



# La détection et la caractérisation de planètes extrasolaires avec CoRoT



Marc Ollivier

Institut d'Astrophysique Spatiale d'Orsay



# Plan de l'exposé

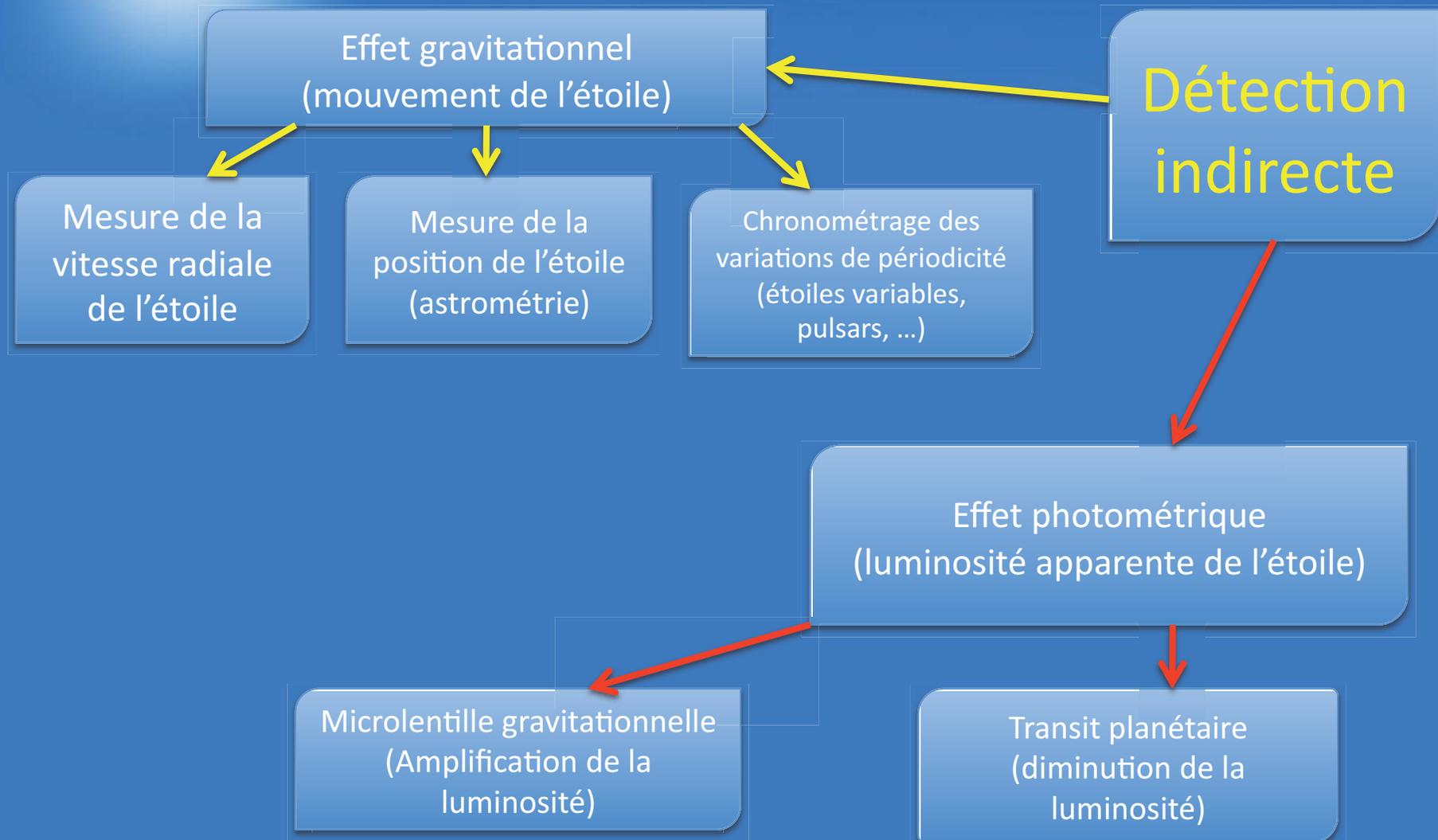
- Détection des exoplanètes par la méthode des transits
  - Principe
  - Observables et paramètres des observables
  - Premières observations (HD 209458)
  - Détecter un candidat transit
  - Confirmer la nature d'un candidat transit
- La planétologie des transits
  - Détermination de la densité planétaire
  - Spectroscopie des transits
- CoRoT en bref
  - La mission
  - Le traitement des données
  - Le follow up
- Les Planètes de CoRoT



# Détection de planètes par la méthode des transits

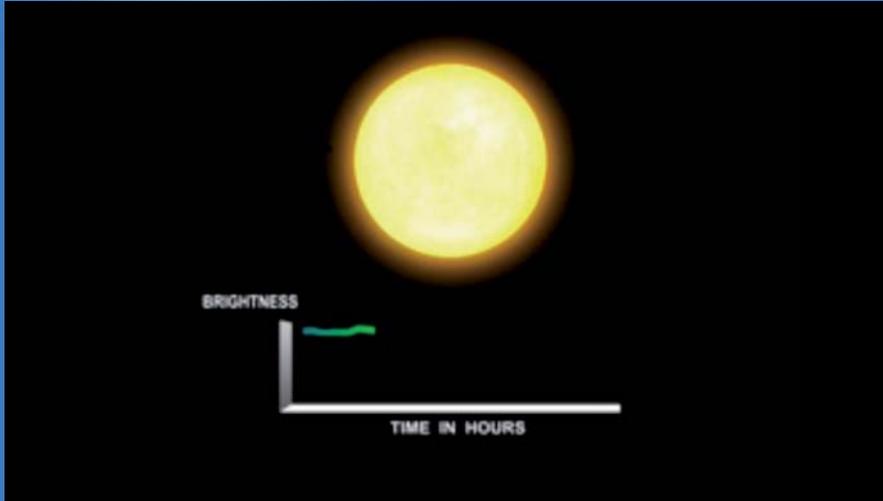


# Détection indirecte des exoplanètes





# Transit planétaire

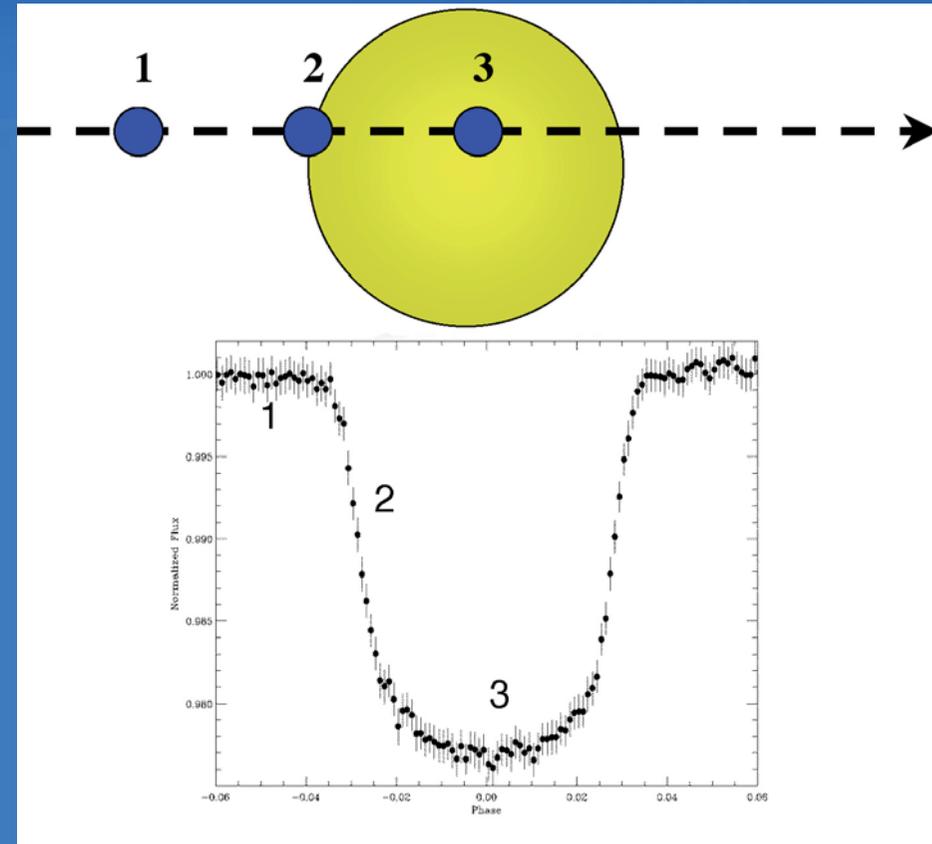


## Conditions d'observabilité :

- Système planétaire vu par la tranche
- Précision photométrique
- Photométrie rapide et continue

## Observables :

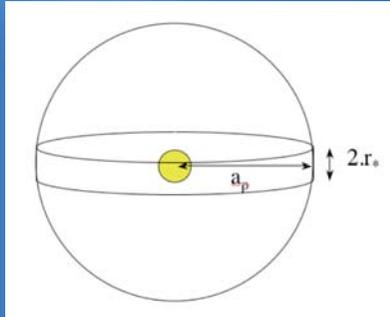
- Période orbitale planétaire
- Rayon planétaire
- inclinaison du système (max)





# Paramètres d'un transit planétaire

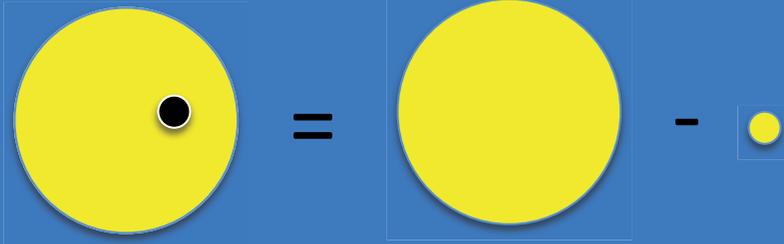
- Probabilité du transit



$$P = \frac{2\pi a_p \cdot 2r_*}{4\pi a_p^2} = \frac{r_*}{a_p} = \frac{r_*}{P^{2/3}} \left( \frac{4\pi^2}{Gm_*} \right)^{1/3}$$

Objet	P
Jup. chaud	0.1
Terre	0.005
Jupiter	0.001

- Profondeur du transit



$$\frac{\Delta F}{F} \approx \left( \frac{r_p}{r_*} \right)^2$$

Objet	$\Delta F/F$
Jupiter	$10^{-2}$
Terre	$10^{-4}$

- Durée du transit (équatorial)

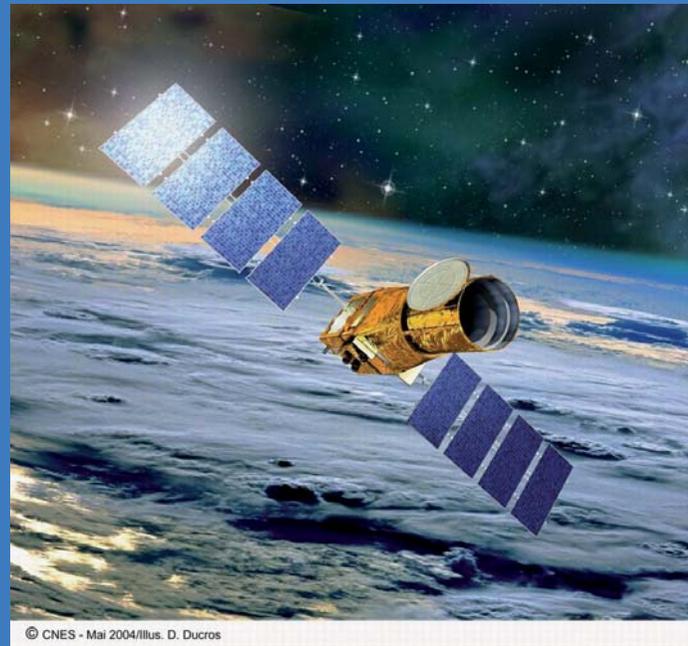
$$\tau = \frac{(2\pi)^{2/3} 2r_* \sqrt{1-b^2}}{(Gm_*)^{1/3}} P^{1/3}$$

Objet	$\tau$ (b=0)
Jup. Chaud	$\approx 3$ heures
Terre	$\approx 14$ heures
Jupiter	$\approx 30$ heures



## Transits planétaires : stratégie observationnelle

- **P faible** : Observation en continue de plusieurs milliers d'objets
- **$\tau =$  quelques heures** : Photométrie rapide (échantillonnage de quelques dizaines de secondes à quelques minutes)
- **$\Delta F/F$**  : La précision photométrique dépend du site d'observation

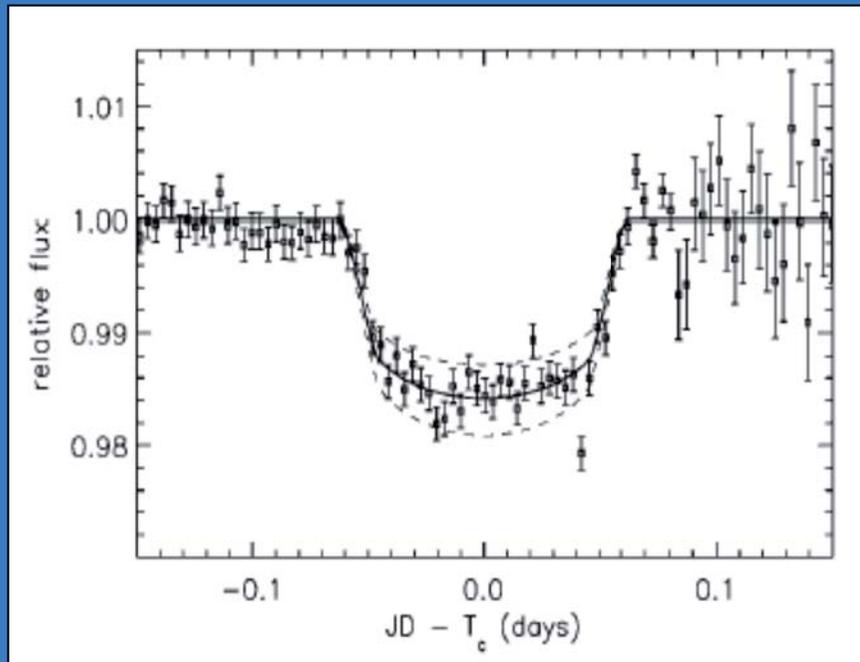


© CNES - Mai 2004/illus. D. Ducros



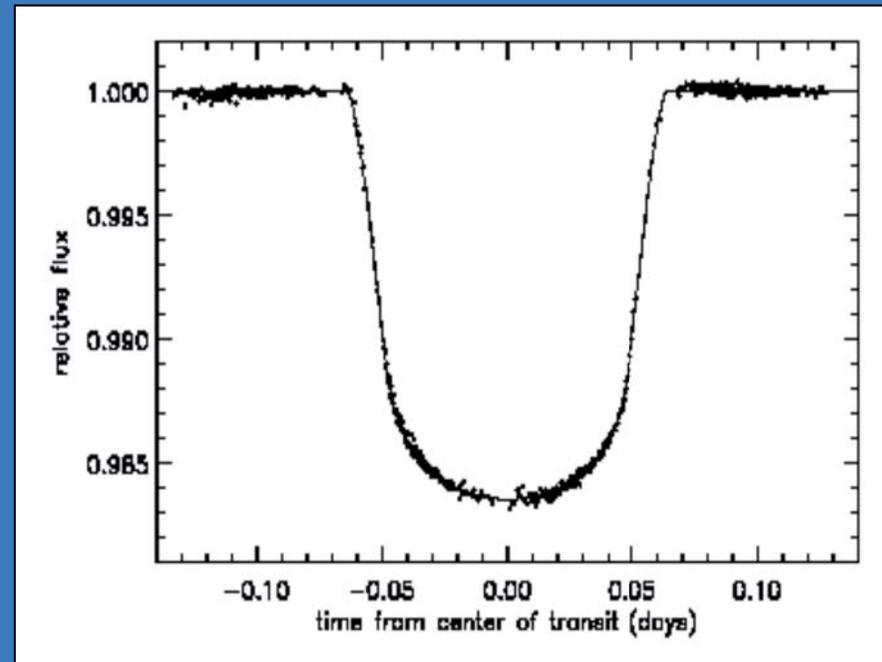
# Première observation des transits HD 209548

Sol (10 cm)



Charbonneau et al., 2000

Espace (HST)

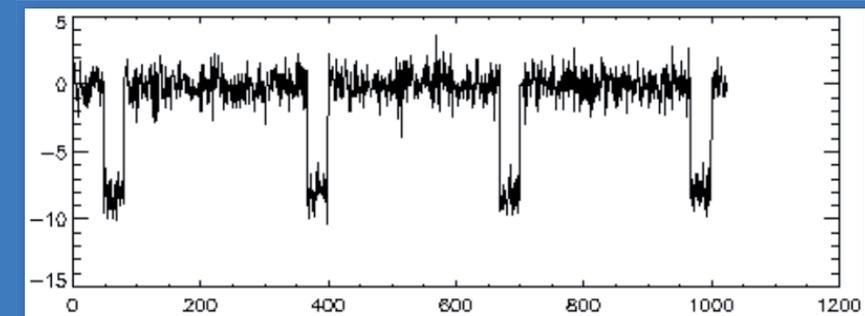
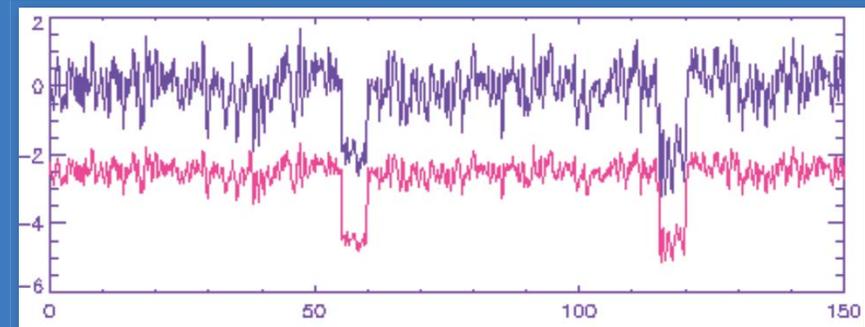
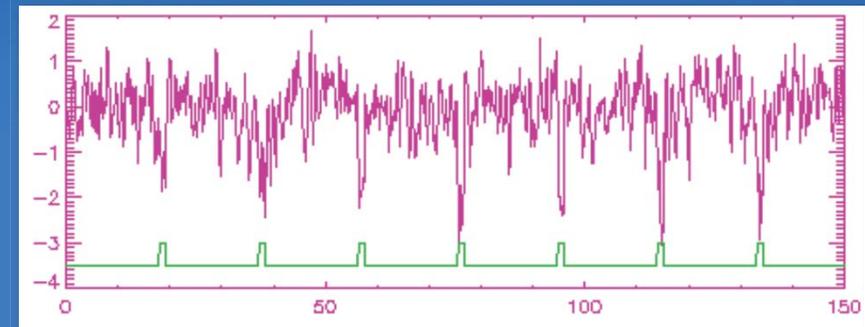


Brown et al., 2001



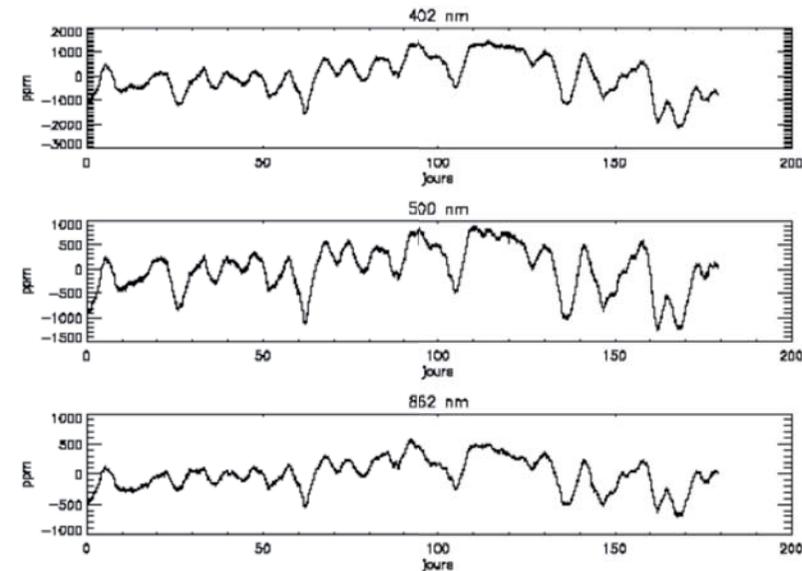
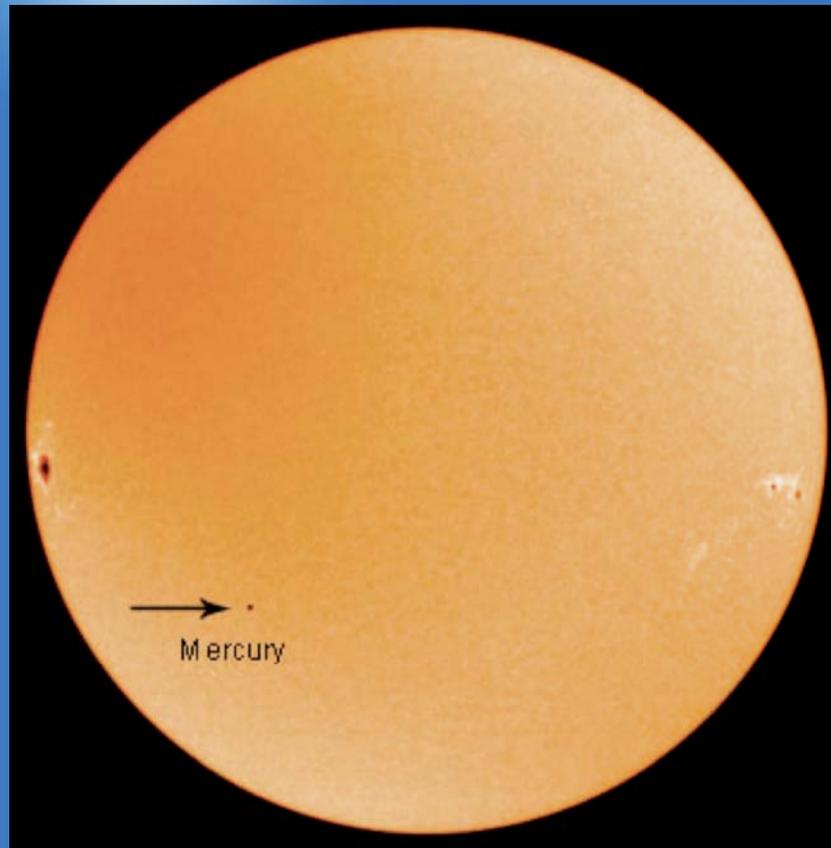
# Détecter un candidat transit

- Baisse périodique de luminosité : besoin de 3 événements minimum
- 2 événements suffisent si information chromatique
- Analyse des perturbations périodiques si beaucoup de transits (anneaux, autres planètes...)





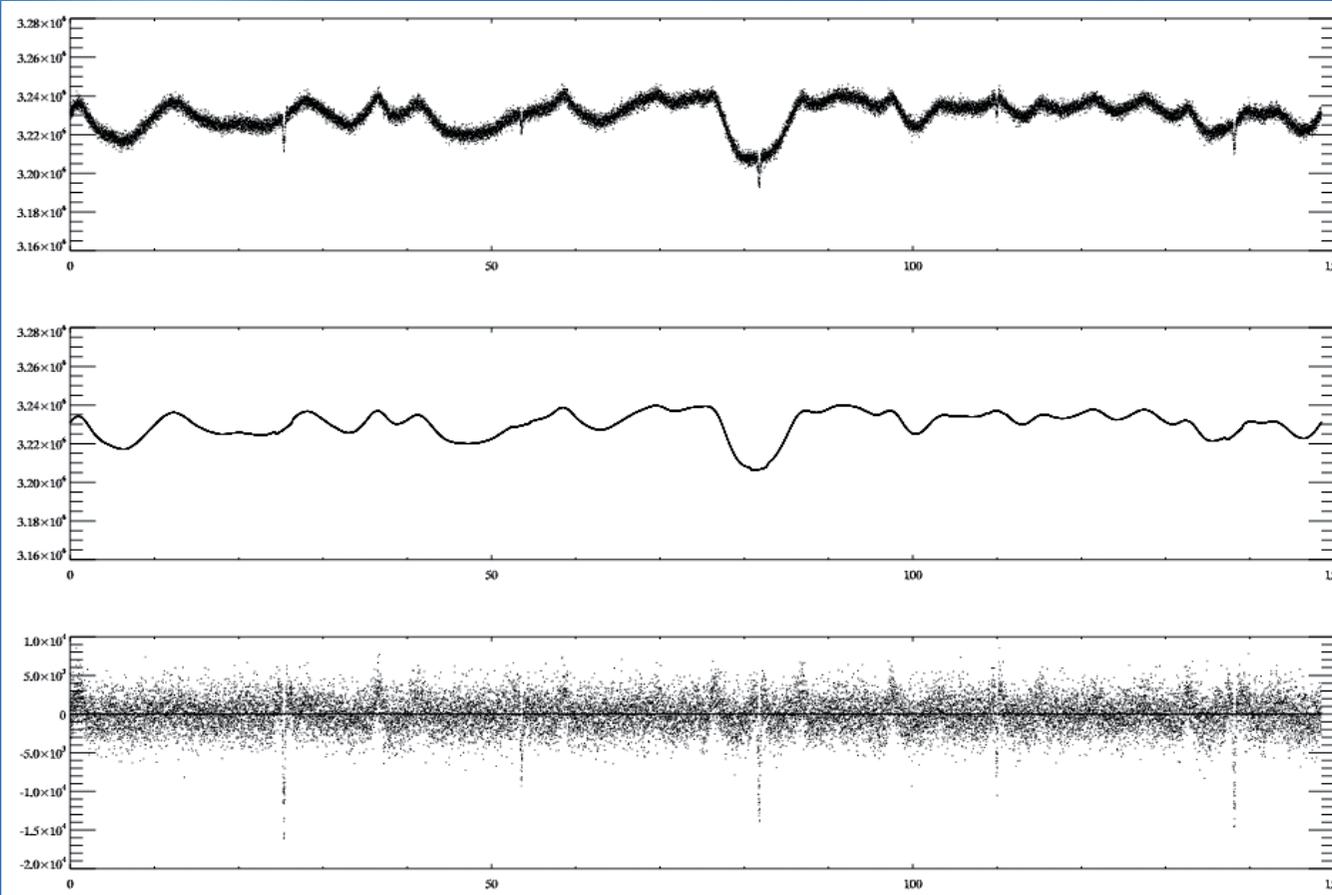
# Photométrie chromatique



Transit :  $\Delta F/F \sim$  achromatique  
 $\neq$  activité stellaire



# Qu'est ce qu'une (vraie) courbe de lumière ?



Courbe originale

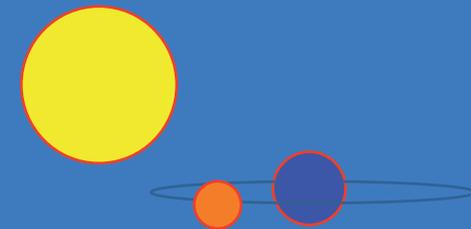
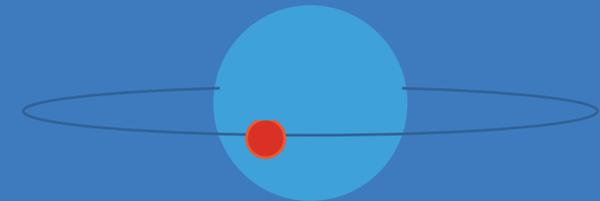
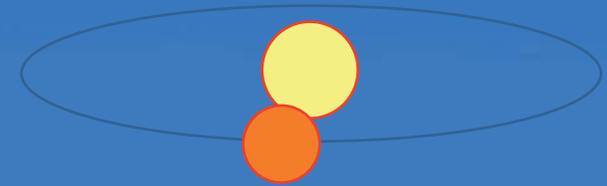
Basses fréquence  
fluctuations stellaires  
(Activité, pulsations...)

Hautes fréquences



# Eliminer les faux-positifs

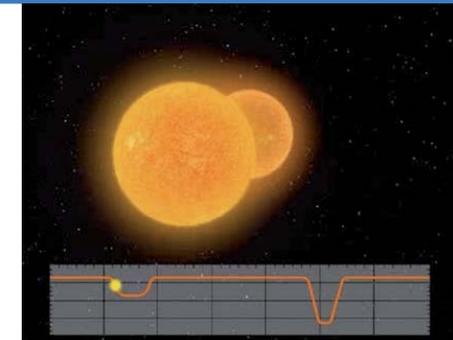
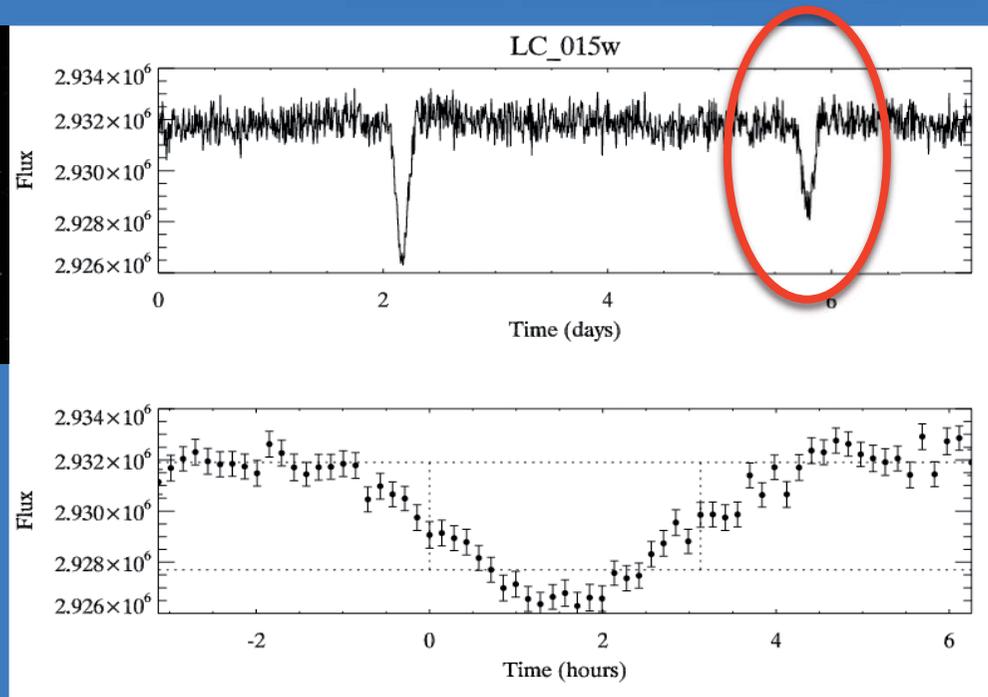
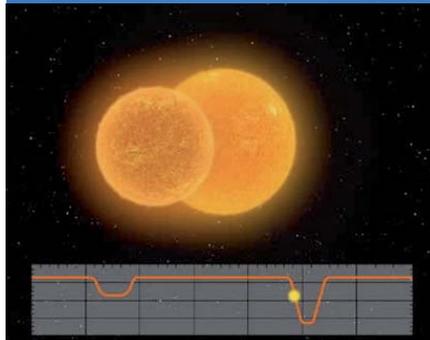
- Eclipse rasante d'une binaire
- Cas des géantes
- Binaire à éclipse du fond dans la PSF de l'instrument





# Ex : Cas des binaires à éclipse

- Forme en V du transit et éclipses secondaires



- Vitesse radiale : masse stellaire ou planétaire
- Spectroscopie : chasse aux géantes
- Photométrie ON/OFF des étoiles du champ
- Information chromatique sur le transit

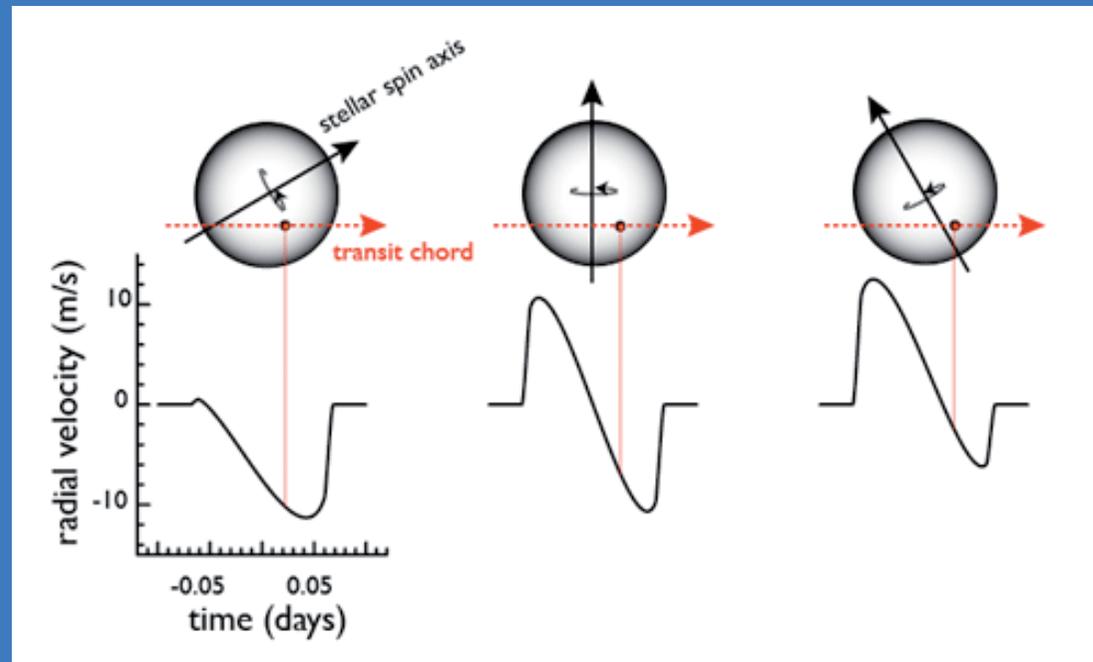
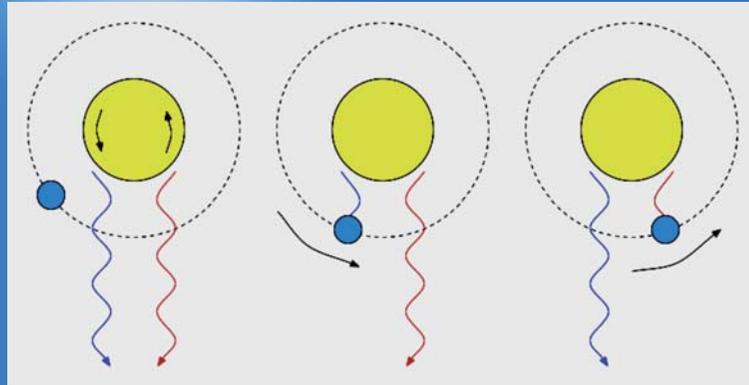


# Suivi observationnel nécessaire

- Photométrie Hors/Pendant un transit :
  - sur chacune des étoiles susceptible de polluer la PSF
  - permet d'éliminer les faux positifs (binaire de fond)
- Imagerie à haute résolution
  - permet de détecter d'éventuel compagnon proche ou des étoiles de fond
  - Optique adaptative ou imagerie par bon seeing : NACO, PUEO, Megacam
- Vitesses radiales :
  - le juge ultime car il donne la masse
  - mesures durant le transit => effet Rossiter-McLaughlin



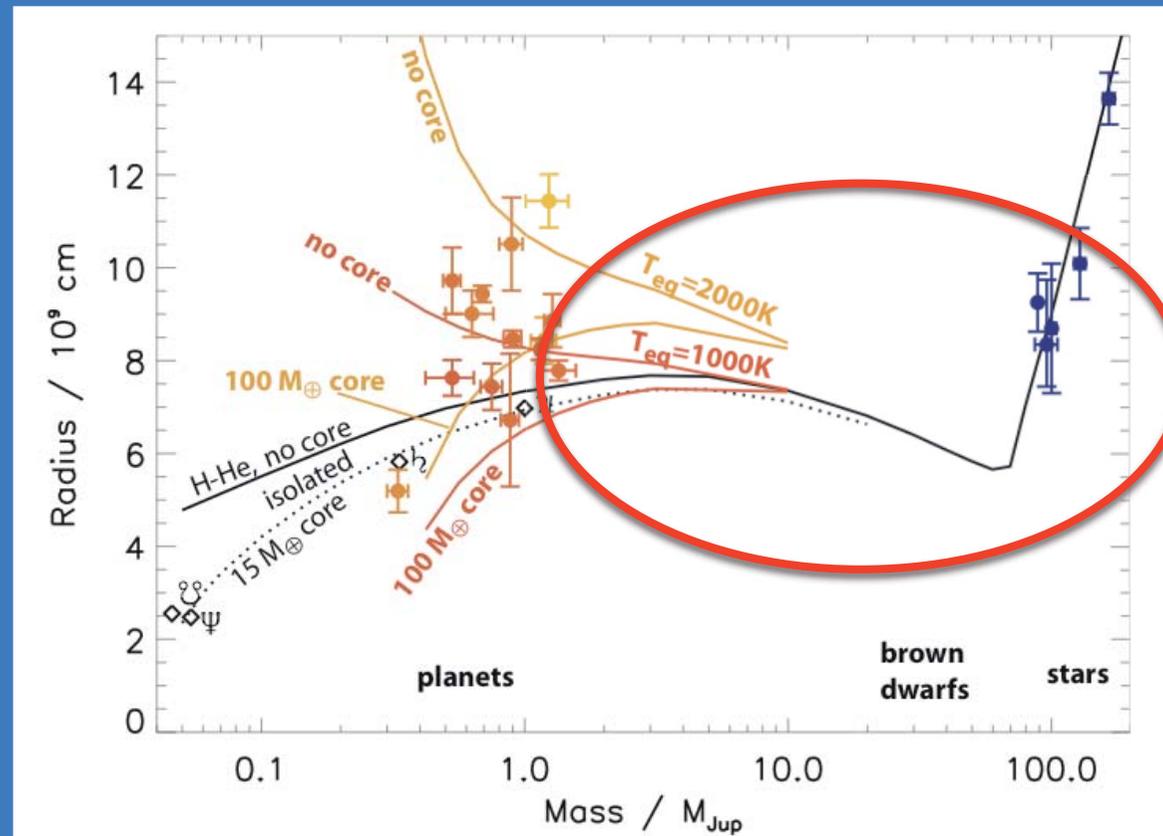
# Effet Rossiter-McLaughlin





# Confirmer la nature de l'objet en transit

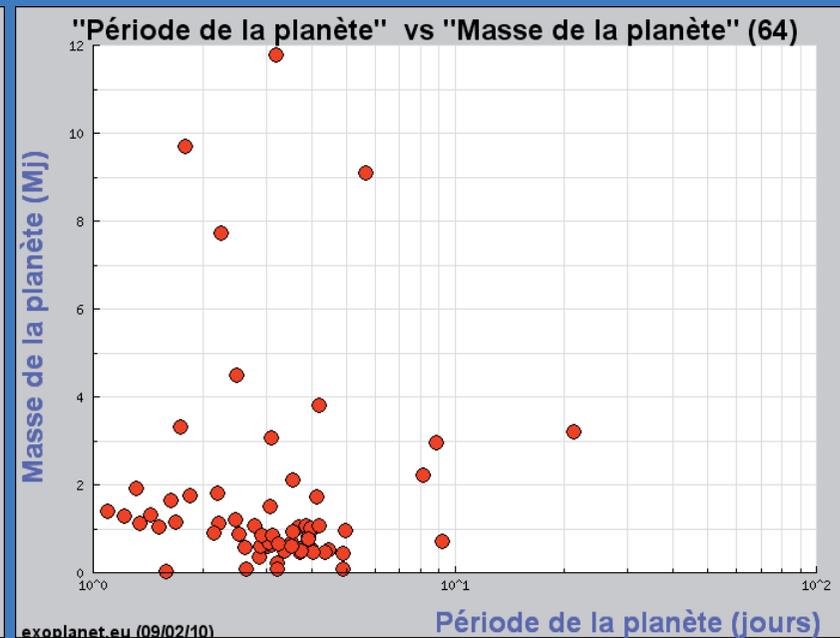
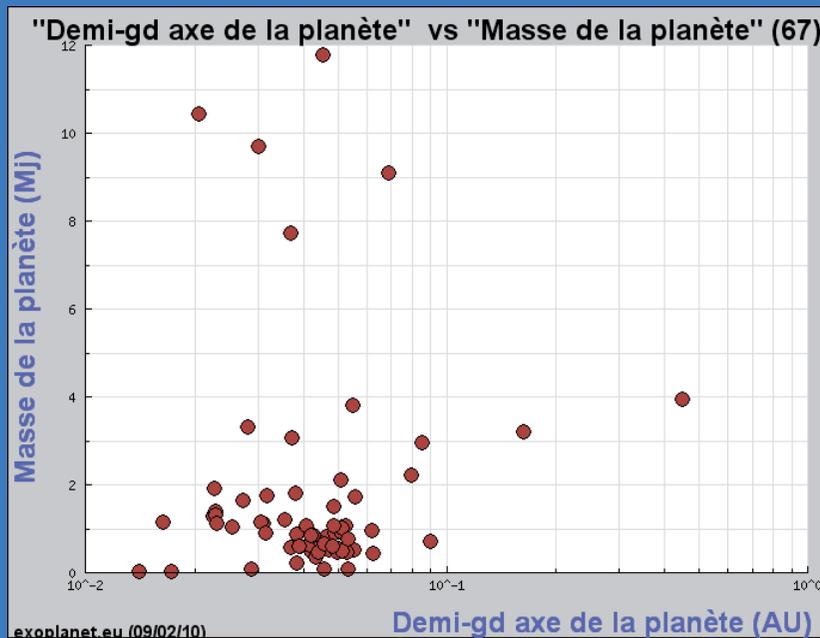
- La transition étoile planète





# Les planètes en transits

- Actuellement 69 objets en transits (planètes + BD)
- Principalement des planètes géantes observées depuis le sol (HAT, WASP, TrES, OGLE, XO...)
- 7 planètes CoRoT « officielles »
- Masse déterminée par vitesse radiale

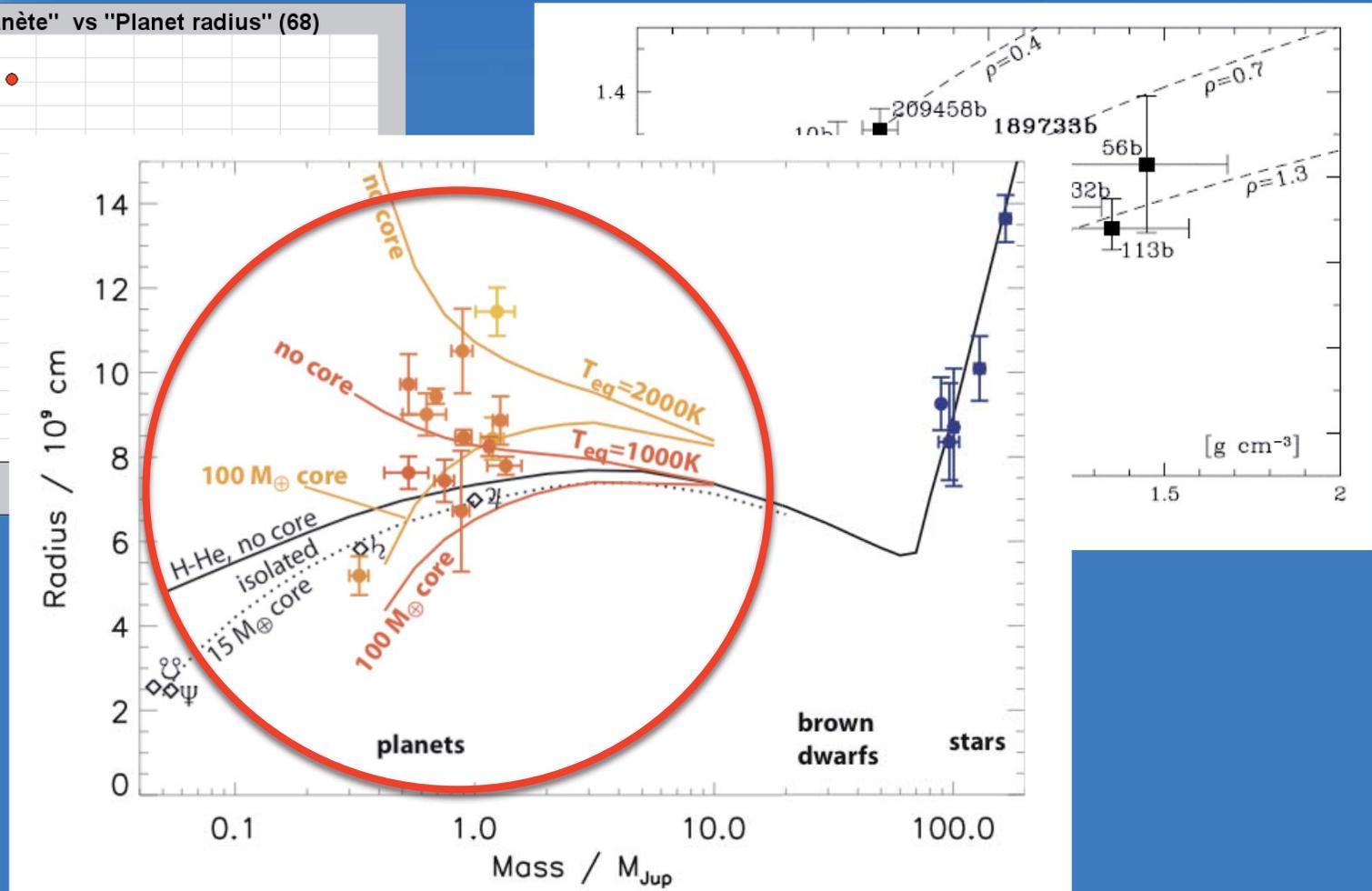
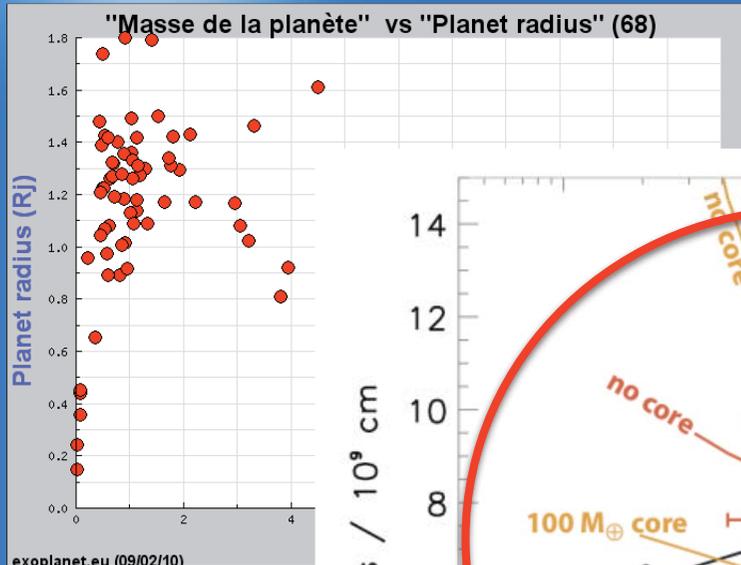




# La planétologie des transits



# Densité des exoplanètes





# Spectroscopie des transits

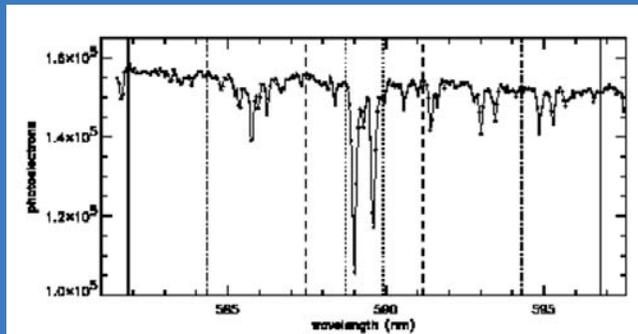
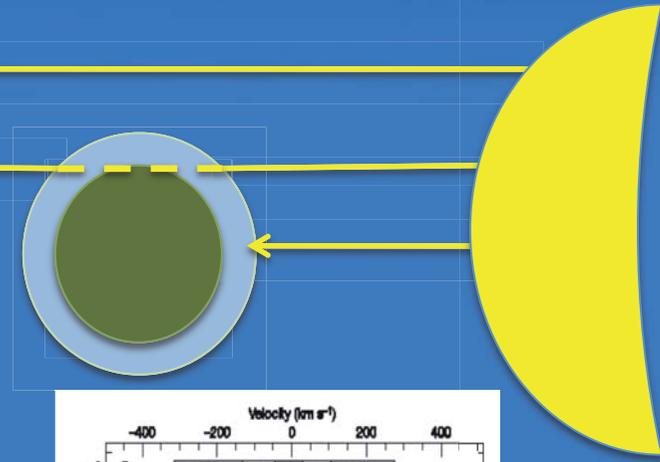
Flux stellaire ←

Flux stellaire absorbé (chromatique) ←

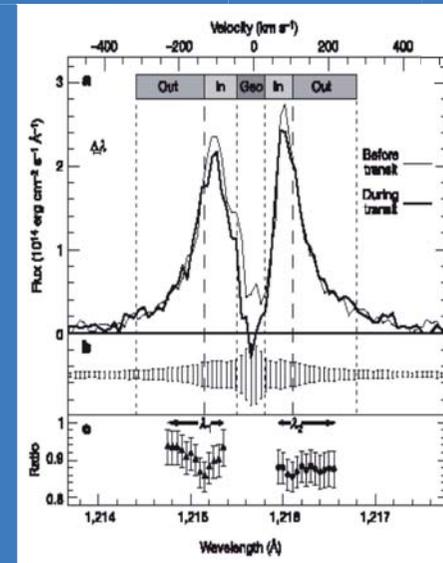
Flux stellaire occulté (achromatique)

$$P(z) \rightarrow \tau(\lambda) \rightarrow R_{\text{measured}} = f(\lambda)$$

$R(\lambda)$  mesuré  $\rightarrow$  composition



HD 209458 B : première identification d'une atmosphère (absorption du sodium)  
(Charbonneau et al. 2002)



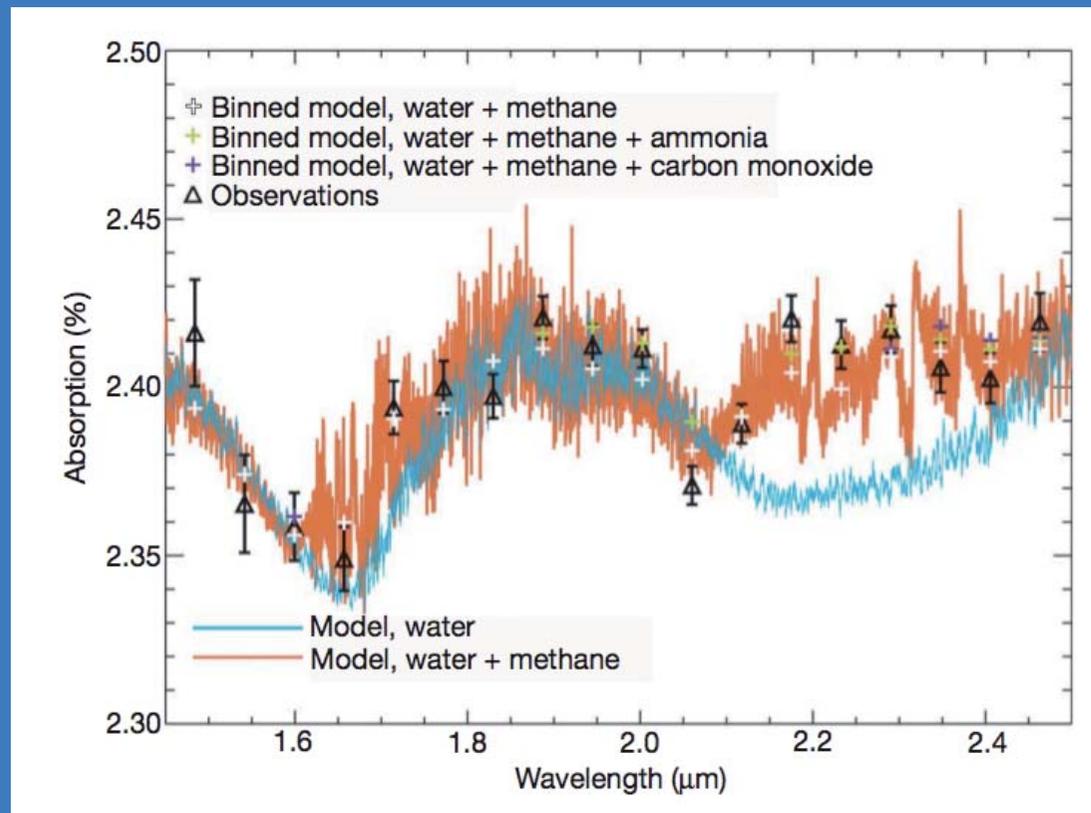
Détection de l'échappement de  $H_2$   
(Vidal-Madjar et al. 2003)



## Spectroscopie des transits (2)

- Spectroscopie en transmission : contrainte sur le modèle de HD 189733b : mise en évidence de CH<sub>4</sub> et H<sub>2</sub>O

planète 1.15 M<sub>J</sub> - 0.031 u.a. - p=2.2186 j - R=1.156 R<sub>☉</sub>  
Étoile : K1-K2 - mv=7.67 - M=0.8 M<sub>☉</sub> - d=19.3 pc

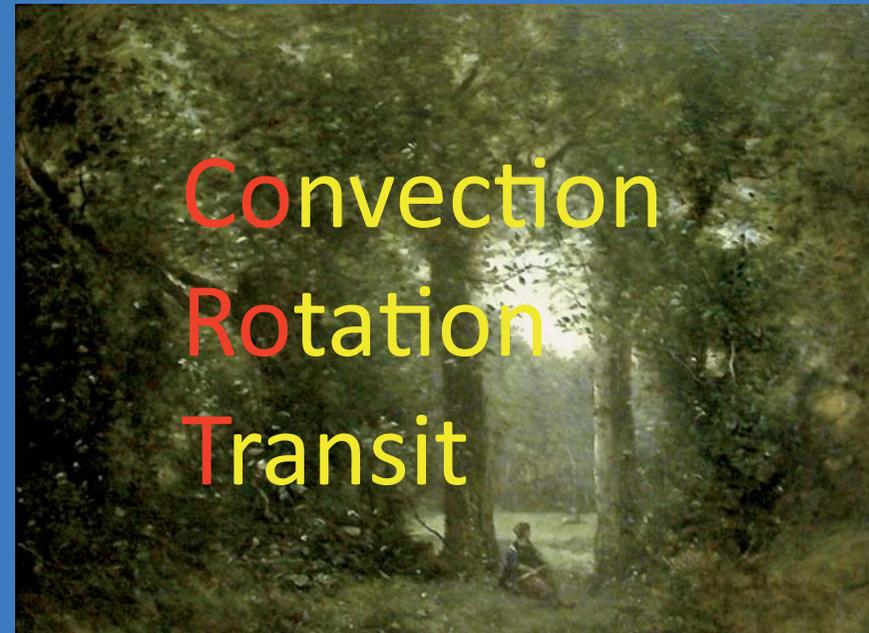
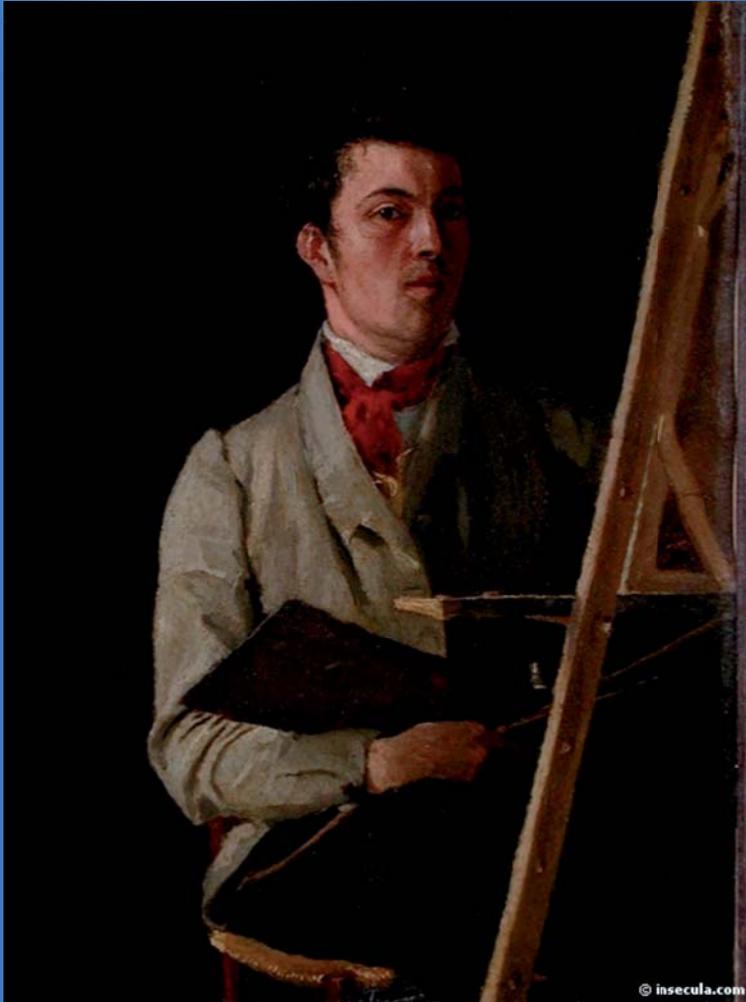


Swain et al. 2008



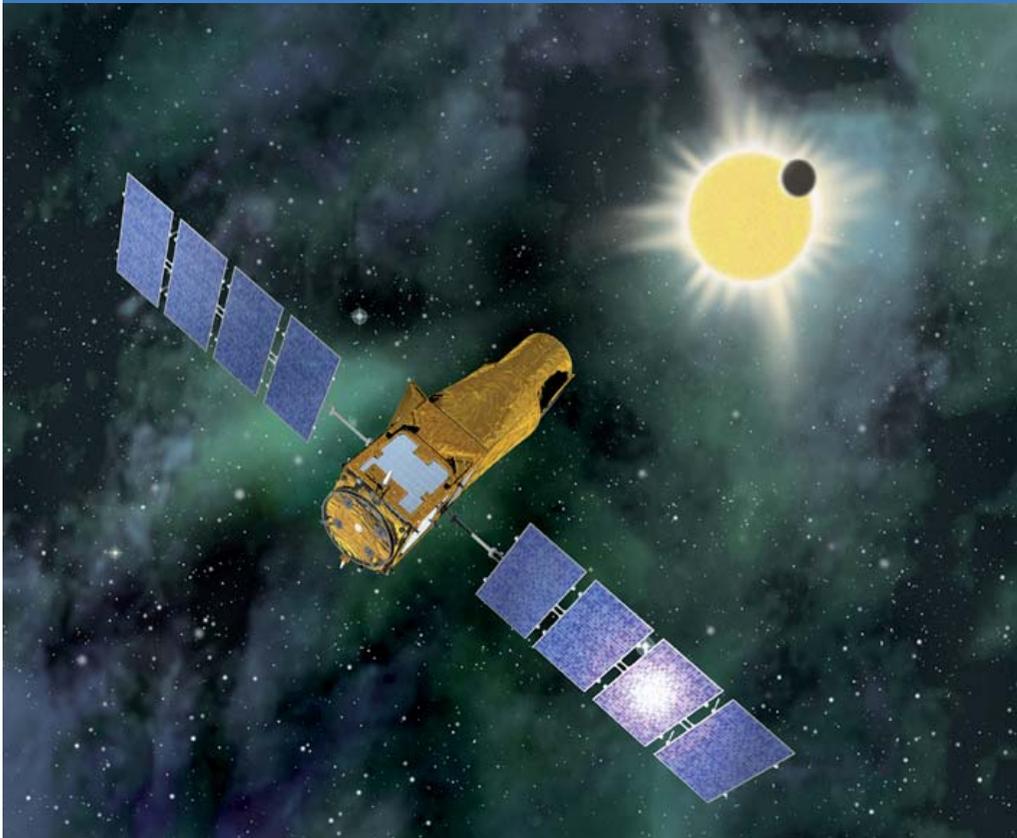
# CoRoT

Jean-Baptiste  
Camille COROT  
(1796-1875)





# CoRoT



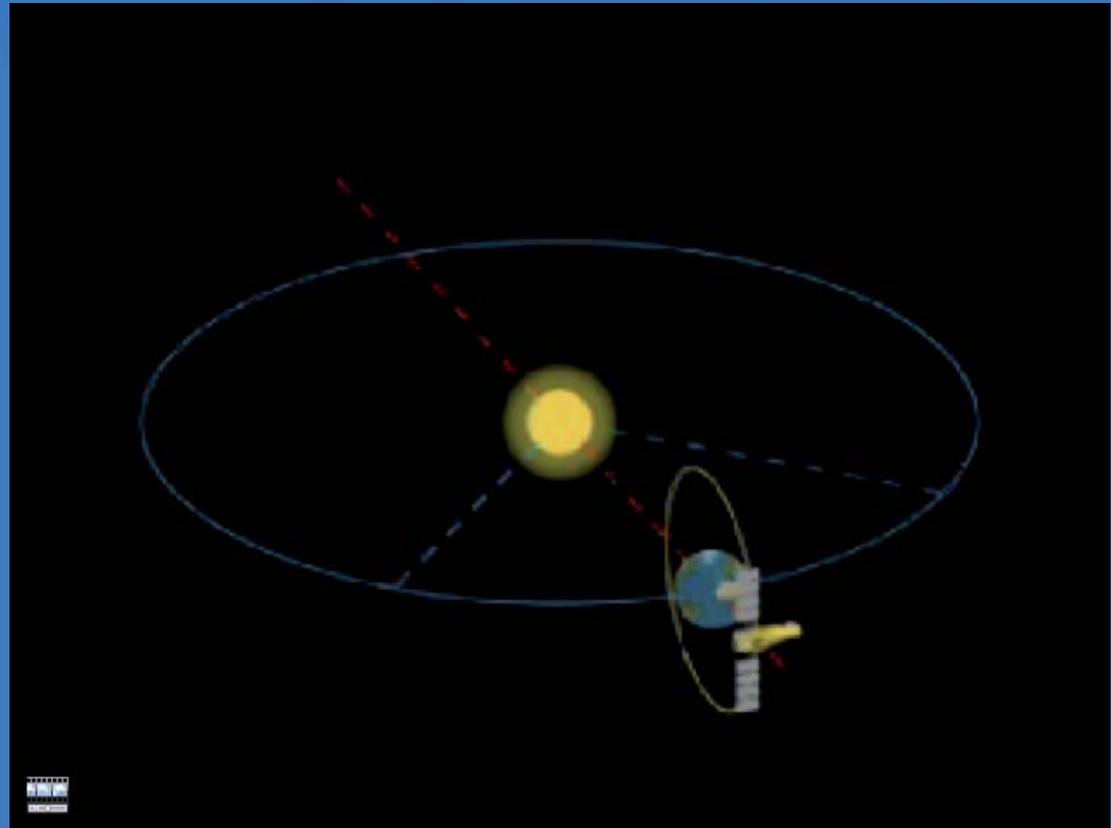


## CoRoT en bref

- « Petite » mission CNES (MO) + Belgique + Allemagne + Autriche + Espagne + Brésil + ESA
- 3<sup>ème</sup> mission PROTEUS (minisat)
- Double programme : astérosismologie ET recherche de planètes extrasolaires
- Lancement 27 décembre 2006 : Soyouz Starsem 2b depuis Baïkonour
- Orbite polaire circulaire à 896 km d'altitude
- Durée nominale : 3 ans



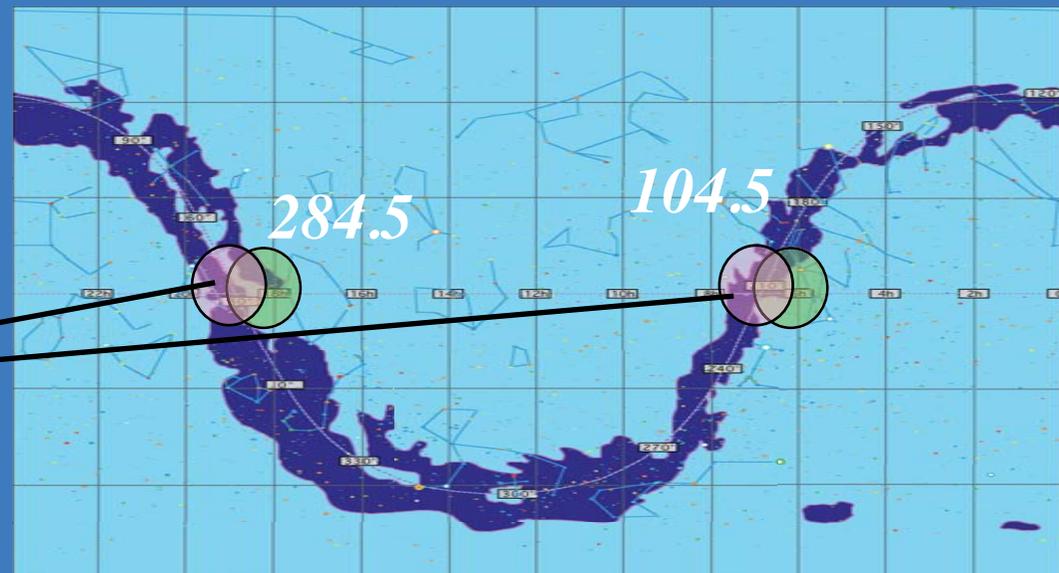
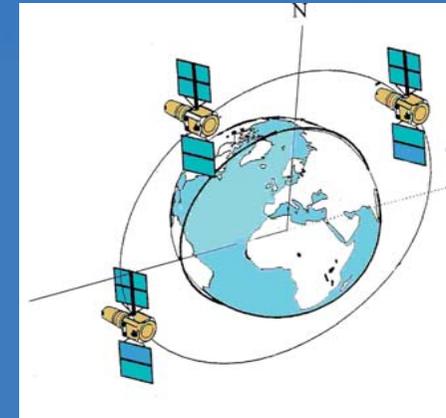
# Profil de la mission





# Les yeux de CoRoT

- Orbite polaire
- yeux de CoRoT à l'intersection du plan de l'écliptique et du plan de la Galaxie



- Les yeux de CoRoT



# Le satellite CoRoT



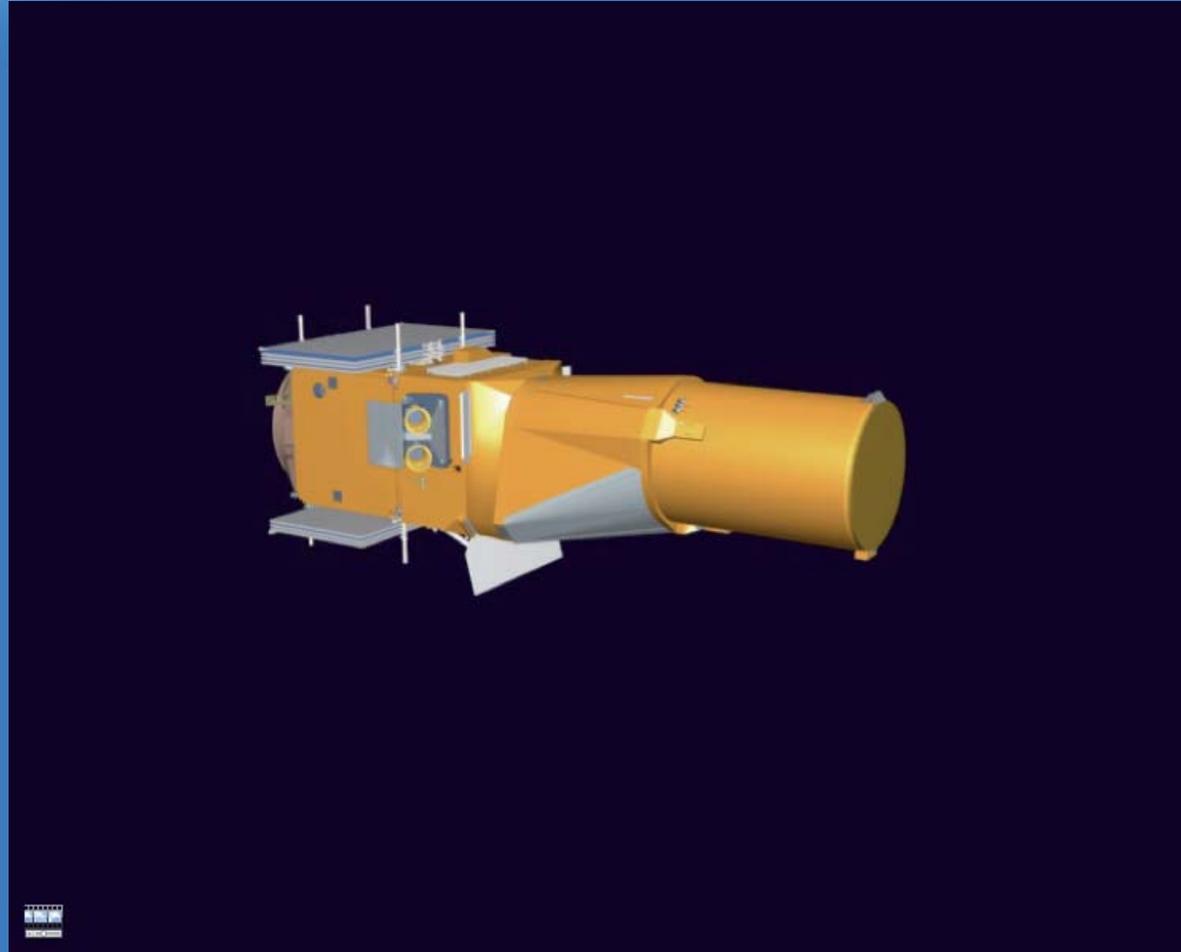
## Les Principales caractéristiques du satellite COROT

<b>Masse</b>	630 kg au lancement
<b>Masse Charge Utile</b>	300 kg
<b>Longueur</b>	4100 mm
<b>Diamètre</b>	1984 mm
<b>Puissance électrique</b>	530 W
<b>Précision du pointage</b>	0.5 arcsec
<b>Télémetrie</b>	1.5 Gbit/jour
<b>Capacité mémoire de masse</b>	2 Gbit

© Alcatel Alenia Space / JL Bazile 2006

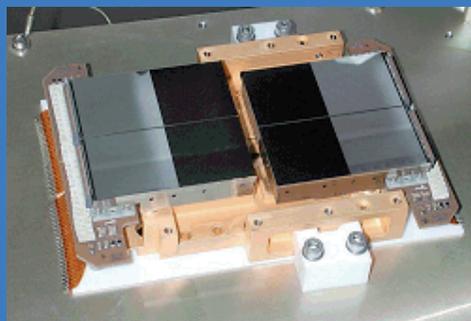
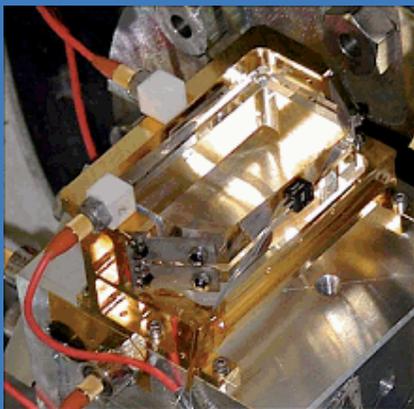
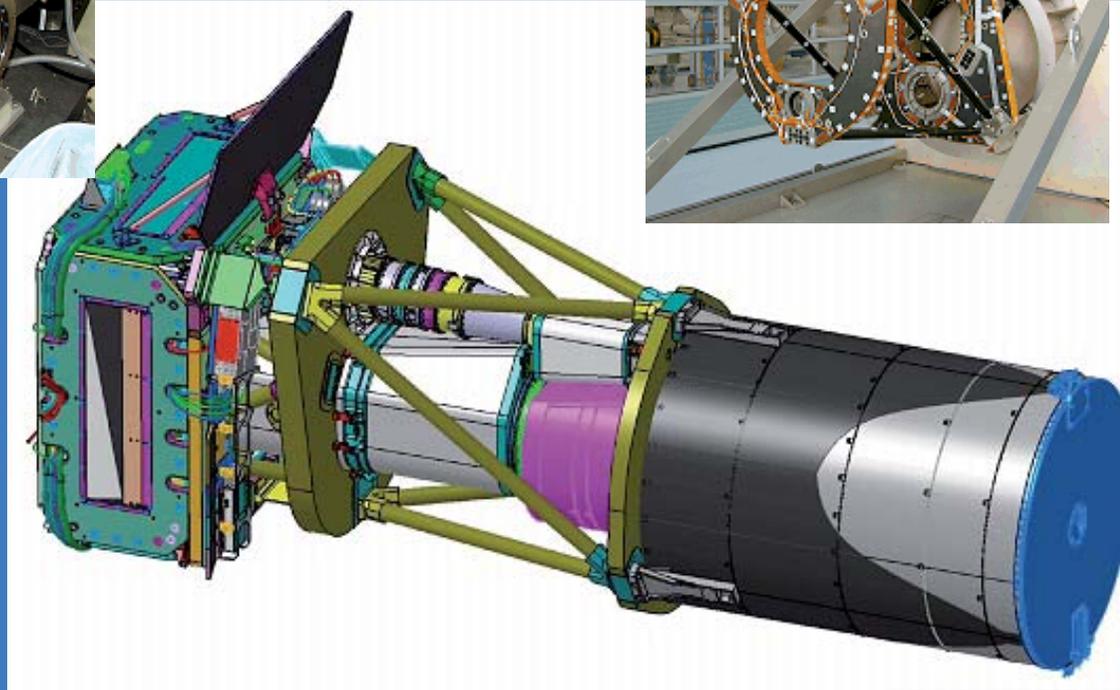
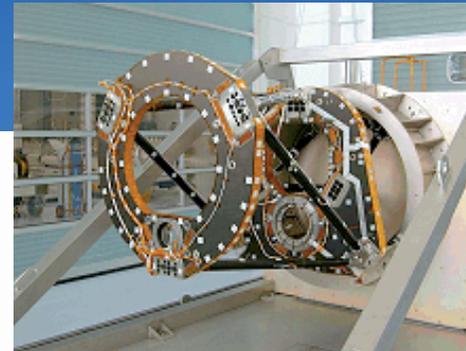


# L'instrument CoRoT





# L'instrument CoRoT (2)



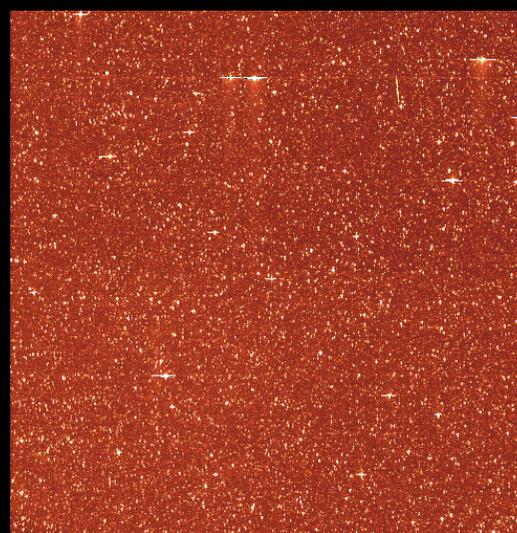
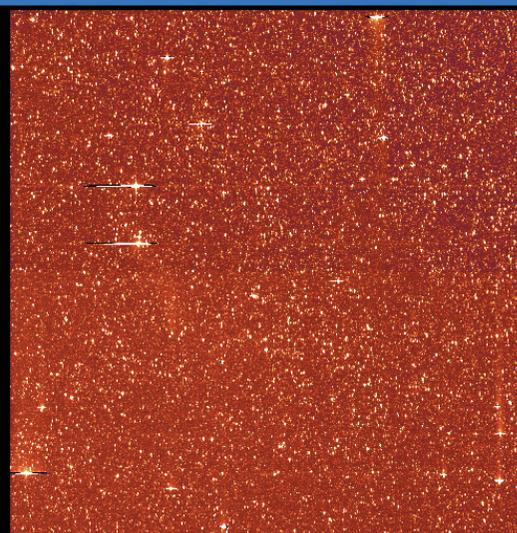
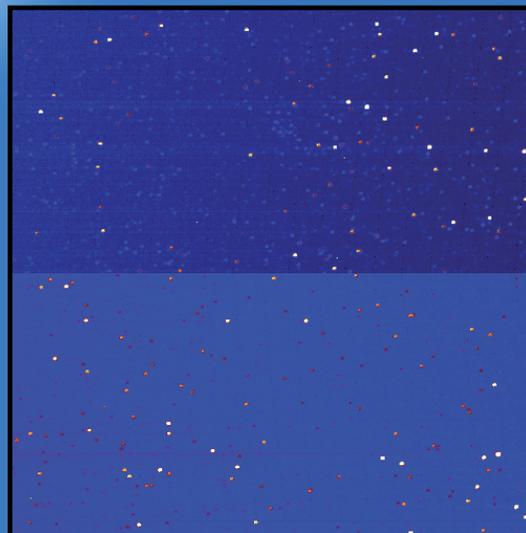


# Le plan focal de CoRoT

5 cibles / CCD  
 $5 \leq mv \leq 9,5$

Échantillonnage  
De 1 à 32 s

Champ sismo



CCD à transfert de  
trame, aminci,  
Retro éclairé,  
2048x2048 EEV  
Taille pixel :  $13.5 \mu\text{m}$   
or 2.32 arcsec

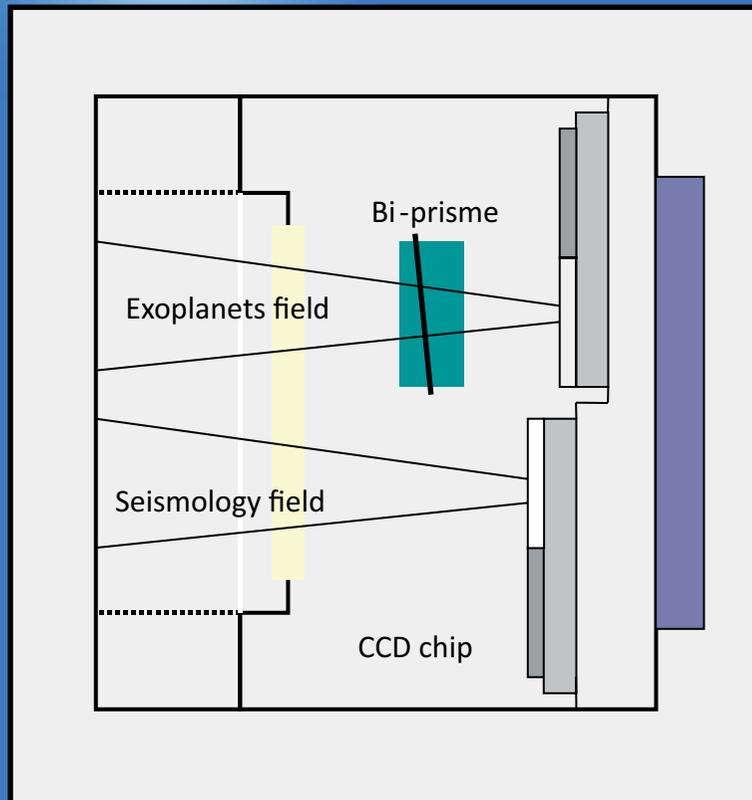
6000 cibles / CCD  
 $10.5 \leq mv \leq 16$

Échantillonnage  
De 32 s ou 512 s

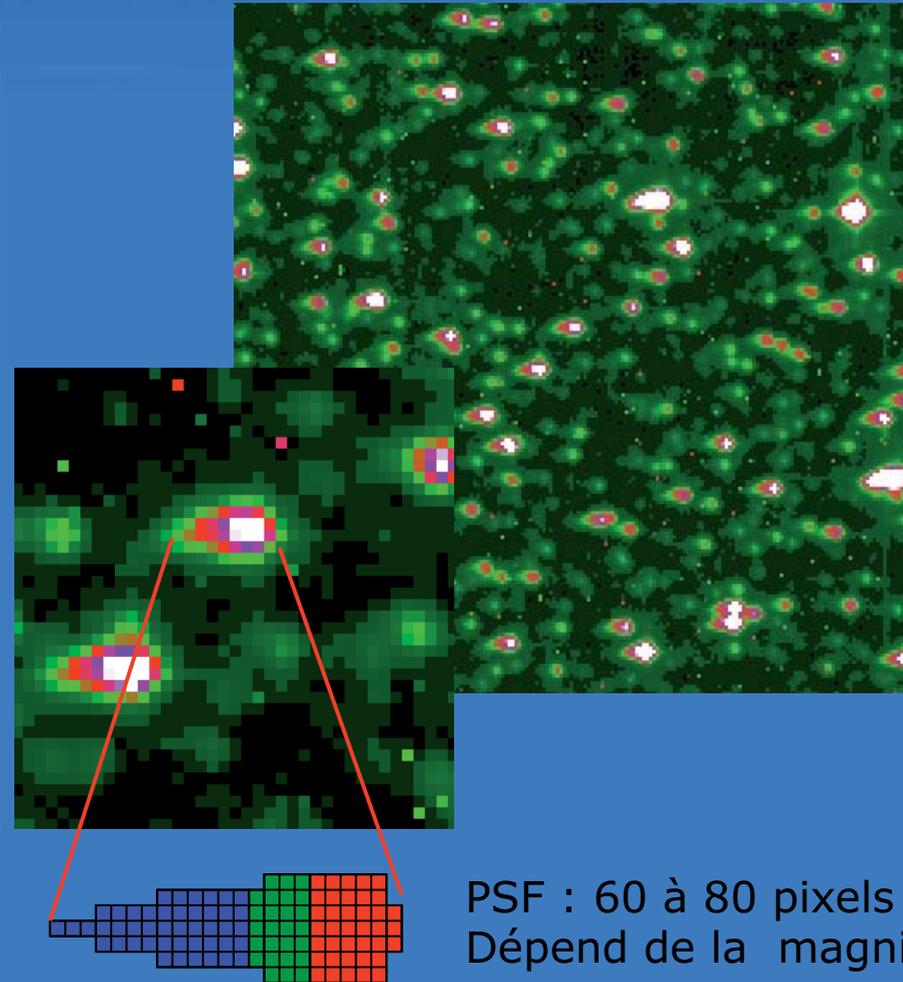
Champ exo



# Le plan focal de CoRoT (2)



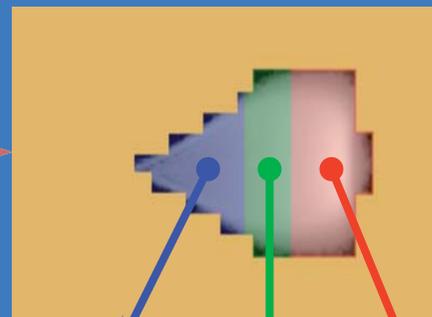
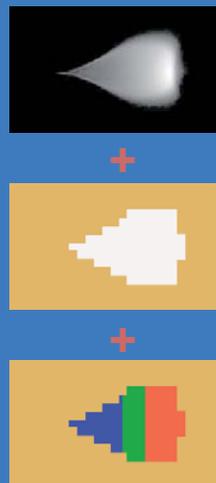
Photométrie en 3 couleurs



PSF : 60 à 80 pixels  
Dépend de la magnitude



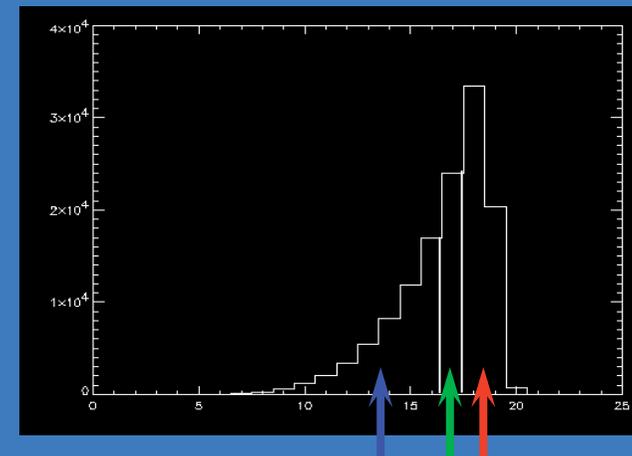
# Photométrie chromatique



Bleu

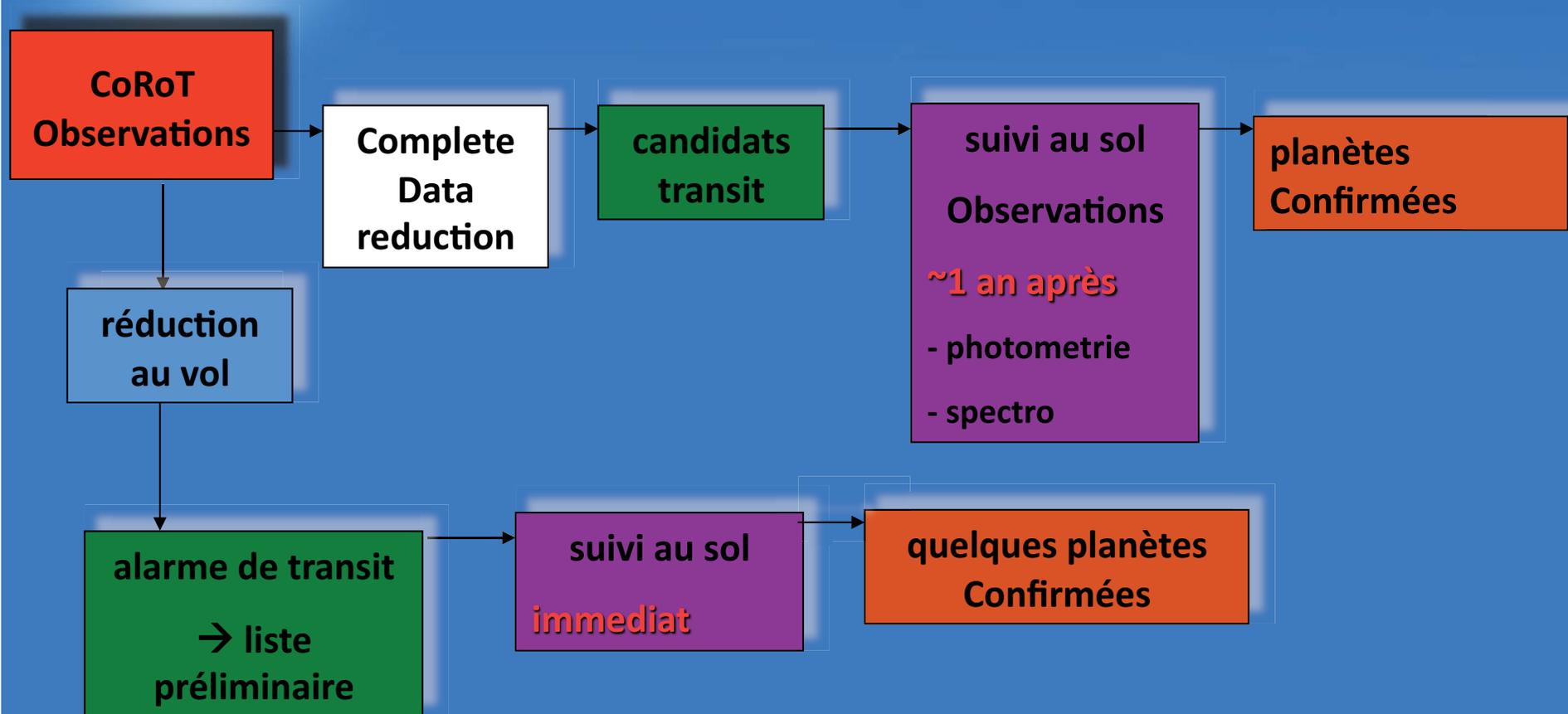
Vert

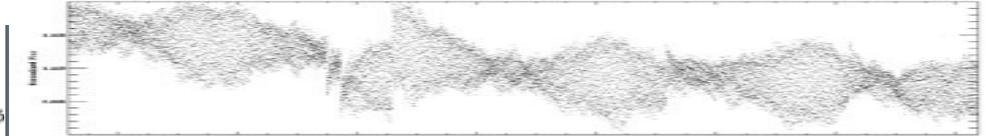
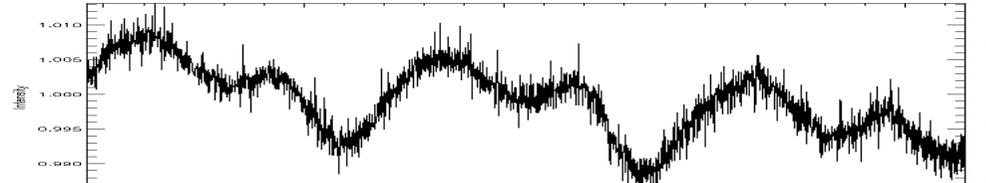
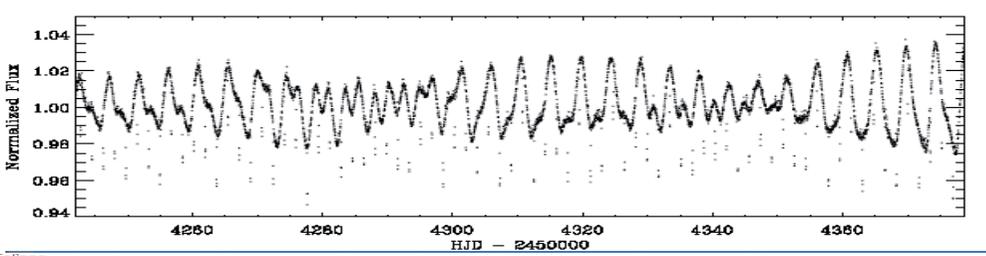
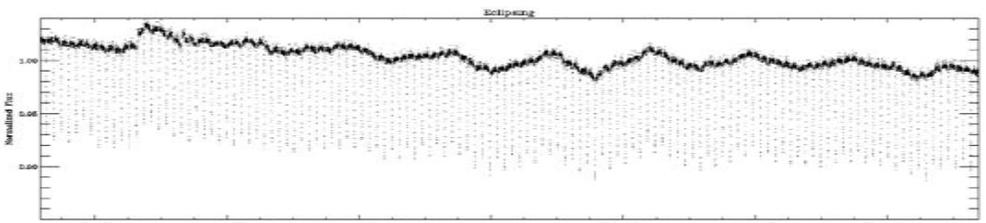
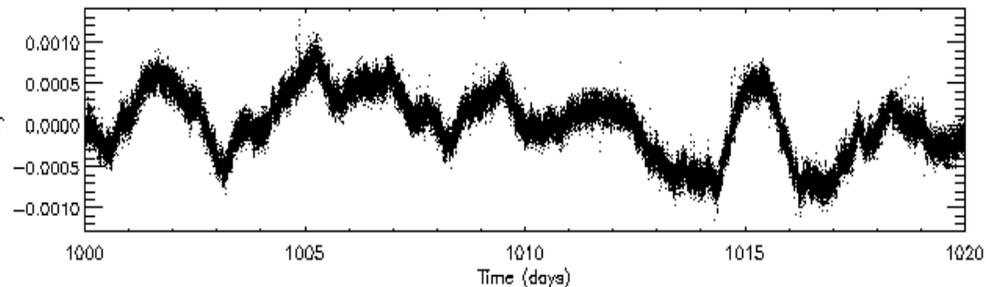
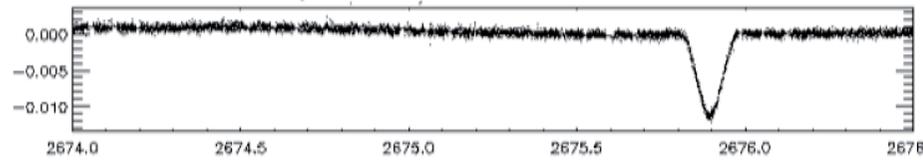
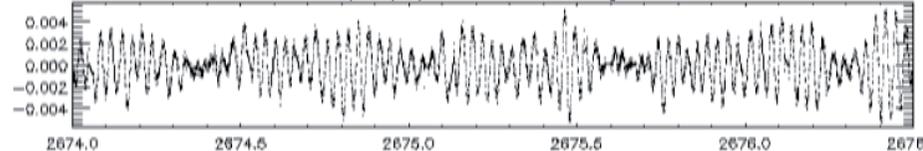
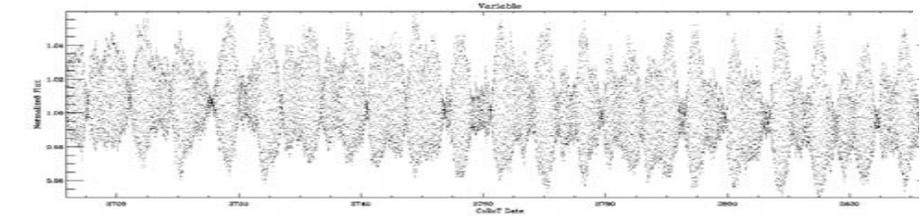
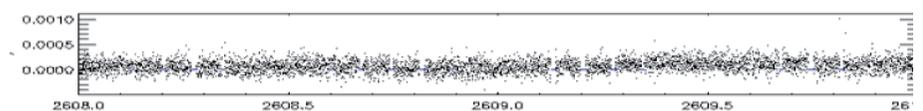
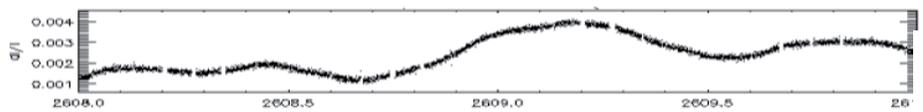
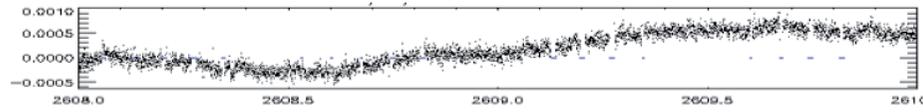
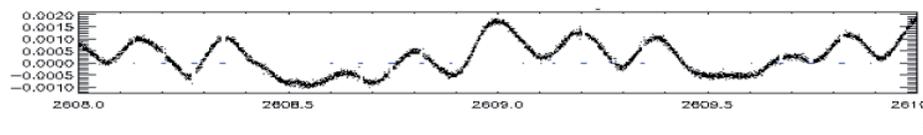
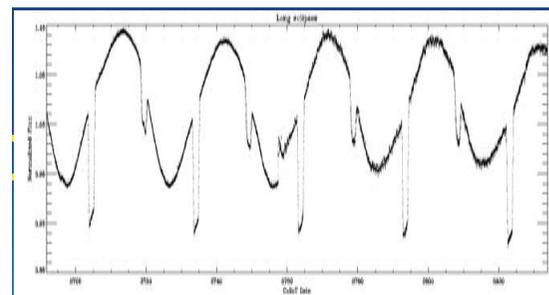
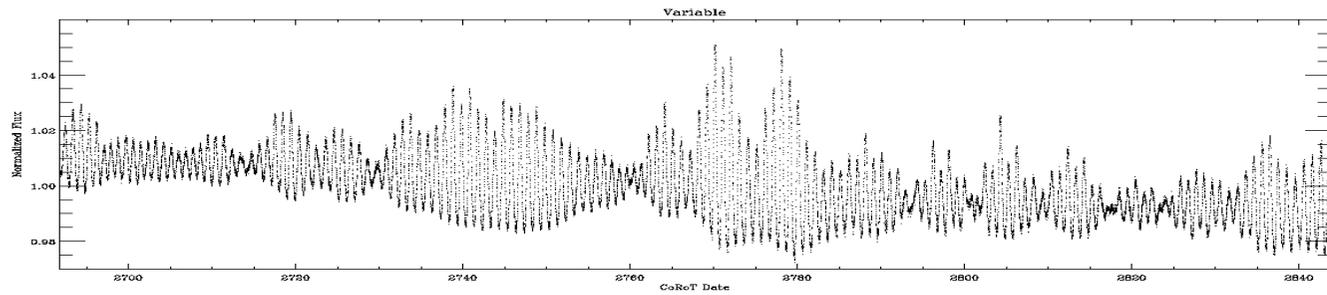
Rouge





# Traitement des données

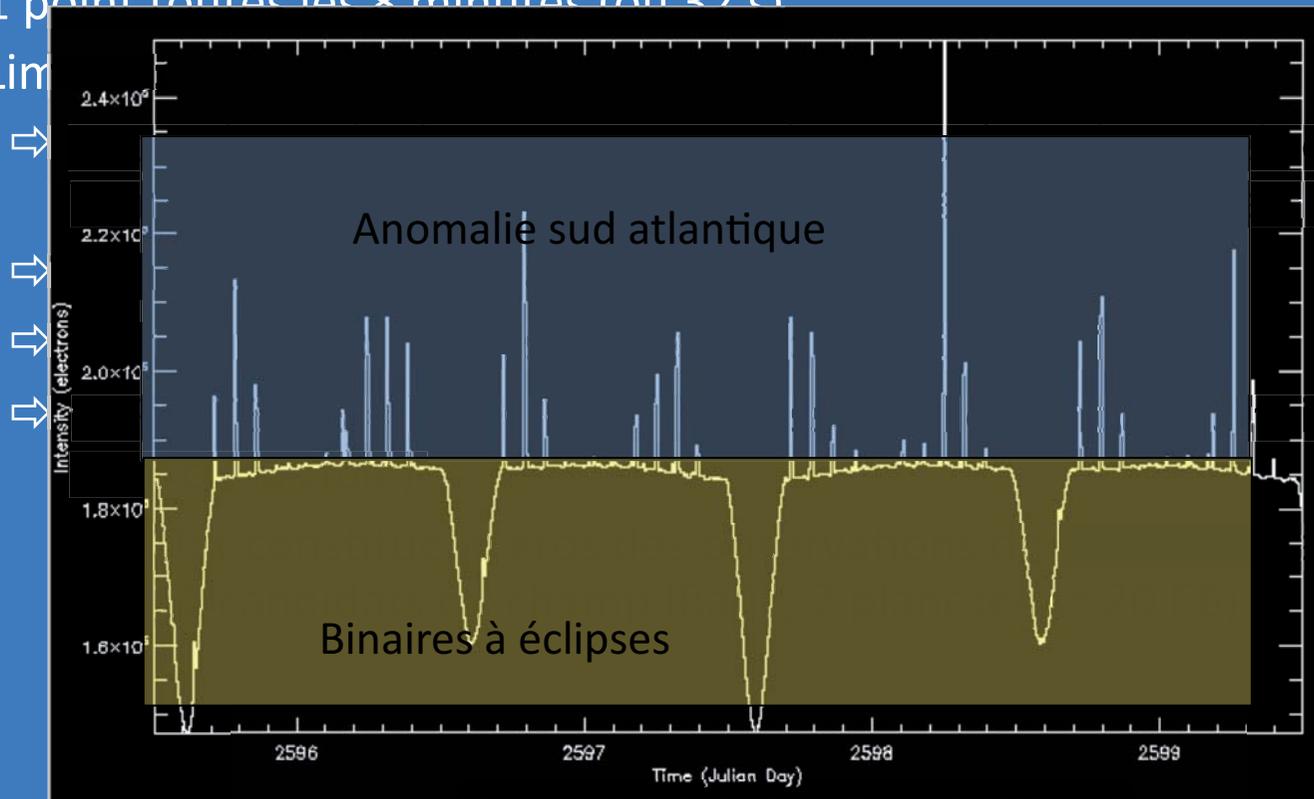






# CoRoT : programme exoplanètes

- 5 champs =  $5 \times 2 \times 6000 *$  sur 150 j = **60 000 \*** + .... (mission prolongée)
- + 10 champs =  $10 \times 2 \times 6000 *$  sur 20 j => **180 000 étoiles**
- Photométrie d'ouverture : 60-80 pixels
- Information en 3 couleurs : prévue pour résoudre des ambiguïtés
- 1 point toutes les 8 minutes (ou 32 s)
- Lim



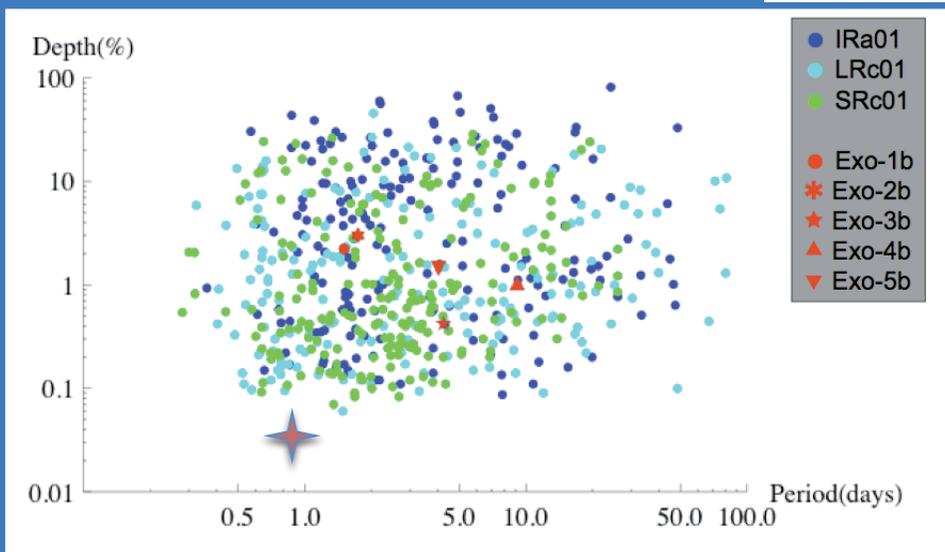
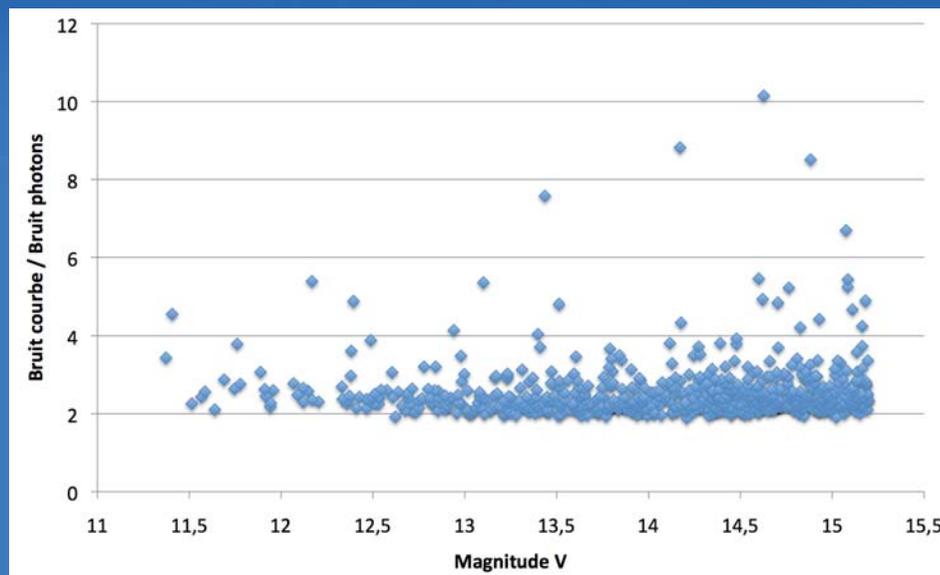
chauds à  
Corot)

es à éclipse (de

sol (e.g. sur



# Performances de CoRoT



Candidats des 3 premiers runs

Planètes Confirmée en rouge

+ confirmation en cours



# Les planètes de CoRoT



# Les planètes confirmées

CoRoT + Photométrie + Vélométrie + HR spectroscopie + modèle structure

## Paramètres des planètes

Planet	V*	Sp type	N. tr	Period (Days)	Rayon (Jupiter)	Masse (Jupiter)	Tpl	densité
1b	13.6	F9	36	1.51	1.49 ± 0.1	1.03	1900	0.38
2b	12.57	G7	81	1.74	1.46 ± 0.05	3.31	1540	1.3
3b	13.3	G0V	34	4.26	1.01	21.6		35
4b	13.7	F8V	6	9.20	1.18 ± 0.3	0.71		0.58
5b	14.0	F9V	27	4.04	1.09	0.86		0.86
6b	13.9		~18	8.89	1.16	3,3		2.6
7b	11.7	K0V	>150	0.85	0.16	0.02	1100 2000	6



# Les jupiters chauds

## CoRoT-exo-1b

faible densité période courte (1.5 j)

36 transits

## CoRoT-exo-4b

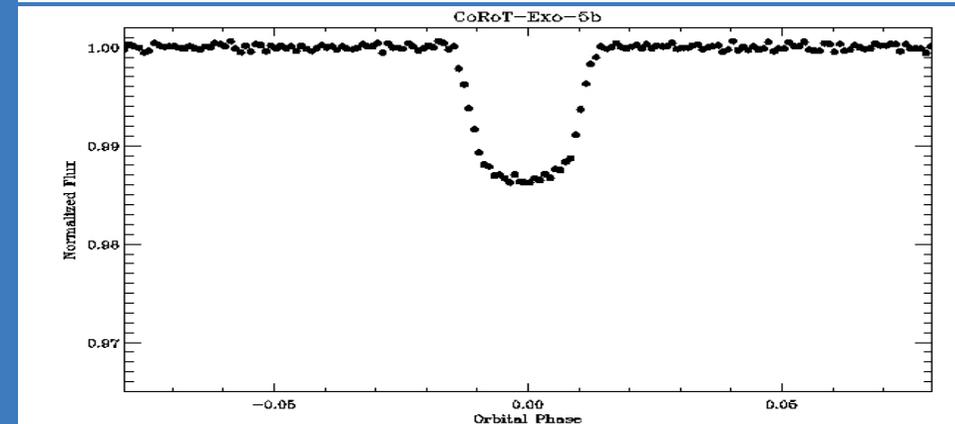
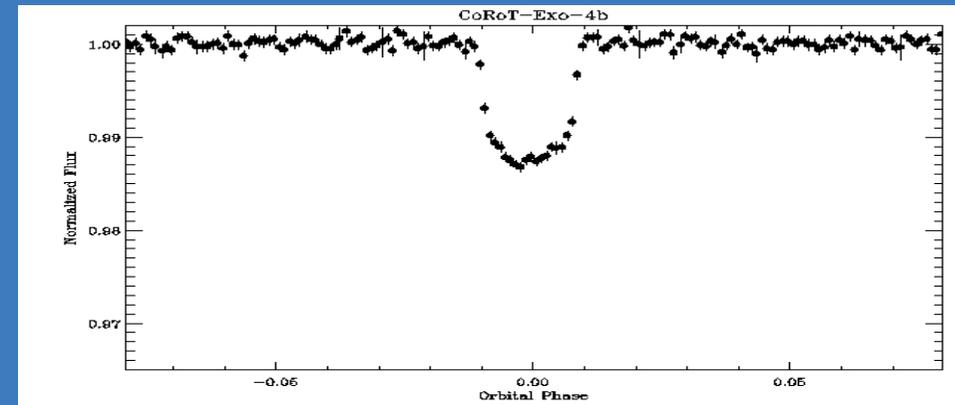
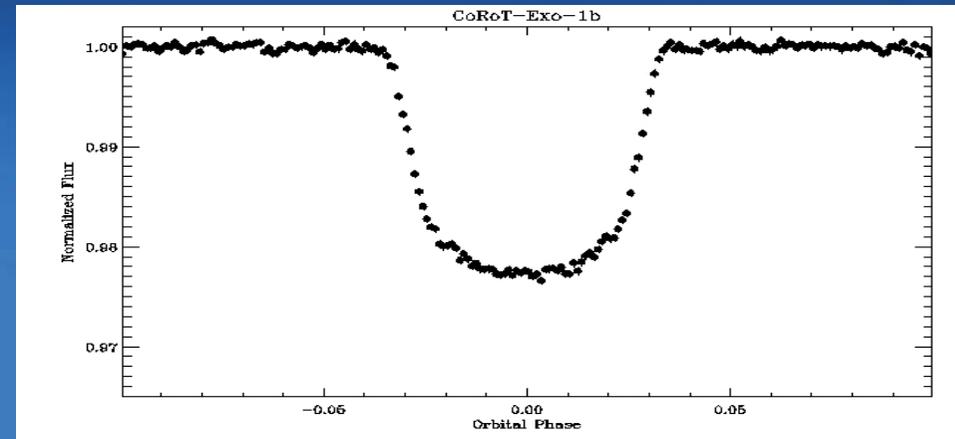
orbite de 9.2 j synchrone

46 transits

## CoRoT-exo-5b

Jupiter chaud classique (4j)

27 transits





# CoRoT-1b : un jupiter enflé

- Paramètres planète :

- ⇒  $M_p = 1.03 M_{Jup}$

- ⇒  $R_p = 1.49 R_{Jup}$

- ⇒  $\rho = 0.38 \text{ gcm}^{-3}$

- ⇒  $T_p = 1900 \text{ K}$

- Densité faible : ?

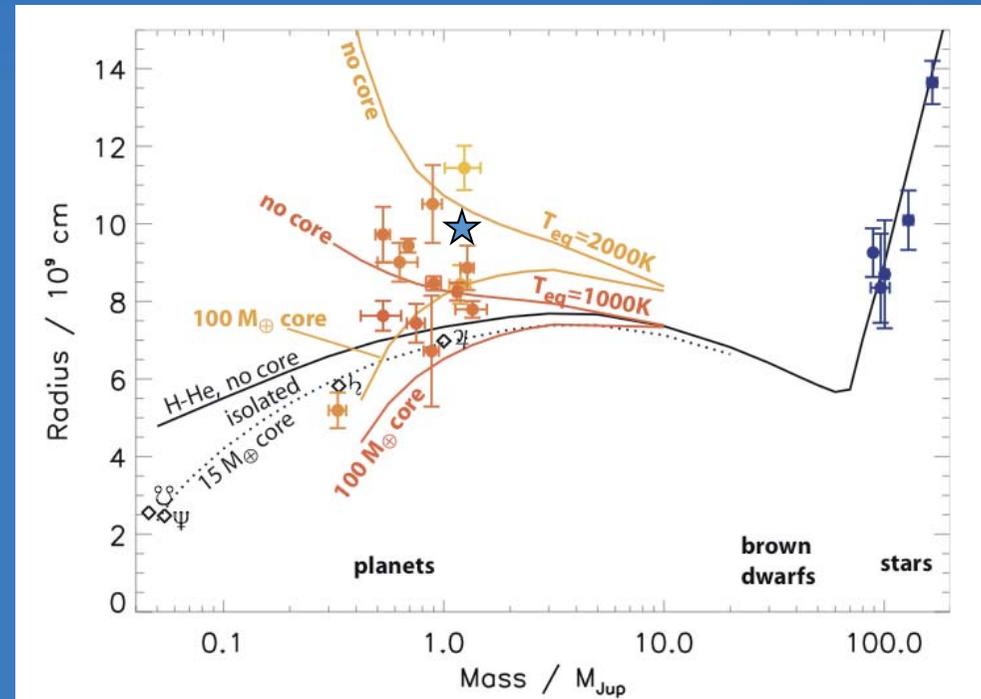
- Modèle de T. Guillot

- ⇒ enfle sous l'irradiation

- ⇒ 2 cas possibles :

- ⇒ Dissipation interne de 1% du flux stellaire (physique ?)

- ⇒ Opacité x 10 à 30 si pas de noyau



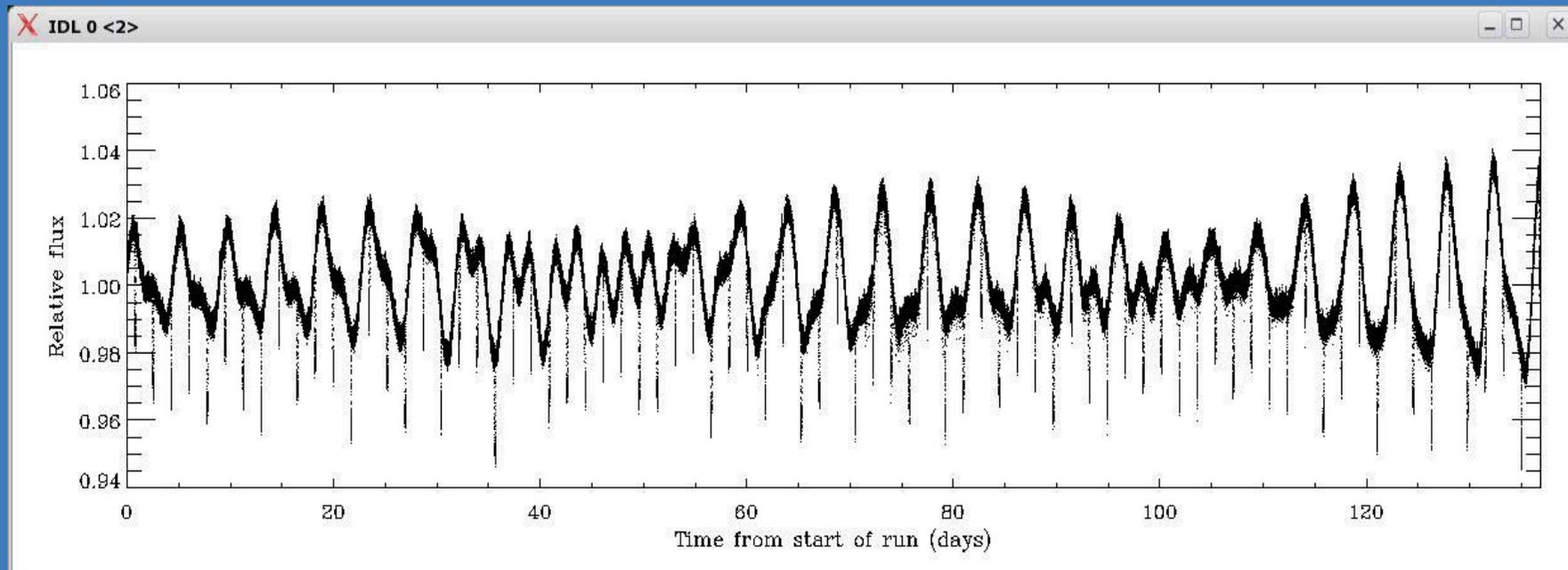
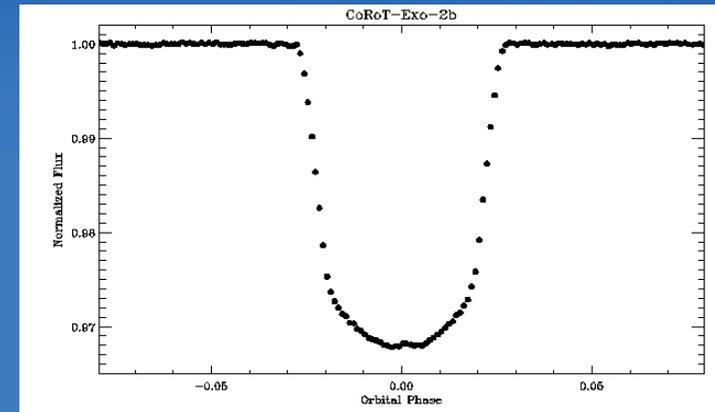


# CoRoT-2b : un (trop) gros jupiter

81 transits successifs

- **Une étoile très active !**

⇒ Des taches à différentes latitudes produisent les pulsations multi-périodes observées





# CoRoT-2b

- Paramètres étoile :

- ⇒ G7V :  $M^* = 0.97 M_{\odot}$  -  $R = 0.91 R_{\odot}$  -  $T_{\text{eff}} : 5625 \text{ K}$

- ⇒ très jeune : 0.05 Gyrs

- raies LiI en abs et H,K du CaII en émission
    - rotation rapide, taches

- ⇒ Métallicité solaire

- Paramètres planète :

- ⇒  $P = 1.74 \text{ j}$

- ⇒  $a = 4.92 R^* = .027 \text{ AU}$

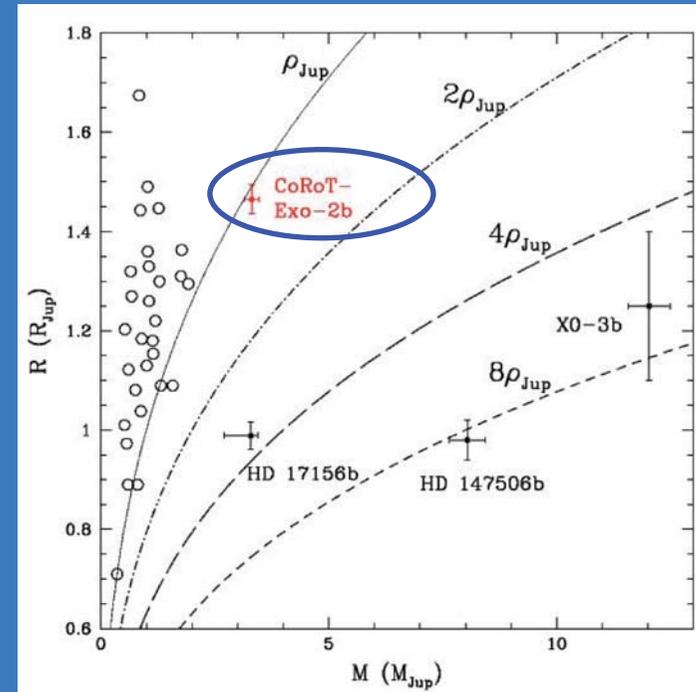
- ⇒  $i = 87^\circ$

- ⇒  $M_p = 3.31 M_{\text{Jup}}$

- ⇒  $R_p = 1.465 R_{\text{Jup}}$

- ⇒  $\rho = 1.31 \text{ g cm}^{-3} = \text{Jupiter}$

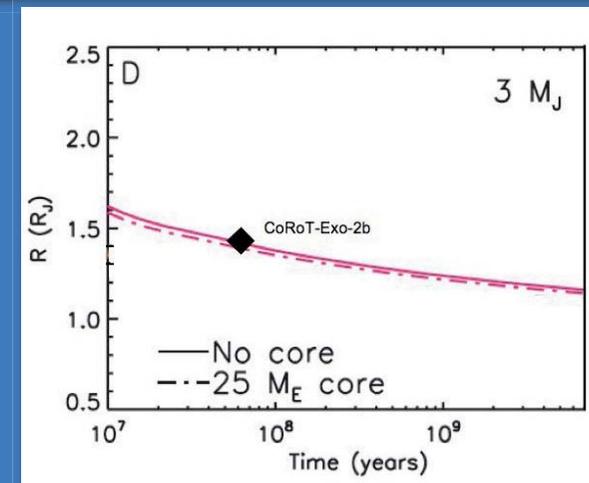
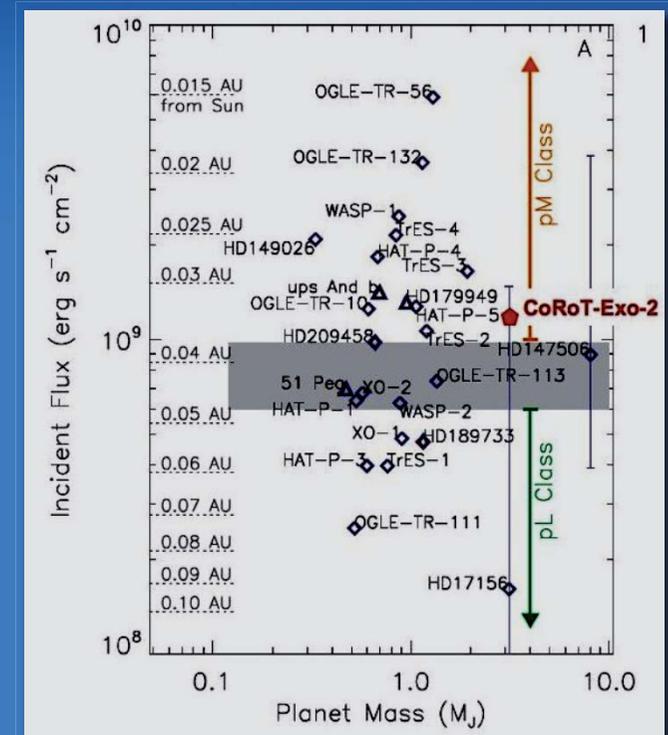
- ⇒  $T_p = 1537 \text{ K}$





# CoRoT-2b : grand rayon ?

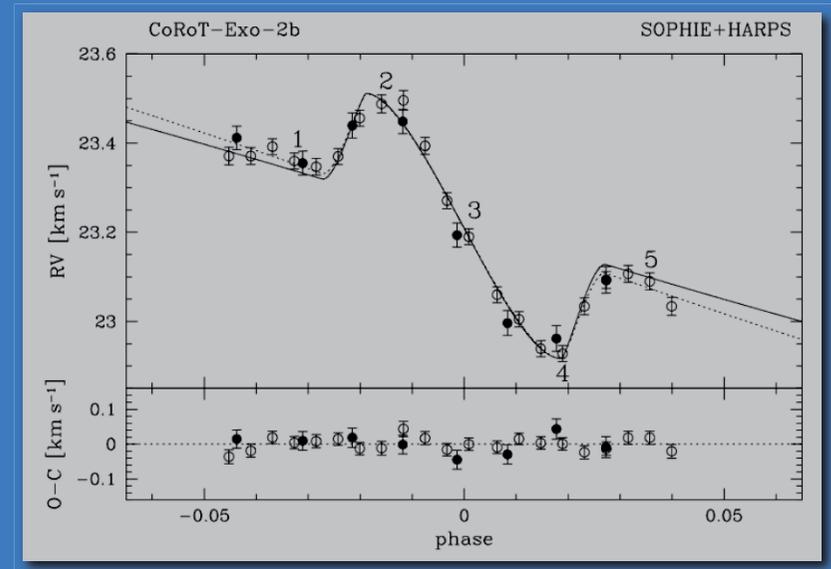
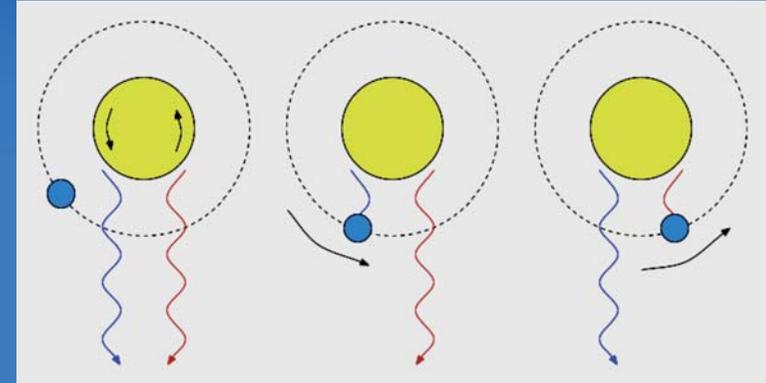
- Densité  $\sim$  celle de Jupiter alors que  $M = 3 M_{\text{jup}}$
- Rayon grand comparé aux modèle (Guillot) : 30% de plus qu'une planète H-He irradiée
- Pourrait être une pM, i.e. avec **inversion de T forte** due à la non-condensation de Ti  $\rightarrow$  absorption gazeuse dans la haute atmosphère  
 $\Rightarrow$  Grand contraste jour/nuit prédit
- Pourrait être **très jeune**, encore en train de se refroidir !





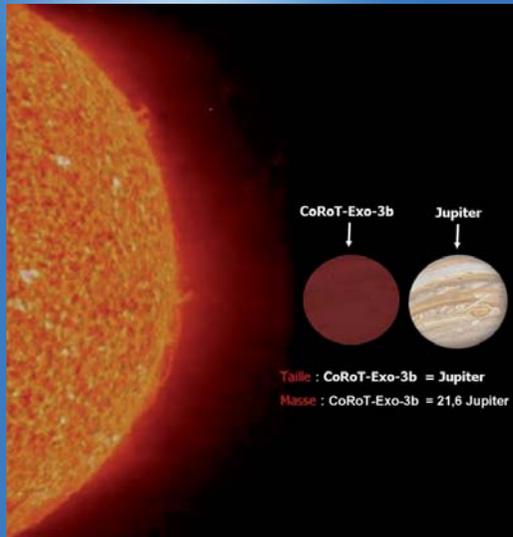
# CoRoT-2b : bonus

- Mesure effet Rössiter-McLaughlin
- Transit vu en vitesse radiale
- $\rightarrow$  angle  $\lambda$  entre l'axe de rotation de l'étoile et l'angle de l'axe orbital de la planète :
- Exo2b :
  - $\Rightarrow \lambda = 7.2^\circ \pm 4.5$
  - $\Rightarrow$  prograde
- Mesuré sur 5 autres planètes à transits
  - $\Rightarrow \lambda = \sim 0^\circ$  & prograde



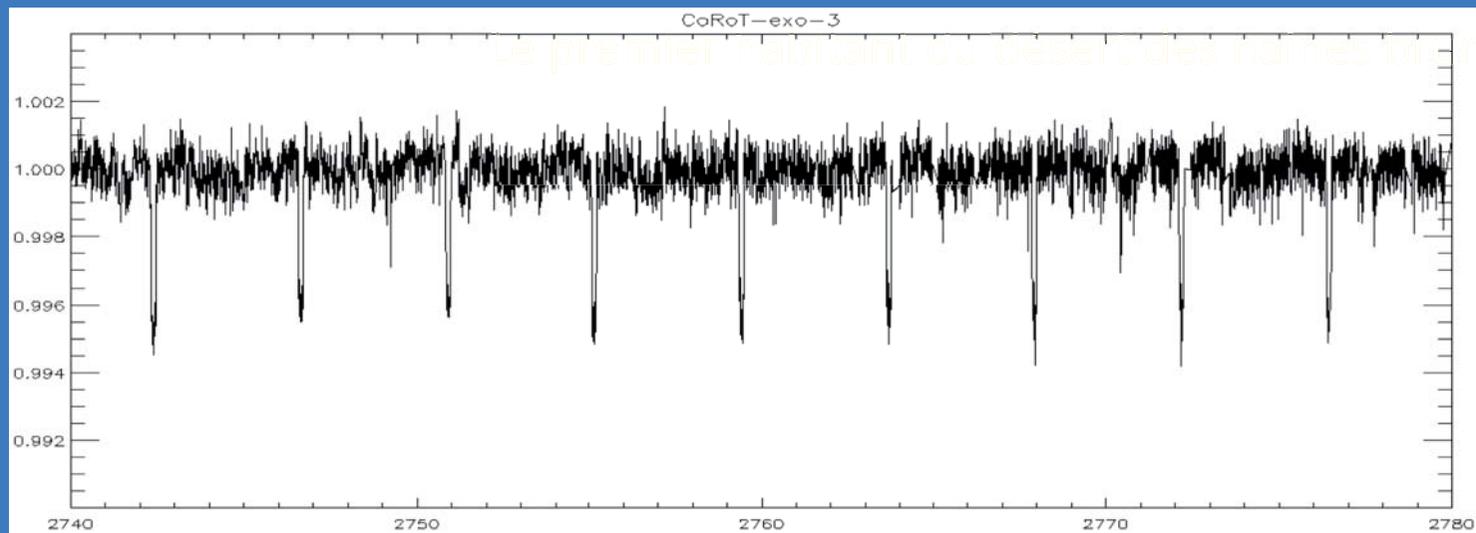


# CoRoT-3b : objet de transition



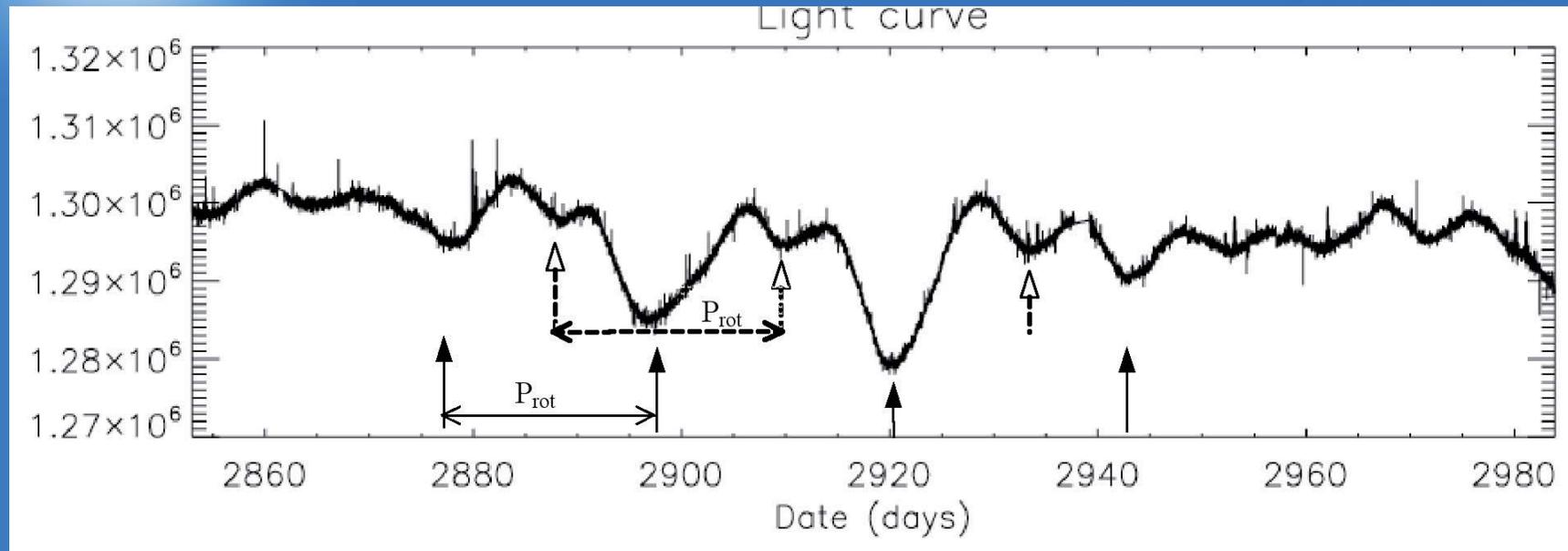
## CoRoT-exo-3b

34 transits  
Prot ~ 4 jours  
période planète : 4.26 j  
excentricité petite  
R:  $0.82 \pm 0.1 R_{Jup}$   
M =  $22 M_{Jup}$





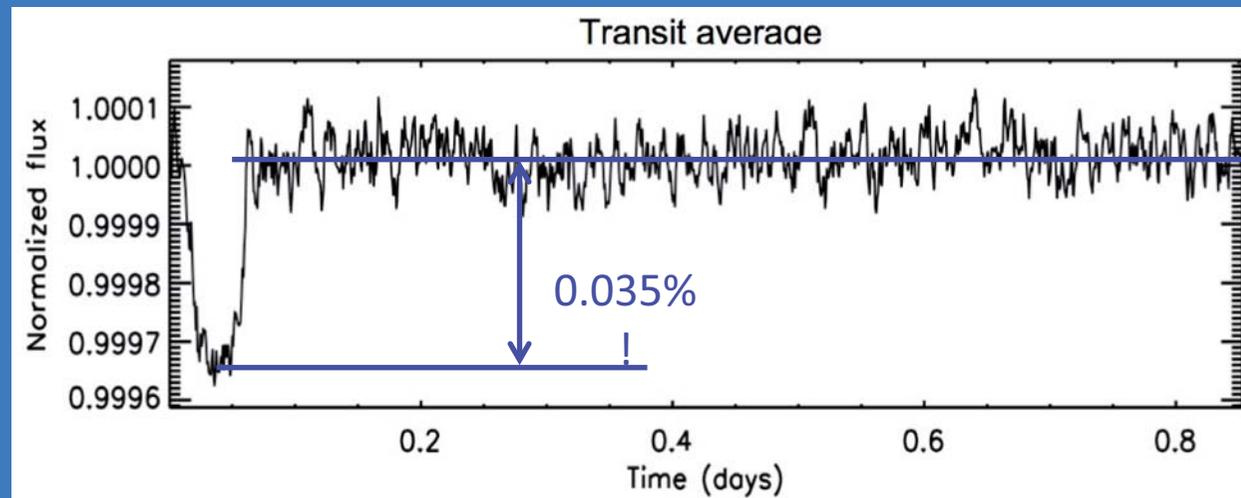
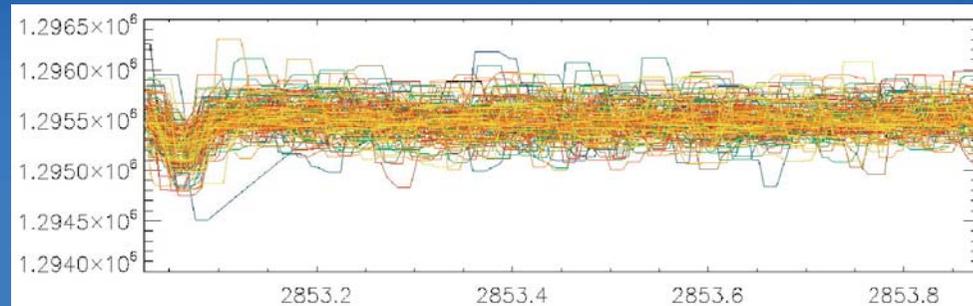
# CoRoT-7b : courbe photométrique



- étoile très active (modulation : 2 %)
- le passage de taches dû à la rotation de l'étoile est visible  
→ période de rotation = 23 jours



# CoRoT-7b : courbe repliée



- 153 transits, tous  $\sim$  vus après superposition
- période courte:  $P = 0.8536$  jours  
→ profondeur du transit :  $\Delta F/F = 0.035\%$



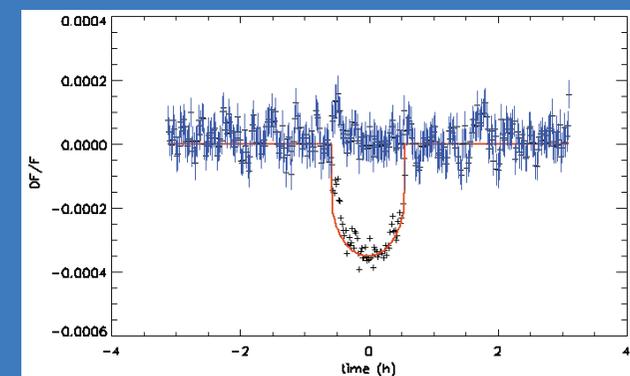
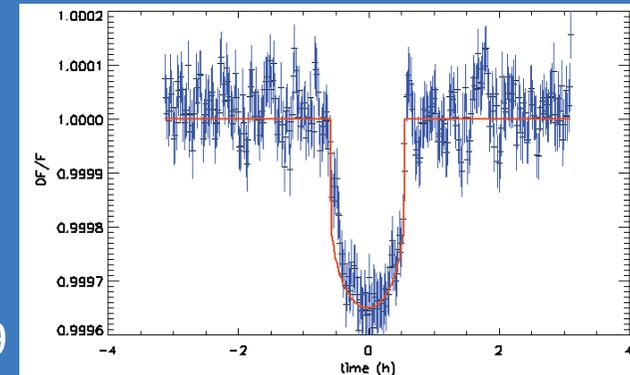
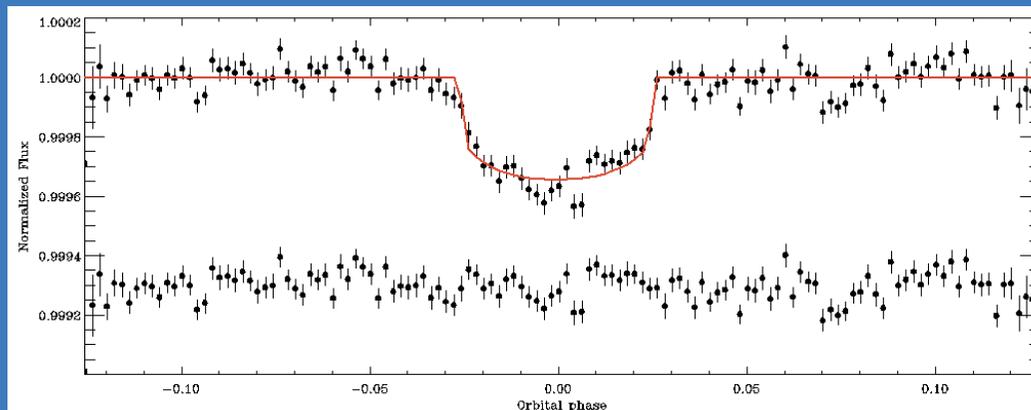
## CoRoT-7b : un follow-up « musclé »

- Spectroscopie (UVES, HARPS) : étoile K0V : CoRoT-7 n'est pas une géante (et CoRoT-7b n'est pas une naine)
- Photométrie ON/OFF (IAC) : dans la PSF CoRoT, pas de variation photométrique d'étoiles notable : pas de BEB
- Photométrie CFHT-MEGACAM : pas de BEB proche
- Photométrie AO : NACO-VLT : pas de BEB entre 0.5 et 4 arcsec
- Spectroscopie CRILES : exclusion du cas système triple avec une étoile  $M < M_6$  autour de CoRoT-7b
- Activité en X : ROSAT : pas d'objet binaire type YY Gem jusqu'à 250 +/- 100 pc : pas de M tardive autour de CoRoT-7b
- Etude des couleurs de CoRoT : transit achromatique : pas un syst. Triple
- Imagerie AO : NACO-VLT : proba d'avoir une étoile de Mag 16.5 de la même couleur que CoRoT-7b avec un jupiter qui transite dans les 0.25 arcsec  $< 2 \times 10^{-4}$
- Vitesse radiale : HARPS : pas de signal stellaire, substellaire ou planète géante : compatible avec un objet de masse  $< 12$  masses terrestres



# CoRoT-7b : caractéristiques

- Période:  $P = 0.8536$  j (une année = 20.5 h)  $\rightarrow a = 0.017$  AU
  - Autres paramètres: dépendent de l'analyse de la CL.
    - $\Rightarrow$  2 groupes avec analyse indépendante
    - $\Rightarrow$  Variabilité : difficulté
    - $\Rightarrow R_{pl} = 1.74 R_{\oplus} \pm .13$  avec impact param =  $0.67 \pm .03$
    - $\Rightarrow R_{pl} = 1.76 R_{\oplus}$  avec impact param =  $0.86 \pm .09$
- $\Rightarrow$  Bon Accord





# A quoi peut ressembler CoRoT-7b ?

- Exemple très amusant pour la physique
- Elongation par force de marée: 1%
- Température
  - ⇒ entre 1100 et 2000 K selon l'albedo : c'est chaud !

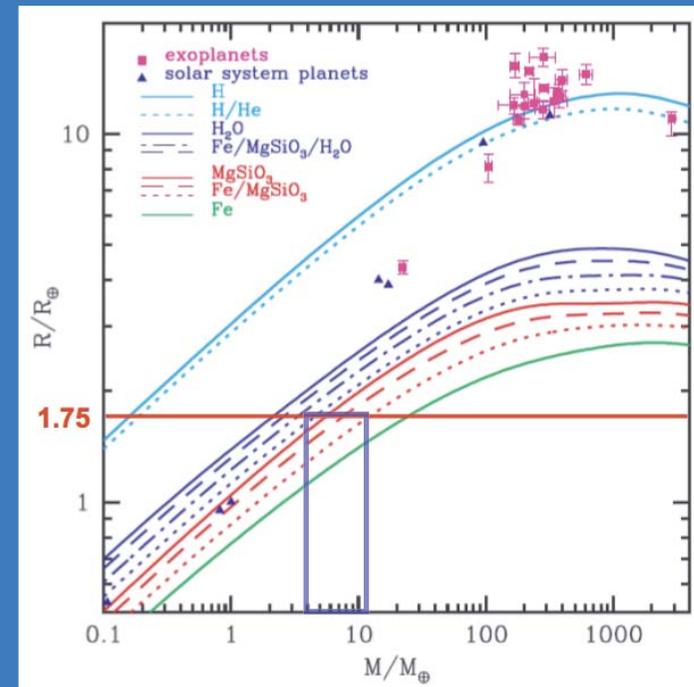


- Structure ?

- ⇒ rocheuse : si  $M > 6 M_{\oplus}$ 
  - Solide ou lave liquide ?
- ⇒ *Planète-océan* si  $M < 5 M_{\oplus}$ 
  - Eau en état super-critique

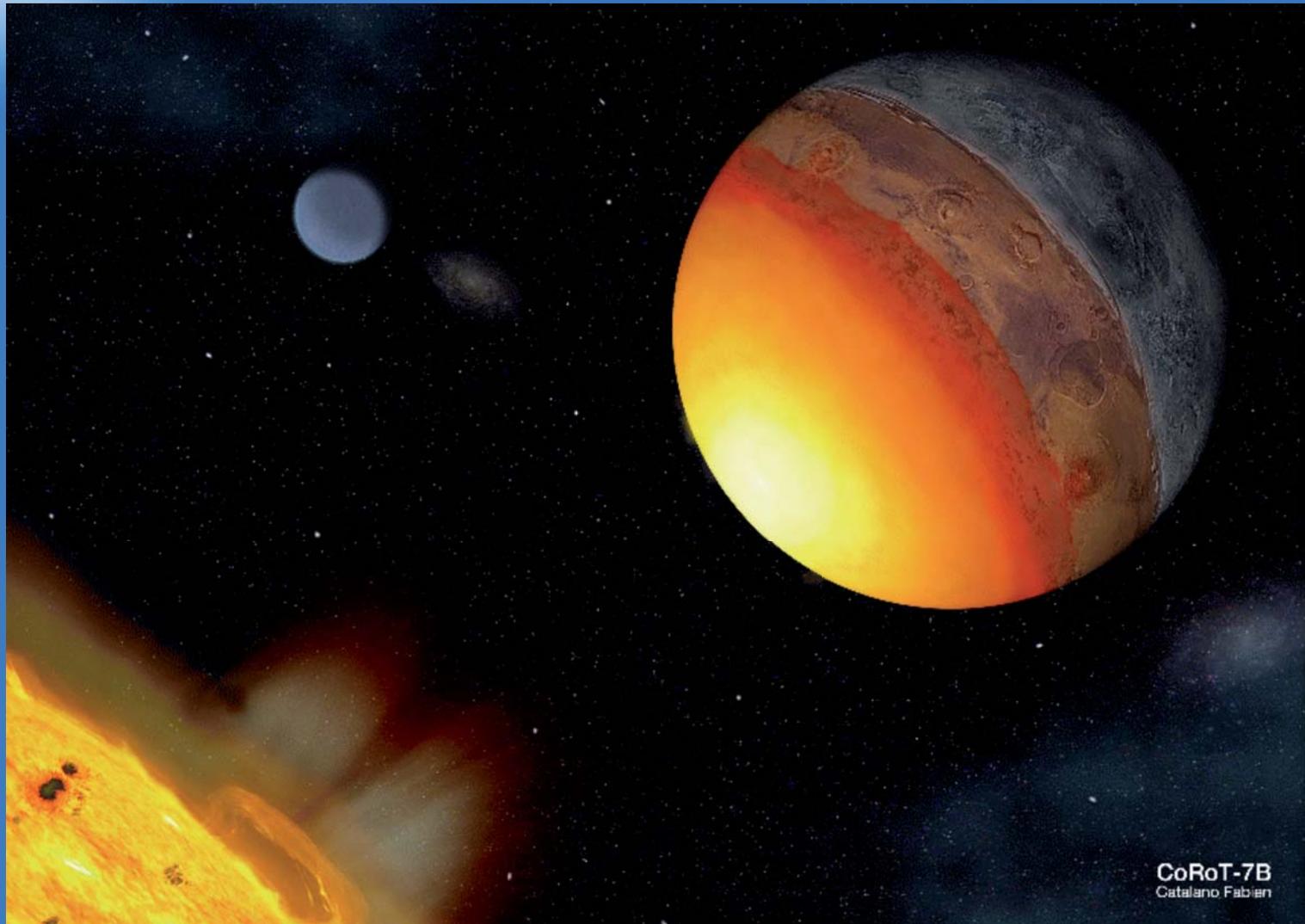
- Atmosphère ?

- ⇒ L'échappement des volatiles nécessite 0.1 à 1 Gyr
- ⇒ Silicates évaporés ?
- ⇒ Nuages de  $\text{Na}_2\text{O}$  ?





# CoRoT-7b ?





# CoRoT et les prédictions

- Premier champ analysé : LRa01
  - ⇒ 90 candidats détectés sur les CdL Corot
  - ⇒ 4/5 écartés en analysant les CdL
  - ⇒ 26 candidats follow-up [16-32 prédicts]
    - 9 imposteurs de fond : photométrie [6-20 prédicts]
    - 9 imposteurs sur la cible : vélocimétrie [1-10 prédicts]
    - 2 planètes + des cas non résolus dont 3 encore possibles [5-15 prédicts]
- Bilan : pas anormal, mais un peu moins de Jupiters qu'attendu



A suivre...