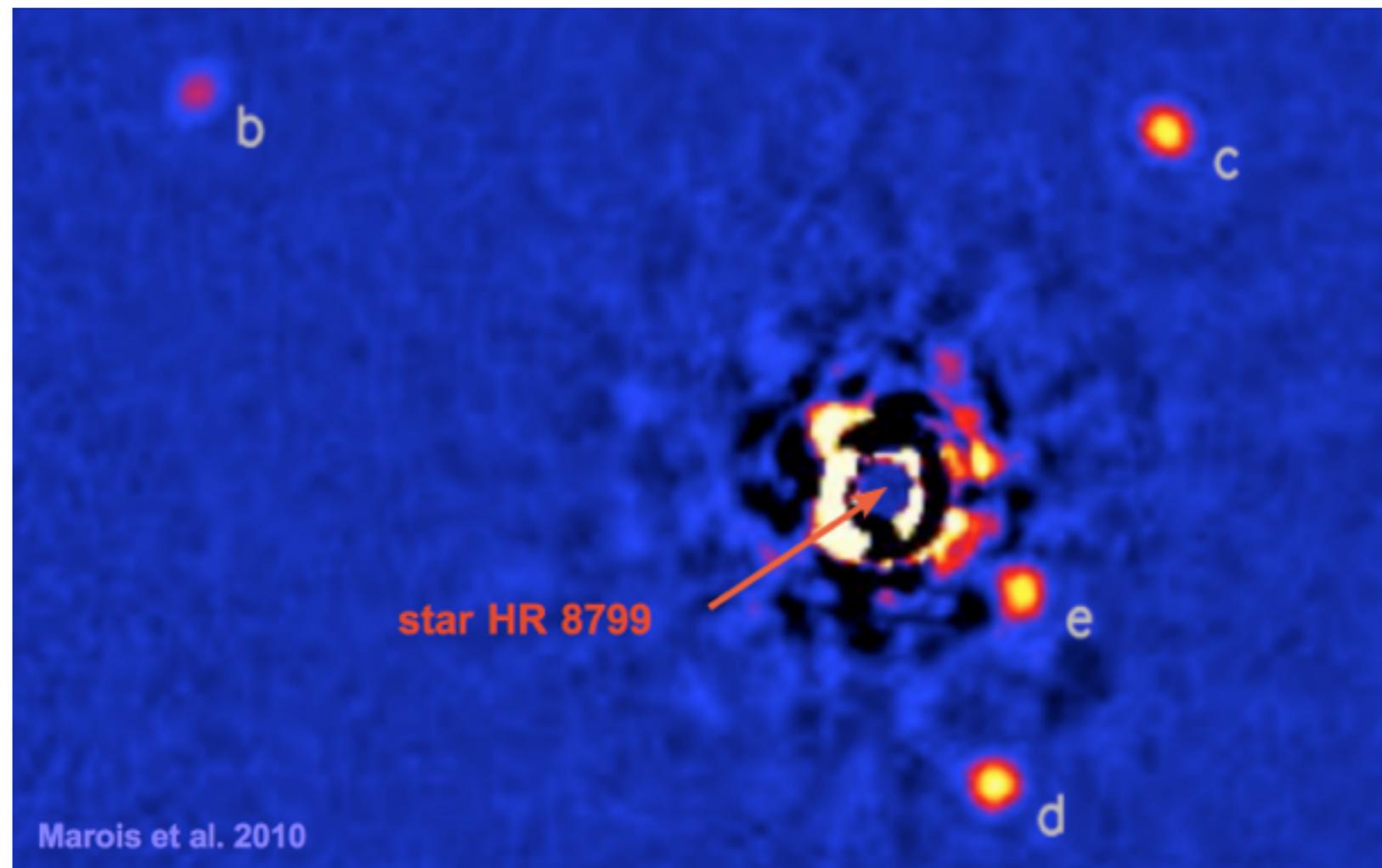


# Les systèmes planétaires extrasolaires



**Clément Baruteau**

CNRS / Institut de Recherche en Astrophysique et Planétologie

---

*Summer Camp OCEVU, IRAP, 13/06/2016*

# Plan

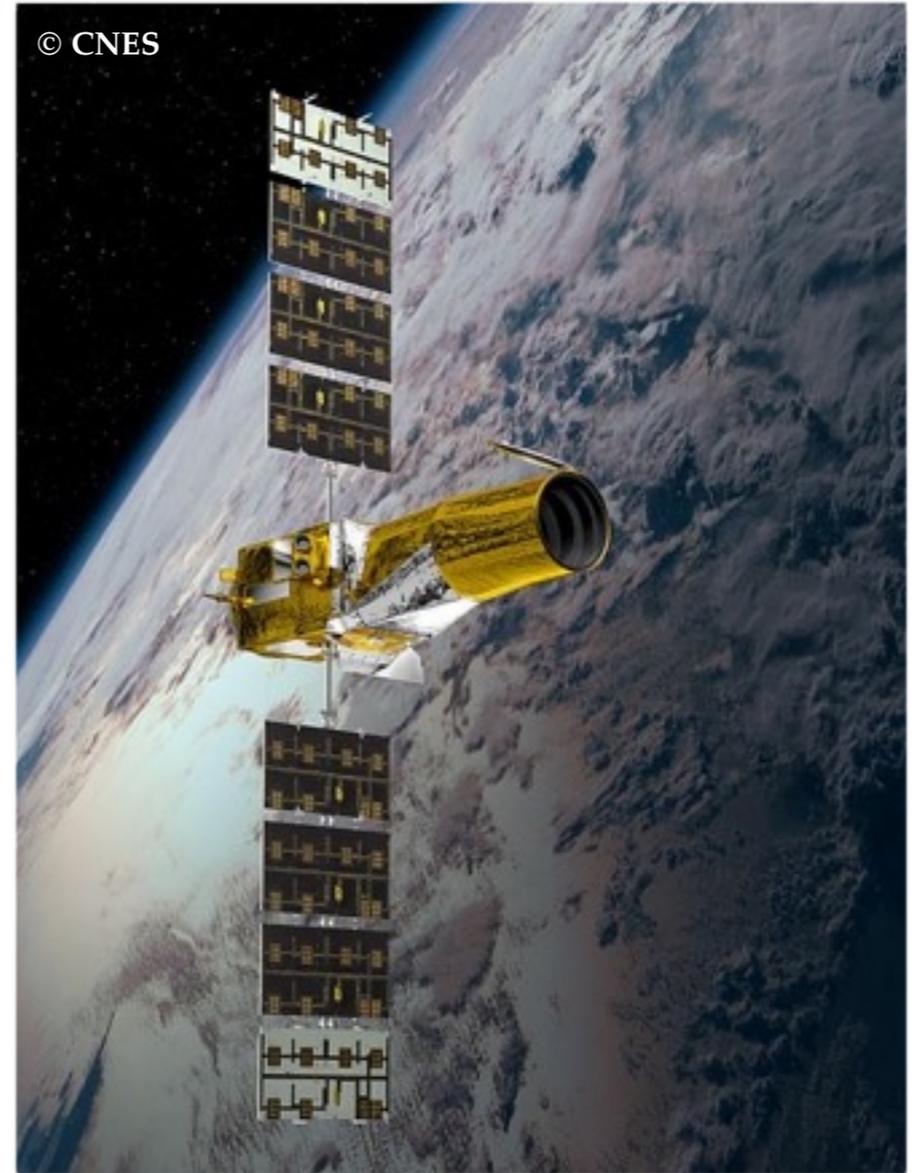
- Méthodes de détection des exoplanètes
- Caractérisation des exoplanètes
- Formation et évolution des systèmes planétaires

© Ministère de la Culture



Télescope de 193 cm à l'Observatoire de Haute Provence

© CNES

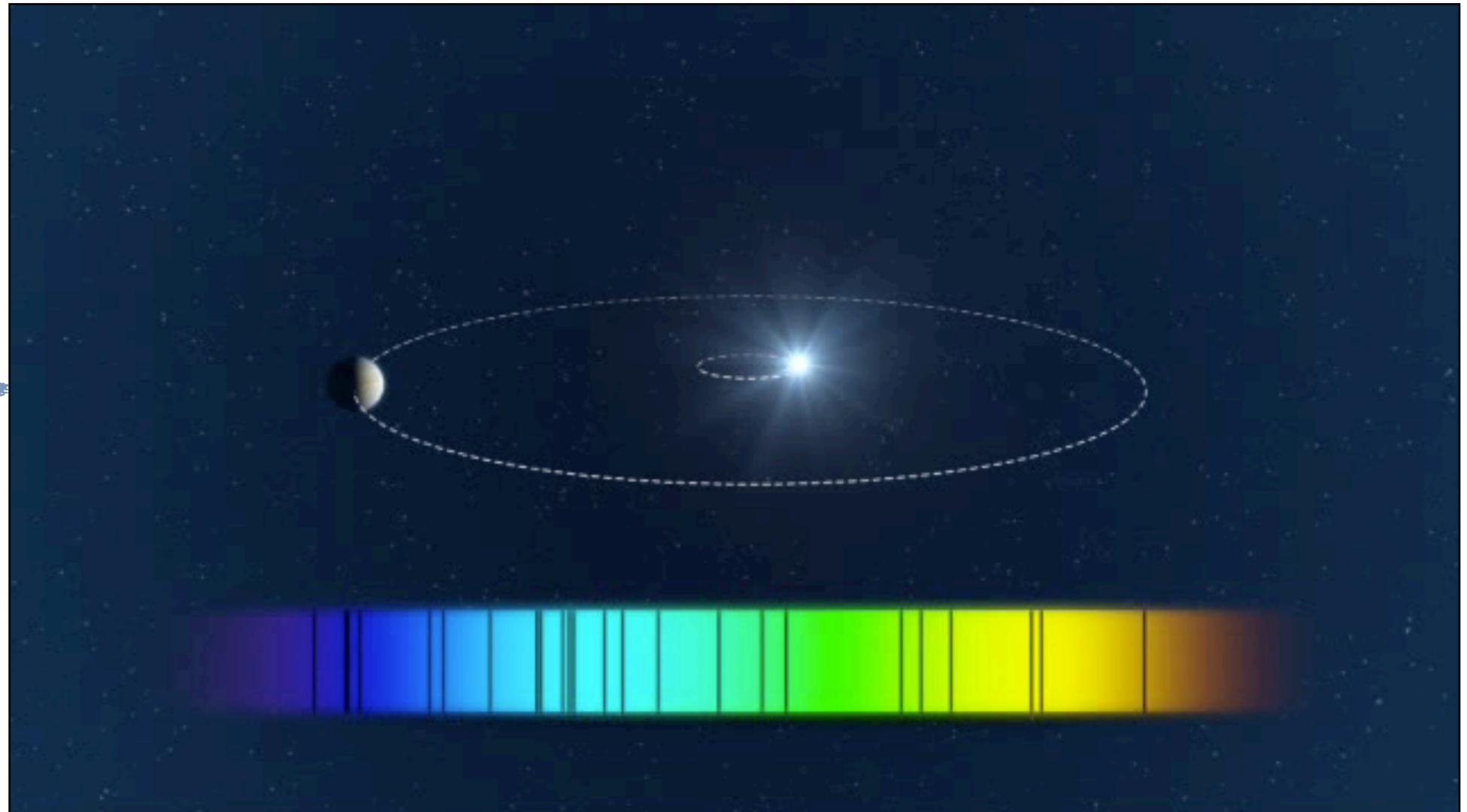


Télescope spatial CoRoT

# MÉTHODES DE DÉTECTION DES EXOPLANÈTES

---

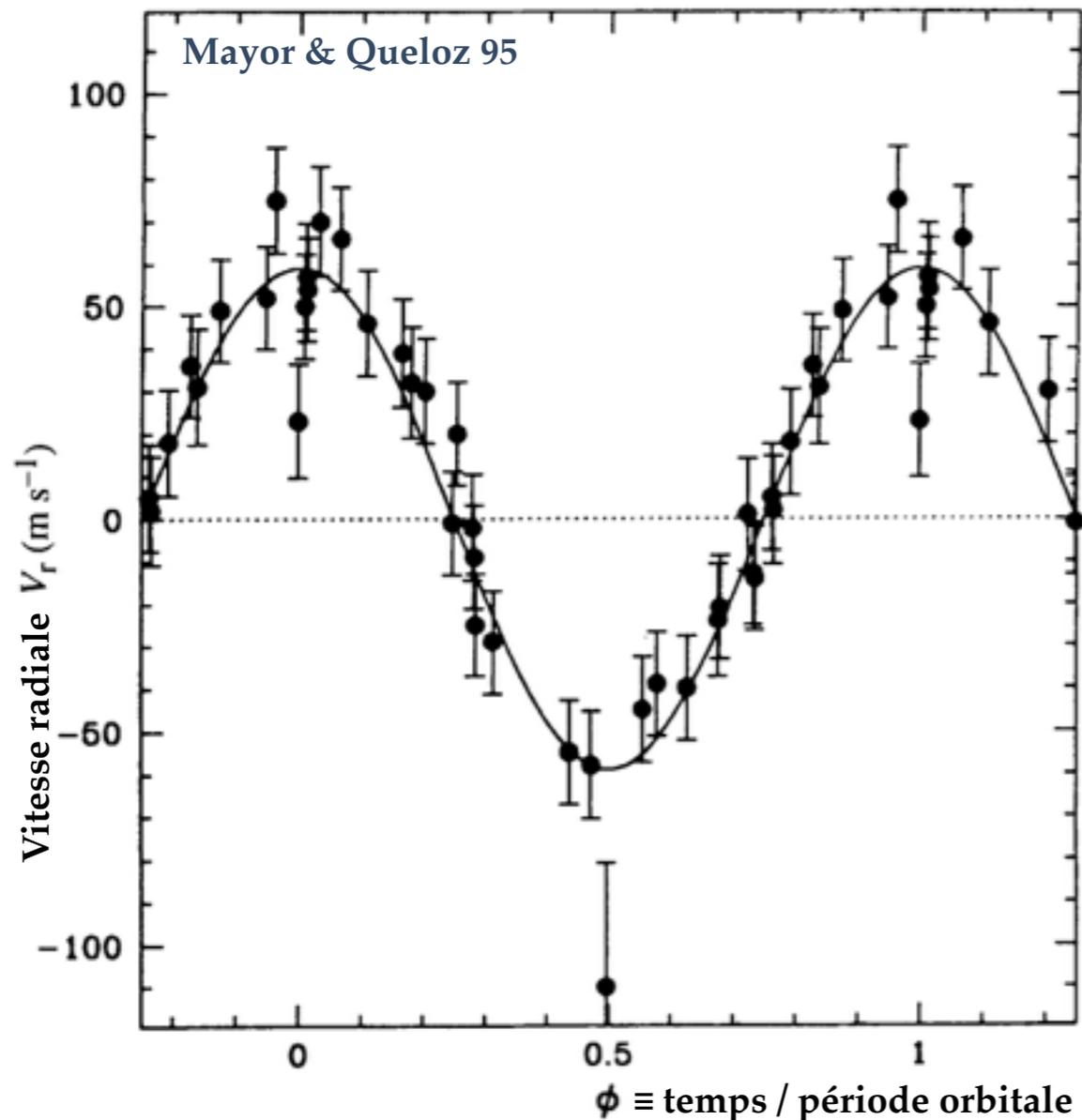
# Détecter les exoplanètes par le spectre de leur étoile



© 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

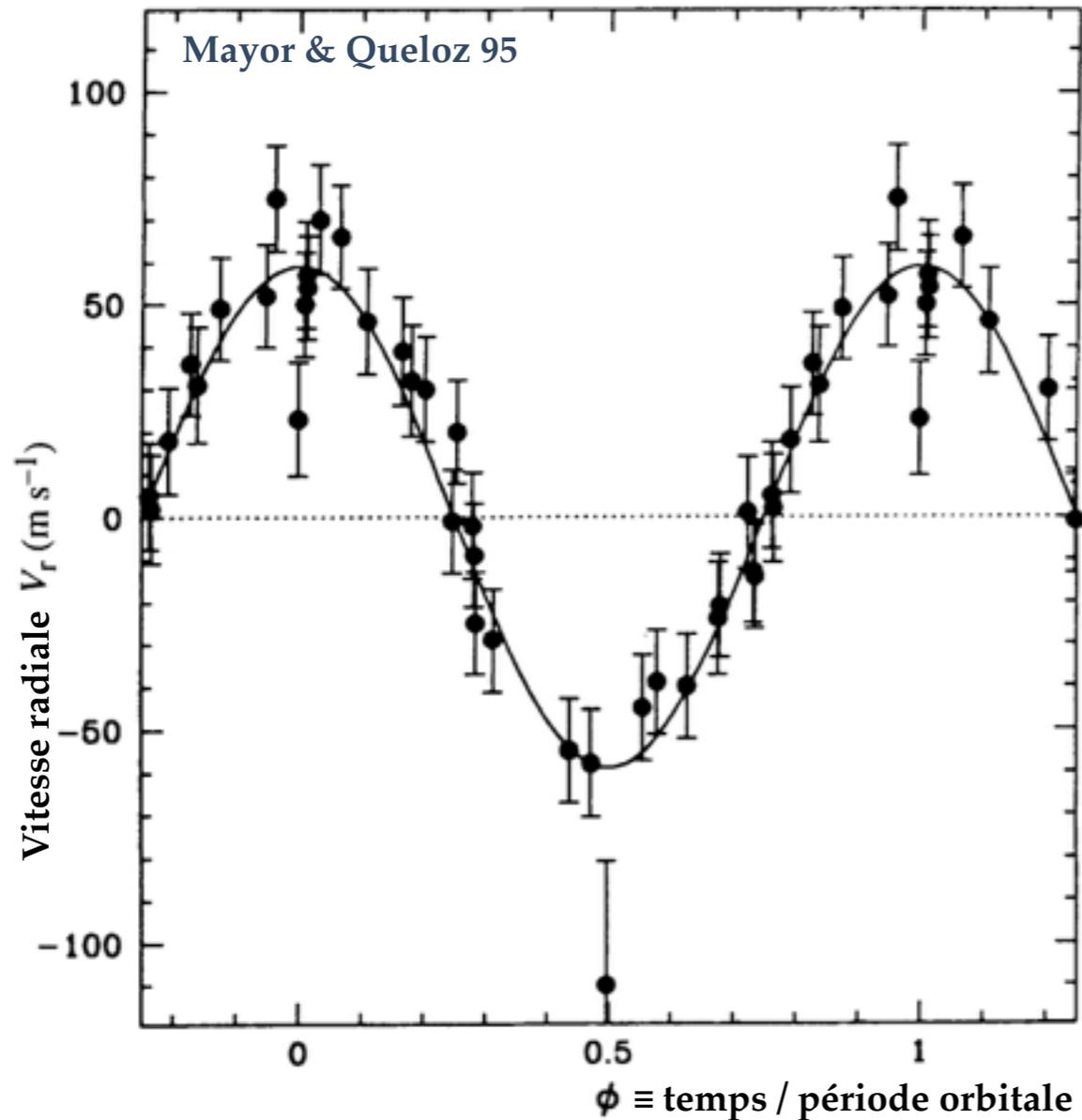


← Vitesse radiale de l'étoile 51-Pegasi

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

rappel: 1UA = distance moyenne Terre-Soleil = 150 millions de km

# Détecter les exoplanètes par le spectre de leur étoile



## ← Vitesse radiale de l'étoile 51-Pegasi

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

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

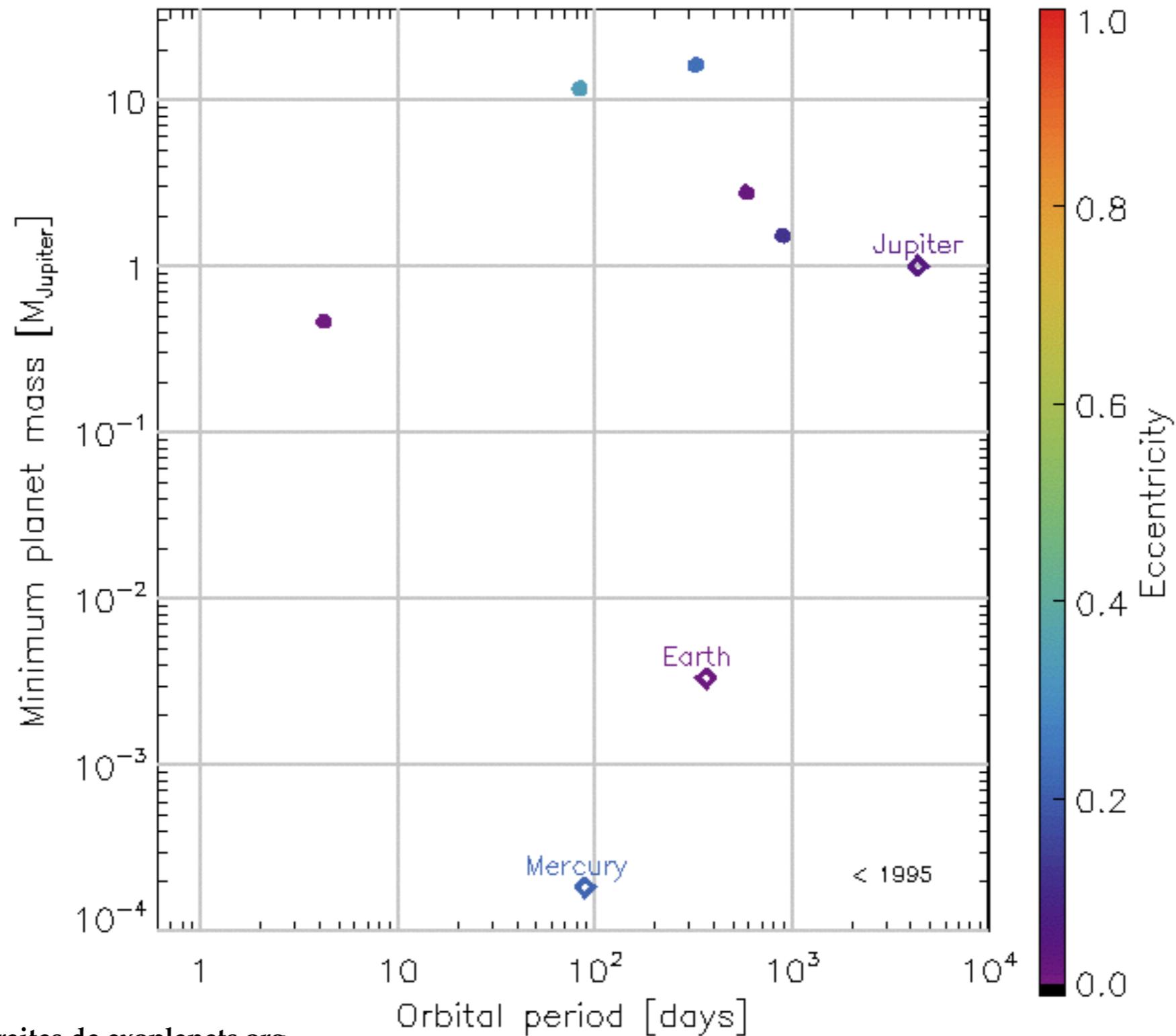
51-Peg 51-Peg-b

Sun

Mercury

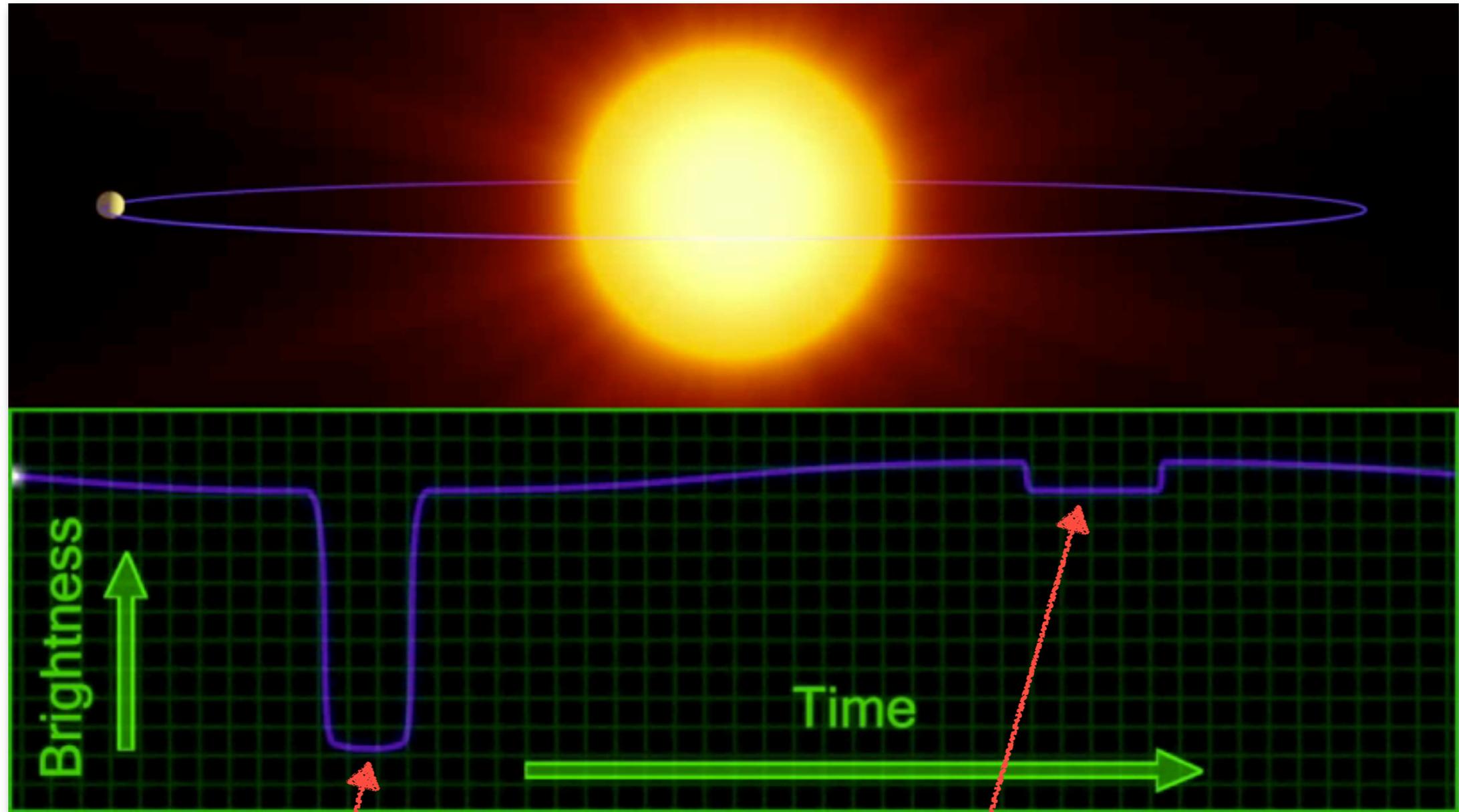
Venus

# Détecter les exoplanètes par le spectre de leur étoile



données extraites de [exoplanets.org](http://exoplanets.org)

# Détecter les exoplanètes par le transit de leur étoile



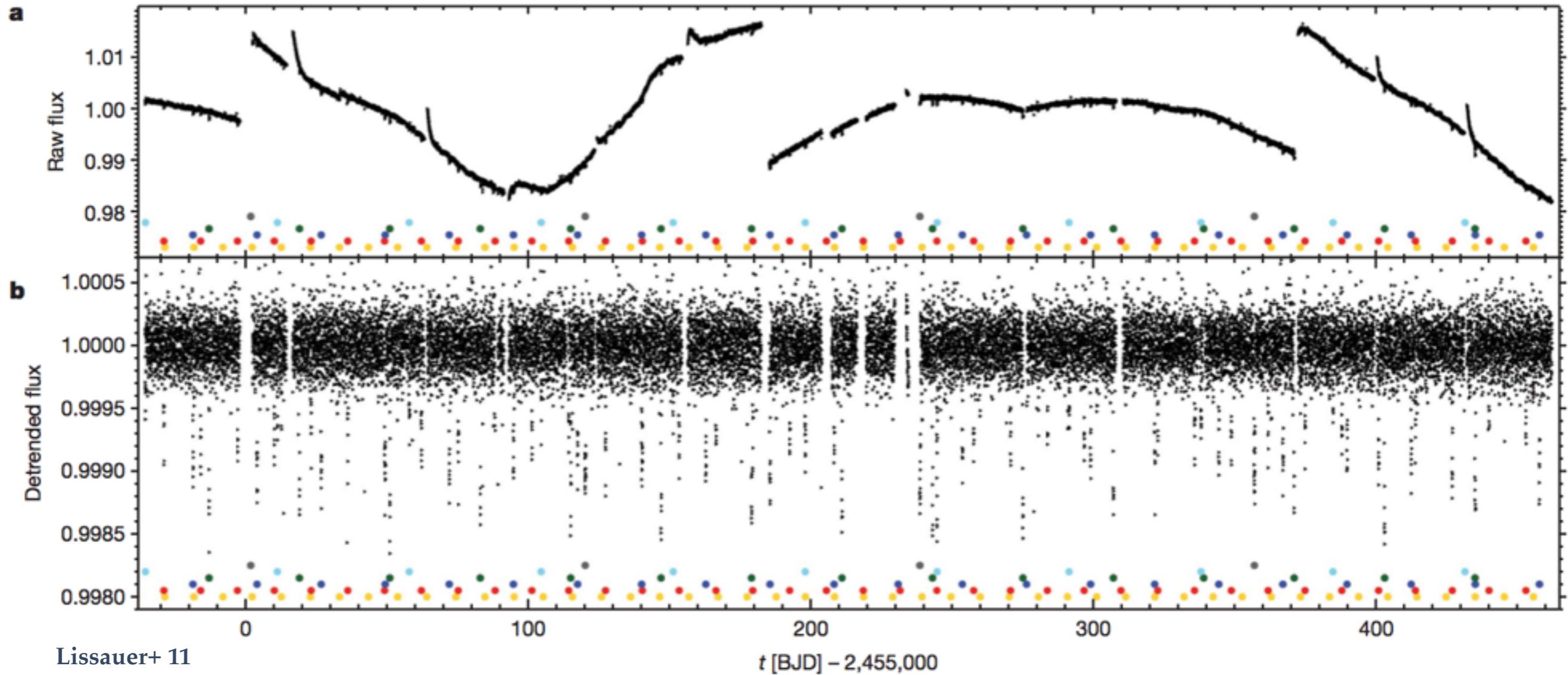
© Spitzer Space Telescope Website

transit

éclipse secondaire

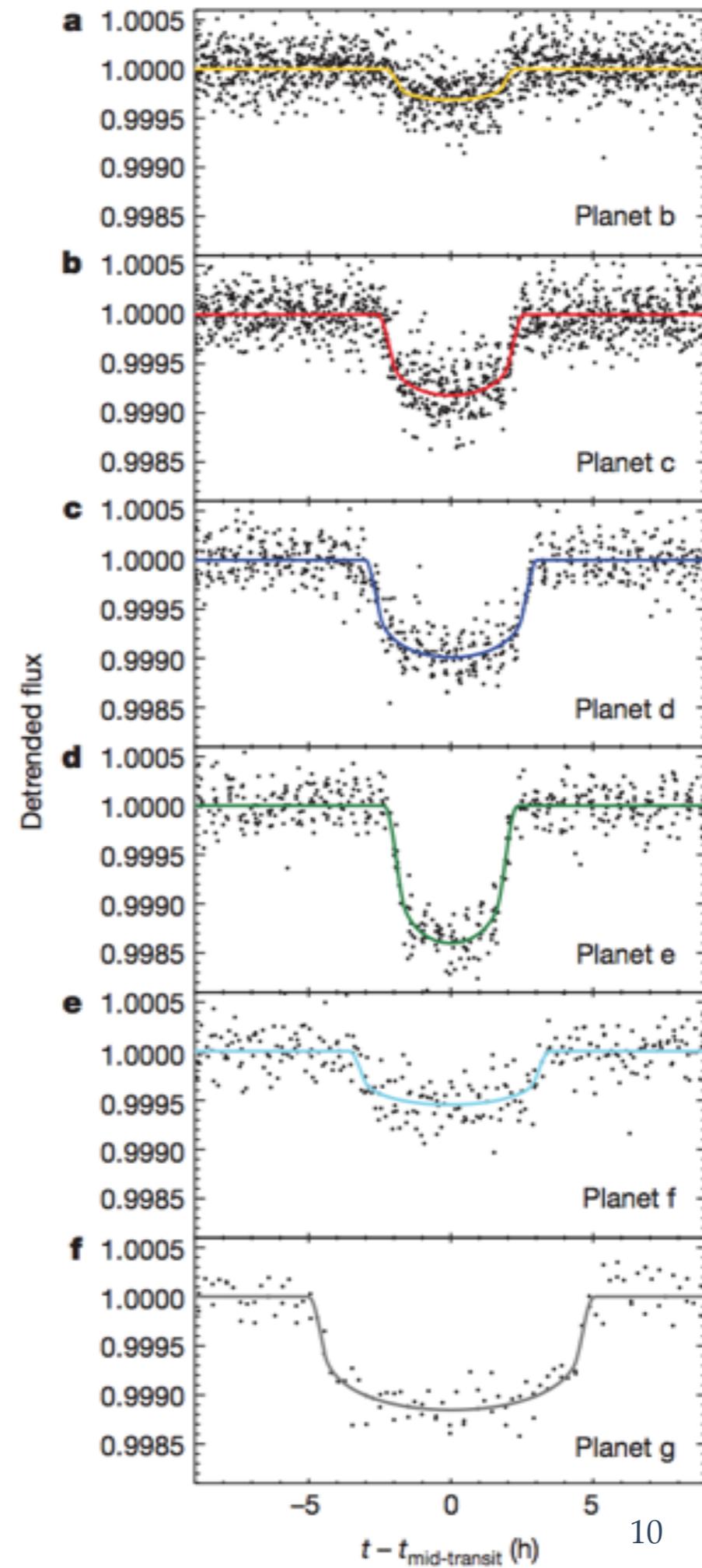
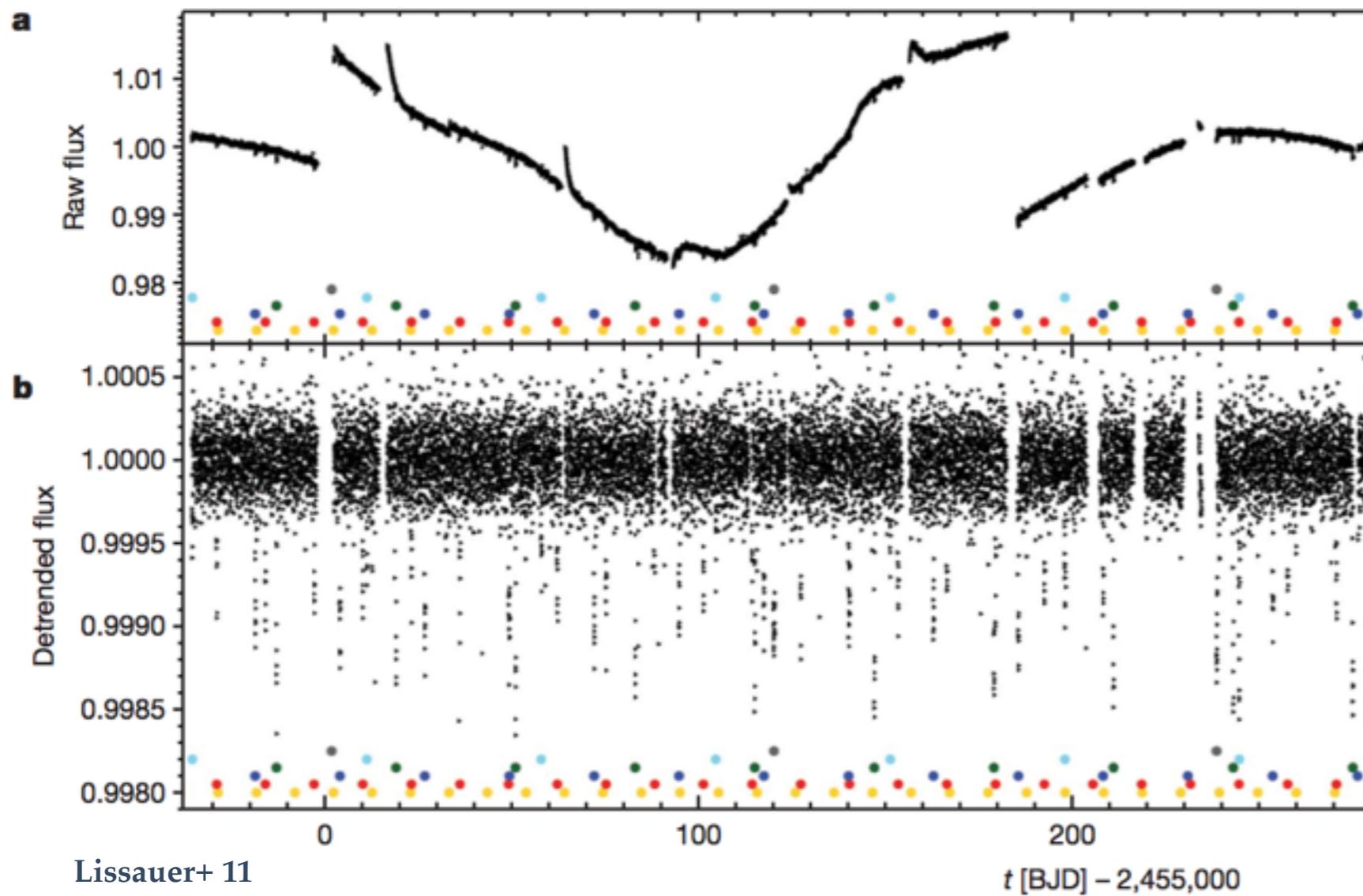
# Détecter les exoplanètes par le transit de leur étoile

## Les 6 planètes autour de l'étoile Kepler-11



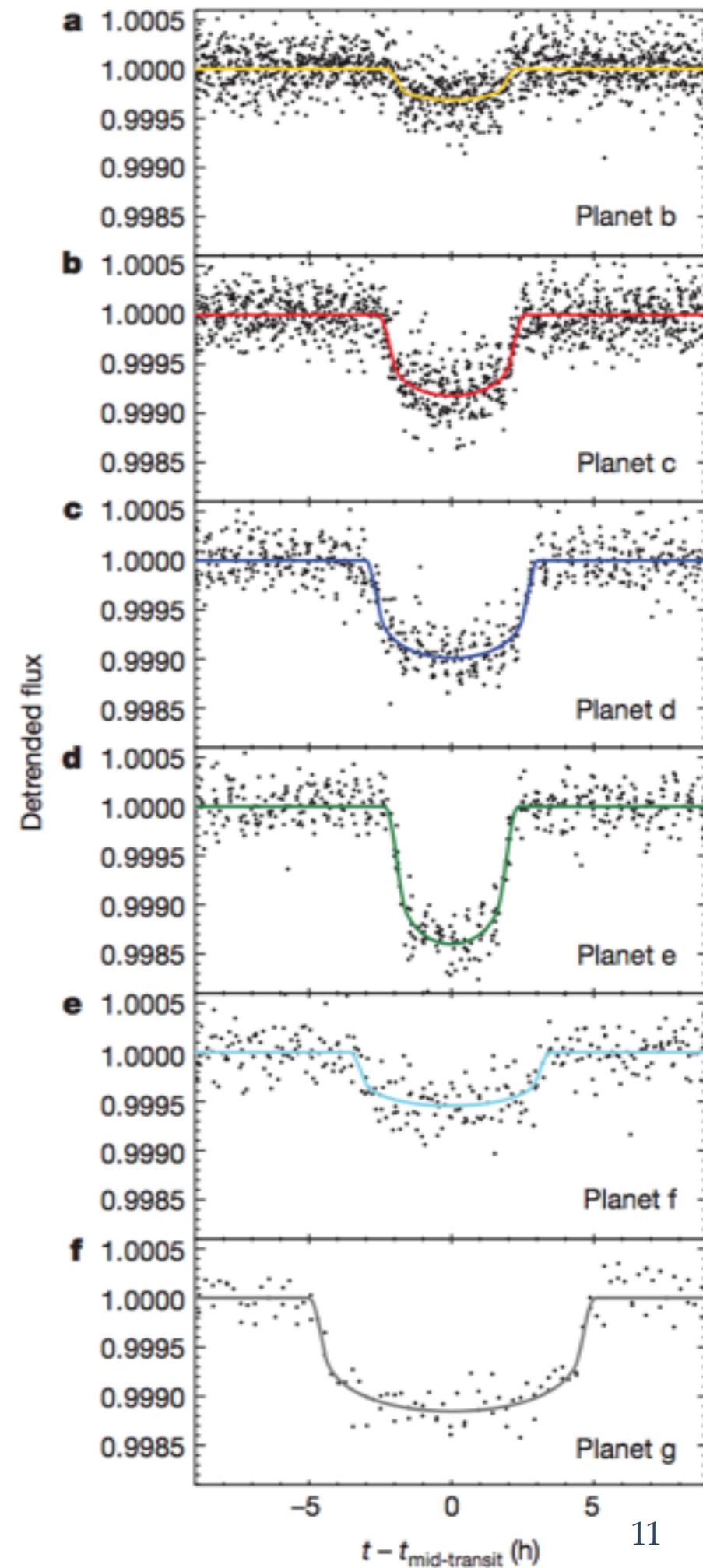
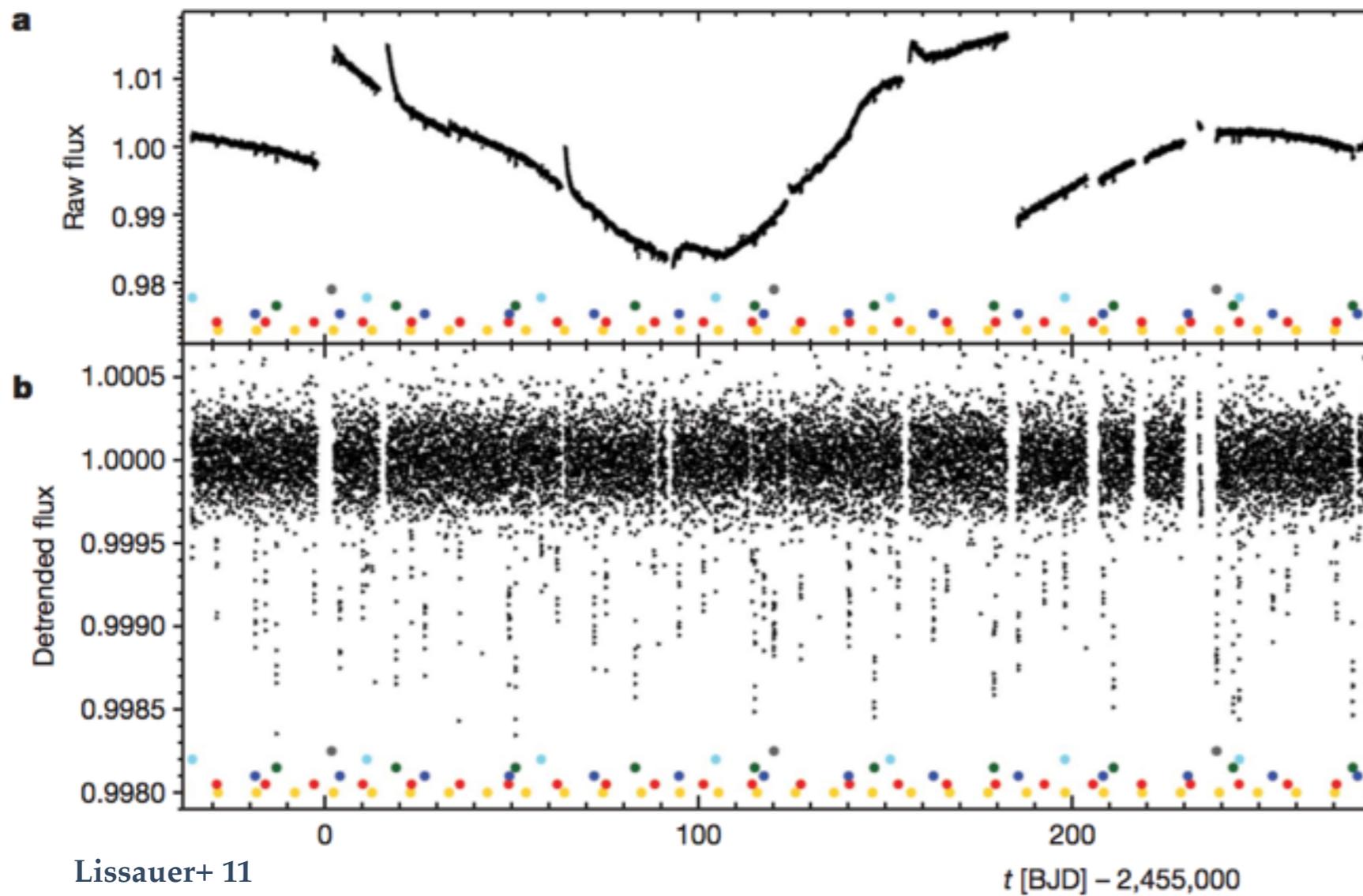
# Détecter les exoplanètes par le transit

## Les 6 planètes autour de l'étoile K



# Détecter les exoplanètes par le transit

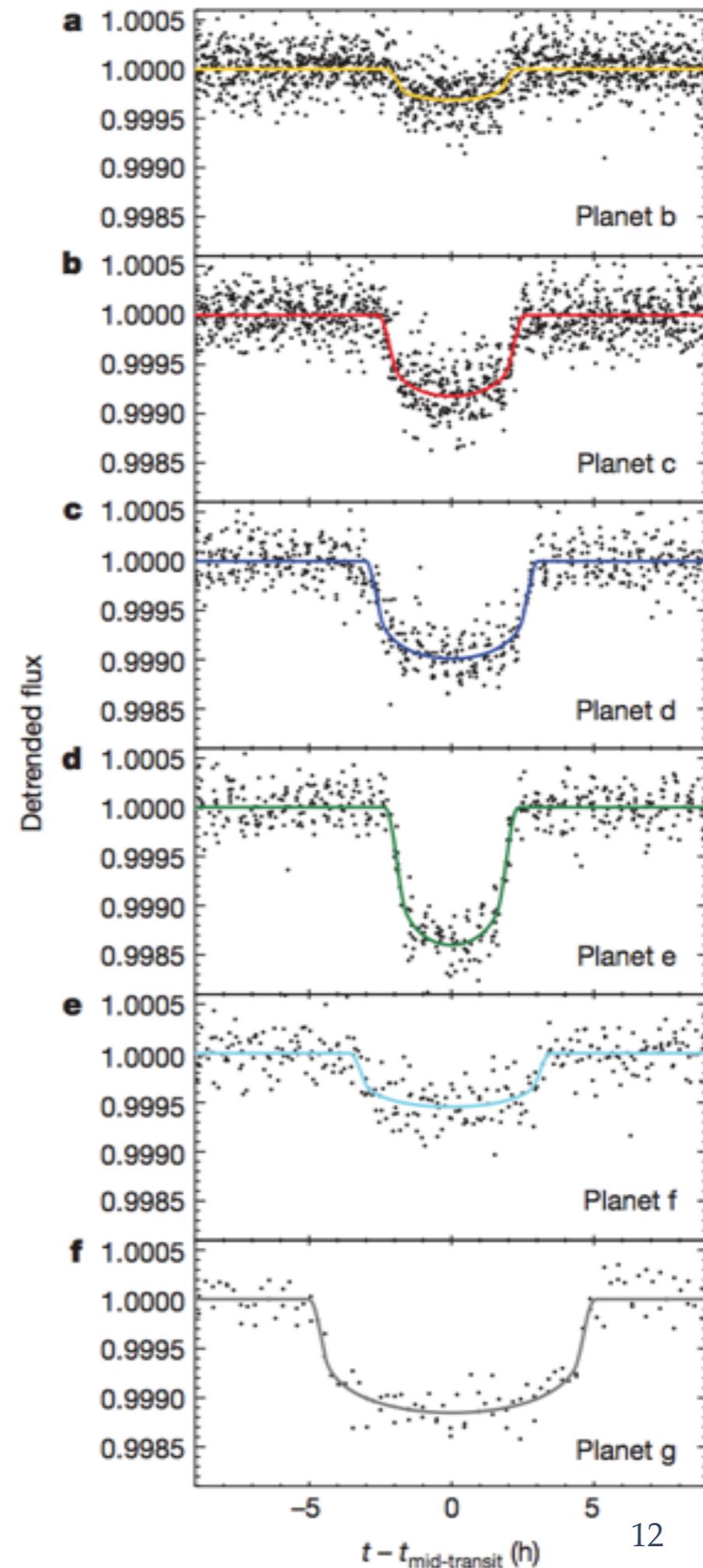
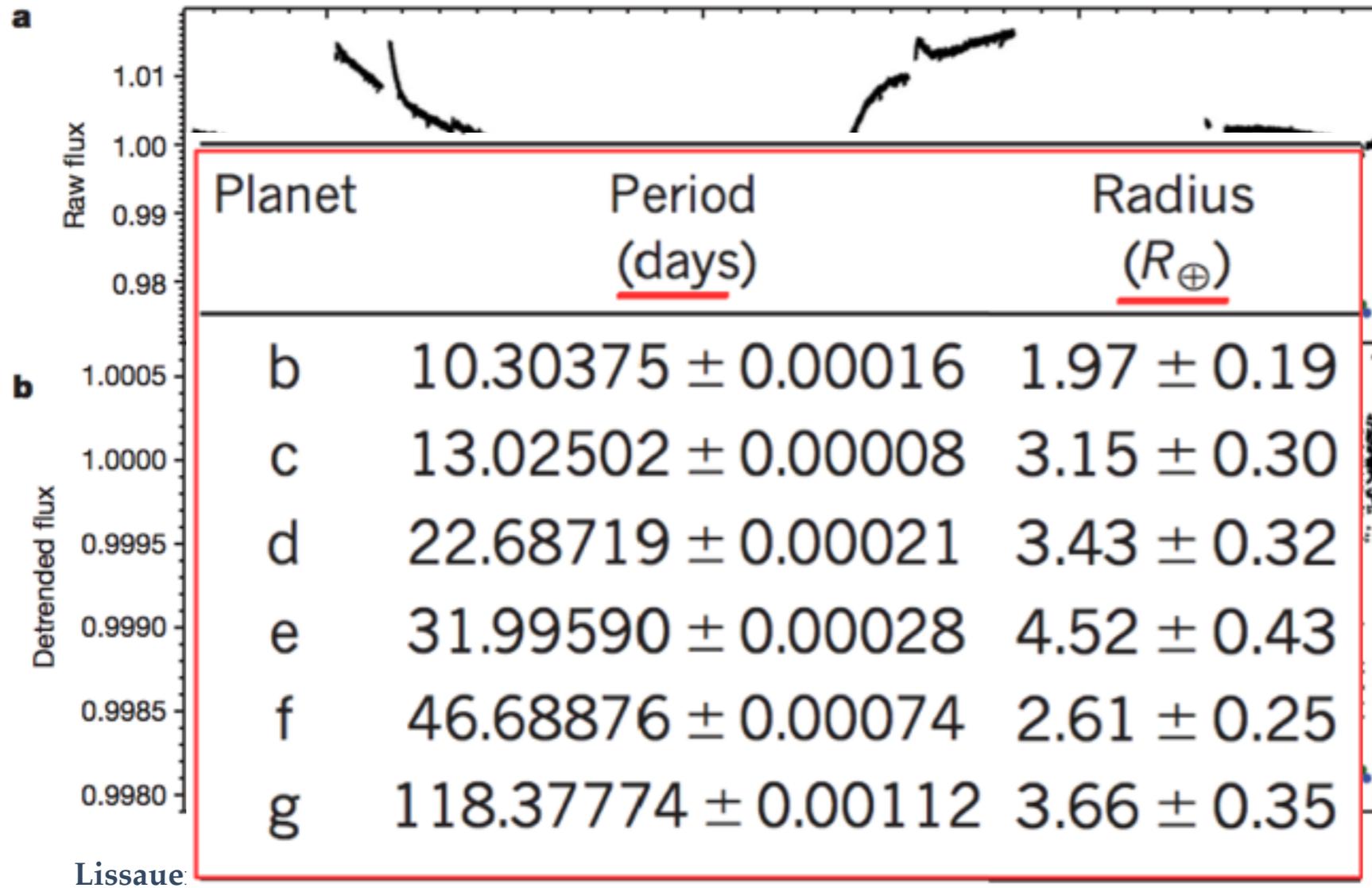
## Les 6 planètes autour de l'étoile K



- 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

# Détecter les exoplanètes par le transit

## Les 6 planètes autour de l'étoile K

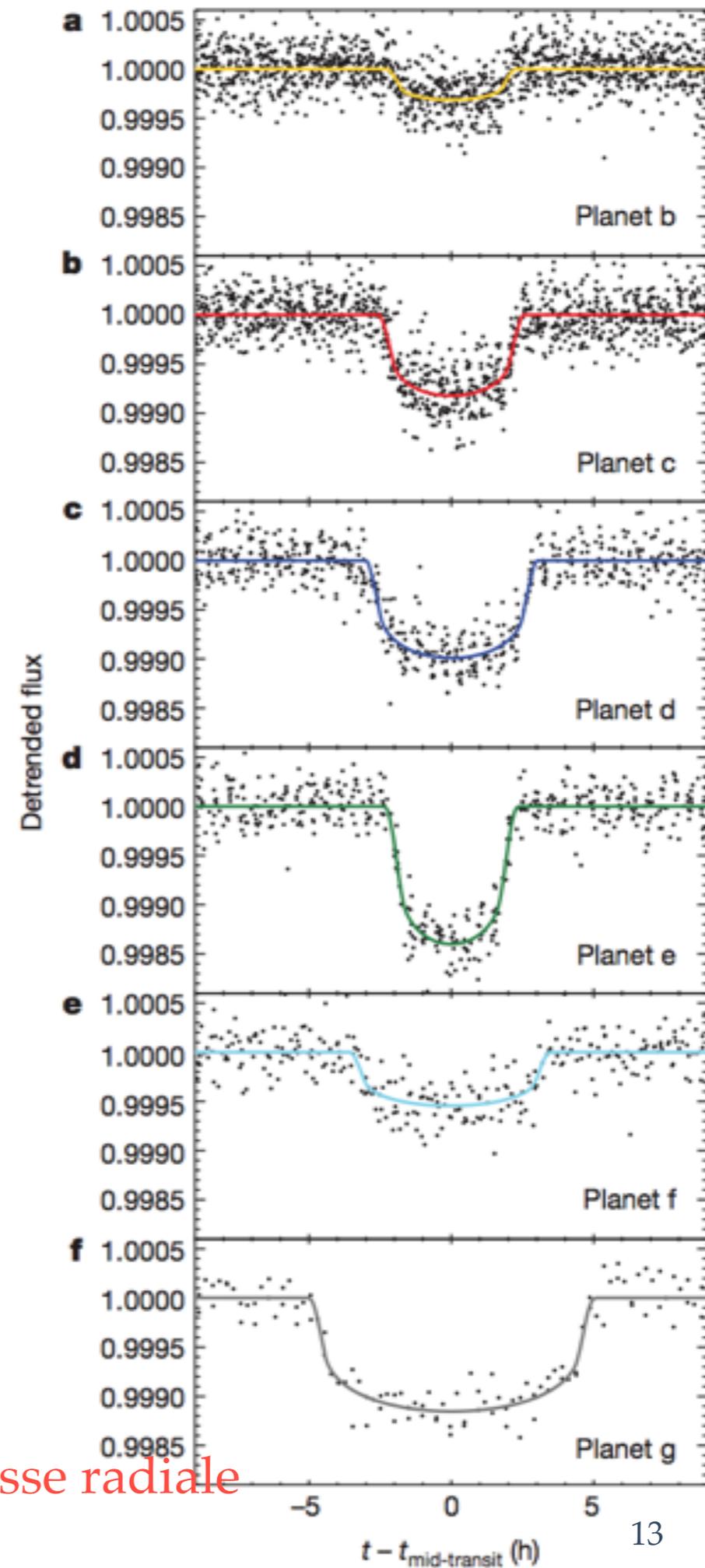
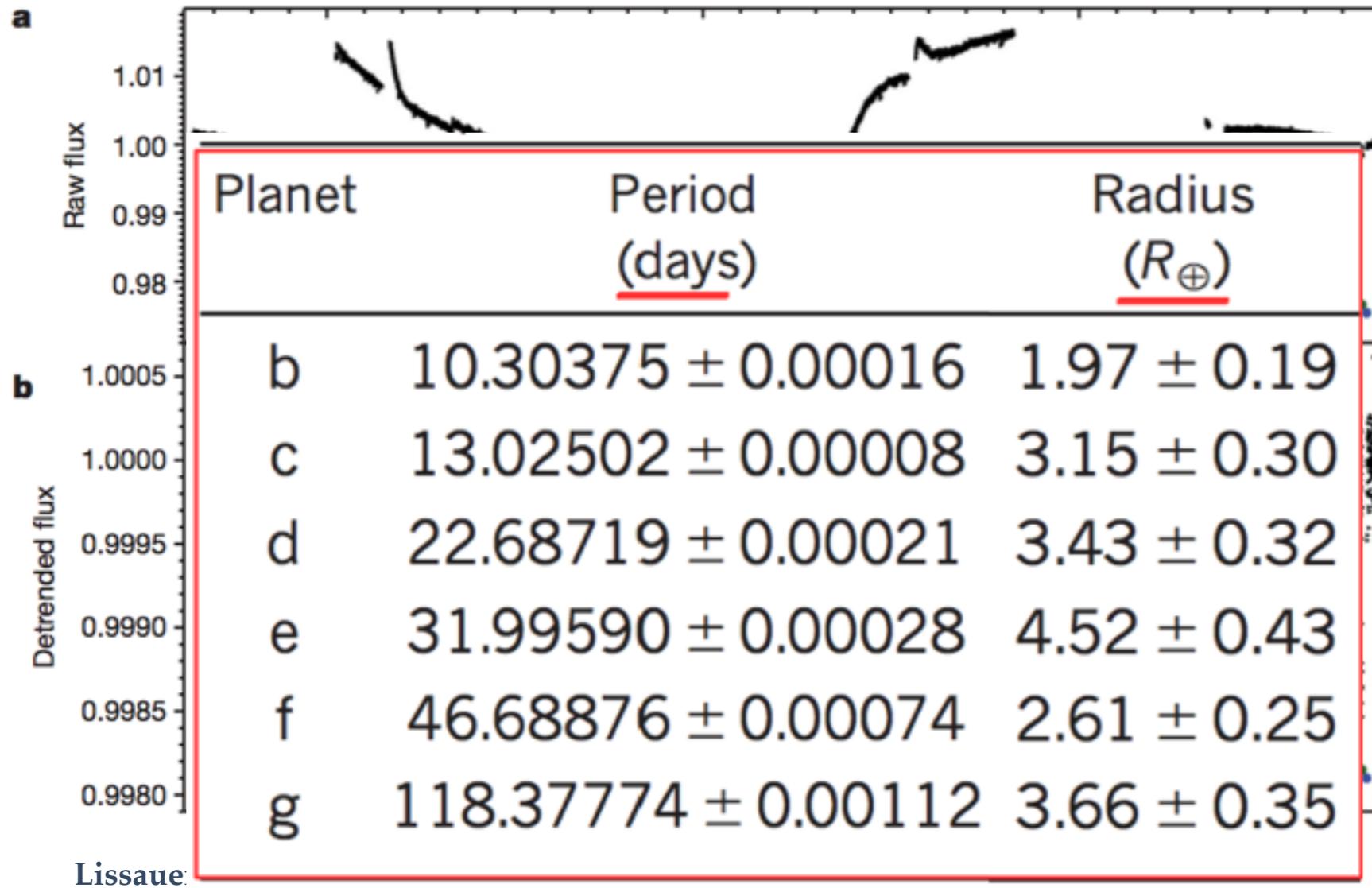


• Diminution du flux de l'étoile  $\sim (R_{\text{planète}} / R_{\text{étoile}})^2$

→  $R_{\text{planète}}$  si  $R_{\text{étoile}}$  est connu, période orbitale

# Détecter les exoplanètes par le transit

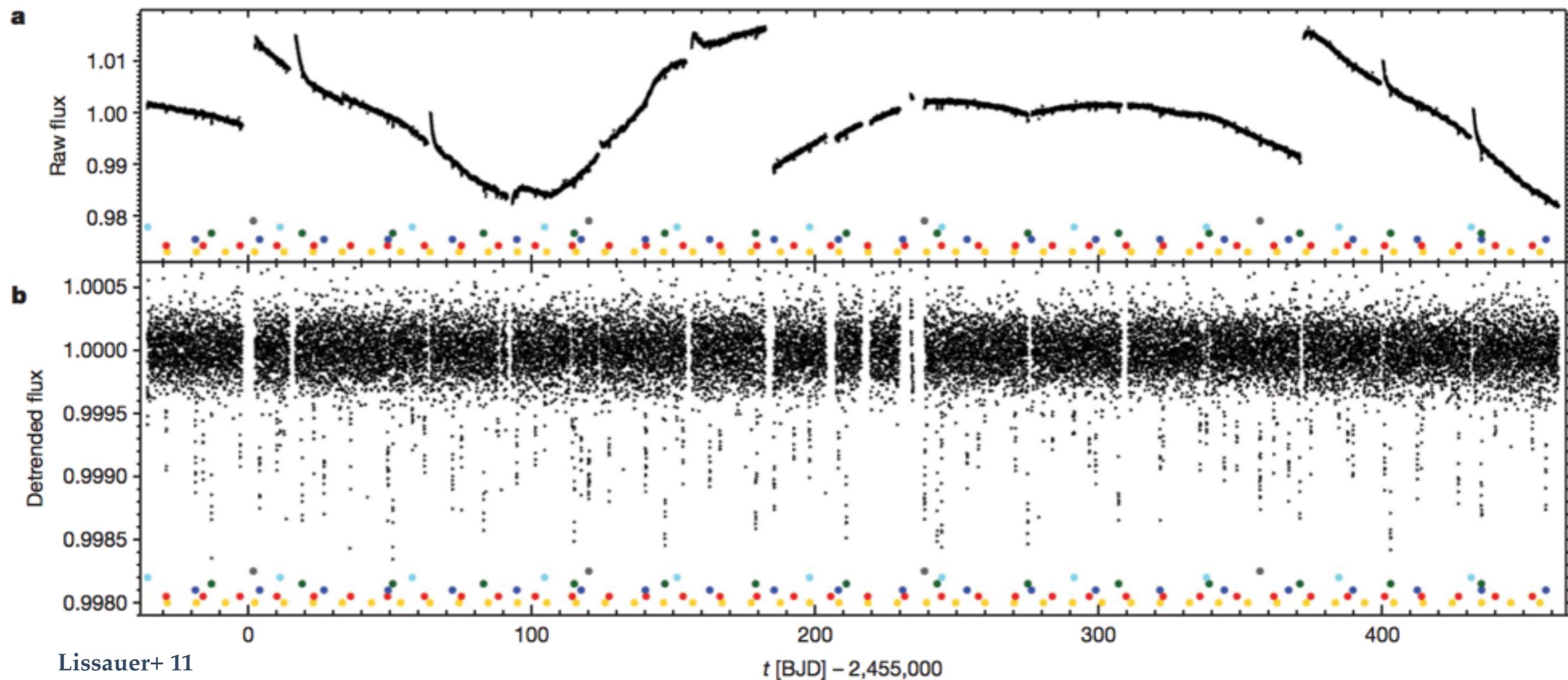
## Les 6 planètes autour de l'étoile K



- 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

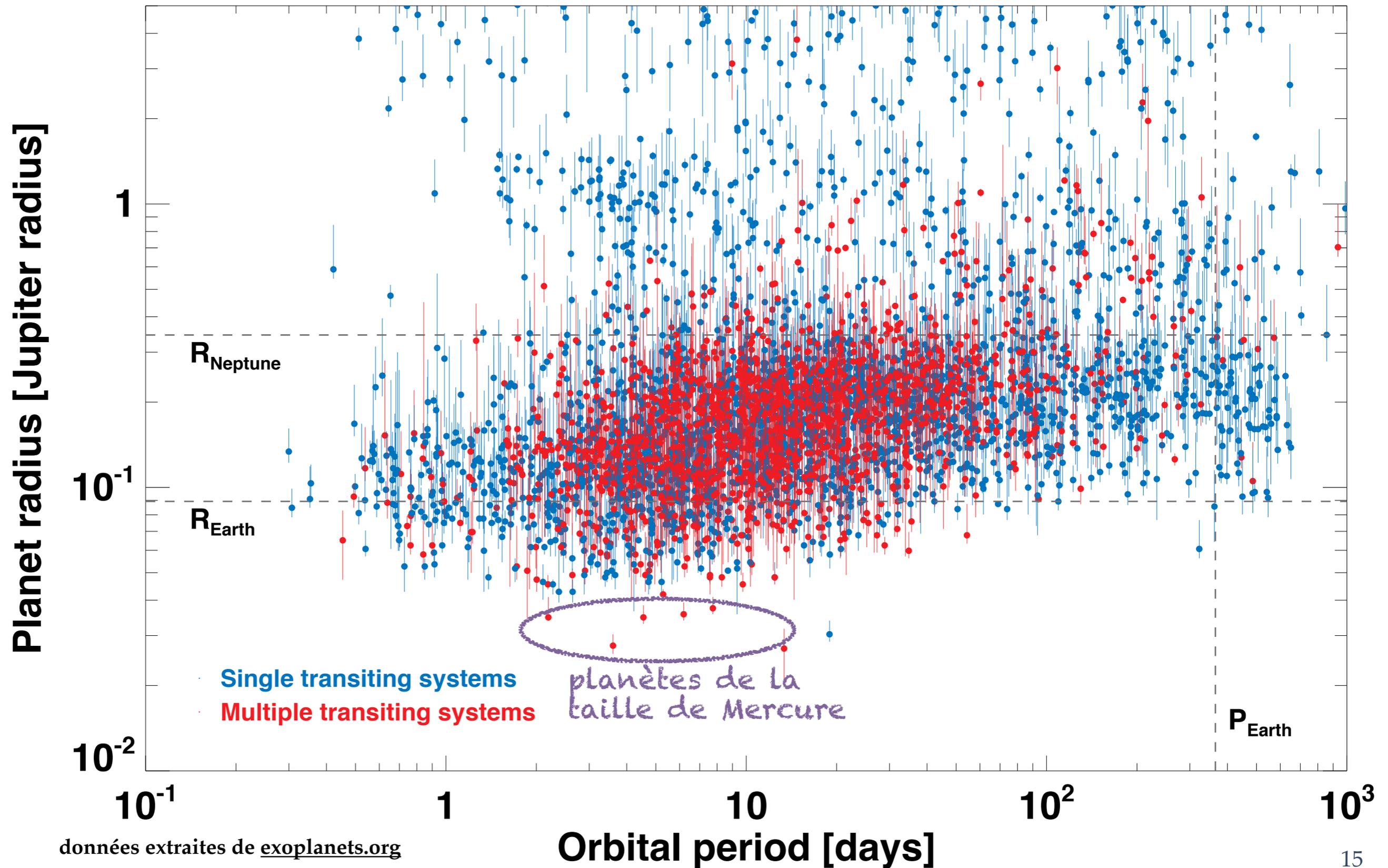
g

Sun

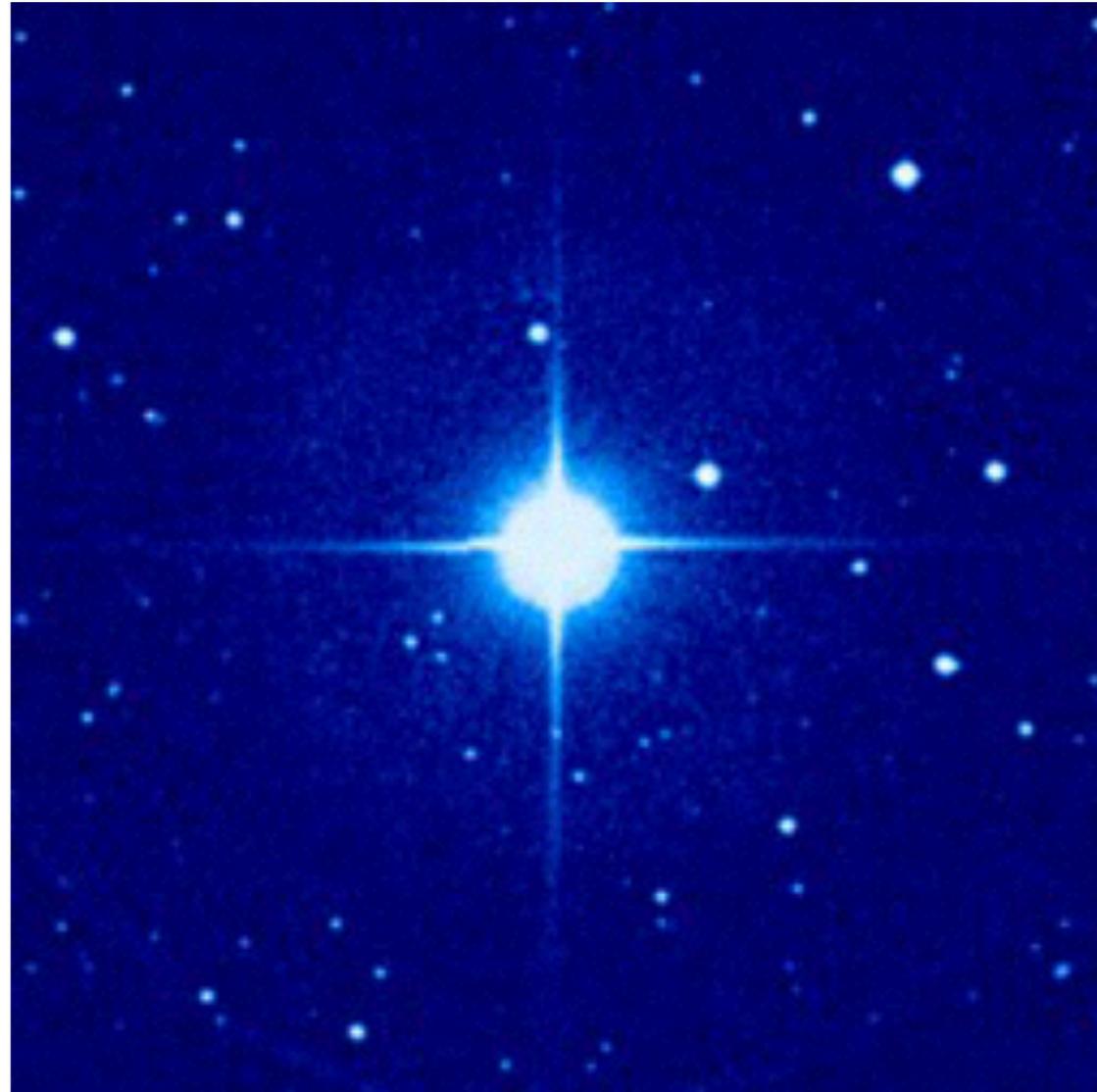
Mercury

Venus

# Détecter les exoplanètes par le transit de leur étoile

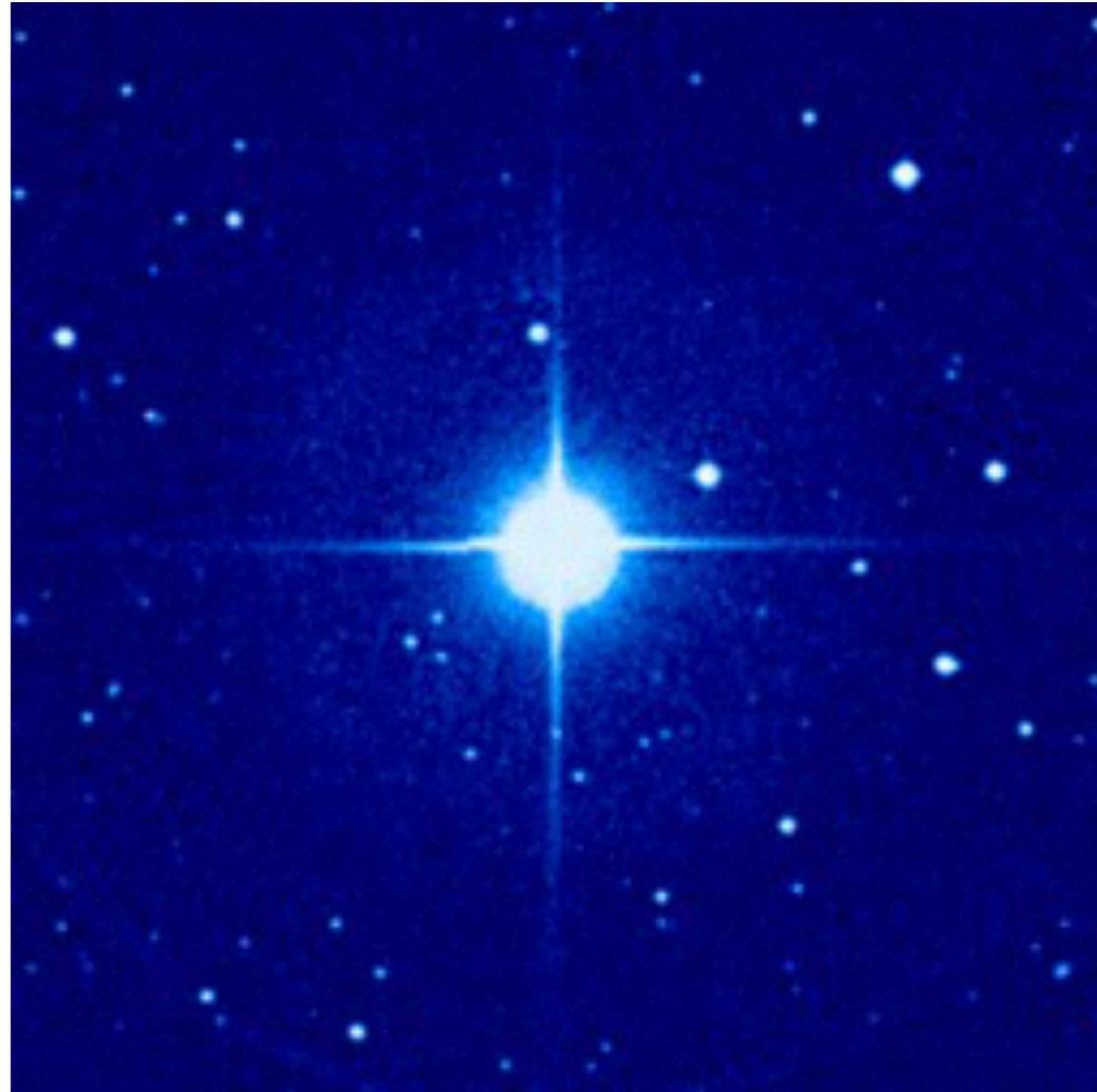


# Détection des exoplanètes par imagerie



- **Problème 1:** une étoile est typiquement  $10^6$  à  $10^9$  plus brillante qu'une planète

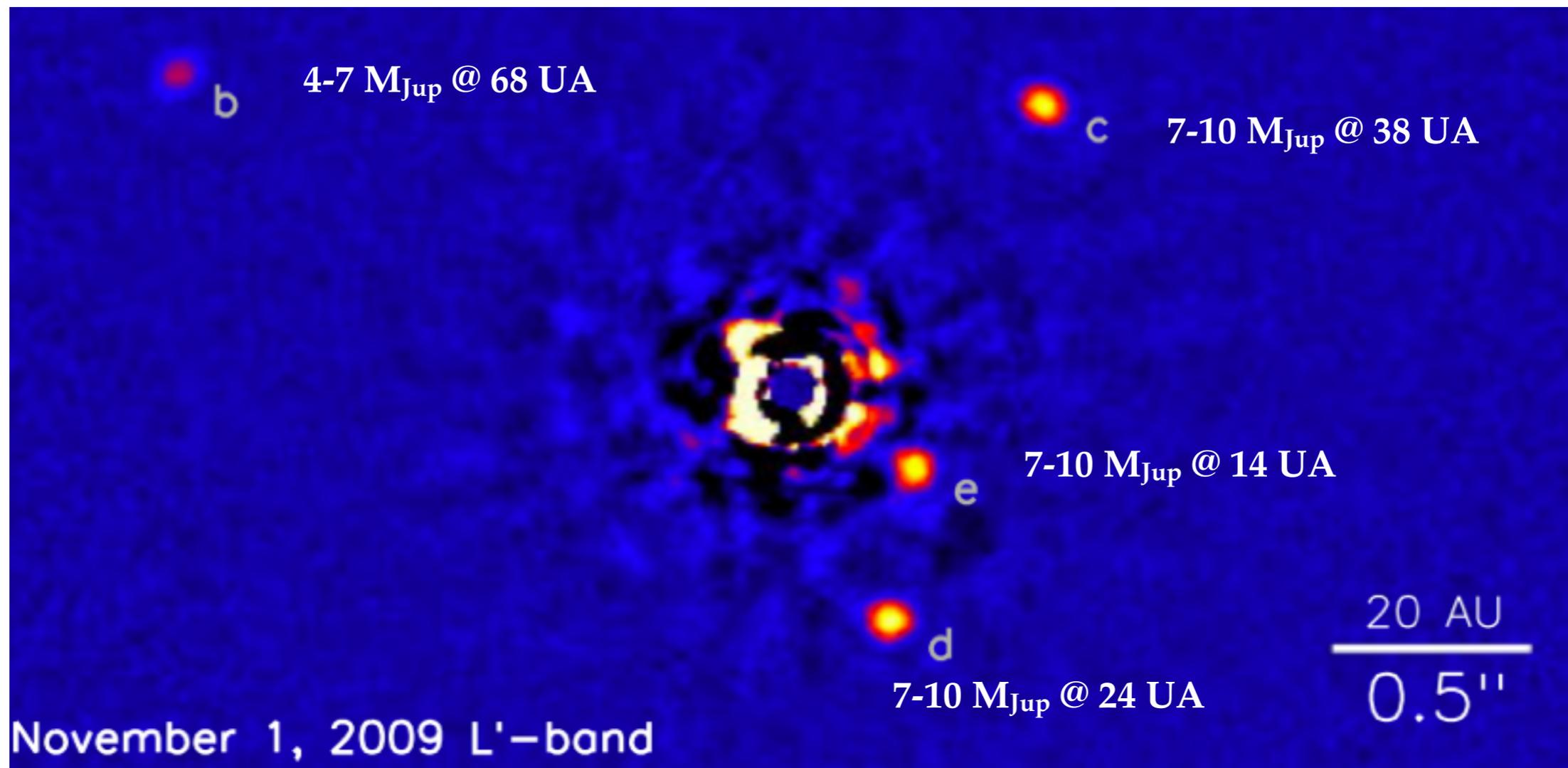
# Détection des exoplanètes par imagerie



- **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

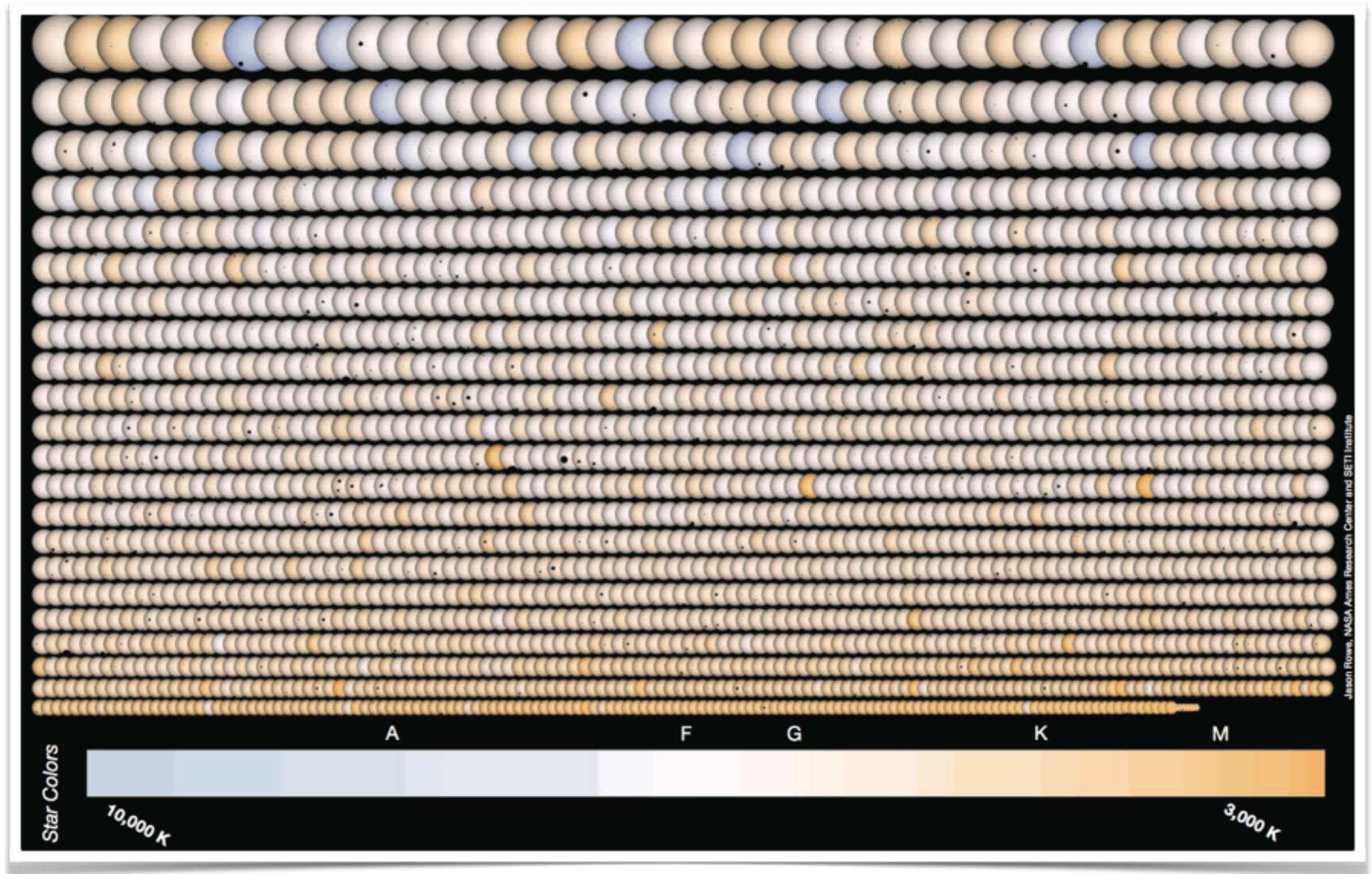
# Détection des exoplanètes par imagerie

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



Marois+ 10

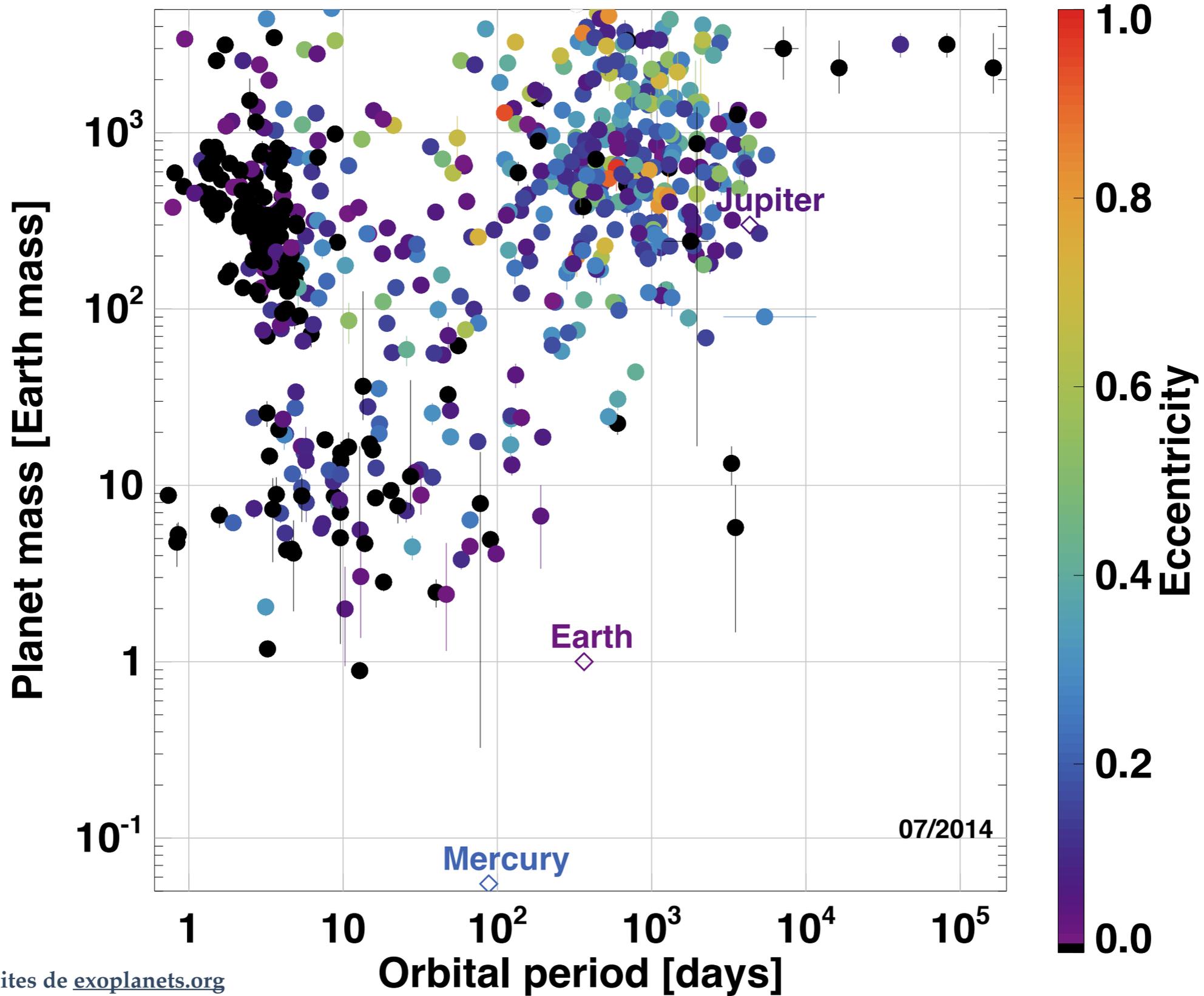
- Les masses des planètes sont estimées par leur luminosité



# CARACTÉRISATION DES EXOPLANÈTES

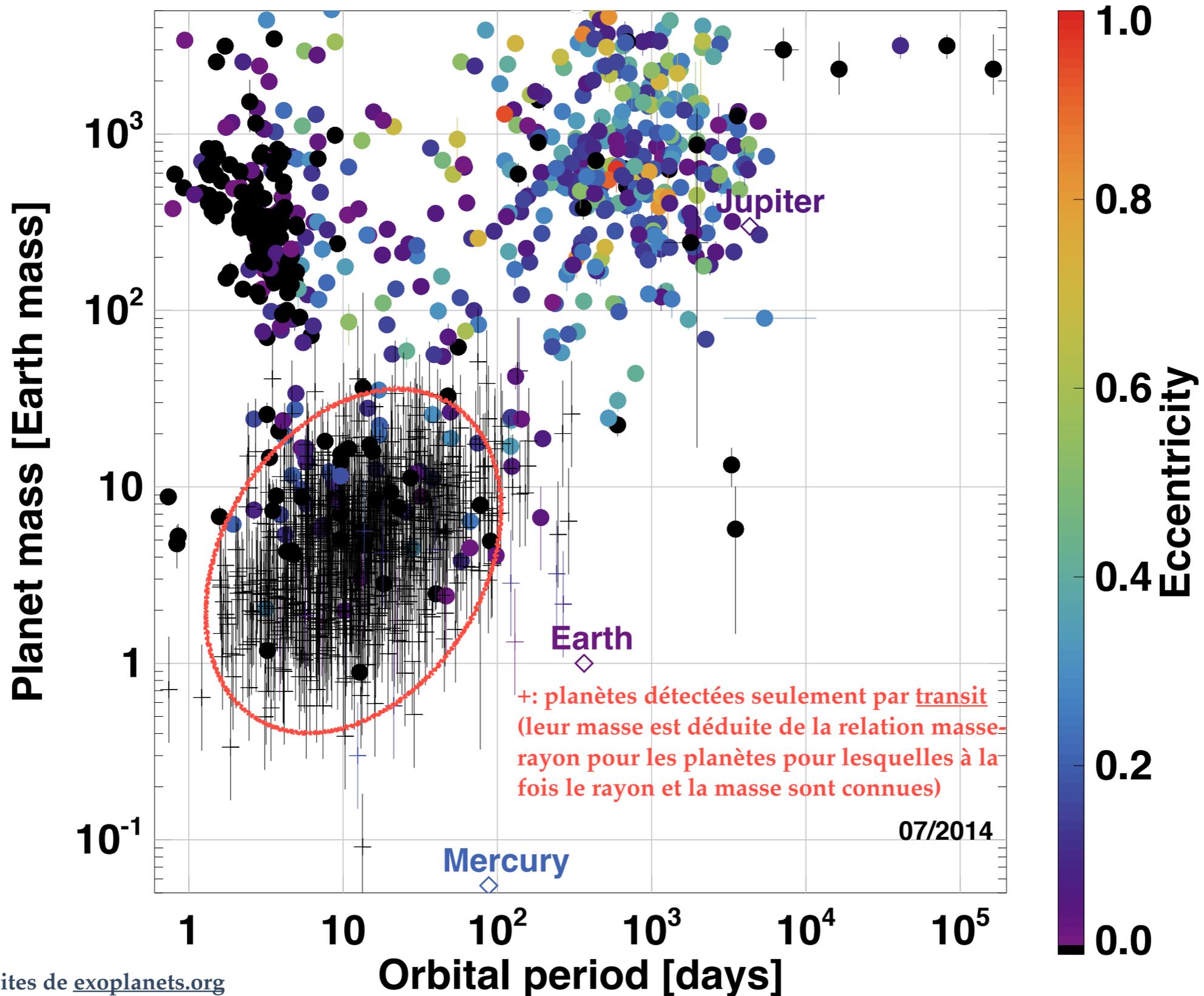
# Environ 1800 exoplanètes confirmées en 20 ans

1 sur 4 fait partie d'un système multi-planétaire



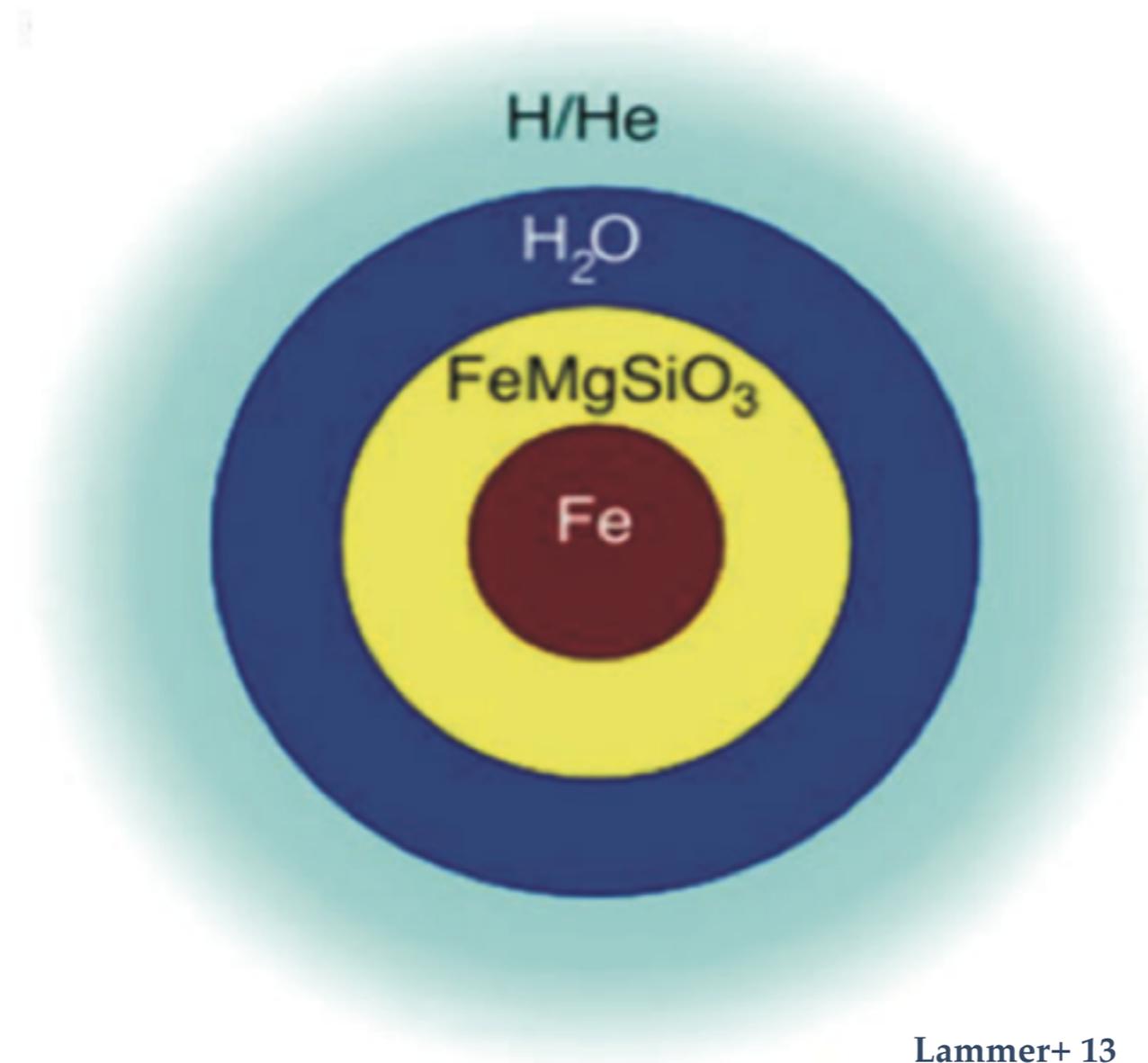
# Environ 1800 exoplanètes confirmées en 20 ans

1 sur 4 fait partie d'un système multi-planétaire



# De quoi sont constituées les exoplanètes?

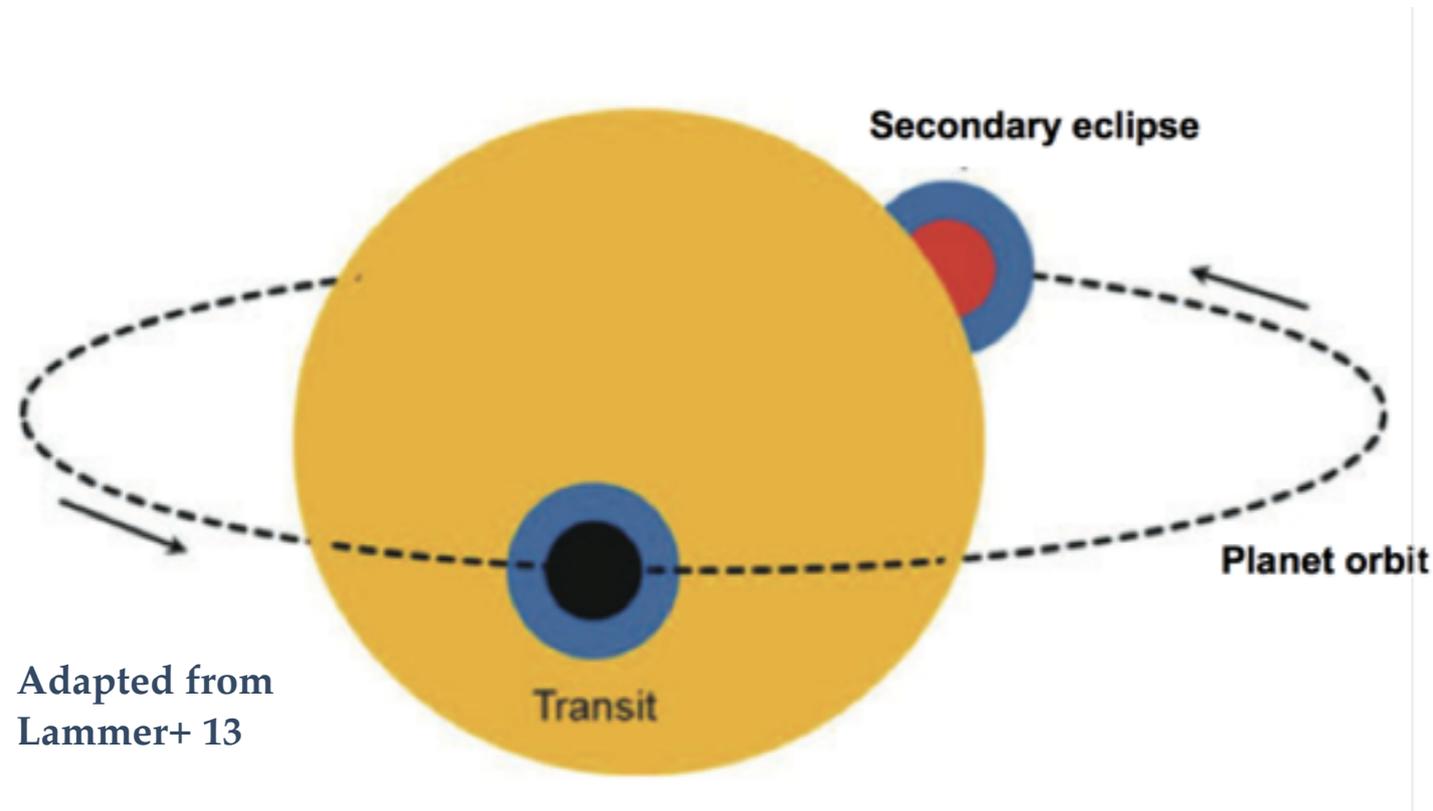
Composition des exoplanètes via leur densité moyenne



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

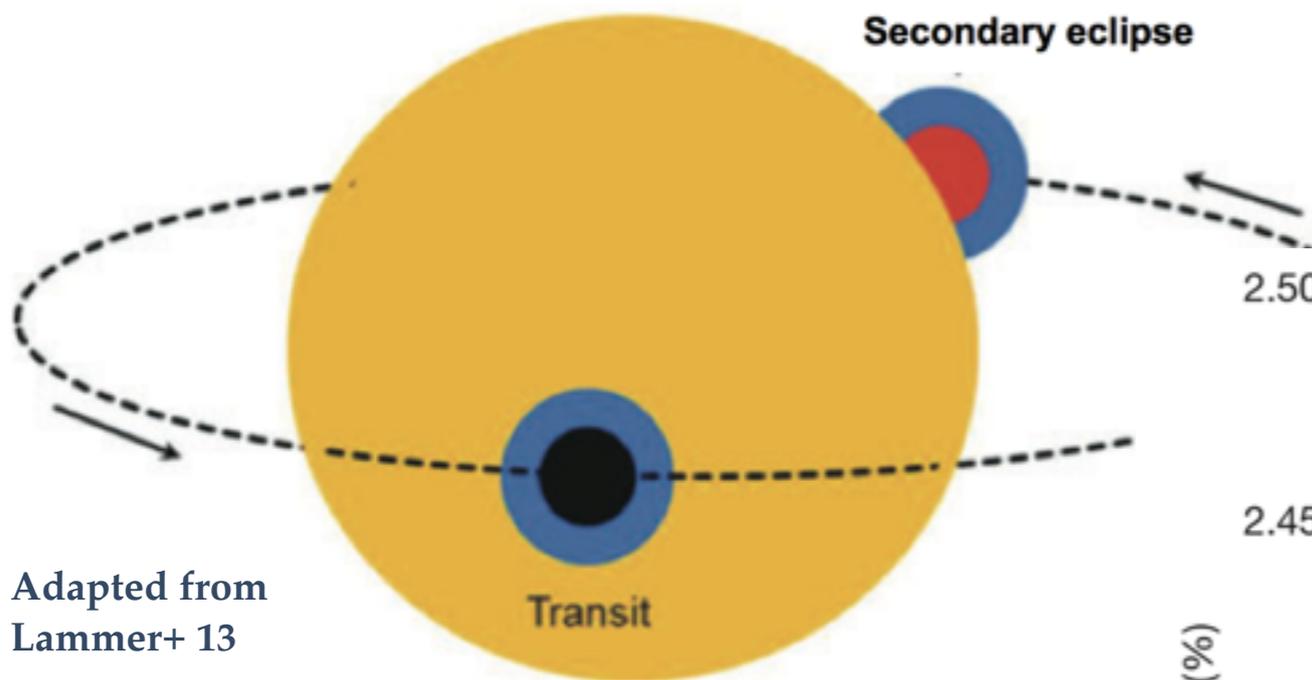
# De quoi sont constituées les exoplanètes?

## Composition de l'atmosphère des exoplanètes

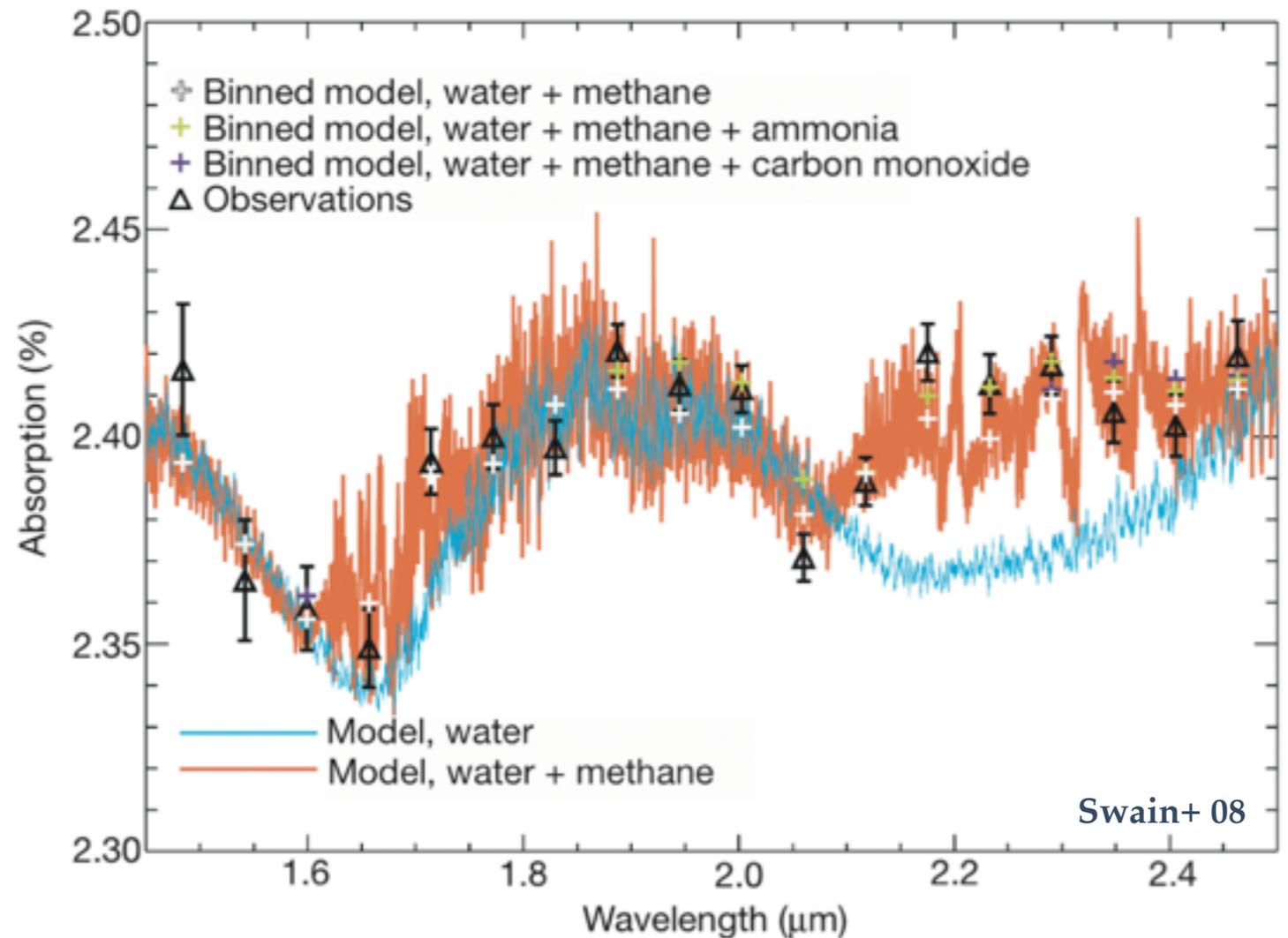


# De quoi sont constituées les exoplanètes?

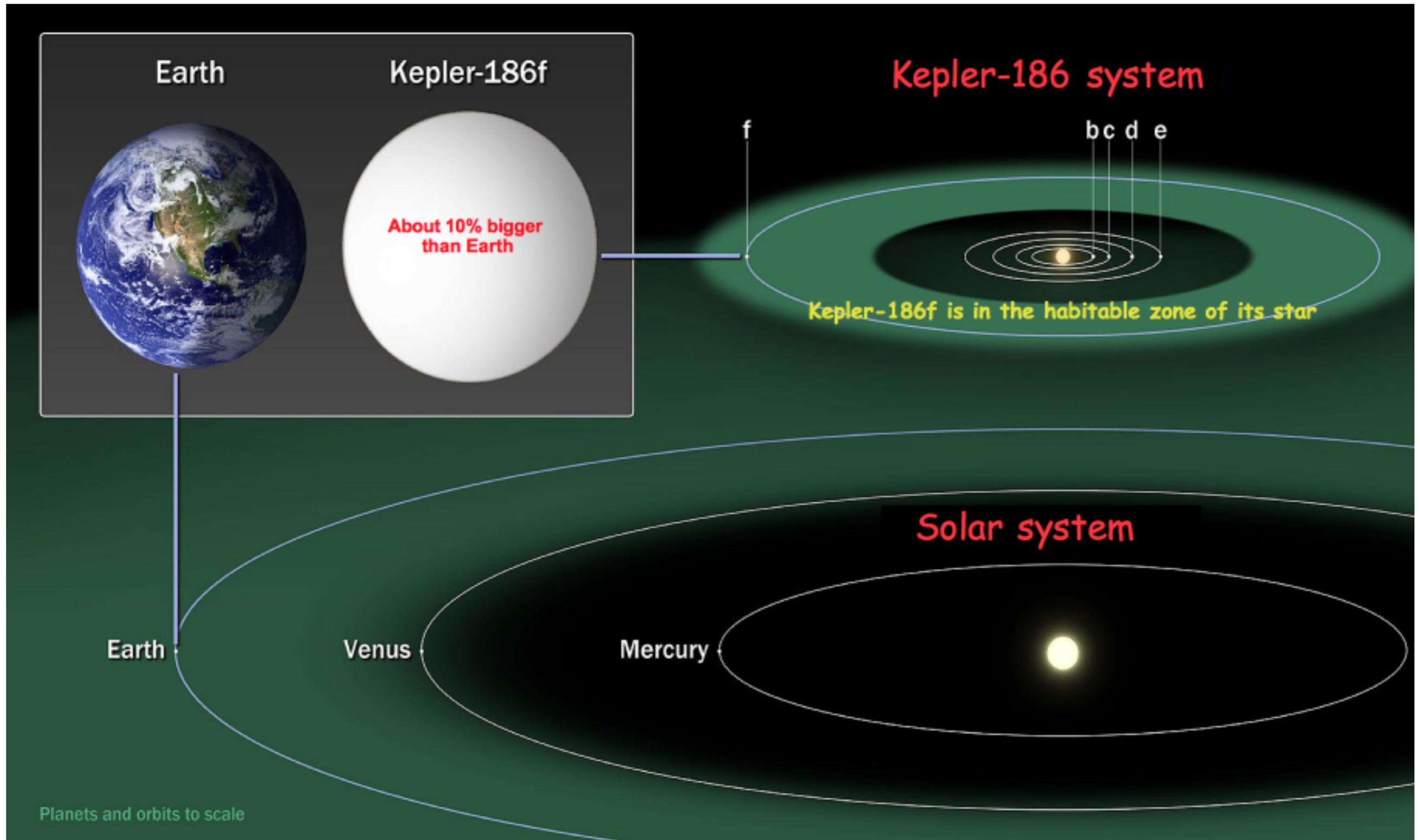
## Composition de l'atmosphère des exoplanètes

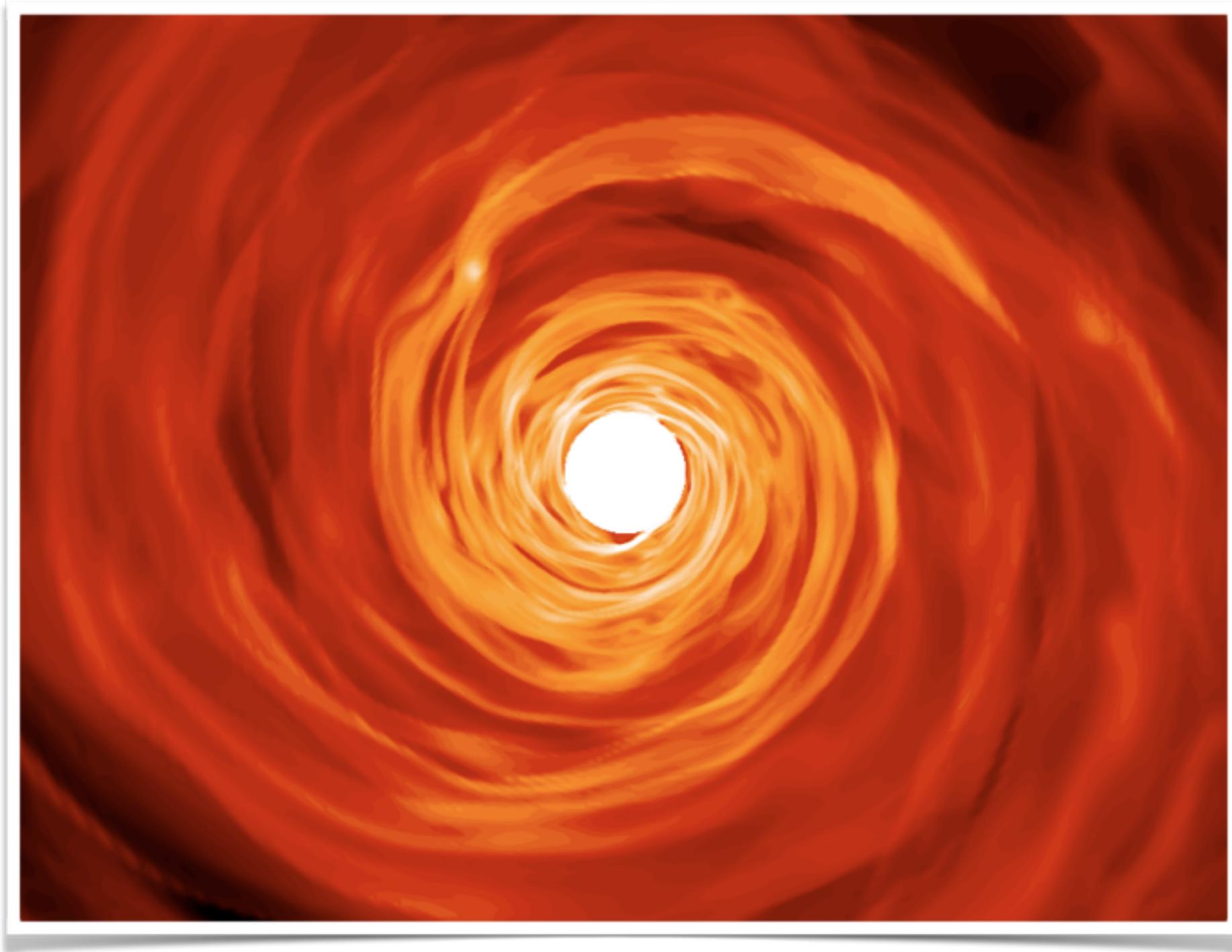


"Spectre" de l'atmosphère de HD 189733b



# (Exo-)planètes habitables

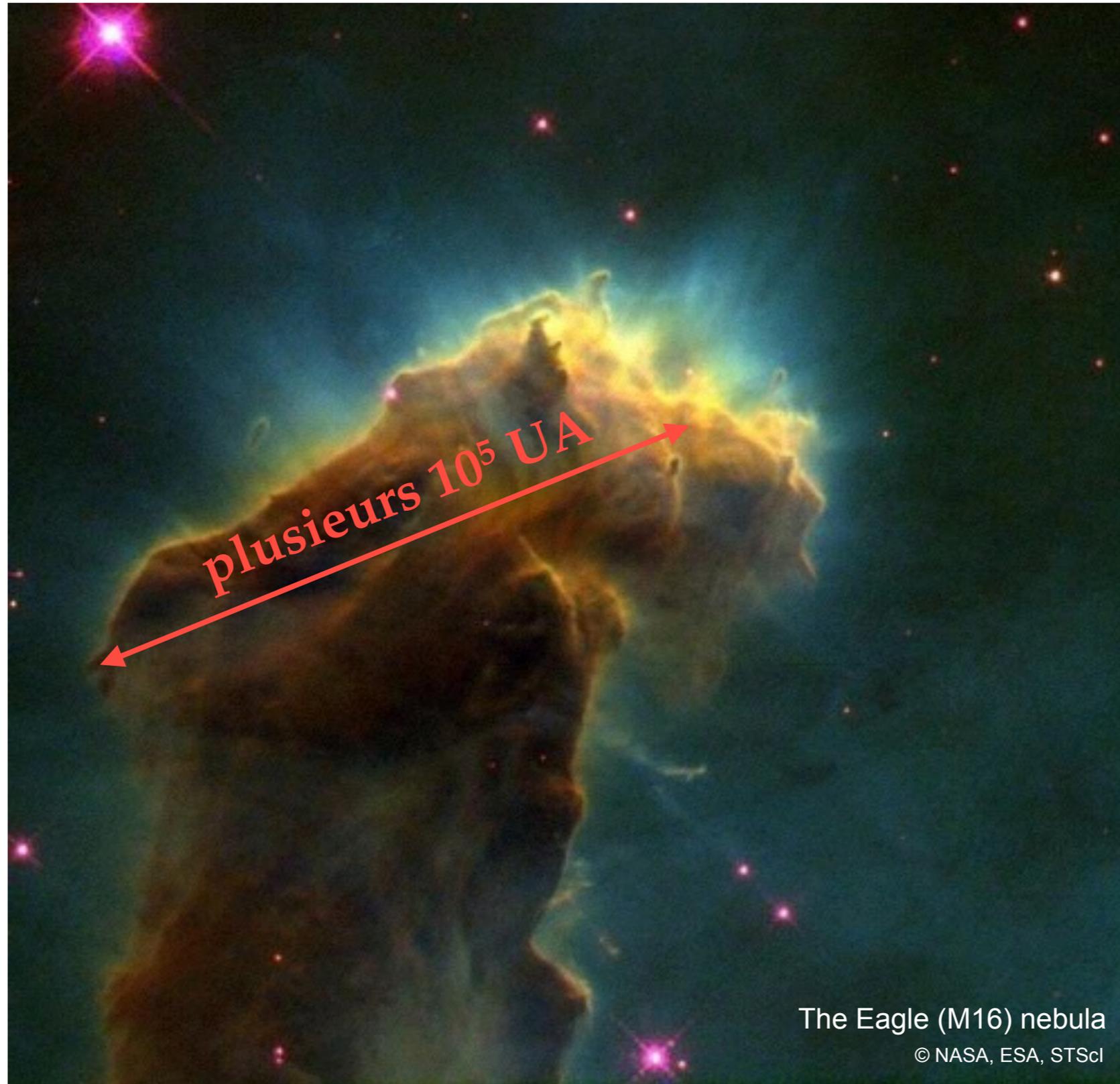




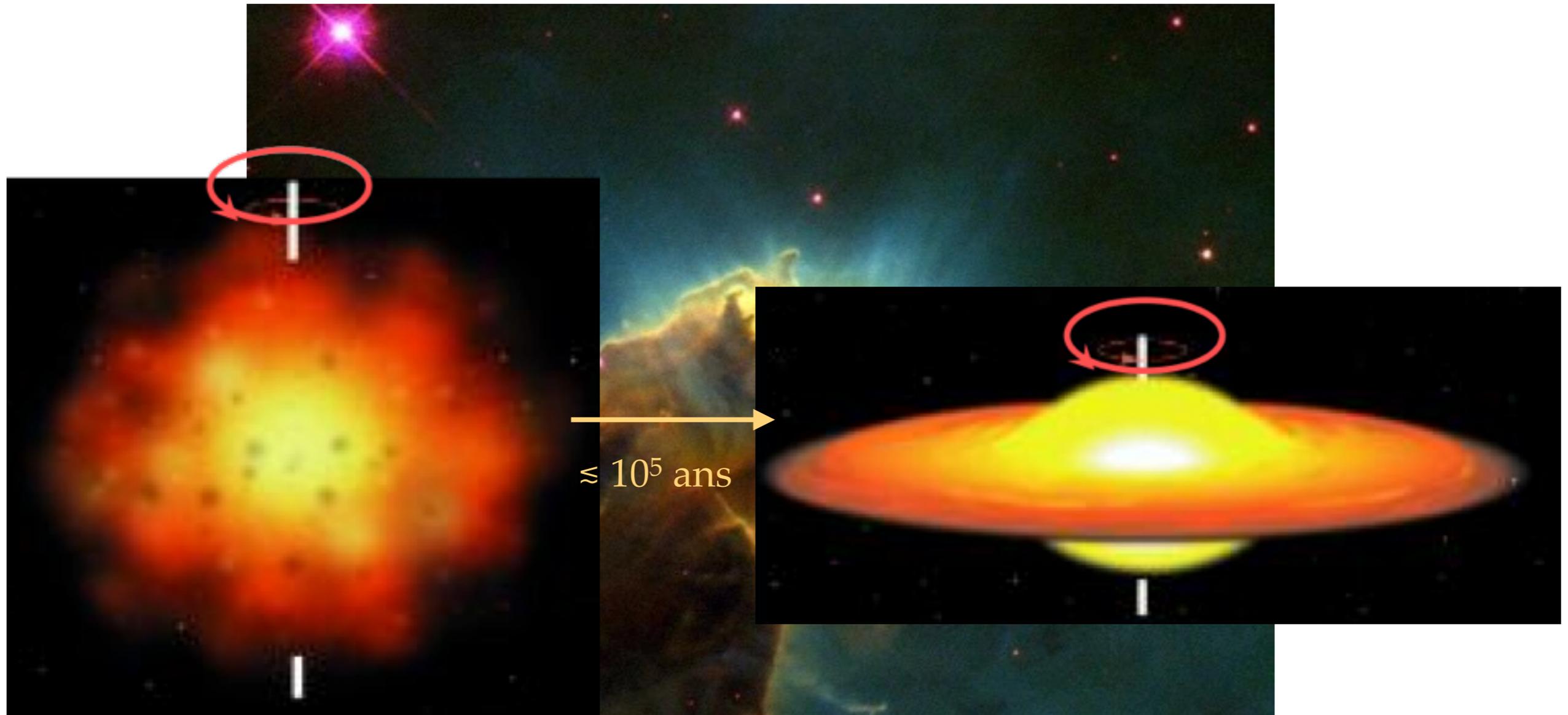
# FORMATION ET ÉVOLUTION DES SYSTÈMES PLANÉTAIRES

---

# Des nuages moléculaires aux disques protoplanétaires



# Des nuages moléculaires aux disques protoplanétaires



The Eagle (M16) nebula

© NASA, ESA, STScI

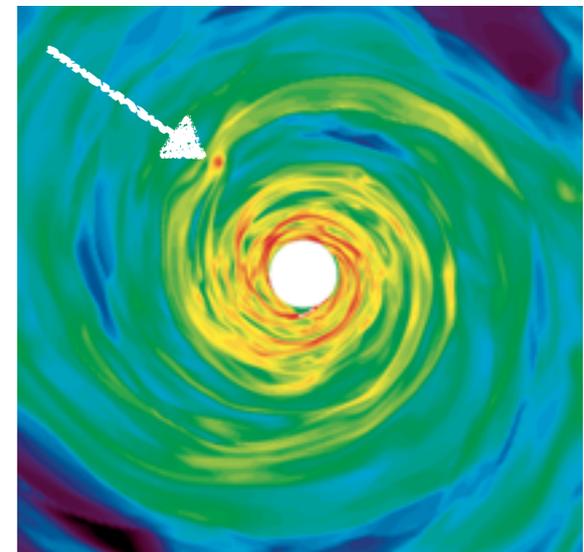
# Formation et évolution planétaires

## formation planétaire

accretion de  
planétésimaux  
et/ou de cailloux?



effondrement  
du disque?



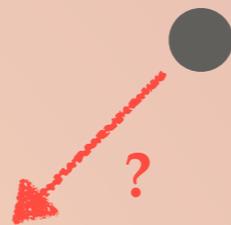
disque protoplanétaire

# Formation et évolution planétaires

## interactions disque-planète

changent le demi-grand axe des planètes  
(*migration planétaire*)

diminuent excentricités et inclinaisons

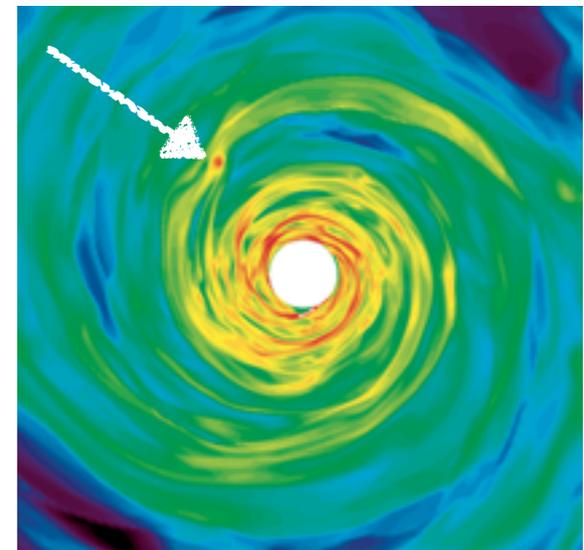


## formation planétaire

accretion de  
planétésimaux  
et/ou de cailloux?



effondrement  
du disque?



disque protoplanétaire

# Formation et évolution planétaires

## interactions disque-planète

changent le demi-grand axe des planètes  
(*migration planétaire*)

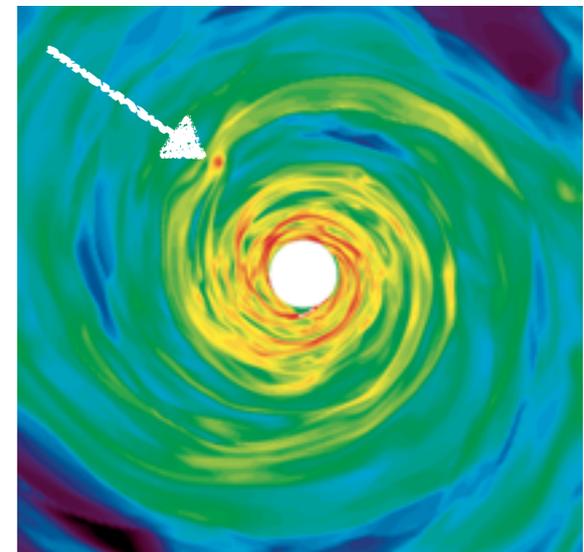
diminuent excentricités et inclinaisons

## formation planétaire

accretion de  
planétésimaux  
et/ou de cailloux?



effondrement  
du disque?



## interactions planète-planète

changent aussi les demi-grand axes!  
croissent excentricités et inclinaisons

disque protoplanétaire

# Formation et évolution planétaires

## dispersion du disque

- . interactions avec l'étoile centrale (marées, évolution stellaire) où avec des étoiles distantes
- . interactions planète-planète
- . interactions planète-disque de débris



# Des questions?

## Références suggérées:

- Armitage 2001, *Dynamics of Protoplanetary Disks*, <http://arxiv.org/abs/1011.1496>
- Armitage 2007, *Lecture notes on the formation and early evolution of planetary systems*, <http://arxiv.org/abs/astro-ph/0701485>
- Baruteau et al. 2014, *Planet-disc interactions and the early evolution of planetary systems*, <http://arxiv.org/abs/1312.4293>
- Johansen et al. 2014, *The multifaceted planetesimal formation process*, <http://arxiv.org/abs/1402.1344>
- Turner et al. 2014, *Transport and Accretion in Planet-Forming Disks*, <http://arxiv.org/abs/1401.7306>