

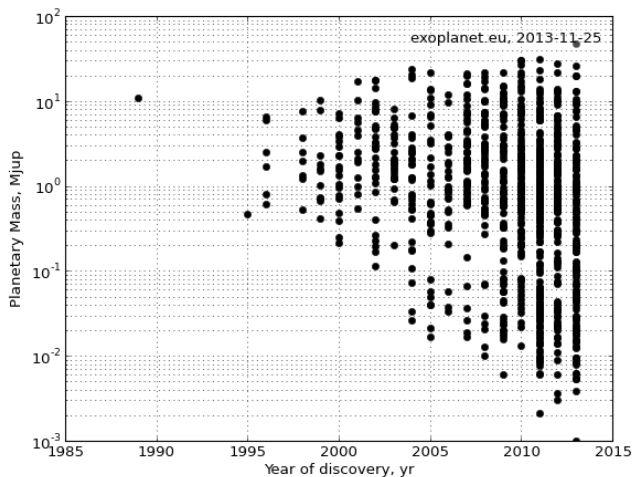
# Recherche des exoplanètes, mesure de leurs propriétés physiques et orbitales

Pascal Bordé

Institut d'astrophysique spatiale  
Université Paris-Sud

Soutenance d'habilitation à diriger des recherches  
26 novembre 2013

# Plus de mille exoplanètes en 20 ans



# Buts et moyens de l'exoplanétologie

## Buts

- explorer la diversité des exoplanètes ;
- déterminer leurs atmosphère, surface et structure interne ;
- comprendre leur formation, leur évolution physique et orbitale, l'influence de l'étoile-hôte et des autres planètes du système ;
- comprendre les circonstances particulières de l'apparition de la Vie sur Terre et la rechercher ailleurs dans l'Univers (exobiologie).

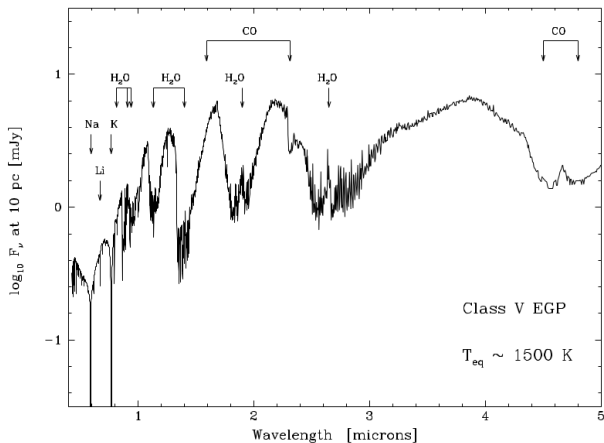
## Moyens

- spectrométrie des vitesses radiales ;
- photométrie des transits ;
- interférométrie optique à longue base ;
- imagerie à haute dynamique...

- 1 Interférométrie optique à longue base
- 2 Coronographie stellaire
- 3 La mission spatiale COROT
- 4 Bilan et perspectives

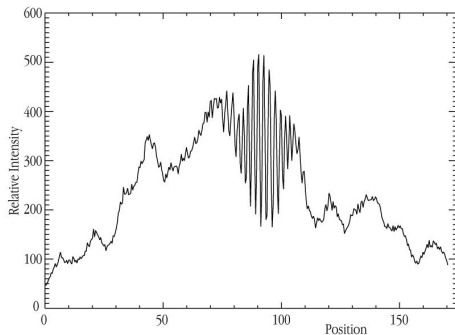
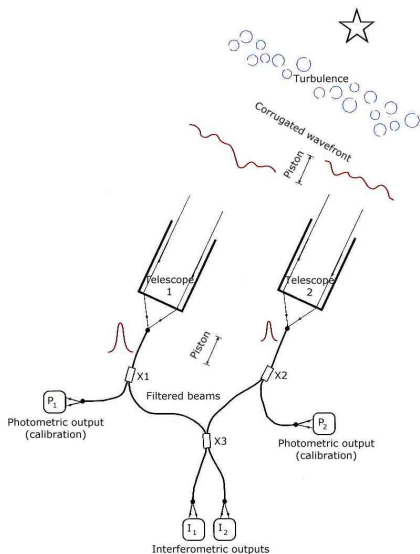
- 1 Interférométrie optique à longue base
- 2 Coronographie stellaire
- 3 La mission spatiale COROT
- 4 Bilan et perspectives

# Motivation astrophysique



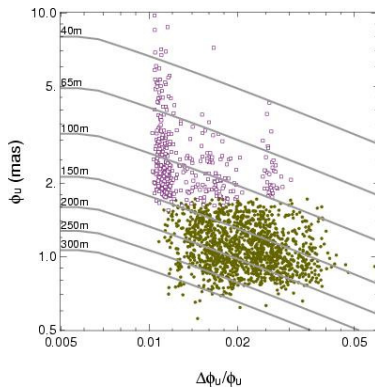
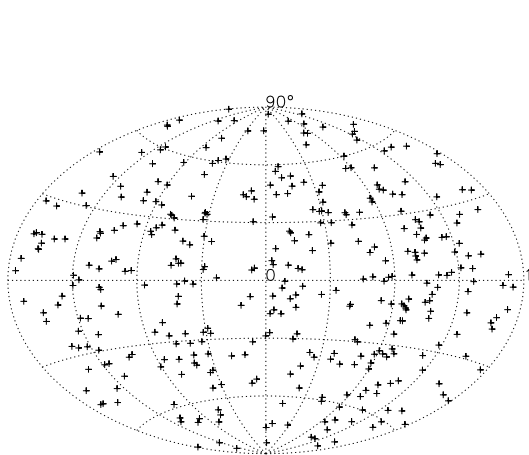
Sudarsky et al., ApJ 588, 1121 (2003)

# Interféromètre optique fibré à longue base



On mesure la visibilité des franges  
(contraste étalonné).

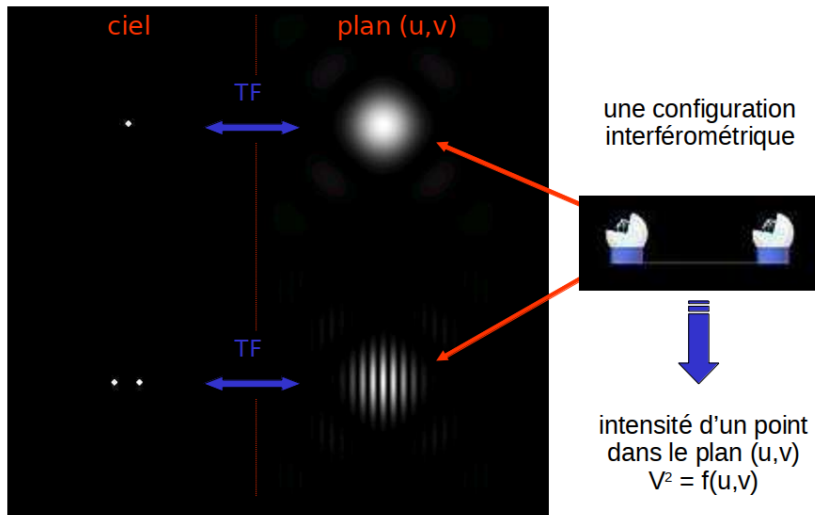
## Catalogues d'étoiles-étalons



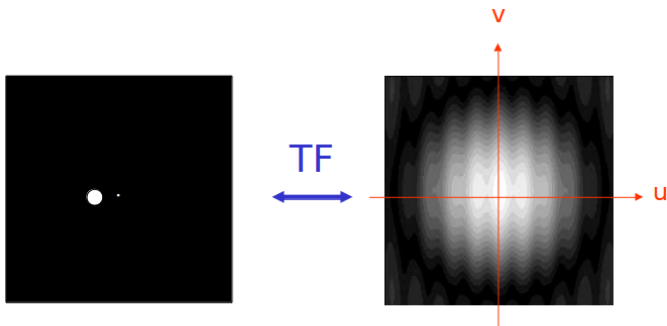
Bordé et al., A&A 393, 183 (2002); Mérand et al., A&A 433, 1155 (2005)



## De la forme de la source à la visibilité des franges



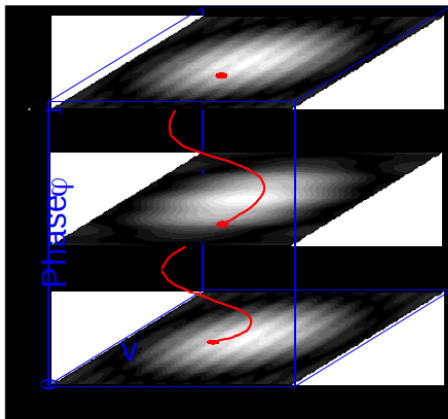
## Cas des systèmes binaires à haut contraste



$$V^2 = V_1^2 + \frac{2V_1}{r} \left[ \cos \left( \frac{2\pi}{\lambda} \vec{B} \cdot \vec{\Delta s} \right) - V_1 \right]$$

P. Bordé, thèse de doctorat (2003)

# Traitement des données



Paramètres spectroscopiques  
Éphéméride  $\varphi = \varphi(t)$



Ajustement d'un modèle sur  
les mesures de  $V^2$



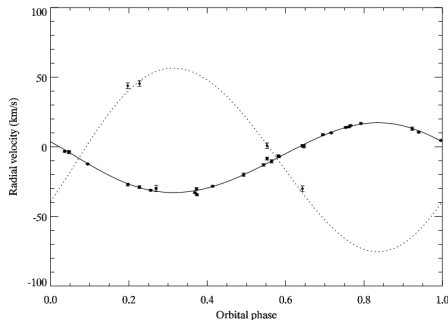
Contraste  $r$  ou  $r_\lambda$   
Paramètres manquants ( $i$ ,  
 $\Omega$ , ...)

P. Bordé, thèse de doctorat (2003)

# Application à une étoile double spectroscopique

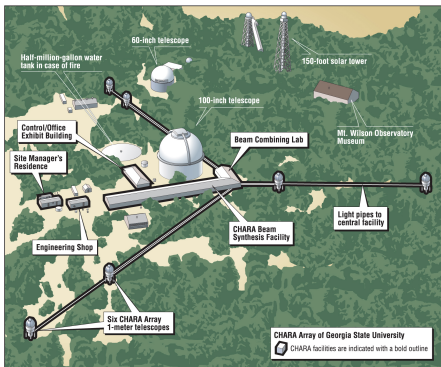
## $\theta$ Draconis

- primaire : F8 IV
- $m_V = 4,0$ ;  $m_K = 2,8$
- distance = 21 pc
- période = 3,1 j
- $a \sin i = 0,026 \text{ UA} = 1,2 \text{ mas}$
- rapport des masses = 0,4

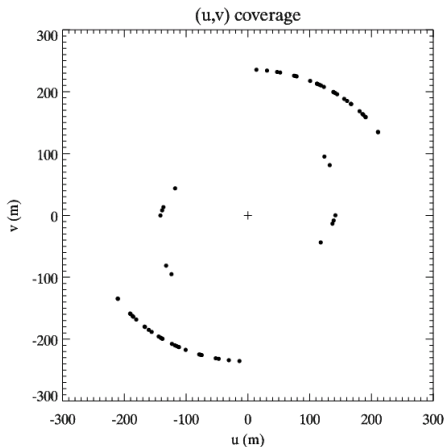


Mazeh et al., ApJ 564, 1007 (2002)

## Observations interférométriques dans l'infrarouge



CHARA + FLUOR (bande K)  
 2 bases (156 m, 251 m)  
 34 mesures de  $V^2$  (2004–2005)



Kotani, Bordé et al., soumis à ApJ (2006)

# Modèles en compétition

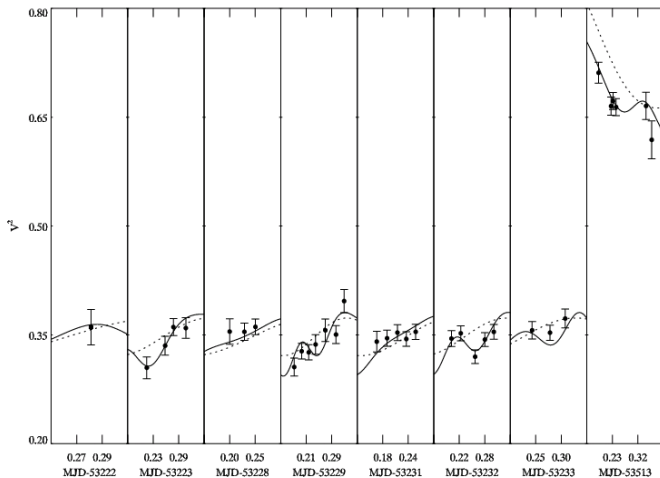
$M_1$  : étoile simple modélisée par un disque assombri (1 paramètre libre)

$$V^2(\theta_{LD}) = \left[ \frac{\int_0^1 I(\mu) J_0(\pi B \theta_{LD} / \lambda \sqrt{1 - \mu^2}) \mu d\mu}{\int_0^1 I(\mu) \mu d\mu} \right]^2$$

$M_2$  : étoile double de contraste  $r$  à secondaire non résolue (4 paramètres libres)

$$V^2(\theta_{LD}, r, \Omega, i) = \frac{V_1^2 + r^2 + 2 V_1 \cos(2\pi / \lambda \mathbf{B} \cdot \mathbf{s})}{1 + r^2}$$

## Ajustement des modèles aux données

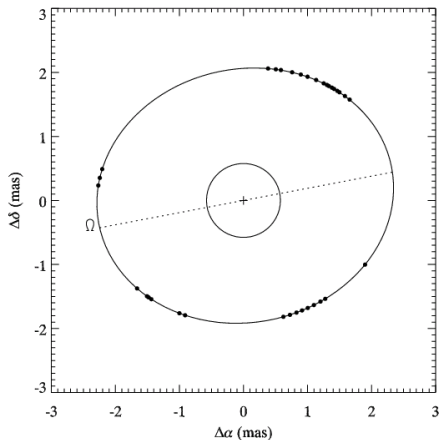


... étoile simple ( $M_1$ ) :  $\theta_{LD} = 1,186 \pm 0,007$  mas ;  $\chi_r^2 = 4,4$

— étoile double ( $M_2$ ) :  $r = 63,2 \pm 7,0$  ;  $\Omega = 97,7 \pm 3$  deg,  $i = 31,0 \pm 0,8$  deg ;  $\chi_r^2 = 1,9$

# Résultats

	Primaire	Secondaire
Type spectral	F8IV	M1V
Masse ( $M_{\odot}$ )	$1,23 \pm 0,12$	$0,471 \pm 0,043$
Rayon ( $R_{\odot}$ )	$2,613 \pm 0,034$	$0,44 \pm 0,06$
$\log g$	$3,69 \pm 0,10$	$4,82 \pm 0,29$
$T_{\text{eff}}$ (K)	$6136 \pm 65$	$3626 \pm 247$
Luminosité ( $L_{\odot}$ )	$8,67 \pm 0,4$	0,03
$M_V$ (mag)	$2,408 \pm 0,061$	10,4
$M_K$ (mag)	$1,176 \pm 0,058$	$5,67 \pm 0,40$
$a$ ( $10^{-2}$ AU)	$1,369 \pm 0,041$	$3,56 \pm 0,13$



Kotani, Bordé et al., soumis à ApJ (2006)



# Le compagnon faible est-il détecté ?

## Test du $\chi^2$ (contre l'hypothèse nulle)

- $P_1 = 5,4 \times 10^{-16}$  ou  $13,8 \sigma \Rightarrow M_1$  est rejeté avec certitude ;
- $P_2 = 2,5 \times 10^{-3}$  ou  $3,4 \sigma \Rightarrow M_2$  est rejeté avec 99,75 % de confiance.

## Test de Fischer ( $M_2$ contre $M_1$ )

$$F = \frac{(\chi_{33}^2 - \chi_{29}^2)/4}{\chi_{29}^2/29} = 11,9 \quad \Rightarrow \quad P = 7,8 \times 10^{-6}$$

$M_2$  est préférable à  $M_1$  avec une confiance de 99,999 %.

## Critère d'information d'Akaike

- Vraisemblance du modèle  $M_k$  :  $L_k \propto \exp(-\chi_k^2/2)$  ;
- $CIA_k \equiv 2 \ln L_k - 2p_k = -\chi_k^2 - 2p_k + C^{te}$  pour  $p_k$  paramètres ;
- $CIA_2 - CIA_1 = 84 \Rightarrow M_2$  est préférable à  $M_1$ .

# Bilan

La mesure du contraste de compagnons faibles par interférométrie nécessite

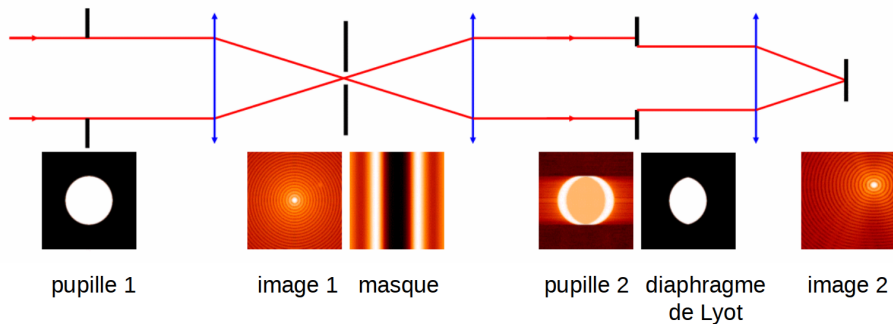
- un instrument suffisamment fiable ;
- une stratégie d'observation adaptée et de nombreuses observations ;
- une bonne maîtrise des sources d'erreur (statistique et systématique) ;
- une bonne théorie statistique.

Avec  $\theta$  Draconis,  $\Delta K \simeq 4,5$  a été démontré. Il faudrait  $\Delta K \sim 10$  pour un jupiter chaud.

- 1 Interférométrie optique à longue base
- 2 Coronographie stellaire**
- 3 La mission spatiale COROT
- 4 Bilan et perspectives

# Principe de la coronographie

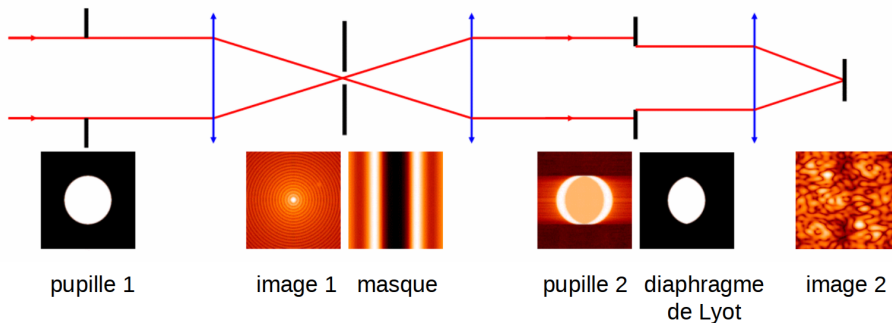
## Coronographe de Lyot avec masque à bande limitée



Kuchner & Traub, ApJ 570, 900 (2002) ; Bordé & Traub, C. R. Phys. 8, 349 (2007)

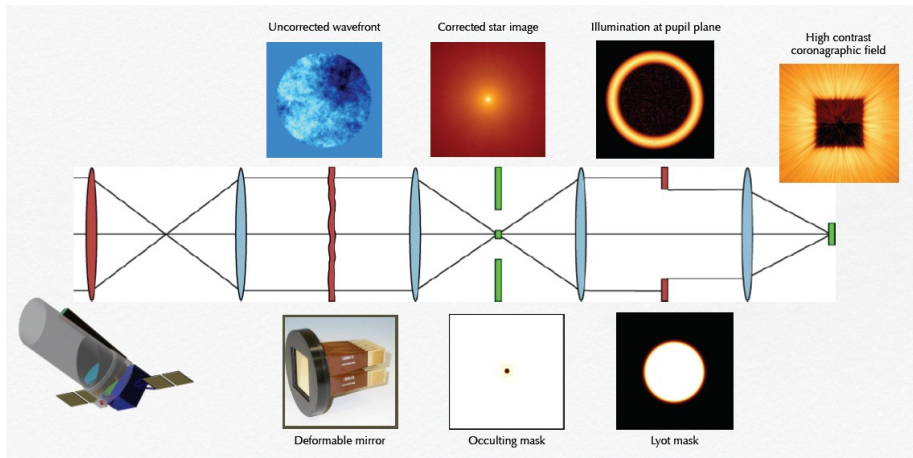
# Bruit de tavelures

Les tavelures sont causées par les aberrations du front d'onde.

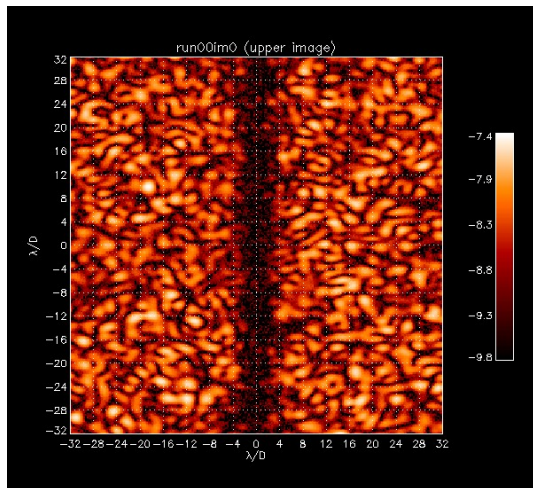
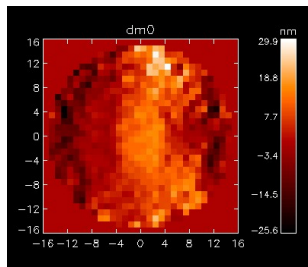


Kuchner & Traub, ApJ 570, 900 (2002) ; Bordé & Traub, C. R. Phys. 8, 349 (2007)

# Terrestrial Planet Finder Coronagraph (projet NASA)

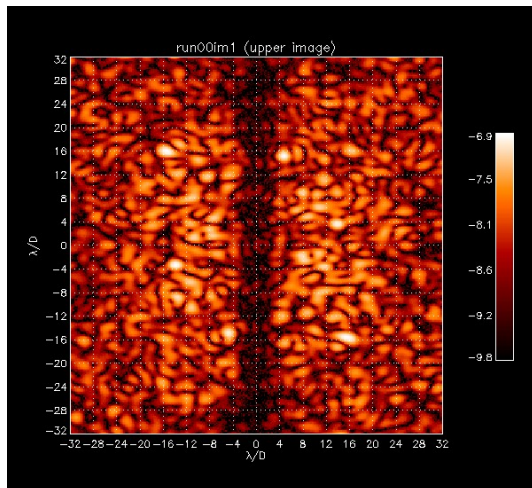
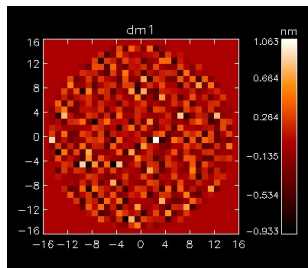


## Simulation : situation initiale



Bordé &amp; Traub, ApJ 638, 488 (2006)

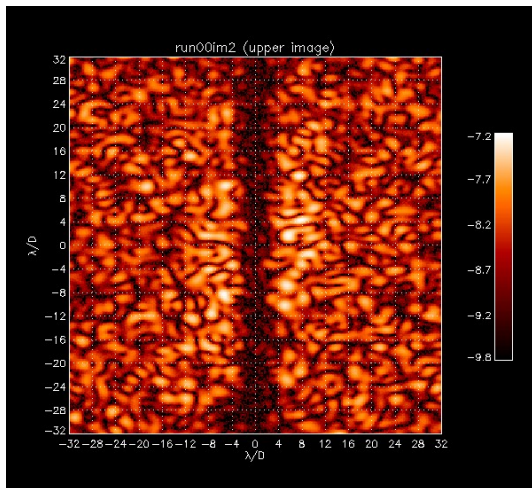
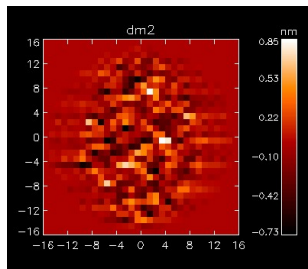
## Simulation : mesure 1



Bordé &amp; Traub, ApJ 638, 488 (2006)

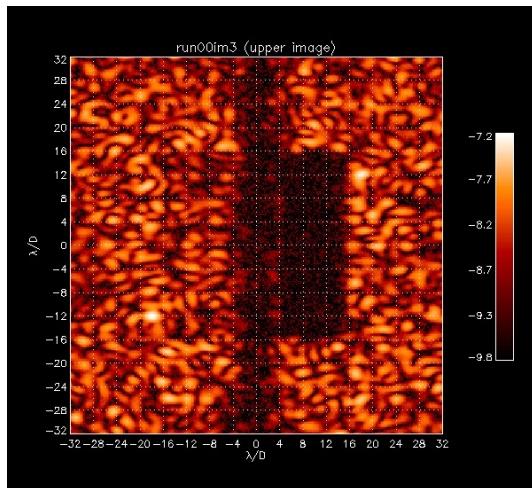
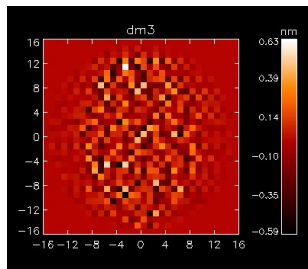


## Simulation : mesure 2



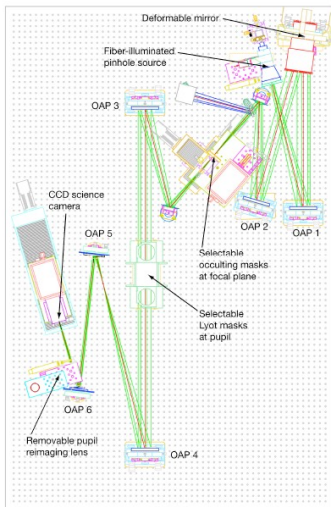
Bordé &amp; Traub, ApJ 638, 488 (2006)

## Simulation : correction appliquée

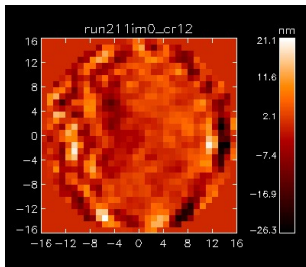


Bordé &amp; Traub, ApJ 638, 488 (2006)

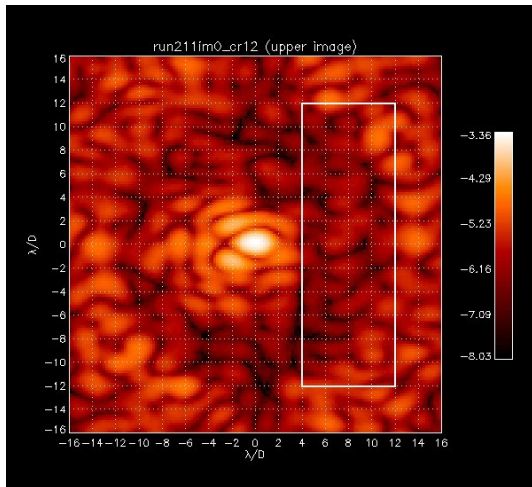
# High Contrast Imaging Testbed



## Expérience : situation initiale



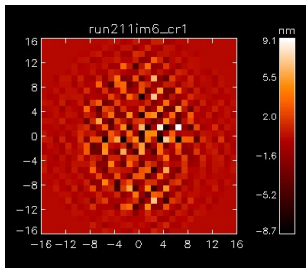
moyenne = 146 ADU ( $1,4 \cdot 10^{-6}$ )  
 médiane = 73 ADU ( $6,8 \cdot 10^{-7}$ )



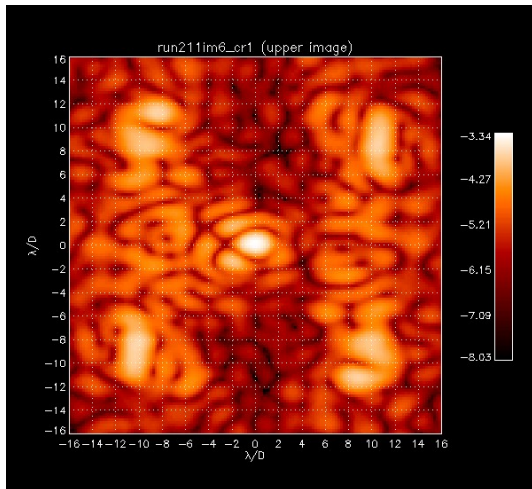
Bordé et al., SPIE 6265, 39 (2006)



## Expérience : itération 1, mesure 2

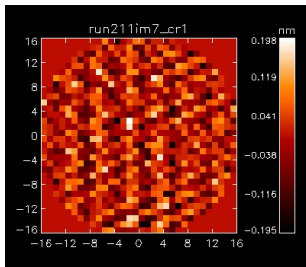


moyenne = 1997 ADU ( $1,9 \cdot 10^{-5}$ )  
 médiane = 867 ADU ( $8,1 \cdot 10^{-6}$ )

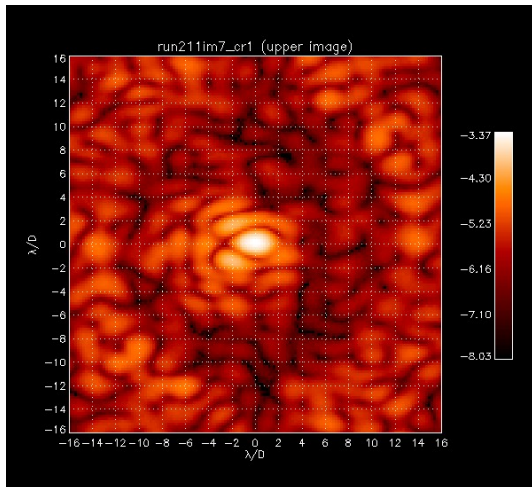


Bordé et al., SPIE 6265, 39 (2006)

## Expérience : itération 1, correction appliquée

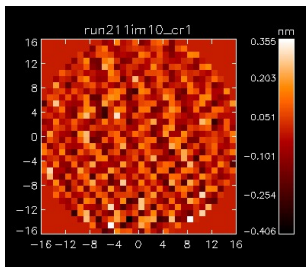


moyenne = 139 ADU ( $1,3 \cdot 10^{-6}$ )  
 médiane = 72 ADU ( $6,7 \cdot 10^{-7}$ )



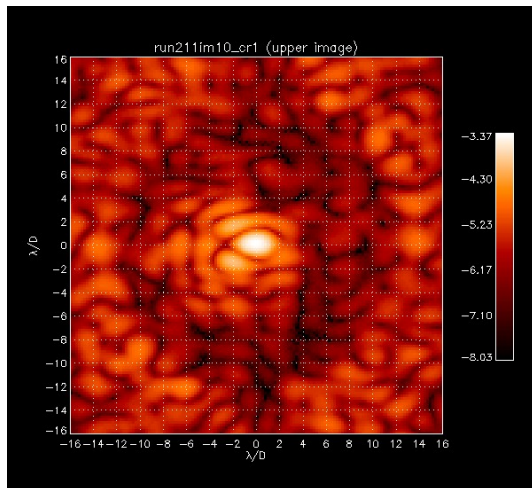
Bordé et al., SPIE 6265, 39 (2006)

## Expérience : itération 2, correction appliquée



moyenne = 134 ADU ( $1,3 \cdot 10^{-6}$ )

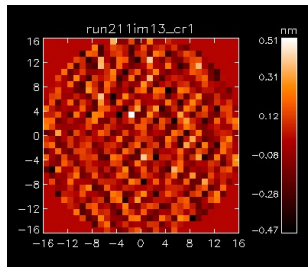
médiane = 62 ADU ( $5,8 \cdot 10^{-7}$ )



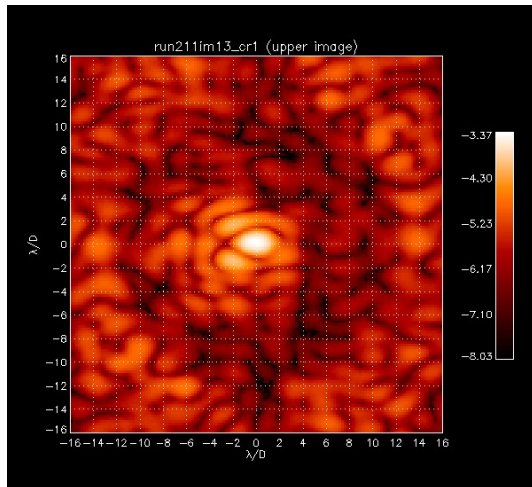
Bordé et al., SPIE 6265, 39 (2006)



## Expérience : itération 3, correction appliquée

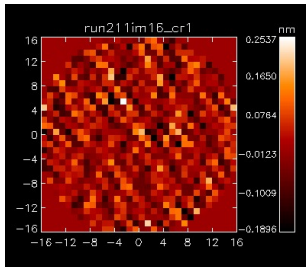


moyenne = 123 ADU ( $1,2 \cdot 10^{-6}$ )  
 médiane = 63 ADU ( $5,9 \cdot 10^{-7}$ )

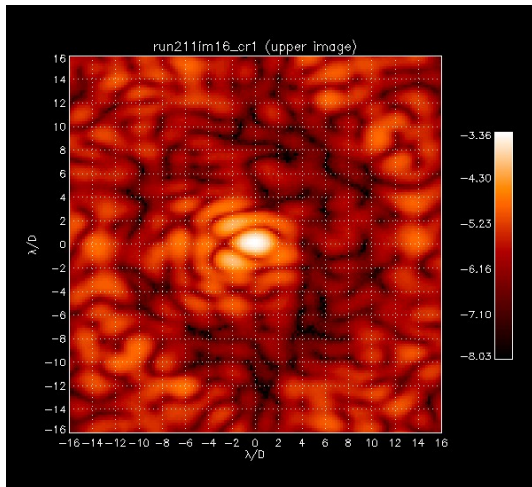


Bordé et al., SPIE 6265, 39 (2006)

## Expérience : itération 4, correction appliquée

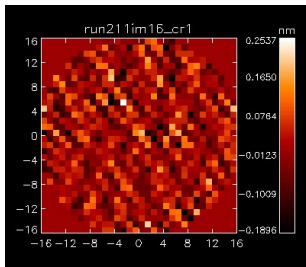


moyenne = 118 ADU ( $1,1 \cdot 10^{-6}$ )  
 médiane = 56 ADU ( $5,2 \cdot 10^{-7}$ )

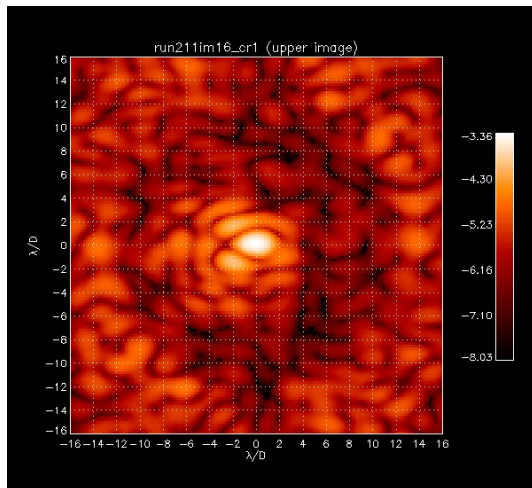


Bordé et al., SPIE 6265, 39 (2006)

## Expérience : itération 5, correction appliquée

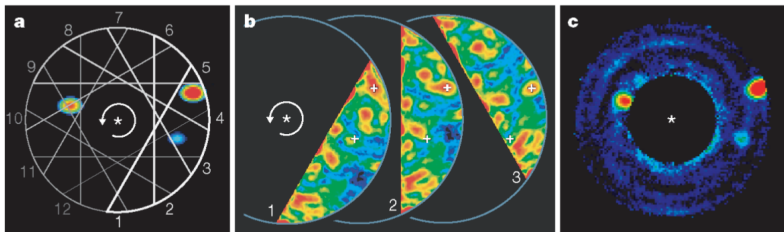
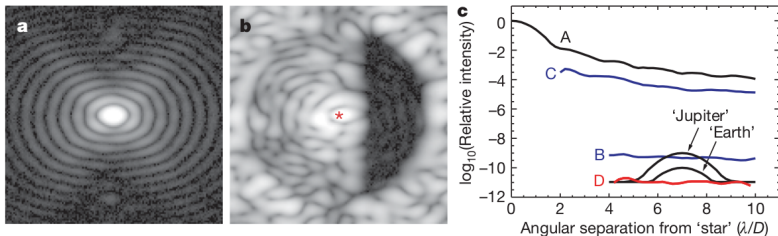


moyenne = 112 ADU ( $1,0 \cdot 10^{-6}$ )  
 médiane = 51 ADU ( $4,8 \cdot 10^{-7}$ )



Bordé et al., SPIE 6265, 39 (2006)

## Meilleurs résultats du HCIT



Trauger &amp; Traub, Nature 446, 771 (2007)

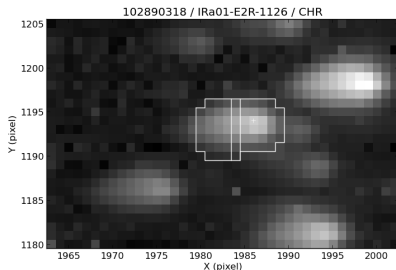
- 1 Interférométrie optique à longue base
- 2 Coronographie stellaire
- 3 La mission spatiale COROT**
- 4 Bilan et perspectives

# Convection, rotation et transits planétaires

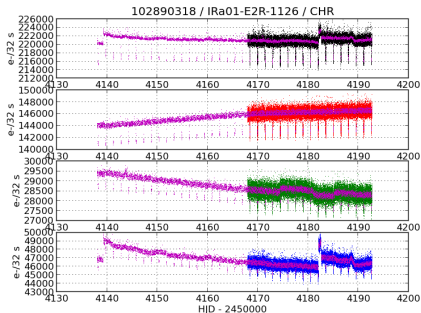


- Mission spatiale du CNES + partenaires européens + Brésil (165 M€)
- Objectifs : sismologie stellaire & détection d'exoplanètes
- Télescope de 27 cm, champ de  $3,5^\circ \times 2,8^\circ$ , 4 détecteurs CCD
- Orbite polaire basse : 900 km
- Lancée le 27 déc. 2006, fin des observations le 2 nov. 2012

# Photométrie à masque d'ouverture



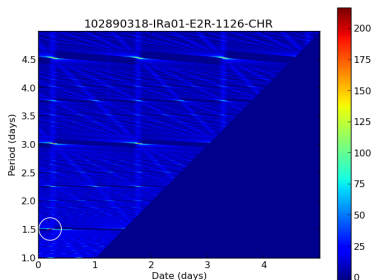
COROT-1 vue by COROT  
et masque photométrique



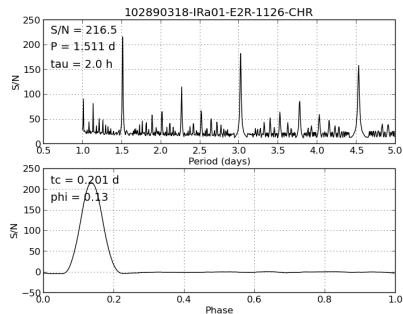
Courbes de lumière de COROT-1  
« blanche, rouge, verte et bleue »

# Détection des transits par filtrage adapté

Principe : intercorrrelation avec une famille de signaux rectangulaires



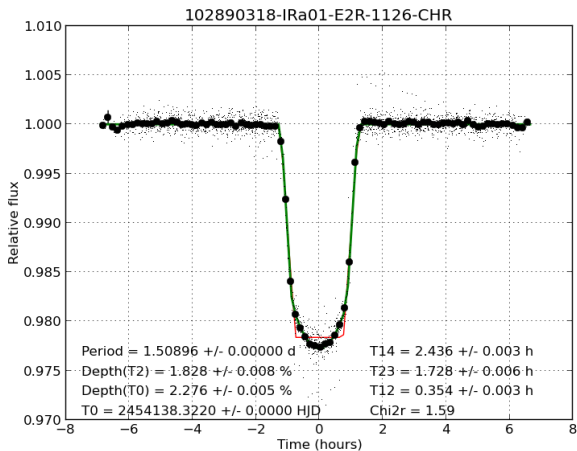
Carte de corrélation



Corrélogrammes en période et phase

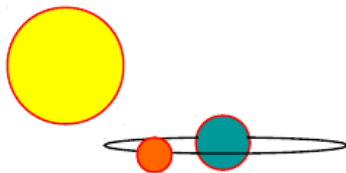
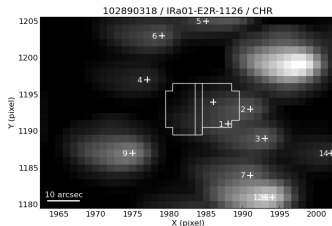


## Transit moyen après repliement



— modèle trapézoïdal ; — modèle « trapézoïdal à fond circulaire »

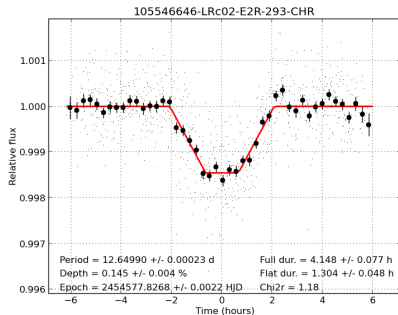
# Le problème des faux positifs



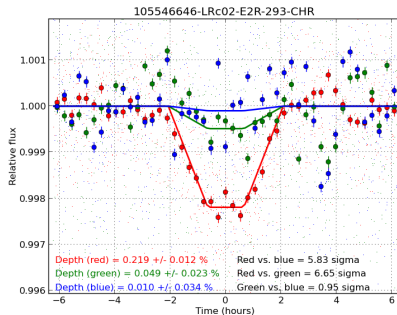
L'étalement des taches images ( $10 \text{ pix} \leftrightarrow 23''$ ) induit une contamination par les étoiles proches qui

- modifie la profondeur relative des transits et donc le rayon planétaire déduit ;
- fabrique des transits semblables à ceux des exoplanètes = *faux positifs*.

## Exemple de détection de faux positifs



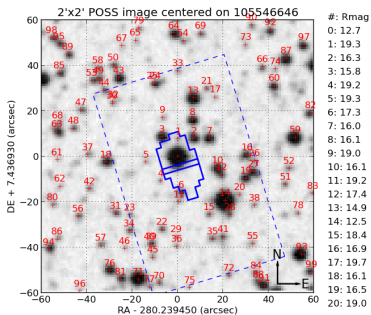
Transit « blanc » moyen



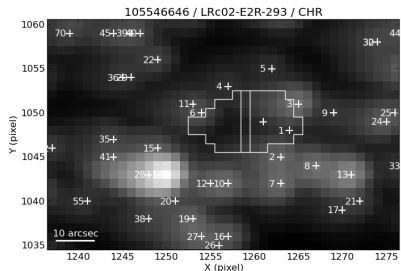
Transits « colorés » moyens

# Identification d'une binaire à éclipse voisine

Relevé du Mont Palomar



Imagette COROT calculée



Le transit observé est compatible avec un transit de 5% devant l'étoile 3.

# Probabilité de la nature planétaire des signaux de transits

Posterior probability

Likelihood

Prior probability

$$\Pr(M|d, I) = \frac{\Pr(d|M, I) \Pr(M|I)}{\Pr(d|I)}$$

M : model (PS, EB, CEB ...)  
d : data  
I : context of the measurement

Marginalized likelihood (Normalization factor)

**Models, M**

Eclipsing Binary single and double periode

Planetary System

Contaminating Eclipsing Binary single and double periode

Contaminating Planetary System

O. Demangeon, thèse de doctorat (2013)

# Résultats préliminaires

## Bayesian analysis for the ranking of transits (BART)

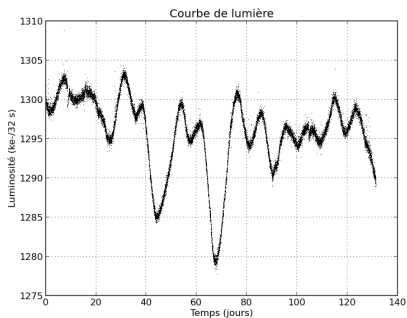
TABLE 8.1 – Classement réalisé sur un groupe de 22 candidats du LRC02.

Rang	Candidat	Nature (Gr CoRoT)	Nature (BART)	Probabilité normalisée des différents modèles [%]					
				P.S.	C.P.S.	E.B.P.	E.B.2.P.	C.E.B.P.	C.E.B.2.P.
1	E1R-632	P.S. (C-6b) <sup>a</sup>	P.S.	99,8	0	0,17	$4,9 \cdot 10^{-3}$	$6,1 \cdot 10^{-2}$	0
2	E1L-249	N.R. (P 3) <sup>b</sup>	P.S.	99,8	0	0,23	$10^{-28}$	$1,8 \cdot 10^{-2}$	$10^{-204}$
3	E1R-1280	P.S. (C-25b) <sup>a</sup>	P.S.	99,5	$10^{-58}$	0,11	0,26	0,17	$10^{-31}$
4	E2R-4630	N.R. (P 1) <sup>b</sup>	P.S.	99,3	$2,9 \cdot 10^{-1}$	0,21	$7,5 \cdot 10^{-2}$	$7,7 \cdot 10^{-2}$	$10^{-17}$
5	E1L-3424	N.R. (P 3) <sup>b</sup>	C.P.S.	$1,1 \cdot 10^{-2}$	99,3	$5,5 \cdot 10^{-4}$	$4,0 \cdot 10^{-4}$	$4,8 \cdot 10^{-1}$	$2,5 \cdot 10^{-1}$
6	E1R-3179	N.R. (P 3) <sup>b</sup>	C.E.B.P.	$6,0 \cdot 10^{-3}$	5,1	$5,9 \cdot 10^{-2}$	$2,0 \cdot 10^{-3}$	92,8	2,1
7	E1L-2870	C.E.B./C.P.S. (CHR) <sup>c</sup>	E.B.P.	$5,5 \cdot 10^{-4}$	$9,7 \cdot 10^{-3}$	95,5	$5,6 \cdot 10^{-5}$	4,53	$2,6 \cdot 10^{-4}$
8	E1L-3654	N.R. (P 3) <sup>b</sup>	C.E.B.2.P.	$2,6 \cdot 10^{-6}$	$3,4 \cdot 10^{-2}$	$3,4 \cdot 10^{-4}$	1,7	$7,2 \cdot 10^{-2}$	98,2
9	E2R-293	C.E.B./C.P.S.(CHR) <sup>c</sup>	C.P.S.	$3,8 \cdot 10^{-7}$	99,6	$1,2 \cdot 10^{-6}$	$6,0 \cdot 10^{-4}$	0,24	0,13
10	E1R-591	P.S. (C-22b) <sup>a</sup>	C.E.B.P.	$10^{-11}$	24	17	10	50	$1,1 \cdot 10^{-2}$
11	E1L-202	P.S. (C-11b) <sup>a</sup>	C.P.S.	$10^{-15}$	99,7	$3,6 \cdot 10^{-3}$	$6,3 \cdot 10^{-4}$	0,29	$6,1 \cdot 10^{-3}$

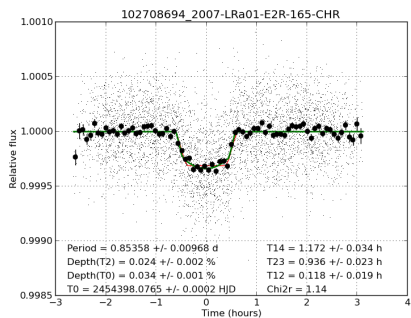
O. Demangeon, thèse de doctorat (2013)

## COROT-7b : un super-mercure

Courbe de lumière



Courbe de transit



Léger et al., A&A 506, 287 (2009); B. Samuel, thèse de doctorat (2011)

## COROT-7b : un super-mercure

Courbe de vitesse radiale

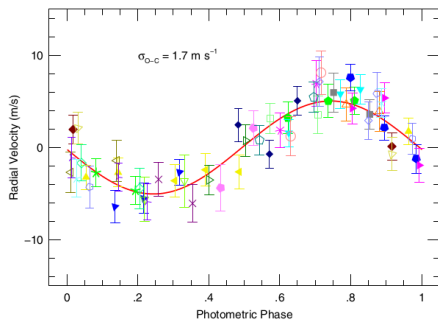
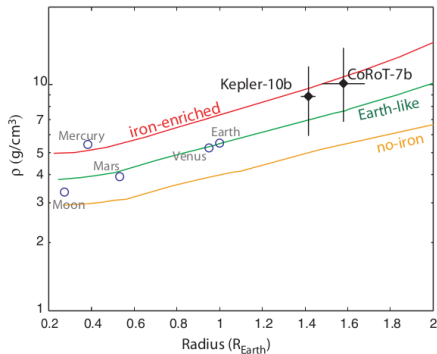


Diagramme masse-rayon

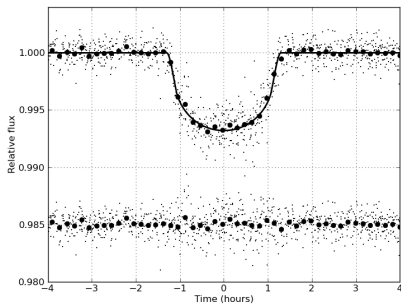


Hatzes et al., ApJ 743, 75 (2011)

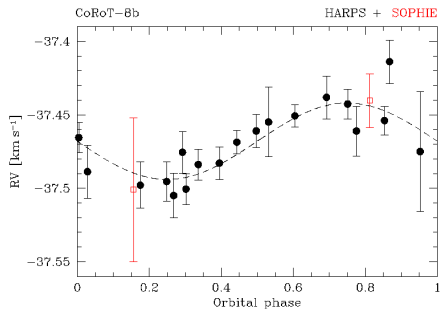


## COROT-8b : un mini-saturne dense

Courbe de transit



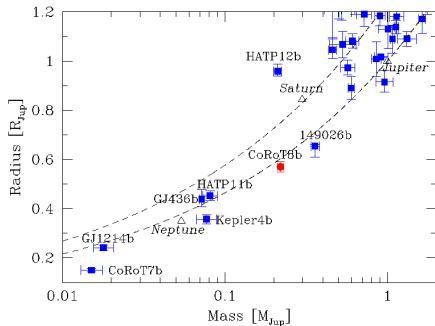
Courbe de vitesse radiale



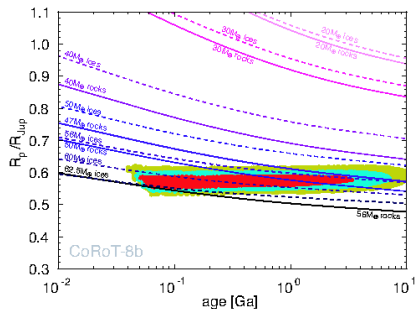
Bordé et al., A&amp;A 520, A66 (2010)

## COROT-8b : un mini-saturne dense

Diagramme masse-rayon

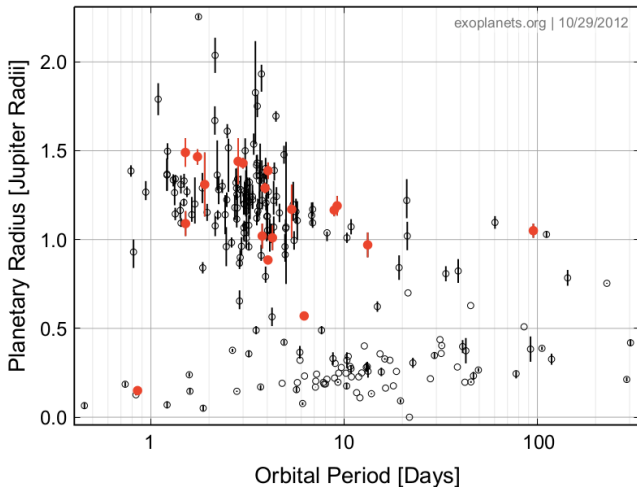


Modèles de contraction



Bordé et al., A&amp;A 520, A66 (2010)

## COROT a découvert une grande variété de planètes



Moutou et al., Icarus 226, 1625 (2013)

- 1 Interférométrie optique à longue base
- 2 Coronographie stellaire
- 3 La mission spatiale COROT
- 4 Bilan et perspectives

# Résultats les plus significatifs (1999-2013)

- 1 Production de catalogues d'étoiles-étalons pour l'interférométrie ;
- 2 Détection interférométrique du compagnon faible de l'étoile binaire spectrométrique  $\theta$  Draconis ;
- 3 Correction des tavelures avec un miroir déformable derrière un coronographe spatial ;
- 4 Estimation des performances de COROT avant son lancement ;
- 5 Recherche et la caractérisation des signaux de transits dans les courbes de lumière de COROT ;
- 6 Participation à l'étude de COROT-7b et étude de COROT-8b.

# Programme de recherches à court terme

- 1 Publication de COROT-30b et COROT-31b (jupiters chauds) ;
- 2 Calcul de la probabilité de la nature planétaire de tous les candidats de COROT en collaboration avec O. Demangeon (et publication associée) ;
- 3 Application aux candidats de Kepler si pertinent ;
- 4 Chronométrage des transits de COROT-8b (nouvelles données) ;
- 5 Analyse bayésienne des mesures de  $\theta$  Draconis pour re-soumission.

# Perspectives scientifiques et spatiales

- ① Exoplanètes autour d'étoiles brillantes : CHEOPS, TESS ;
- ② Exoplanètes (telluriques) dans la zone tempérée : PLATO, NEAT ;
- ③ Spectrométrie des atmosphères d'exoplanètes : JWST, ECHO, SPICES, ESA L4 ?

