

# Atmosphère des planètes extrasolaires et Spirou



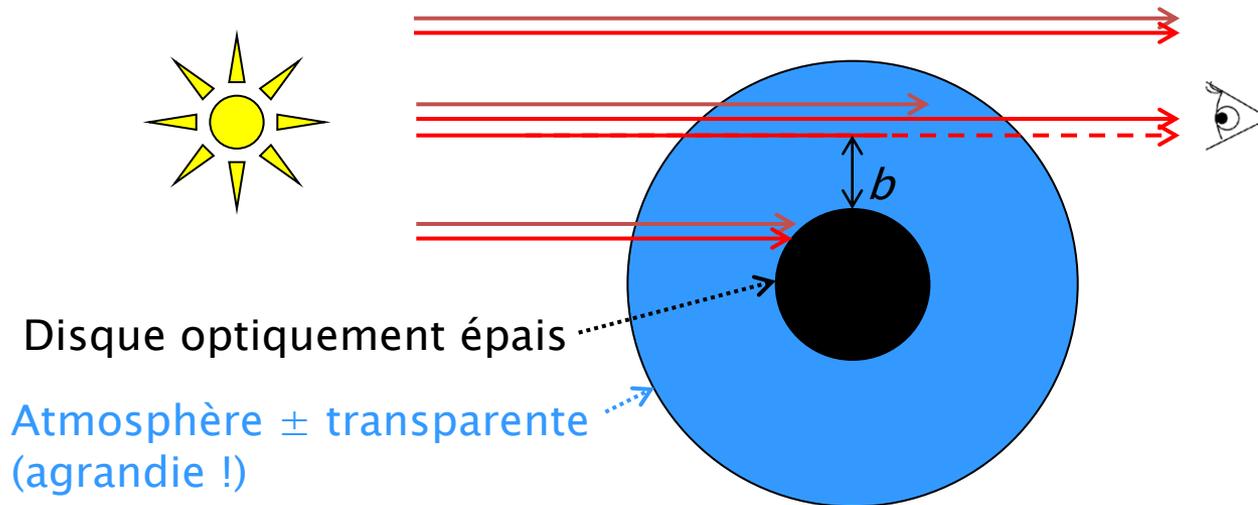
Alain Lecavelier des Etangs  
(IAP-CNRS-UPMC)

# Plan

- Spectre d'absorption des exoplanètes
- Signatures d'atmosphère en fonction de  $\lambda$
- Comment observer du sol ??

# Spectroscopie d'absorption

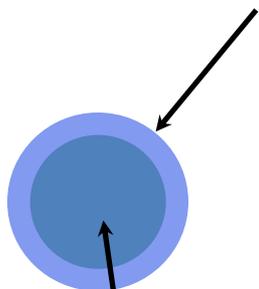
La lumière peut être complètement ou partiellement transmise, ou bien totalement absorbée en fonction de la **longueur d'onde** ( $\lambda$ ) et du **paramètre d'impact** ( $b$ )



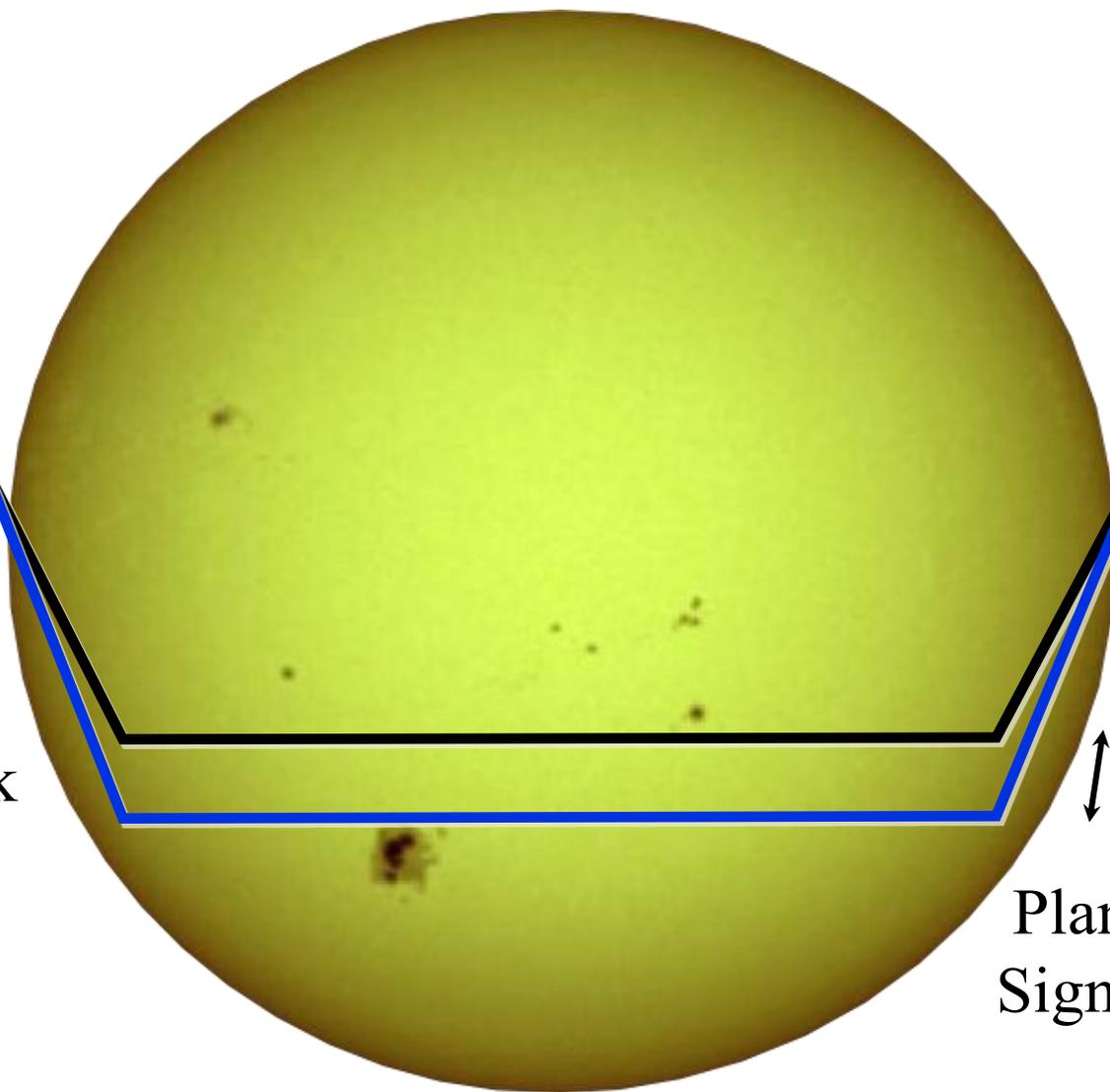
La planète **apparaît plus grande** lorsqu'elle est observée à des  $\lambda$  fortement absorbés  $\rightarrow R_p \equiv R_p(\lambda)$

Seager & Sasselov 2000  
Hubbard et al. 2001  
Brown 2001

Translucent  
Atmosphere



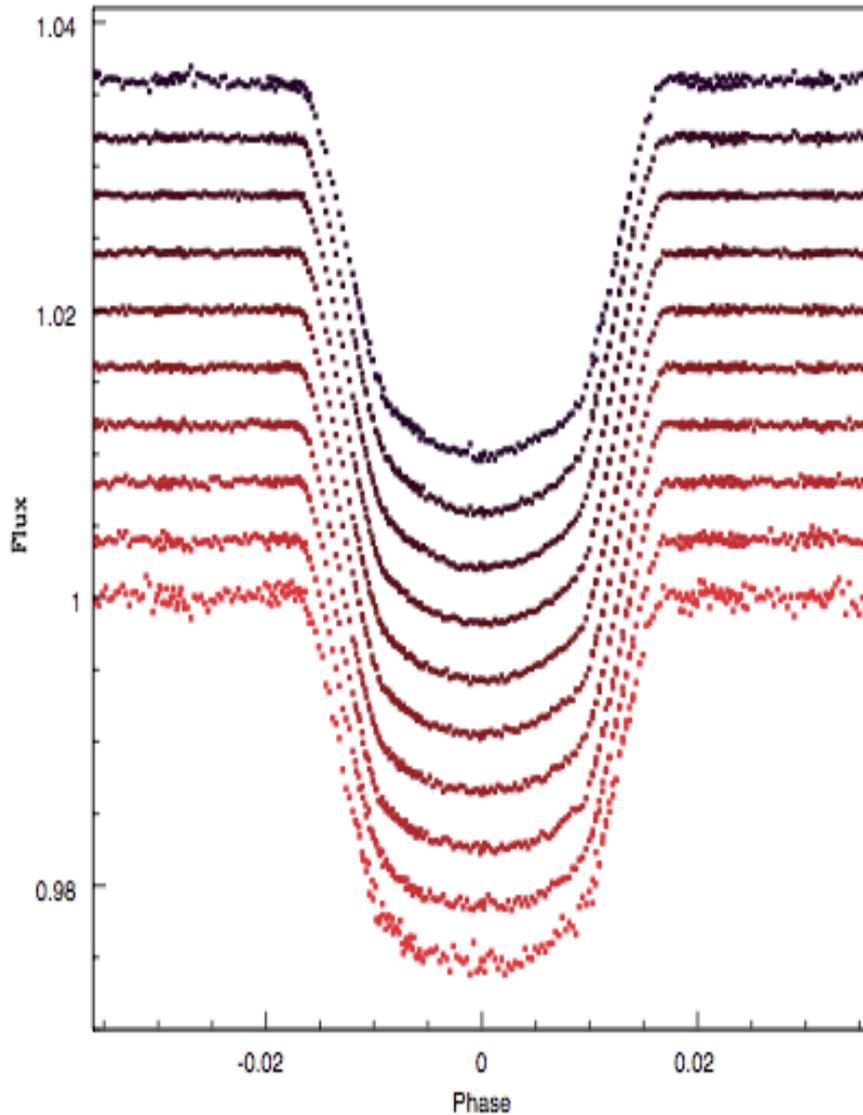
Opaque  
Planetary Disk



1-2%

Planet Atmosphere  
Signature  $\sim 10^{-4}$

# Spectroscopie d'un transit



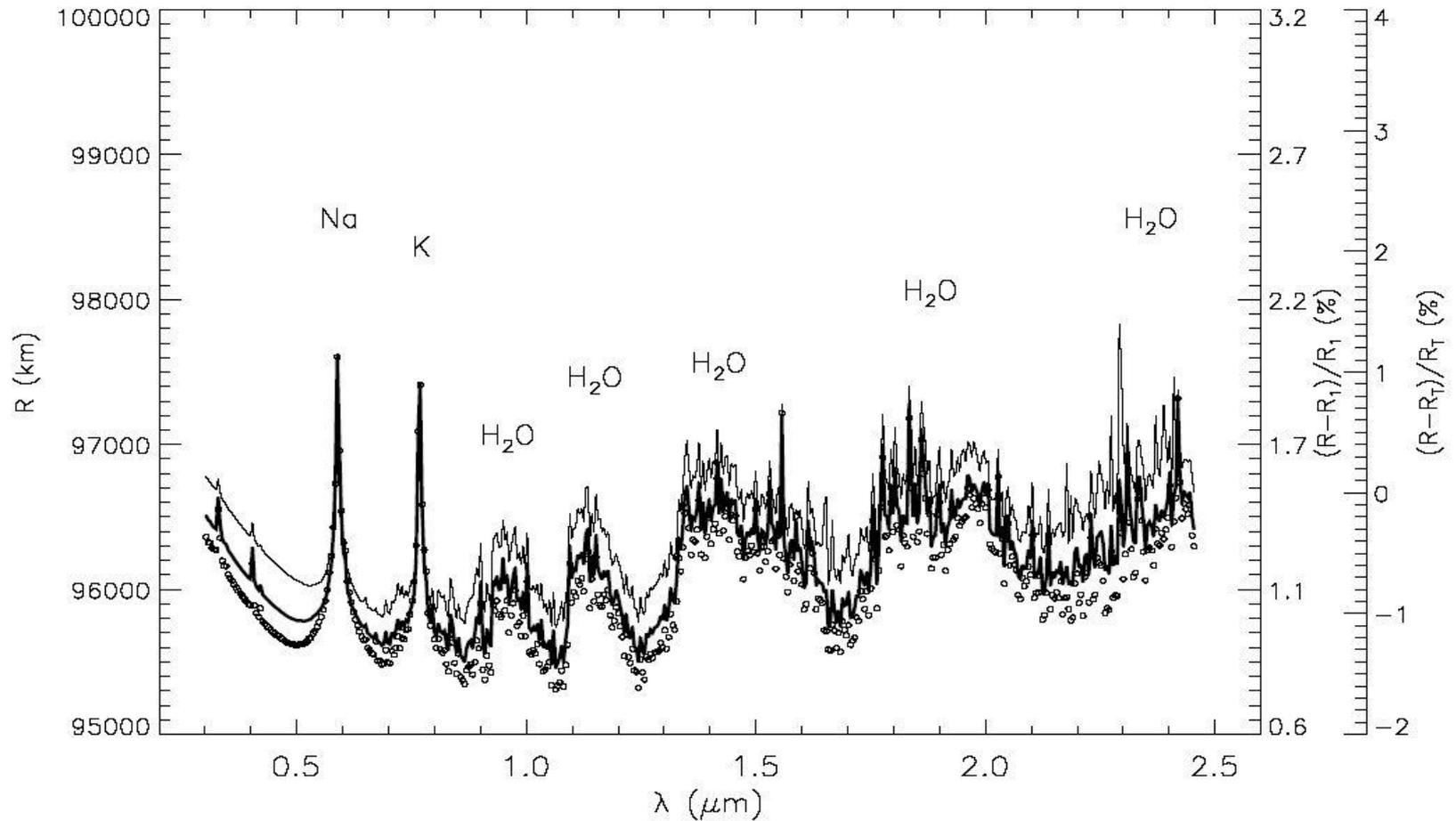
9000 Å

On détermine  $R_{\text{planet}}(\lambda)$   
en mesurant la profondeur de transit  
à différentes longueurs d'onde.

6000 Å

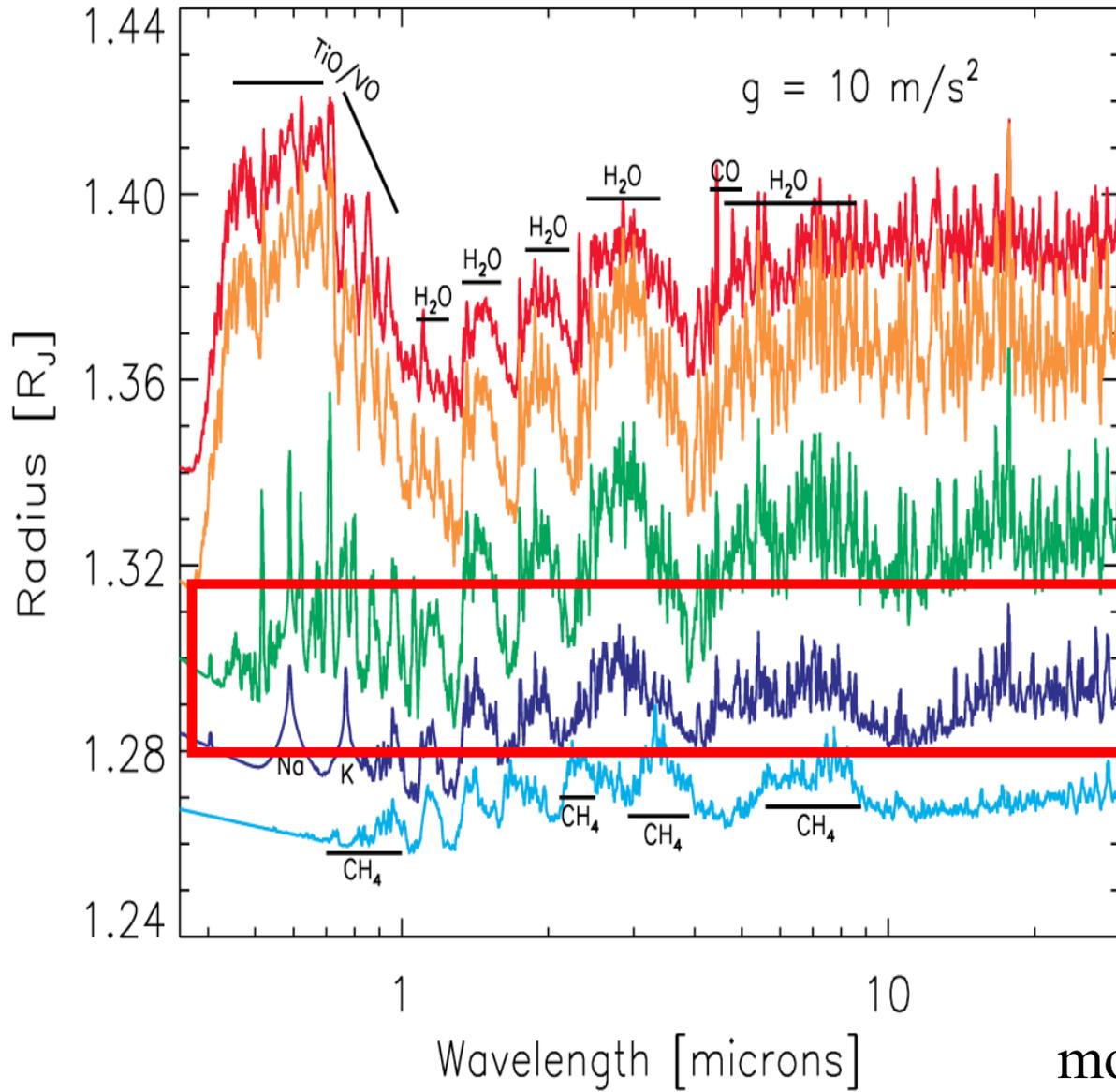
(Pont et al. 2008)

# Rayon en fonction de $\lambda$ pour un Jupiter-chaud



(Hubbard et al. 2001)

# Rayon en fonction de $\lambda$



# Signatures en fonction de $\lambda$

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 H<sub>2</sub> 300-500 nm
- Haze (MgSiO<sub>3</sub> / Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 300-2000 nm
- Na I 589.2-589.8 nm
- K I 768.4 nm
- TiO-VO 600-800 nm

IR

- CH<sub>4</sub> 1.6 - 2.3 - 3.3 - 3.5-8  $\mu$ m
- H<sub>2</sub>O 1.8 - 6-8  $\mu$ m
- CO<sub>2</sub> 4  $\mu$ m
- CO 2.3 - 4.5  $\mu$ m

# Planètes observées

- HD209458b :  
HI OI? CII SiIII SiIV? MgI? CaI? ScII H<sub>2</sub>?  
NaI TiO-VO? H<sub>2</sub>O/?? CO<sub>2</sub>?? CO
- HD189733b :  
HI Aérosols NaI KI H<sub>2</sub>O?/?? CO CH<sub>4</sub>??
- Wasp 12-b : Haze (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>?) MgII? C/O élevé?
- XO-1b : H<sub>2</sub>O??
- XO-2b : KI
- Wasp-17b: NaI?
- Hat-P-1 : KI?
- Wasp-19 : H<sub>2</sub>O TiO ?
- GJ436b (23M<sub>⊕</sub>) : CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>??
- GJ1214b (6M<sub>⊕</sub>) : H<sub>2</sub>O/Aérosols?

# Mesures physiques

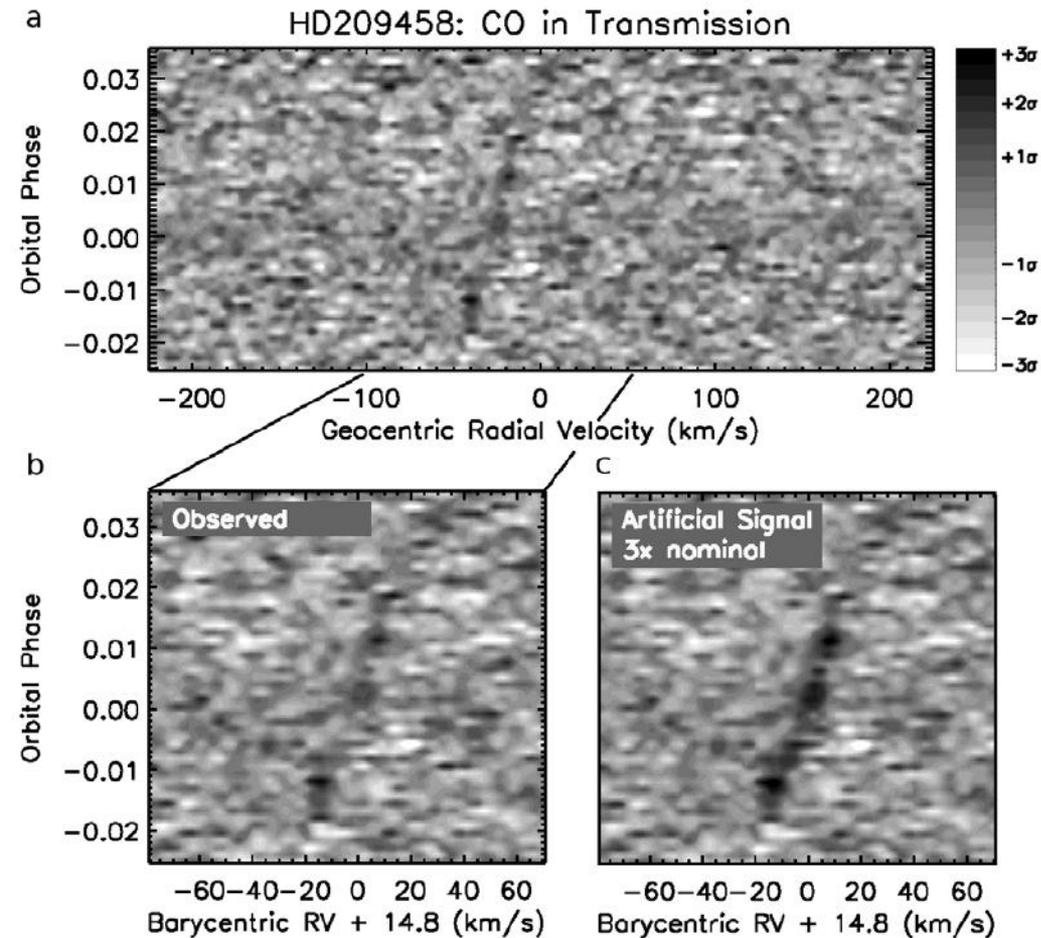
- Détection/Non-détection  
!! pas de mesure d'abondance en absorption !!
- Température (T)
- Pression (P)
- Variation de température avec l'altitude ( $dT/dz$ )
- Variation d'abondance avec l'altitude ( $dN/dz$ )
- Abondance relative en absorption ( $N_1/N_2$ )
- Taux d'échappement ( $dM/dt$ )
- Vents au terminateur jour-nuit (V)
- Abondance/Profile T-P en émission ( $N/T(P)$ )

# Mesures physiques

- Détection/Non-détection  
!! pas de mesure d'abondance en absorption !!
- 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)

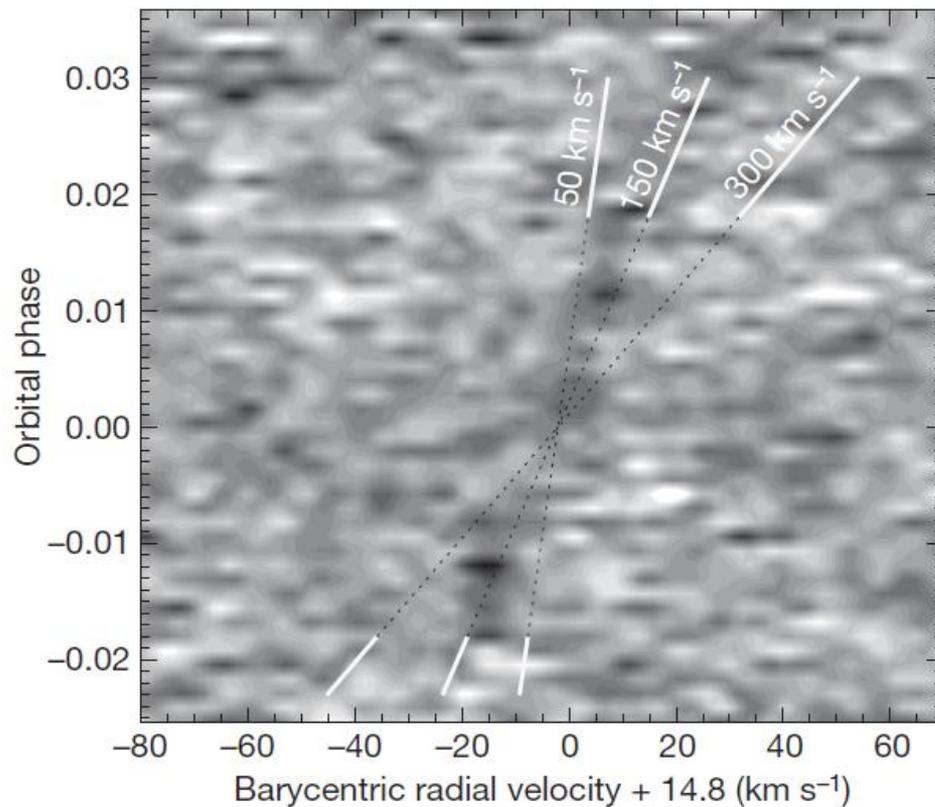
# Raies d'absorption en CO et décalage en vitesse radiale

(Snellen et al., Nature 2010)



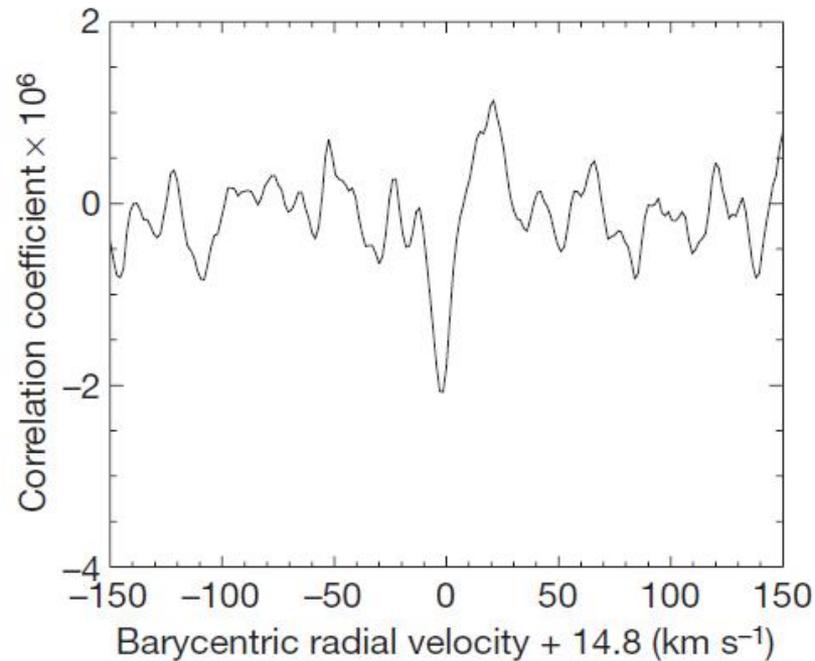
Observations avec CRIRES  
R=100 000  
Observation : ~5 heures  
2.291  $\mu\text{m}$  – 2.349  $\mu\text{m}$

- Observations du CO atmosphérique à la vitesse radiale de la planète



**Figure 2 | The expected carbon monoxide signal as function of the planet orbital velocity.** The observed CO signal is shown in greyscale as in Fig. 1. The dotted lines indicate the expected change in radial velocity of the planet over the transit for orbital velocities of 50, 100 and 150  $\text{km s}^{-1}$ . We determined the planet orbital velocity to be  $140 \pm 10 \text{ km s}^{-1}$  ( $1\sigma$ ) using chi-squared analysis. The orbital velocities of both the planet and the star around the planet–star centre-of-mass are known, allowing the masses of both objects to be determined using solely Newton’s law of gravitation:  $M_1 = 1.00 \pm 0.22 M_{\text{Sun}}$  and  $M_2 = 0.64 \pm 0.09 M_{\text{Jup}}$  ( $1\sigma$ ).

- Mesure de la masse absolue de la planète :  $M_p = 0.64 \pm 0.09$



**Figure 3 | The carbon monoxide signal integrated over the transit.** The cross-correlation signal from all spectra taken during the transit were combined assuming a planetary orbital velocity of  $140 \text{ km s}^{-1}$ , individually weighted by the depth of the transit signal at the observed epoch. The integrated signal is statistically significant at the  $5.6\sigma$  confidence level. We derive a CO volume mixing ratio of  $(1-3) \times 10^{-3}$  for the upper atmosphere of HD 209458b, with the precision governed by the uncertainty in the pressure–temperature profile and in the level of masking of the CO signal by  $\text{CH}_4$ . The CO signal is blueshifted by  $\sim 2 \text{ km s}^{-1}$  with respect to the systemic velocity of the host star, which suggests a velocity flow from the dayside to the nightside driven by the large incident heat flux on the dayside.

-Detection d'un décalage vers le bleu de 2 km/s au limbe (jour → nuit) : vent !  
(explication alternative ::  $e_p \neq 0$ )