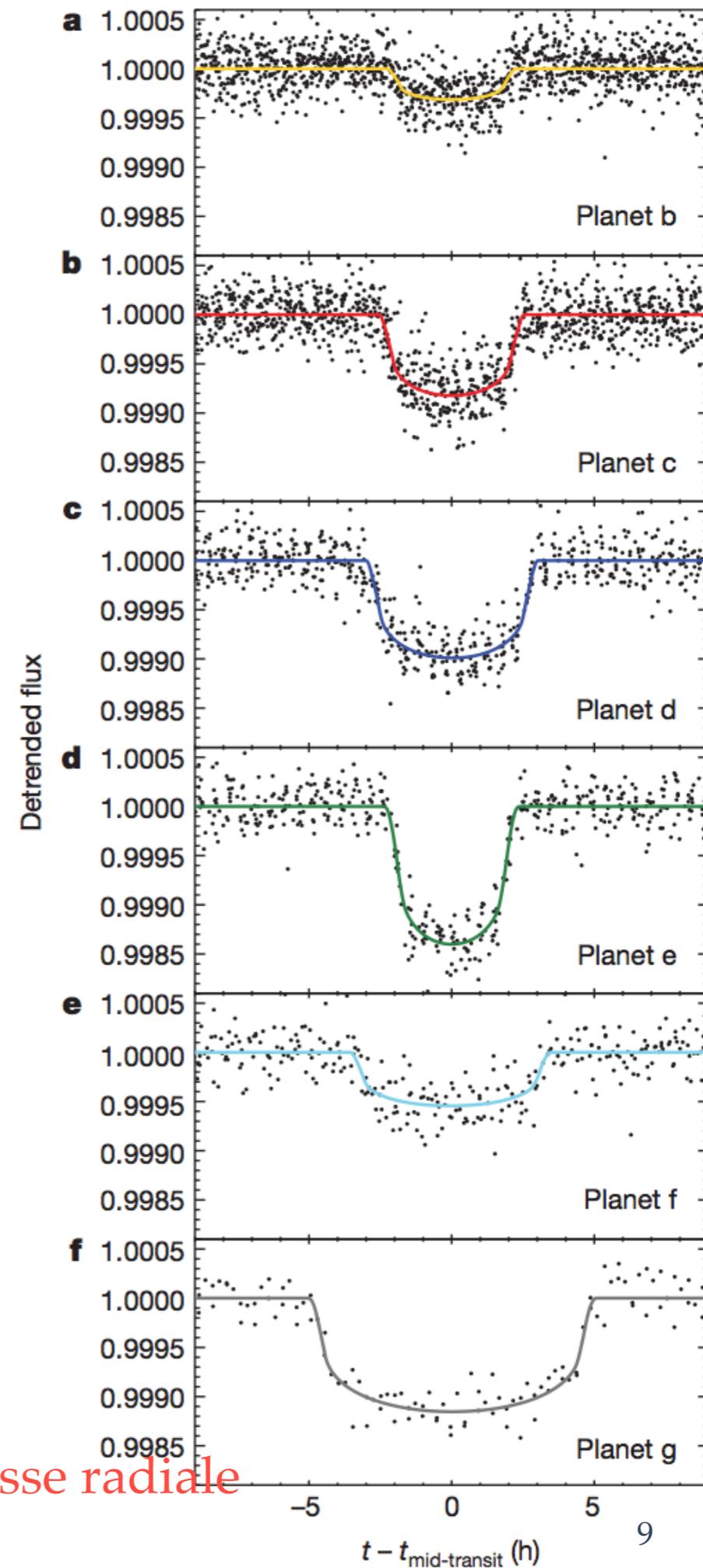
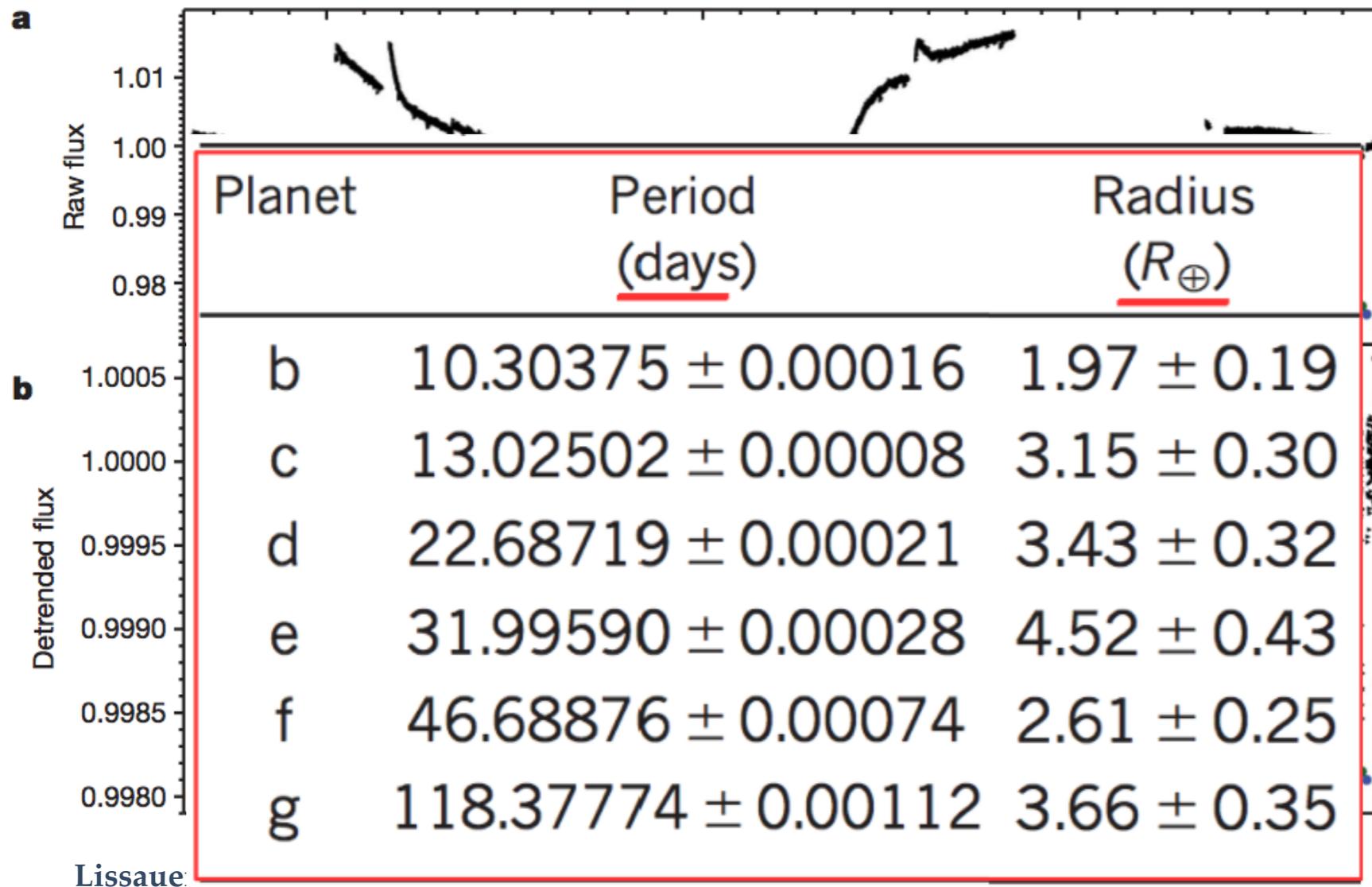
Détecter les exoplanètes par le transit de leur étoile

Les 6 planètes autour de l'étoile Kepler-11



Détecter les exoplanètes par le transit

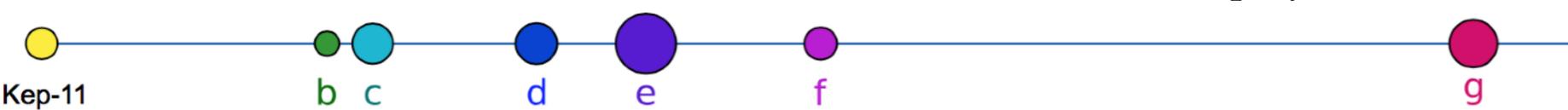
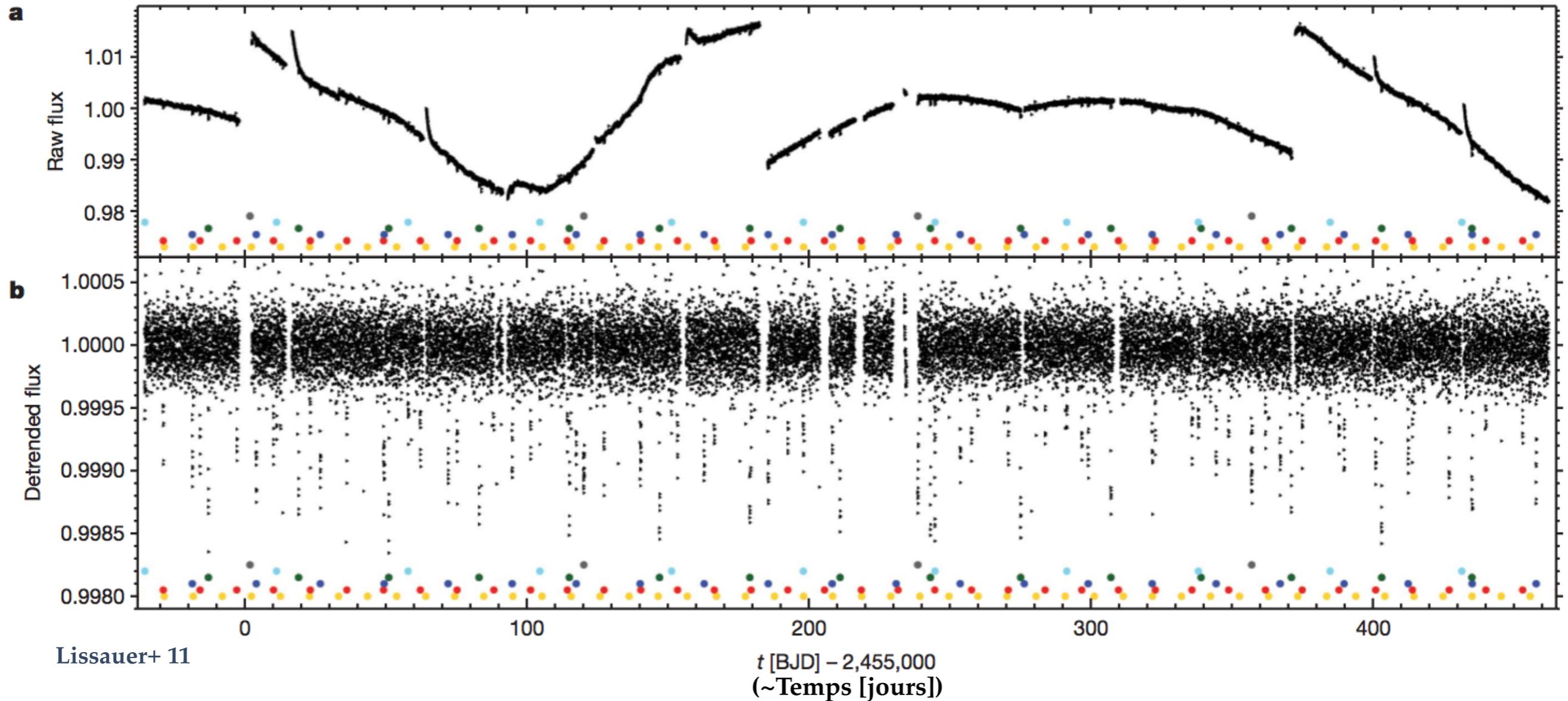
Les 6 planètes autour de l'étoile K



- Diminution du flux de l'étoile $\sim (R_{\text{planète}} / R_{\text{étoile}})^2$
 - $R_{\text{planète}}$ si $R_{\text{étoile}}$ est connu, **période orbitale**
 - **Vraie masse** de la planète en combinant transit + vitesse radiale

Détecter les exoplanètes par le transit de leur étoile

Les 6 planètes autour de l'étoile Kepler-11



Kep-11

b

c

d

e

f

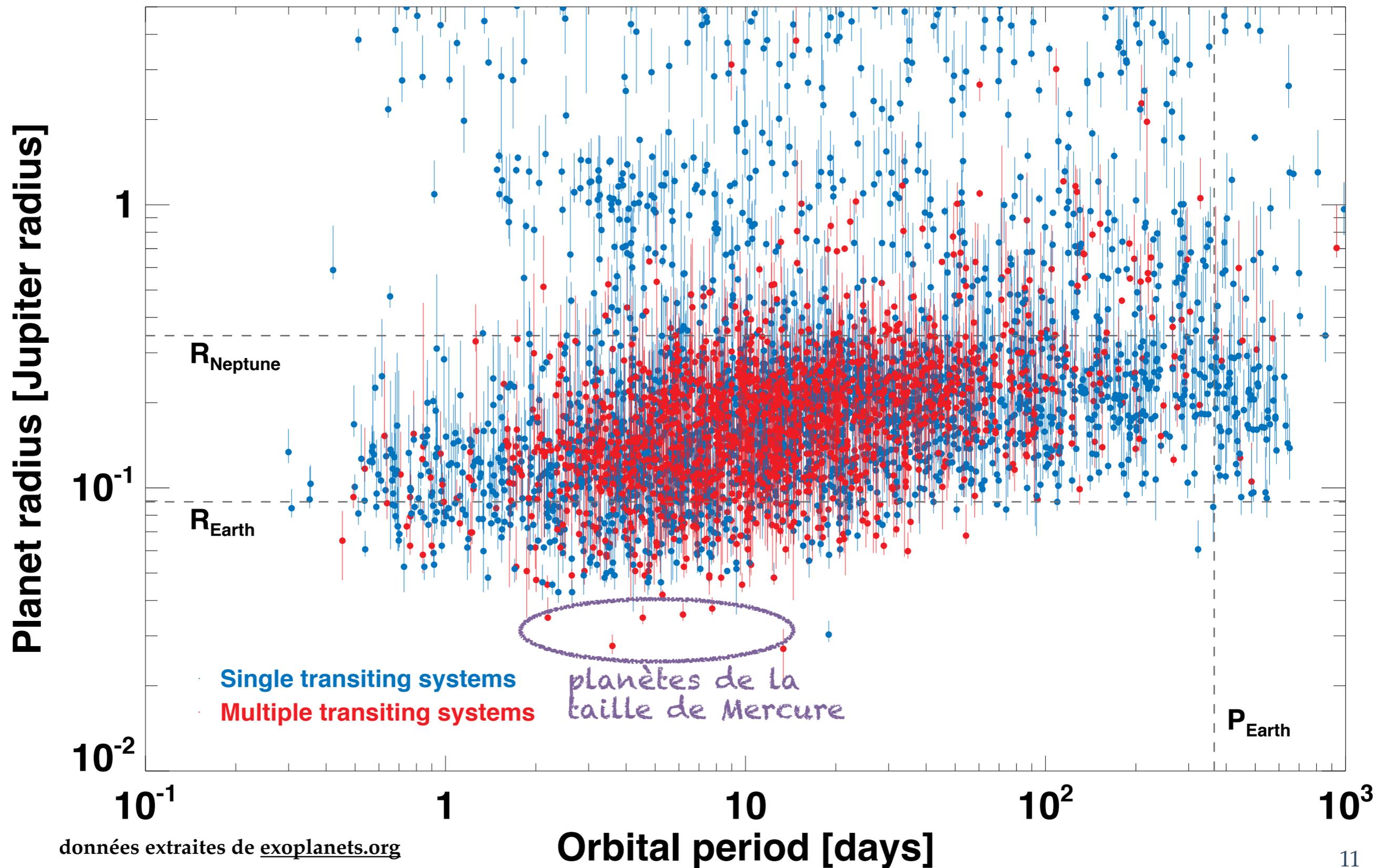
g

Sun

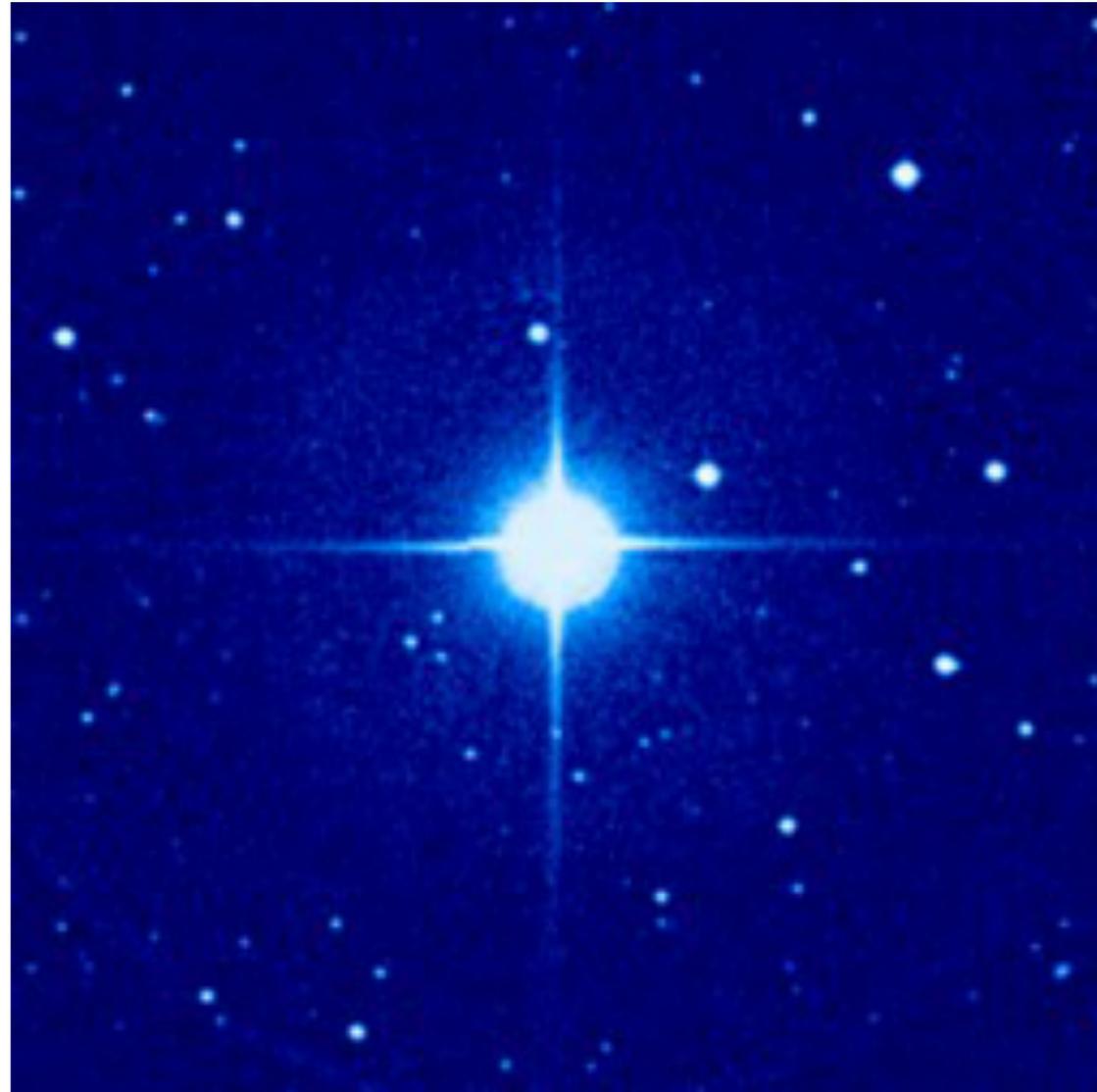
Mercury

Venus
10

Détecter les exoplanètes par le transit de leur étoile



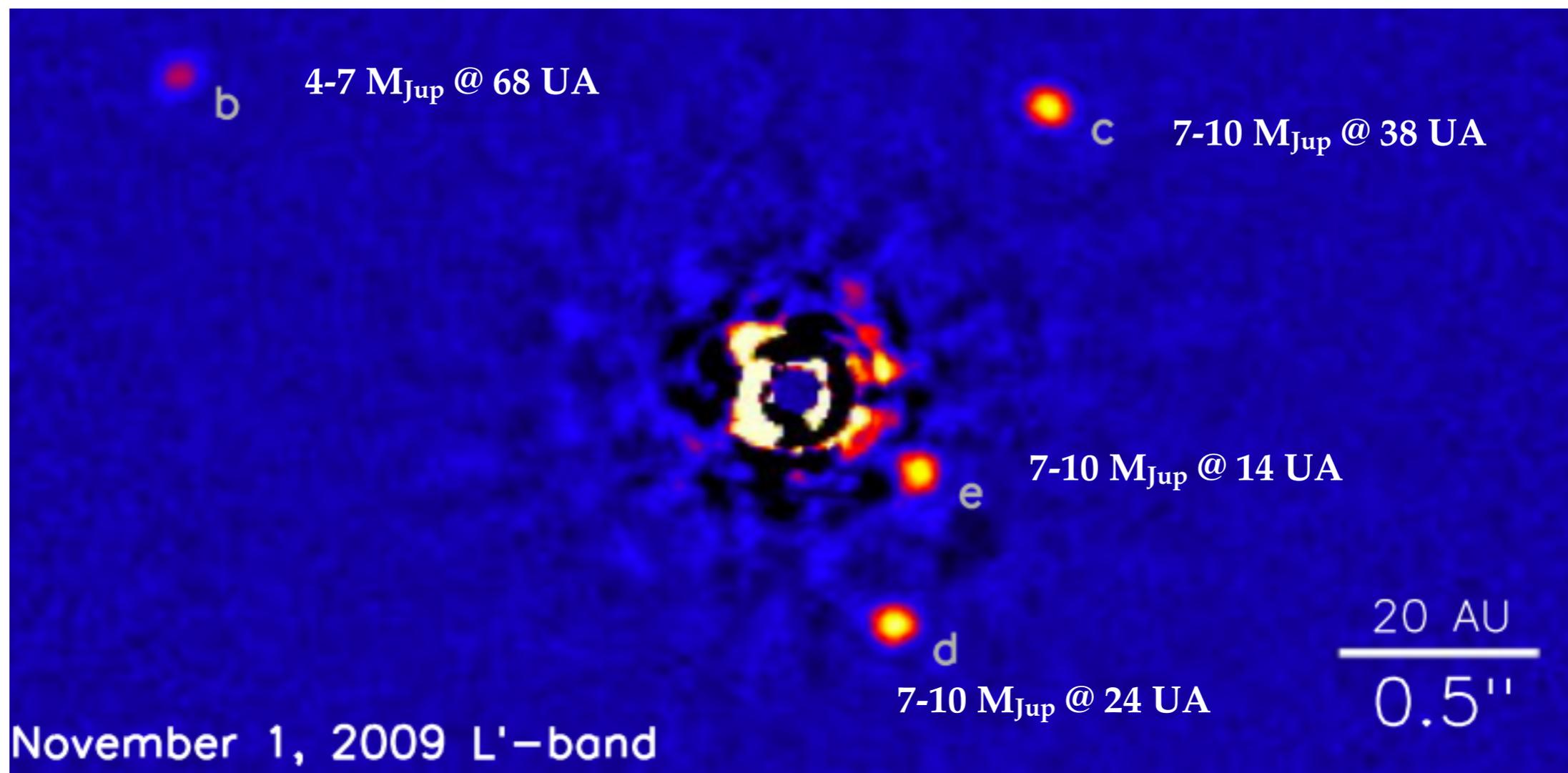
Détection des exoplanètes par imagerie



- **Problème 1:** une étoile est typiquement 10^6 à 10^9 plus brillante qu'une planète
- **Problème 2:** observer une planète à 5 UA d'une étoile située à 50 parsecs de nous requiert une résolution angulaire de $\sim 0.1'' \equiv 5 \times 10^{-7}$ radians

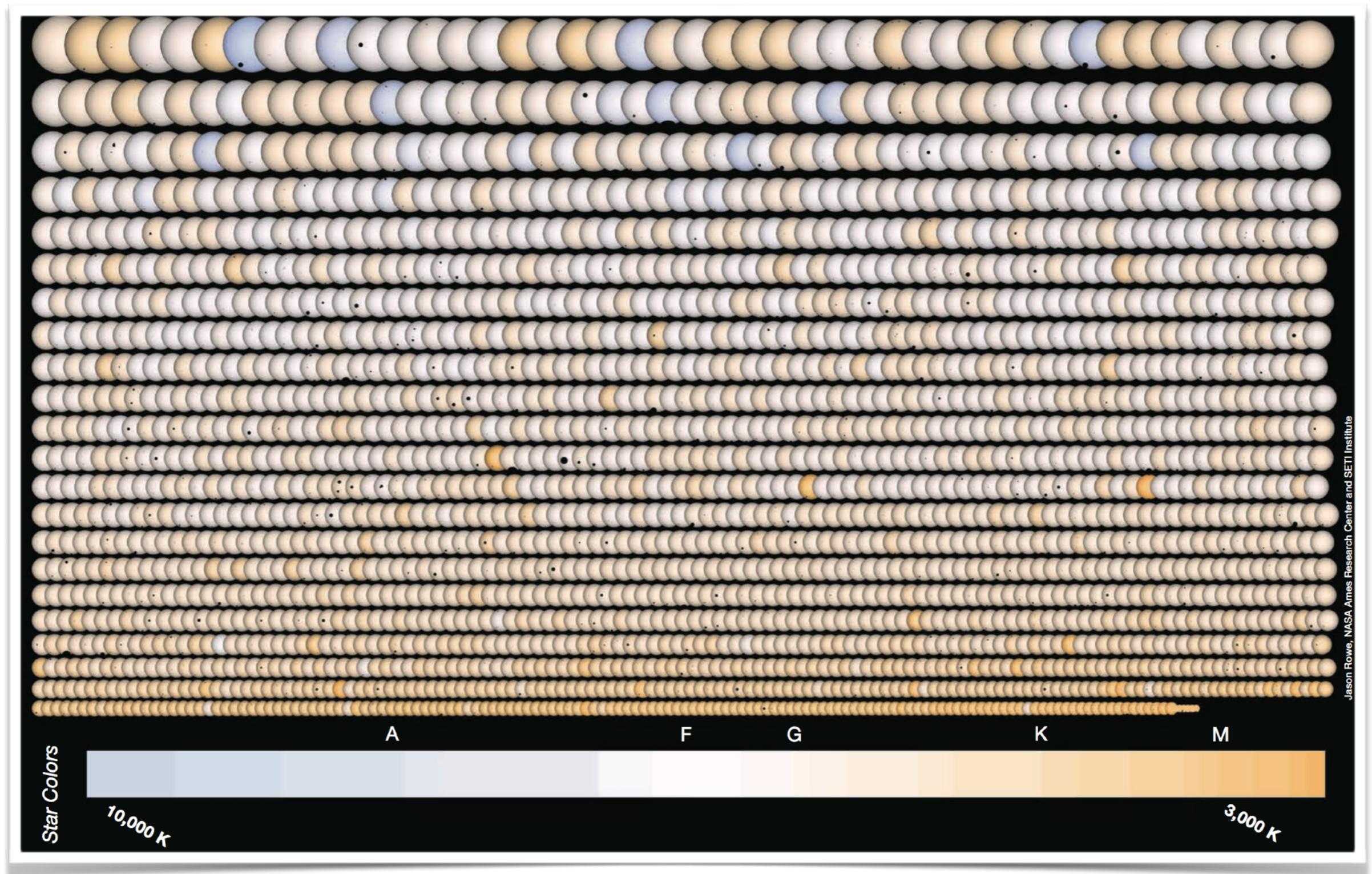
Détection des exoplanètes par imagerie

Les 4 planètes connues à ce jour autour de l'étoile HR 8799



Marois+ 10

- Les masses des planètes sont estimées par leur luminosité

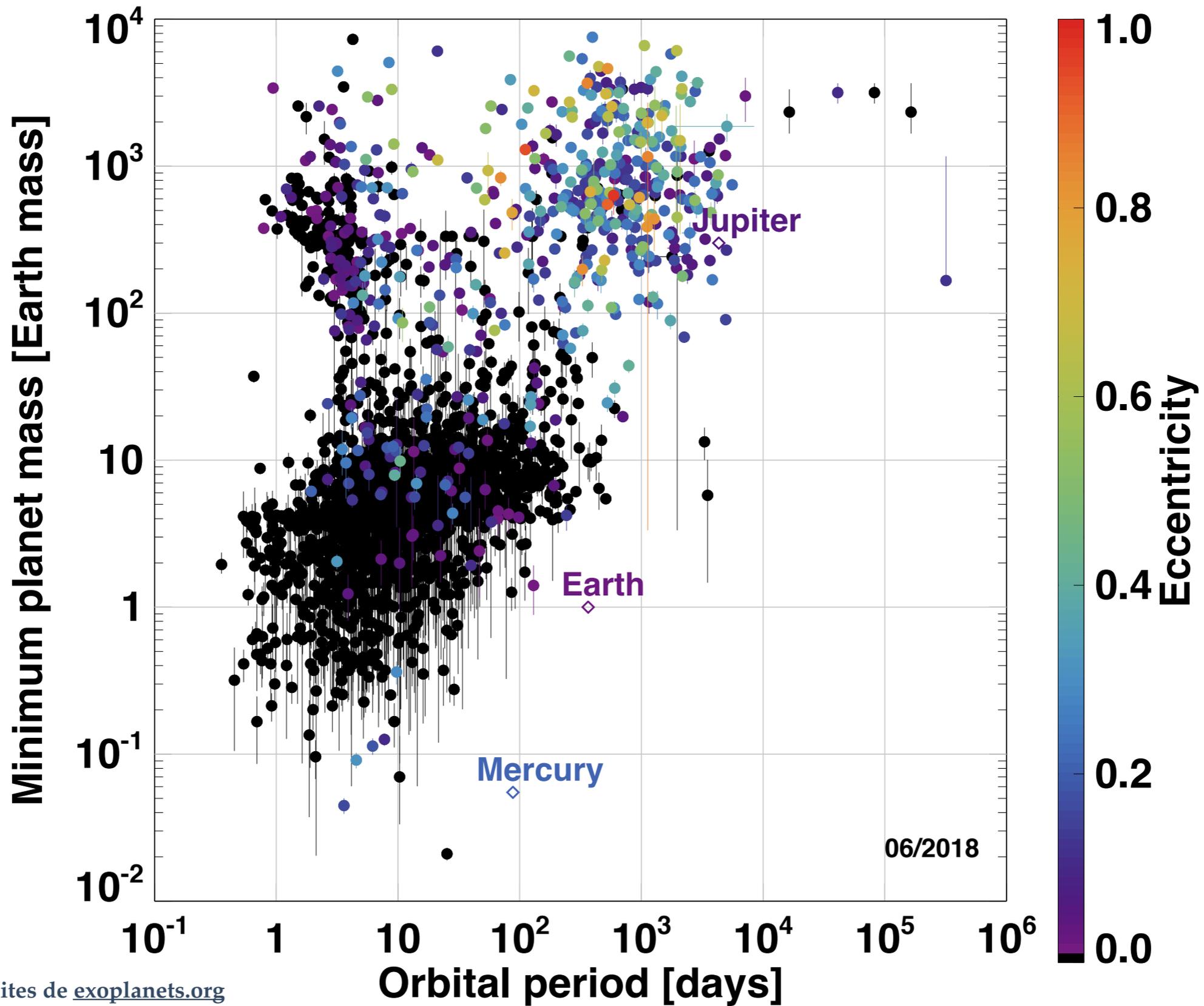


CARACTÉRISATION DES EXOPLANÈTES

MASSE, ORBITE, STRUCTURE INTERNE, ATMOSPHÈRE, HABITABILITÉ

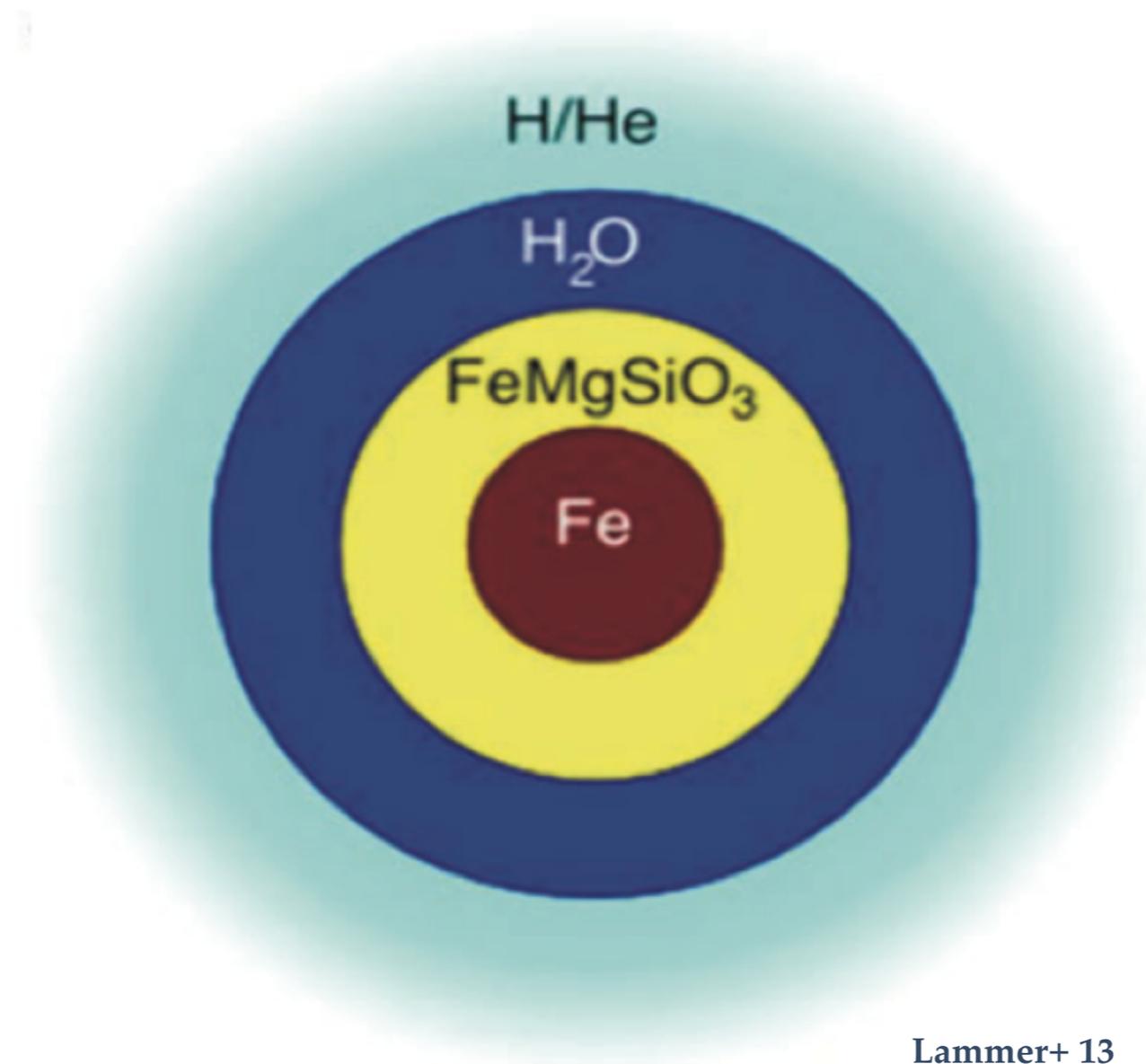
Environ 3000 exoplanètes confirmées en 25 ans

~1 sur 3 fait partie d'un système multi-planétaire



De quoi sont constituées les exoplanètes?

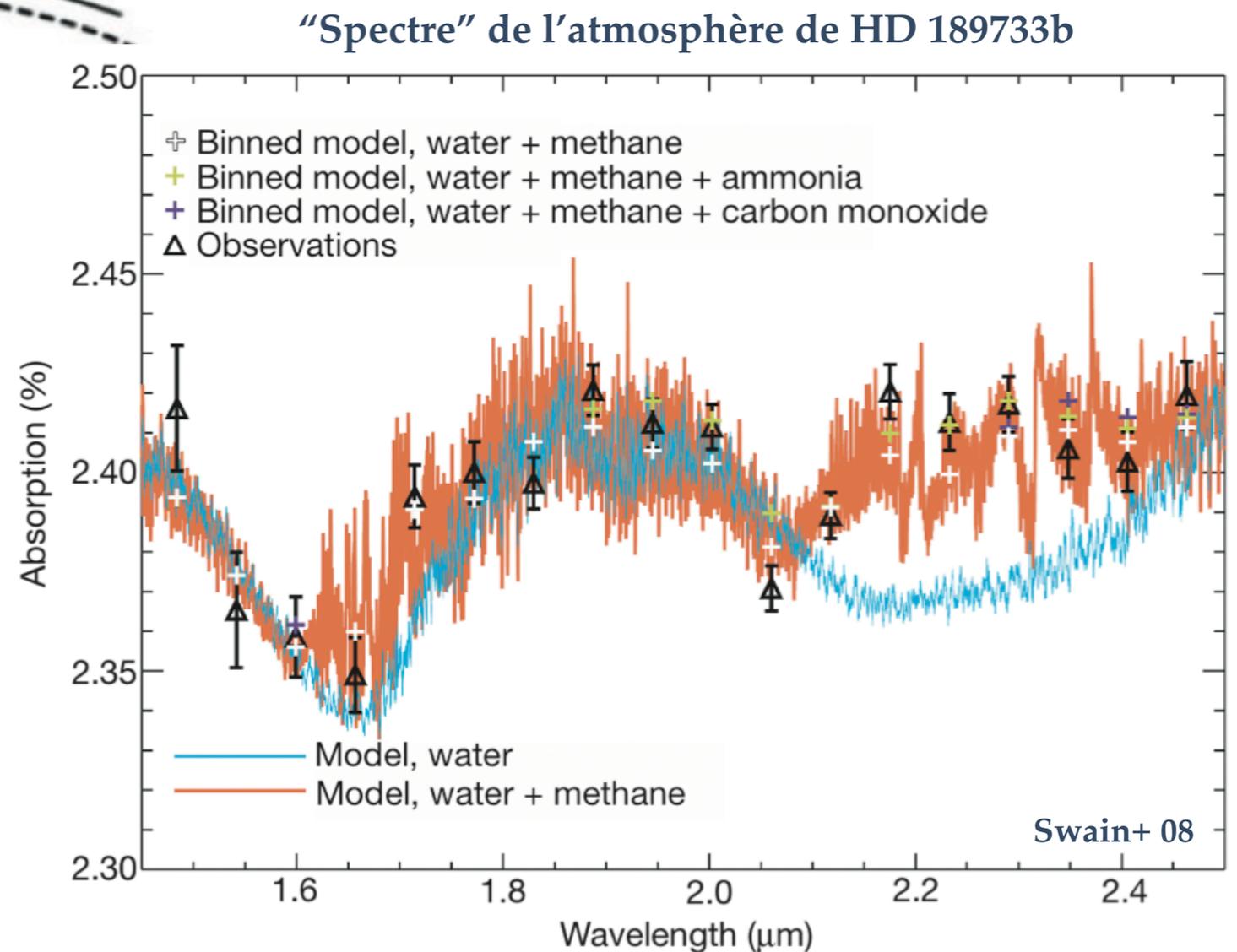
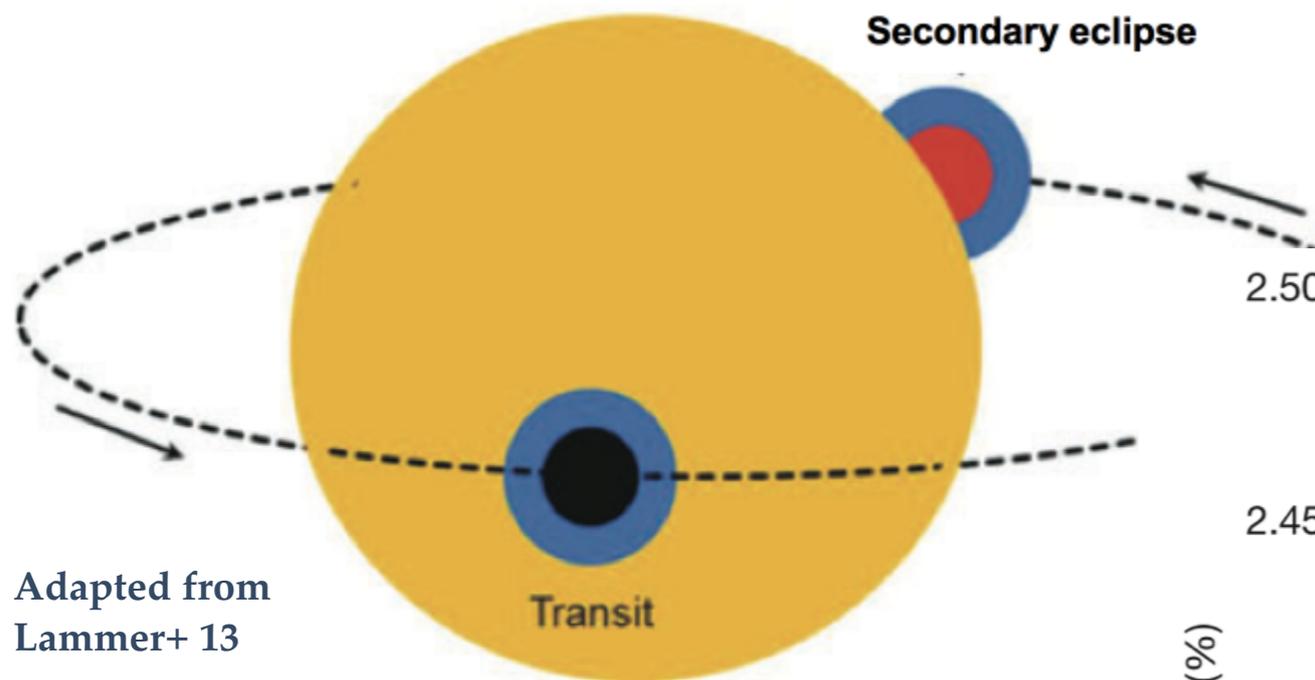
Composition des exoplanètes via leur densité moyenne



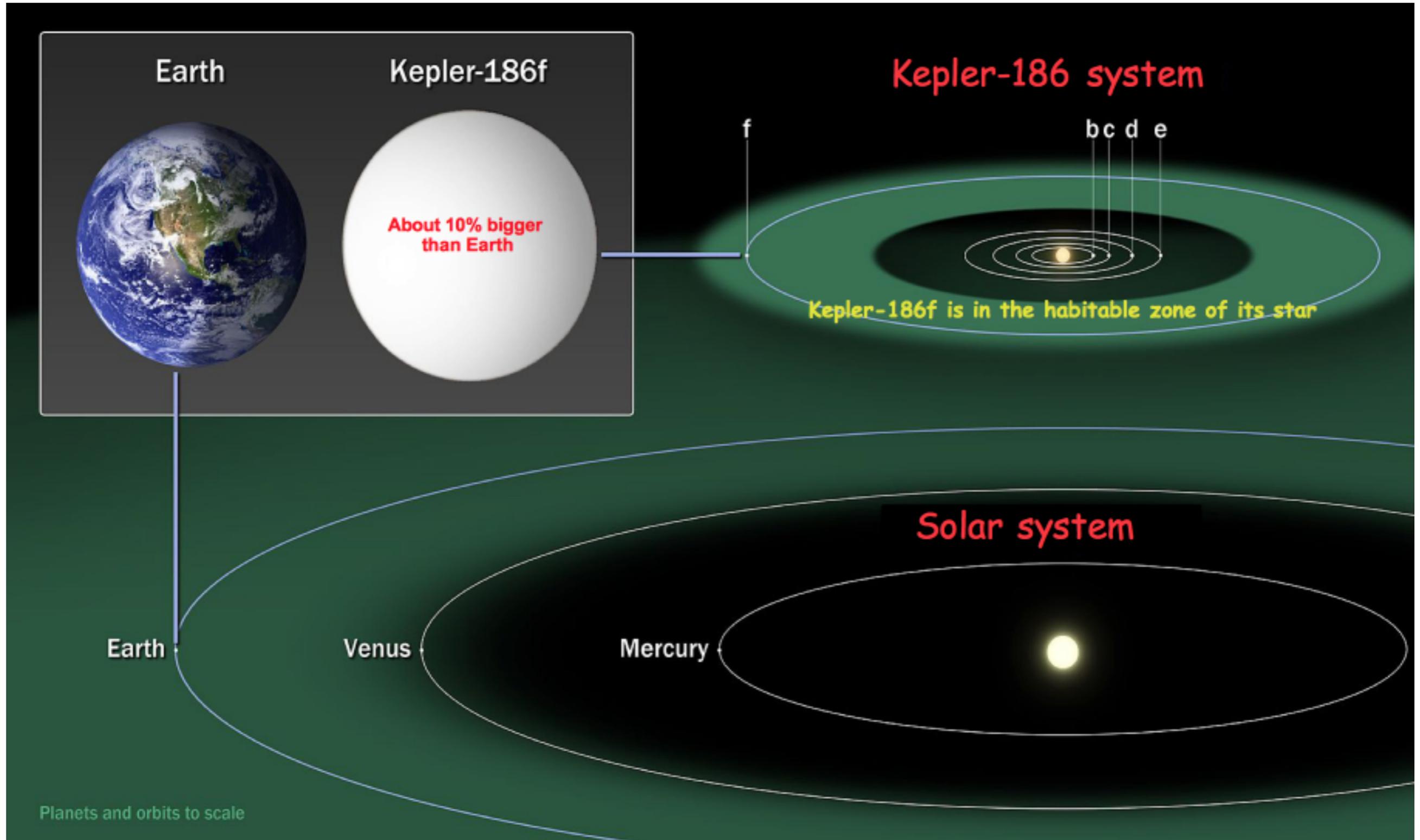
Un modèle possible de structure pour l'exoplanète GJ1214b
(6 fois plus massive que la Terre, mais 3 fois moins dense!)

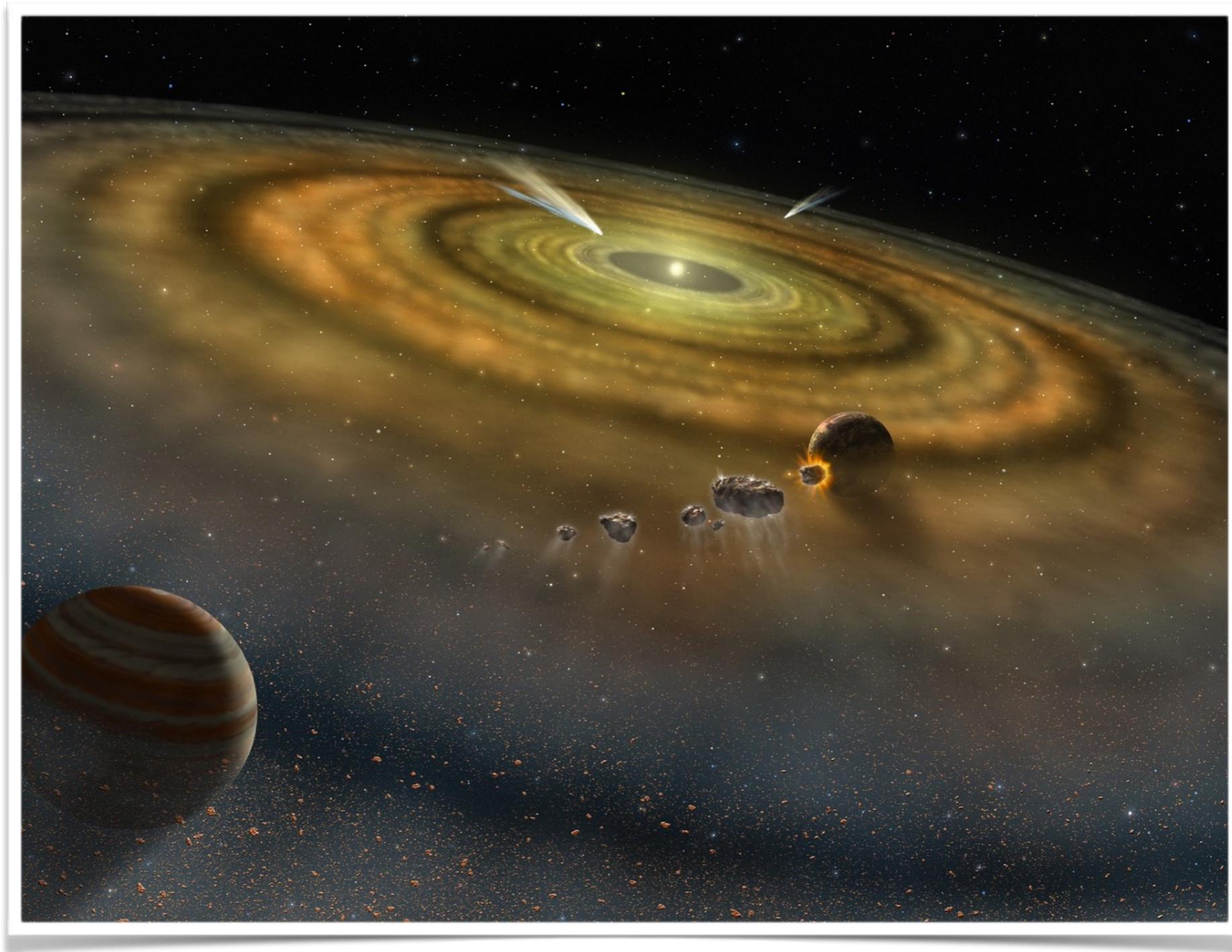
De quoi sont constituées les exoplanètes?

Composition de l'atmosphère des exoplanètes



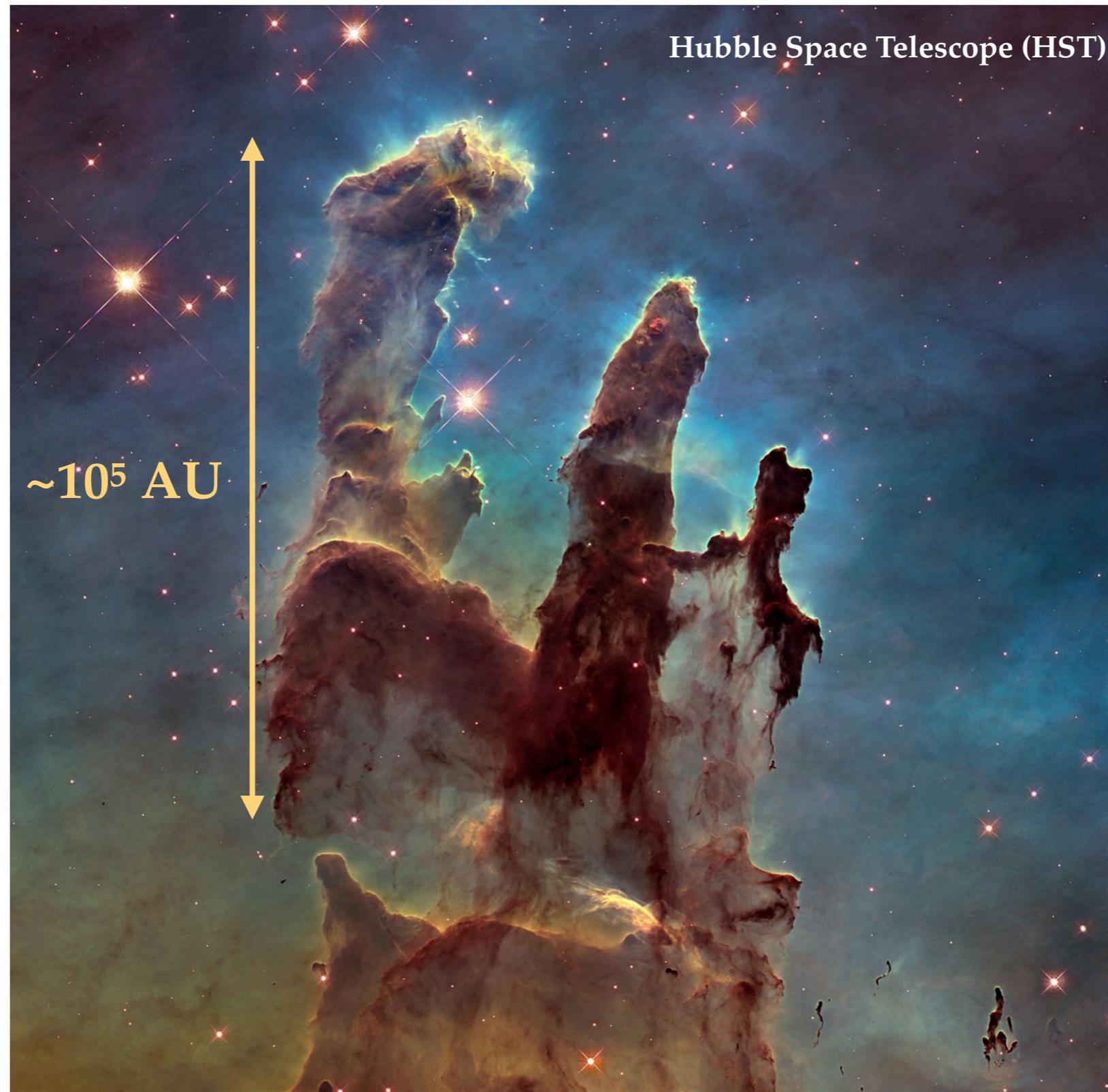
(Exo-)planètes habitables





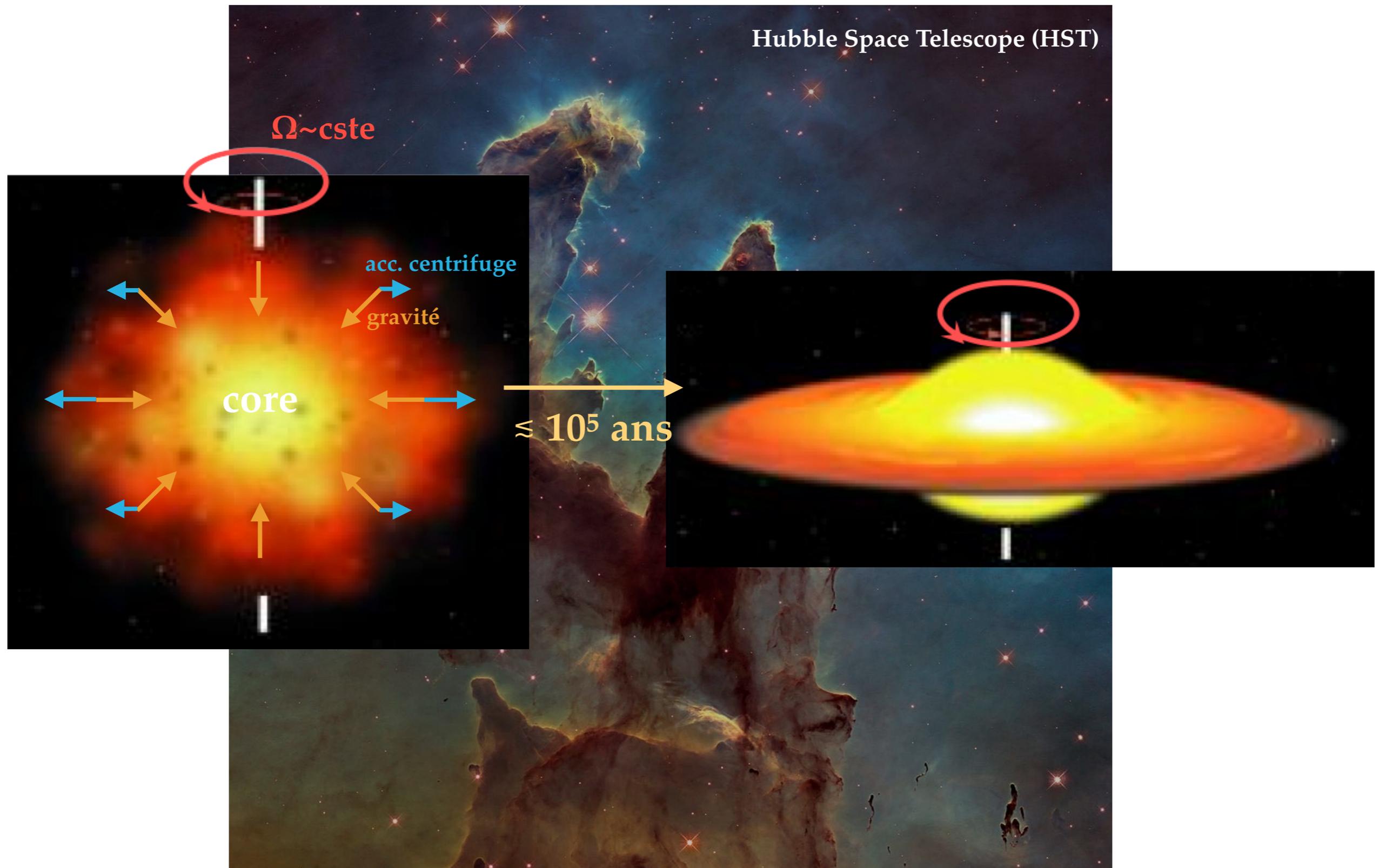
FORMATION ET ÉVOLUTION DES SYSTÈMES PLANÉTAIRES

Des nuages moléculaires aux disques protoplanétaires



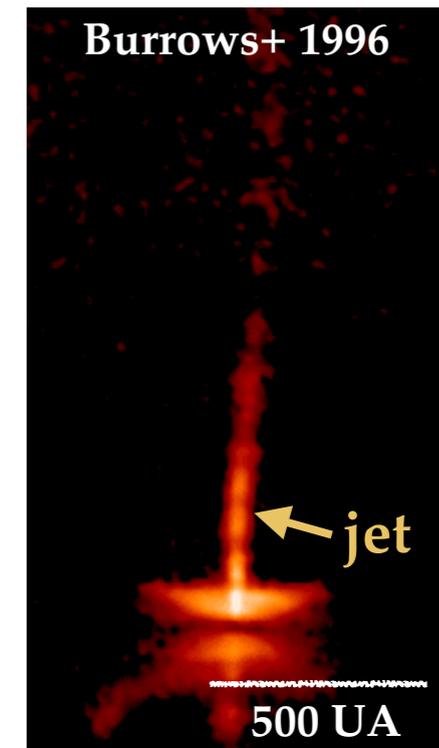
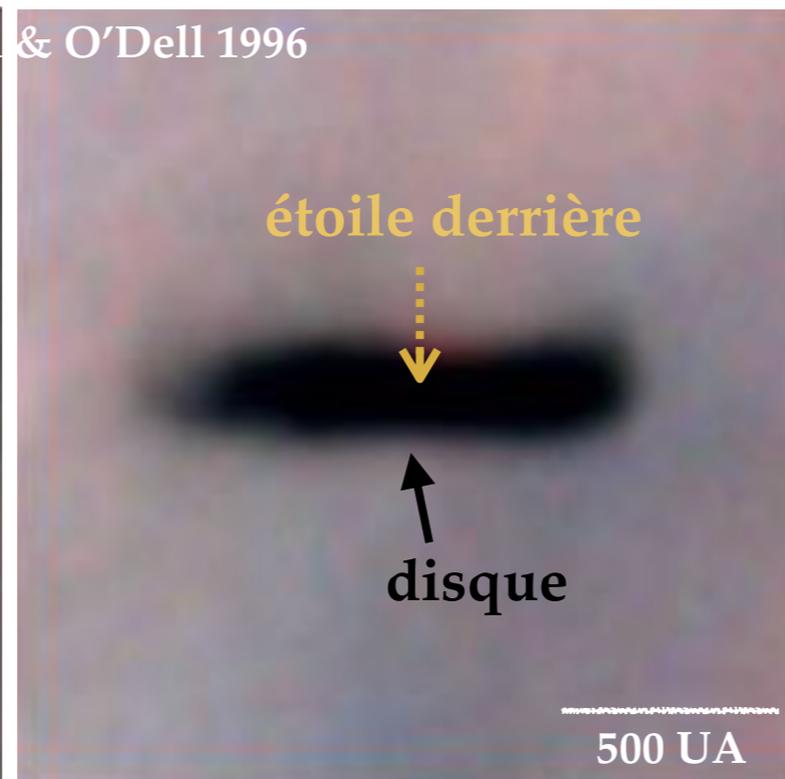
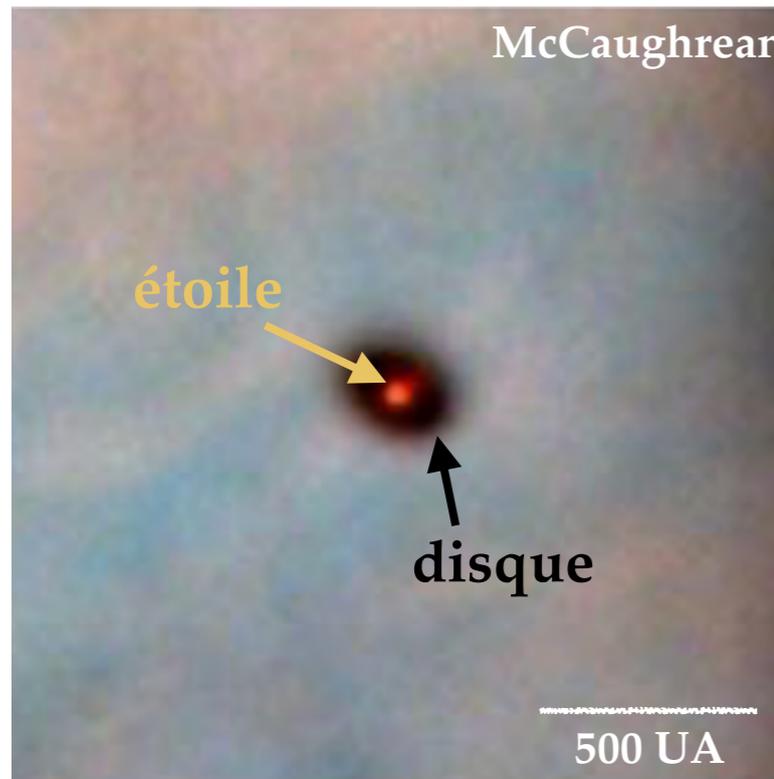
“Pilliers de la Création” dans la Nébuleuse de l’Aigle

Des nuages moléculaires aux disques protoplanétaires



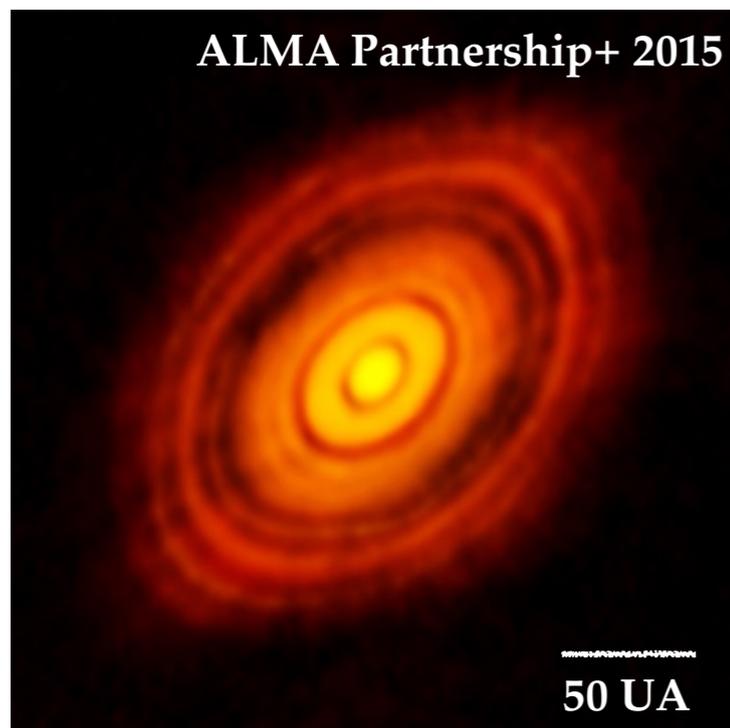
"Pilliers de la Création" dans la Nébuleuse de l'Aigle

Observations de disques protoplanétaires

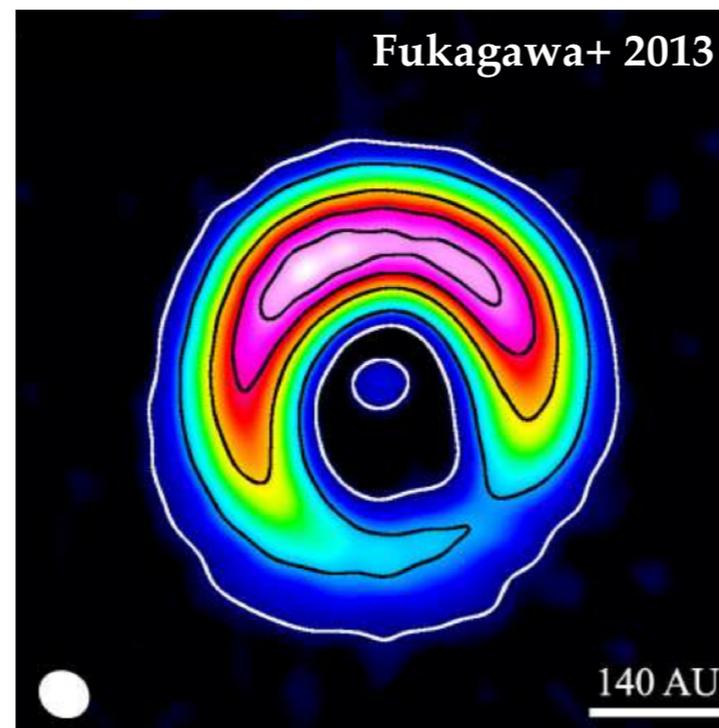


Disques dans *Orion* (émission composite du gaz dans l'optique)

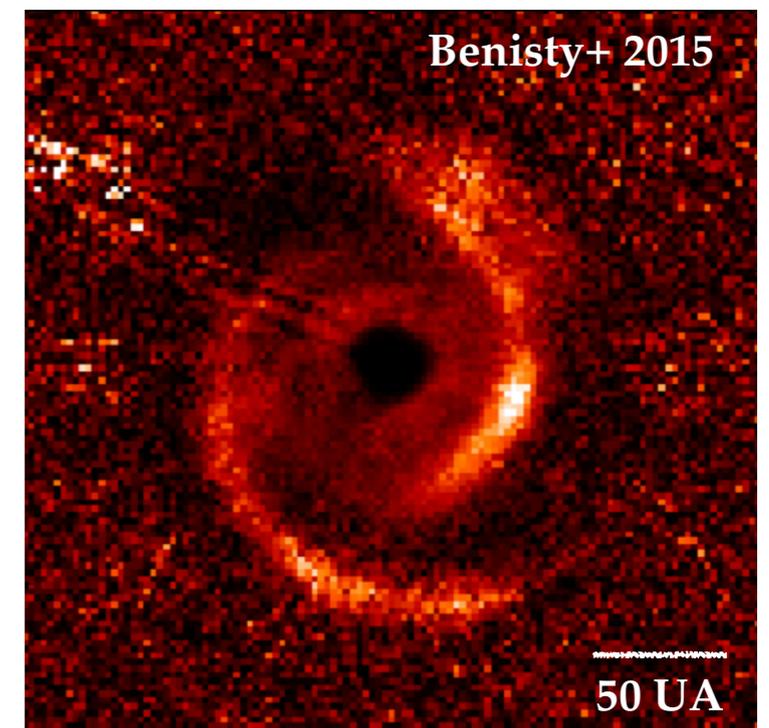
Disque et jet autour de HH 30 (optique)



HL Tau (radio)



HD142527 (radio)



MWC 758 (proche infrarouge)

Formation and Evolution of Planetary Systems

— a huge diversity of length and time scales

protoplanetary disk

- solids (from $\sim\mu\text{m}$ to $\sim\text{km}$ in size),
the building blocks of planets

- gas (99% of disks mass), part of
it will form planets atmosphere

size $\sim 100 \text{ AU} \sim 10^{10} \text{ km}$

lifetime $\sim 10^{6-7} \text{ yr}$

$\sim 10^{6-8} \text{ yr}$ for terrestrial
planets in the Solar System
 $< 10^{6-7} \text{ yr}$ for giant planets

planet formation

planet core
 $\sim 10^{3-4} \text{ km}$

planetesimals

$\sim 1-100 \text{ km}$ (like comets, asteroids)

pebbles
 $\sim \text{cm}$

dust
 $\sim \mu\text{m}$

meteorites (on Earth)
 $\sim \text{mm}-10\text{km}$

giant planet
 $\sim 10^5 \text{ km}$

planet evolution

- orbital evolution as planets interact with the
protoplanetary disk and with other planets

$< 10^{6-7} \text{ yr}$

- internal evolution $\sim 10^{6-9} \text{ yr}$

10^5-10^9 yr

Des questions?

Références suggérées:

- *Armitage 2007, Lecture notes on the formation and early evolution of planetary systems*
<https://arxiv.org/abs/astro-ph/0701485>
- *Wright & Gaudi 2013, Exoplanet detection methods*
<https://arxiv.org/abs/1210.2471>