



Les planètes extrasolaires



Marc OLLIVIER

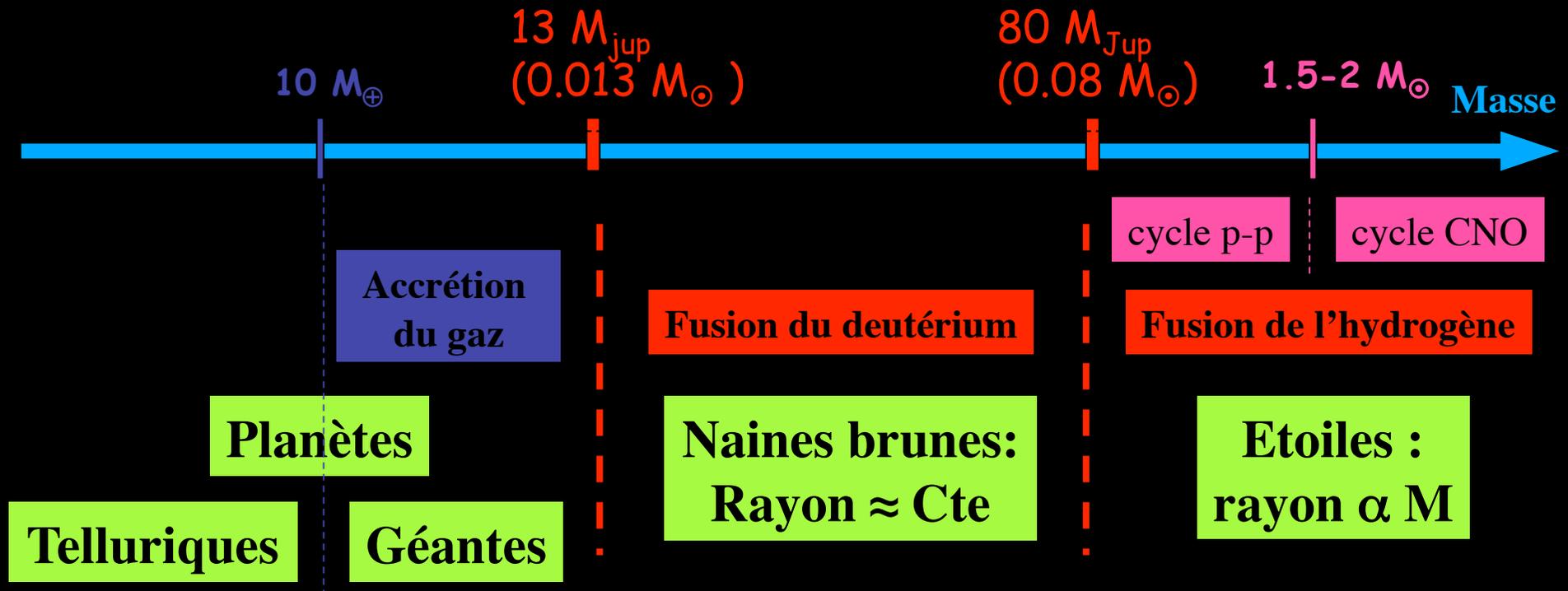
Institut d'Astrophysique Spatiale
d'Orsay



Etoile ou planète ?

Physique gouvernée principalement par la masse des objets

- Gravitation
- Processus nucléaires



Planète : impossibilité de fusionner le deutérium



La diversité des exosystèmes



Un peu d'histoire... 1 : L'ère des intuitifs

- Epicure (~ -300) : Adresse à Hérodote

"Ce n'est pas seulement le nombre des atomes, c'est celui des mondes qui est infini dans l'Univers. Il y a un nombre infini de mondes semblables au nôtre et un nombre infini de mondes différents [...] On doit admettre que dans tous les mondes, sans exception, il y a des animaux, des plantes, et tous les êtres que nous observons [...]"

- Giordano Bruno (1600) : L'infini, l'Univers et les mondes

- Huygens (1629-1695) :

"N'hésitons pas, nous, à admettre avec les principaux Philosophes de notre temps, que la nature des étoiles et celle du Soleil est la même. D'où résulte une conception du monde beaucoup plus grandiose que celle qui correspond aux vues antérieures plus ou moins traditionnelles. Car qu'est-ce qui empêche maintenant de penser que chacune de ces étoiles ou Soleils a des Planètes autour d'elle et que ces planètes à leur tour sont pourvues de Lunes ?"



Un peu d'histoire : 2 : l'ère des observateurs

1931 Berman : $m = 45M_j$

1960 Van de Kamp : étoile de Barnard

1981 β pictoris

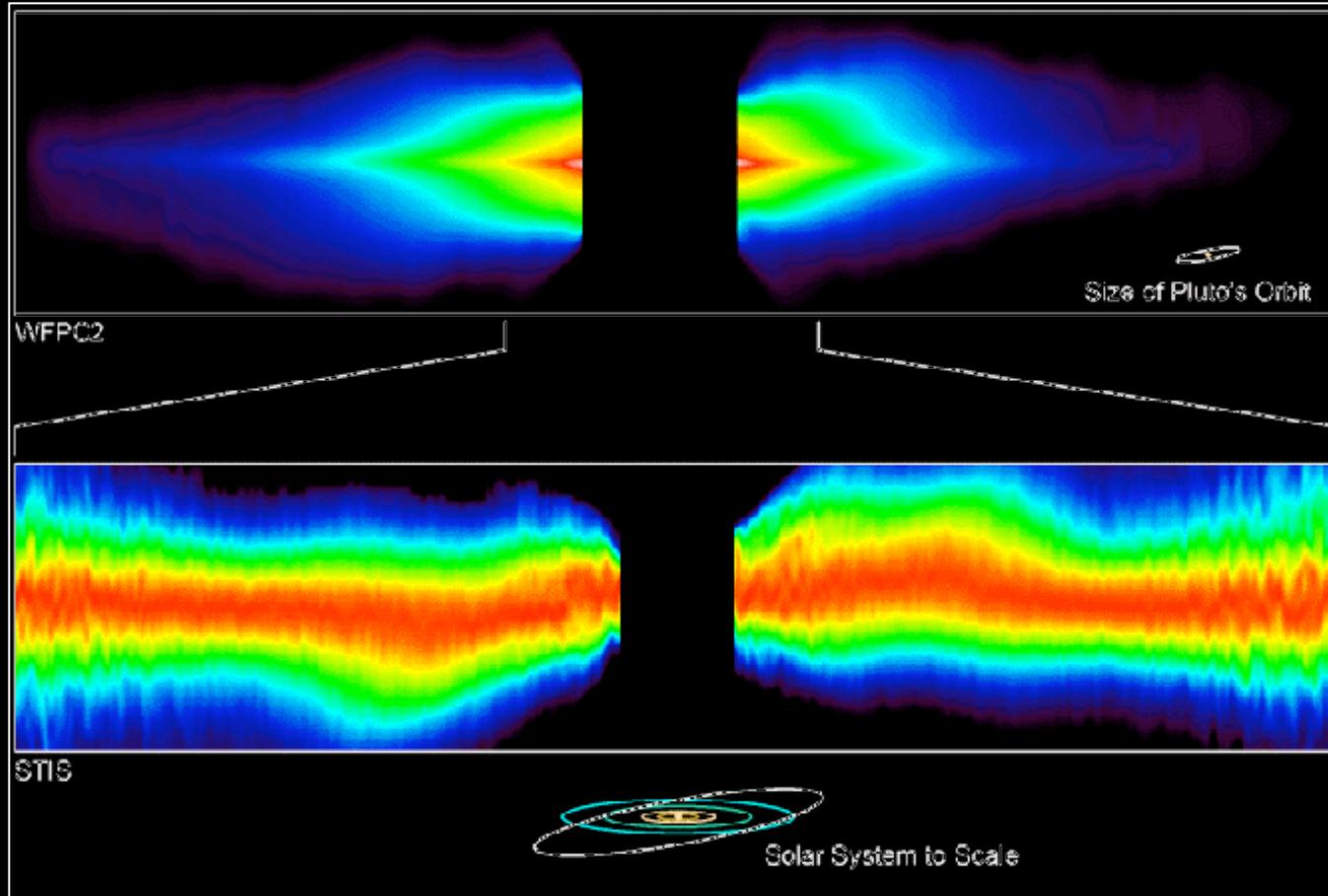
1985 Mc Carthy et al. : Van Biesbroeck 8 B

1992 Wolszczan : PSR 1257 +12

1995 Walker : rien en dessus de 3 M_j autour de 21 étoiles

1995 Mayor et Queloz : 51 Pégase

β Pictoris





Des planètes par dizaines

22/01/2009

Plusieurs milliers d'étoiles surveillées en vitesse radiale :

Une vingtaine de programmes de recherche de transits au sol et espace

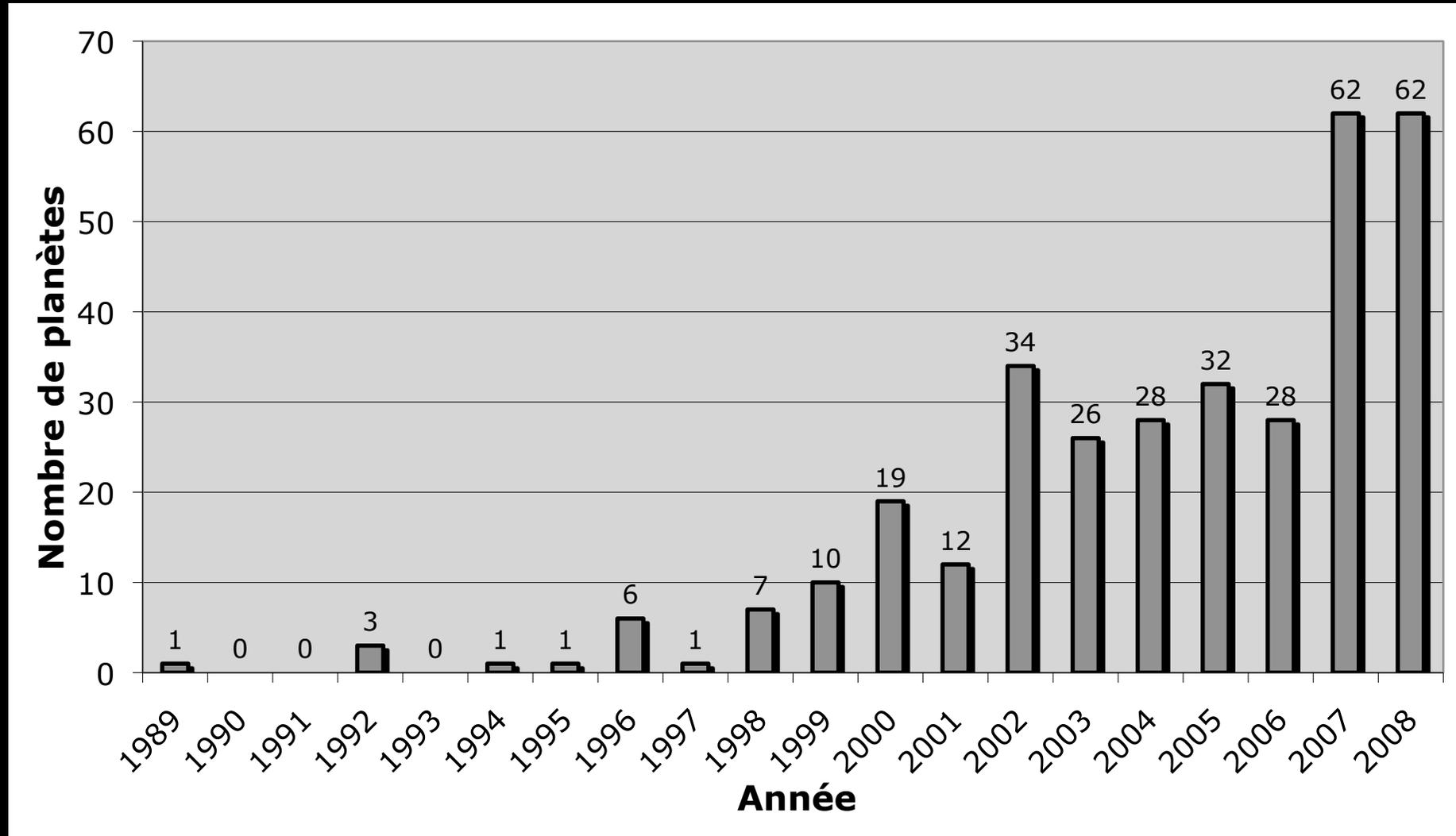
Par transits et microlentilles gravitationnelles

- 285 systèmes planétaires
- 335 planètes (>300 par mesure de la vitesse radiale)
- 35 systèmes multiples : 23 doubles, 10 triples, 1 quadruple, 1 quintuple

<http://exoplanet.eu/>



Taux de découvertes





Des planètes partout

- Autour des étoiles de toutes tailles
 - Type solaire : ex HD 209458 (G0V)
 - Géantes : ex HD 47536 (K1 III : 23.5 R \odot)
 - Naines : ex Gl 581 (M4)
- Autour des étoiles en fin de vie
 - Pulsar : ex PSR 1257+12
 - Naines blanches : ex V 391 (naine SdB)
- Autour des objets jeunes : ex 2MASS 1207 (naine brune 5 Mans)
- Dans les systèmes en formation : ex Fomalhaut
- Dans les disques de débris : ex Béta Pic



Des systèmes complexes

ex : 55 Cancri : G8, 1.15 R_{\odot} , 13.4 pc

Planet	$m(m_{Jup})$	$a(u.a)$	$p(j)$
e	0.034	0.038	2.817
b	0.824	0.115	14.65
c	0.169	0.24	44.34
f	0.144	0.781	260
d	3.835	5.77	5218

ex : Gl 581 : M3, 0.38 R_{\odot} , 6.26 pc

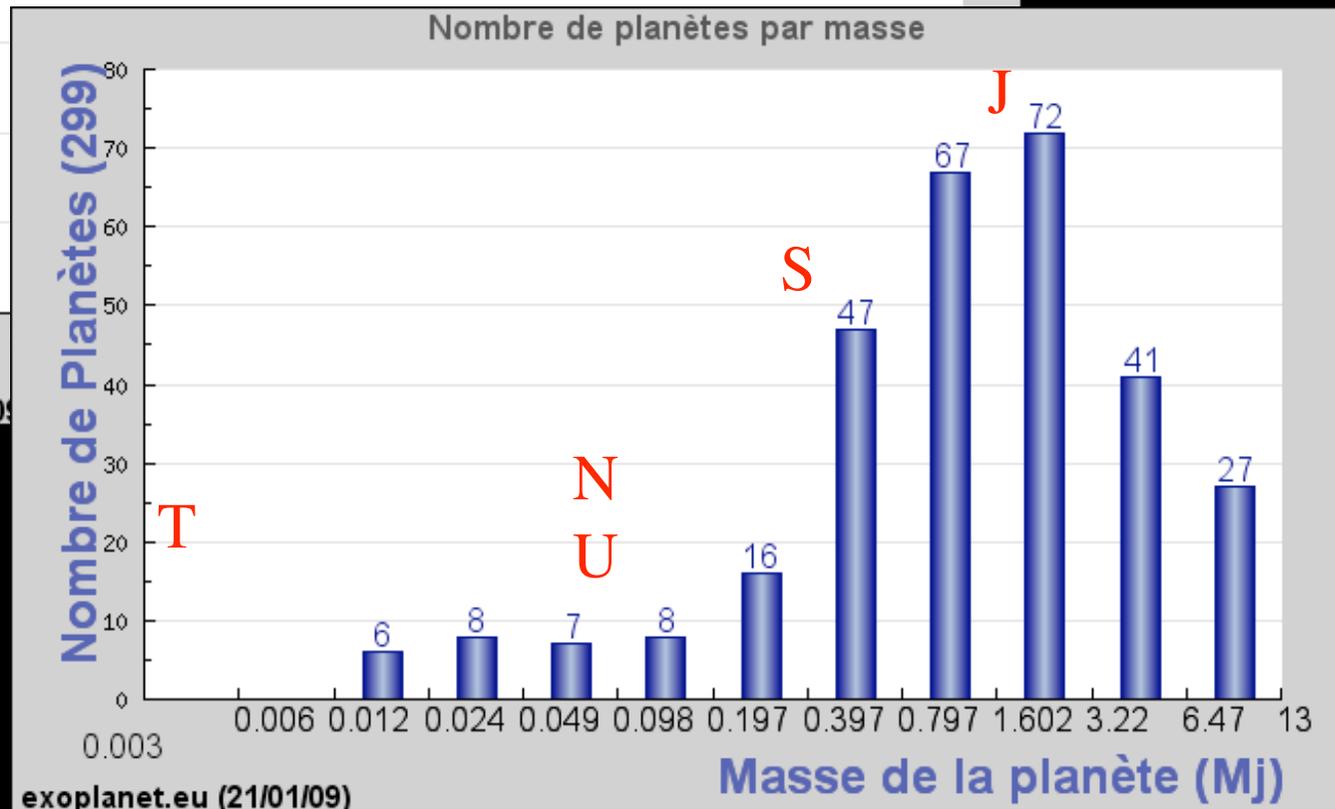
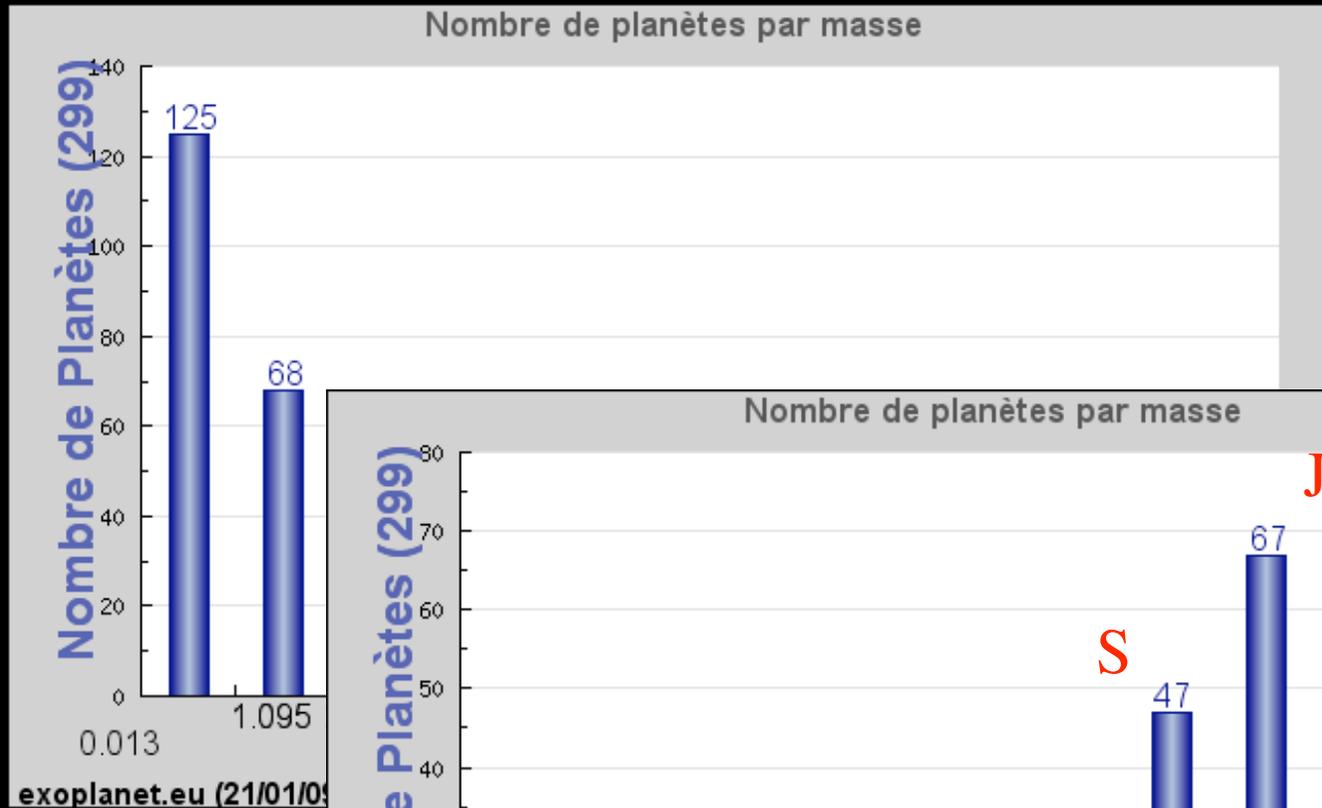
Planet	$m(m_{\oplus})$	$a(u.a)$	$p(j)$
b	15.64	0.041	5.368
c	5.02	0.073	12.93
d	7.72	0.25	83.6

ex : PSR1257 +12 : pulsar

Planet	$m(m_{\oplus})$	$a(u.a)$	$p(j)$
b	0.015	0.19	25.34
c	3.4	0.36	66.54
d	2.8	0.47	98.22

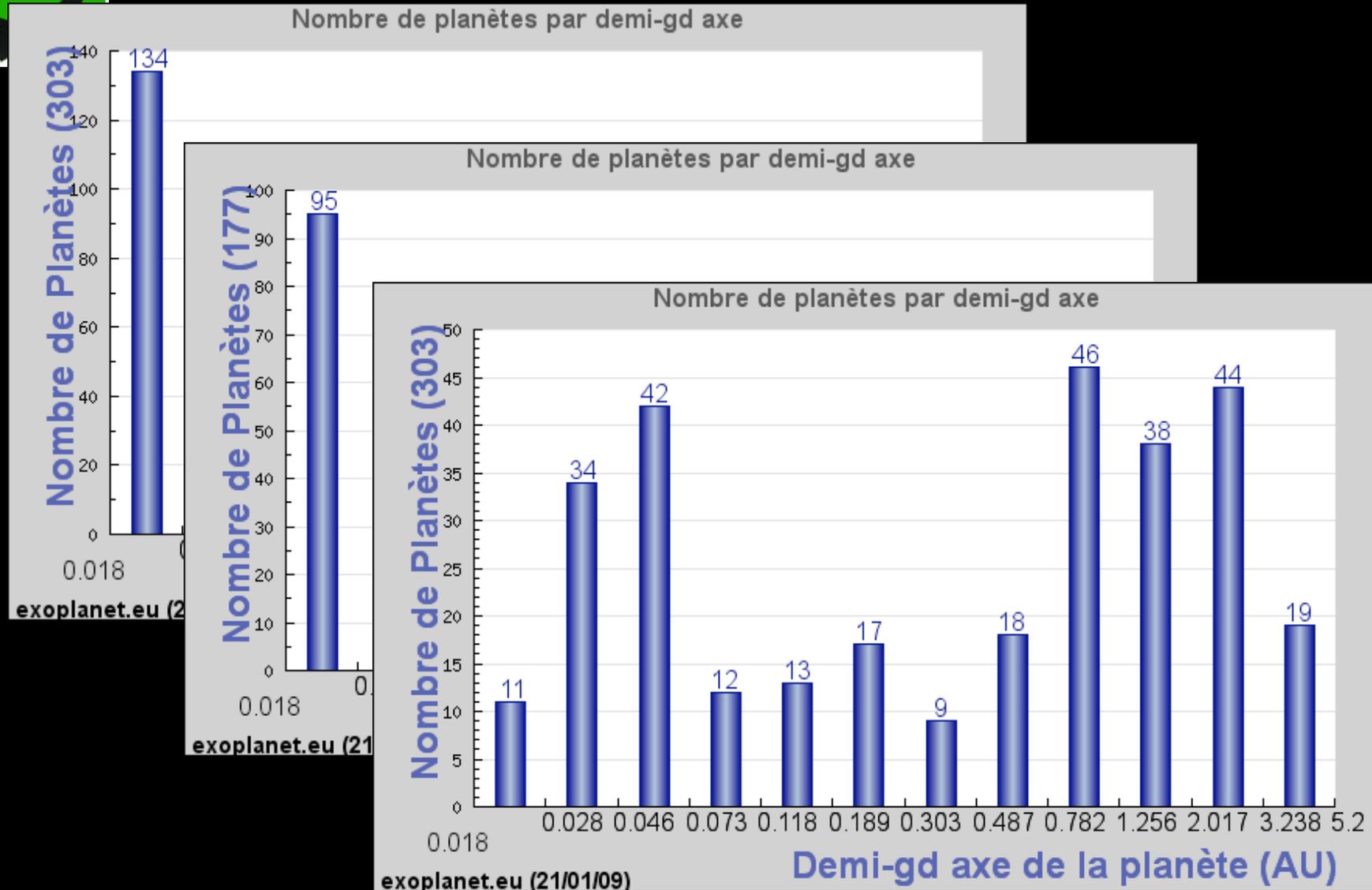


Distribution en masse des exoplanètes



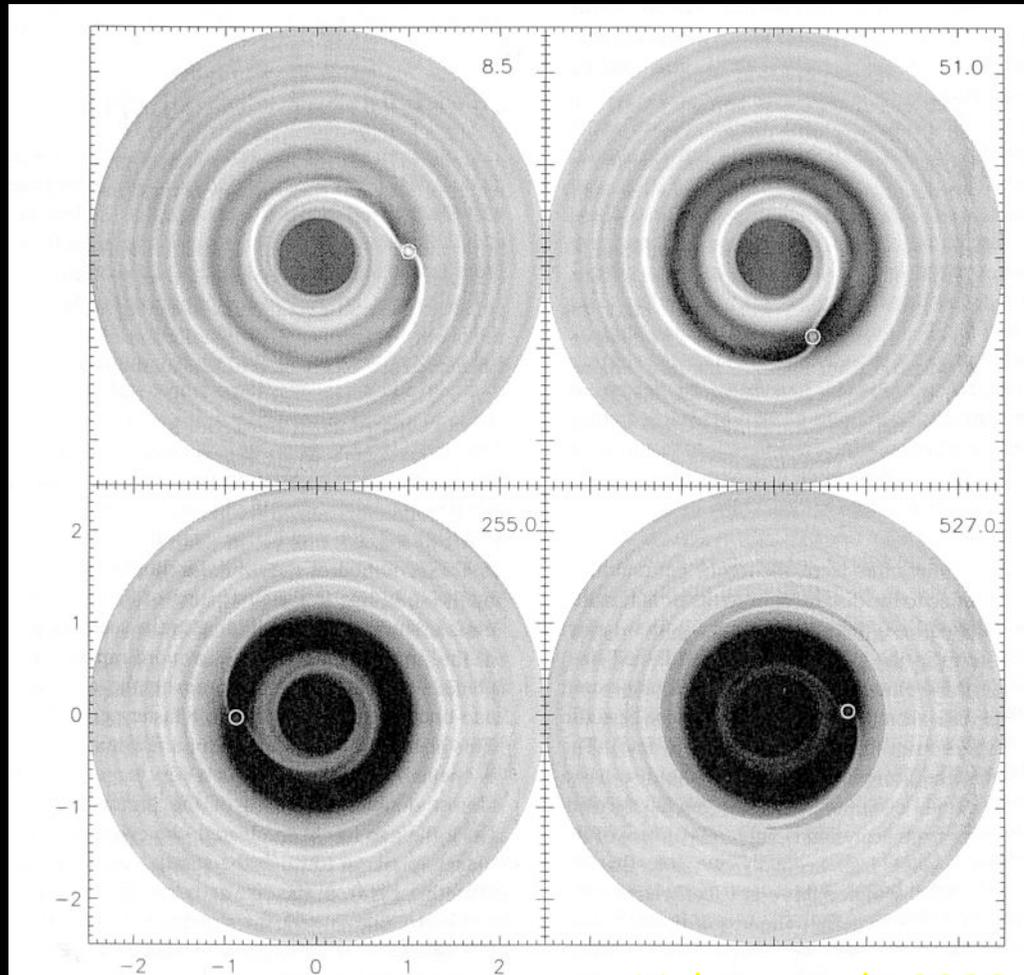


Distribution en distance des exoplanètes

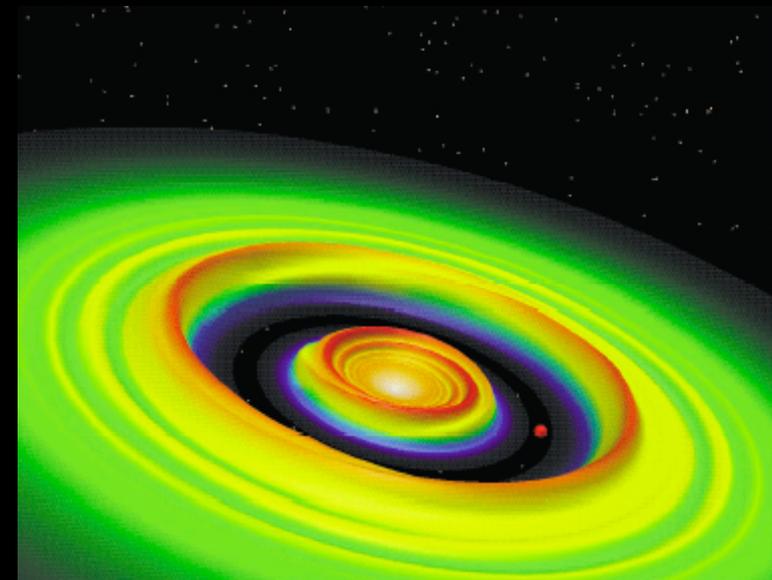




Mécanismes de migrations d'orbites



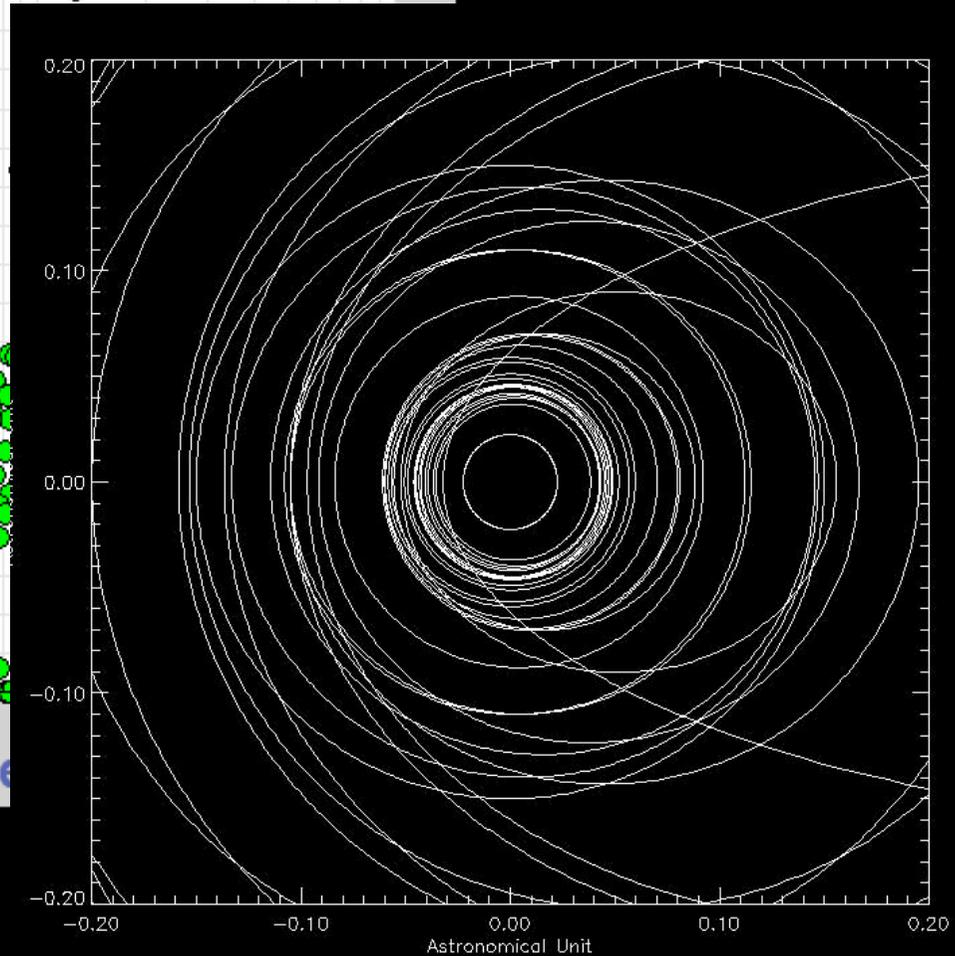
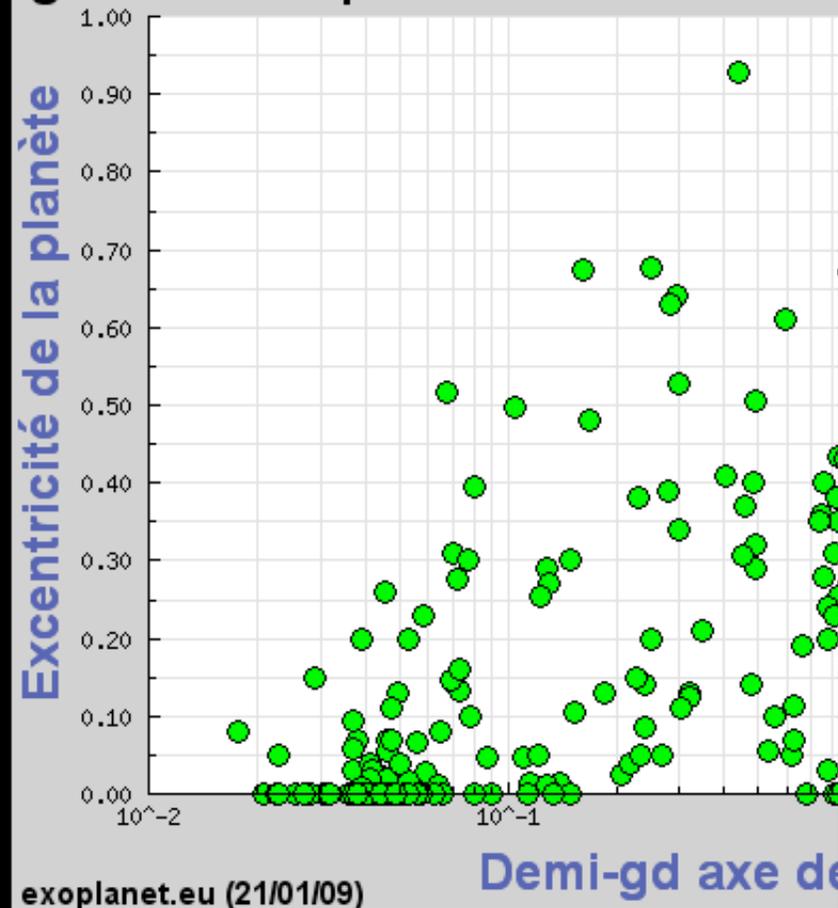
Nelson et al., 2000



Bryden et Lin

Excentricité des exoplanètes

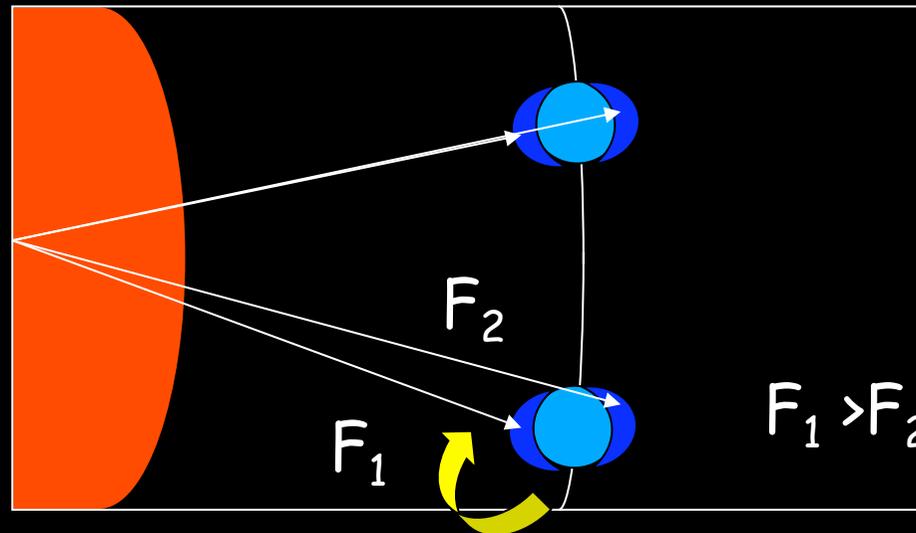
-gd axe de la planète" vs "Excentricité de la planète"





Excentricité des exoplanètes (2)

- Orbites proches : Effets de marées
 - attraction gravitationnelle différentielle sur la planète
 - création d'un bourrelet
 - dissipation d'énergie → circularisation de l'orbite
 - couple de rappel → synchronisation rotation / révolution (cf. Lune)



- Conséquences : verrouillage de phase ($\tau \sim 2 \cdot 10^6$ ans)
 - 2 hémisphères différents, vents zonaux

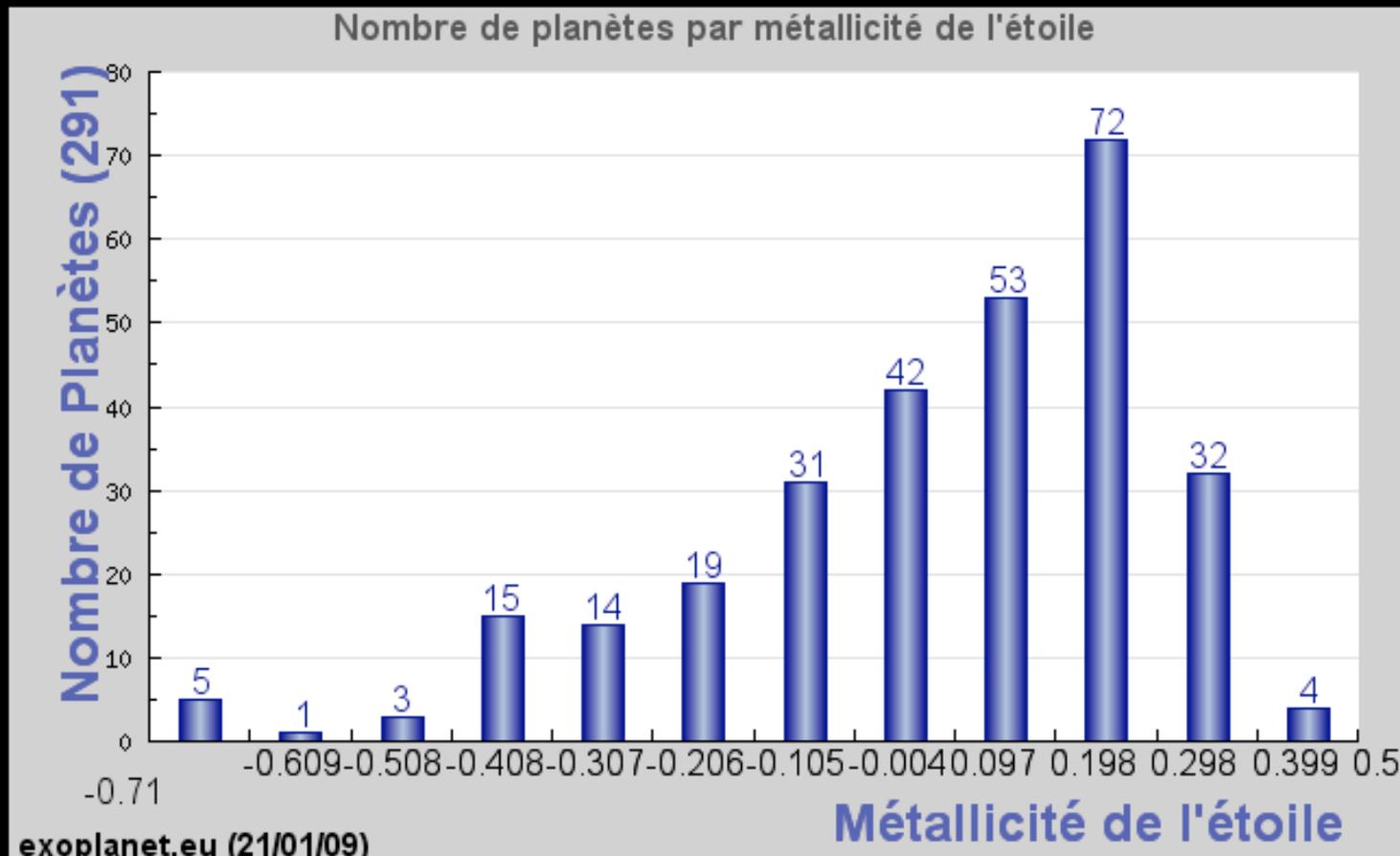


Metallicité d'une étoile

- H (X), He (Y), et les métaux (Fe ou Z) : Z : métallicité
- $X+Y+Z = 1$ (par définition)
- Pour le soleil, $Z = 0.02$
- Par commodité, on appelle aussi « métallicité »

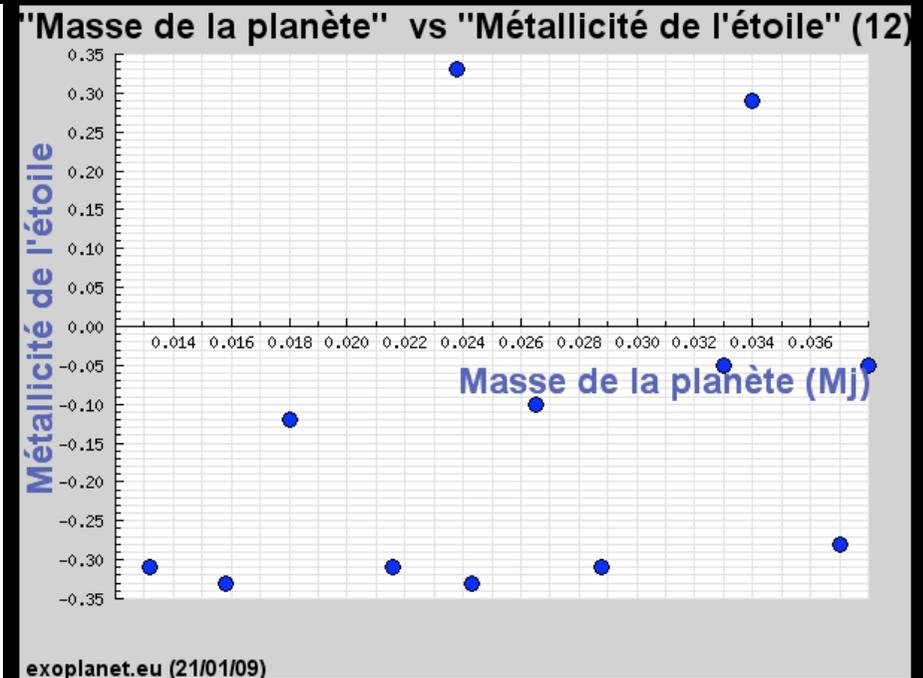
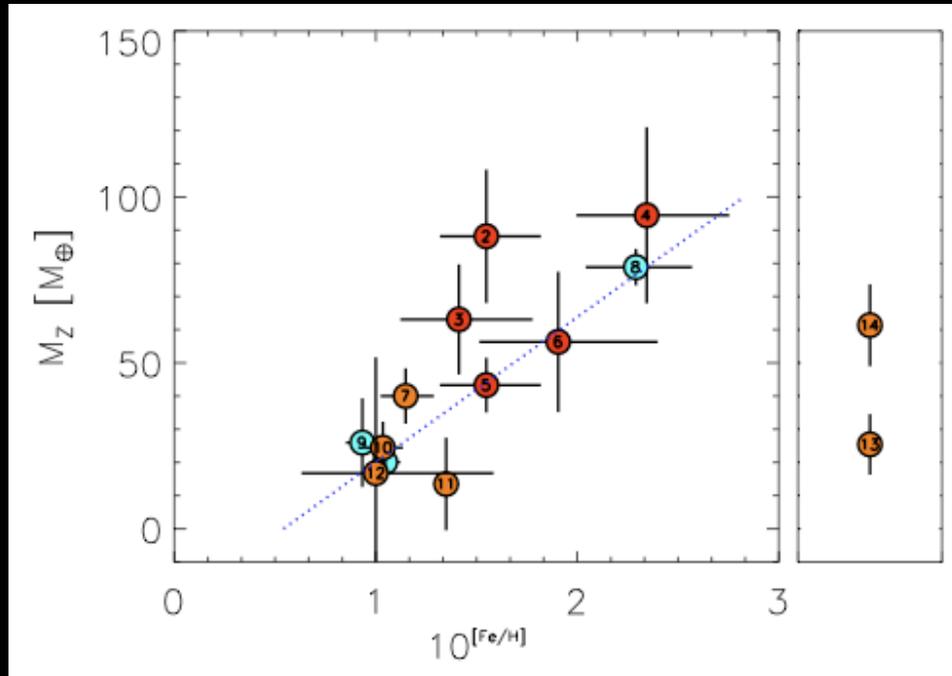
$$\text{Metallicite} = [\text{Fe}/\text{H}] = \log \left(\frac{[\text{Fe}][\text{H}]_{\text{sol}}}{[\text{H}][\text{Fe}]_{\text{sol}}} \right)$$

Métallicité et exoplanètes



- Après correction des biais : métallicité plus élevée pour les étoiles à planètes
- Observation compatible avec un modèle par accrétion de planétésimaux et formation de planètes géantes
- Conséquences sur la formation des planètes telluriques ?

Métallicité et exoplanètes (2)



Guillot 2007

- Corrélation métallicité / masse du corps solide des planètes géantes
- Pas de corrélation pour les planètes telluriques

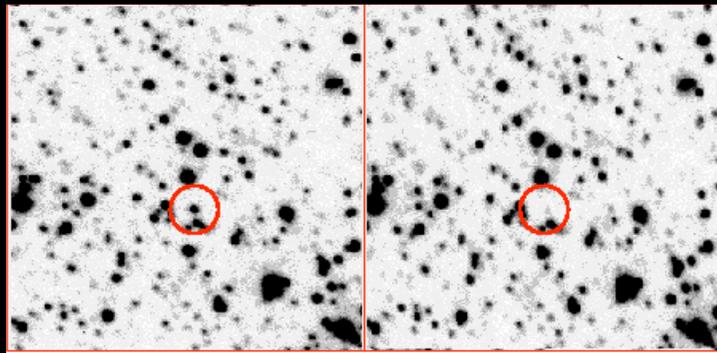
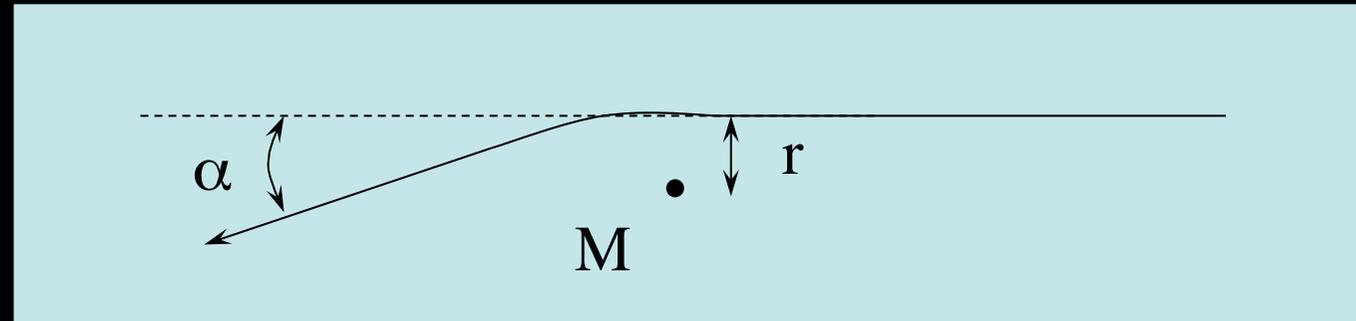


Compléter la description
statistique :

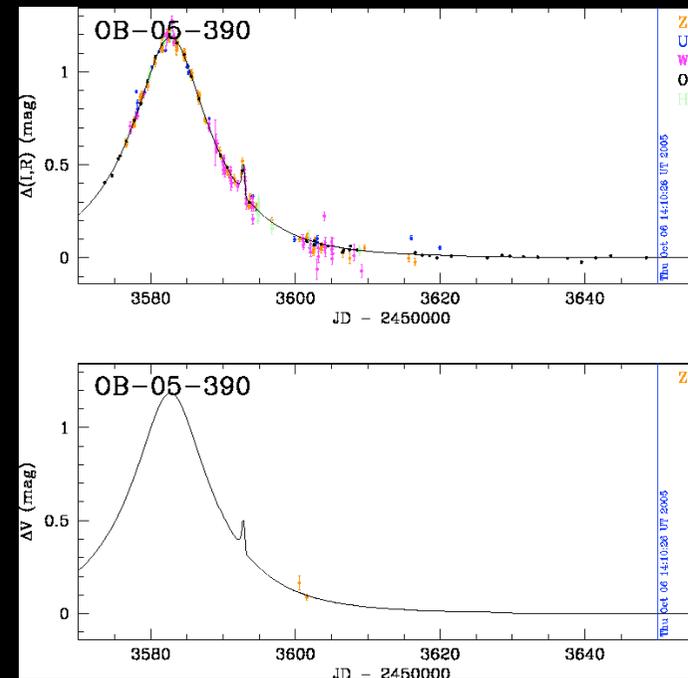
A la recherche des « petites »
planètes

Microentillage gravitationnel

$$\alpha = \frac{4GM}{c^2 r} = \frac{2R_s}{r}$$



Nom : OGLE-05-390L b découverte en 2005
 par Beaulieu et al.
 Masse : 0.018 (\pm 0.01) MJ (5.8 M_{\oplus})
 Distance de la planète. (proj.) : 2.6 AU
 Période orbitale : 3800 jours

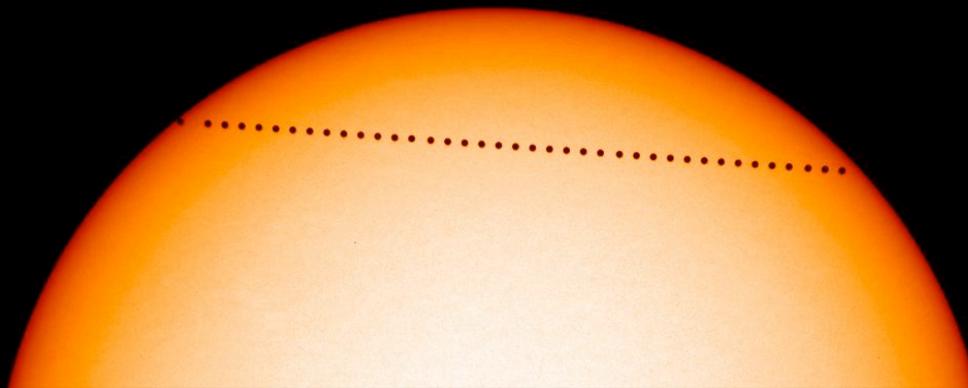




Observation des transits

Concerne uniquement les systèmes observés par la tranche, pour lesquels les planètes peuvent occulter partiellement leur étoile centrale.

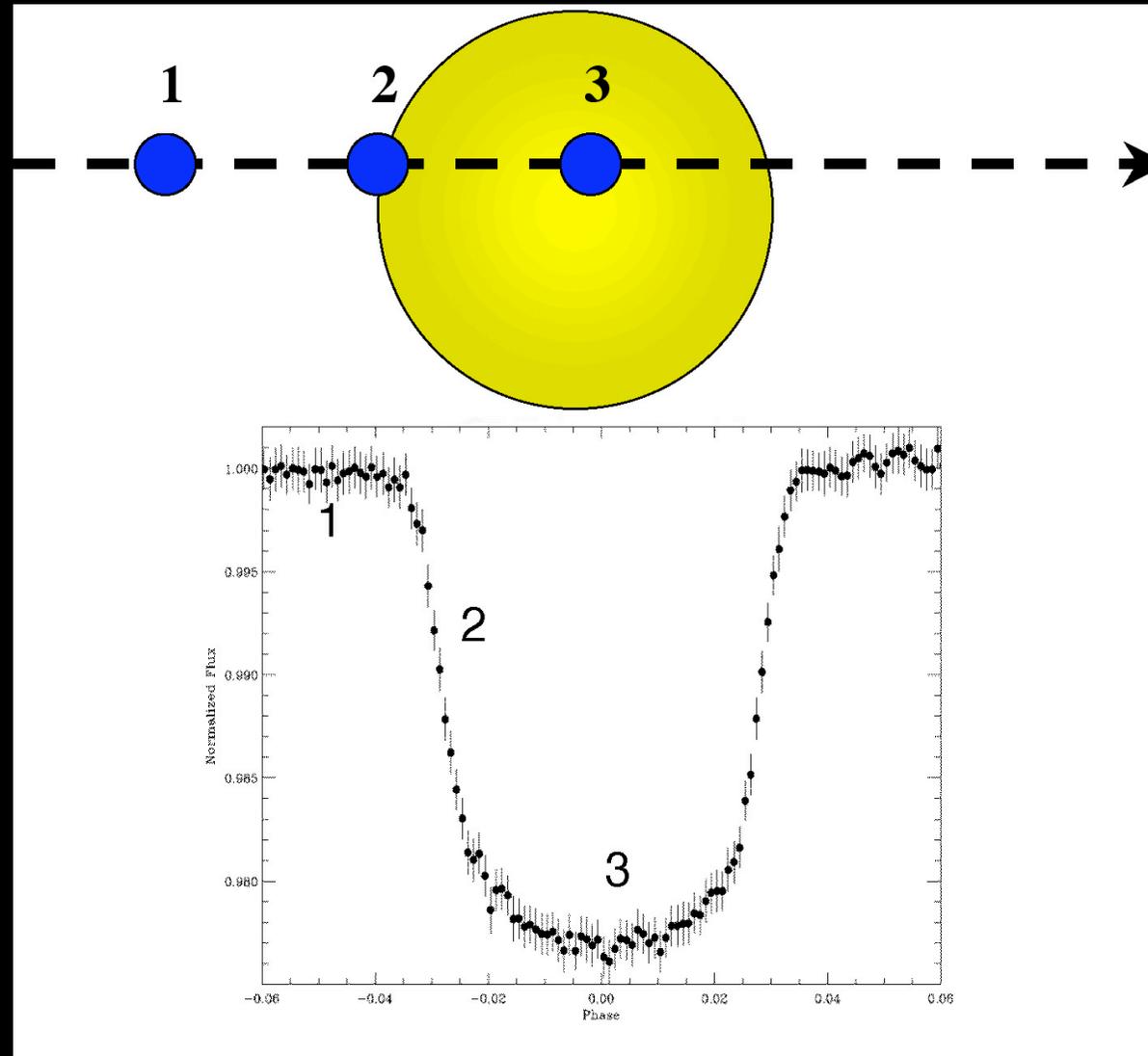
Venus : 8 juin 2004



Mercure : 7 mai 2003
vue par SOHO



Observation des transits (2)





Observation des transits

$$\frac{\Delta F}{F} = \frac{F_{\text{étoile avant transit}} - F_{\text{étoile durant transit}}}{F_{\text{étoile avant transit}}} = \frac{\text{Surf}_{\text{planète}}}{\text{Surf}_{\text{étoile}}} = \left(\frac{R_p}{R_*}\right)^2$$

$$D_T = \frac{p}{\pi} \cdot \frac{R_*}{a}$$

$$\text{proba} = \frac{R_*}{a}$$

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

Objet	Durée
Jupiter chaud	~ 3 heures
Terre	~ 14 heures
Jupiter	~ 30 heures

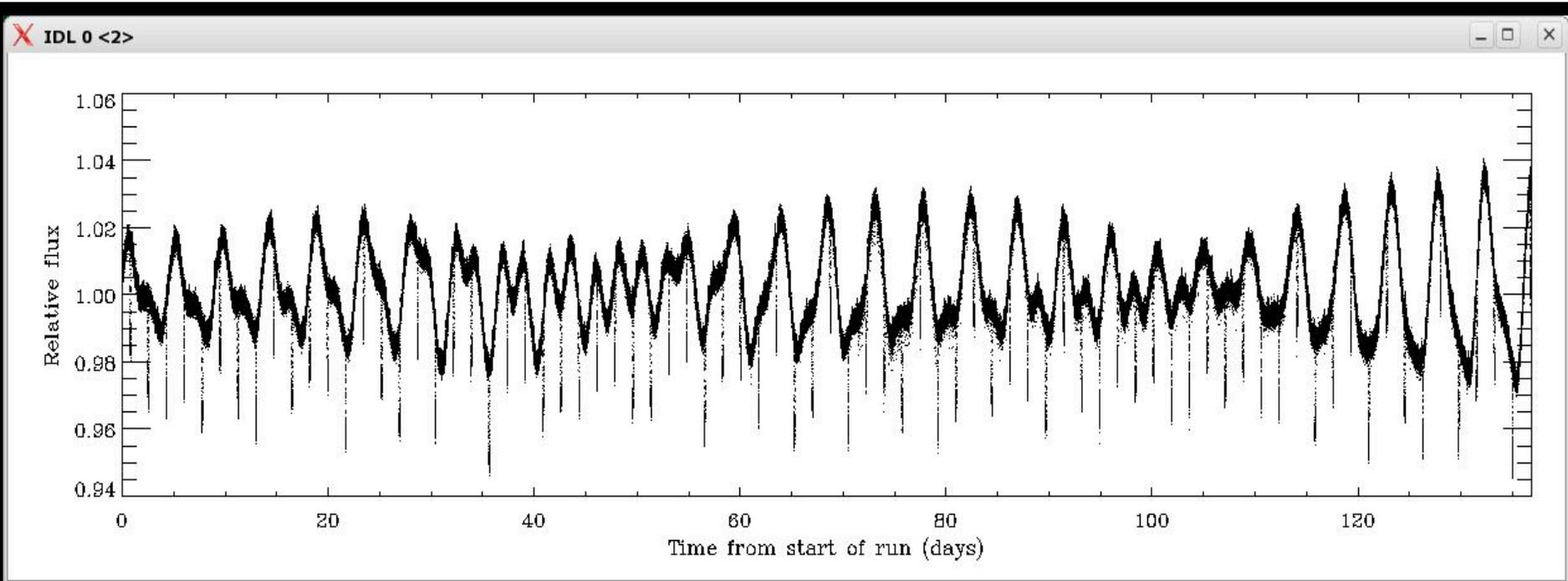
Objet	Probabilité
Jupiter chaud	$\sim 10\%$
Terre	$\sim 0.5\%$
Jupiter	$\sim 0.1\%$



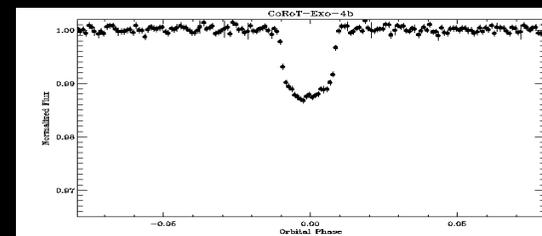
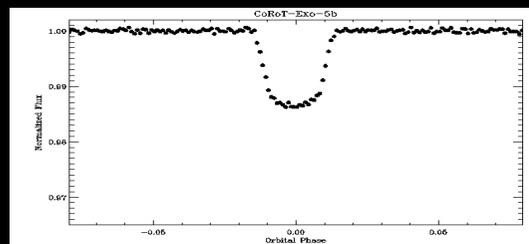
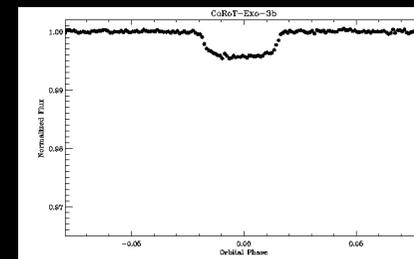
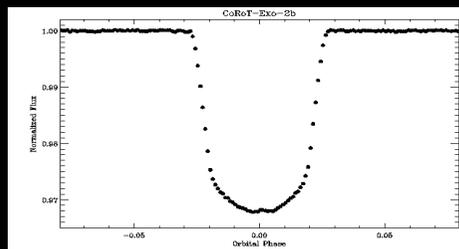
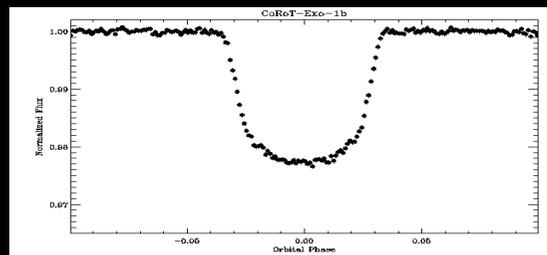
CoRoT en bref

- « Petite » mission CNES (MO) + Belgique
+ Allemagne + Autriche + Espagne + Brésil
+ ESA
- 3^{ème} 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





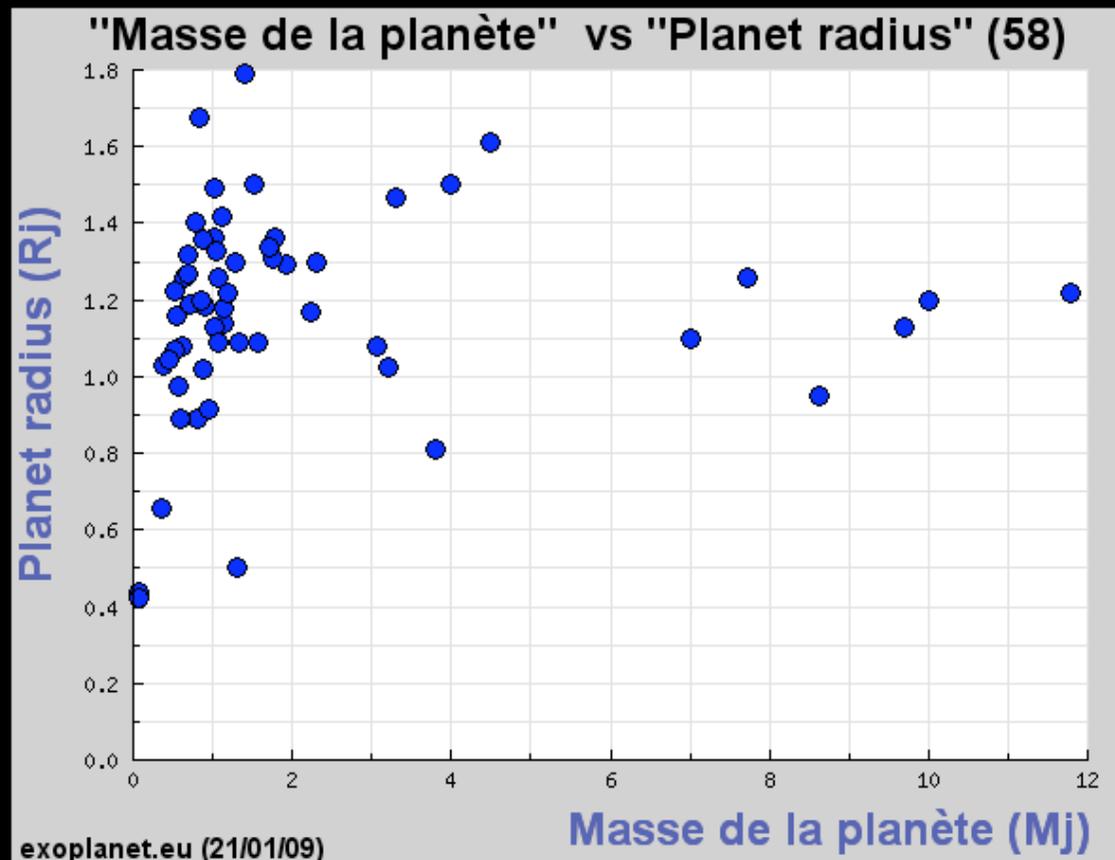
Exoplanétologie par étude des transits





Mesure de la densité planétaire moyenne

- Profondeur du transit → dimension de la planète
- Mesure en vitesse radiale → masse (sans indétermination)
- Limitée actuellement aux planètes géantes





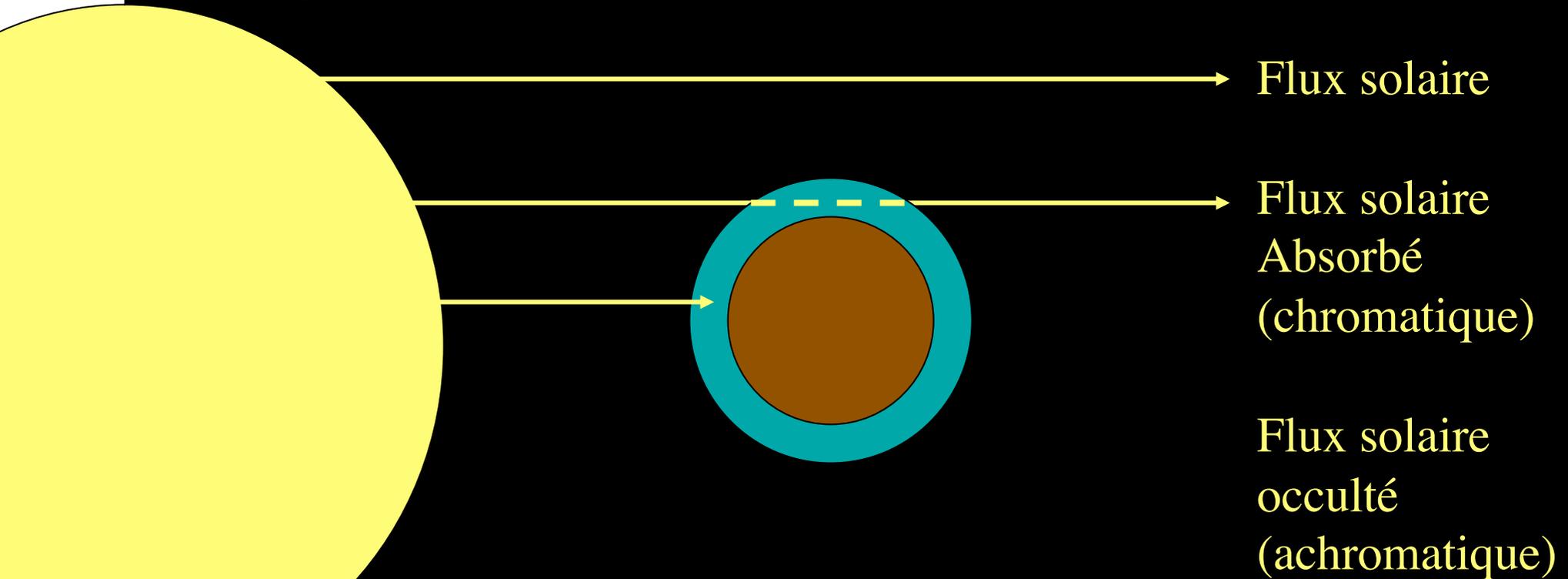
Spectroscopie des exoplanètes en transit



Spectroscopie de l'atmosphère

Spectroscopie en transmission (transit primaire)

Visible et IR



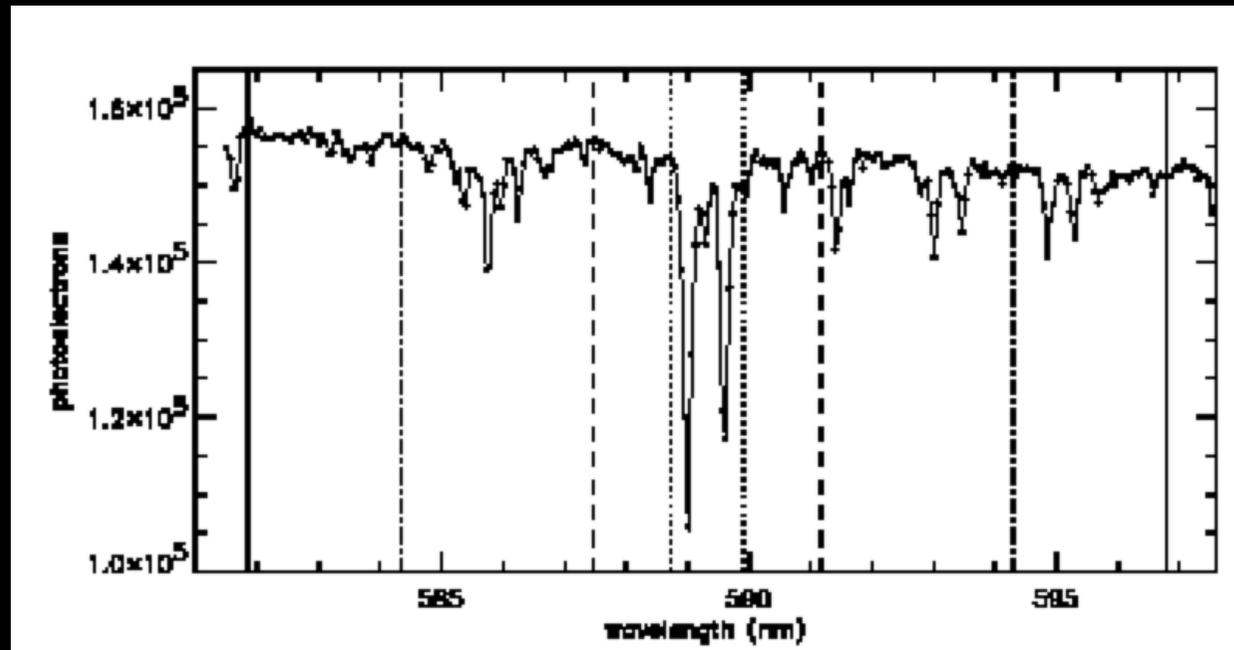
$$P(z) \rightarrow \tau(\lambda) \rightarrow R_{\text{mesuré}} = f(\lambda)$$

Mesure de $R(\lambda) \rightarrow$ info sur la composition



Spectroscopie de l'atmosphère

Spectroscopie en transmission



HD 209458 B : Première mise en évidence observationnelle d'une atmosphère d'exoplanète par observation de l'absorption du sodium (Charbonneau et al. 2002)

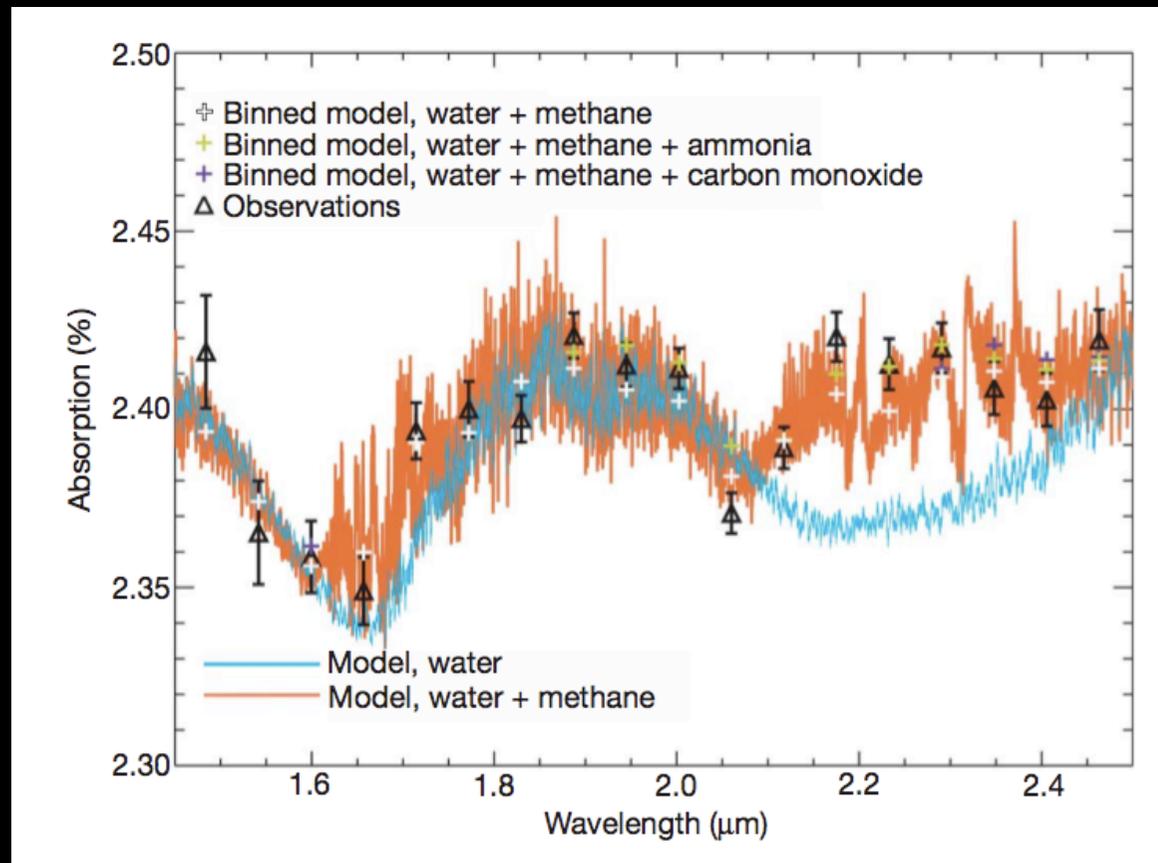


Spectroscopie de l'atmosphère

Spectroscopie en transmission : contrainte du modèle de HD 189733 b : identification de CH_4 (et H_2O)

planète $1.15 M_J$ - 0.031 u.a. - $p=2.2186 \text{ j}$ - $R=1.156 R_\odot$

Étoile : $K1\text{-}K2$ - $m_v=7.67$ - $M=0.8 M_\odot$ - $d=19.3 \text{ pc}$



Swain et al. 2008



Spectroscopie des transits : résumé

- Premières observations directes et analyse d'atmosphère d'exoplanètes géantes chaudes (Identification d'espèces atomiques (Na, H, C, O, ...) et moléculaires (H_2O , CH_4 , Si-O (?)))
- Premières contraintes des modèles atmosphériques
- Méthode limitée à quelques objets
- Pas possible d'identifier des biosignatures

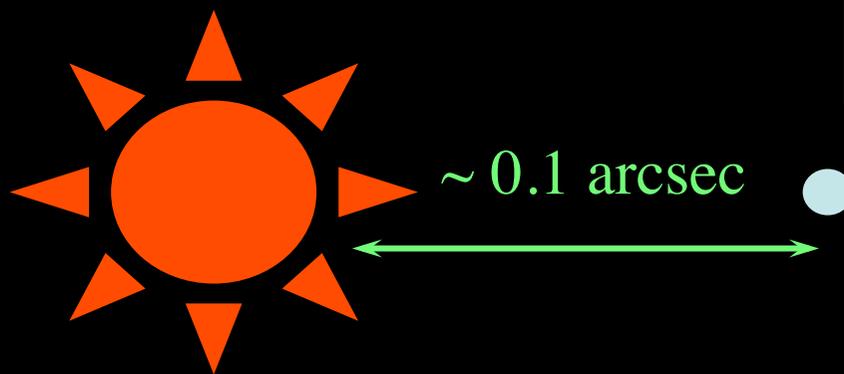
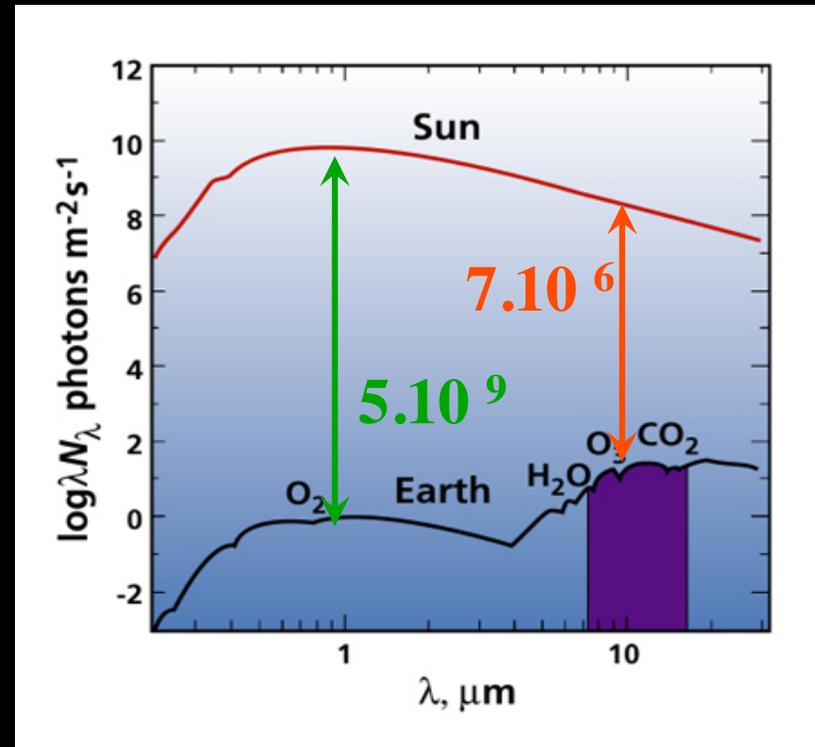


Comment obtenir le spectre des exoplanètes ?

De l'art de la détection
directe..

Détection directe d'une planète extrasolaire

Problème #1 ⇒



⇐ Problème #2



Choix du domaine spectral

Visible / proche IR

IR Thermique

0.5 - 2 μm

6 - 20 μm

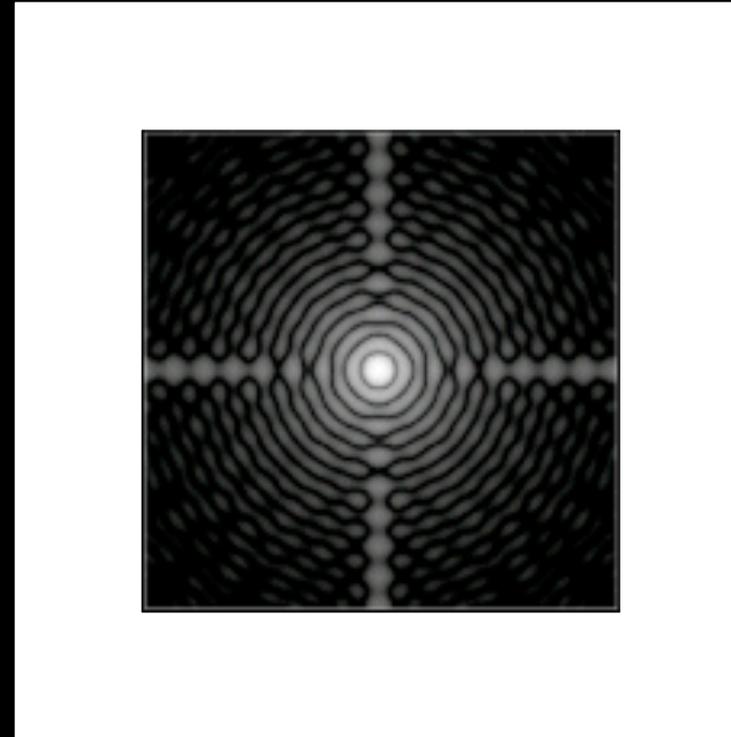
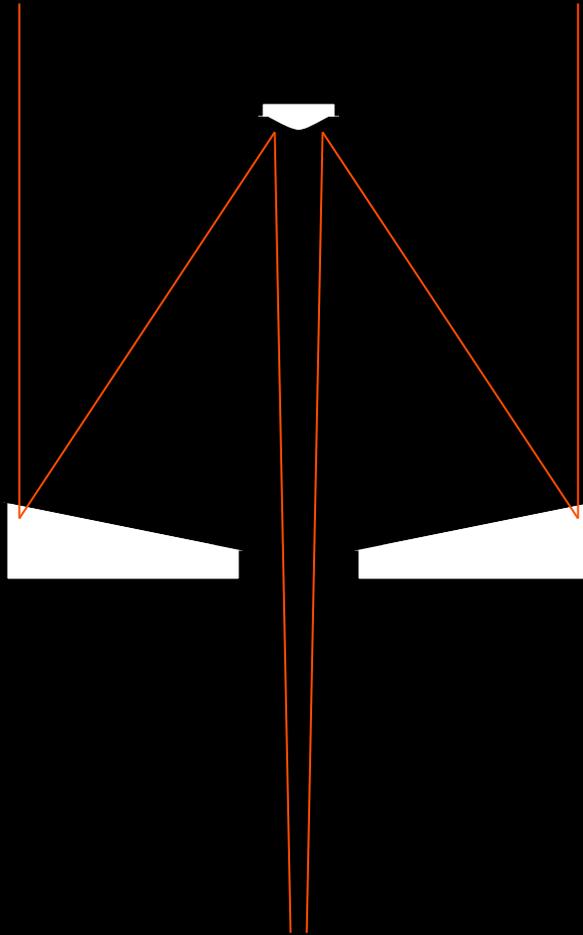
$$F^*/F_{\text{pl}} = 5 \cdot 10^9$$

$$\text{Planet. Flux} = 0.3 \text{ ph m}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

$$F^*/F_{\text{pl}} = 7 \cdot 10^6$$

$$\text{Planet. Flux} = 10 \text{ ph m}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

Un problème de résolution

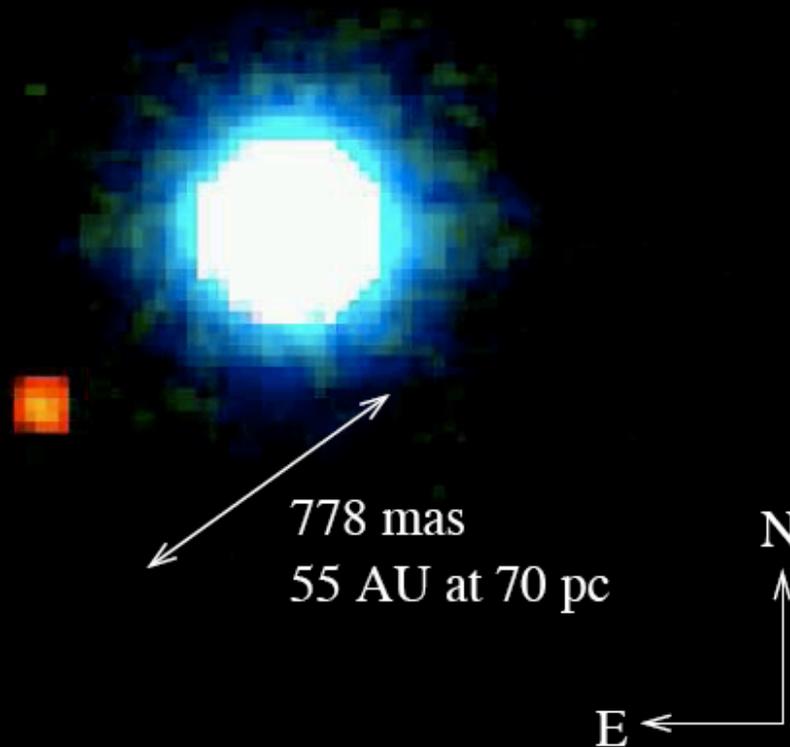


Diamètre $\sim 2.4 \lambda f/D$



Première image d'un autre système planétaire

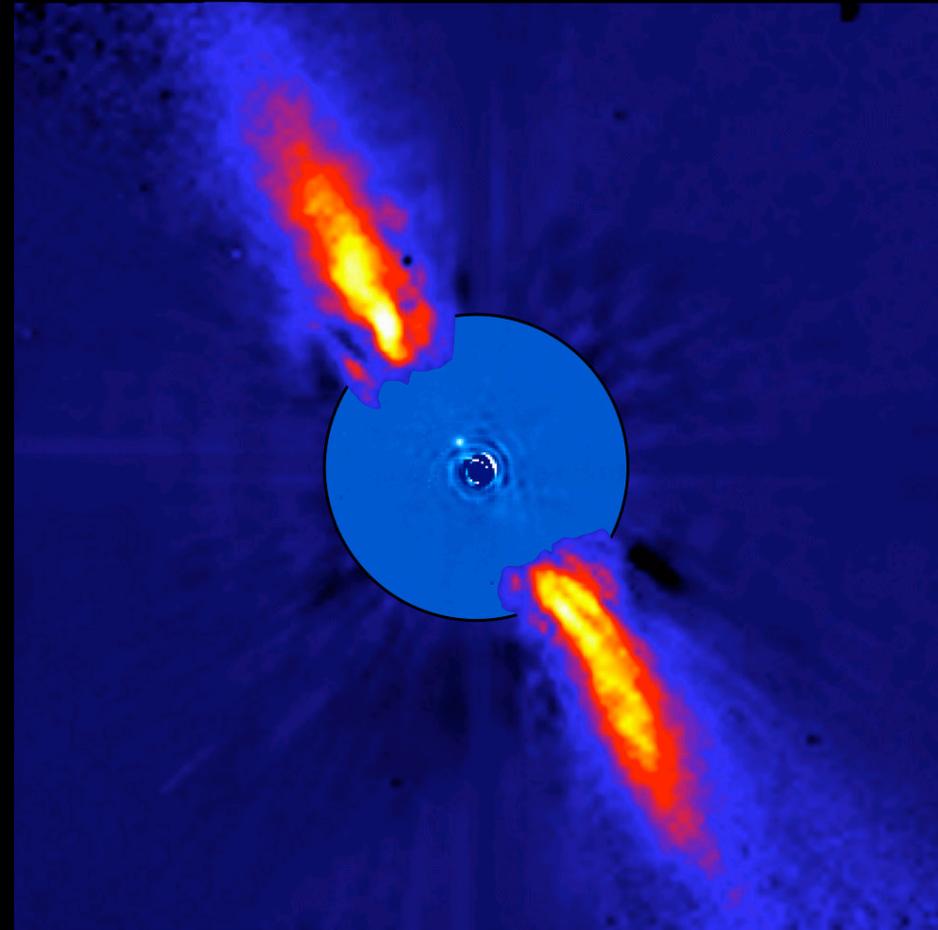
2MASSWJ1207334-053254



Chauvin et al. 2005



LE cas Beta Pictoris

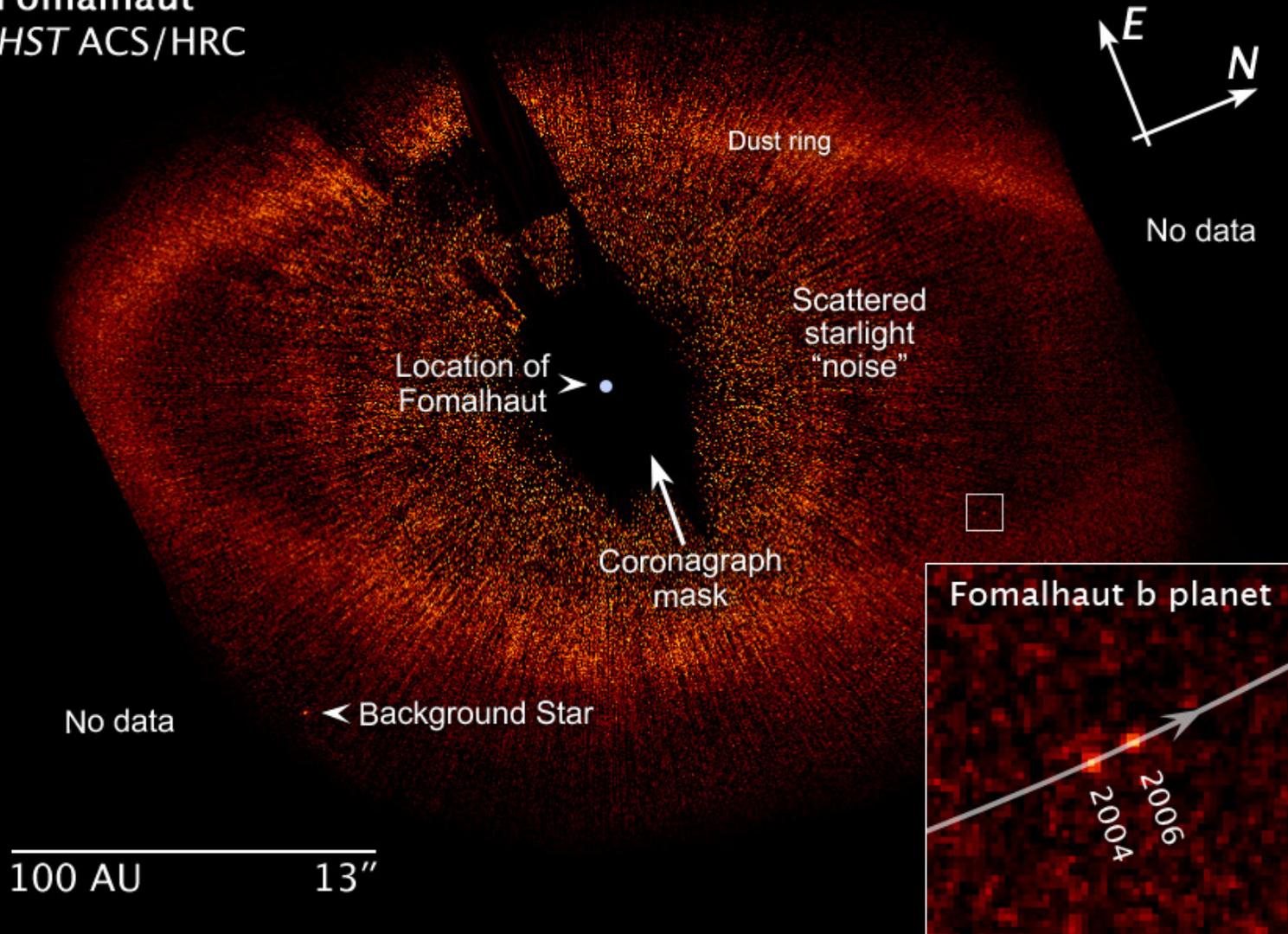


Lagrange et al. 2008



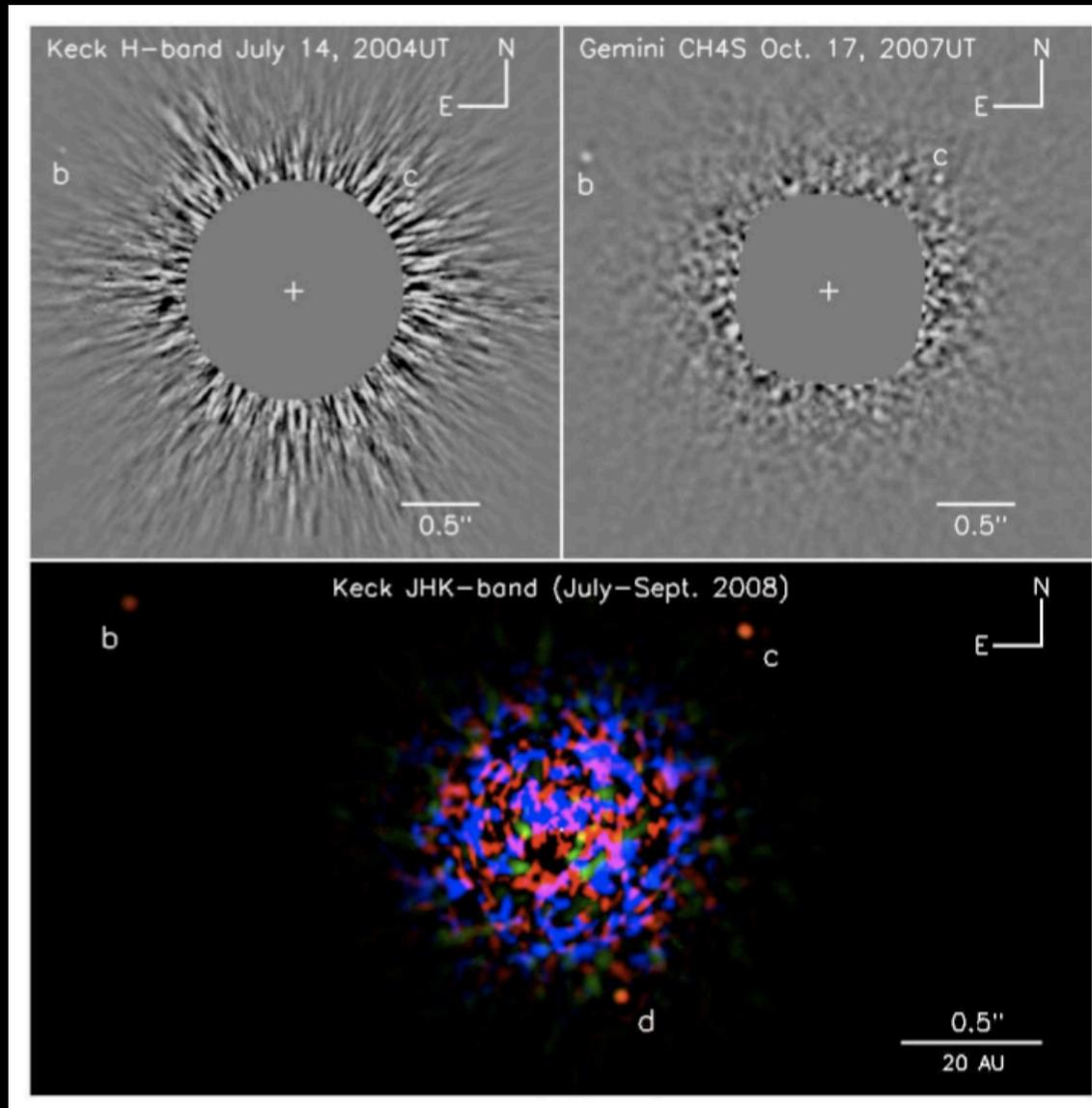
Le cas Fomalhaut b

Fomalhaut
HST ACS/HRC



Kalas et al. 2008

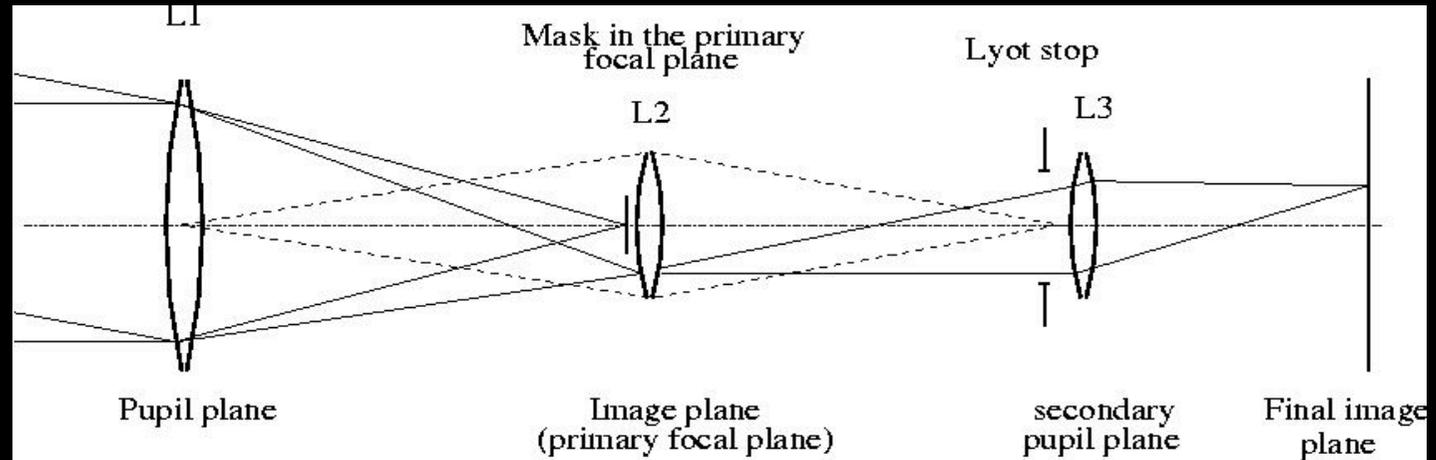
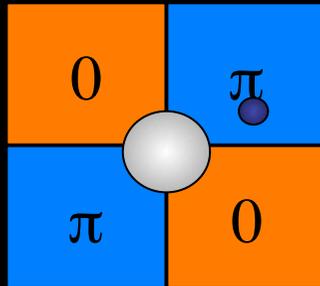
Le cas HR 8799



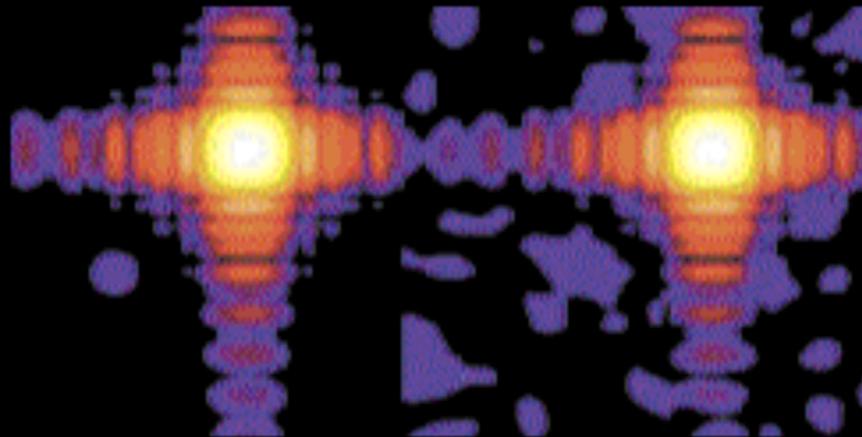
Marois et al. 2008



Observer dans le Vis/NIR

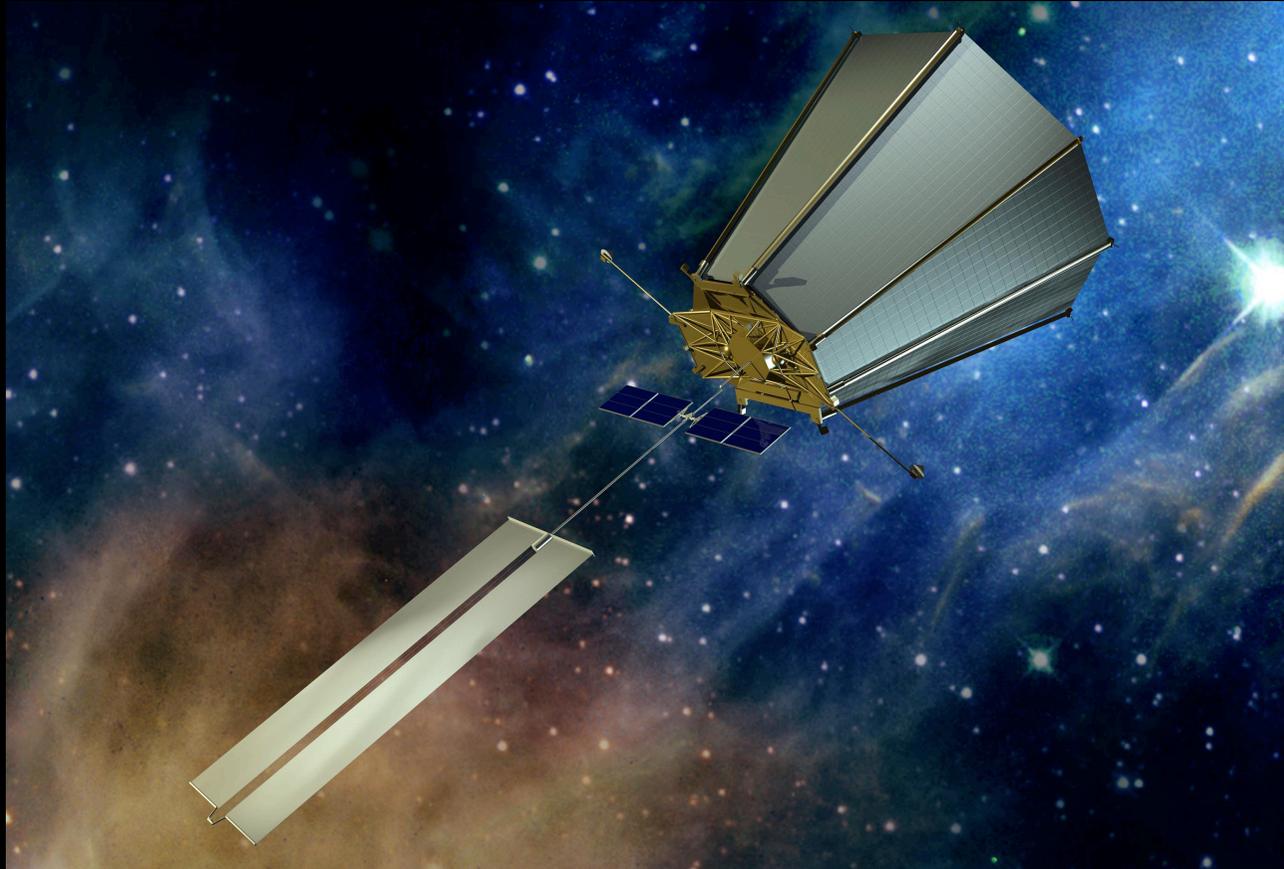


Télescope classique + Coronographe à 4 quadrants (Rouan et al.)



Pupille apodisée (Spergel)
Pupille carrée (Niesenson)
 $D = 1 \rightarrow 5 \text{ m}$

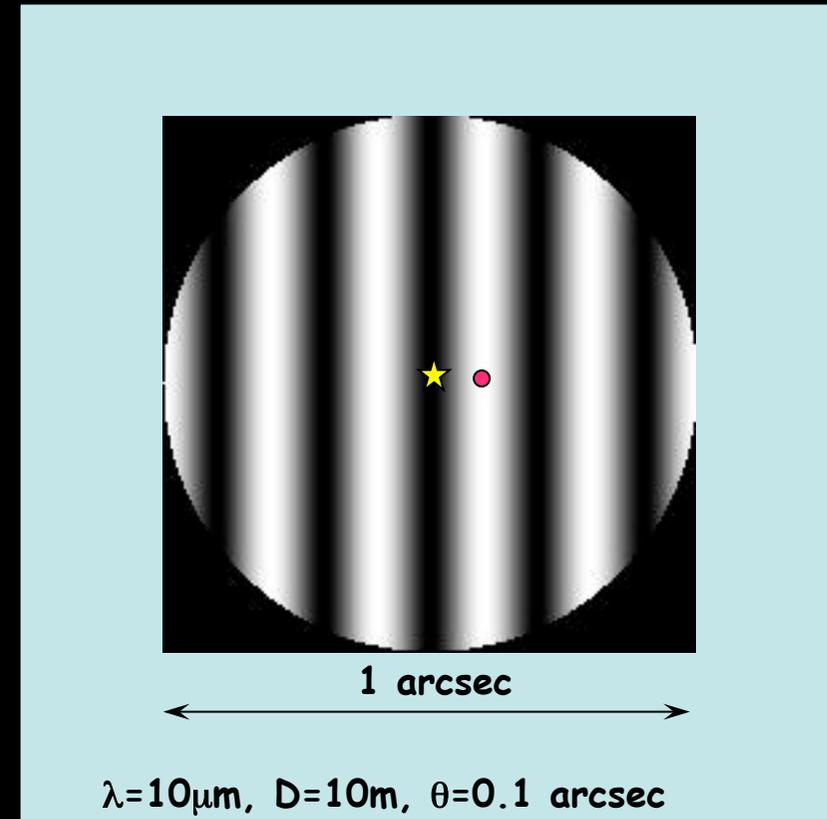
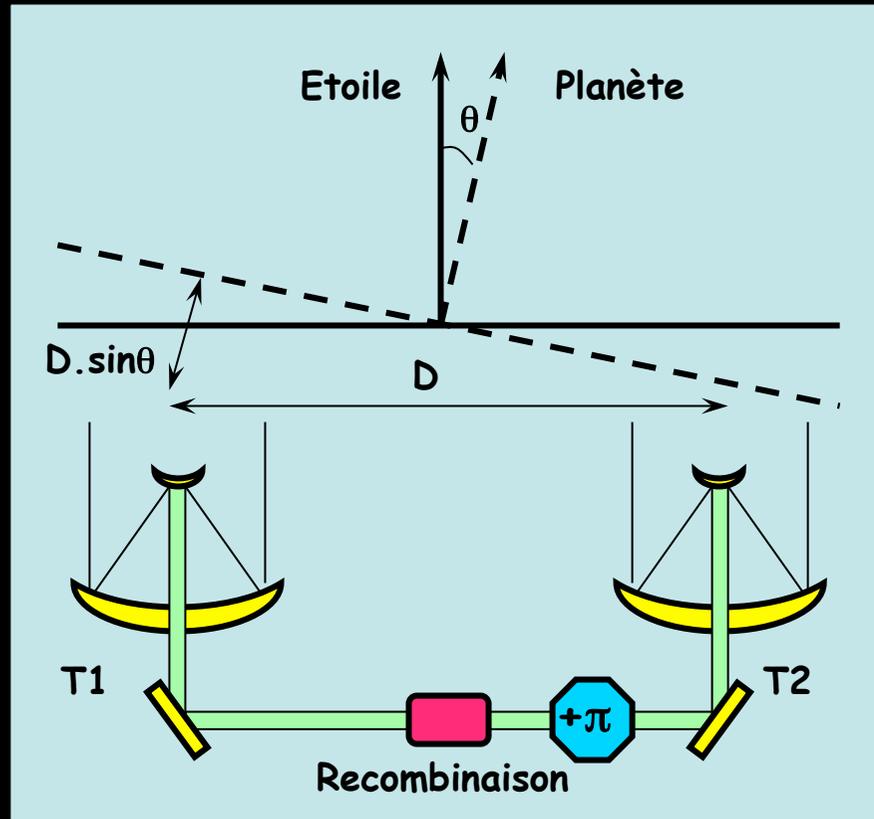
La mission TPF-C



Mission NASA, avec collaborations
Détection + spectroscopie en visible / proche IR de
planètes telluriques autour des étoiles proches
vers ???

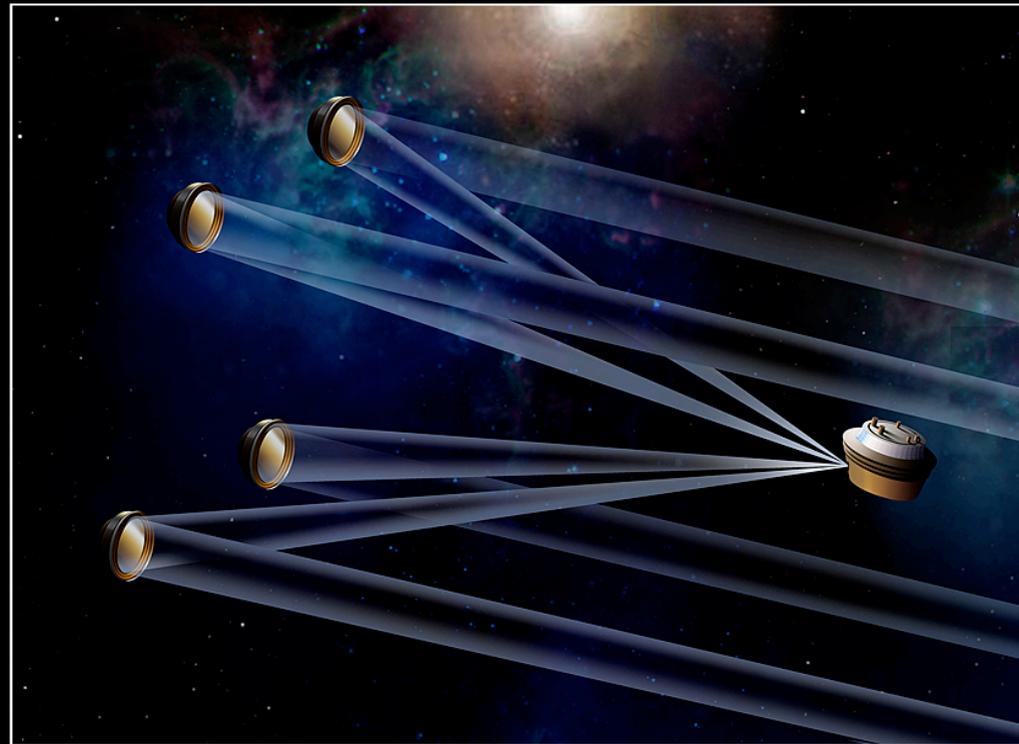


L'interféromètre de Bracewell (1978)





La mission Darwin/TPF-I



🍏 Initiée en Europe en 1993

🍏 Collaboration ESA/NASA ?

🍏 Détection + spectroscopie en IR de planètes telluriques autour des étoiles proches vers ???



Imager la surface d'une exoplanète



Caractérisation morphologique

- Observation des grosses structures (continents - oceans)
résolution spatiale "pauvre" : 16x16 px
- Observation des structures géologiques, météorologiques et biologiques (montagnes - mers et océans - nuages - forêts)
résolution spatiale "faible" : 128x128 px
- Observation des grandes structures technologiques (cités)
résolution spatiale "médium": 1024 x 1024 px
- Observation de la vie in-situ (réseaux de communication, constructions artificielles, animaux)
résolution spatiale "élevée" > 10000 x 10000 px

Resolution "pauvre"

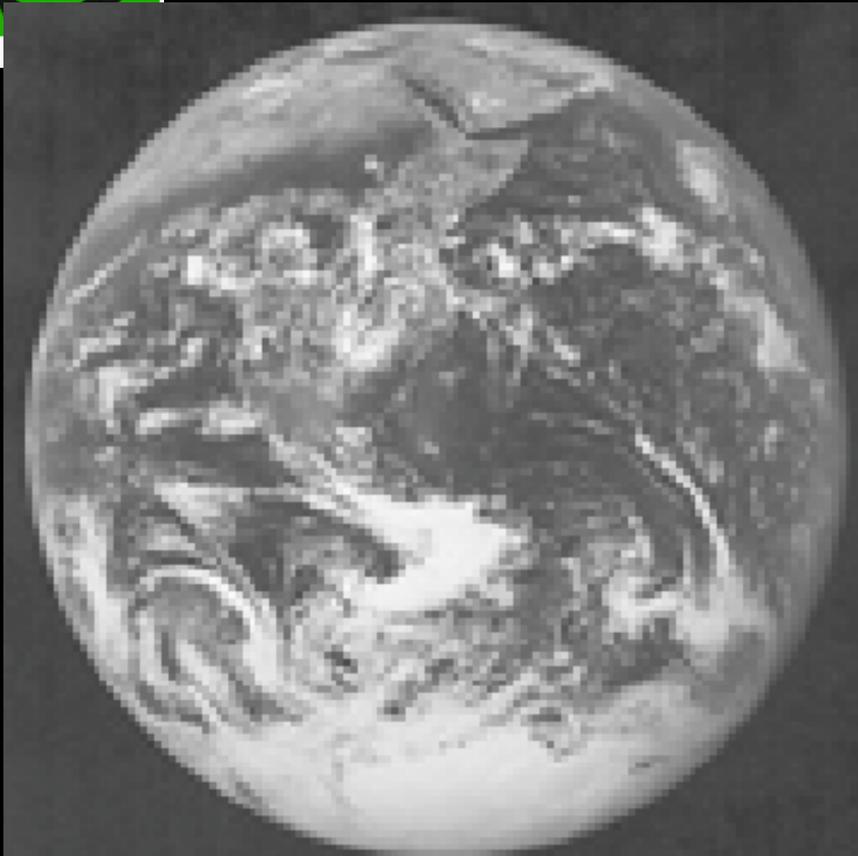


16 x 16 → 200 px

Res = $4 \cdot 10^{-7}$ arcsec → 450 km

S = 20000 m² : Int. Time ~ 1 min - 3min

Résolution "faible"

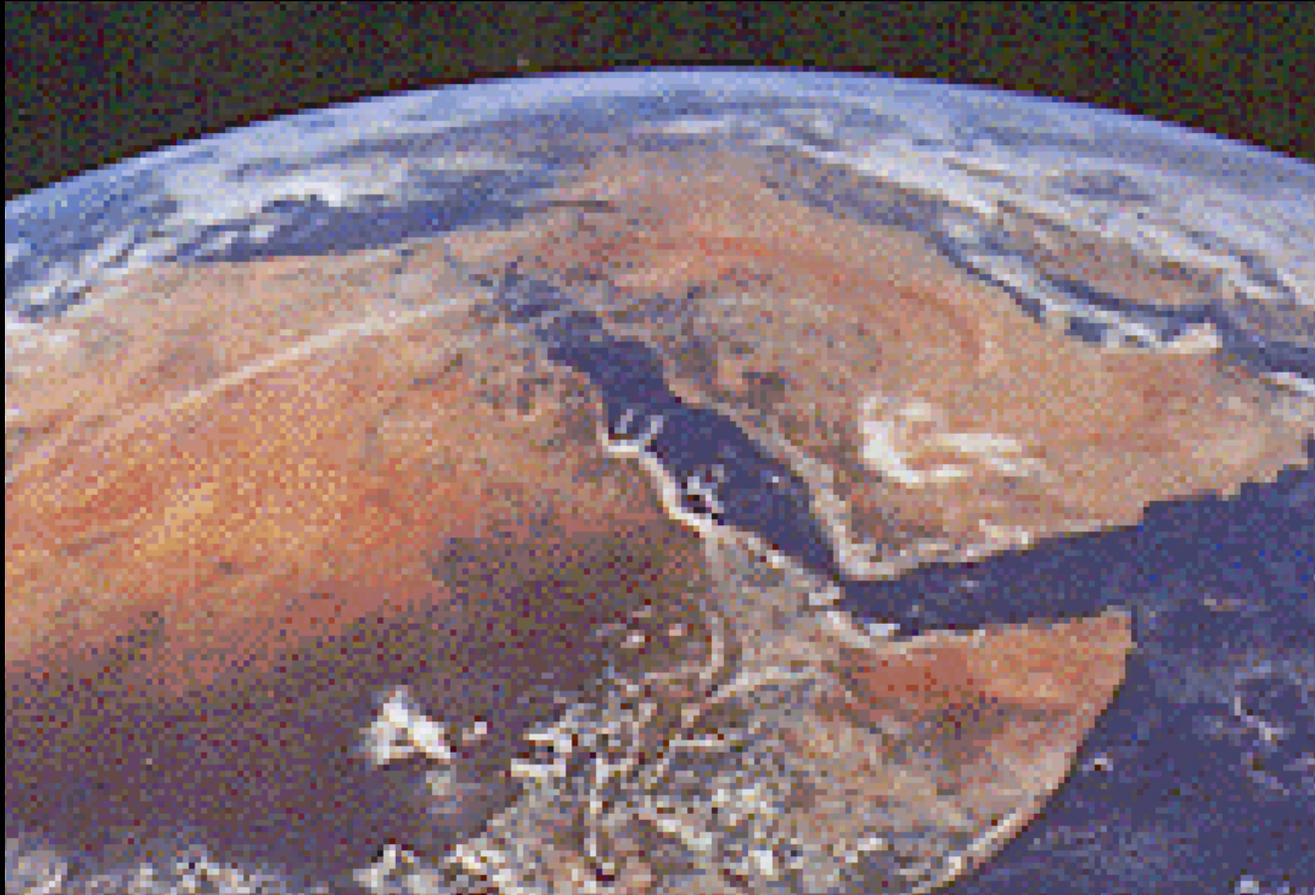


128 x 128 → 12800 px

Res = $5 \cdot 10^{-8}$ arcsec → 3600 km

S = 80000 m² : Int. Time ~ 15 min - 45 min

Résolution "médium"



$1000 \times 1000 \rightarrow 8 \cdot 10^5 \text{ px}$

$Res = 0.6 \cdot 10^{-8} \text{ arcsec} \rightarrow 30000 \text{ km}$

$S = 5\,000\,000 \text{ m}^2$; Int. Time $\sim 20 \text{ min} - 1 \text{ h}$



Résolution "élevée"



$10000 \times 10000 \rightarrow 8 \cdot 10^7 \text{ px}$

$\text{Res} = 0.6 \cdot 10^{-9} \text{ arcsec} \rightarrow 300000 \text{ km}$

$S = 5\,000\,000 \text{ m}^2$; Int. Time $\sim 30 - 100 \text{ h}$



Conclusions (1)

- Les exoplanètes et les exo-systèmes existent en grand nombre
- La diversité des systèmes a permis un nouveau regard sur notre Système Solaire
- De nouveaux mécanismes ont été identifiés (migration d'orbite...)
- La structure des exoplanètes et la composition de leur atmosphère peuvent être étudiées par spectroscopie,
- Une analyse chimique systématique au premier ordre est envisageable à moyen terme
- L'observation directe de la surface des exoplanètes est illusoire.

Conclusion (2)

*And the conclusion is, that we need
a new generation of telescopes to find
evidence of extra-terrestrial life*

