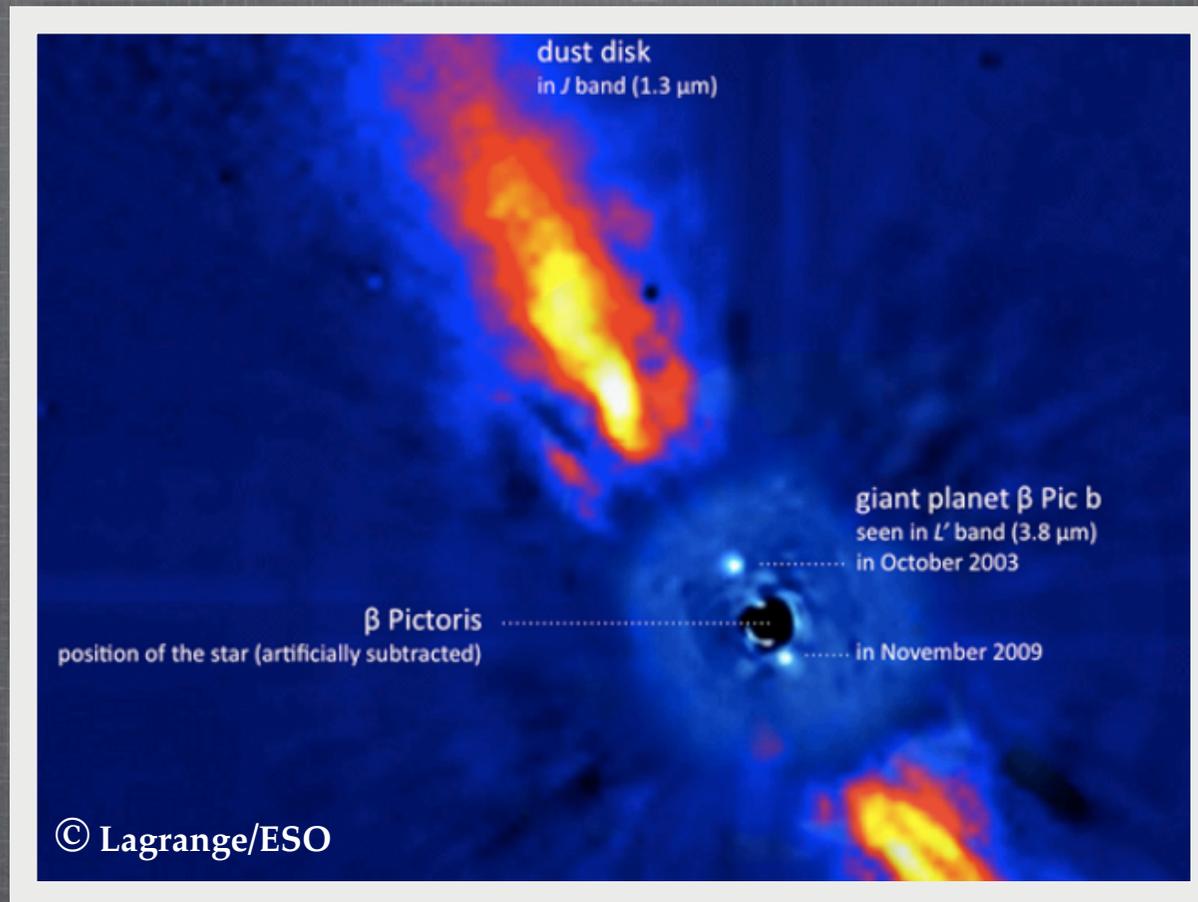


DÉTECTION D'EXOPLANÈTES

RÉSULTATS ET PROJETS INSTRUMENTAUX

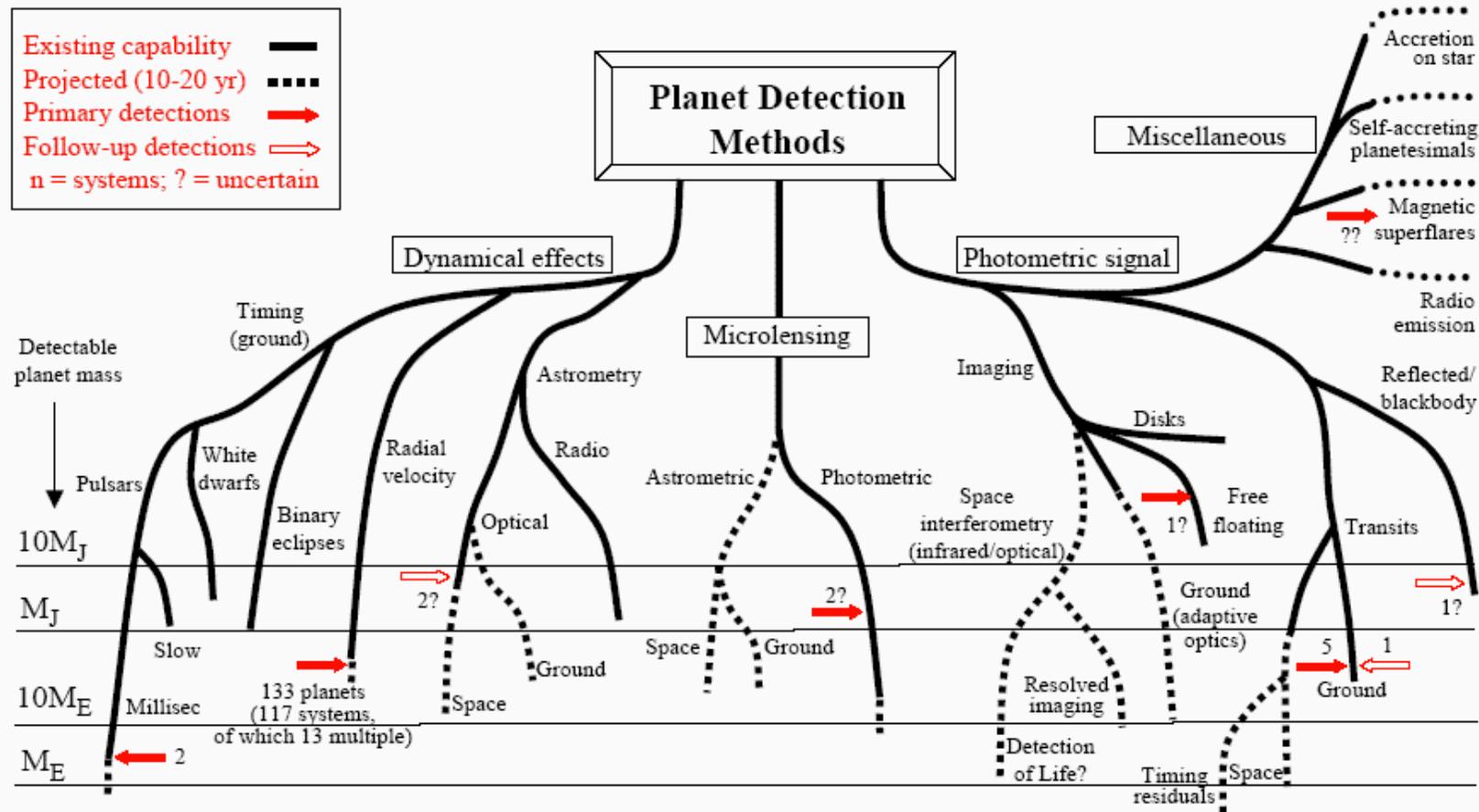


Anthony Boccaletti (LESIA, Obspm)

POURQUOI ?

- les dénombrer (fréquence ...)
- comprendre les processus de formation/évolution
- propriétés orbitales (architecture des systèmes)
- paramètres fondamentaux: Masse, Rayon
- composition atmosphériques (gaz, nuages, ...)
- composition des surfaces (telluriques)
- ... étudier leur diversité ...

COMMENT ?



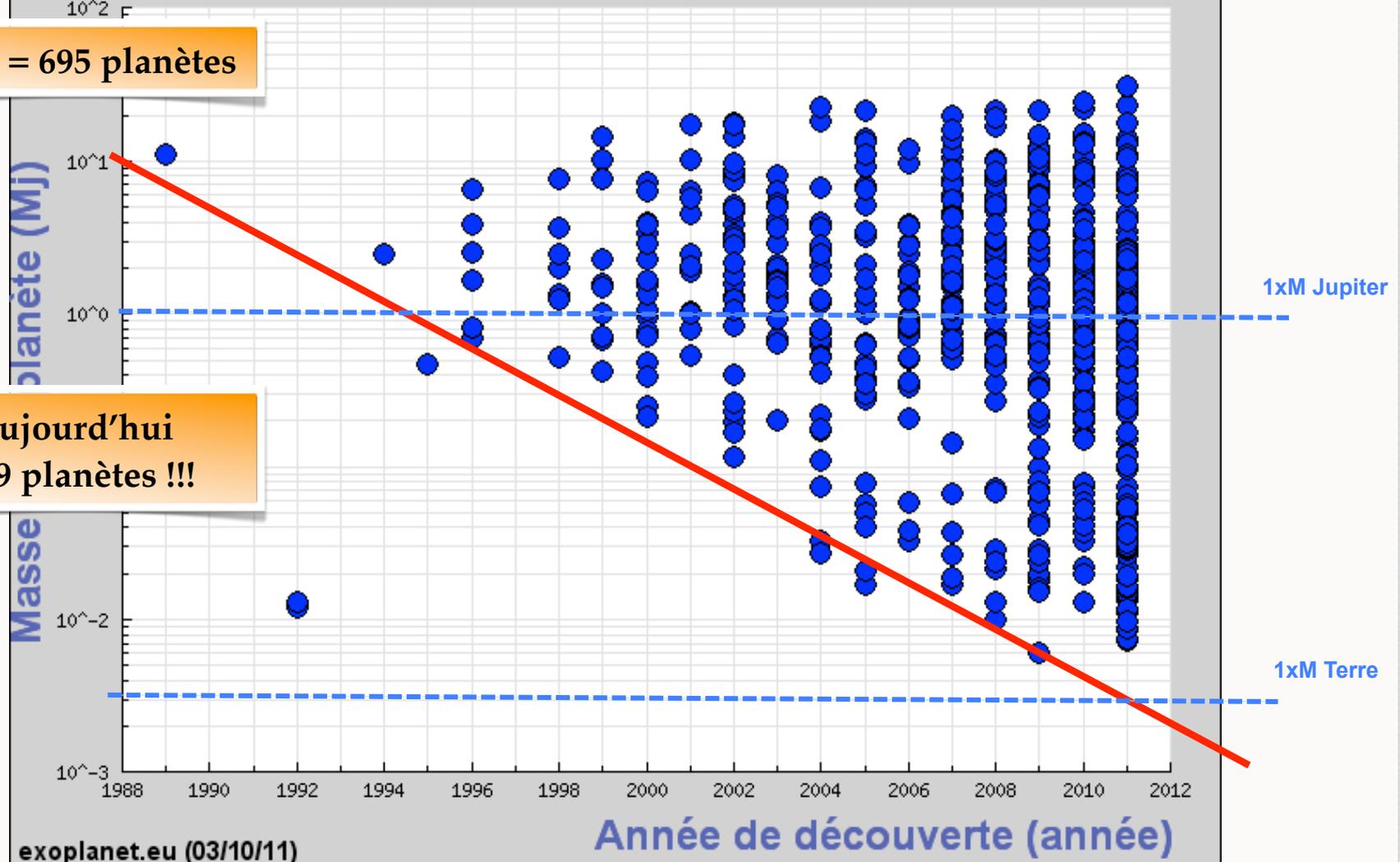
Perryman et al. 2000 (updated in 2004)

MASSE VS. ANNÉE DÉCOUVERTE

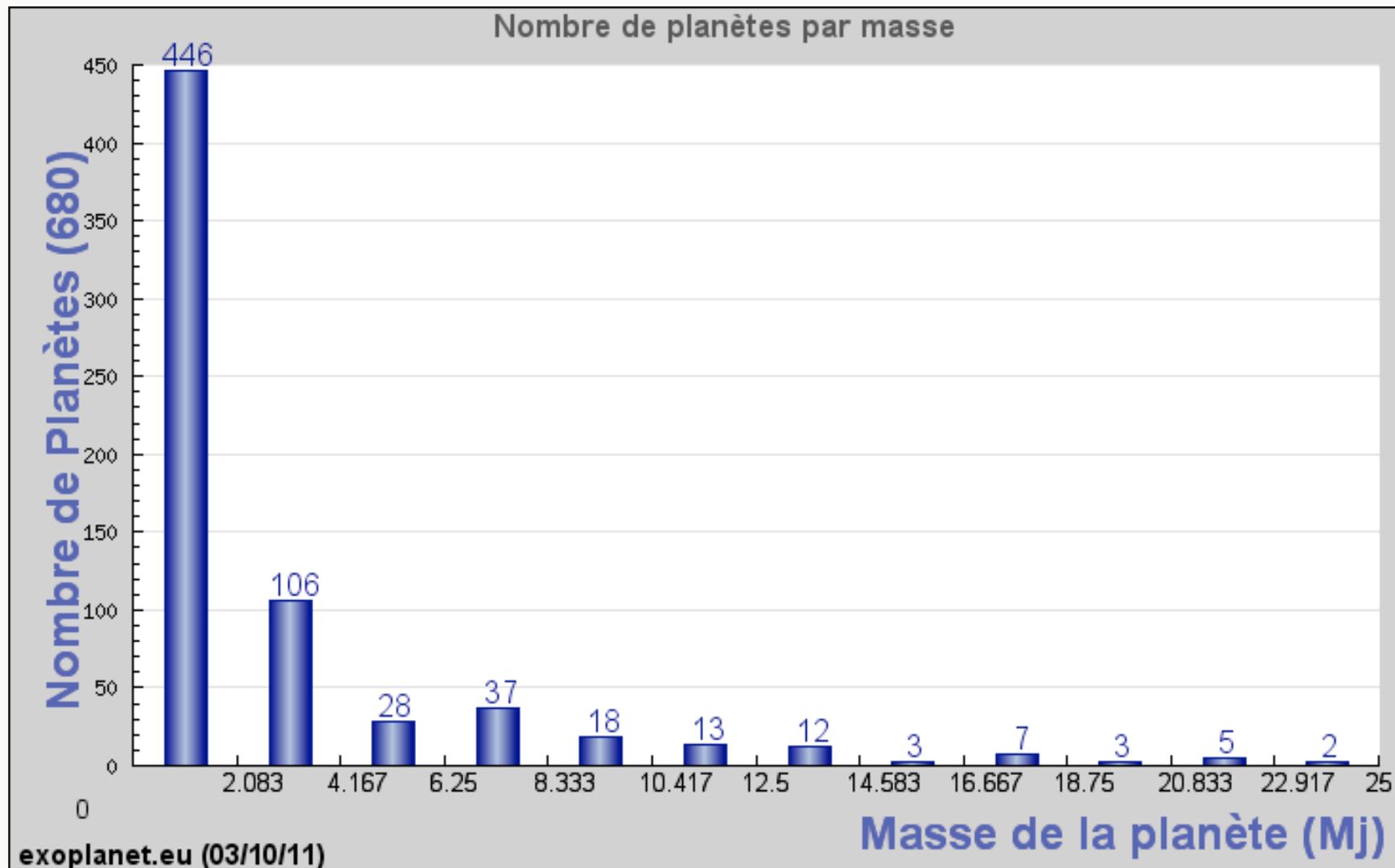
"Année de découverte" vs "Masse de la planète" (680)

Total = 695 planètes

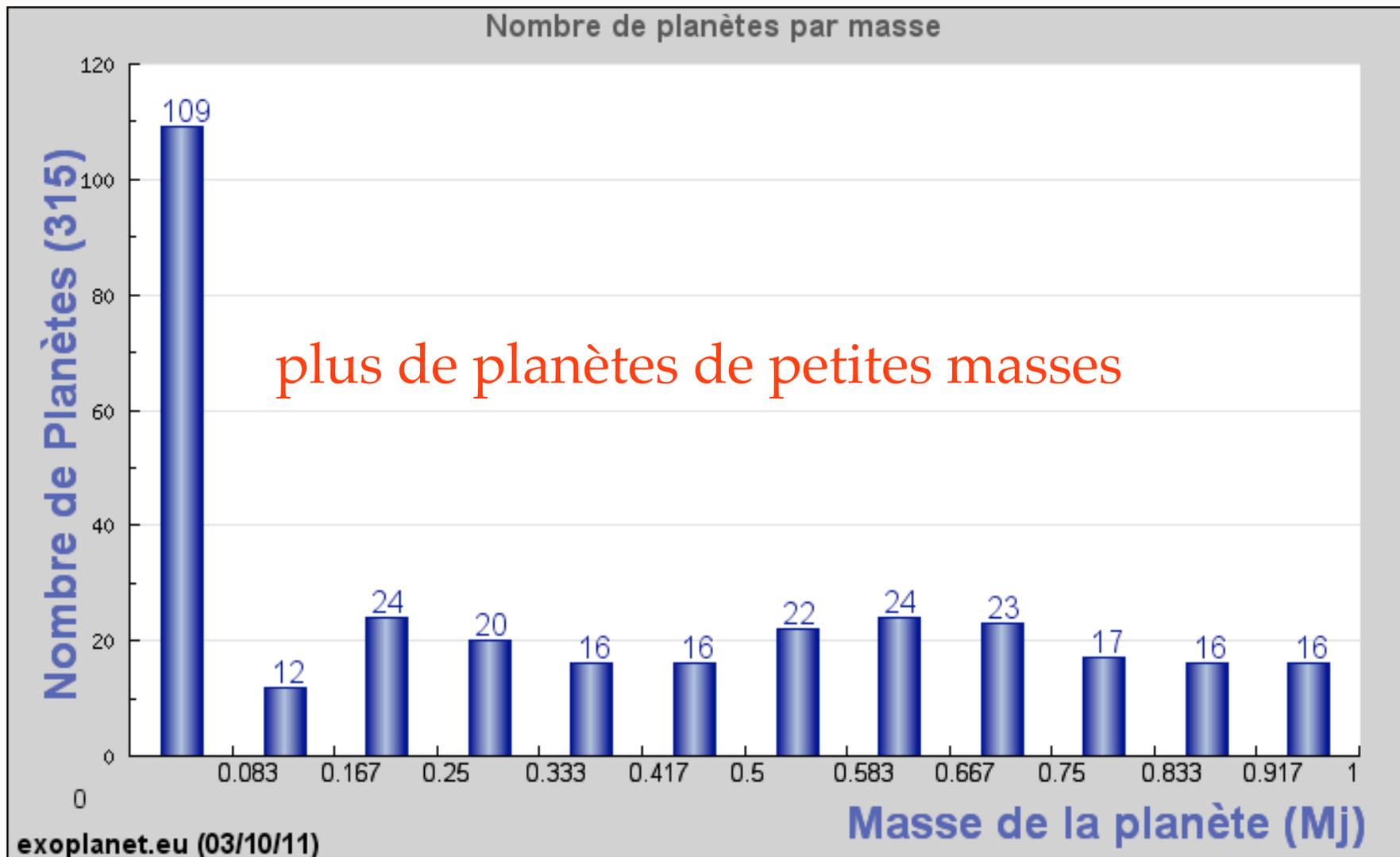
aujourd'hui
699 planètes !!!



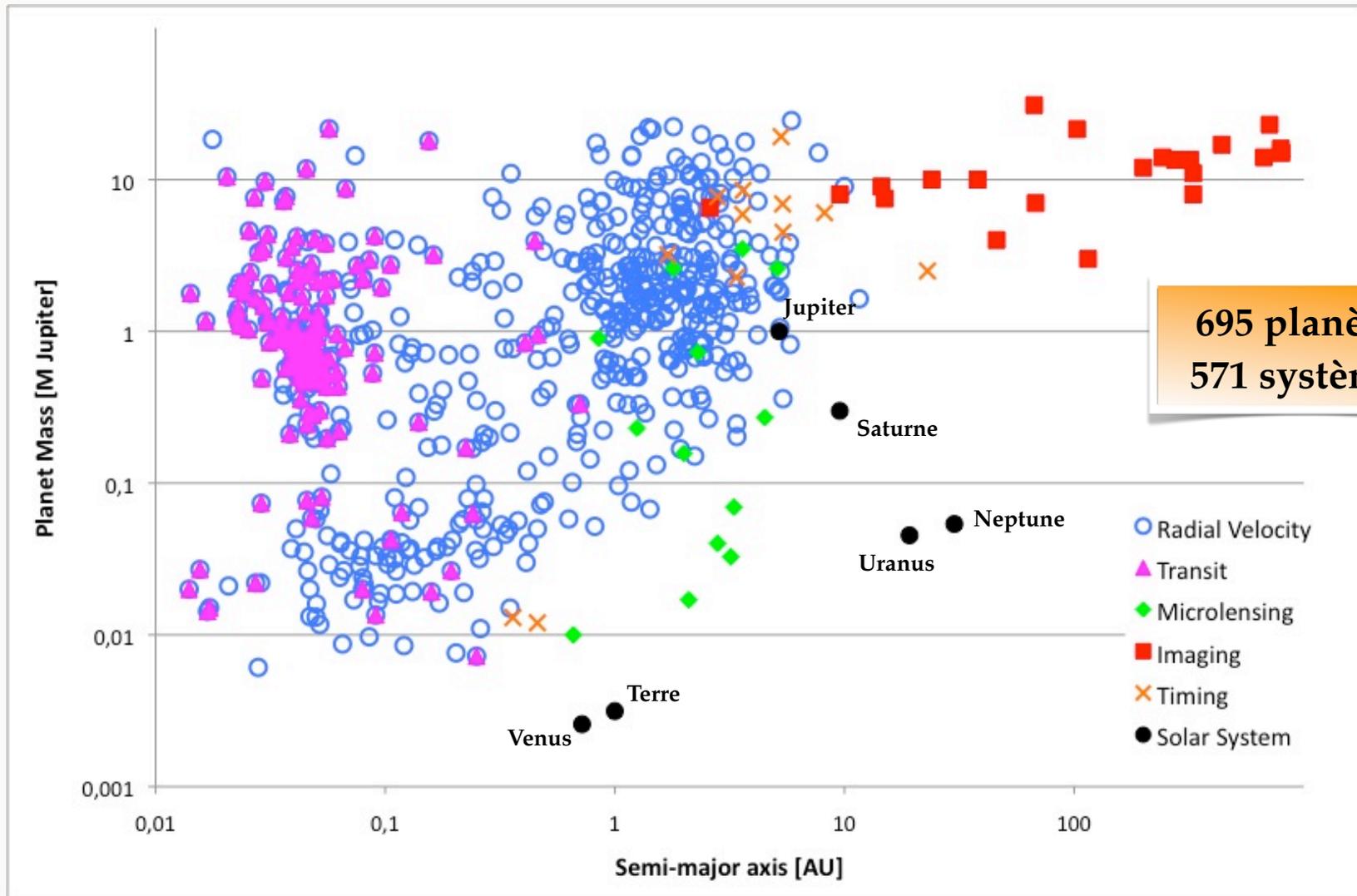
LEUR MASSE



LEUR MASSE



MASS VS. SEMI-MAJOR AXIS

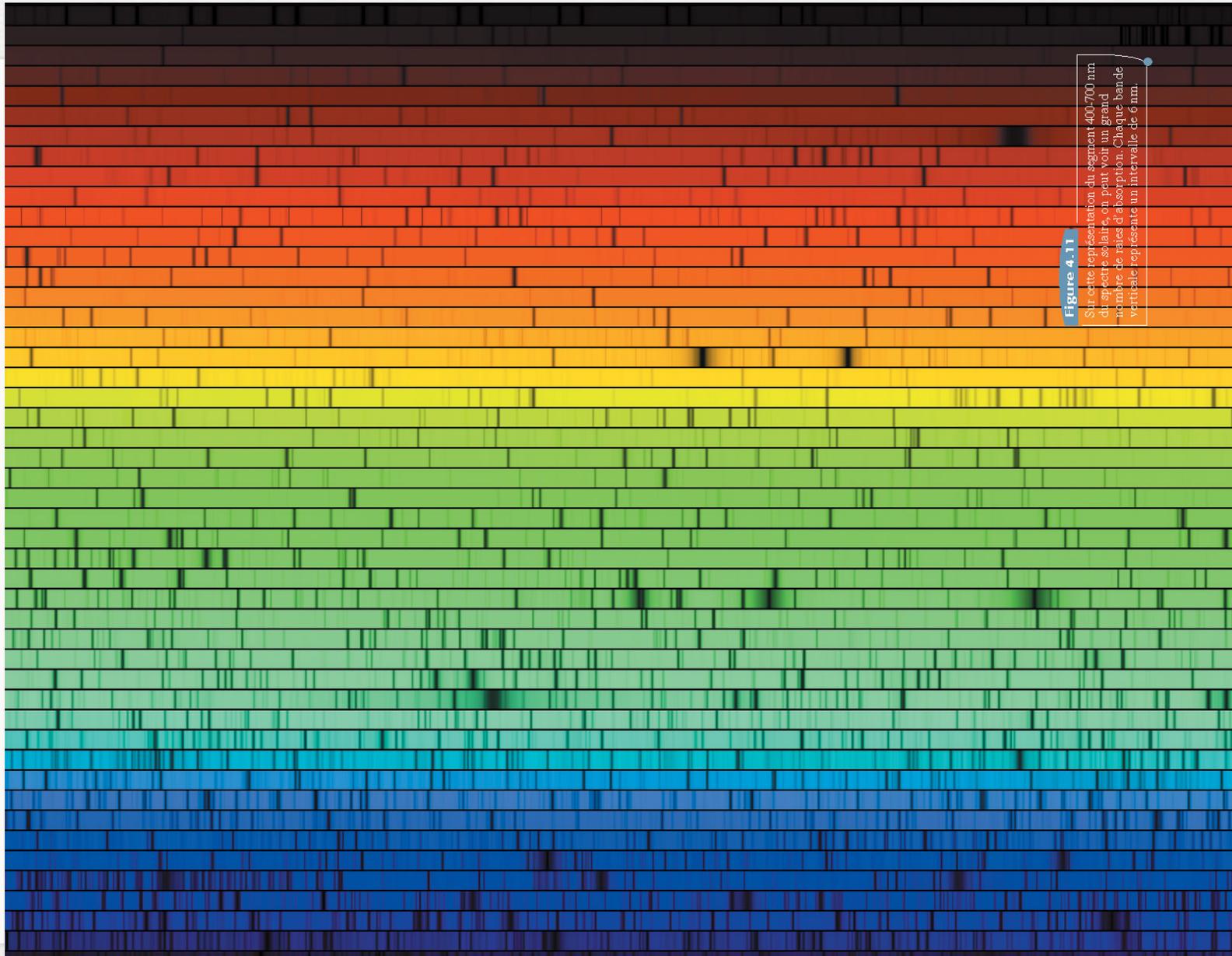


695 planètes
571 systèmes

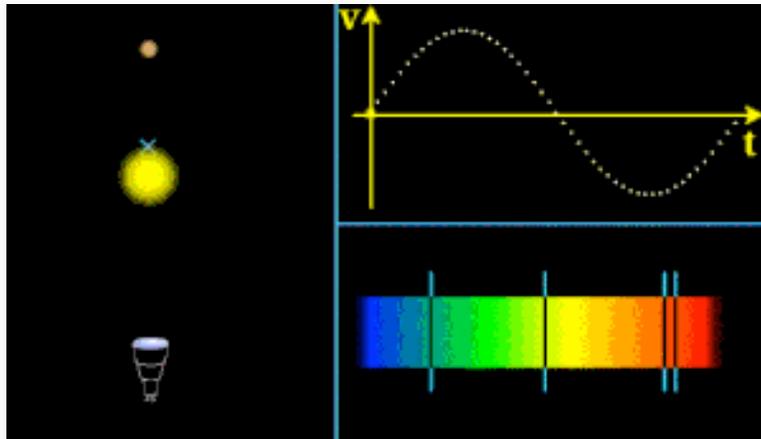
BILAN

- 695 planètes détectées (masses, orbites)
- ~ 81 systèmes multiples
- 7 - 10% des étoiles observées ont des planètes
- 3.3% à longues périodes (3 - 6 AU)
- freq jupiters chauds: 0.5 - 1%
- ~ 172 systèmes en transit => rayon
- ~ 50 planètes < 10 M_{\oplus} courte période 0.05-0.5 AU
- Estimation fréquence => 30% pour $M < 10 M_{\oplus}$ et 50% pour $M < 50 M_{\oplus}$

MÉTHODES «INDIRECTES»

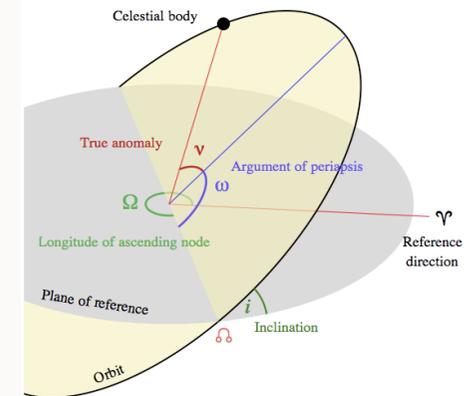


VITESSES RADIALES



$$V_R(t) = K \sin\left(\frac{2\pi t}{P}\right)$$

$$K = \frac{M_p \sin i}{M_*} \sqrt{\frac{GM_*}{a \cdot (1 - e^2)}}$$

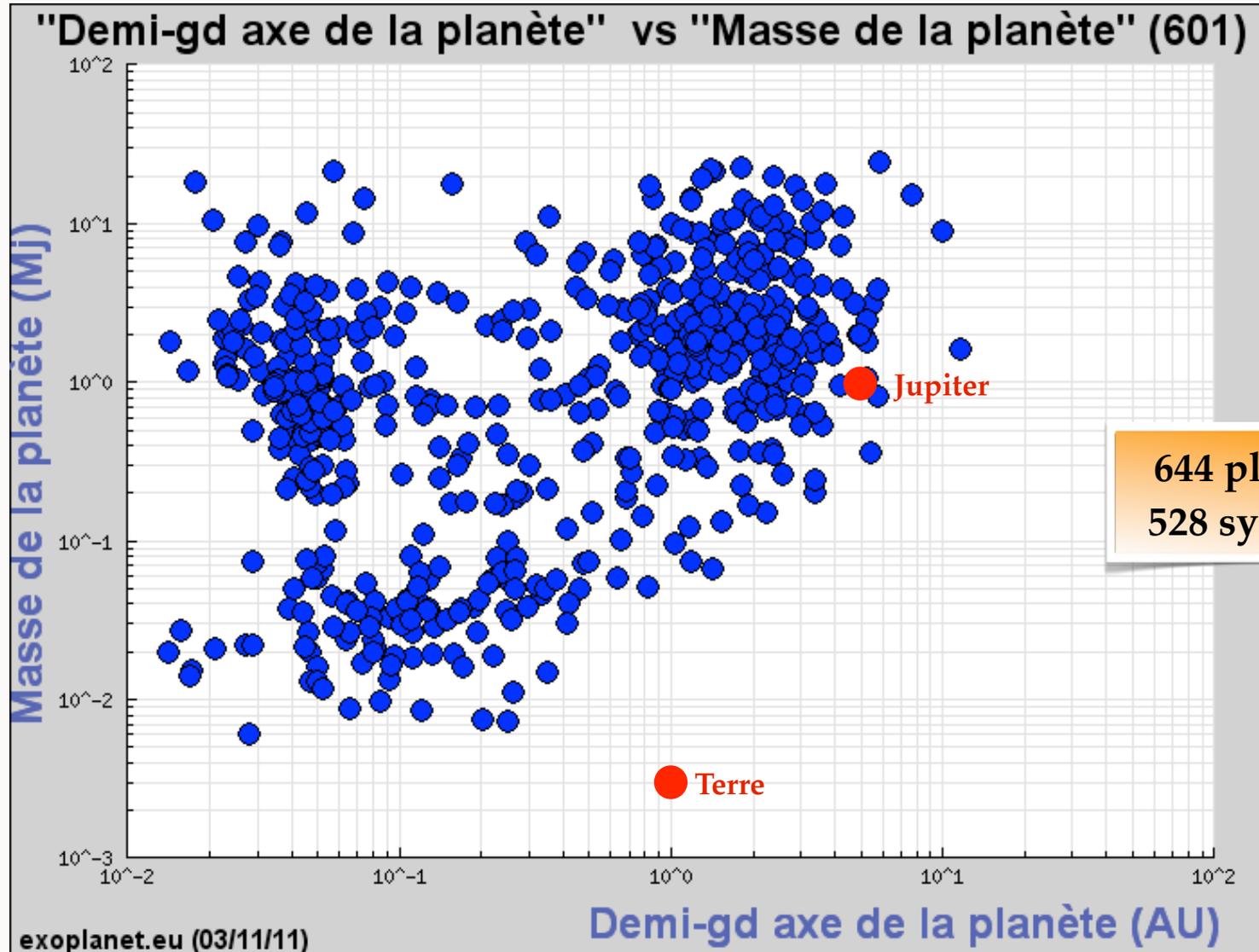


Détection favorable :

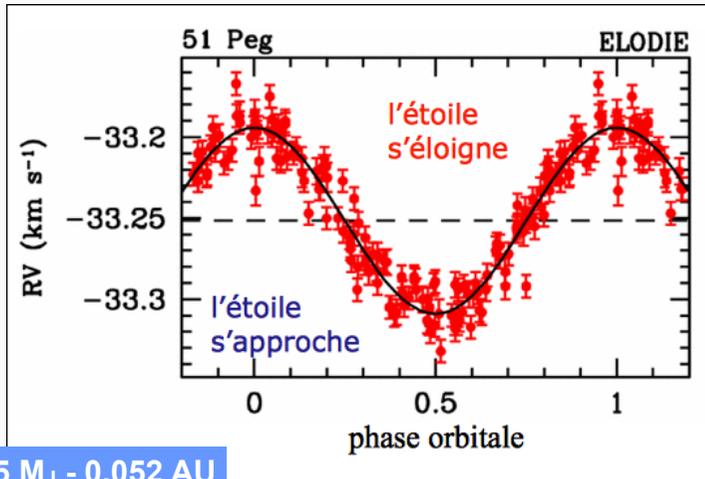
- ✓ planètes massives
- ✓ planètes proches de l'étoile
- ✓ indépendant de la distance de l'étoile
- ✓ masse minimale (indétermination du $\sin i$)

Jupiter (318 M_{\oplus})	5 AU	12.7 m.s^{-1}
Jupiter (318 M_{\oplus})	1 AU	28.4 m.s^{-1}
Neptune (17 M_{\oplus})	1 AU	1.5 m.s^{-1}
Super Terre (5 M_{\oplus})	0.1 AU	1.4 m.s^{-1}
Super Terre (5 M_{\oplus})	1 AU	0.45 m.s^{-1}
Terre (1 M_{\oplus})	1 AU	9 cm.s^{-1}

ESPACE PARAMÈTRES

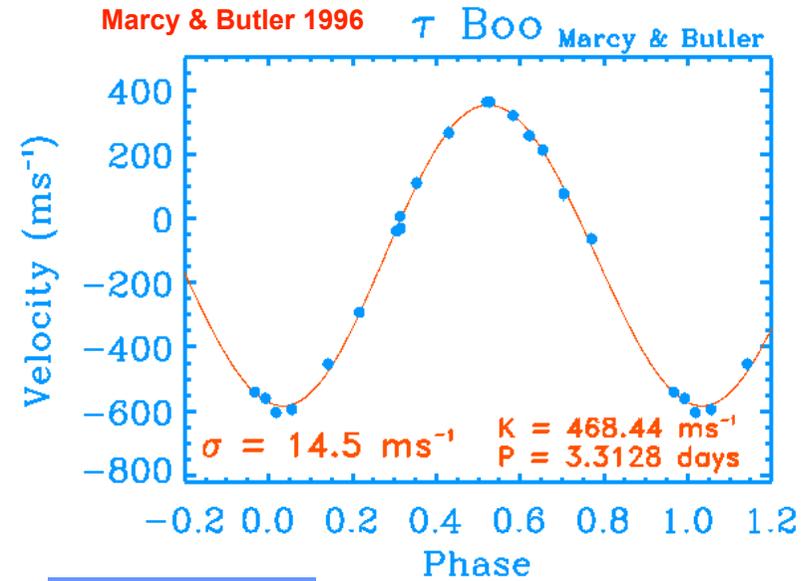


LES PREMIÈRES ...

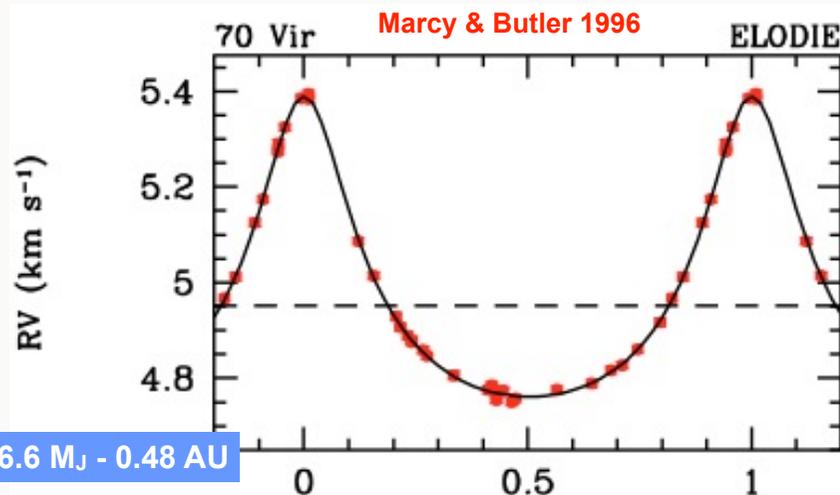


0.5 M_J - 0.052 AU

Mayor & Queloz 1995



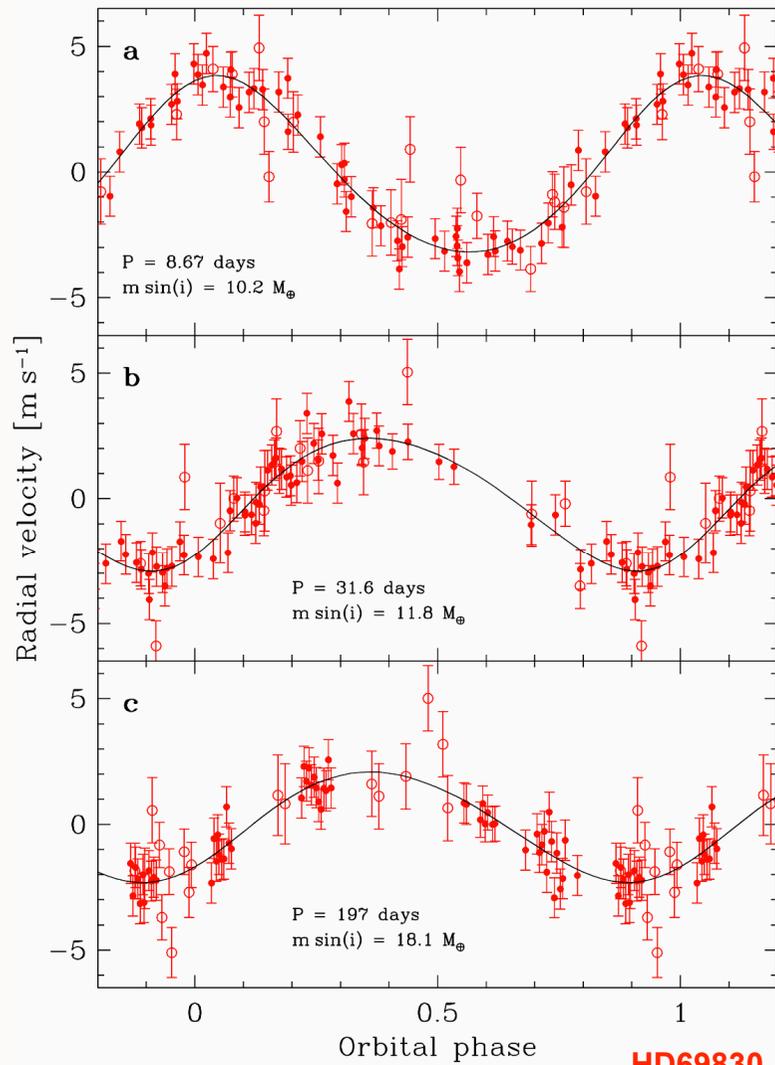
3.9 M_J - 0.046 AU



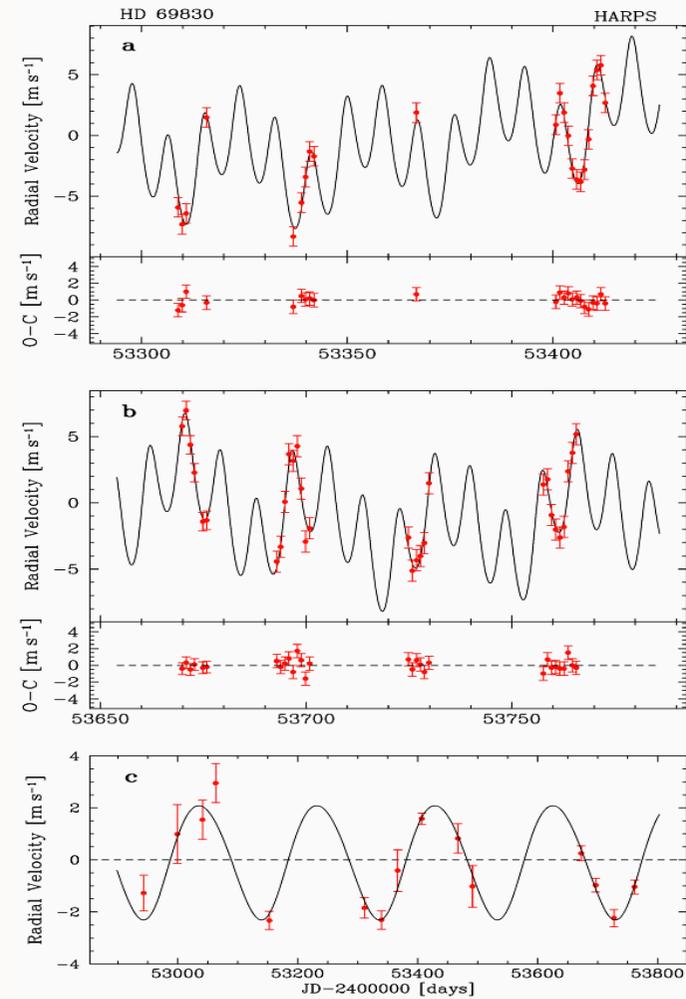
6.6 M_J - 0.48 AU

Les Jupiters Chauds

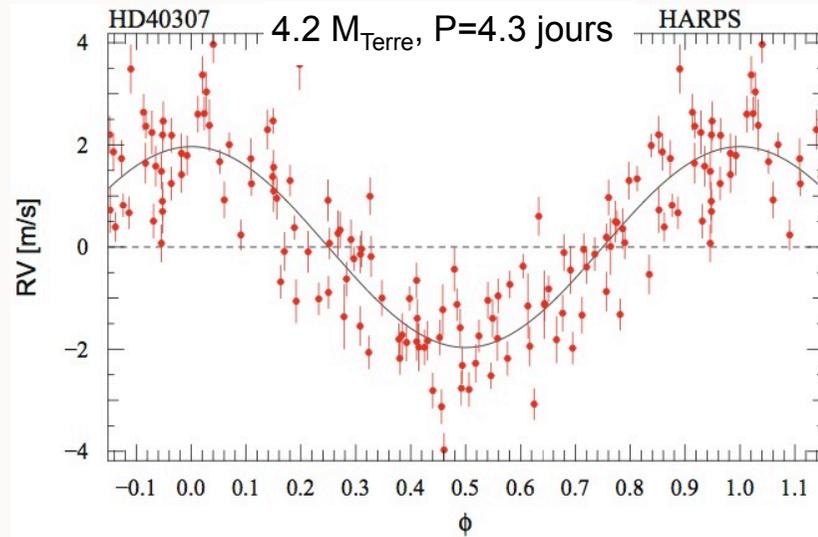
DES NEPTUNES ...



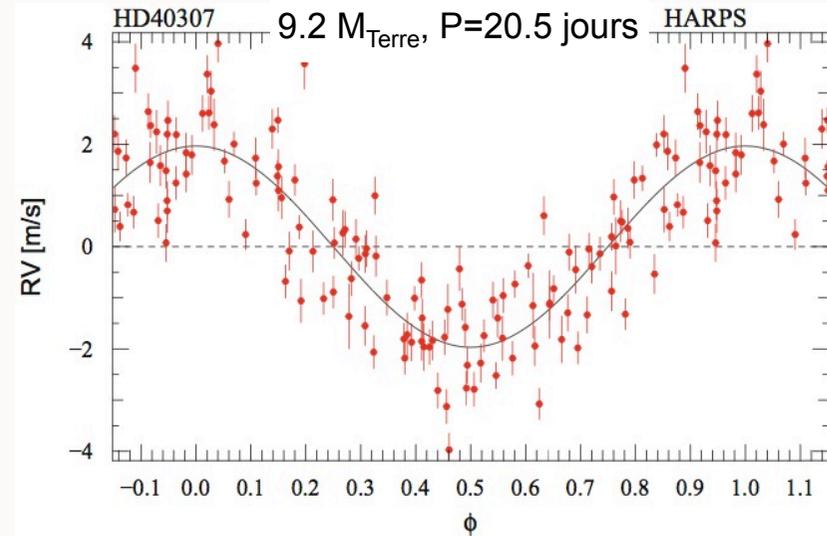
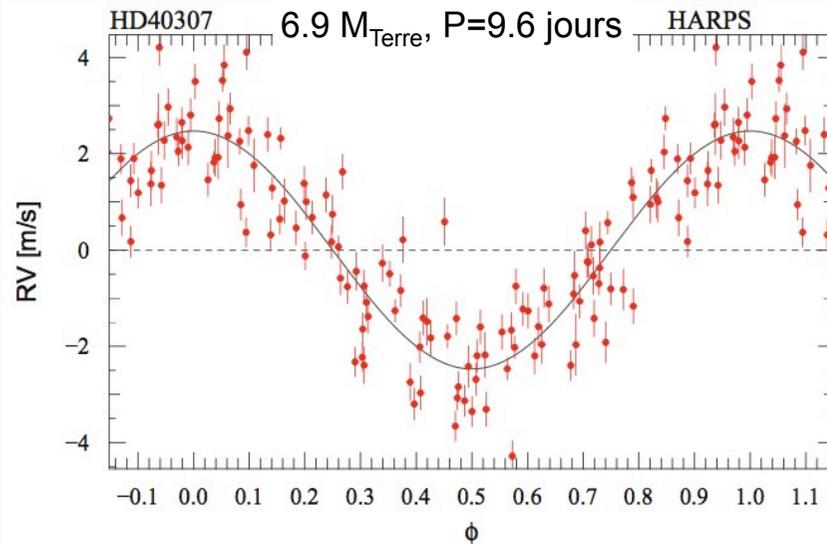
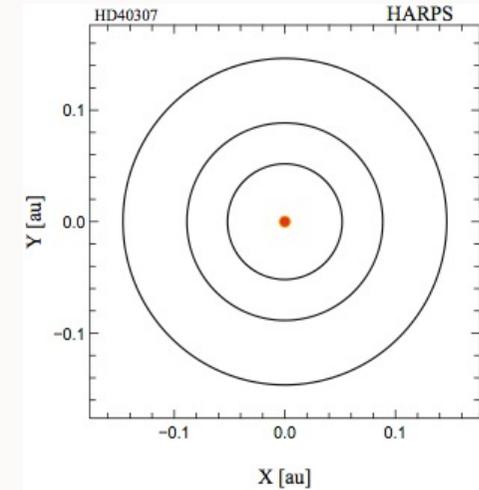
HD69830 - Trident de Neptune (Lovis et al. 2006)



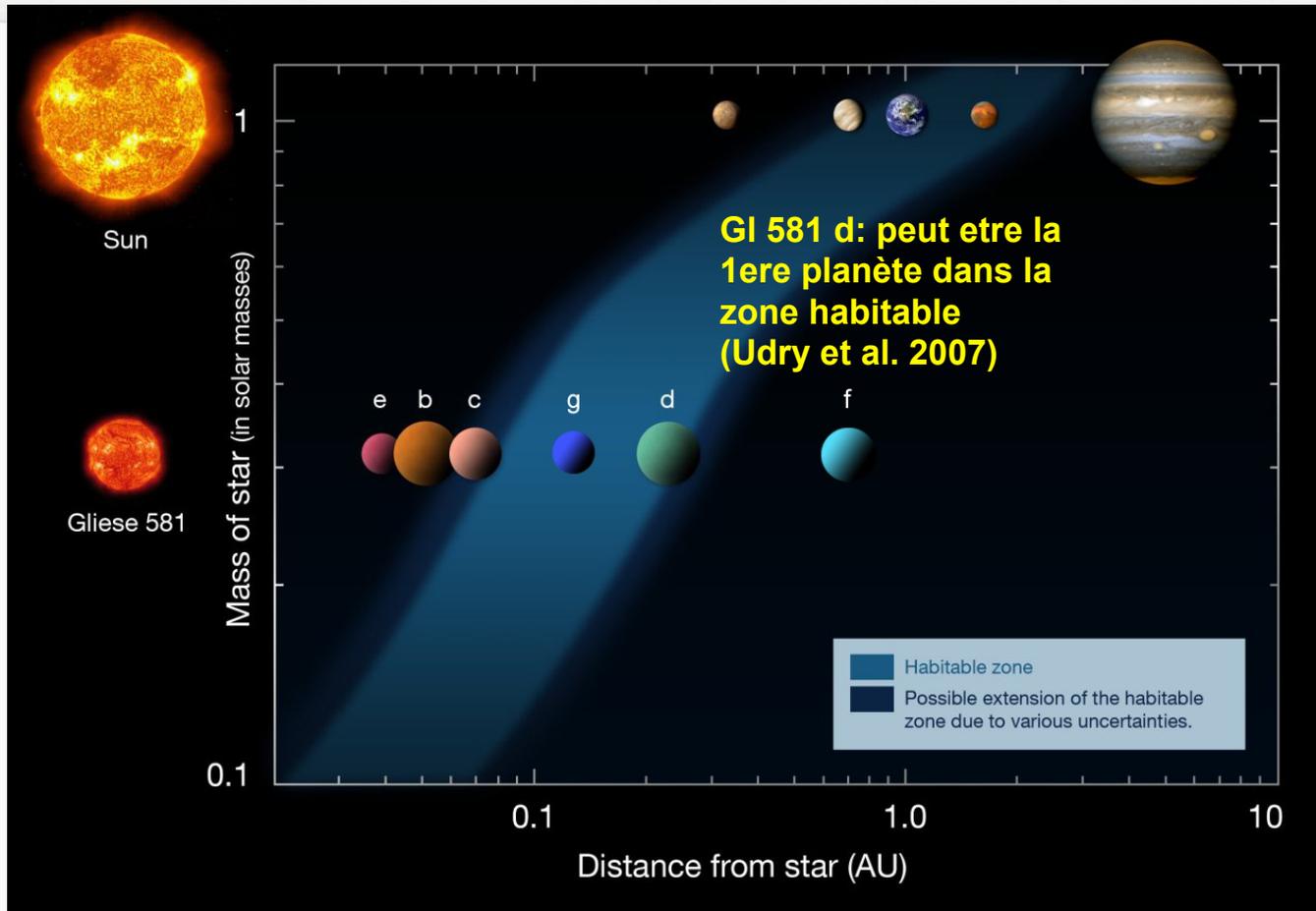
DES SUPER TERRES ...



HD40307
 Mayor et al. 2009

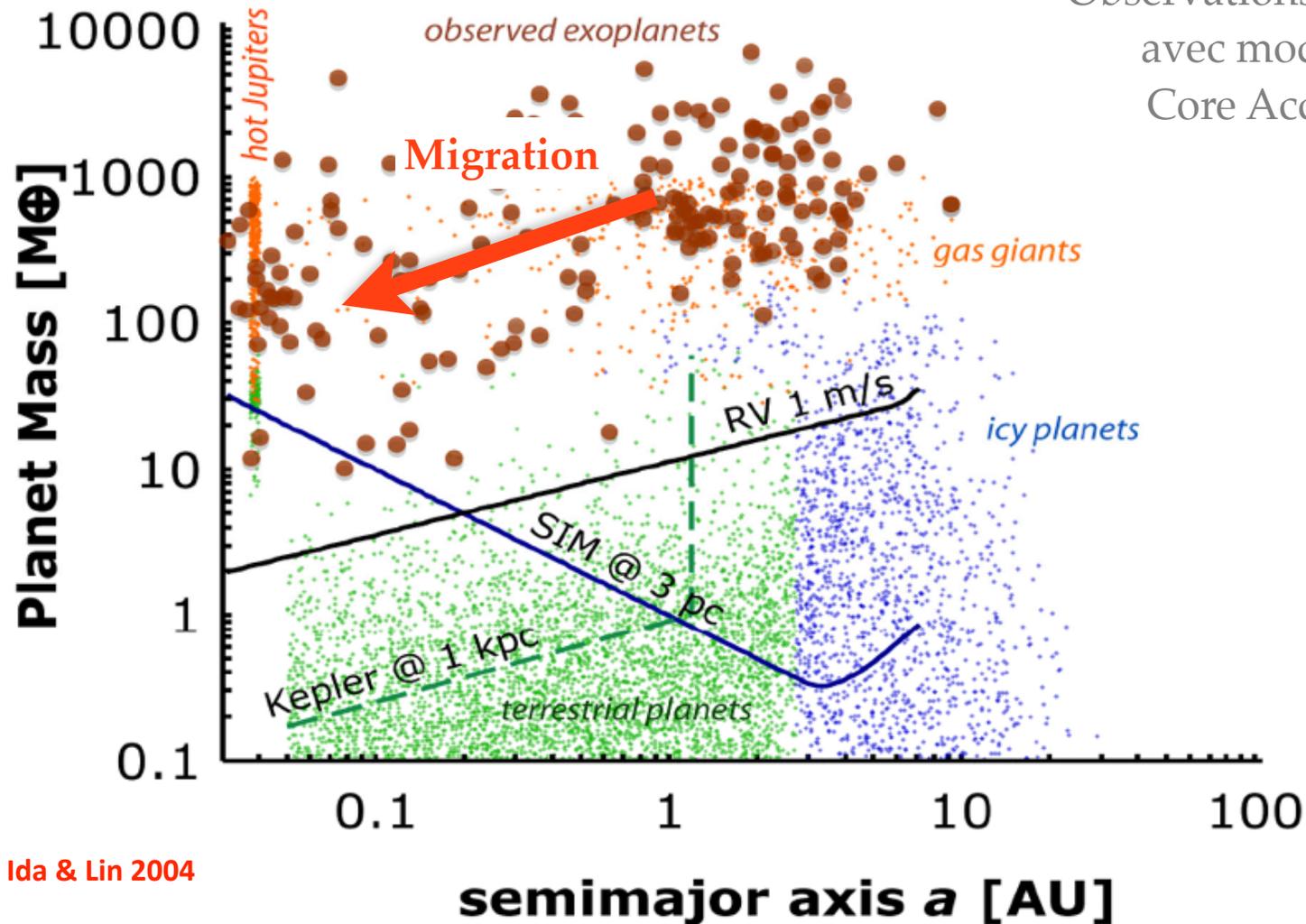


ZONE HABITABLE



	Gl 581 b	Gl 581 c	Gl 581 d	Gl 581 e	Gl 581 f	Gl 581 g
Mass (M_{\oplus})	15.65	5.3	7.09	1.94	7.31	3.17
a [AU]	0.04	0.07	0.22	0.03	0.76	0.15

UN RÉSERVOIR DE PETITES PLANÈTES



Ida & Lin 2004

INSTRUMENTS

Caractéristiques de HARPS

Étendue spectrale : 380-690 nm

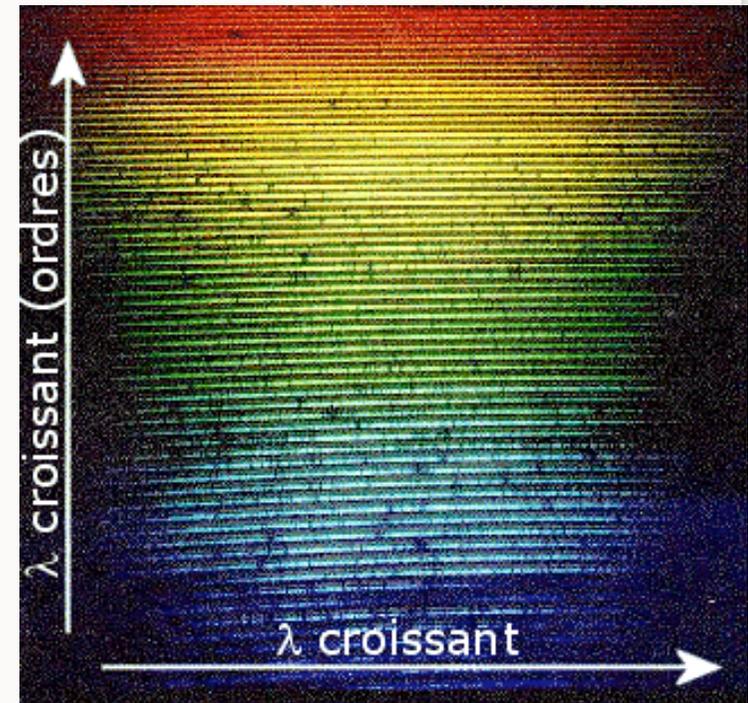
Résolution spectrale : 90 000

Format du spectre : 68 ordres

2 CCD 2k × 4k

Lampe Th-Ar

Précision < 1 m.s⁻¹

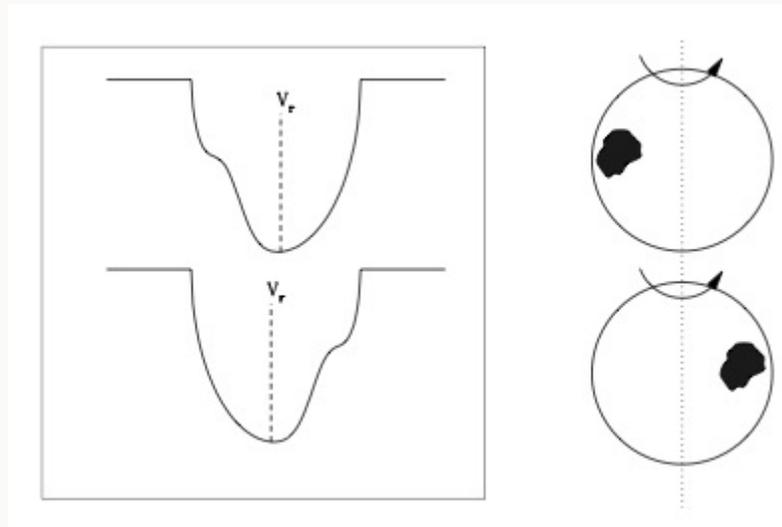


ESPRESSO (VLT)
précision 10 cm.s⁻¹



BRUIT STELLAIRE

Les taches solaires perturbent les raies spectrales et donc la mesure de la vitesse radiale



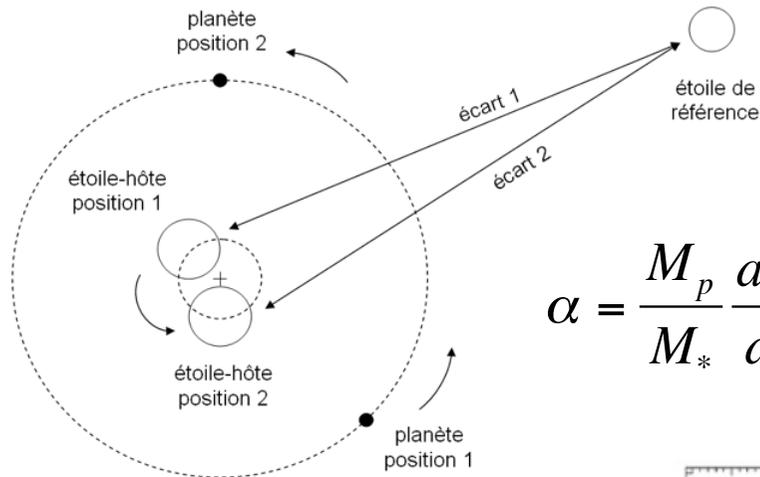
Meunier et al. 2010 : 1 cycle solaire = 8 m.s^{-1}

=> difficile de faire mieux que $0.5 - 1 \text{ m.s}^{-1}$

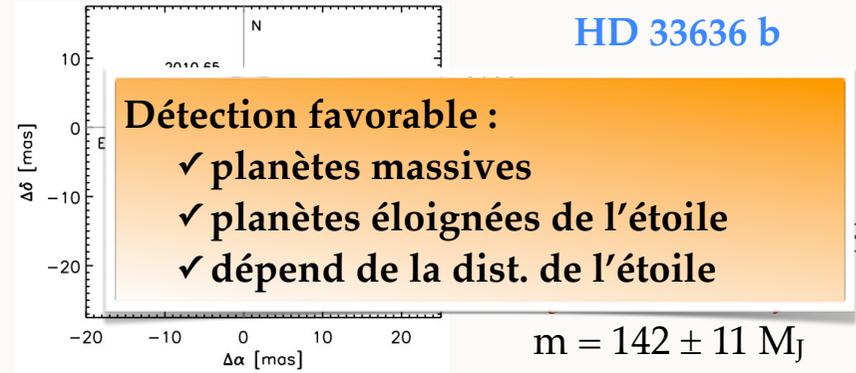


Sélection d'étoiles «calmes»
 pour atteindre un niveau de bruit de
 quelques dizaines de cm.s^{-1}

ASTROMÉTRIE



$$\alpha = \frac{M_p}{M_*} \frac{a(\text{AU})}{d(\text{pc})}$$



Bean et al. 2007

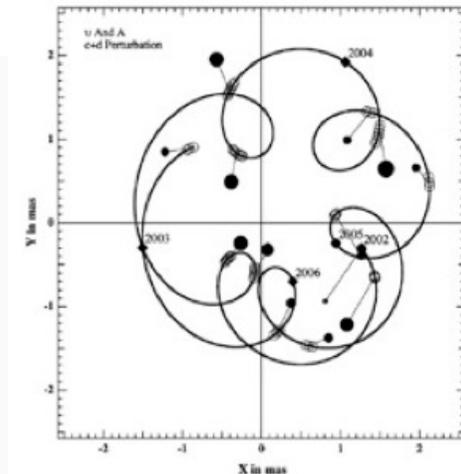
Ups And bcd

en VR:

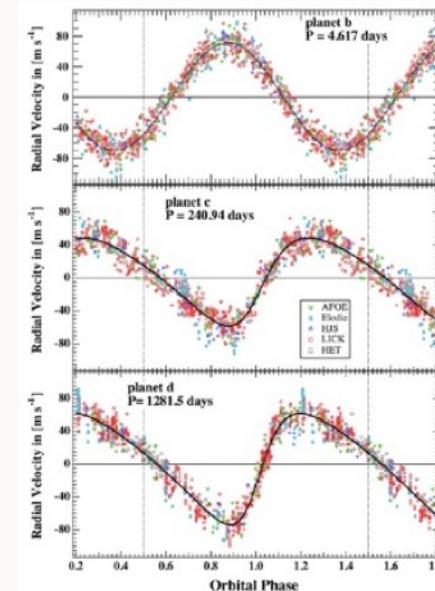
$$\begin{aligned} m_b \cdot \sin i &= 0.75 M_J - P_b = 4.6 \text{ j} \\ m_c \cdot \sin i &= 2.25 M_J - P_c = 240 \text{ j} \\ m_d \cdot \sin i &= 3.95 M_J - P_d = 1281 \text{ j} \end{aligned}$$

Astrométrie (HST/FGS):

$$\begin{aligned} i &= 8^\circ - m_c = 12 M_J \\ i &= 24^\circ - m_d = 10 M_J \end{aligned}$$

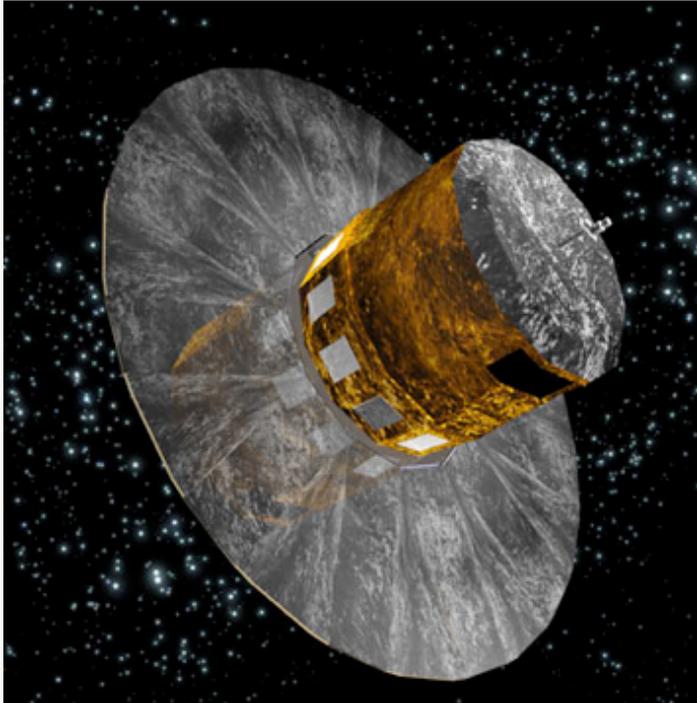


McArthur et al. 2010



ASTROMÉTRIE

2012



- couverture complète du ciel
- précision de qq. micro arcseconde:
[4, 10, 200] μsa à $m_V = [10, 15, 20]$
- astrométrie => masse
- confirmation des résultats VR
- extension aux naines M

=> beaucoup de planètes attendues
7% des étoiles observées à $d < 50\text{pc}$
(Casertano et al. 2008)



TRANSITS

Profondeur transit:

$$\frac{\Delta F}{F} = \left(\frac{R_p}{R_*} \right)^2$$

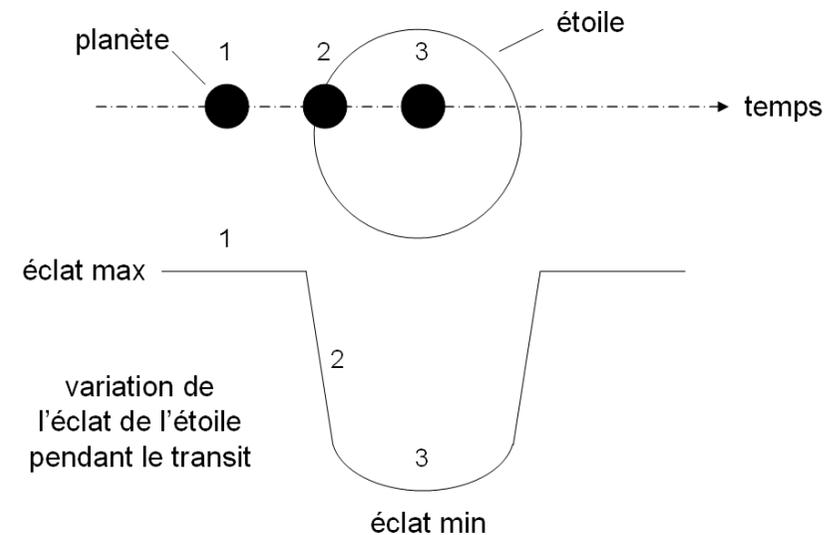
Jupiter / Terre : $10^{-2} / 10^{-4}$

Durée transit:

$$t(\text{hrs}) = \left(\frac{R_*}{R_{sun}} \right) \left(\frac{P}{1\text{yr}} \right)^{1/3} \left(\frac{M_*}{M_{sun}} \right)^{-1/3} \left(1 - \frac{d^2}{R_*^2} \right)^{-1/2}$$

Jupiter / Terre : qq. heures

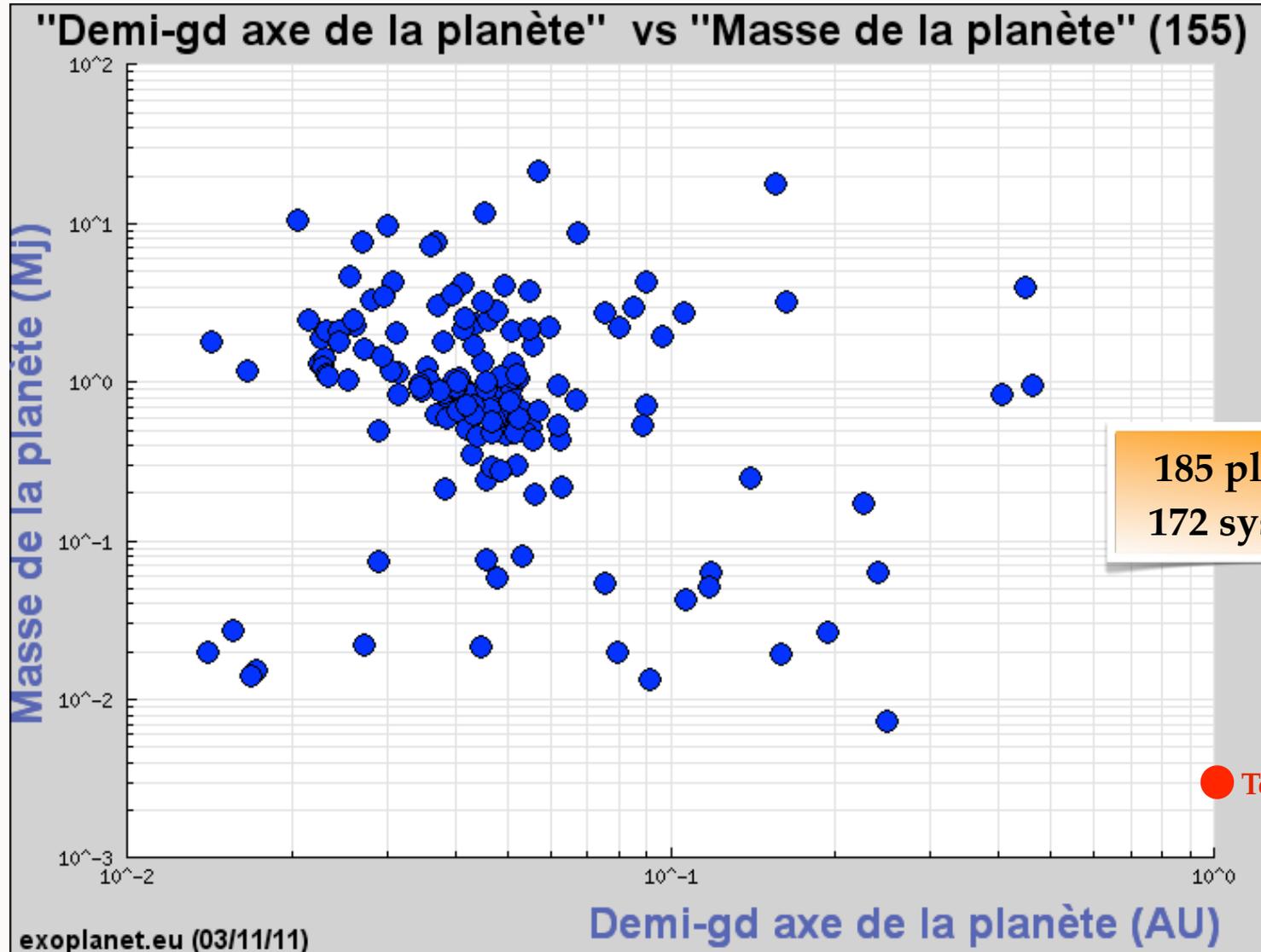
**si Transit + VR => i proche de 90°
=> $M_p \cdot \sin i = M_p$**



Détection favorable :

- ✓ planètes de grands diamètres
- ✓ petites étoiles
- ✓ planètes proches de l'étoile

ESPACE PARAMÈTRES

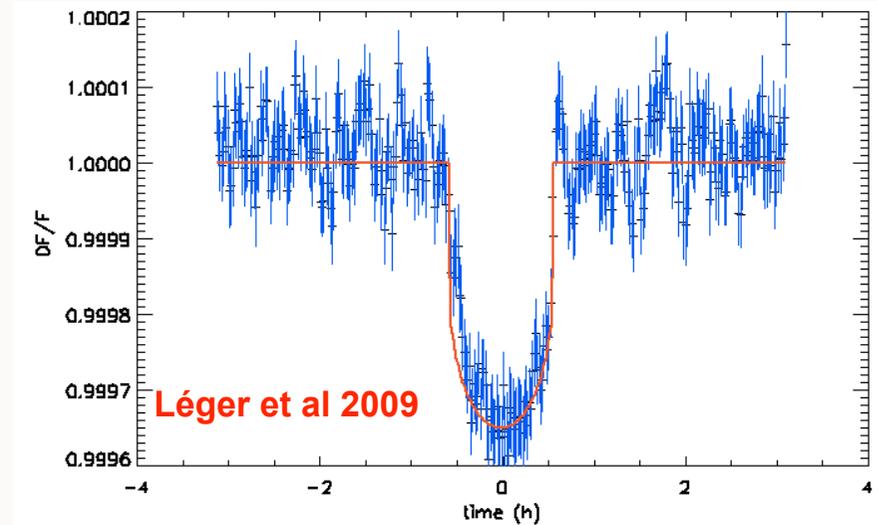
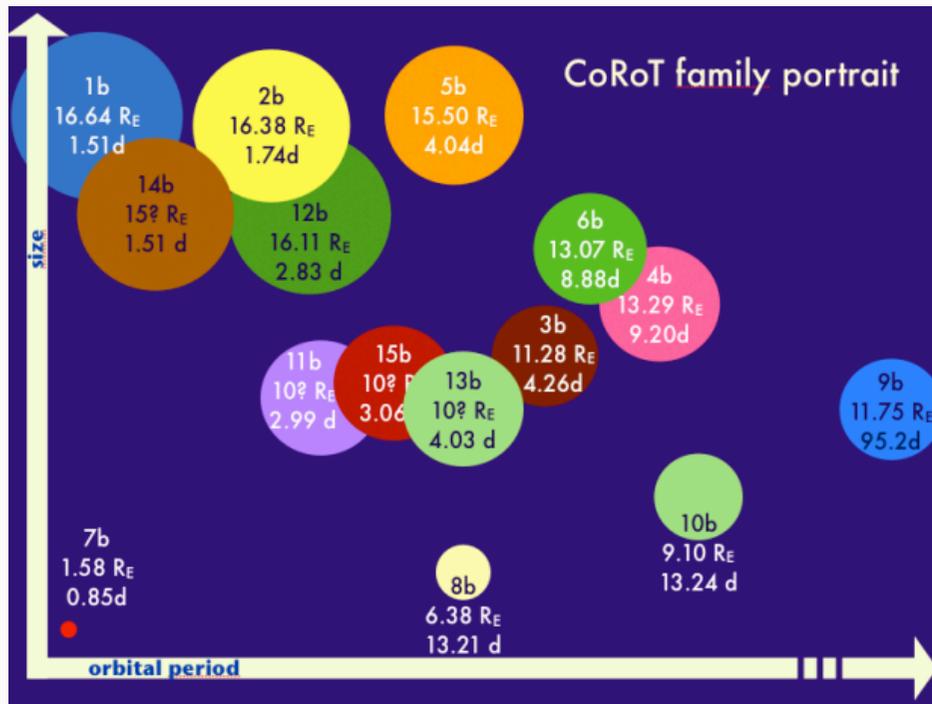


185 planètes
172 systèmes

Terre



TRANSITS: COROT



Caractéristiques de Corot 7b

$R = 1.72 R_{\oplus}$

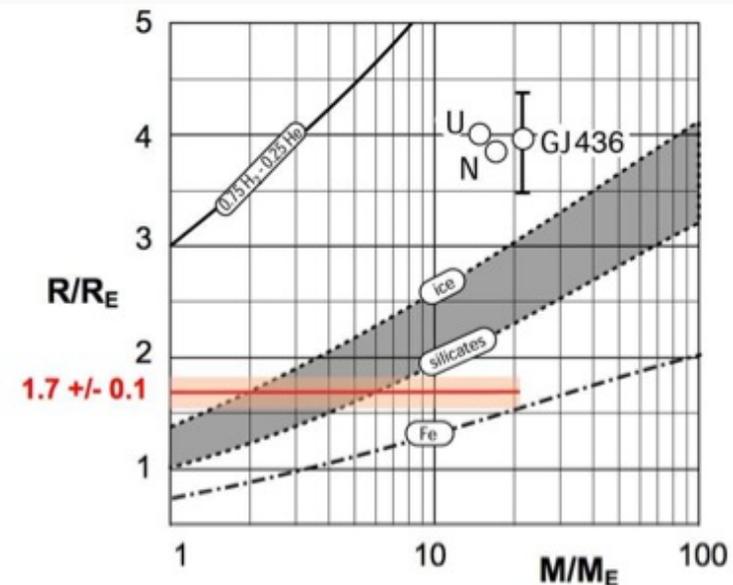
$M < 11 M_{\oplus}$

$a = 0.017 \text{ AU}$

$P = 0.85 \text{ jours}$

Hatzes et al. 2011

$M = 7.4 \pm 1.2 M_{\oplus}$

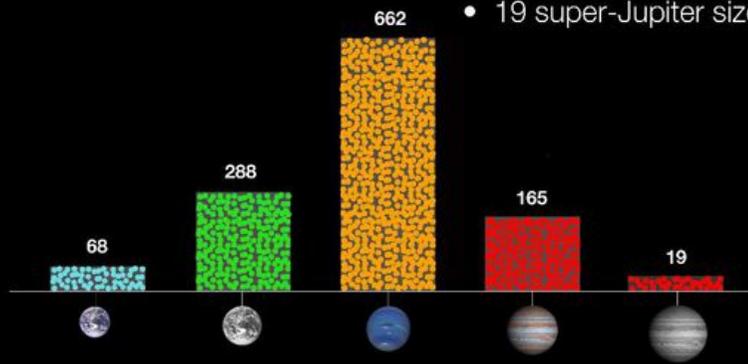


TRANSITS: KEPLER

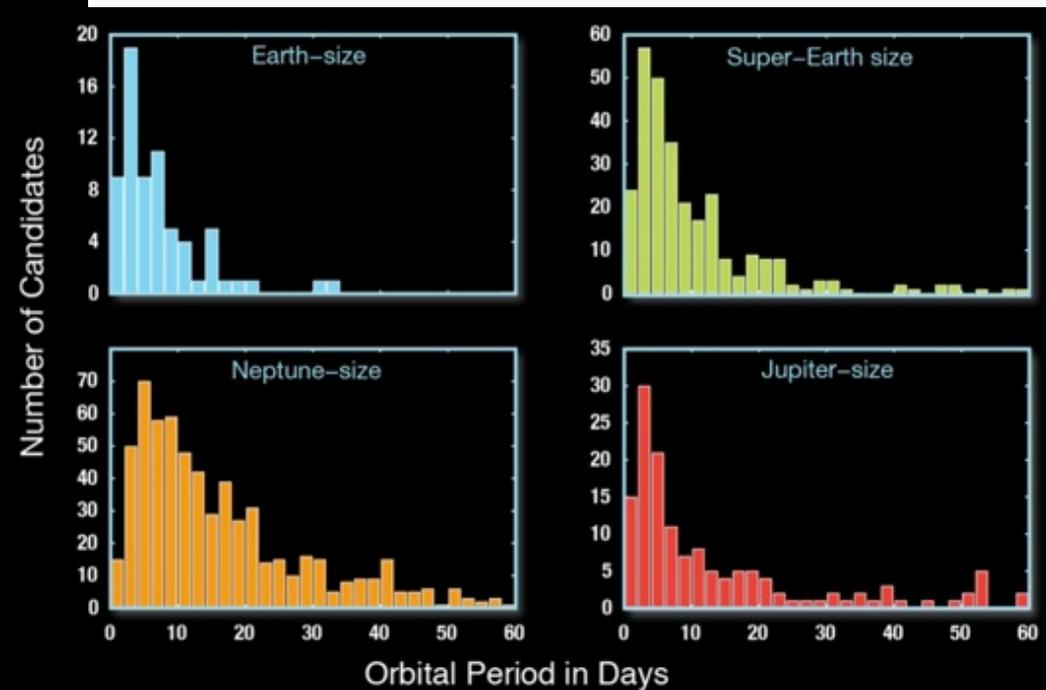
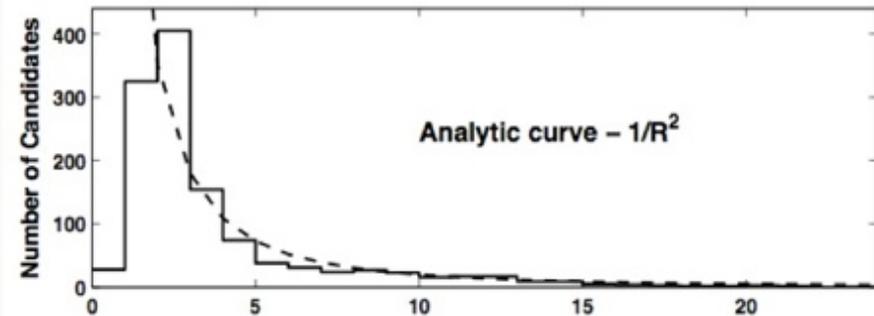


Numbers of Planet Candidates

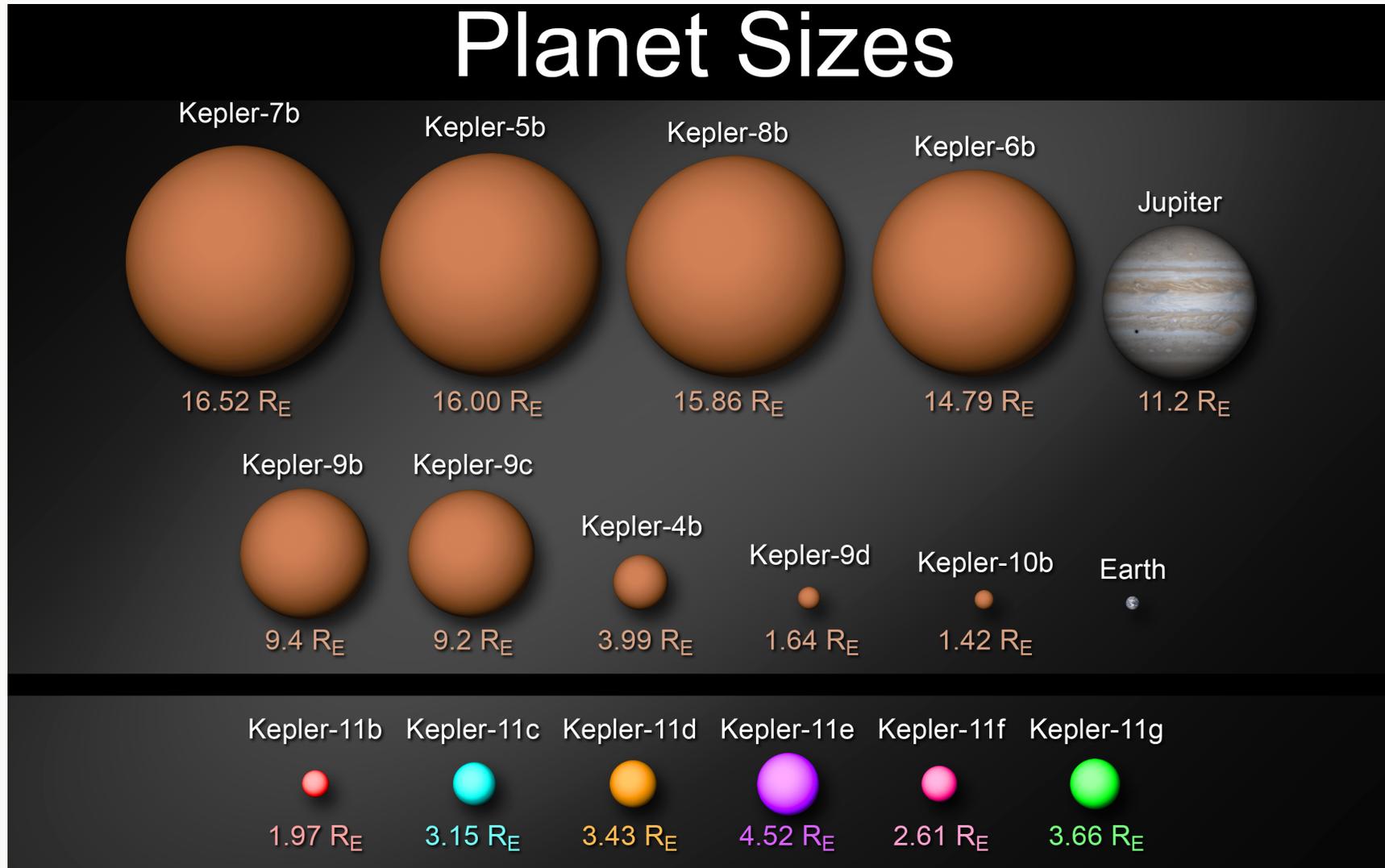
- 68 Earth-size
- 288 super-Earth size
- 662 Neptune size
- 165 Jupiter size
- 19 super-Jupiter size



**1235 candidats ...
 ... 25 planètes confirmées !!!**

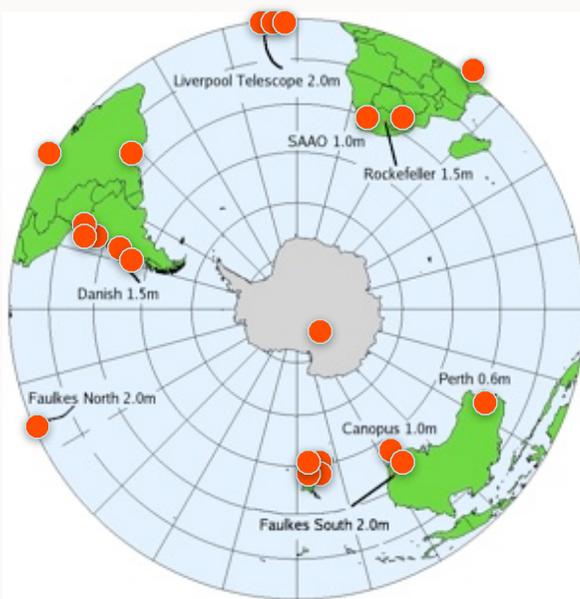


TRANSITS: KEPLER

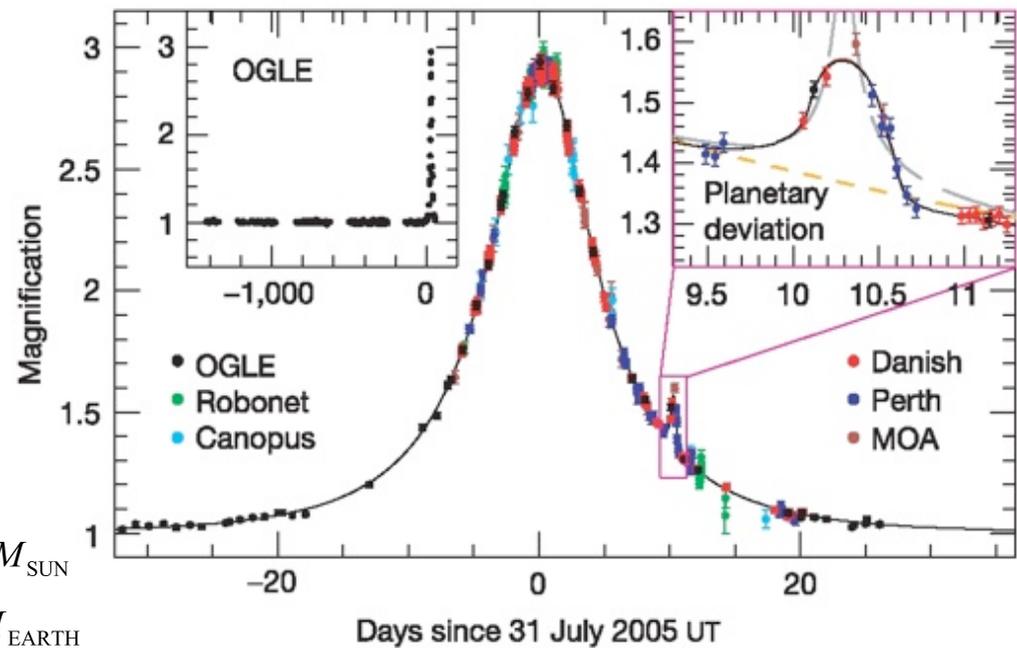


MICRO-LENSING

Radial velocities & transits



Réseau de télescopes au sol pour couverture continue (~20 télescopes)



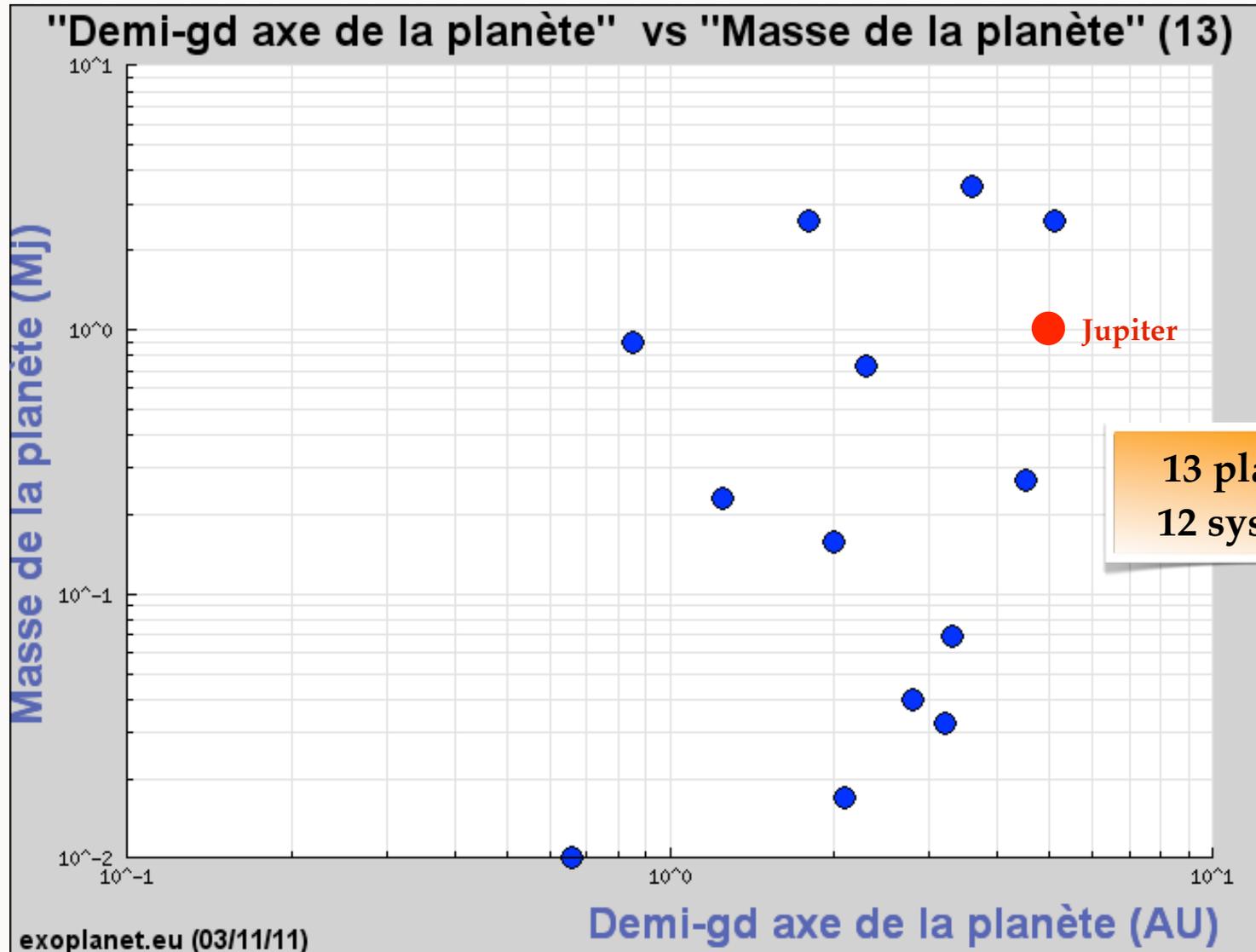
Beaulieu et al. 2006

$$M_* = 0.22^{+0.21}_{-0.11} M_{\text{SUN}}$$

$$M_p = 5.5^{+5.5}_{-2.7} M_{\text{EARTH}}$$

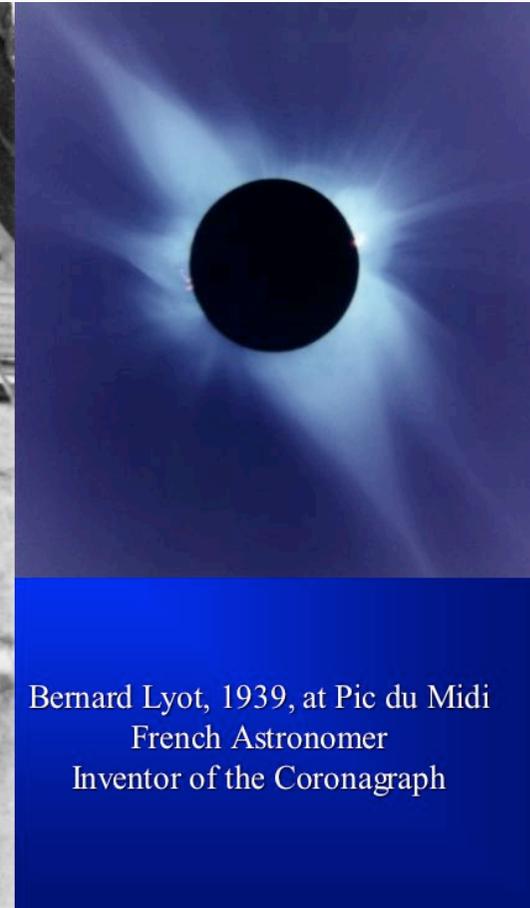
$$a = 2.6^{+1.5}_{-0.6} \text{ AU}$$

ESPACE PARAMÈTRES



MÉTHODES «DIRECTES»

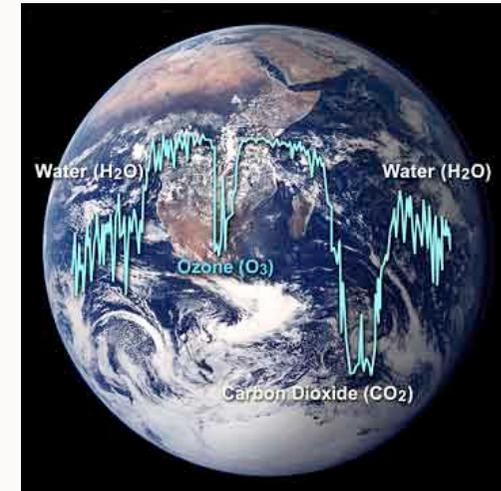
- IMAGERIE DIRECTE



Bernard Lyot, 1939, at Pic du Midi
French Astronomer
Inventor of the Coronagraph

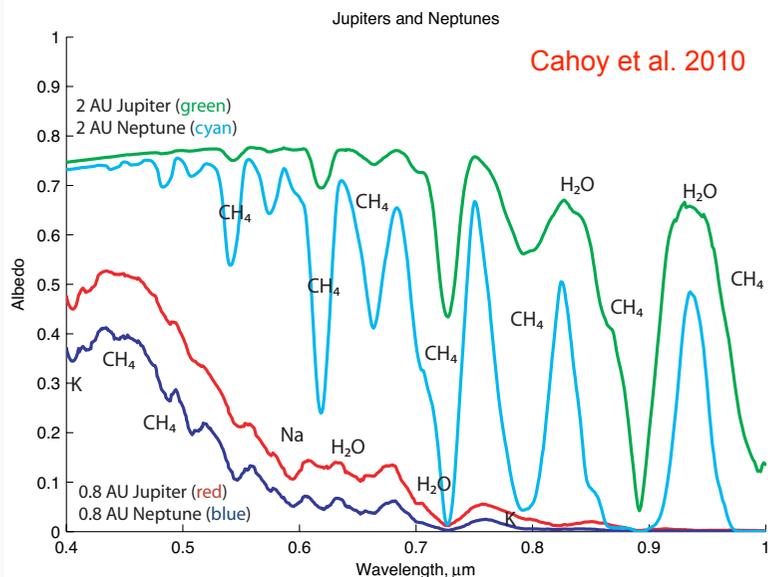
LES OBSERVABLES

- ❖ *Sensible à toutes les composantes d'un système planétaire*
- ❖ *Position dans l'image : $x(t)$, $y(t)$ [distances projetées]*
 - position orbitale (t): paramètres orbitaux, architecture des systèmes planétaires, distribution de la poussière
- ❖ *Flux (intensité & polarisé): $F(\lambda, t)$, $P(\lambda, t)$*
 - accès au spectre => physique et chimie de l'atmosphère (composition, température, pression, masse, gravité)
 - accès au degré de polarisation => physique de l'atmosphère (nuages/brumes, océans, sols, végétations)
 - variations temporelles (saisons, anneaux, excentricité)
 - habitabilité, bio signatures

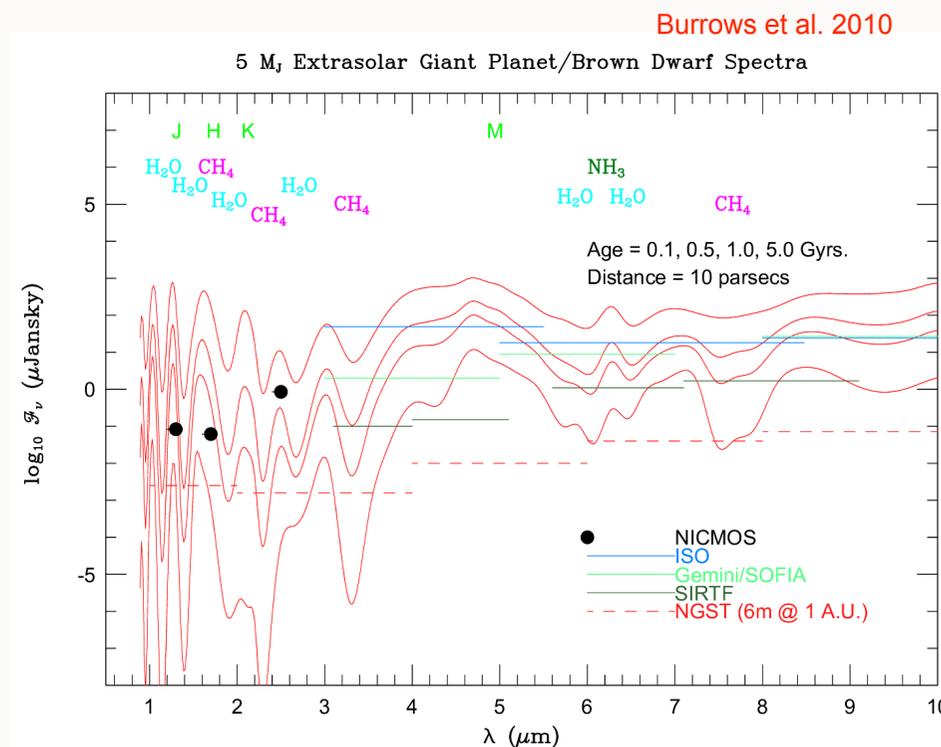


La détection directe est un outil pour caractériser
les atmosphères exoplanétaires
Toutes les λ sont intéressants du visible à l'IR moyen

QUELLE INFORMATION SPECTRALE ?



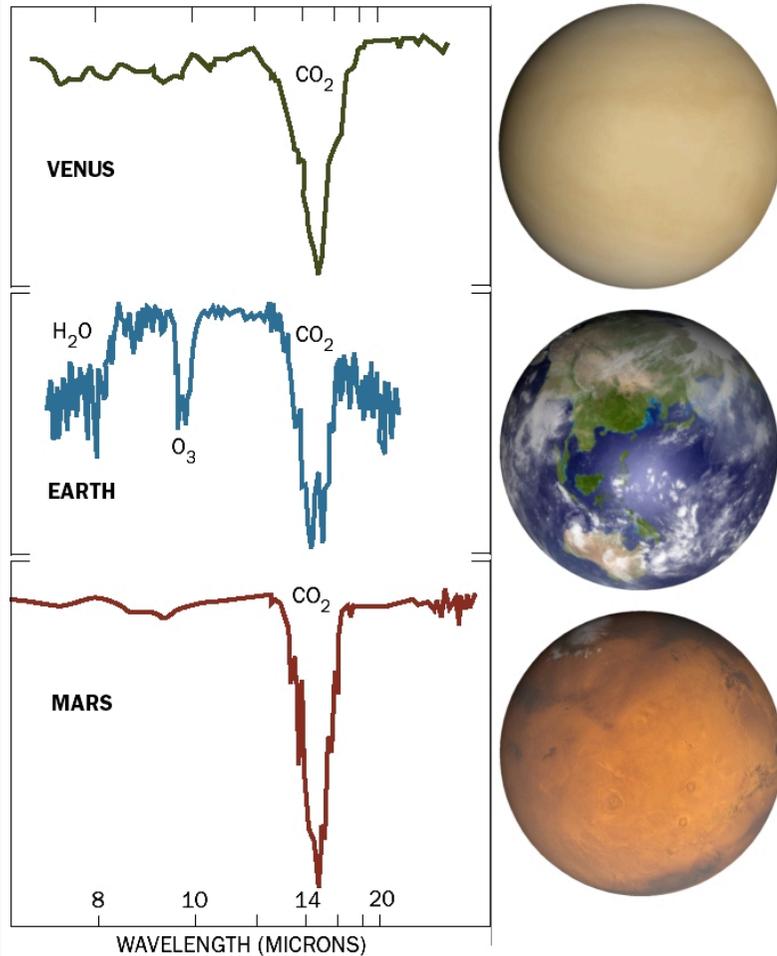
Planètes géantes



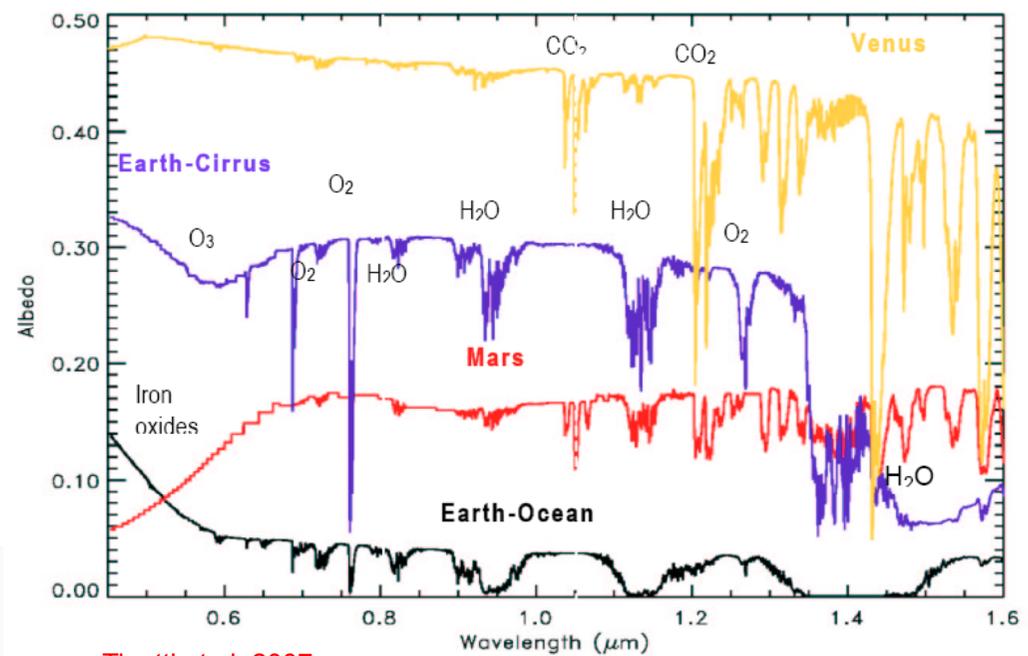
Contient informations sur :

- Espèces chimiques
- Pression, Température
- Nuages, Sols

QUELLE INFORMATION SPECTRALE ?

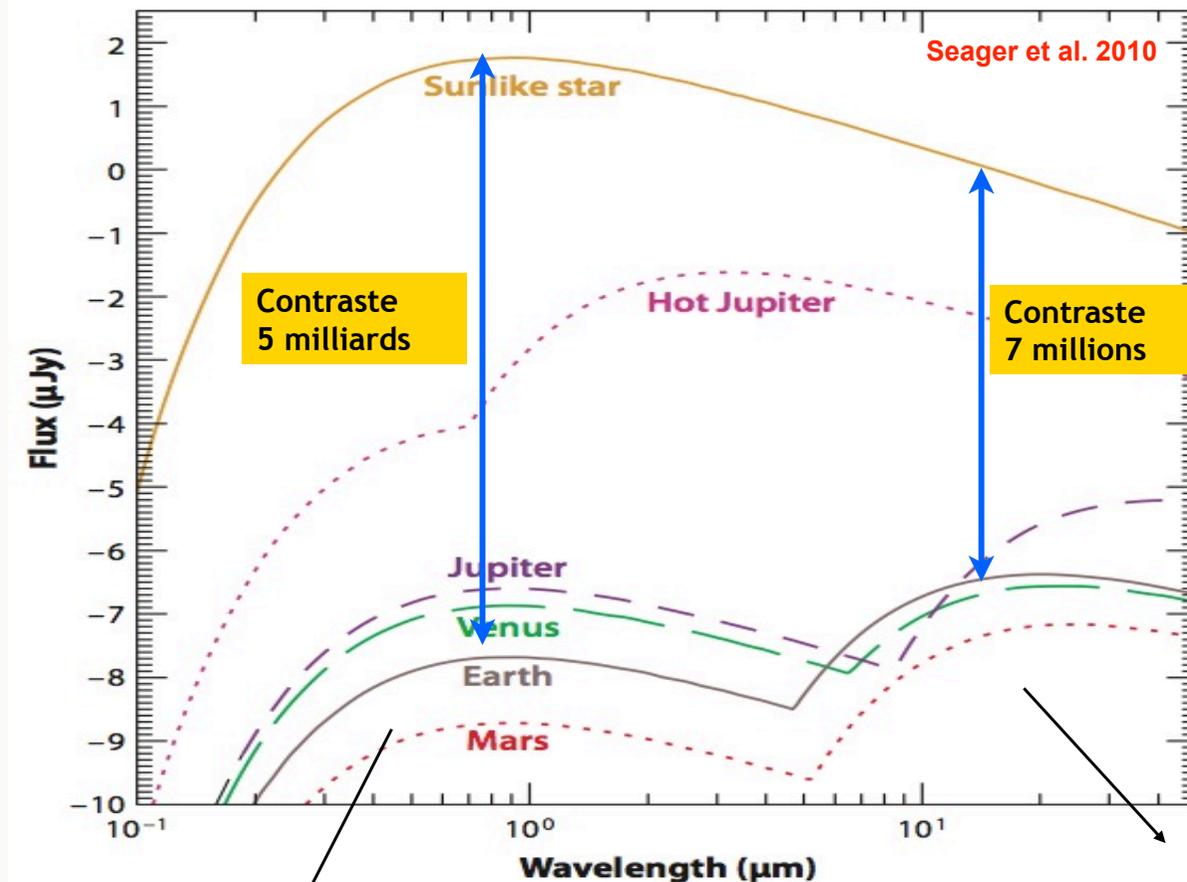


Planètes telluriques



Tinetti et al. 2007

RAPPORT D'INTENSITÉ

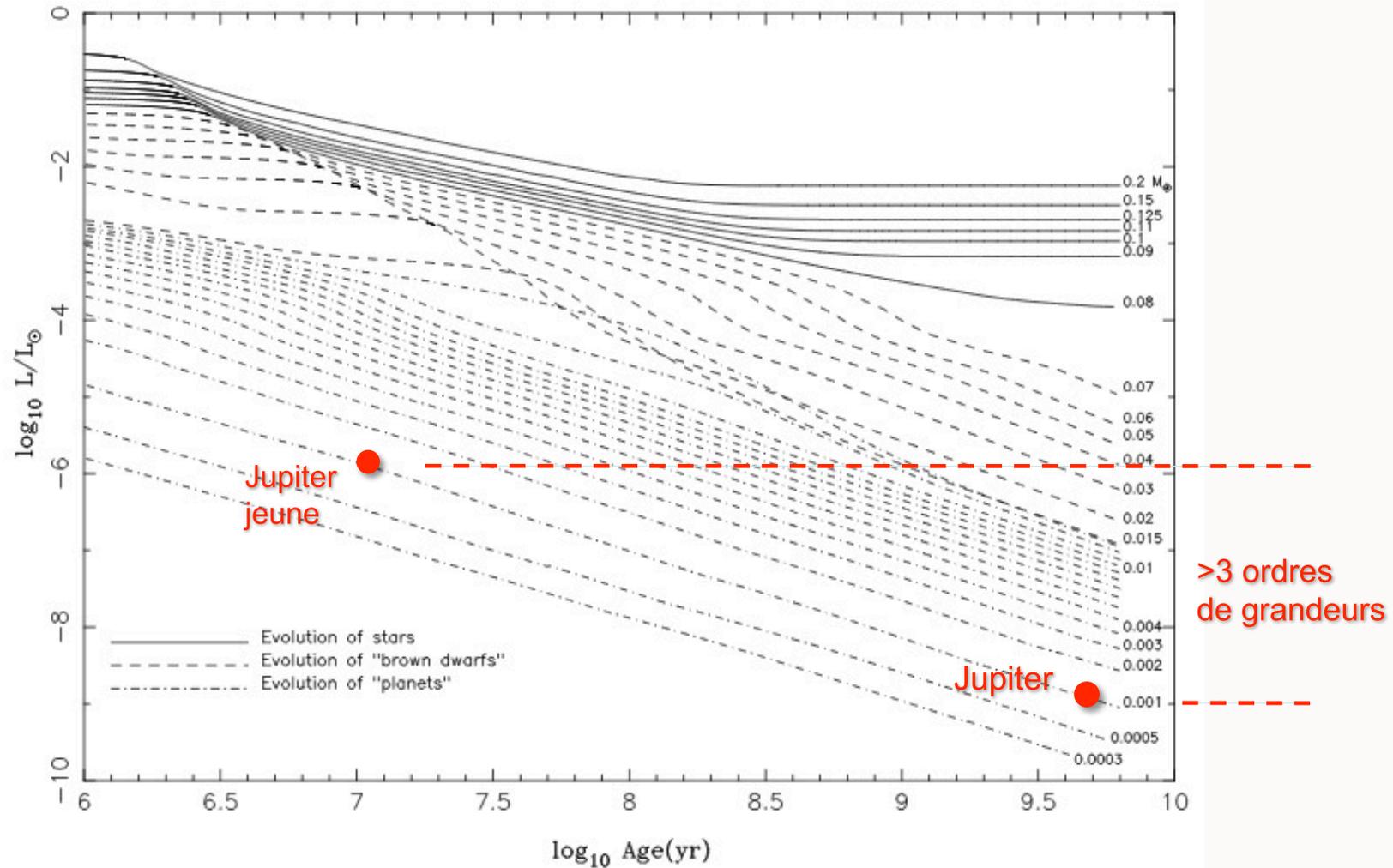


Pourquoi c'est difficile ?

Lumière réfléchie
 irradiated planets

Émission thermique
 self luminous planets

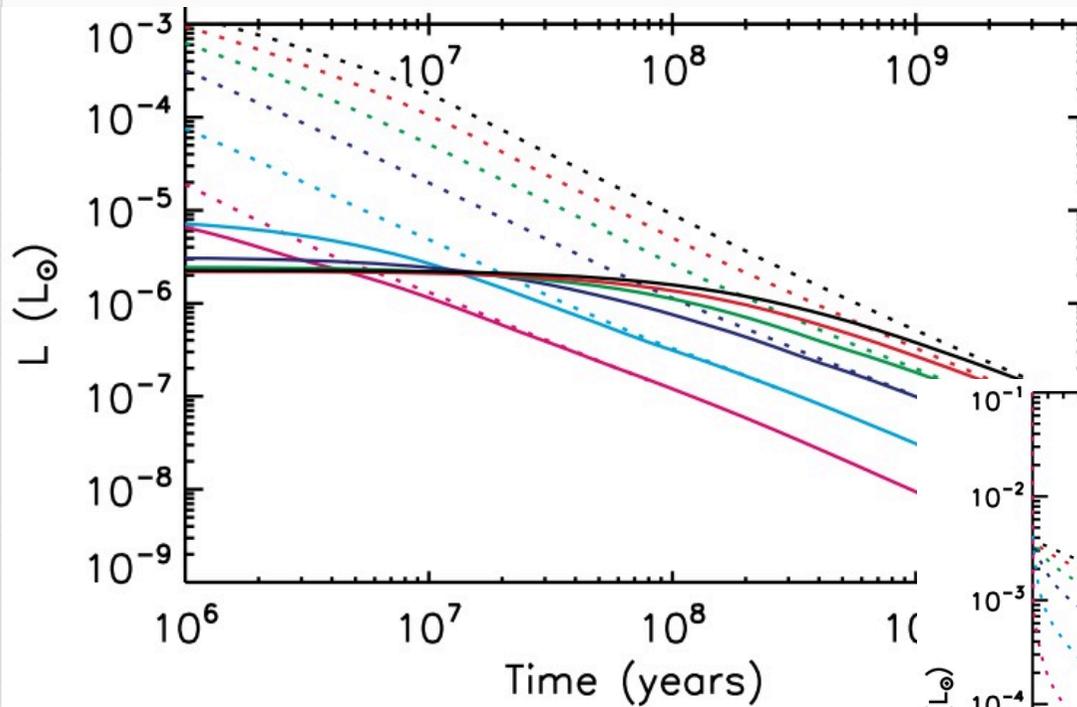
MODÈLES D'ÉVOLUTION



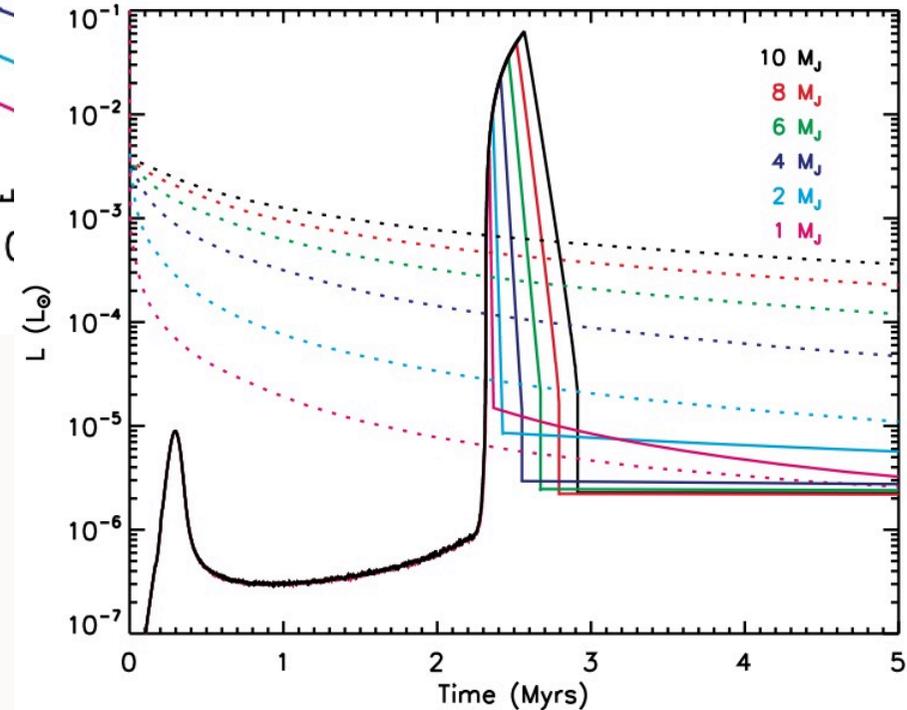
- modèle «hot start»: extrapolation des naines brunes

Burrows et al. 1997

MODÈLES D'ÉVOLUTION

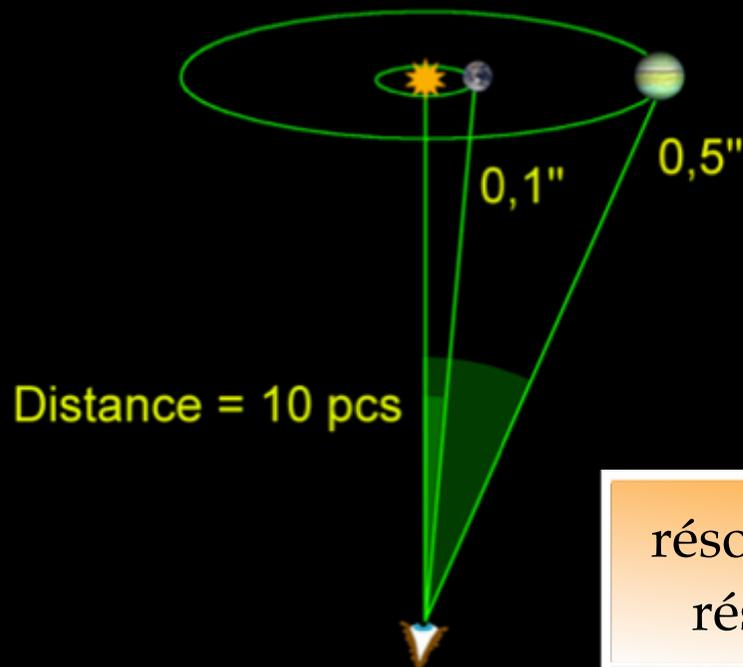


Marley et al, 2007



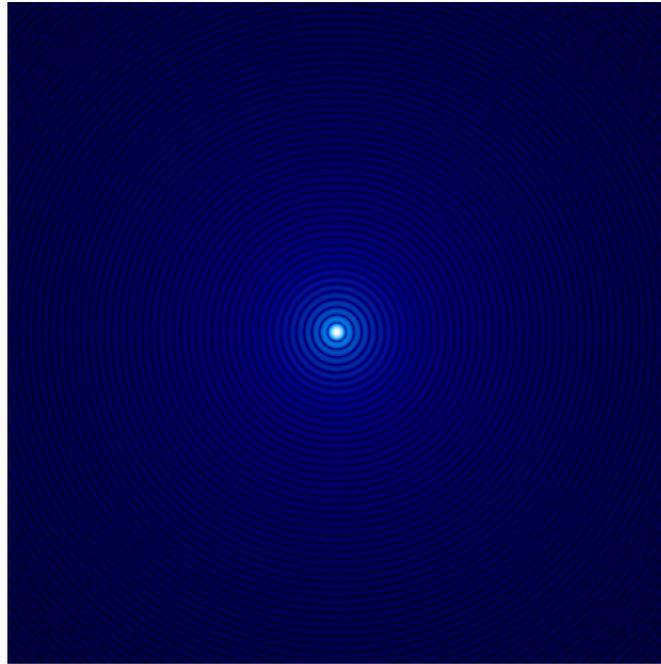
- modèle «cold start»: incluant conditions initiales du core accretion
- planètes jeunes plus faibles

SÉPARATION ANGULAIRE

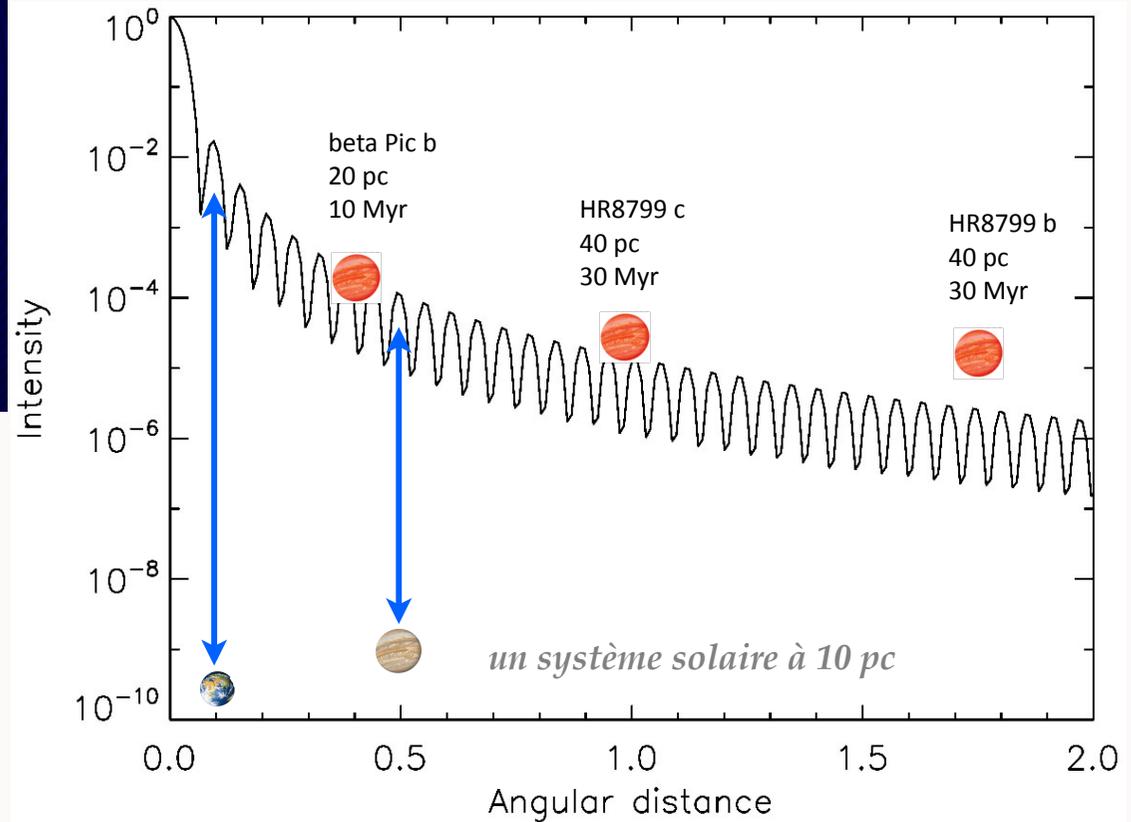


résolution HST : 50mas (visible)
résolution VLT : 40mas (IR)

DIFFRACTION

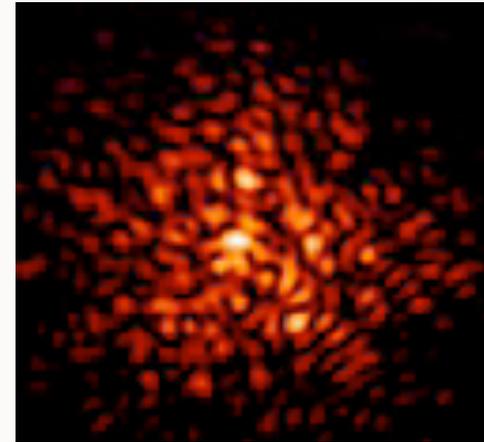
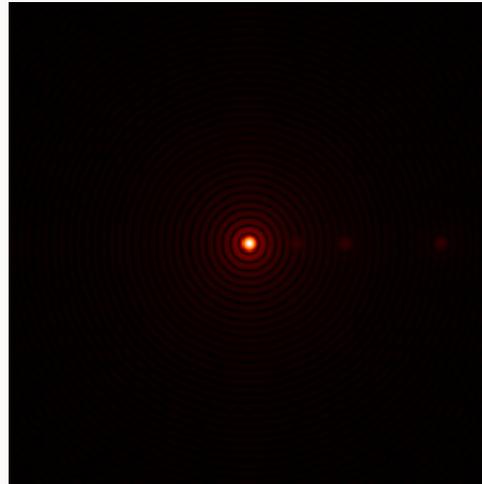


λ/D Limite de diffraction (optique parfaite)

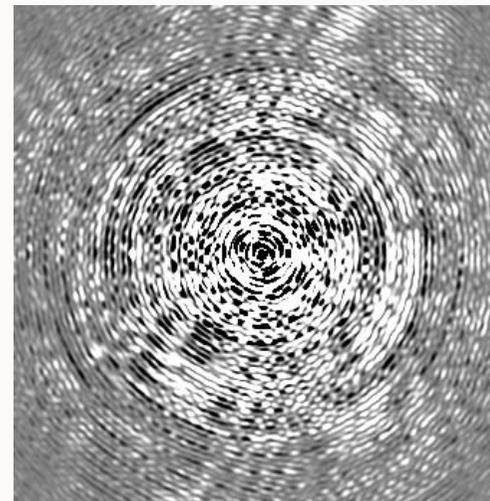
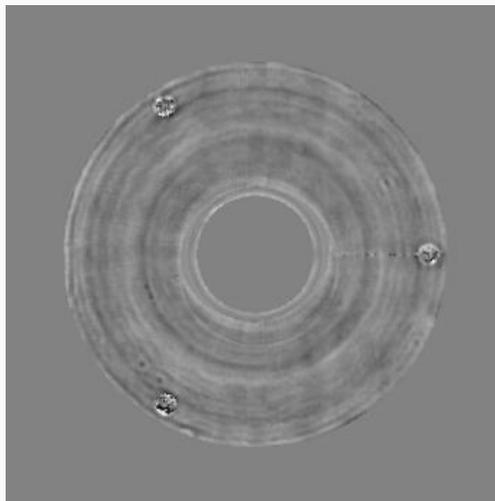


DÉFAUTS OPTIQUES

Sol



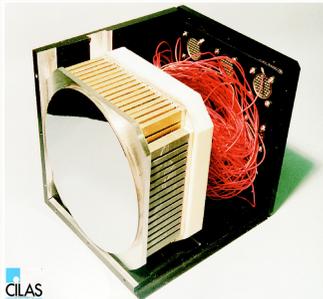
Spatial



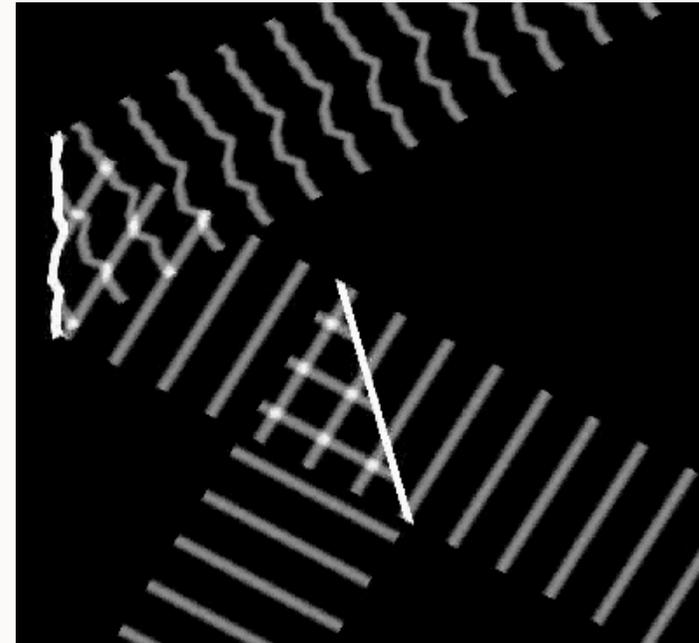
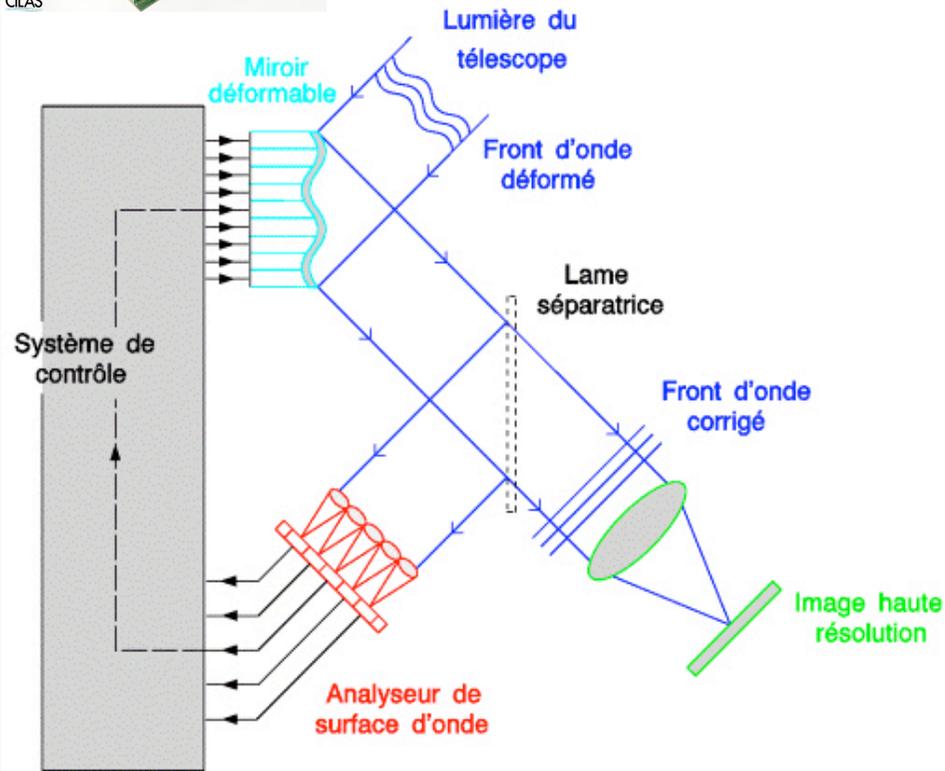
LA BONNE RECETTE

- Pour un instrument d'imagerie haut contraste il faut:
 - **correction du front d'onde**: réduction des défauts de phase (et amplitude).
 - **atténuation de l'étoile** centrale: réduction du bruit de photon stellaire
 - **calibration et/ou traitement** pour réduire les défauts non corrigés

OPTIQUE ADAPTATIVE

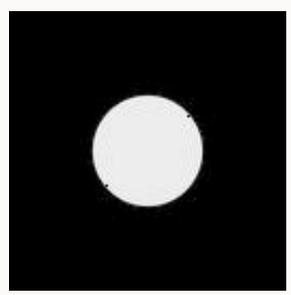
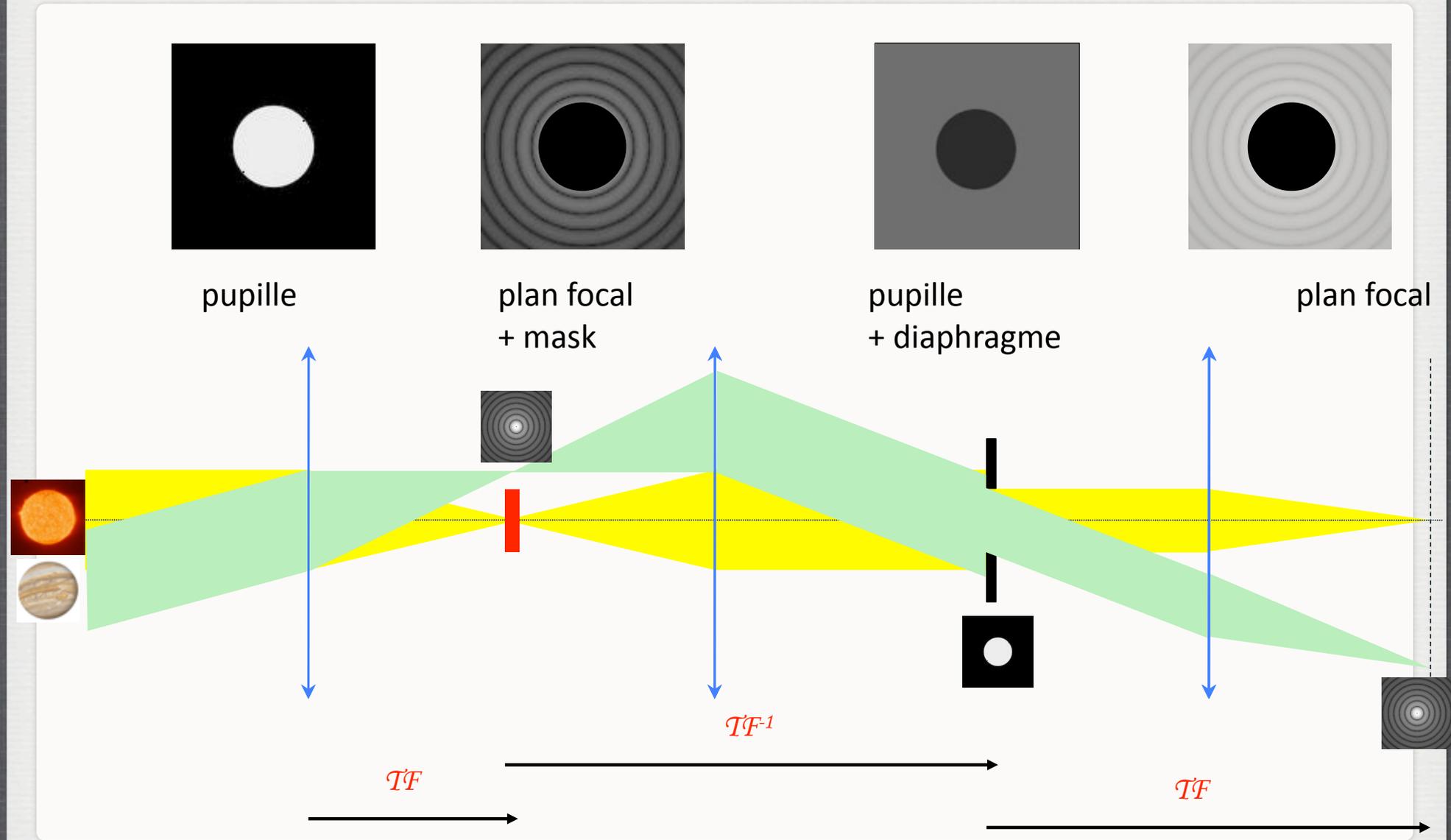


CILAS

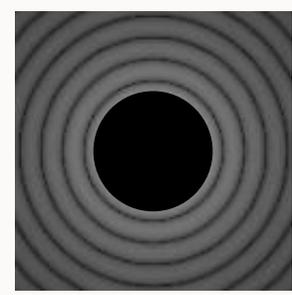


- ✓ Restaure la résolution angulaire théorique
- ✓ Concentre le flux dans un pic de diffraction

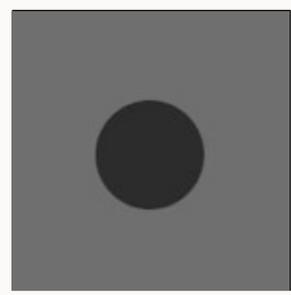
CORONOGRAPHE



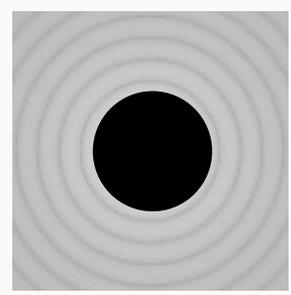
pupille



plan focal
+ mask



pupille
+ diaphragme



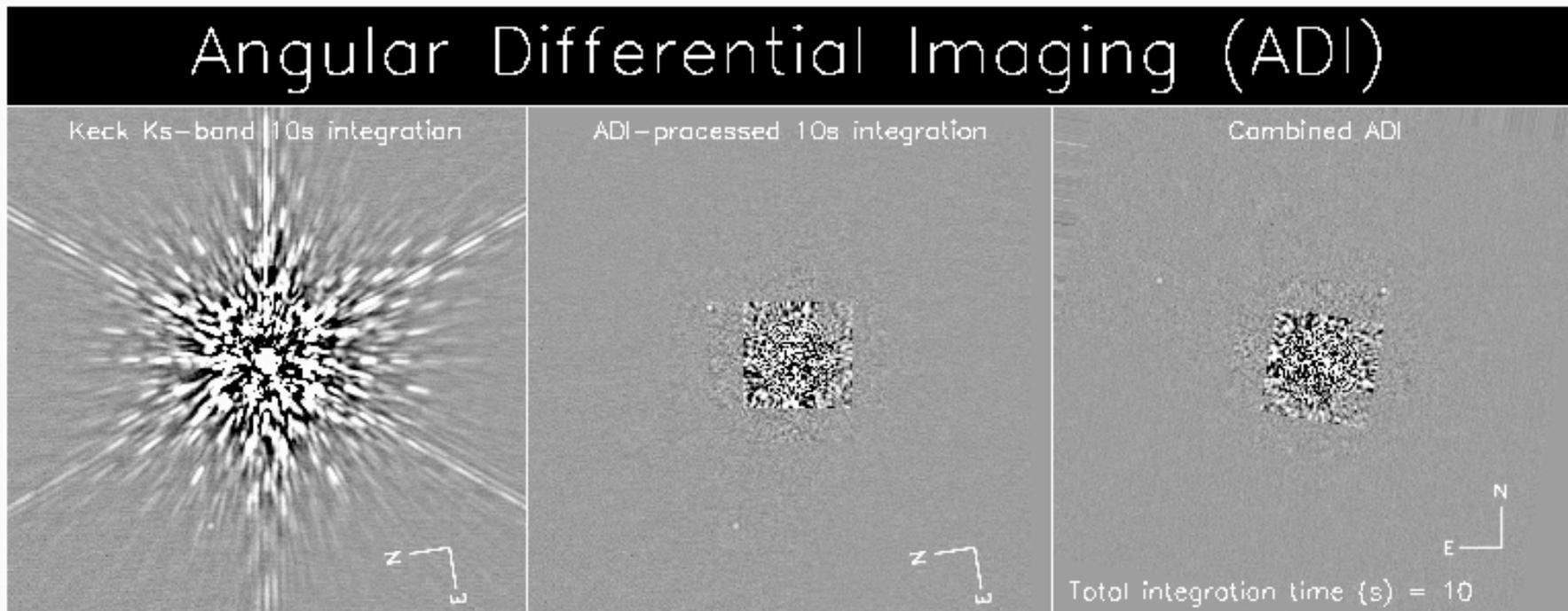
plan focal

IMAGERIE DIFFÉRENTIELLE

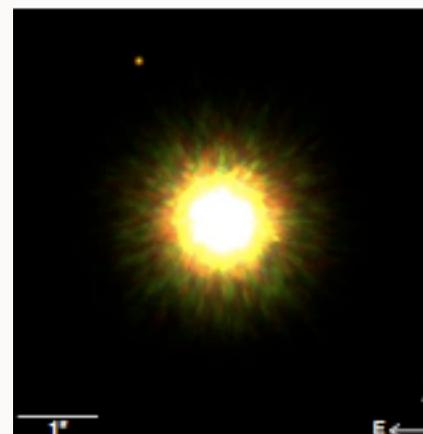
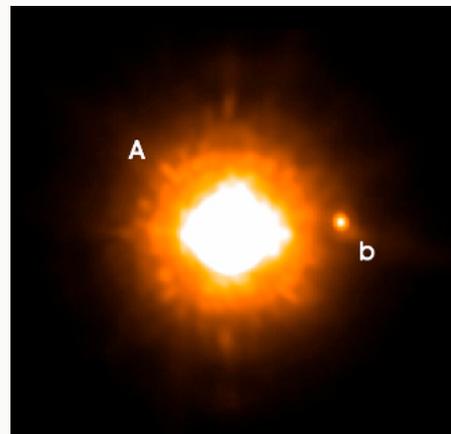
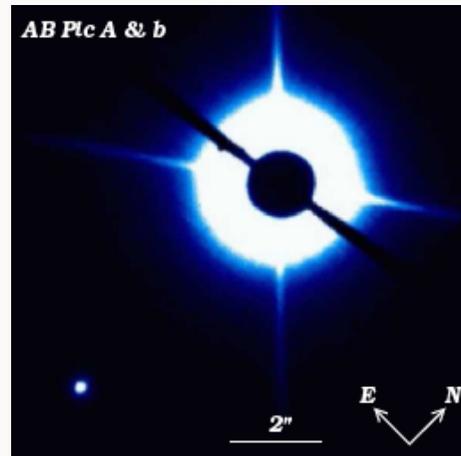
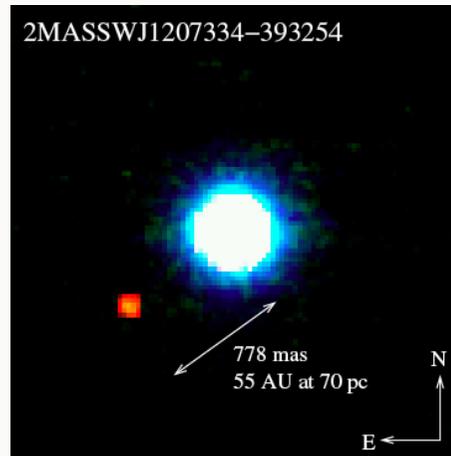
Exploite une «différence» entre l'étoile et la planète

- **spectrale**: 2 ou plusieurs filtres (Marois et al. 2000, Sparks & Ford 2002)
- **polarimétrique**: 2 états de polarisation
- **angulaire**: rotation du champ sur télescope alt-az (Marois et al. 2006)
- **cohérence**: pas d'interférence entre planète et étoile (Baudoz et al. 2005)

Marois et al, 2008



PREMIERS RÉSULTATS



name	Mass (M_J)	Dist (AU)
2M 1207 b	5	46
GQ Lup b	17	100
AB Pic b	14	248
CHRX 73 b	12	210
HN Peg b	16	795
DH Tau b	12	330
RSX 1609 b	8	330

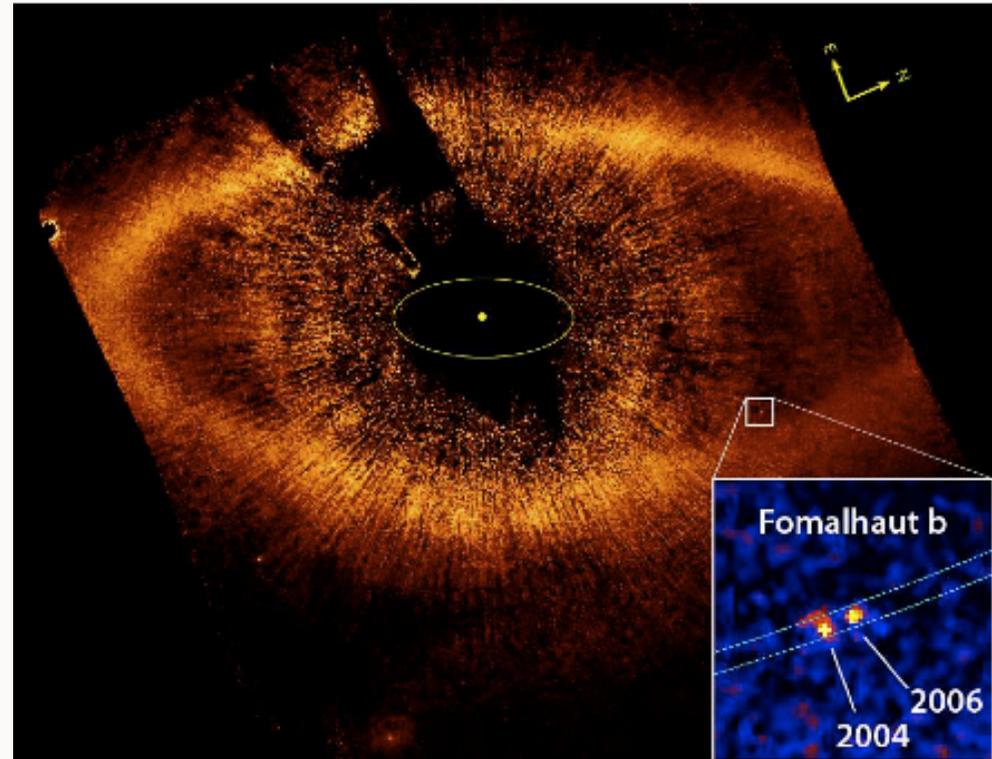
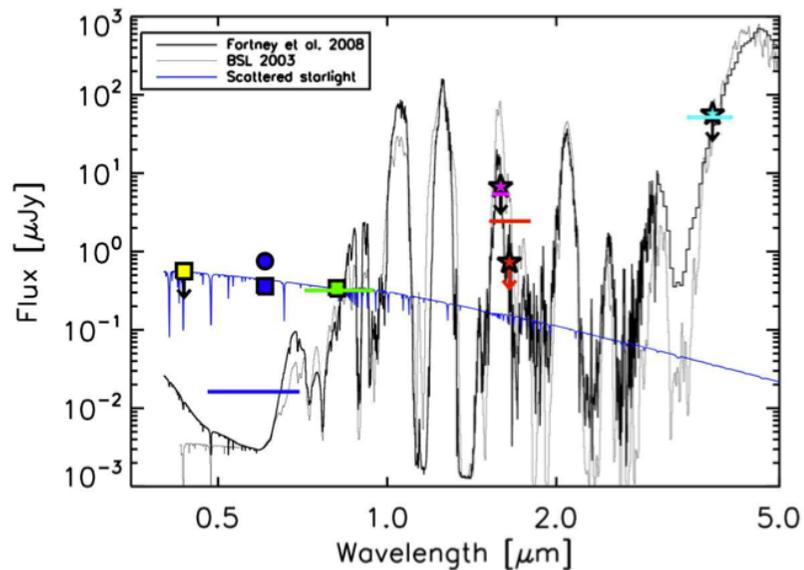
Conditions favorables:

- ✓ petits **rapports de masse** (faible contraste)
- ✓ ages **jeunes** (planètes plus brillantes)
- ✓ **séparations** physique / angulaire grande

Observations en désaccord avec
modèle de Core Accretion
=> instabilités gravitationnelles

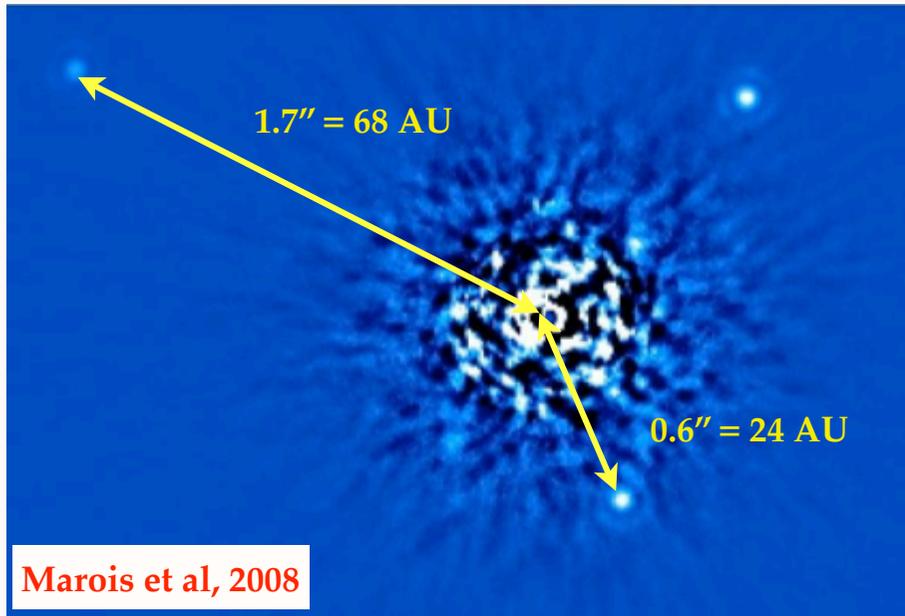
FOMALHAUT b

- Fomalhaut b : 200 Myr
- HST / STIS : 2004, 2006 en visible
- Planète suspectée à partir de la morphologie du disque
- masse limite supérieure = 3 M_J

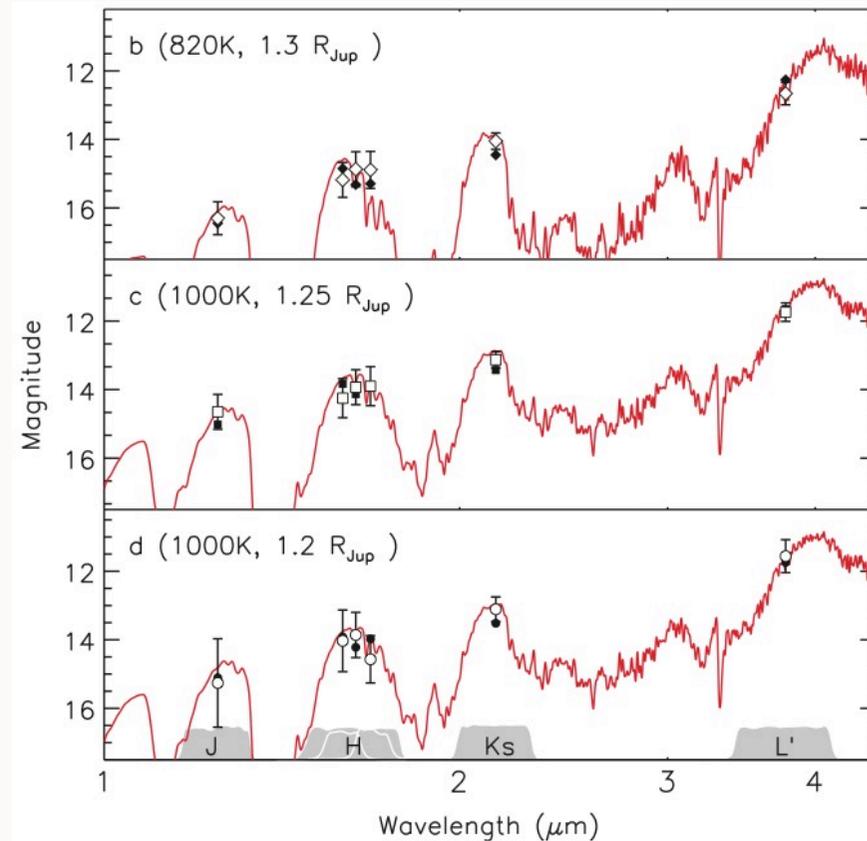
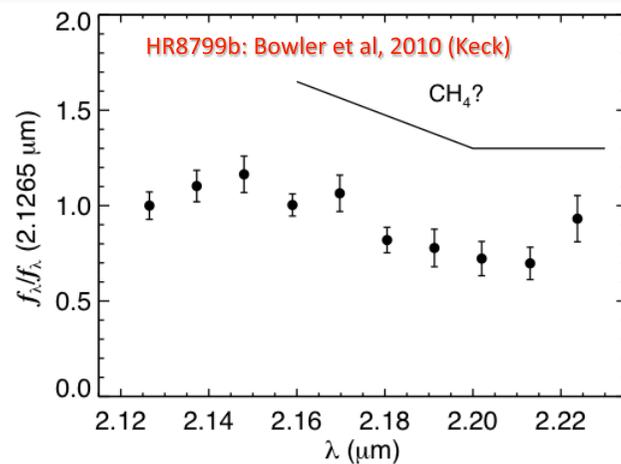


Kalas et al, 2008

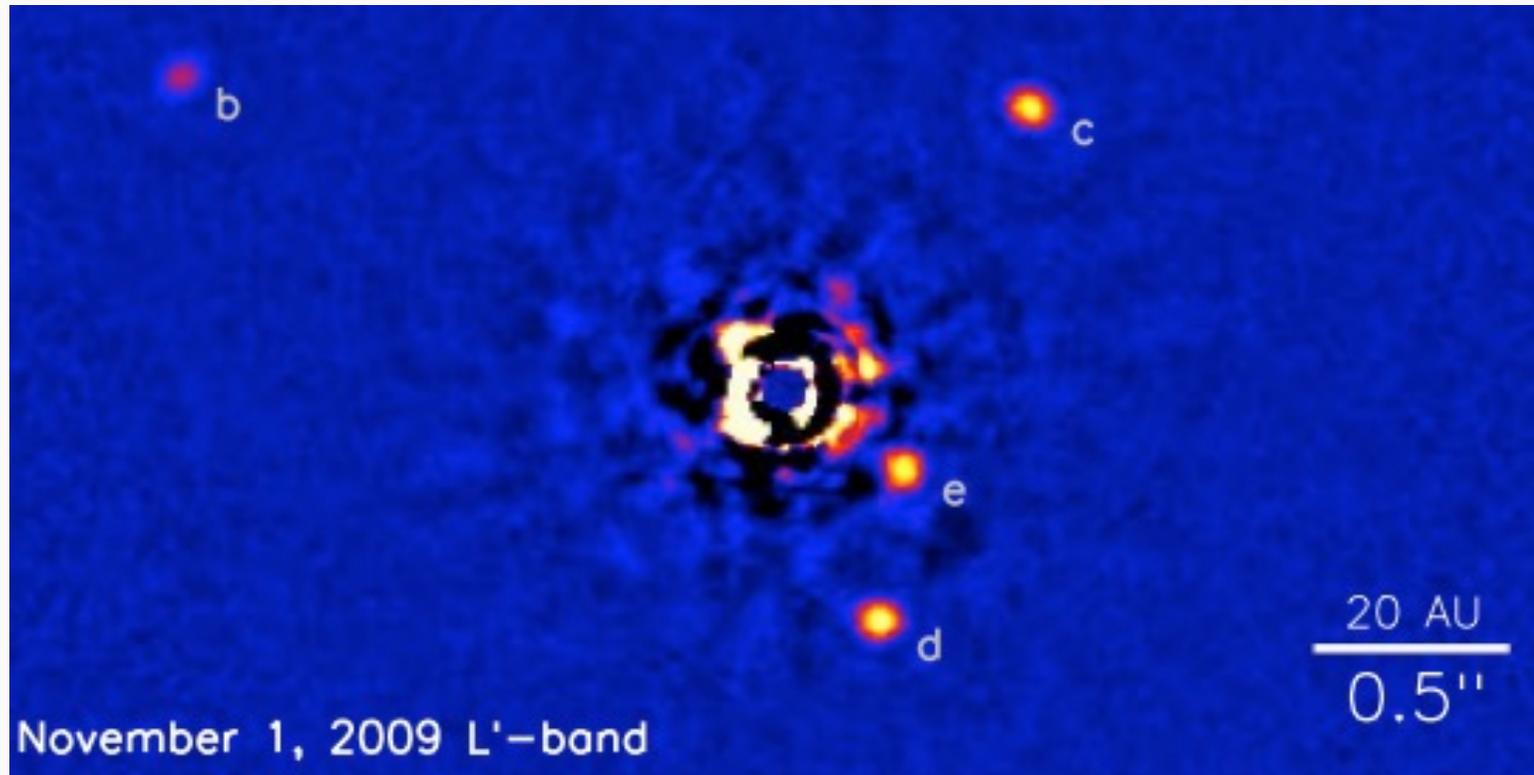
HR8799 bcd ...



HR8799 : 30 Myr
masses : 7, 10, 10 M_{Jupiter}
distance : 24, 38, 68 AU



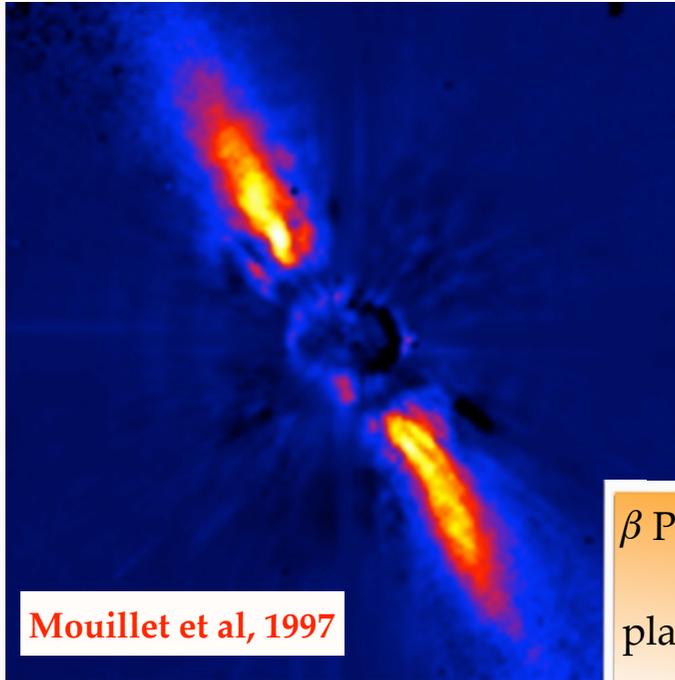
... ET e



Marois et al, 2010

25 publications à referee depuis 2008 !!!

β PICTORIS b



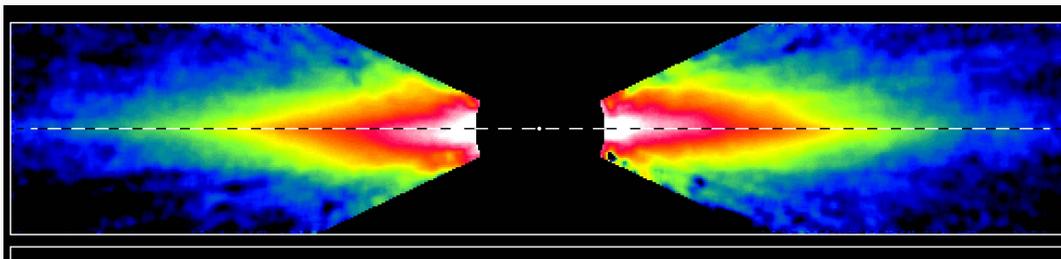
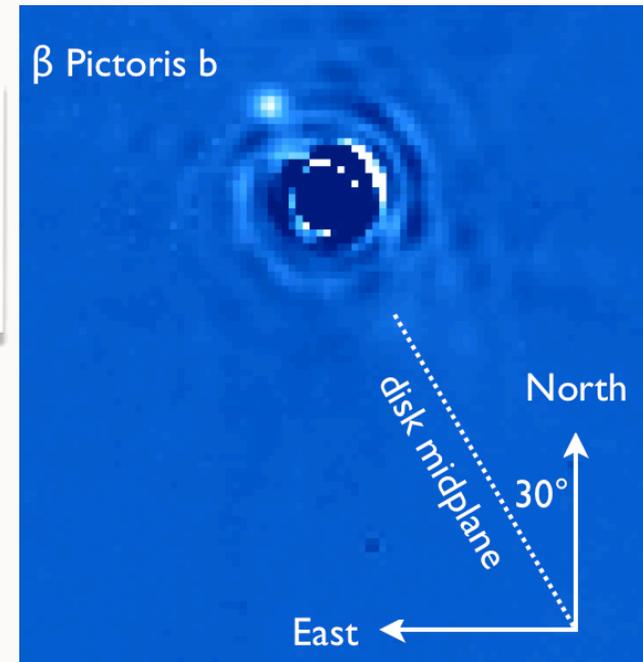
Mouillet et al, 1997



Augereau et al, 2001

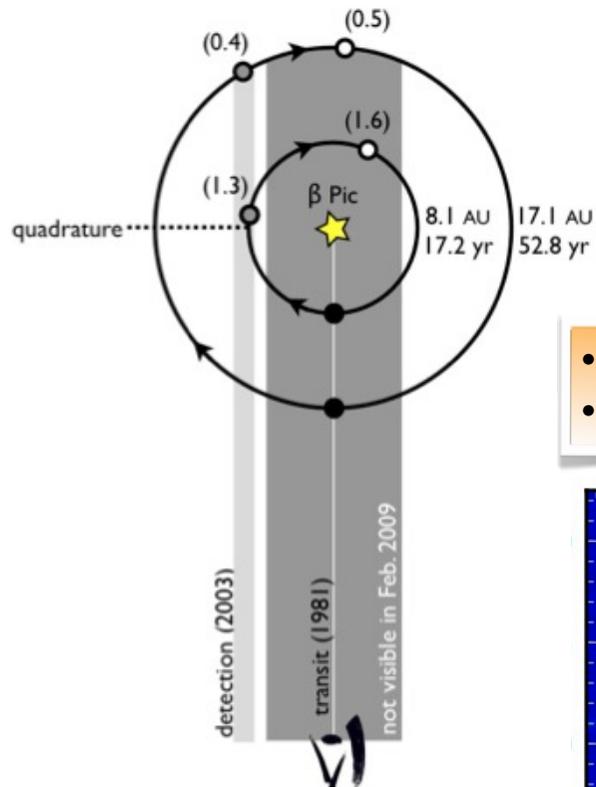
Lagrange et al, 2009

β Pic : 12 Myrs, 20 pc, disque de débris
 planète suspectée depuis 1996

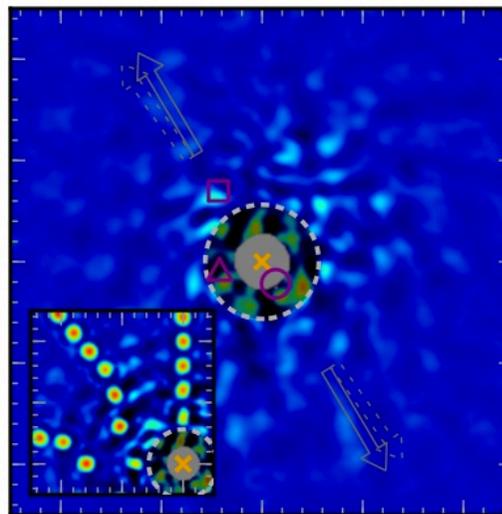


Burrows et al, 1996

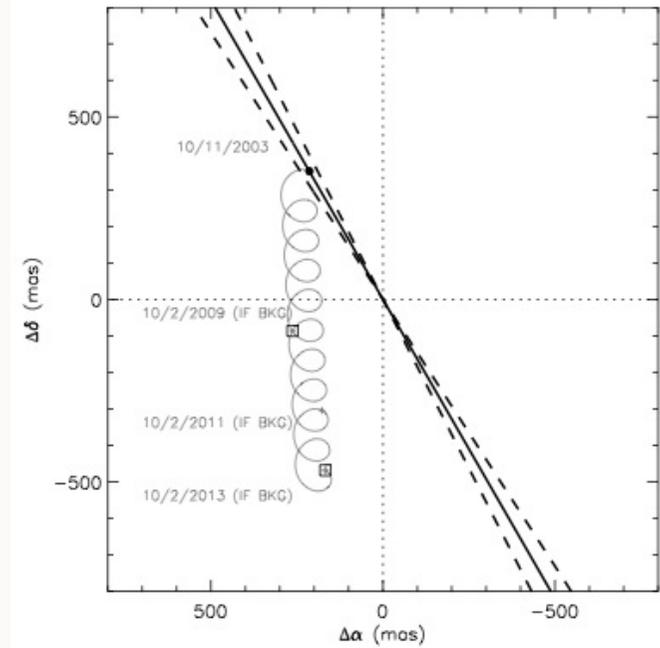
β PICTORIS b



- planète ou étoile de fond ?
- si planète : quelle orbite ?



Lagrange et al, 2009b



Lagrange et al, 2009b

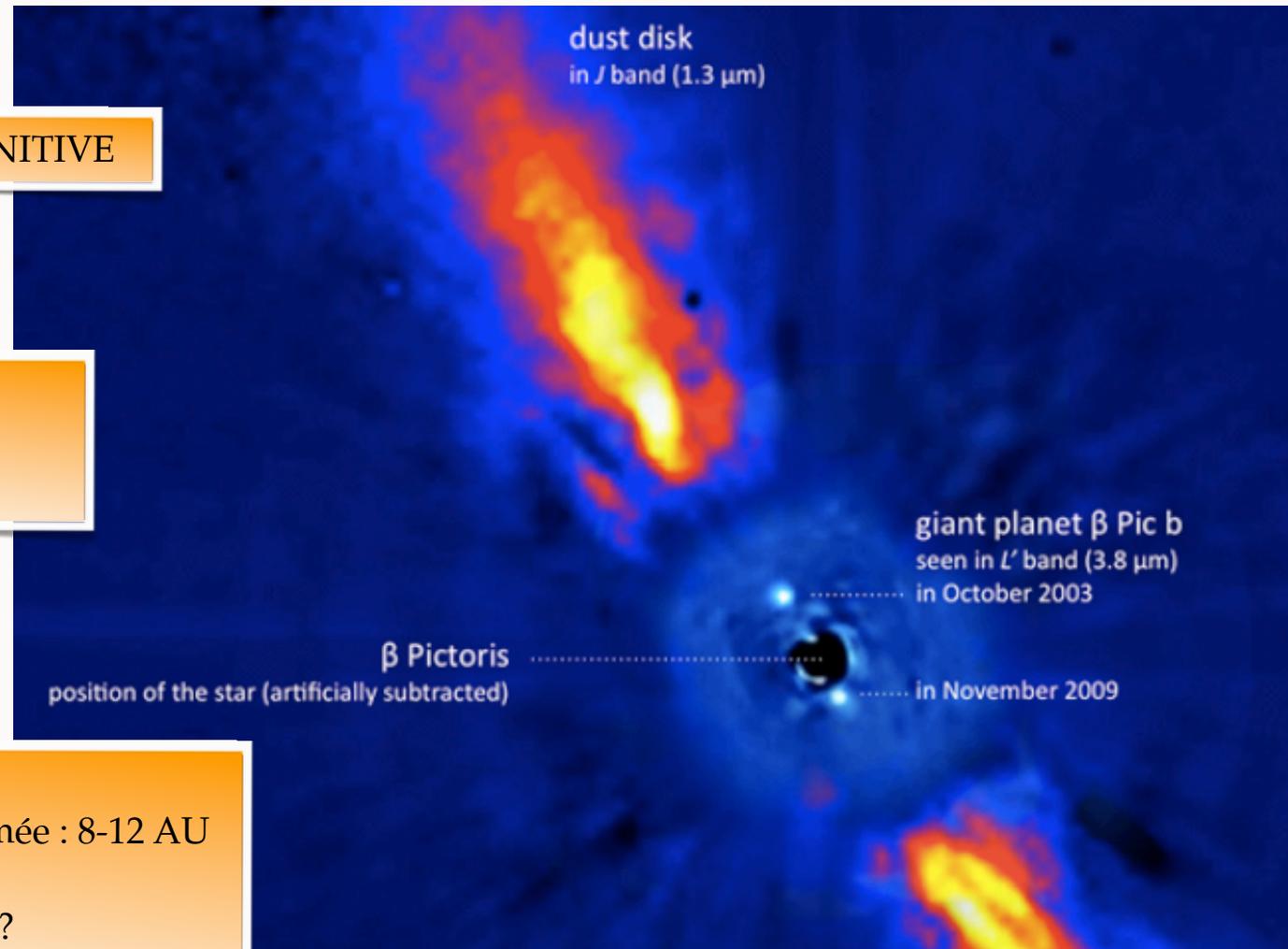
Fitzgerald et al, 2009

β PICTORIS b

CONFIRMATION DEFINITIVE

2003/10 : 0.4" NE
2009/01 : pas détecté
2009/11 : 0.3" SW

Planète dans le disque
petite séparation confirmée : 8-12 AU
production du warp ?
formation par accréation ?
suivi en cours ...

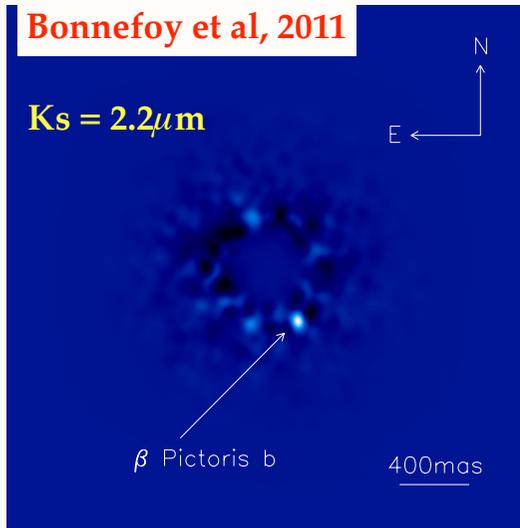


Lagrange et al, 2010

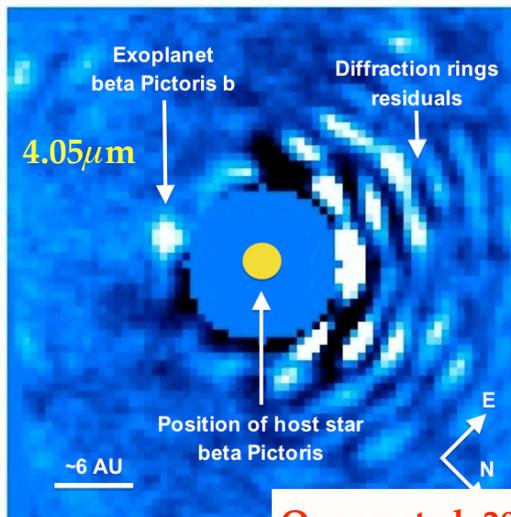
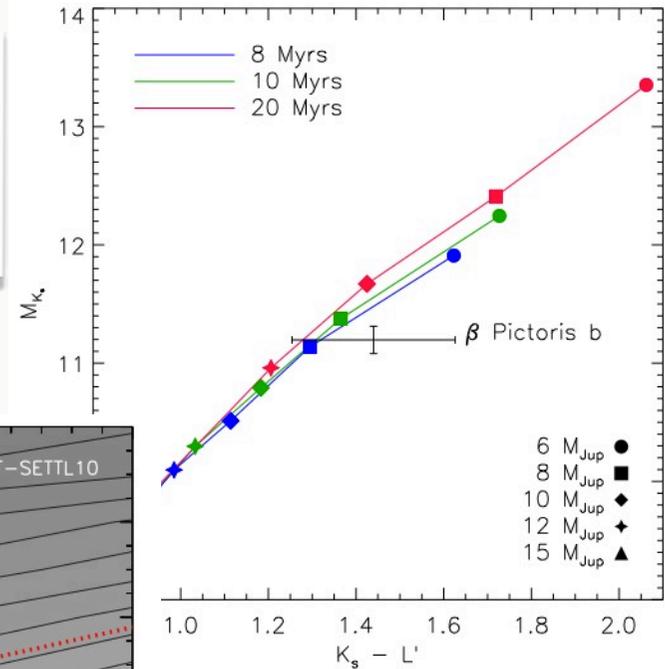
β PICTORIS b

Bonnefoy et al, 2011

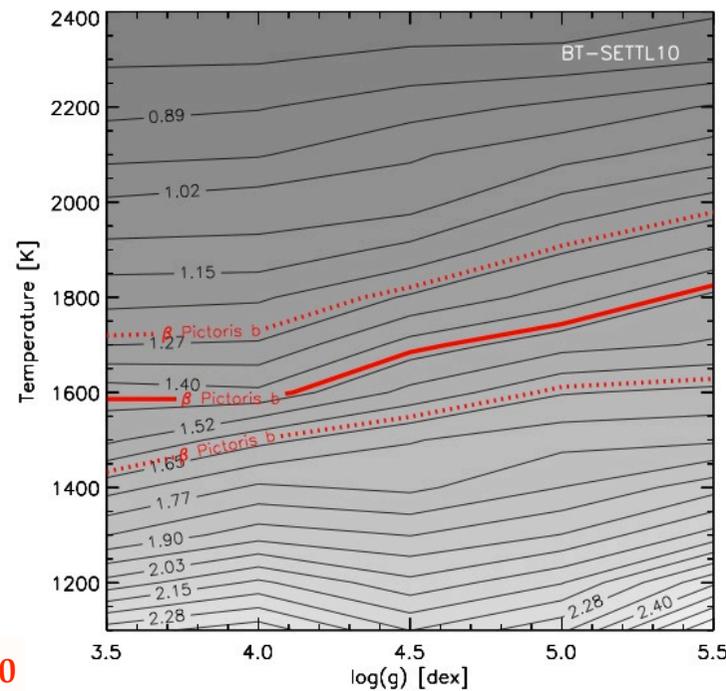
$K_s = 2.2\mu m$



2003/10 : 0.4" NE
2009/01 : pas détecté
2009/11 : 0.3" SW
2010 /03-04 : 0.35" SW



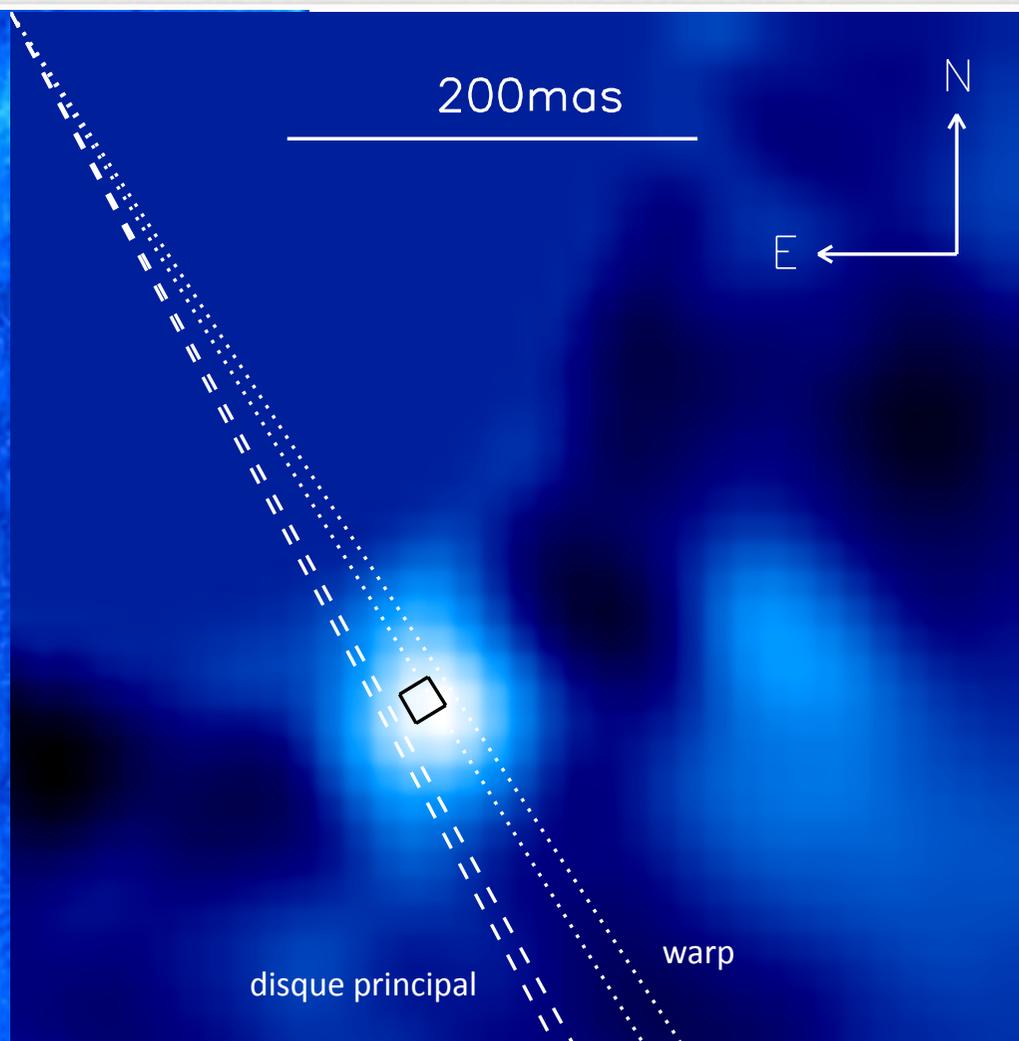
Quanz et al, 2010



Bonnefoy et al, 2011

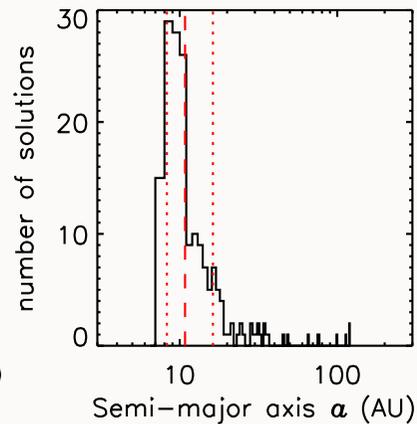
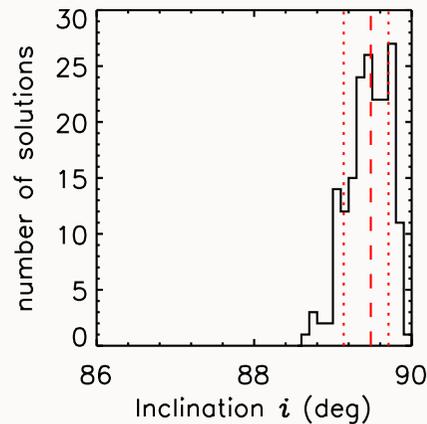
limite dynamique $M_p < 40 M_J$
=> pas compatible avec
modèle «cold start»

β PICTORIS b

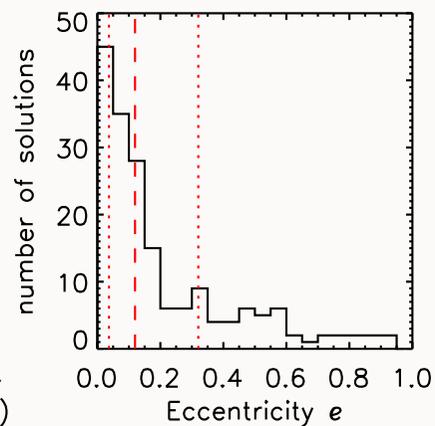
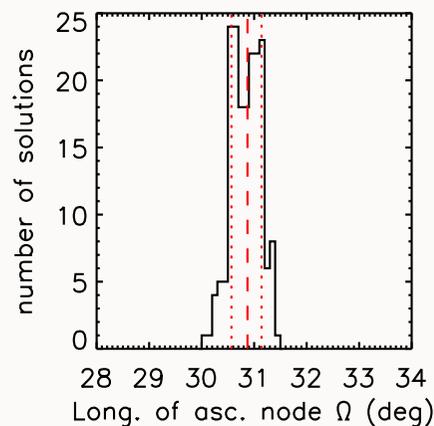


Lagrange et al, 2011 (submitted)

β PICTORIS b

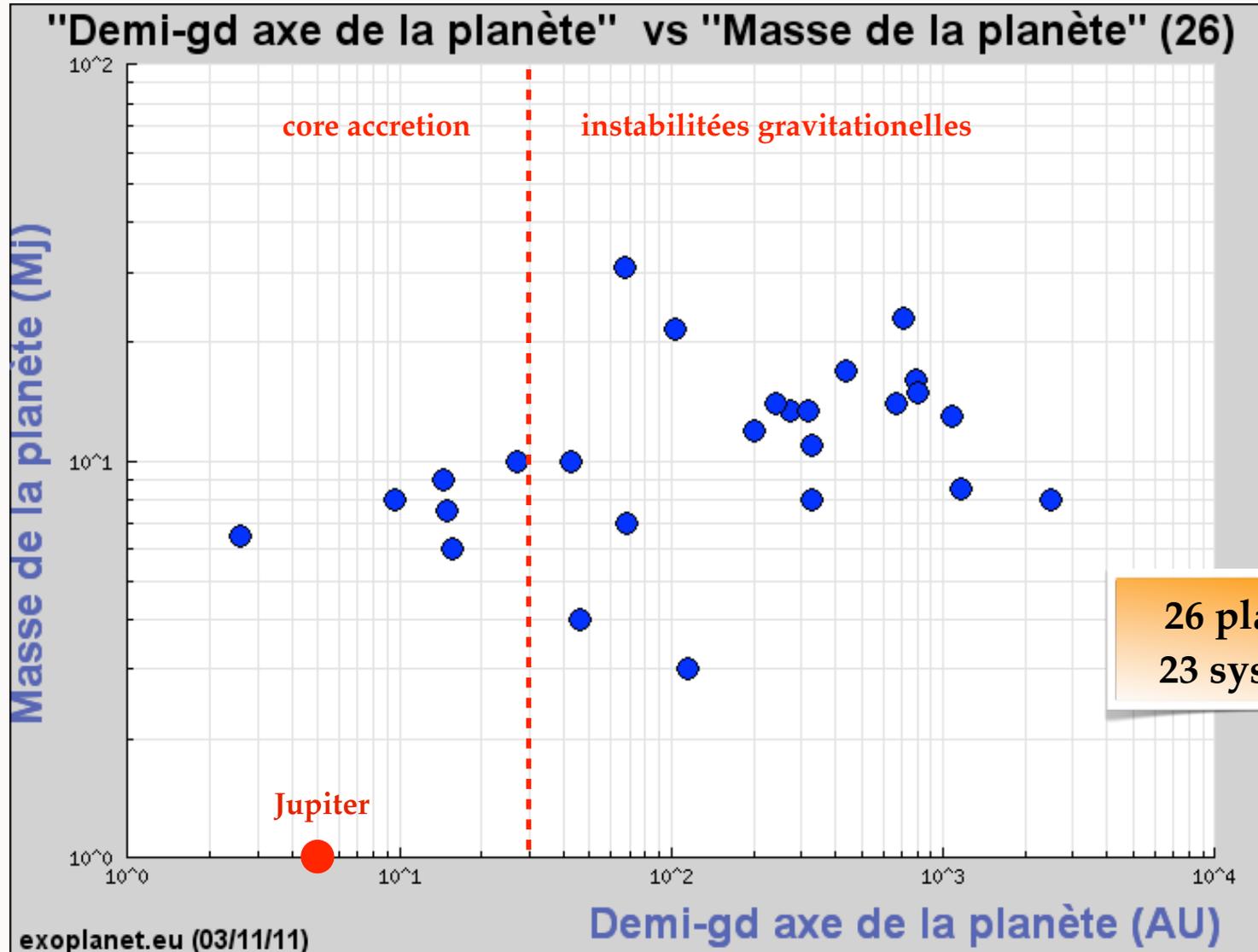


Détermination de l'orbite (MCMC)
5 points - $\chi^2 = 1.75$
confirme $a = 8-9$ AU **Curie et al, 2011**



Nouvelle détermination
9 points (réduction homogène)
 $\chi^2 = 0.75$
Chauvin et al, 2011 (submitted)

ESPACE PARAMÈTRES



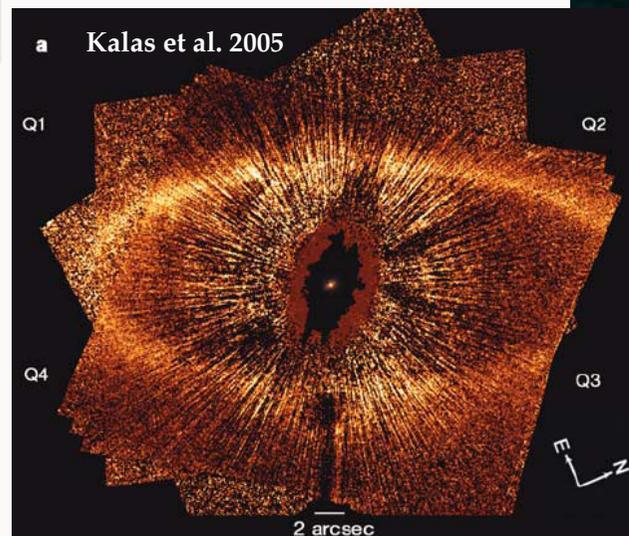
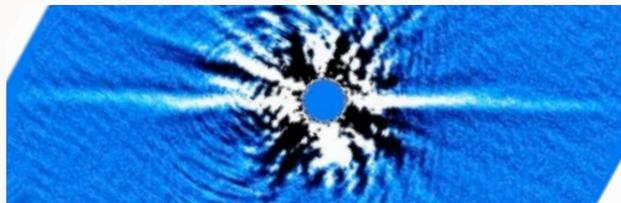
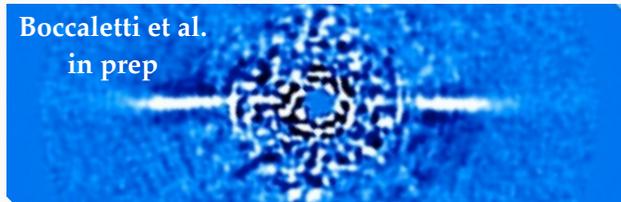
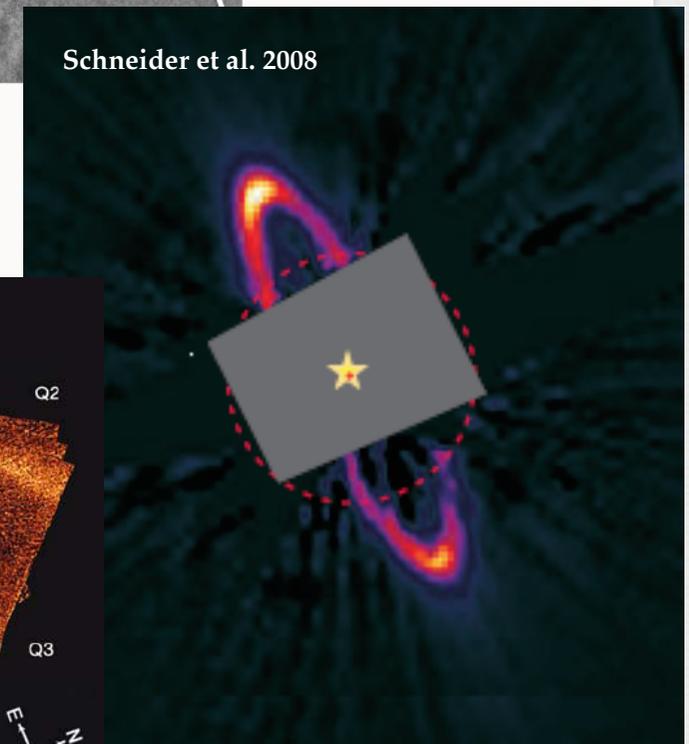
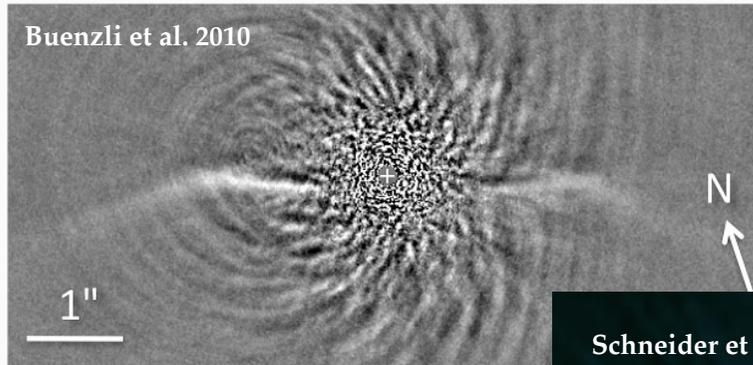
CONNECTION DISQUES - PLANÈTES

présence planètes se traduit par:

- central clearing => ring
- sillons (gaps)
- warp
- asymmetries ...

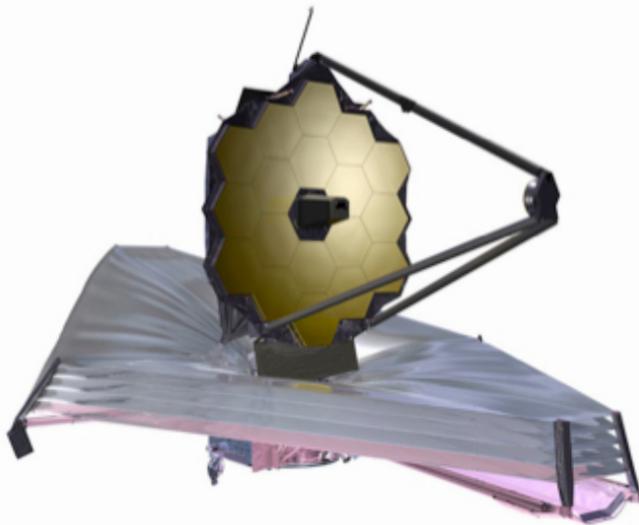
imagerie en lumière diffusée (Vis, Near IR):

- morphology
- propriétés des grains (couleurs)
- présence indirecte de planètes



JAMES WEBB SPACE TELESCOPE

~~2015~~ --> 2018



NIRCAM



instrument US

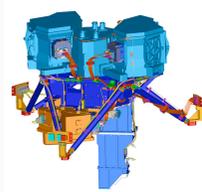
imageur 0.6 - 5 μm

5 coronographes : Lyot 2.2 + 4.8 μm

contraste : $10^5 - 10^6 \Rightarrow$ qcq. masses de Jupiter

photometrie R = 10 - 20

MIRI



instrument EU + US

imageur 5 - 28 μm

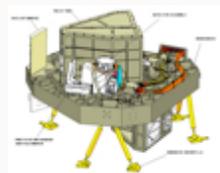
4 coronographes :

4QPMs 10.65 - 11.40 - 15.5 μm + Lyot 23 μm

contraste : $10^4 - 10^5 \Rightarrow$ Jupiter 300 - 400 K

photometrie R = 20

TFI



instrument CSA

imageur 1 - 5 μm

Lyot coronographes + tunable filter

contraste : $10^5 - 10^6 \Rightarrow$ qcq. masses de Jupiter

spectroscopie R = 100

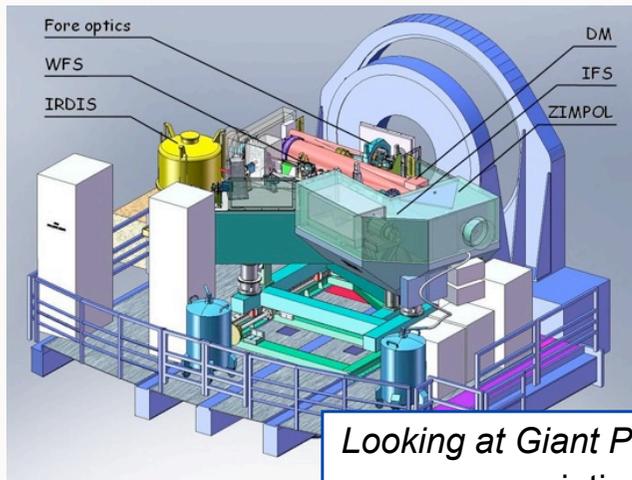
PLANET FINDERS

eXtreme AO + coronagraphy + differential imaging



European Consortium, VLT

- Dual band NIR camera (YJHK)
- NIR IFS (YJH)
- Dual Polarisation VIS camera



Looking at Giant Planets in :

- young associations of stars (10 Myrs <100pc)
- stars with known planets (RV surveys)
- stars of intermediate age (0.1-1 Gyr)
- very nearby bright stars



Japan, Subaru

- Dual band NIR camera
- Dual polarisation NIR camera

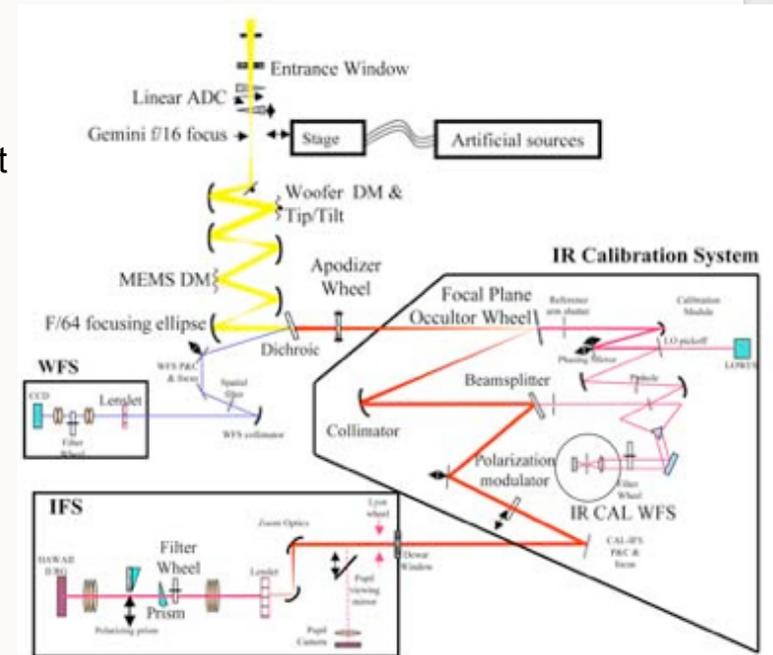
HiCIAO + (in dev., 2012)

- Focal Plane WF
- coronagraph improvement
- NIR IFS



US, Gemini South

- NIR IFS (YJH)
- Focal Plane

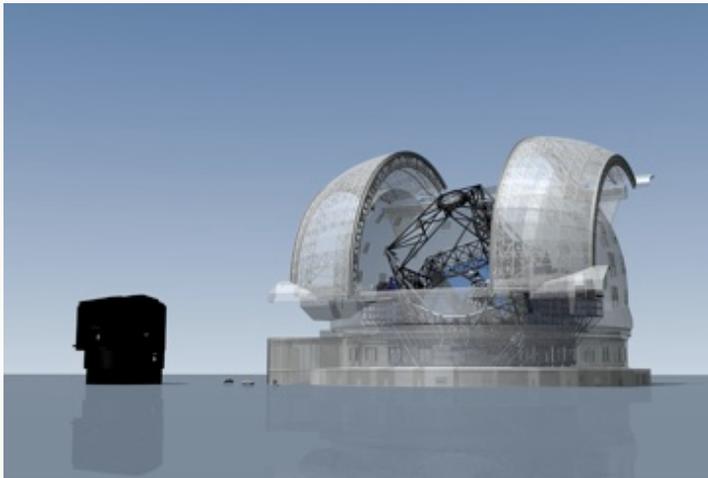


EXTREMELY LARGE TELESCOPES

> 2020

VERS :

- la détection Terres / Super Terres
- la caractérisation Géantes / Super Terres matures



3 grands projets :

- TMT (Thirty Meter Telescope, US), 30m - Hawaii
- GMT (Giant Magellan Telescope, US), 25m - Chili
- E-ELT (European Extremely Large Telescope), 42m - Chili

E-ELT

- CODEX: spectro optique haute résolution
- EPICS: imageur haut contraste
- HARMONI: spectro-intégral de champ
- METIS: imageur / spectro mid IR

TMT

- HROS: spectro optique haute résolution
- NIRES: spectro échelle nearIR
- PFI: imageur haut contraste

SPATIAL À LONG TERME ...

> 20??

VERS :

- la caractérisation Géantes matures
- la caractérisation Terres / Super Terres matures

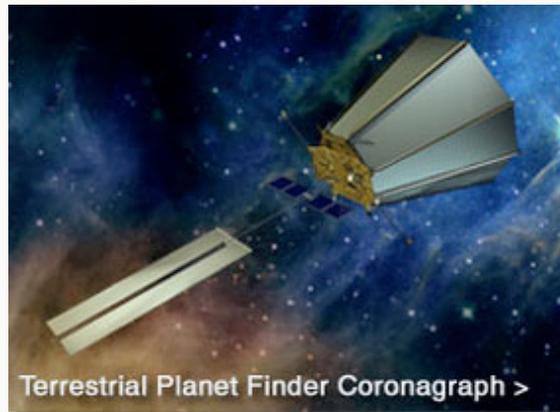


Petits télescopes 1.5-2 m optimisés Haut Contraste
ACCESS (Trauger et al.)
PECO (Guyon et al.)
SPICES (Boccaletti et al.)



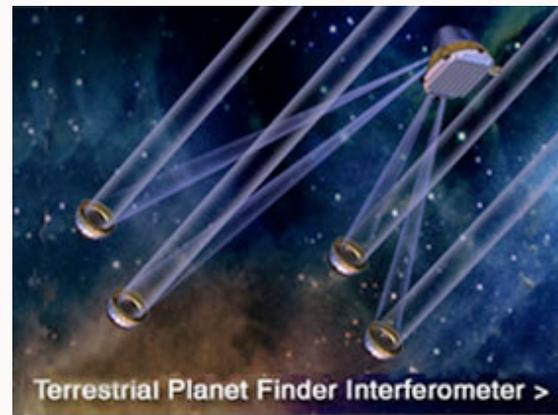
Occulteur externe + Tel 3-4 m
NWO (Cash et al.), THEIA (Kasdin et al.), FRESNEL (Koechlin et al.)

VIS



Terrestrial Planet Finder Coronagraph >

Télescopes 4-6 m optimisés Haut Contraste
TPF - C



Terrestrial Planet Finder Interferometer >

mid IR

Interféromètres 50-100 m optimisés nulling
TPF-I, DARWIN

TOUT SAVOIR SUR LES EXOPLANÈTES !!!

L'Encyclopédie des Planètes Extrasolaires

Depuis Février 1995

Accueil Catalogue interactif Bibliographie Recherche Conférences Autres Sites 

[Jean Schneider](#) CNRS/LUTH - Observatoire de Paris

L'URL est exoplanet.eu

Jean Schneider (LUTH)

Mise à jour : 28 Mars 2011

Dernières nouveautés :

- 02 Février : 6 planètes en transit devant l'étoile [Kepler-11](#) (Lissauer et al.)
- 06 Juillet : [Nouvelle confirmation](#) de la planète β Pic b au VLT (Quanz et al.)
- 29 Juin : [CoRoT-7d](#): un troisième compagnon pour [CoRoT-7](#) ? (Hatzes et al.)

[Archives des nouveautés](#)

[Panorama des méthodes de détection et Vulgarisation](#)

Mise à jour : 11 Décembre 2010

[Catalogue interactif](#)

[lisez-moi](#)

Mise à jour : 28 Mars 2011 539 planètes

[Détections: programmes en cours et projets](#)

Mise à jour : 05 Mars 2011

[Bibliographie](#)

Mise à jour : 28 Mars 2011

[Conférences \(Programmes, Abstracts, ...\)](#)

Mise à jour : 24 Mars 2011

[Planètes Habitables](#)

Mise à jour : 12 Juillet 2004

[Illustrations](#)

Mise à jour : 29 Mars 2005

[Théories](#)

Mise à jour : 13 Novembre 2009

[Autres sites relevant des planètes extrasolaires](#)

Mise à jour : 20 Janvier 2011

C'EST
TOUT
POUR
AUJOURD'
HUI

