

# Les planètes Super-Terre Détections & Caractérisations

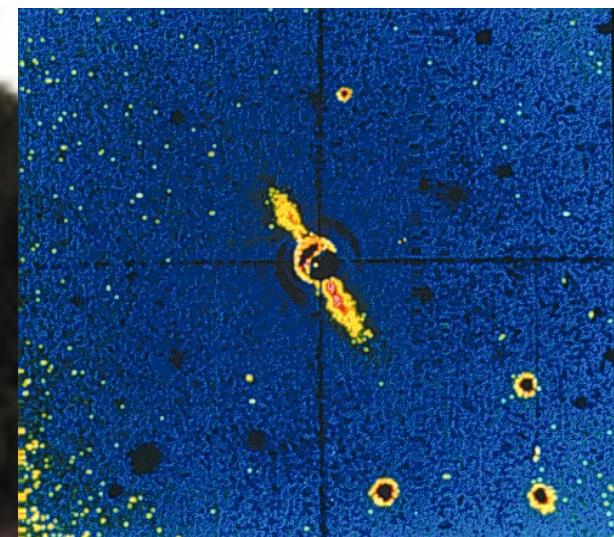
Xavier Delfosse

Institut de Planétologie et  
d'Astrophysique de Grenoble

Observatoire de Grenoble /  
Université Grenoble Alpes / CNRS



# Intro : Histoire & différents types de planètes



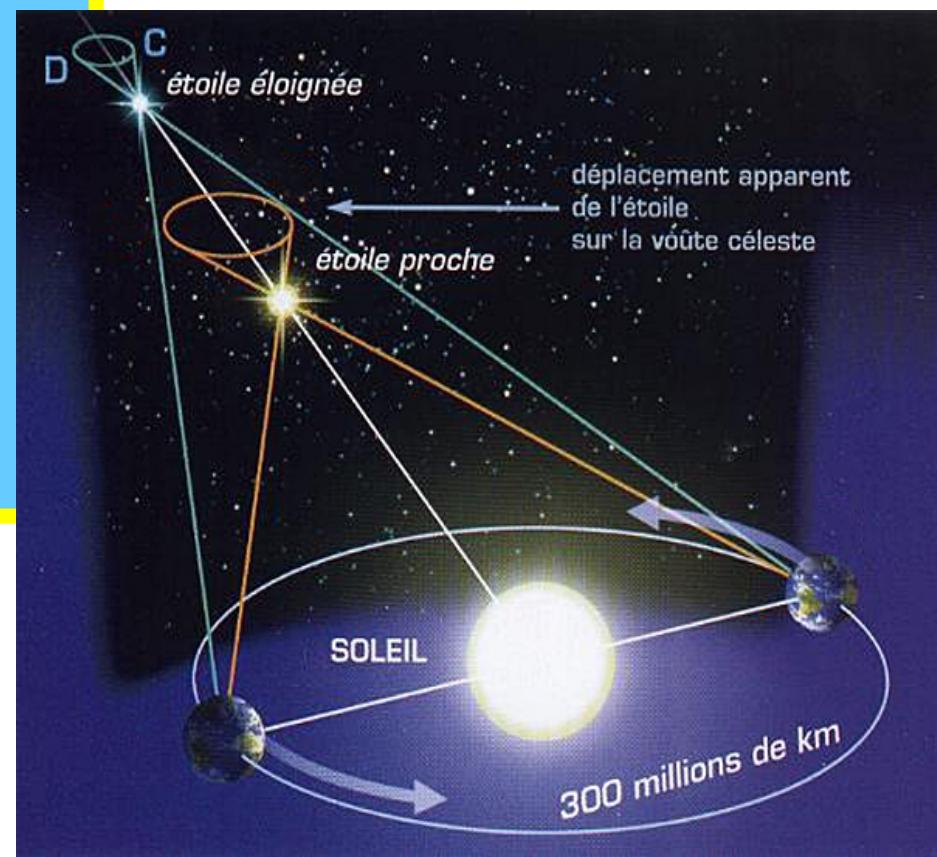
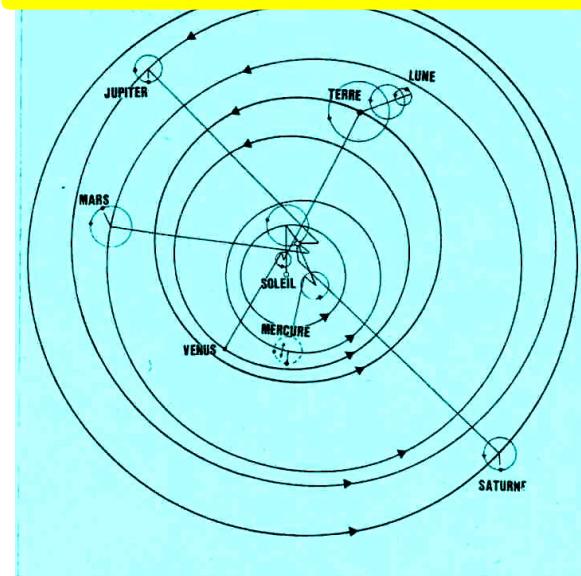
# Intro : Histoire & différents types de planètes

Copernic (1543); Kepler (~1600-1620); Galilée (1610) :

Passage d'un monde géocentrique à un monde héliocentrique

Une conséquence directe : les étoiles sont des Soleils

"Les étoiles fixes ne sauraient être moins éloignées de la Terre que de 27600 fois la distance d'ici au Soleil qui est de 33 millions de Lieux » (note = 0,5 a.l.). « Les voilà donc lumineuses par elles-même, et toutes, en un mot, autant de Soleils. " (De Fontenelle 1686, Entretien sur la pluralité des mondes)

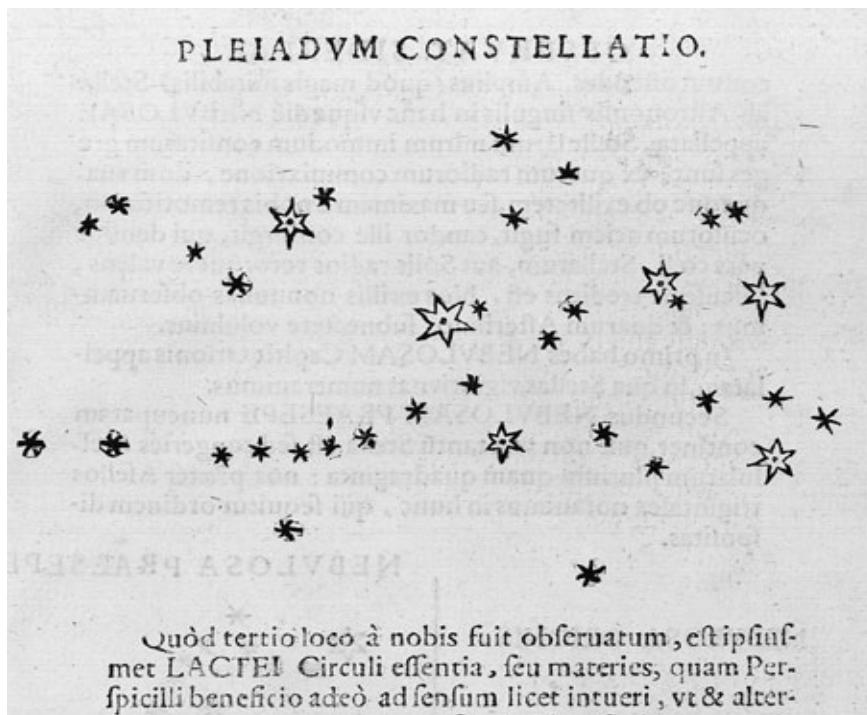


# Intro : Histoire & différents types de planètes

## Les étoiles et planètes extra-solaires :

«Les voilà donc lumineuses par elles-même, et toutes, en un mot, autant de Soleils...»

Les étoiles fixes sont autant de Soleils. Notre Soleil a des planètes qu'il éclaire : Pourquoi chaque étoile fixe n'en aura-t-elle pas aussi qu'elle éclairera ? » (De Fontenelle 1686)



La problématique est posée scientifiquement dès le XVII<sup>ème</sup> siècle :

- les étoiles sont des Soleils
- sont-elles accompagnées de planètes ?
- ces planètes peuvent-elles être « habitables » ? voir habitées ?

# Intro : Histoire & différents types de planètes

## Les étoiles et planètes extra-solaires :

«Les voilà donc lumineuses par elles-même  
Les étoiles fixes sont autant de Soleils  
fixe n'en aura-t-elle pas

Il faudra attendre plus de 300 ans pour avoir  
des éléments de réponses scientifiques...

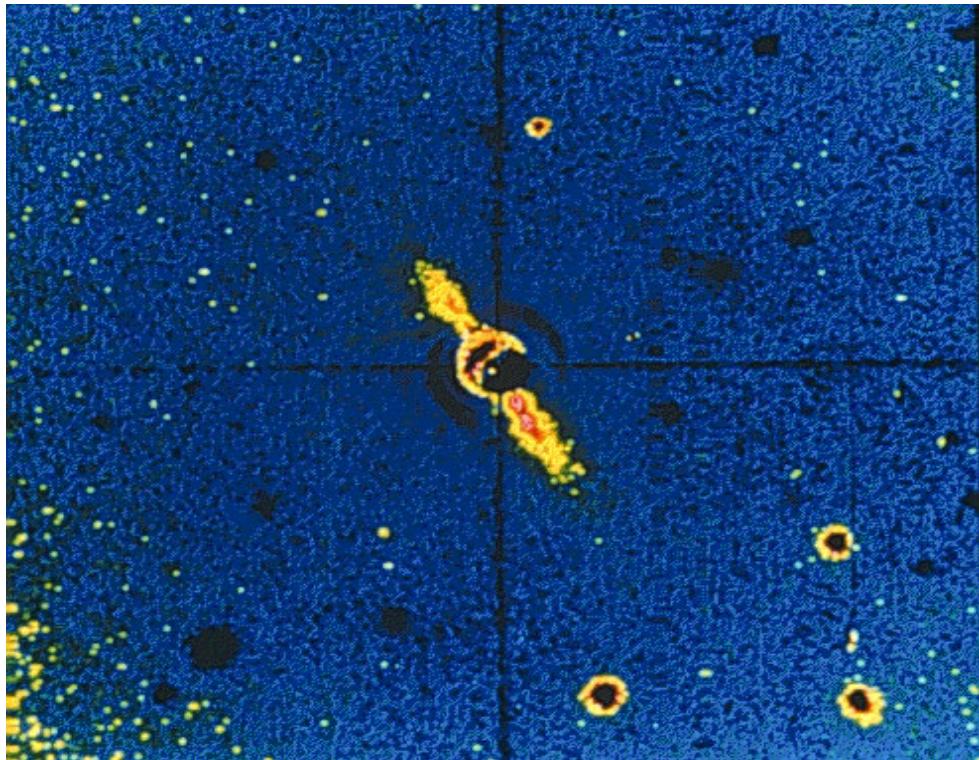
Pourquoi chaque étoile



La problématique est posée  
scientifiquement dès le XVII<sup>ème</sup>  
siècle :

- les étoiles sont des Soleils
- sont-elles accompagnées de planètes ?
- ces planètes peuvent-elles être « habitables » ? voir habitées ?

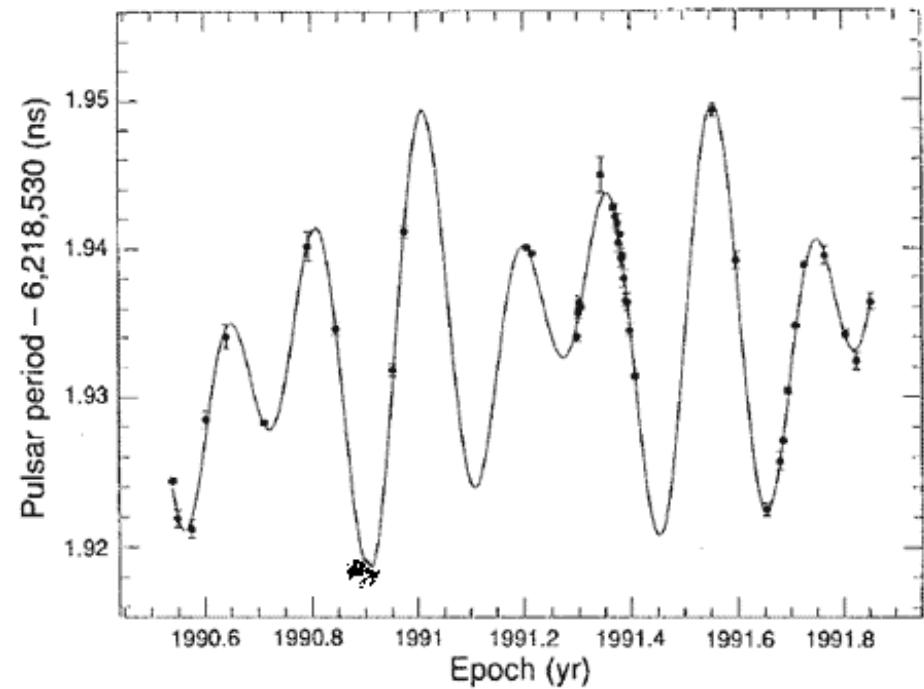
# Intro : Histoire & différents types de planètes



Smith & Terrile 1984

Image d'un disque circumstellaire autour de  $\beta$  Pictoris

Disque de poussière, qq 10 Myr, postérieur à la formation planétaire



Wolszczan & Frail 1992

Découverte de 2 planètes autour du pulsar PSR1257+12 (2.8 et 3.4  $M_{\text{TERRE}}$ ).

Par chronométrage du pulsar

# Intro : Histoire & différents types de planètes

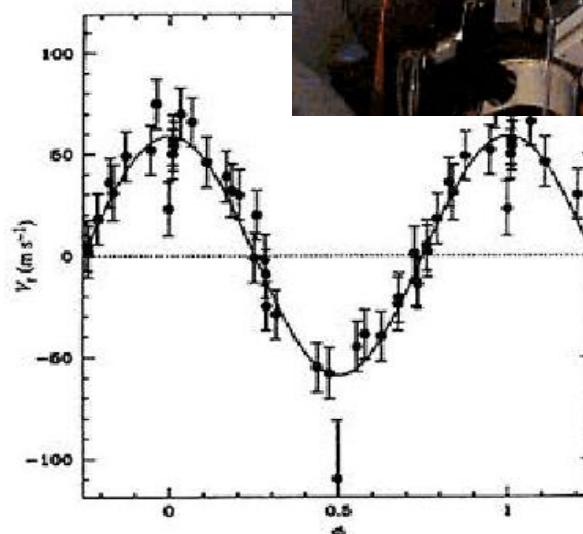


Mayor & Queloz (1995)

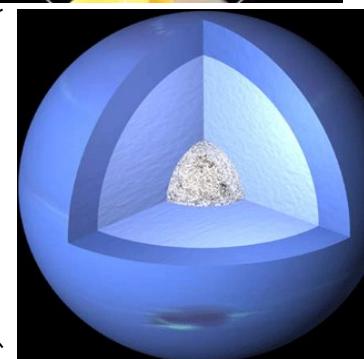
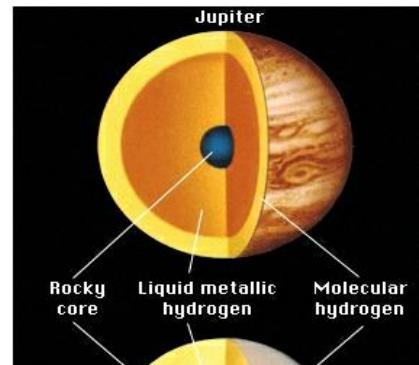
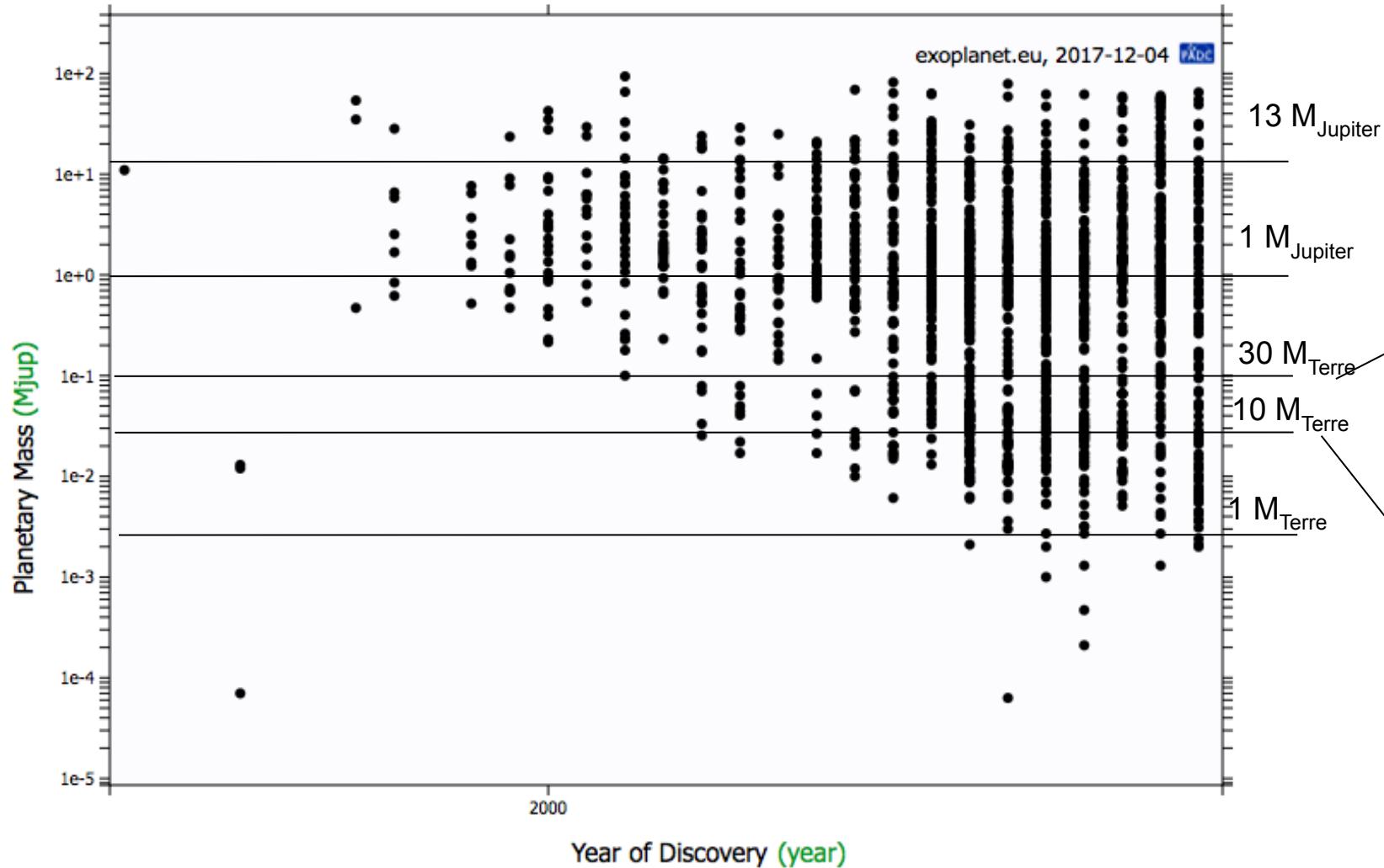
Découverte d'une planète autour d'une étoile de type solaire :  
51 Peg

La moitié de la masse de Jupiter ( $0.46M_{JUP} = 146 M_{TERRE}$ )

20 fois plus proche de son étoile que la Terre ne l'est du Soleil ;  
période  $\sim 4$  jours

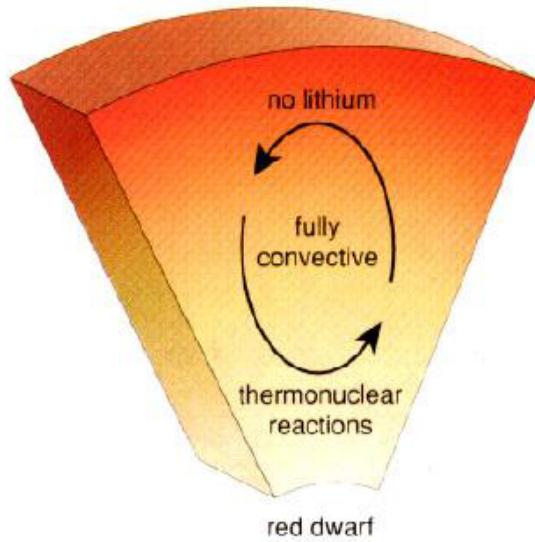


# Intro : Histoire & différents types de planètes



Mars 2019 : ~ 3999 exoplanètes détectées

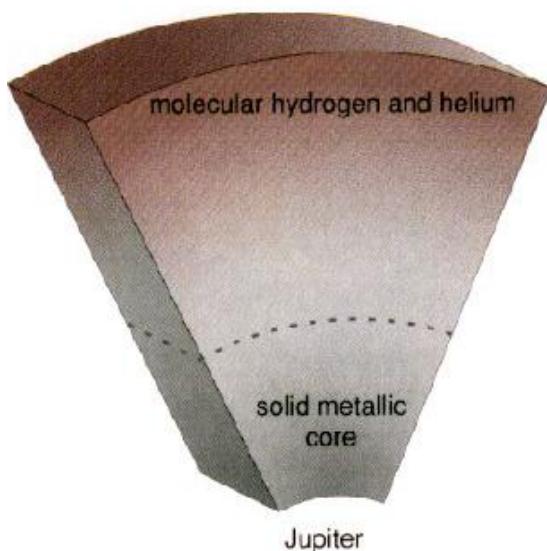
# Intro : Définition Exoplanètes



**Etoiles de très faible masse :**

$$M > 70M_{JUP}$$

Réactions nucléaires stables

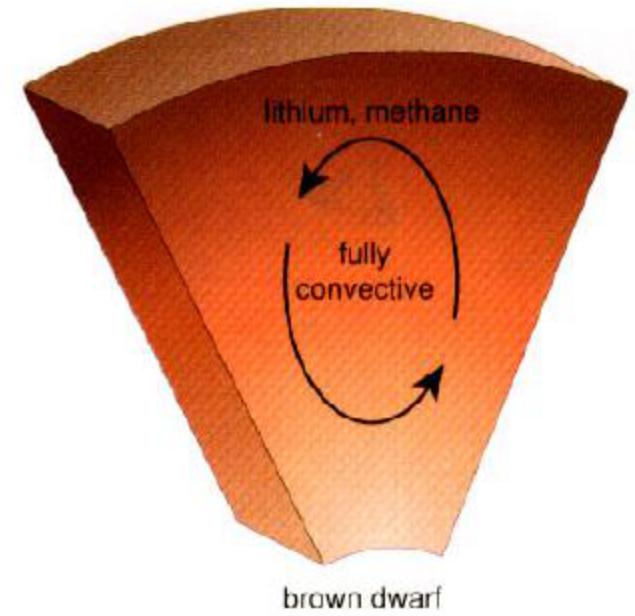


**Planètes :**

$$M < 13M_{JUP}$$

Aucune fusion nucléaire

Cœur d'éléments lourds



**Naines brunes :**

$$70M_{JUP} > M > 13M_{JUP}$$

Fusion nucléaire temporaire

### Astrometric Method

$$\theta'' = \left( \frac{M_p}{M_*} \right) \left( \frac{a}{r} \right) \approx \frac{10^{-3}}{r(\text{pc})} \left[ \frac{P(\text{yr})}{M_*(\odot)} \right]^{2/3} M_p(J)$$

$$V_r(\text{m/s}) \approx \frac{30}{[P(\text{yr})]^{1/3}} \frac{M_p(J) \sin i}{[M_*(\odot)]^{2/3}}$$

Microlensing Method

$$R_E^2 = \frac{4GMD}{c^2}, \quad D = \frac{D_d D_s}{D_s}, \quad t_0 = \frac{R_E}{V_e}$$

$$t_0 = \frac{2D_L \theta_E}{V_L} = \frac{2D_L}{V_L} \sqrt{\frac{4GM(1 - D_d/D_s)}{c^2 D_d}}$$

$$A = \frac{u^2 + 2}{u(u^2 + 4)^{1/2}}, \quad \xrightarrow{\text{impact parameter}} \quad u = \text{impact parameter}$$

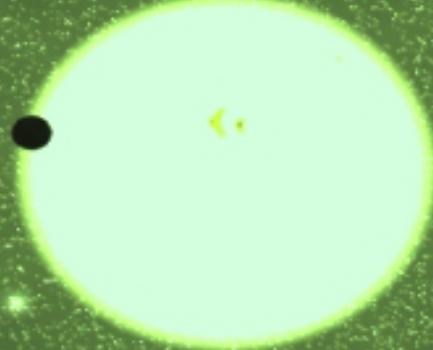
### Radial Velocity Method

$$K = \left( \frac{2\pi G}{P} \right)^{1/3} \frac{M_p \sin i}{(M_* + M_p)^{2/3}} \frac{1}{\sqrt{1 - e^2}}$$

$$M_p \sin i = \left( \frac{P}{2\pi G} \right)^{1/3} K_* M_*^{2/3} (1 - e^2)^{1/2}$$

### Direct Detection

$$B \geq \frac{\lambda D}{r} \approx \left( \frac{\lambda}{10 \mu\text{m}} \right) \left( \frac{D}{10 \text{pc}} \right) \left( \frac{r}{1 \text{AU}} \right)^{-1} \text{m}$$



### Effective Temperature

$$T_p = \frac{(1 - A)^{1/4}}{\sqrt{2}} \left( \frac{R_*}{r} \right)^{1/2} T_*$$

$$A_\oplus \sim 0.39, \quad T_* \sim 5770 \text{ K}, \quad r_\oplus \sim 1 \text{ AU} \\ \Rightarrow T_p \sim 280 \text{ K} \Rightarrow \text{Greenhouse Effect!}$$

### Transit Method

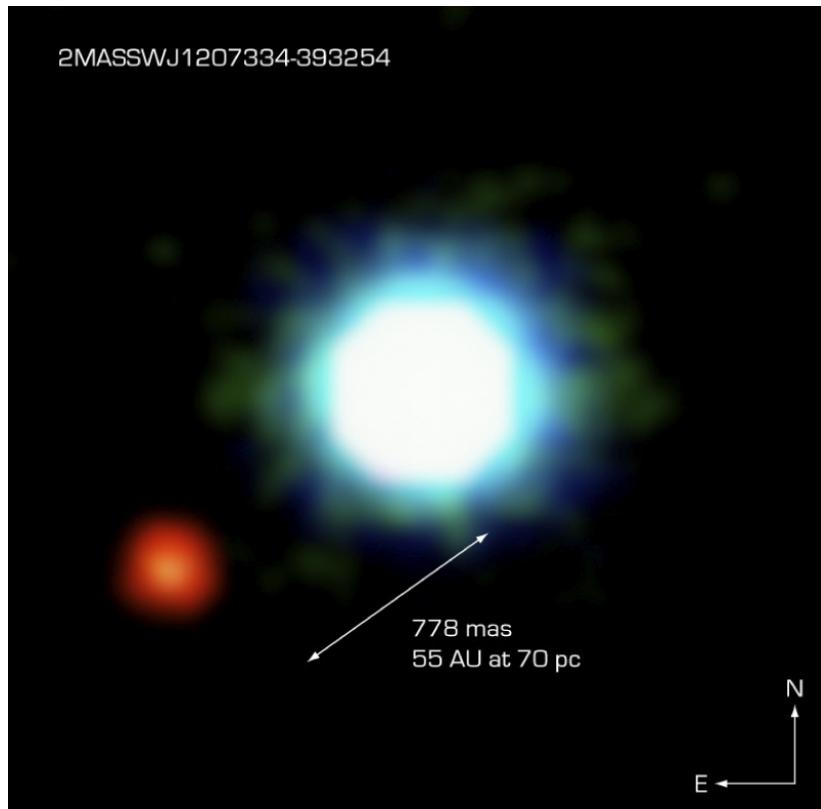
$$\frac{\Delta F}{F} = \left( \frac{R_p}{R_*} \right)^2, \quad t = \frac{P_p}{\pi} \left( \frac{R_* \cos \delta + R_p}{a_p} \right)$$

$$i_{\min} = \cos^{-1} \left( \frac{R_*}{a_p} \right), \quad \cos i = \frac{R_* \sin \delta}{a_p}$$

# Détections

# Détections :

Imagerie directe : aujourd'hui seul des planètes massives (qq  $M_{JUP}$ ) et jeunes (qq Myr) sont accessibles

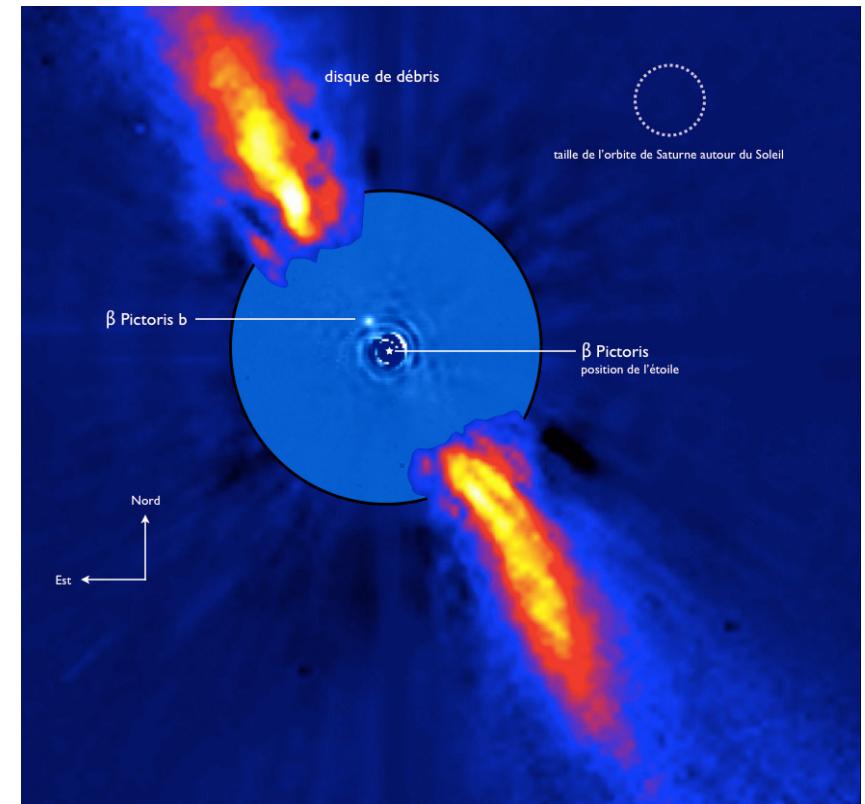


The Brown Dwarf 2M1207 and its Planetary Companion  
(VLT/NACO)

ESO PR Photo 14a/05 (30 April 2005)



2M1207 : Chauvin et al, 2005  
Objet centrale naine brune ( $30-40 M_{JUP}$ );  
planète massive ( $7M_{Jup}$ ), Objet jeune

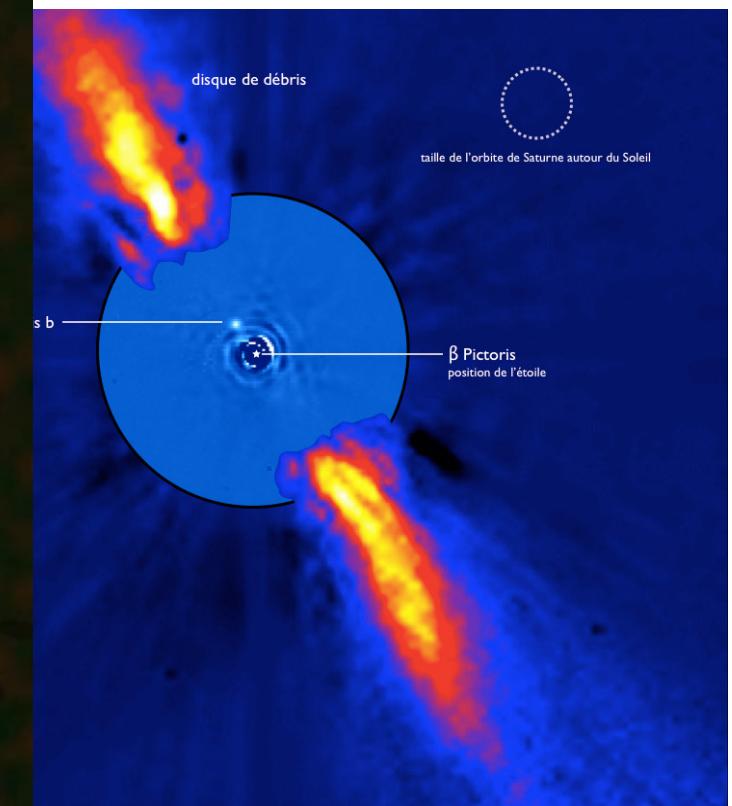
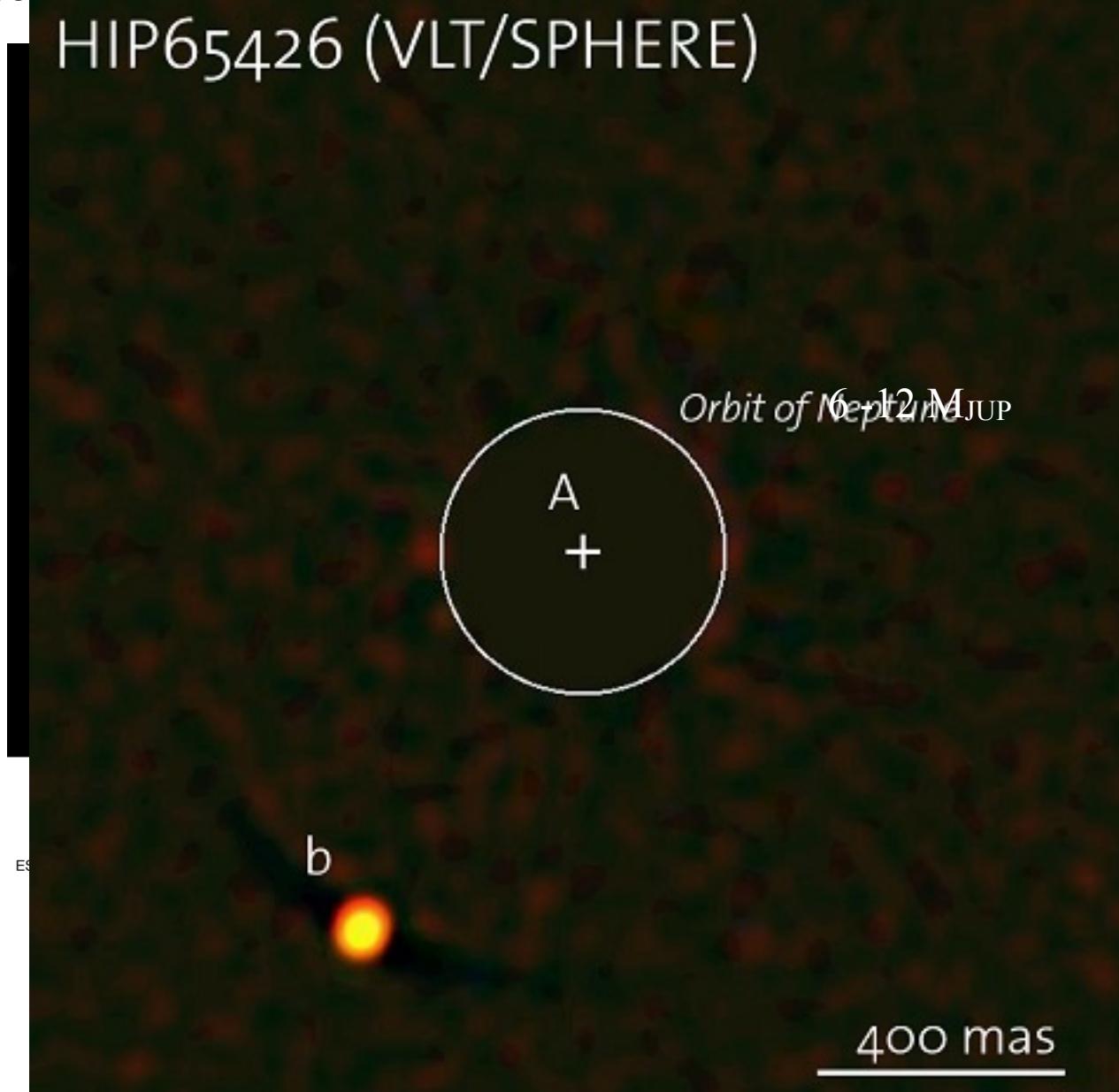


$\beta$  Pict : Lagrange et al, 2008  
planète massive ( $5-8M_{Jup}$ ), Objet jeune



# Détections :

Imagerie directe : aujourd'hui seul des planètes massives (qq  $M_{JUP}$ ) et jeunes (qq Myr) sont accessibles.



grange et al, 2008  
massive (5-8Mjup), Objet jeune

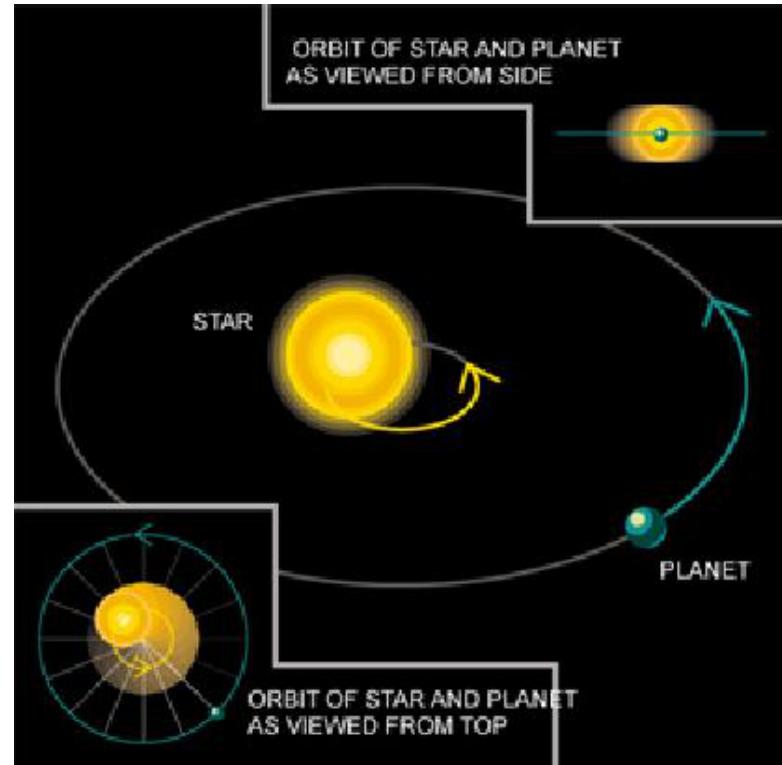
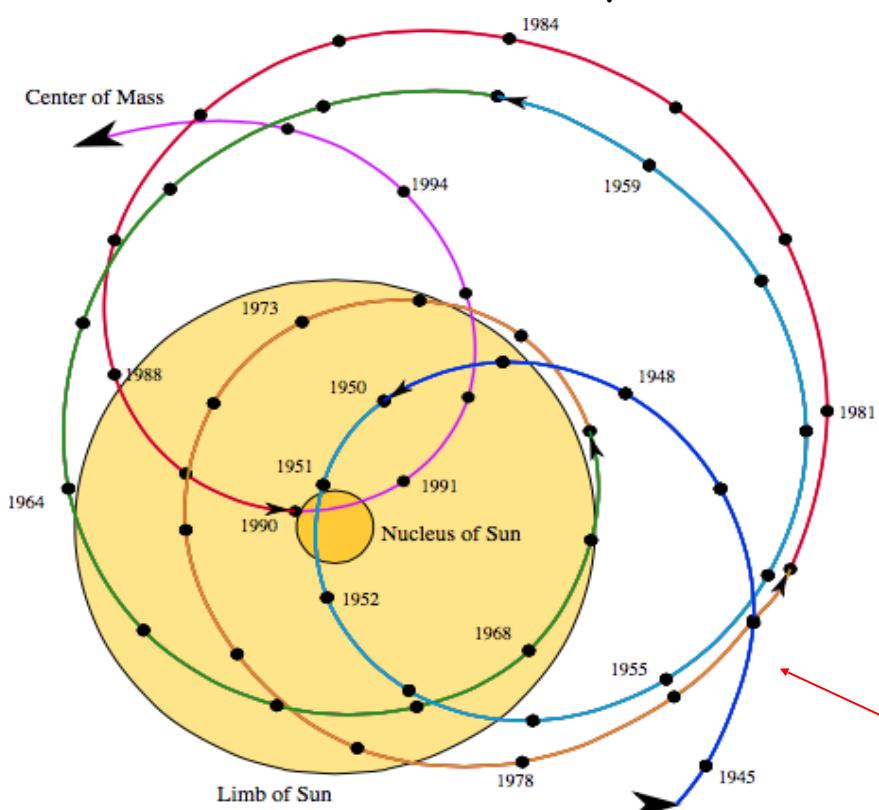


# Détections :

## Détection indirecte :

⇒ planète et étoile tournent autour de leur centre de masse commun

Système Soleil-Jupiter : le centre de masse est à l'intérieur du Soleil mais pas en son centre

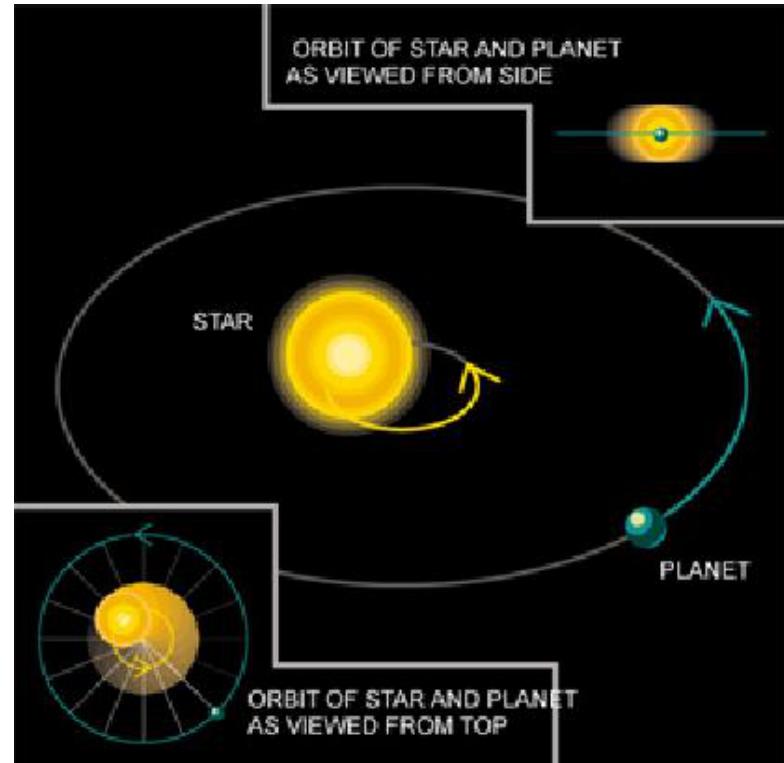
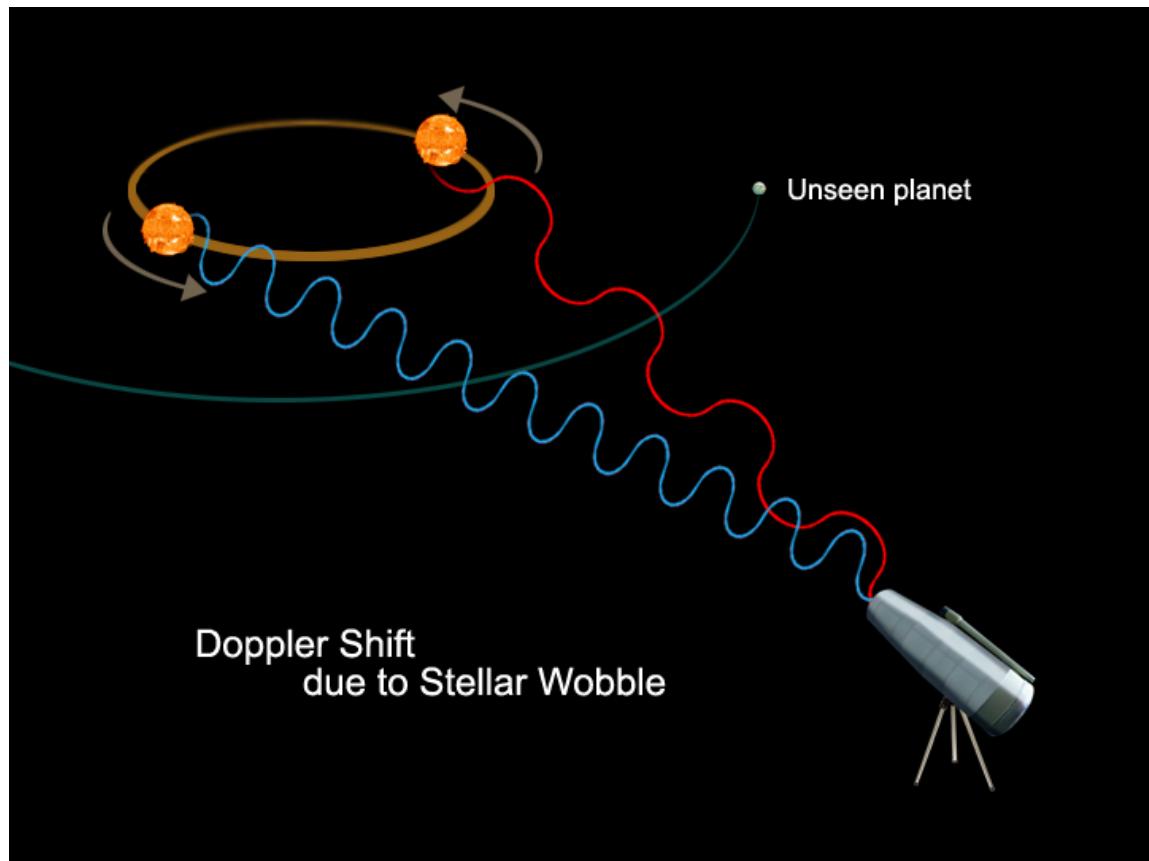


L'étoile subit un mouvement orbital détectable même si la planète est invisible

Mouvement du Soleil sur 50 ans

## Détection indirecte :

⇒ planète et étoile tournent autour de leur centre de masse commun



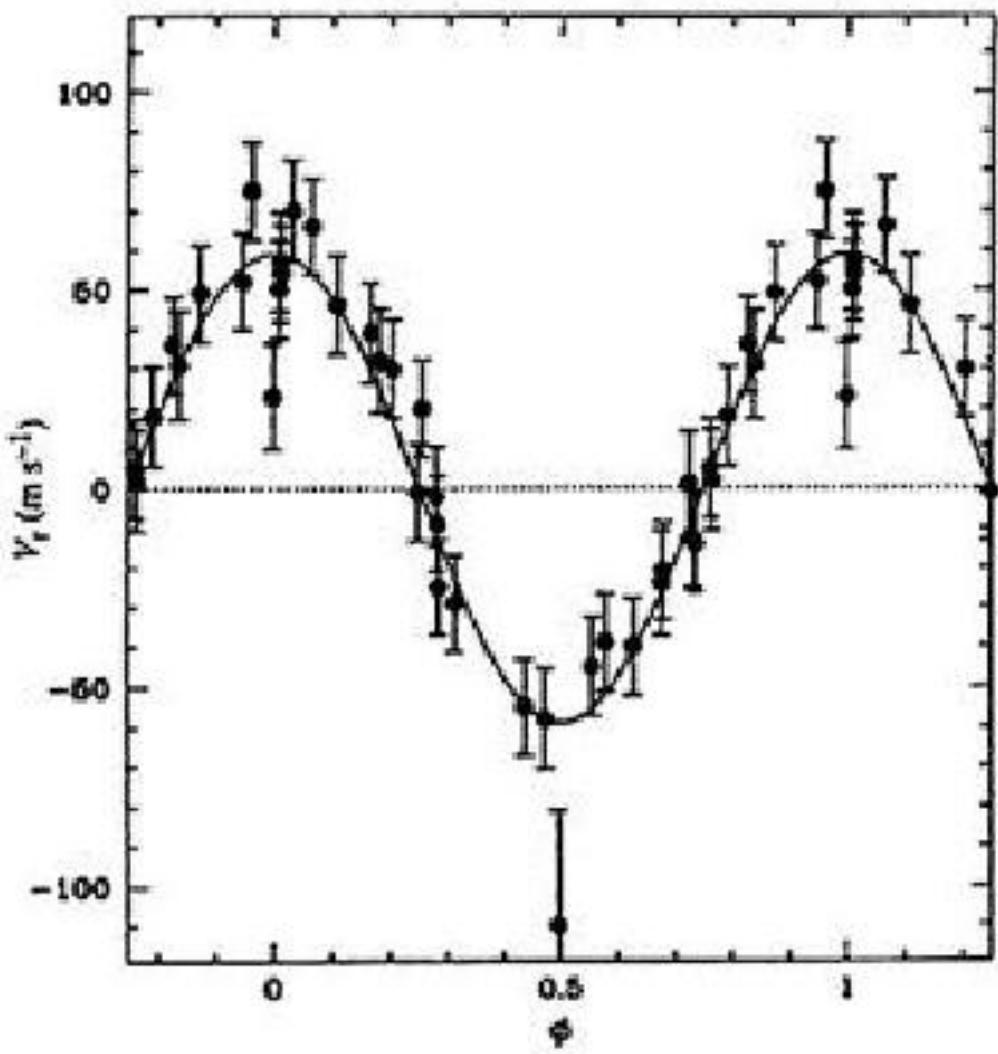
# Détection indirecte par vitesse radiale

Découverte en 1995 d'une planète autour de 51 Pégase

⇒ Observatoire de Haute-Provence, équipe genevoise

⇒ 20 fois plus proche de son étoile que la Terre ne l'est du Soleil

! Permet la mesure de la masse de la planète

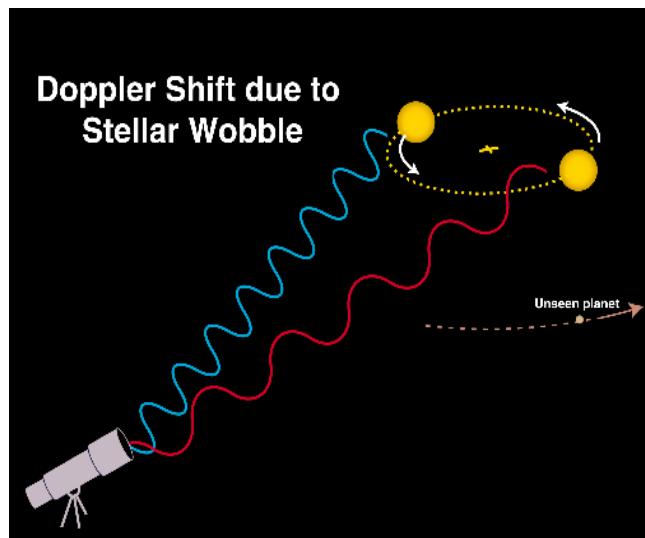


# Détections :

## Détection indirecte par vitesse radiale :

Mesure de la vitesse de l'étoile dans l'axe de visée

$$K = \frac{m \cdot \sin i}{(M_* + m)^{2/3} \cdot P^{1/3} \sqrt{1 - e^2}} \cdot \frac{(2\pi G)^{1/3}}{a^{1/2} \sqrt{1 - e^2}} \quad (6)$$



Dans le cas d'une orbite circulaire, en négligeant  $m$  devant  $M_*$ , et dans les unités usuelles de l'Astronomie :

$$K[m/s] = 203 \cdot \frac{m[M_{Jup}] \cdot \sin i}{M_*^{2/3}[M_\odot] \cdot P^{1/3}[j]} = 28.45 \cdot \frac{m[M_{Jup}] \cdot \sin i}{\sqrt{a[UA] \cdot M_*[M_\odot]}} \quad (7)$$

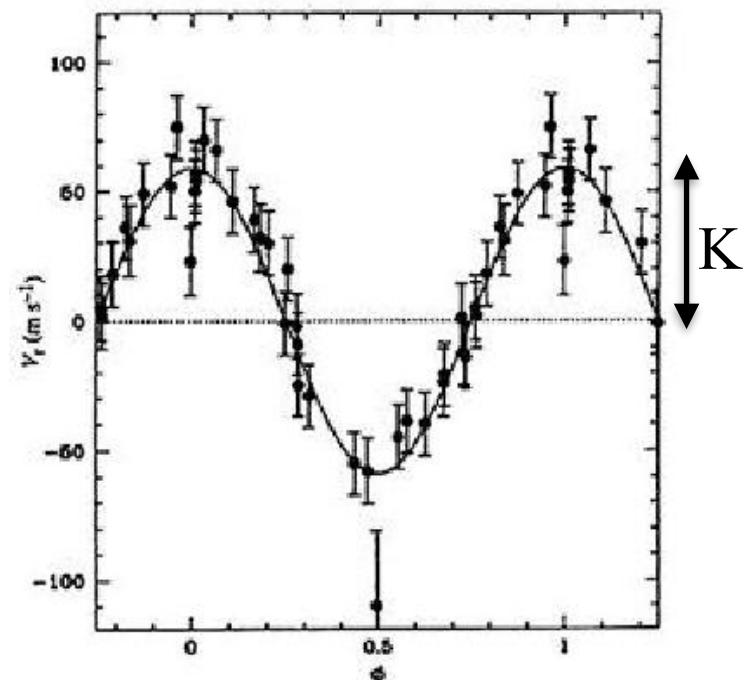
$K$  : semi-amplitude de la vitesse radiale

$m$  : masse de la planète

$M_*$  : masse de l'étoile

$P$  : Période orbitale

$a$  : séparation orbitale



Une méthode plus sensible aux planètes proches de leurs étoiles

# Détections :

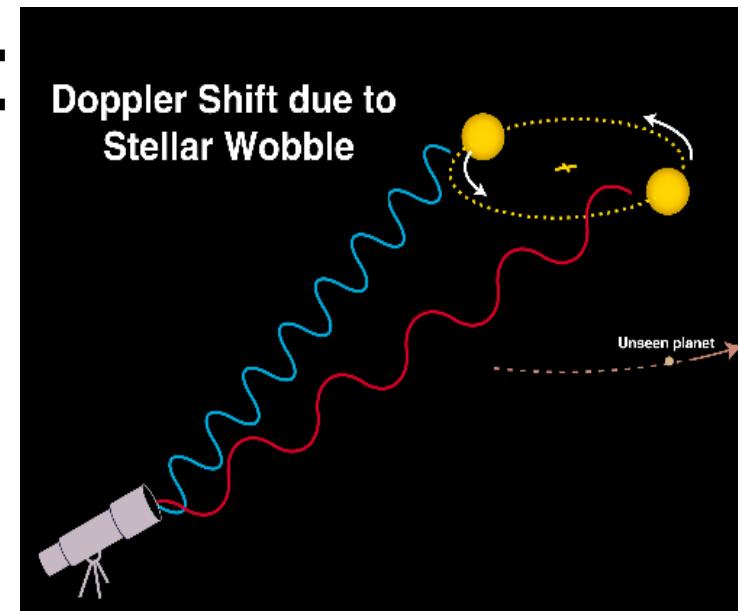
## Détection indirecte par vitesse radiale :

Mesure de la vitesse de l'étoile dans l'axe de visée

## Variation de la vitesse de l'étoile :

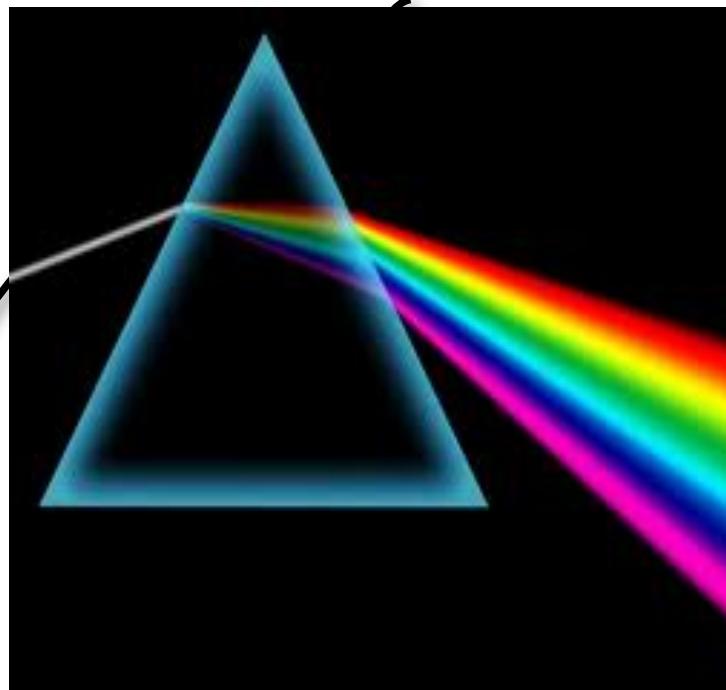
1/ Dans le cas d'une étoile de  $1M_{\text{solaire}}$

	$P = 10j$	$P = 100j$	$P = 1\text{an}$	$P = 10 \text{ ans}$
$10 M_{\text{TERRE}}$	3 m/s	1.4 m/s	0.9 m/s	0.4 m/s
$1 M_{\text{TERRE}}$	0.3 m/s	0.14 m/s	0.09 m/s	0.04 m/s



# Détections :

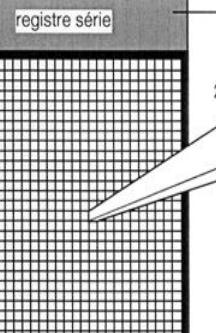
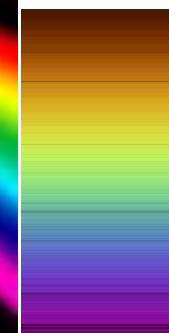
## Détection indirecte par vitesse radiale :



Spectre stellaire



Projeté sur un détecteur CCD

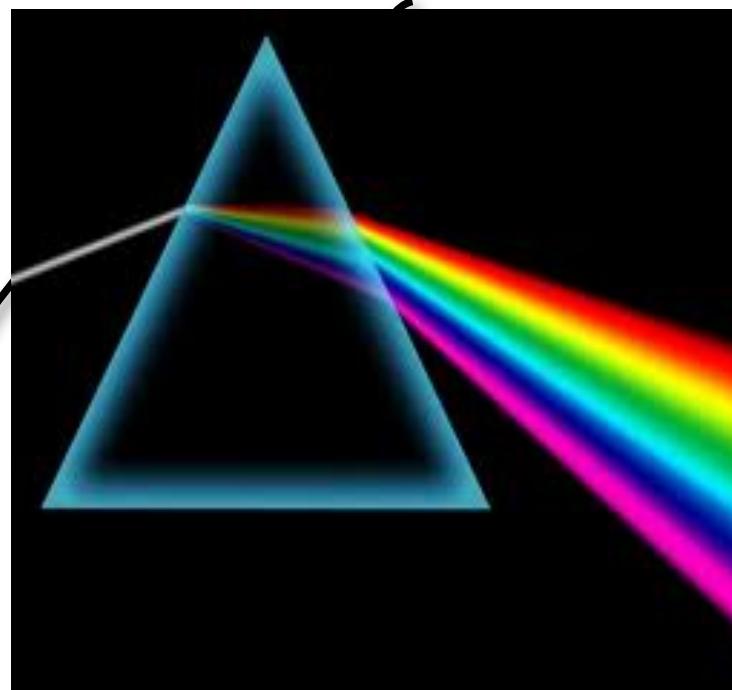


vers l'amplific

pavé de 512 x 512 pixels

# Détections :

## Détection indirecte par vitesse radiale :



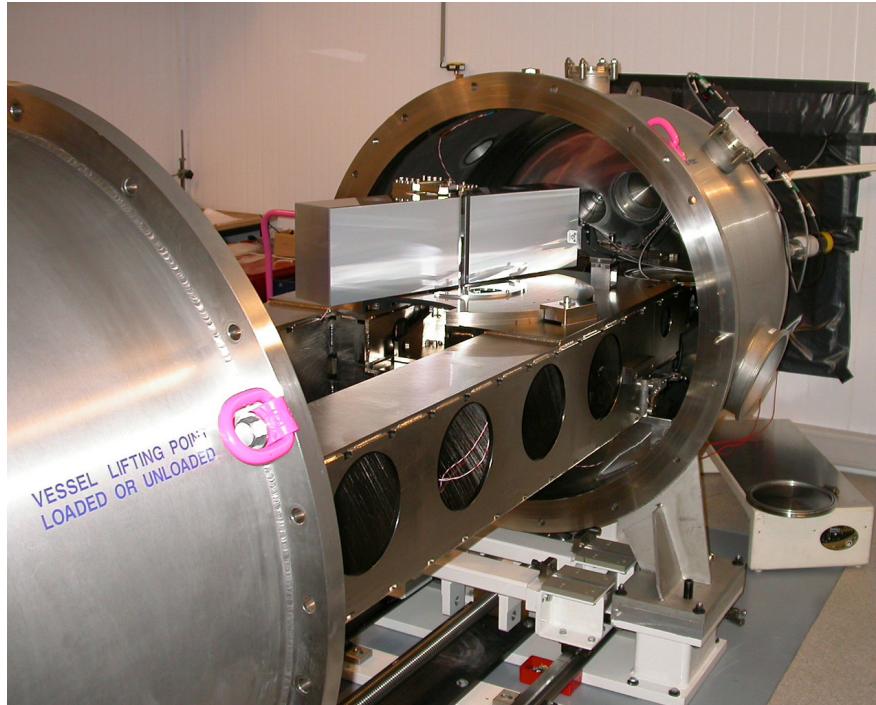
Déplacement du spectre  
Sous effet Doppler pour  
 $\Delta V_r = 1 \text{ m/s}$

En longueur d'onde :  
 $\Delta \lambda = 5 \cdot 10^{-6} \text{ nm}$

Physiquement sur  
le détecteur  
 $\Delta x = 10 \text{ nm}$

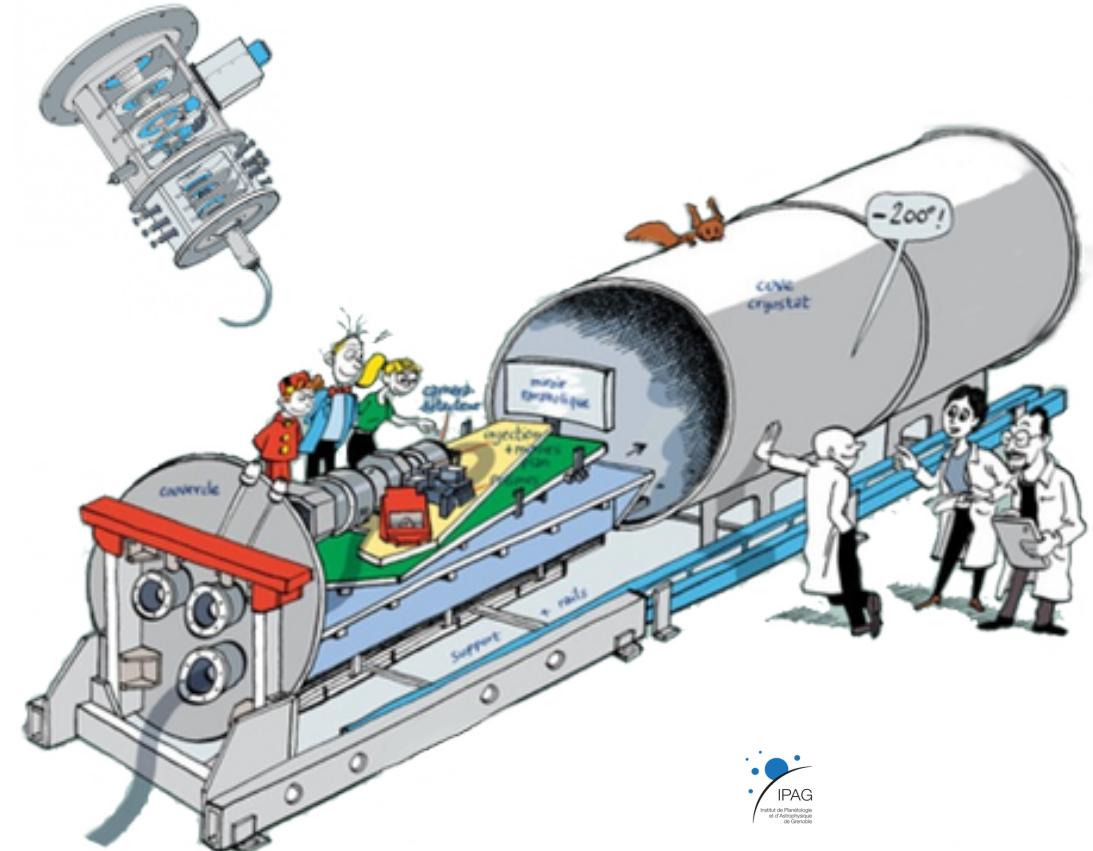
# Détections :

## Détection indirecte par vitesse radiale :



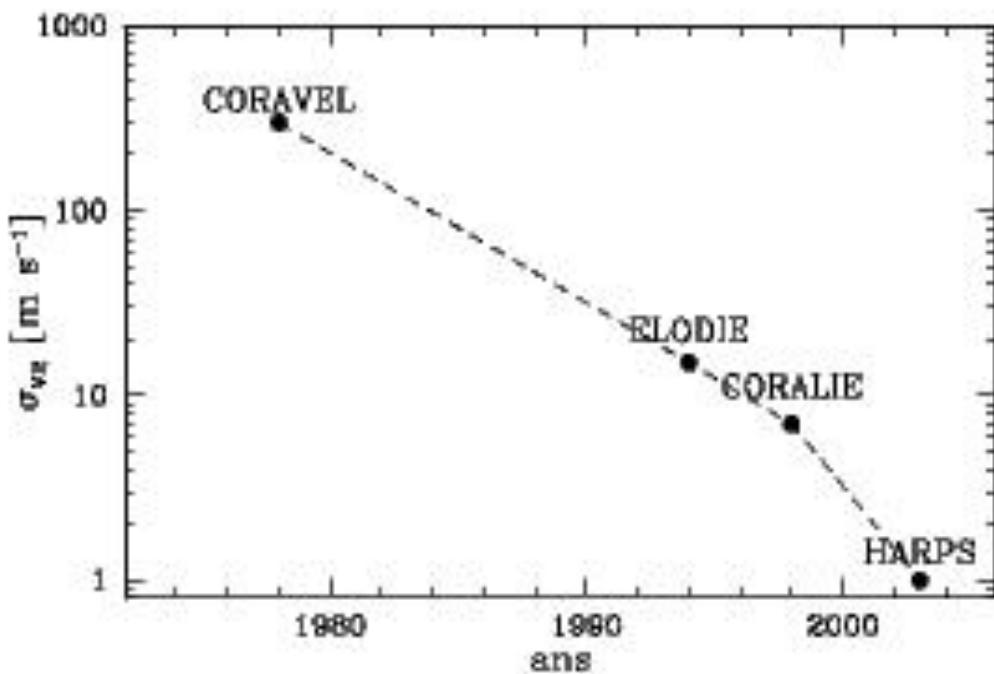
Besoin d'une grande stabilité :

instrument sous vide et stabilisé à 1/1000 K



# Détections :

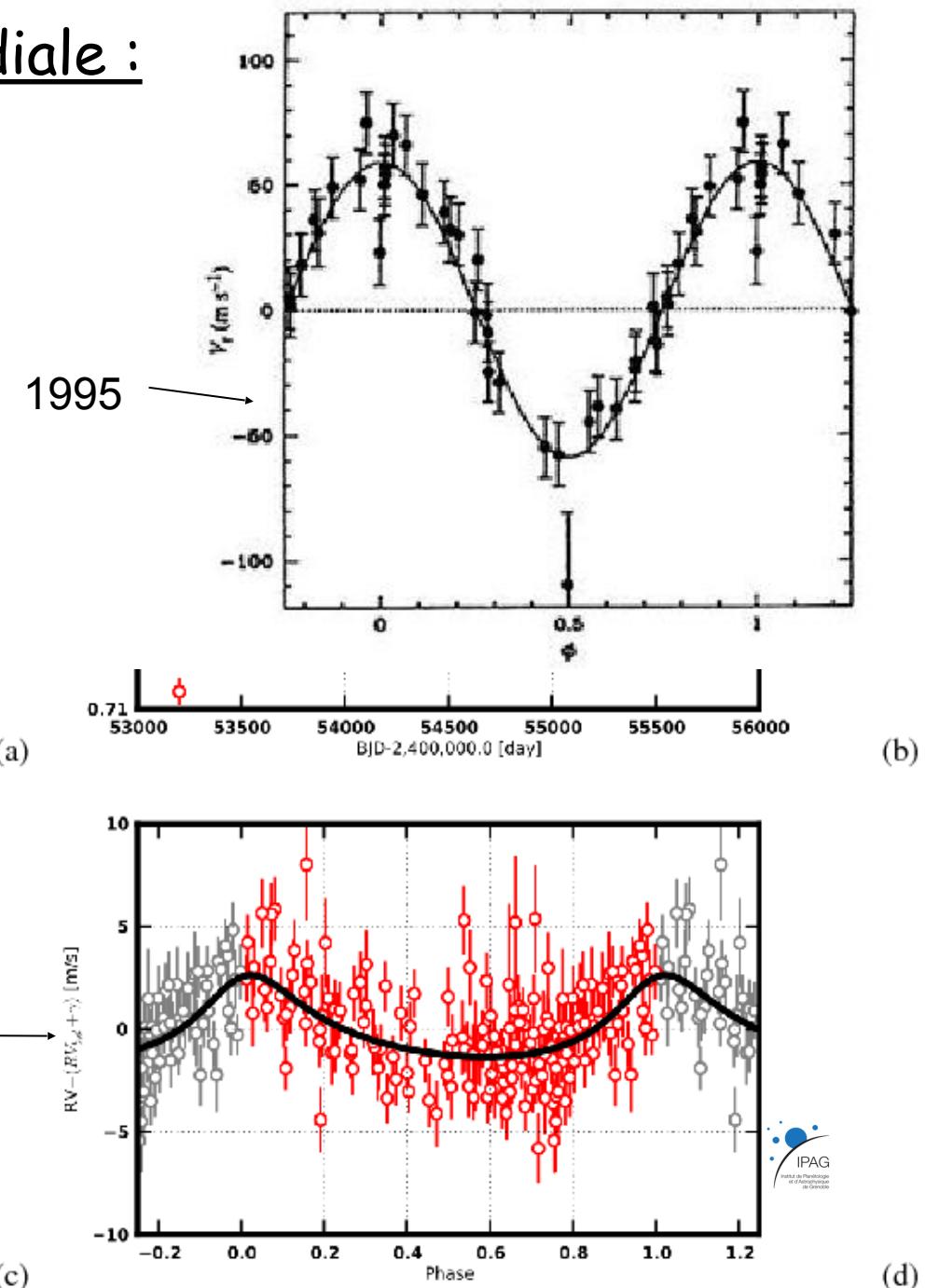
## Détection indirecte par vitesse radiale :



Actuellement : HARPS  $\sim 1\text{m/s}$  sur le long terme

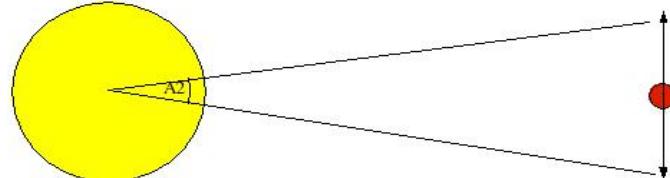
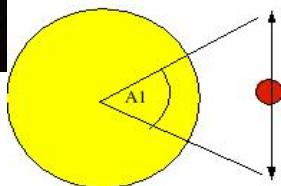
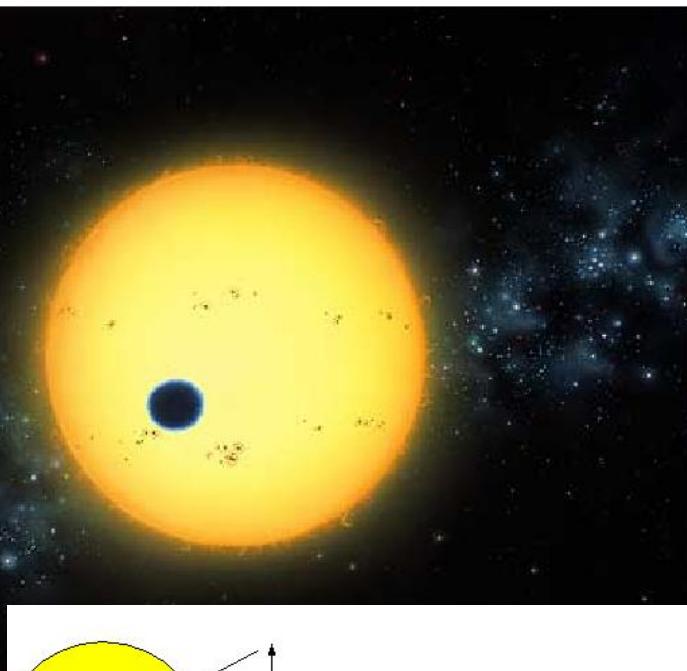
2012

Futur : ESPRESSO (VLT)  $\sim 30\text{ cm/s}$   
SPIROU (CFHT)  $\sim 1\text{m/s}$  en infra-rouge



# Détections :

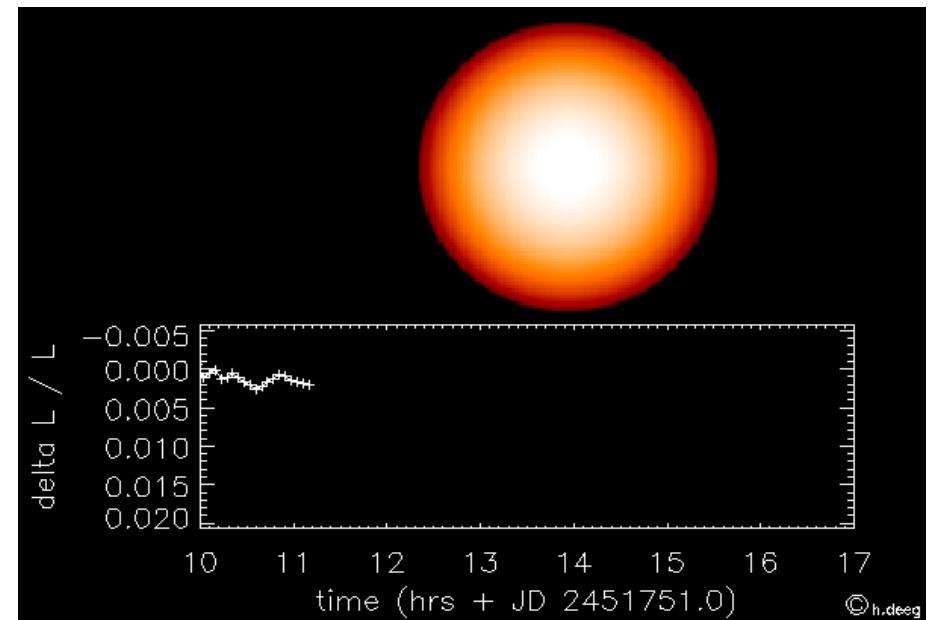
## Transit :



La planète passe devant son étoile et en fait diminuer l'éclat

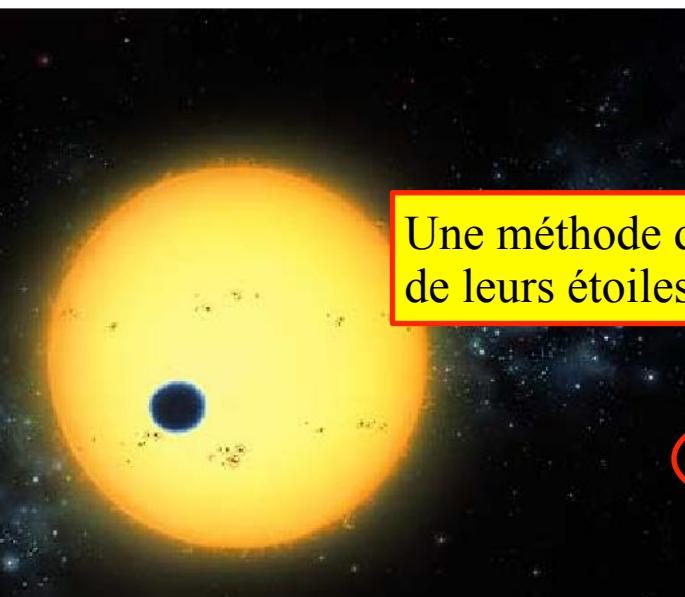
Ce sont des cas particuliers

Plus probable si la période de la planète est très courte



# Détections :

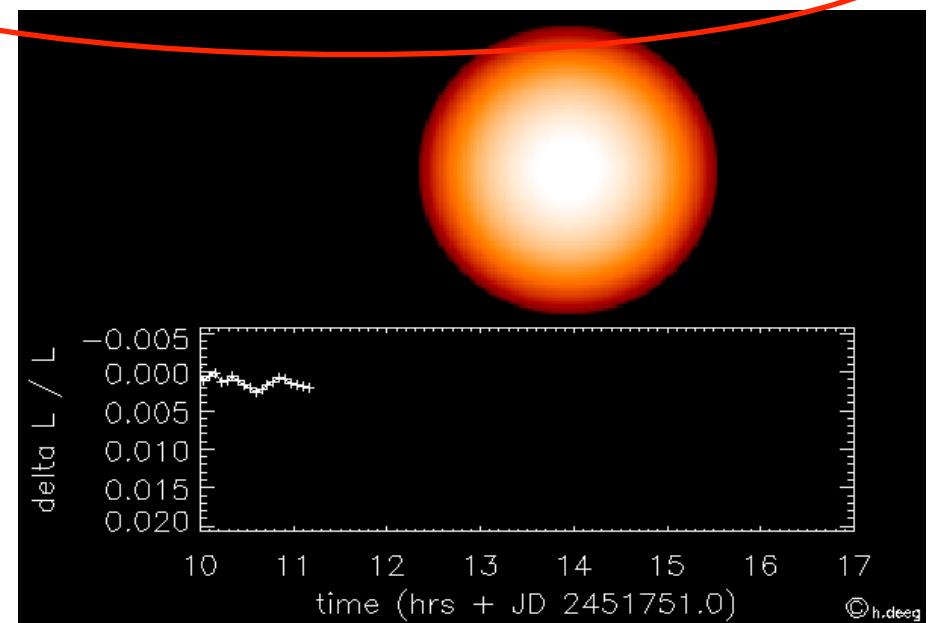
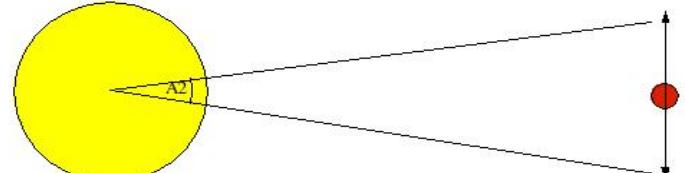
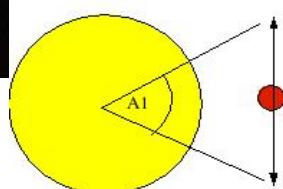
## Transit :



La planète passe devant son étoile et en fait diminuer l'éclat

Une méthode détectant majoritairement des planètes proches de leurs étoiles

Plus probable si la période de la planète est très courte



# Détections :

## Transit :

Profondeur du transit :

$$\Delta F = \frac{F_{off} - F_{on}}{F_{off}} = (r/R)^2$$

Permet d'extraire :

- période
- rayon de la planète

Plus probable pour :

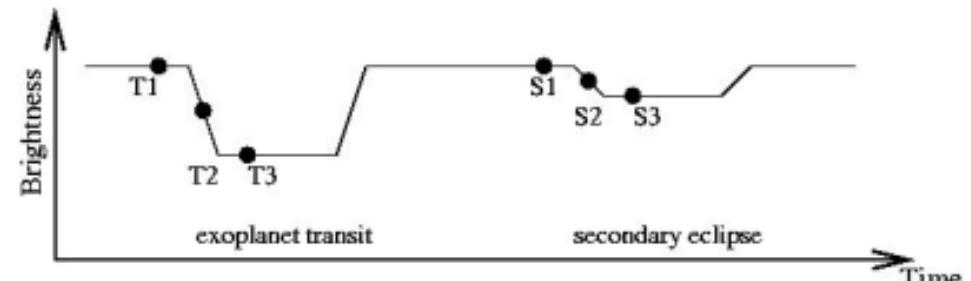
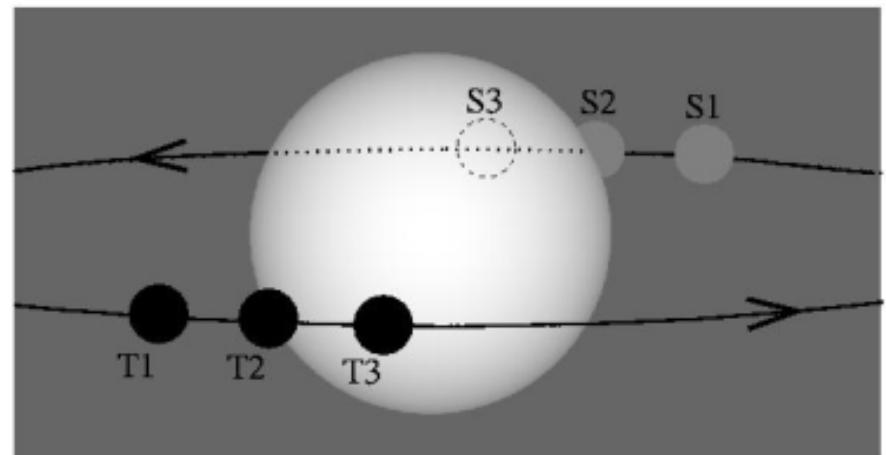
- les périodes courtes

$F_{off}$  : Flux stellaire en dehors du transit

$F_{on}$  : Flux stellaire au maximum du transit

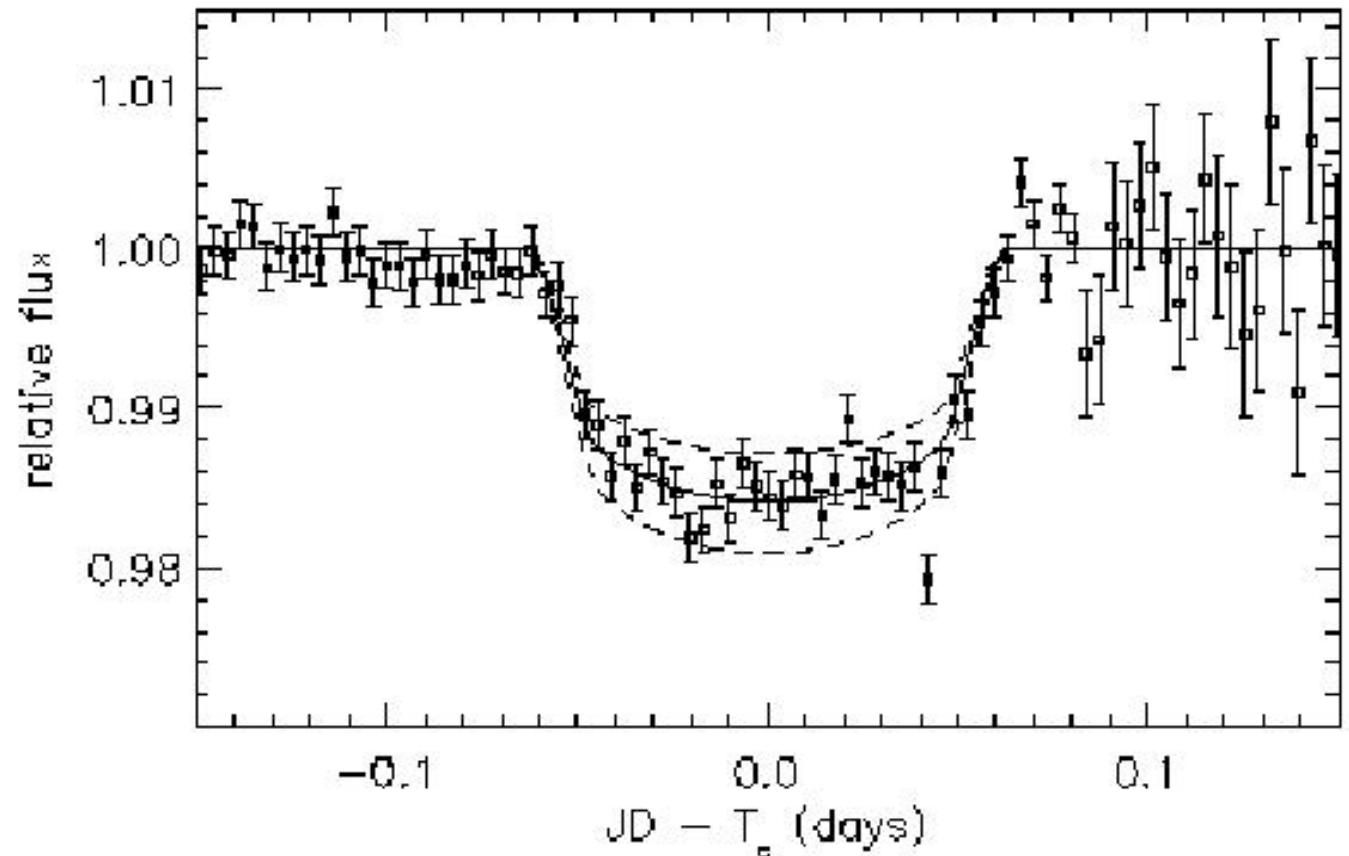
$r$  : rayon de la planète

$R$  : rayon de l'étoile



# Détections :

## Transit :



Premier cas observé en 2000

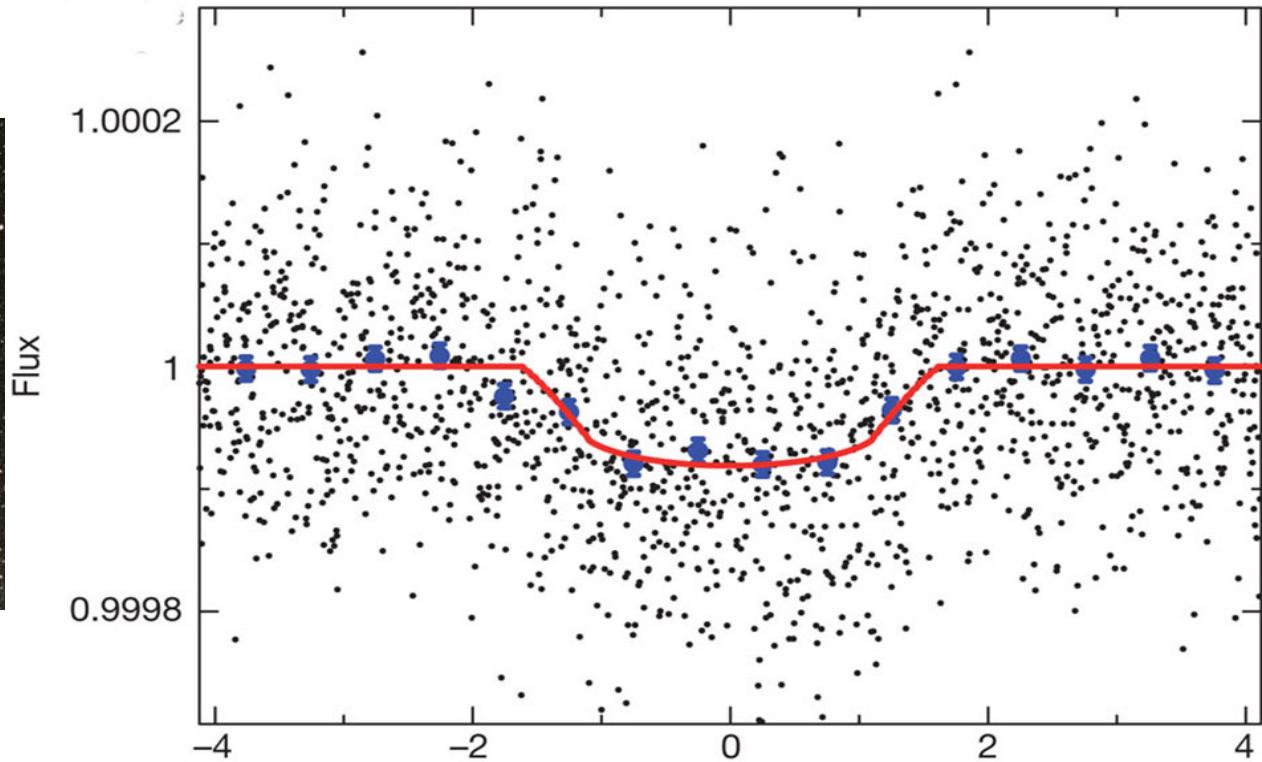
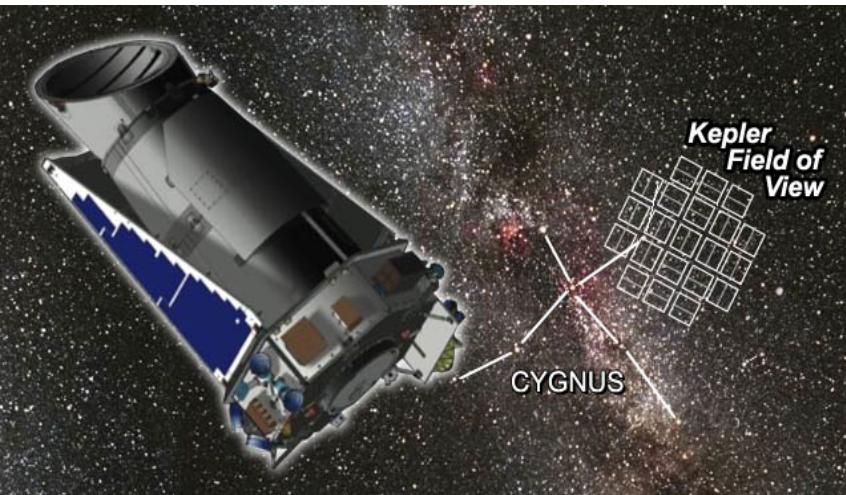
⇒ Charbonneau et al. 2000 ; Mazeh et al. 2000



⇒ HD 209458

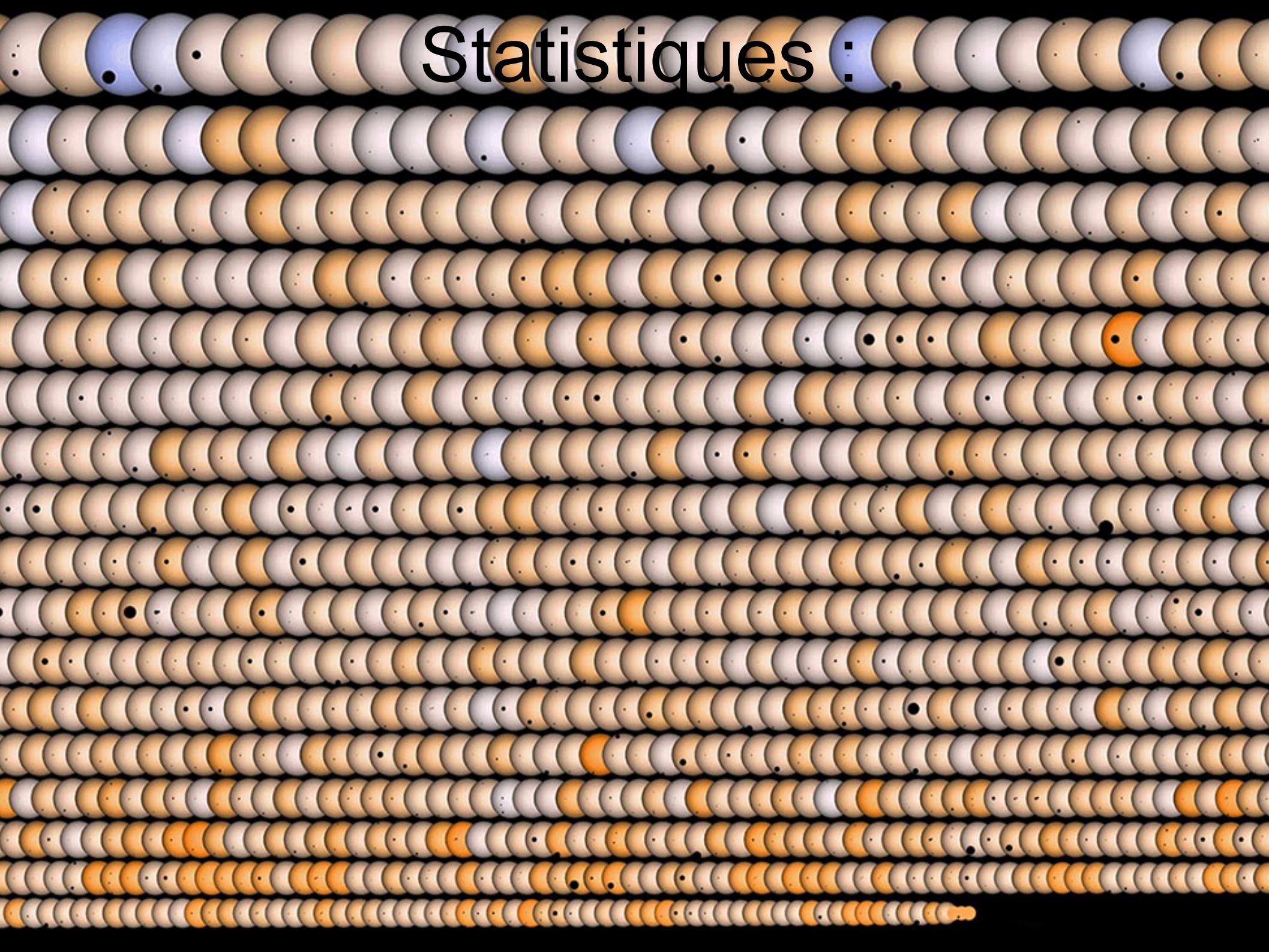
# Détections :

## Transit :



Le signal est parfois très faible... mesure via des satellites  
Développements algorithmiques pour extraire le signal.

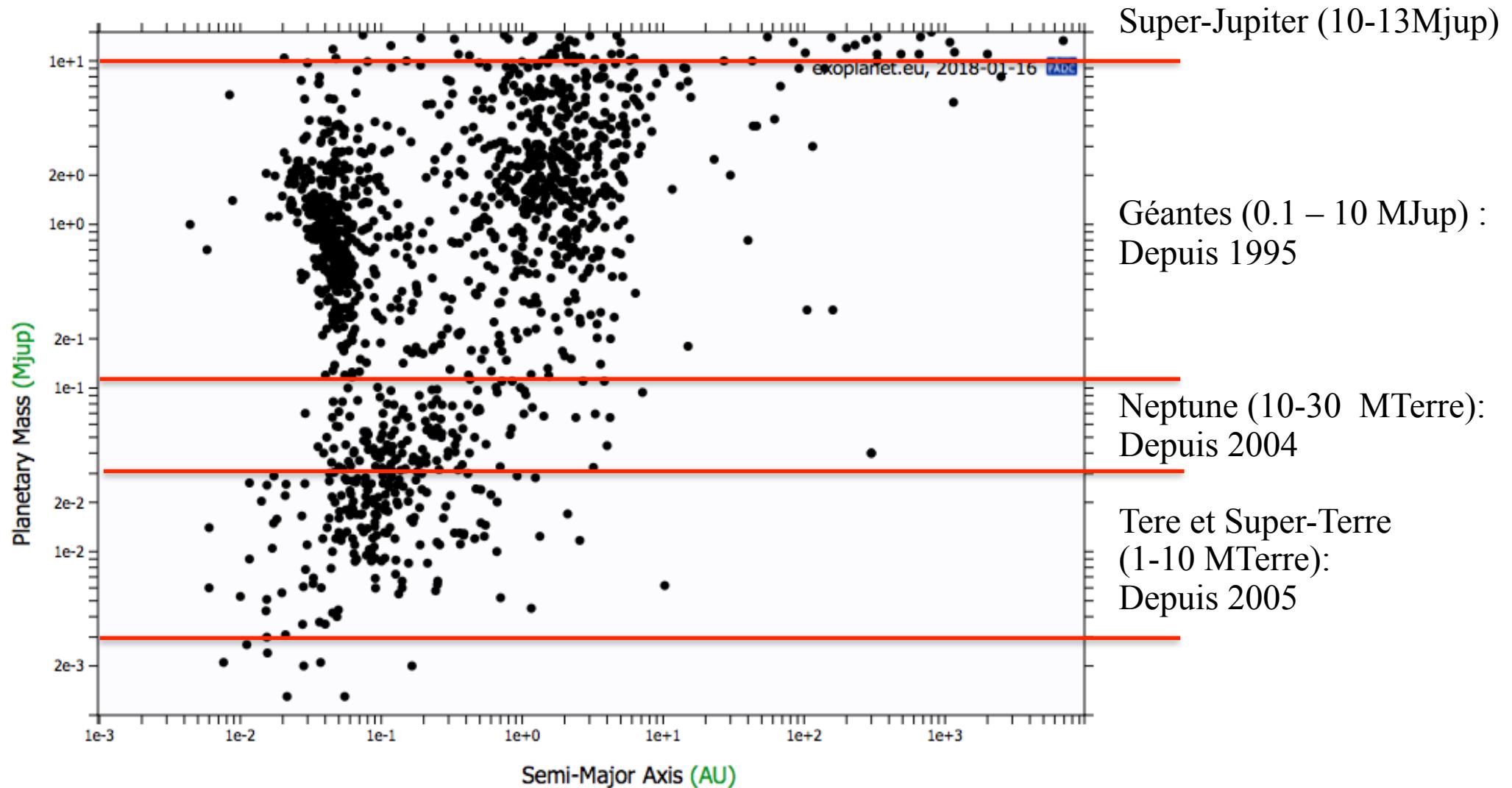
⇒ Kepler 186f : diamètre 15000km  
profondeur du transit  $\sim 1/10000$



# Statistiques :

# Statistiques :

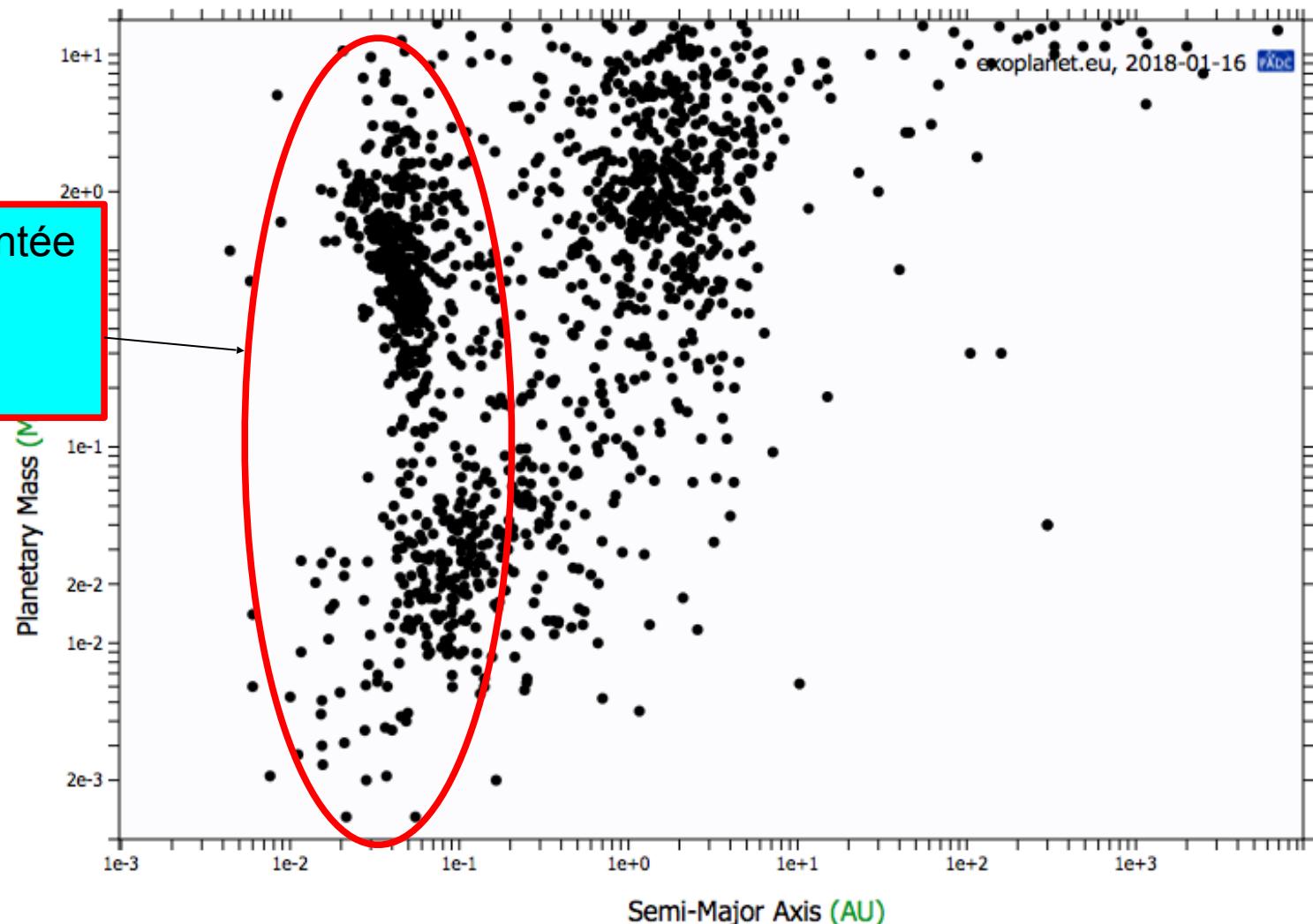
Diagramme masse-période :



# Statistiques :

Diagramme masse-période :

Période courte sur-représentée  
Bias observationnel



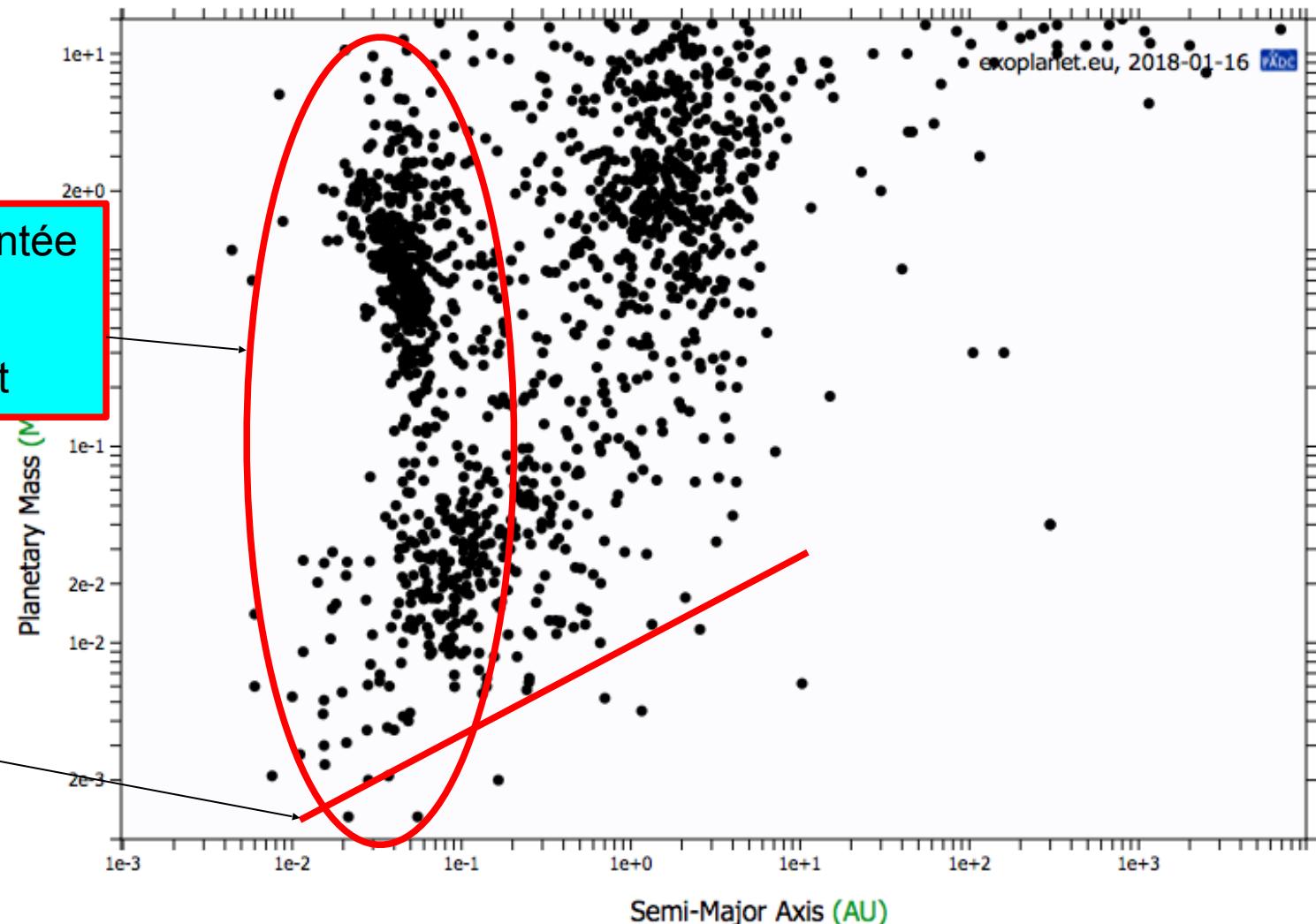
# Statistiques :

Diagramme masse-période :

Période courte sur-représentée

Bias observationnel :  
Planète détectée par transit

Limite de détection  
 $V_r \sim 1 \text{ m/s}$



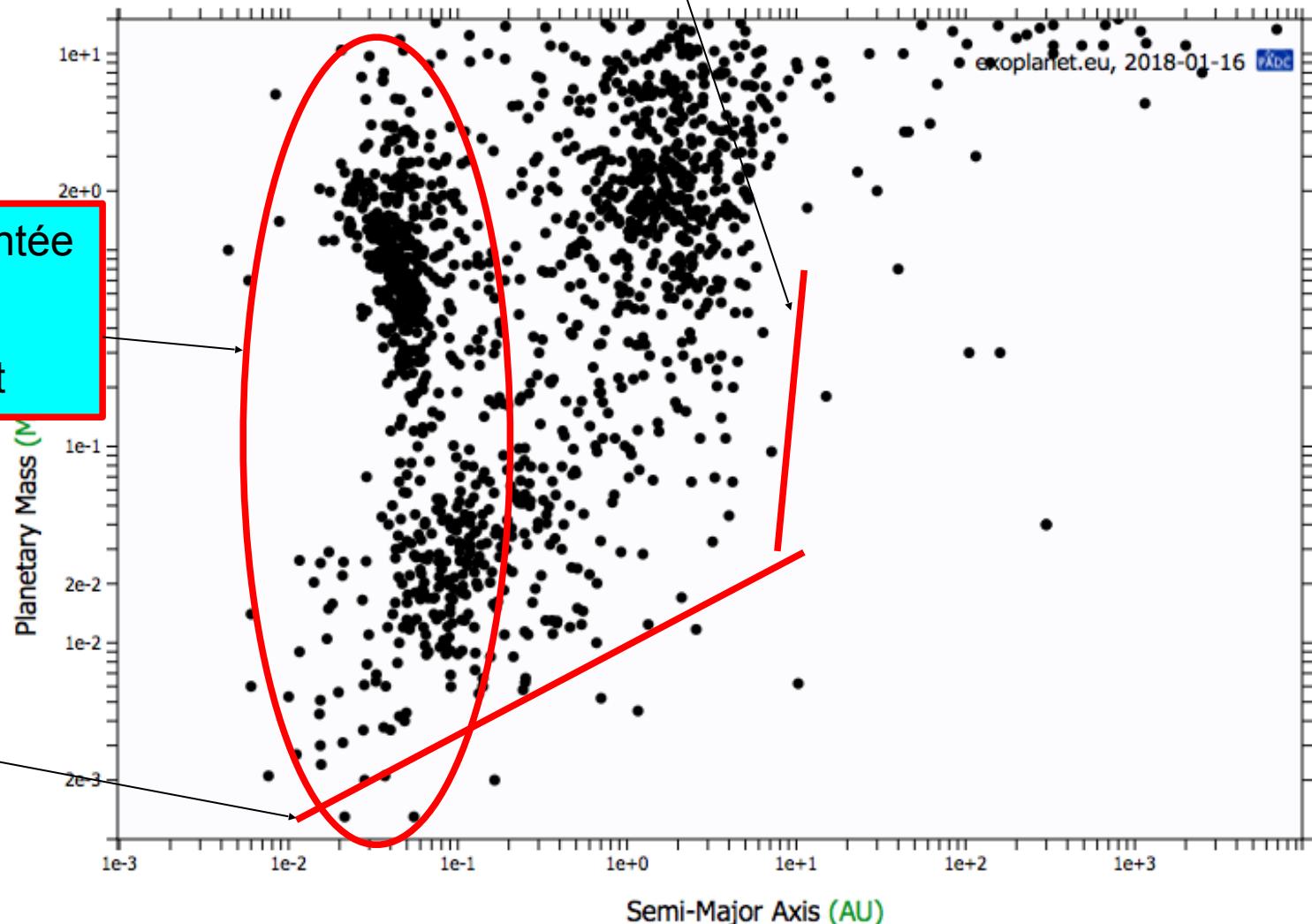
# Statistiques :

Diagramme masse-période :

20 ans : durée typique  
des relevés Vr

Période courte sur-représentée  
Bias observationnel :  
Planète détectée par transit

Limite de détection  
 $V_r \sim 1 \text{ m/s}$



# Statistiques :

## Diagramme masse-période :

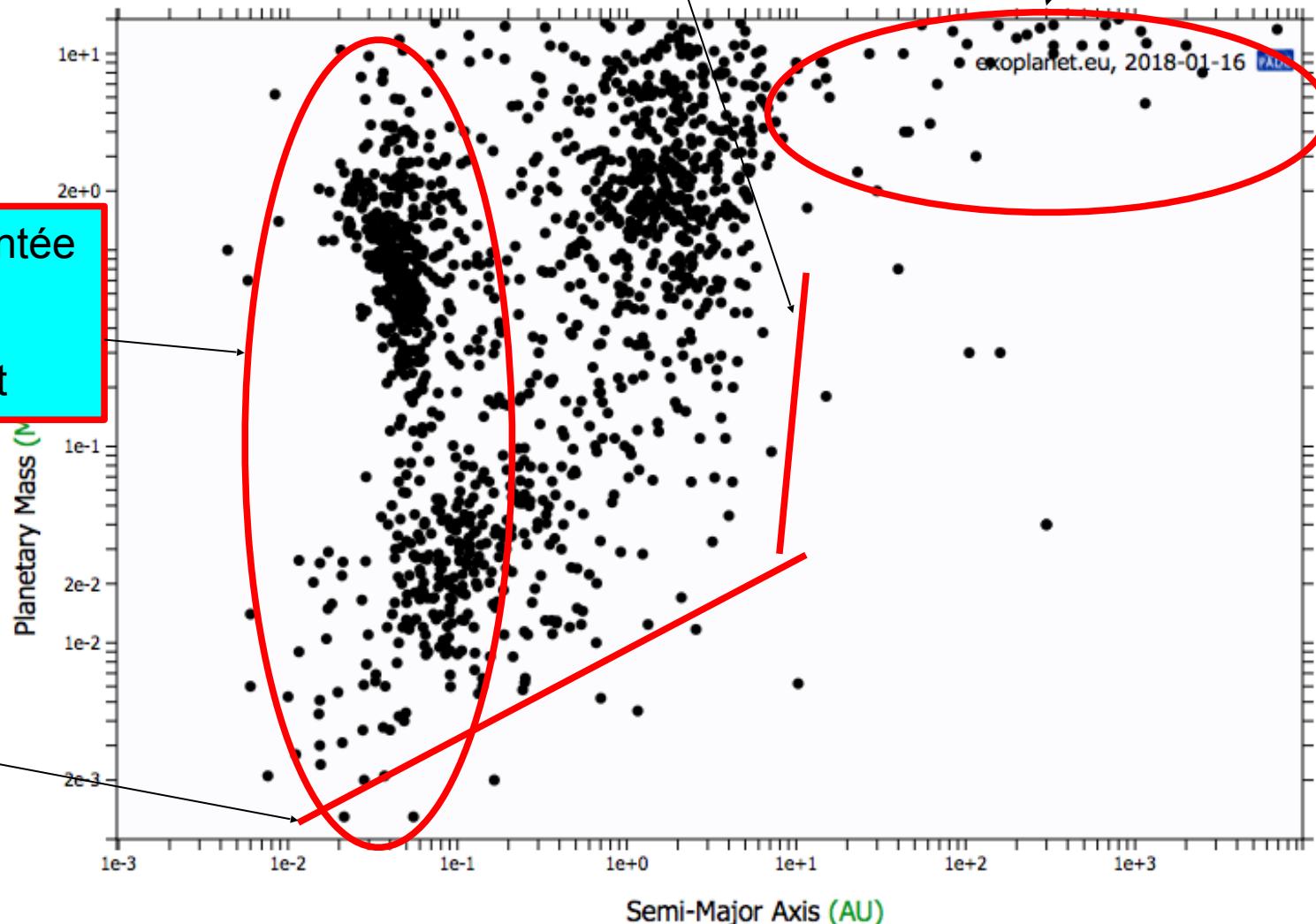
20 ans : durée typique  
des relevés Vr

## Détections par imagerie

## Période courte sur-représentée

## Bias observationnel : Planète détectée par transit

Limite de détection  
 $V_r \sim 1\text{m/s}$



# Statistiques :

Diagramme masse-période :

20 ans : durée typique des relevés V<sub>r</sub>

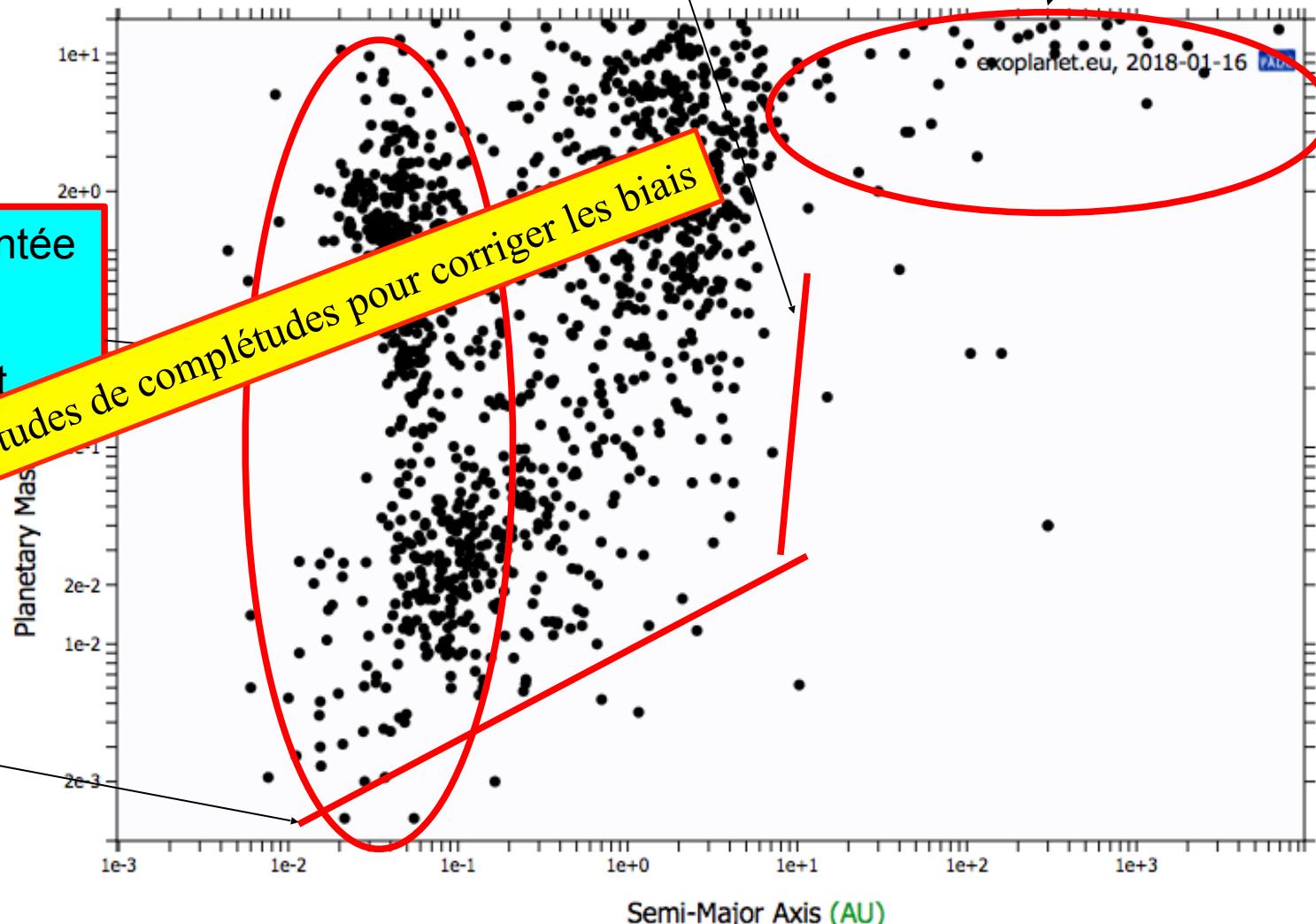
Détections par imagerie

Période courte sur-représentée

Bias observationnel :  
Planète détectée par transit

Nécessite des études de complétiludes pour corriger les biais

Limite de détection  
V<sub>r</sub> ~ 1m/s



# Statistiques :

## Autour des étoiles de type solaire

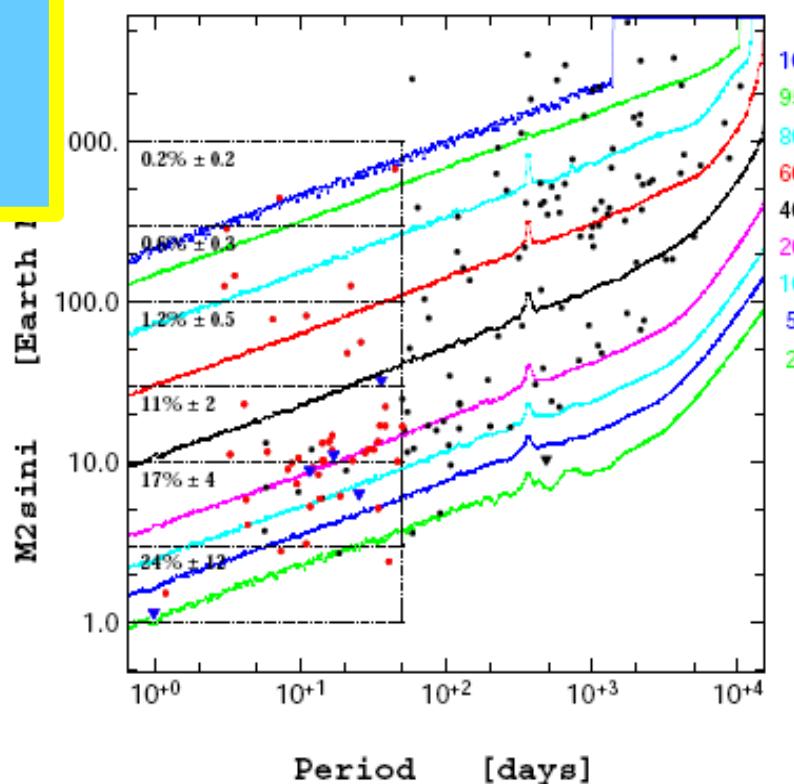
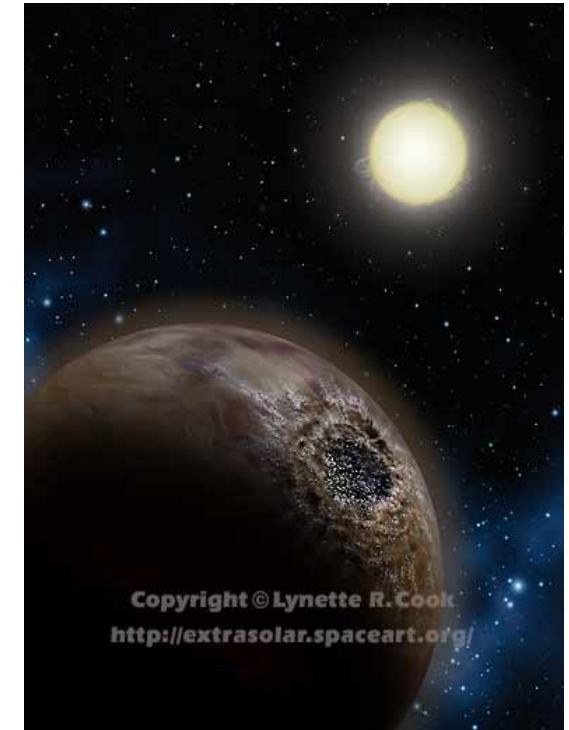
- ⇒ 14% hébergent des **planètes géantes** à moins de 10 ans de périodes.
- ⇒ 50% hébergent des planètes « super-terres » et « neptune » ( $2-30 M_{\text{Earth}}$ ) à moins de 100 jours de Période.

Cf Mayor et al. 2011

Les systèmes planétaires sont très courants.

La formation planétaire est plus efficace pour les petites planètes.

- Les Terres / Super-Terre sont fréquentes



# Statistiques :

Autour des naines rouges  
80% des étoiles de la Galaxie

⇒ 90% hébergent des planètes  
« super-terres » ( $2-10 M_{\oplus}$ )  
Terre  
à moins de 100 jours de Période.

Cf Bonfils, Delfosse et al. 2013

Les systèmes planétaires sont très courants.

La formation planétaire est plus efficace pour les petites planètes.

• Les Terres / Super-Terre sont fréquentes

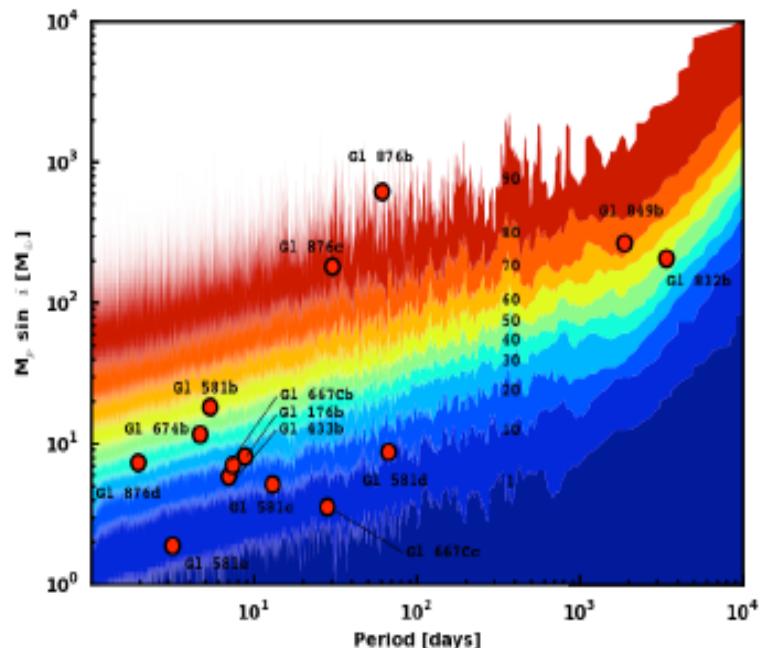
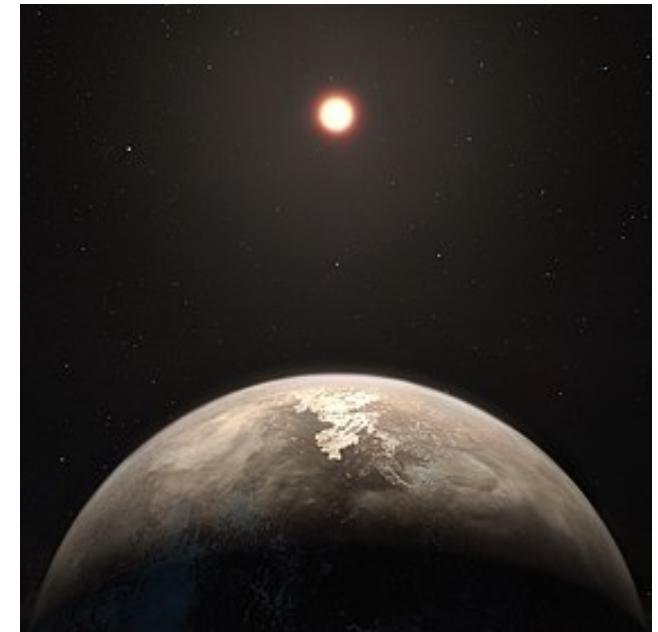
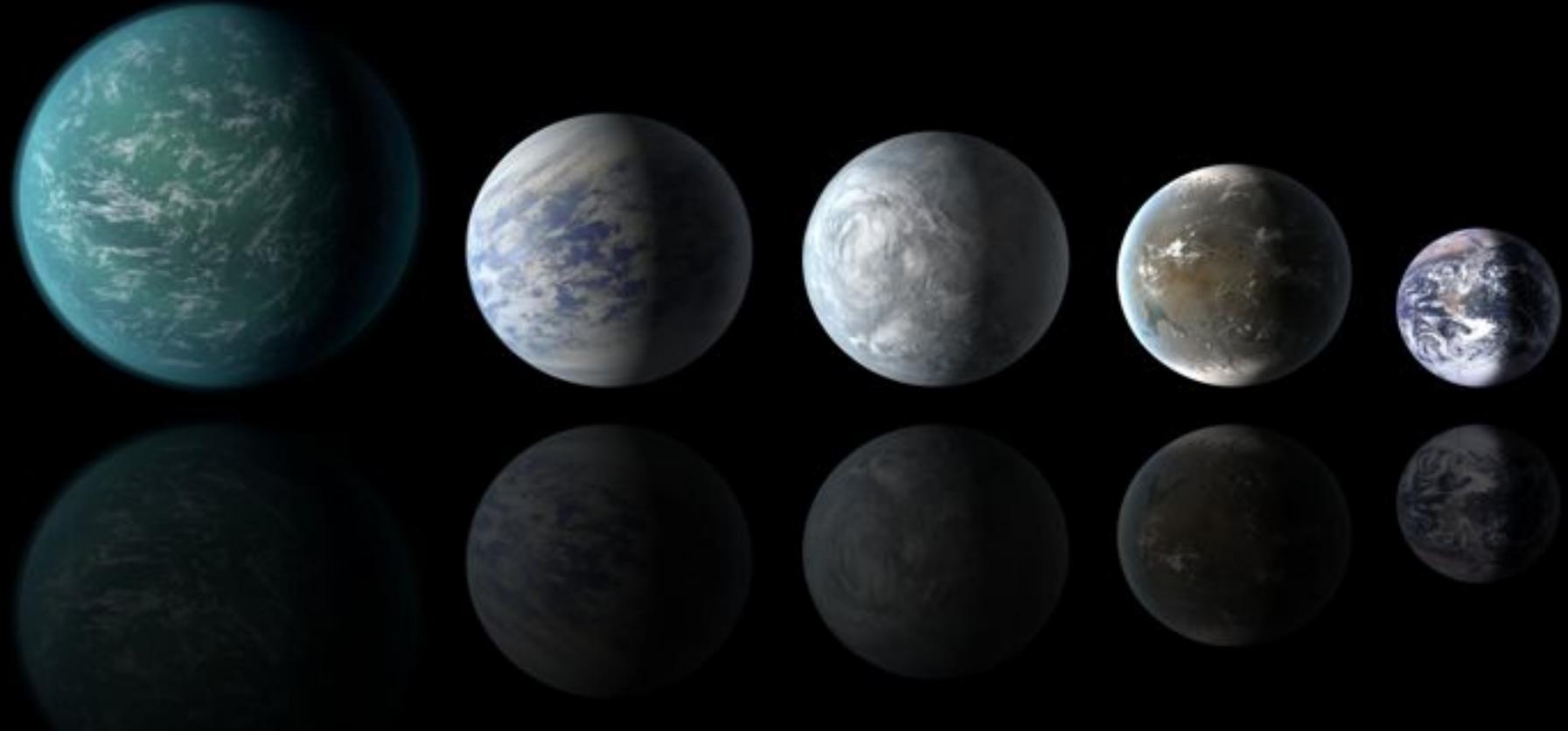


Fig. 15. Survey sensitivity derived from the combined plane-averaged detection limits on individual stars. Iso-contours are shown for 1, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 and 90 stars. Planets detected or confirmed by our survey are reported by red circles and labeled by their names.

# Statistiques :

Les « Super-Terres » sont très nombreuses



Des planètes de 2 à 10 fois la masse de la Terre et rocheuses.  
Pas d'exemple dans notre système solaire.

# Structures des planètes :

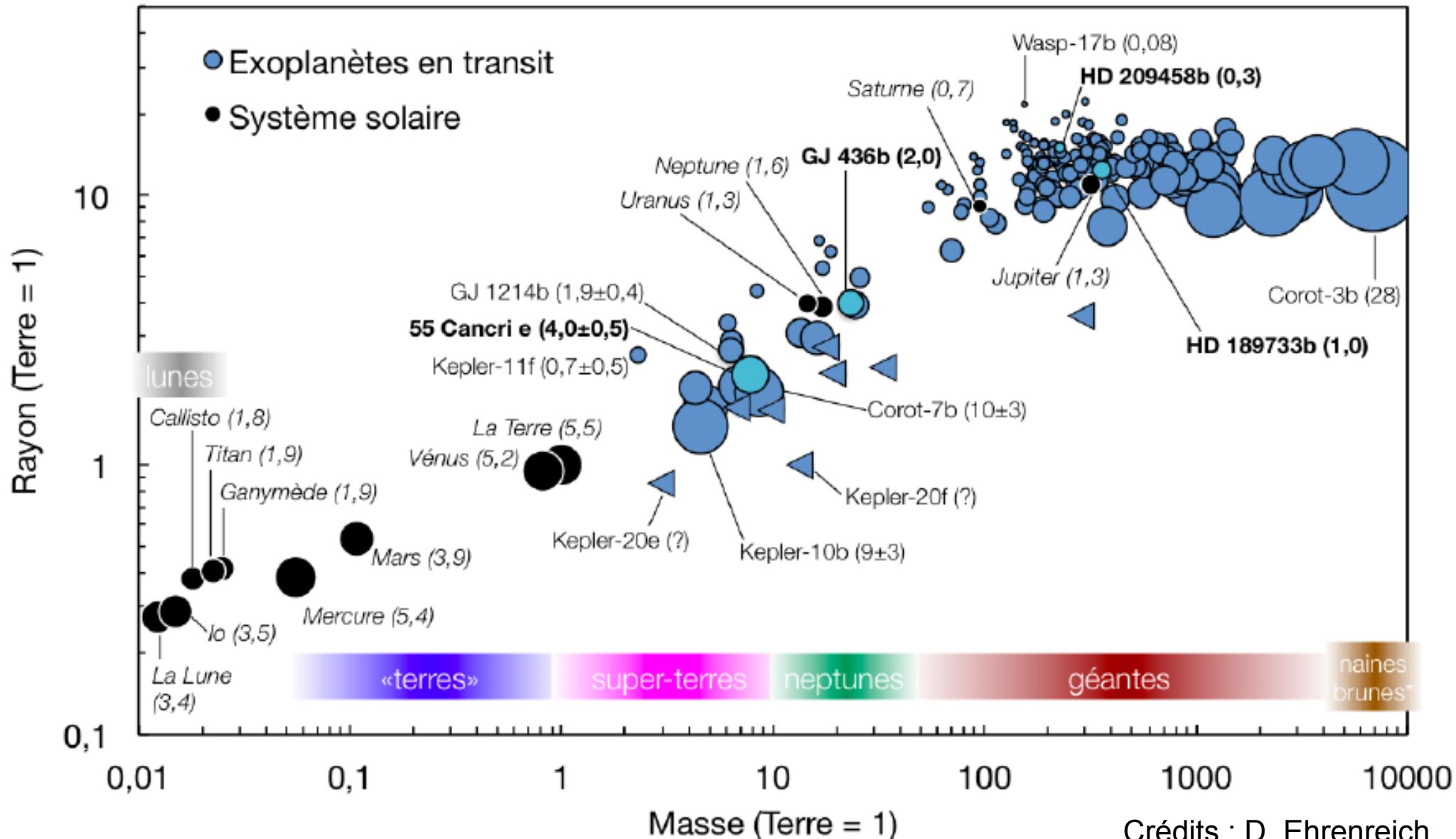
Si une planète est détectée par transit → mesure du rayon  
+ par  $V_r$  → mesure de la masse

⇒ La densité moyenne de la planète est mesurée.

# Caractérisations :

## Densité / Constitution :

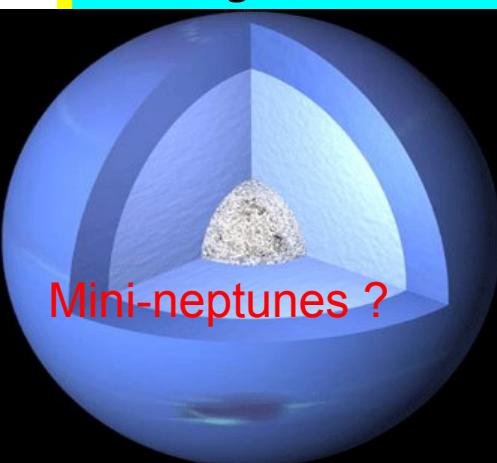
études sur les planètes détectées à la fois en vitesse radiale et transit



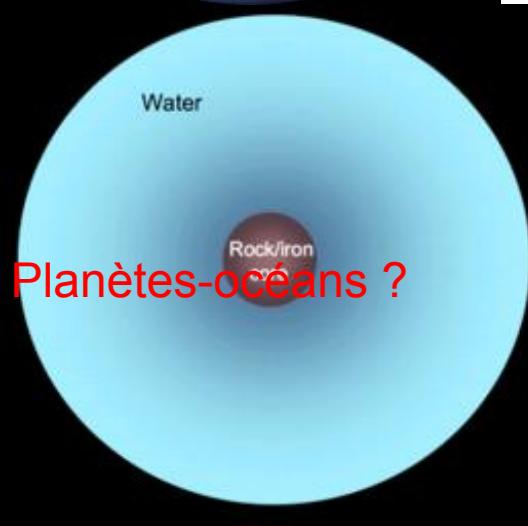
Densité ~ 1,6 à 9 g/cm<sup>3</sup>

(Terre; densité = 5)

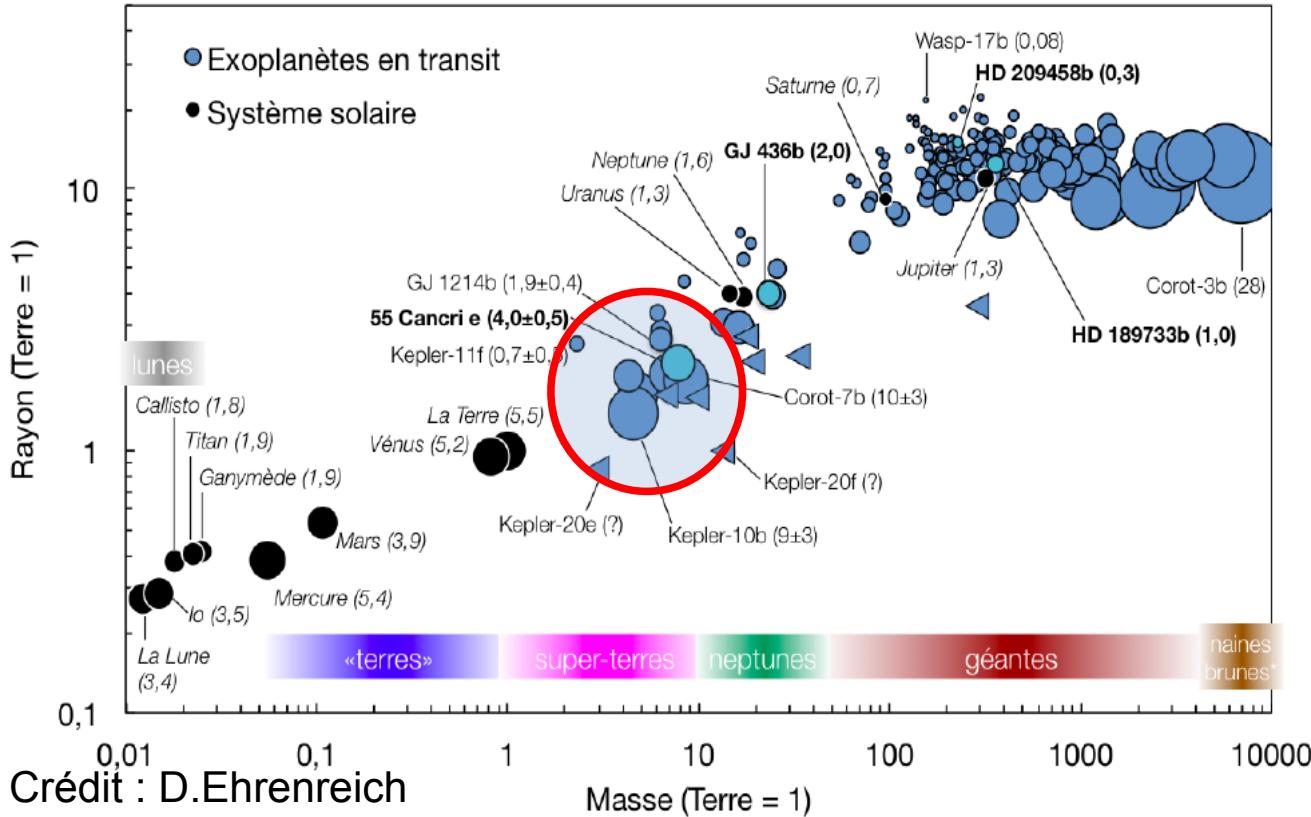
Des planètes de structures différentes dans cette gamme de masse



Mini-neptunes ?



Planètes-océans ?



# Caractérisations :

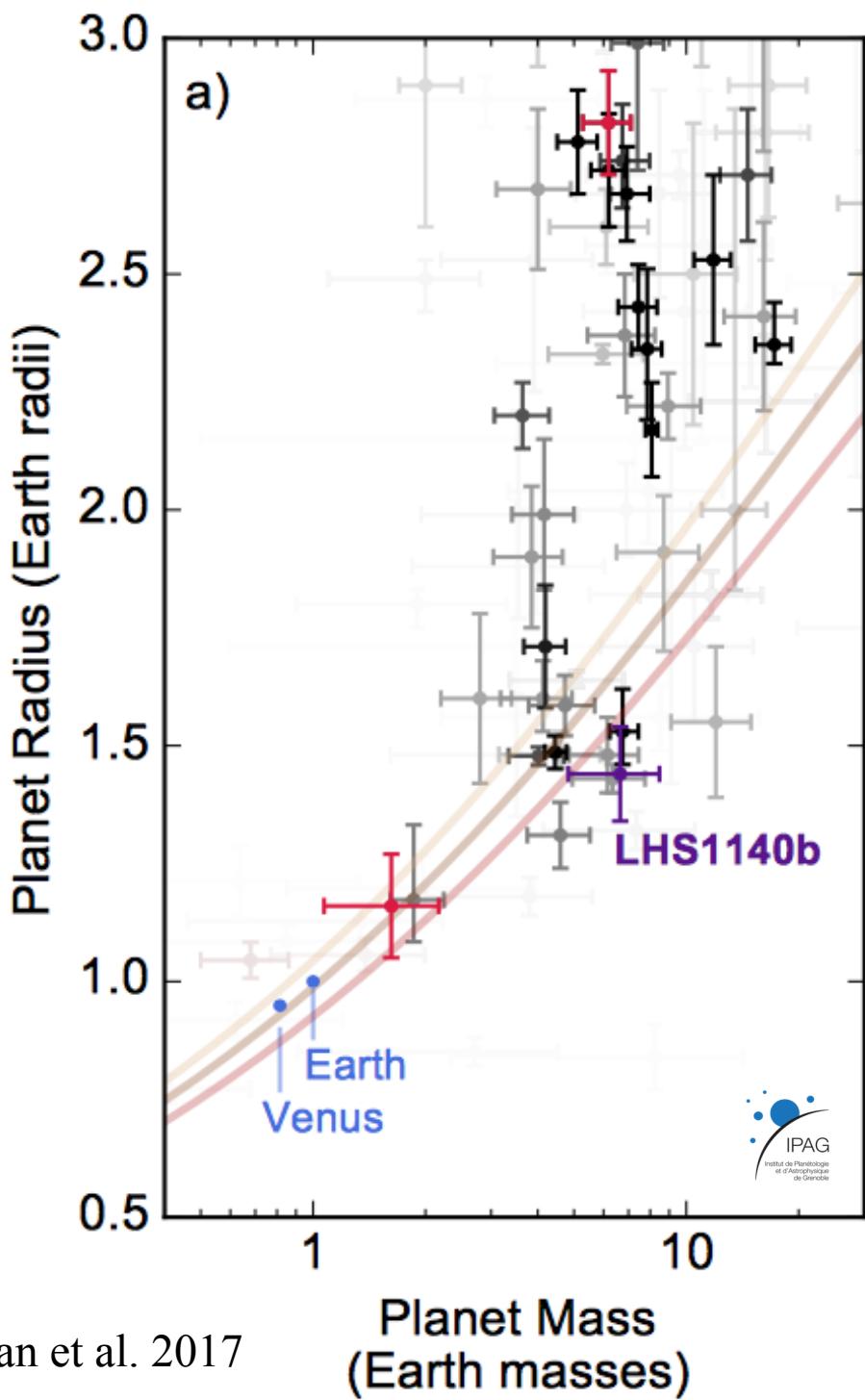
## Densité / Constitution :

études sur les planètes détectées à la fois en vitesse radiale et transit

Grande diversité de densité dans le domaine des Super-Terre.

Les planètes « Super-Terre » ne sont pas toutes des planètes rocheuses

Les erreurs sur les masses sont grandes  
--> une priorité pour la communauté de les améliorer



Dittman et al. 2017

Chercher la vie ?



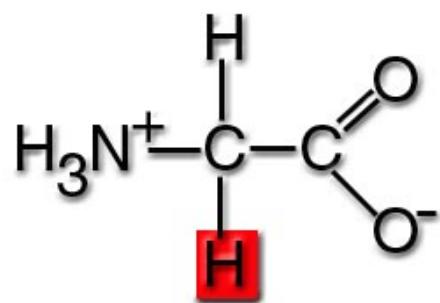
# Chercher la vie ?

## Conditions favorables :

Un environnement similaire à la Terre est favorable... le seul prouvé

La chimie du carbone offre de grands avantages : construction de molécules complexes avec des liaisons stables.

Besoin d'un solvant indispensable aux réactions biochimiques. L'eau apparaît pour beaucoup comme le meilleur choix



GLYCINE (Gly)



# Chercher la vie ?



**Définition** : planètes habitables

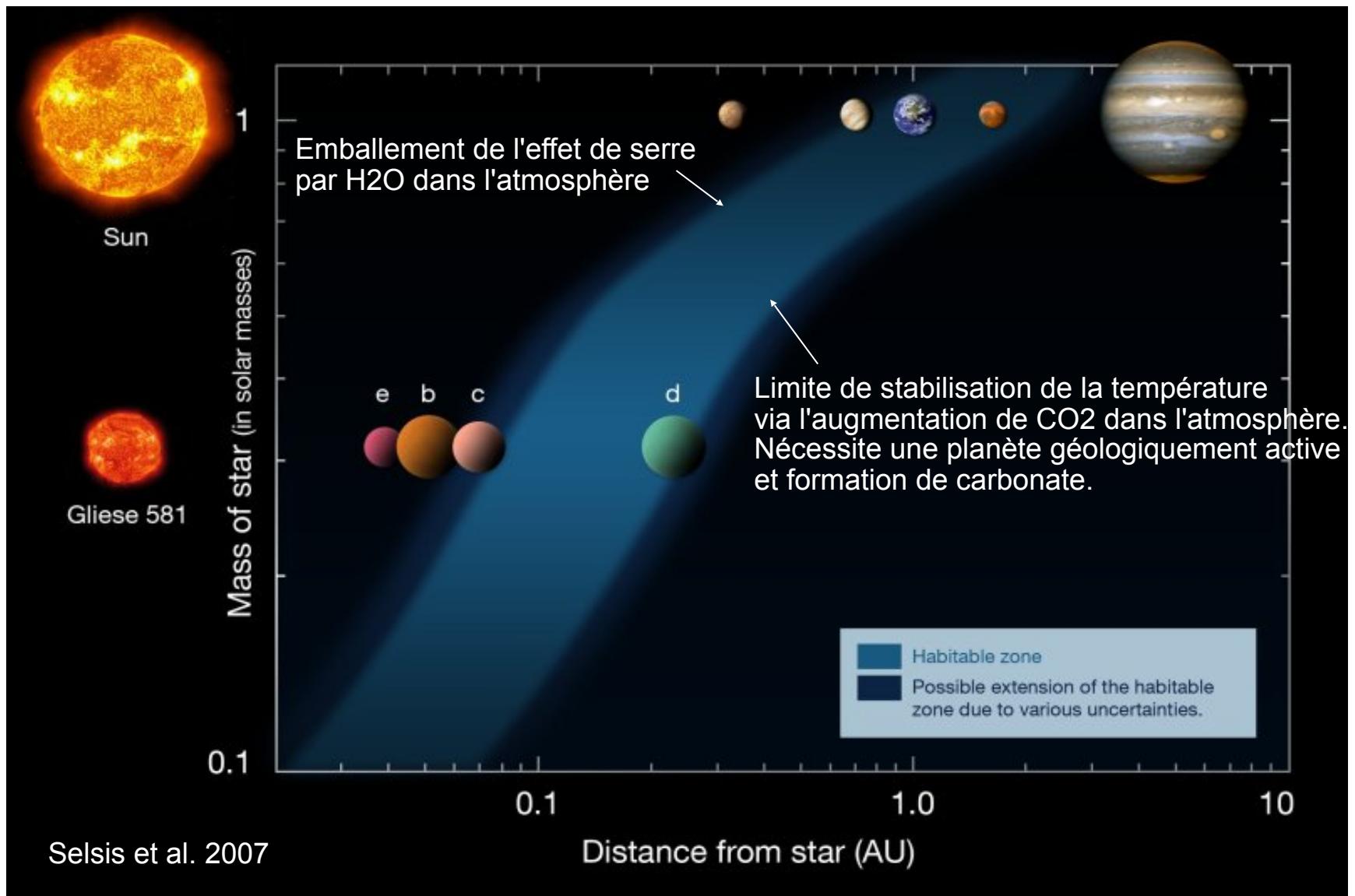
=

planètes avec de l'eau liquide à la surface

# Chercher la vie ?

## Planètes en zone habitable

Définie comme la zone où une planète pourrait abriter de l'eau liquide à sa surface



# Chercher la vie

## Planètes en zone habitable : un exemple Gl667Cc



Gl667C : étoile de 0.3 masse solaire

Gl667Cb : ~5.5 masses de la Terre (P~7j)

Gl667Cc : ~4.2 masses de la Terre (P~28j)

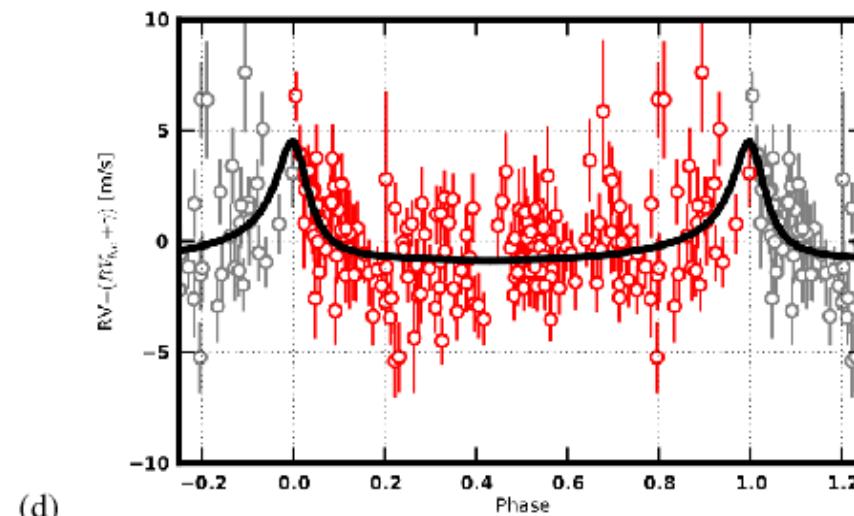
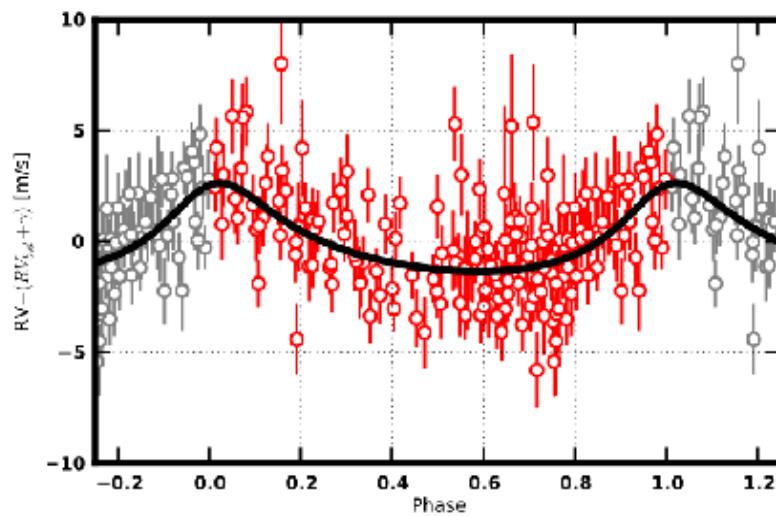
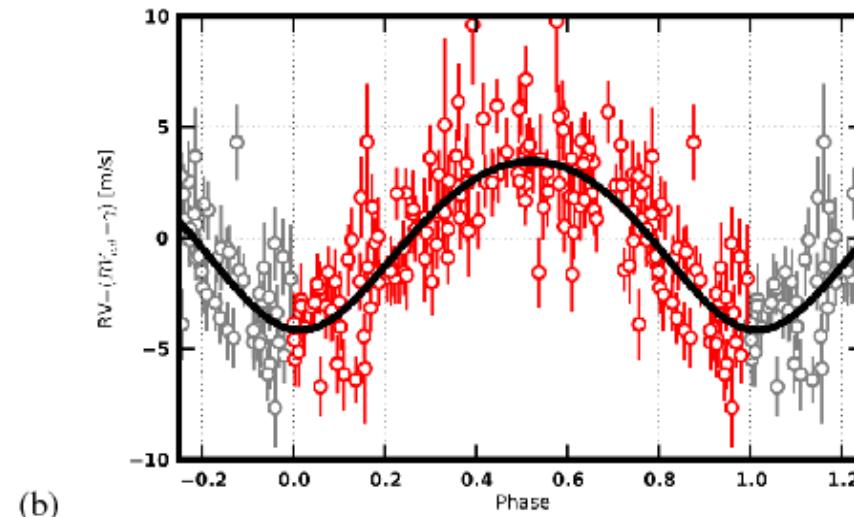
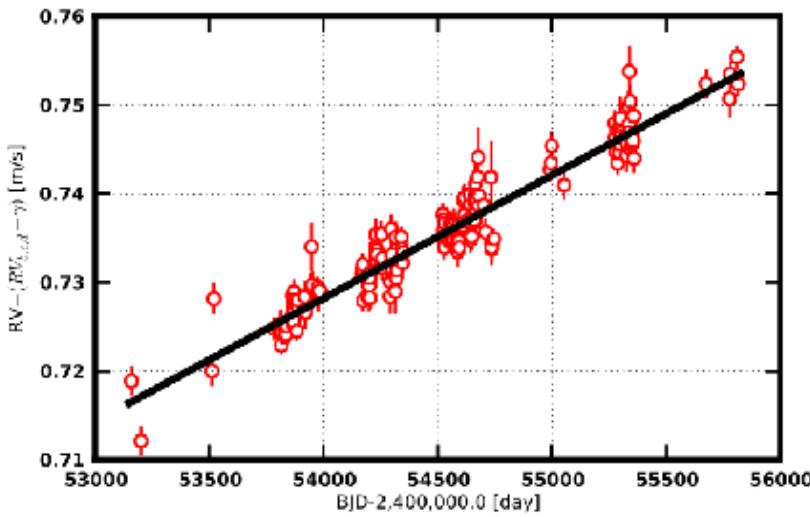
Delfosse et al. 2013



Gl667Cc reçoit de son étoile 90% de l'énergie reçue par la Terre du Soleil...

# Chercher la vie :

Planètes en zone habitable : un exemple Gl667Cc

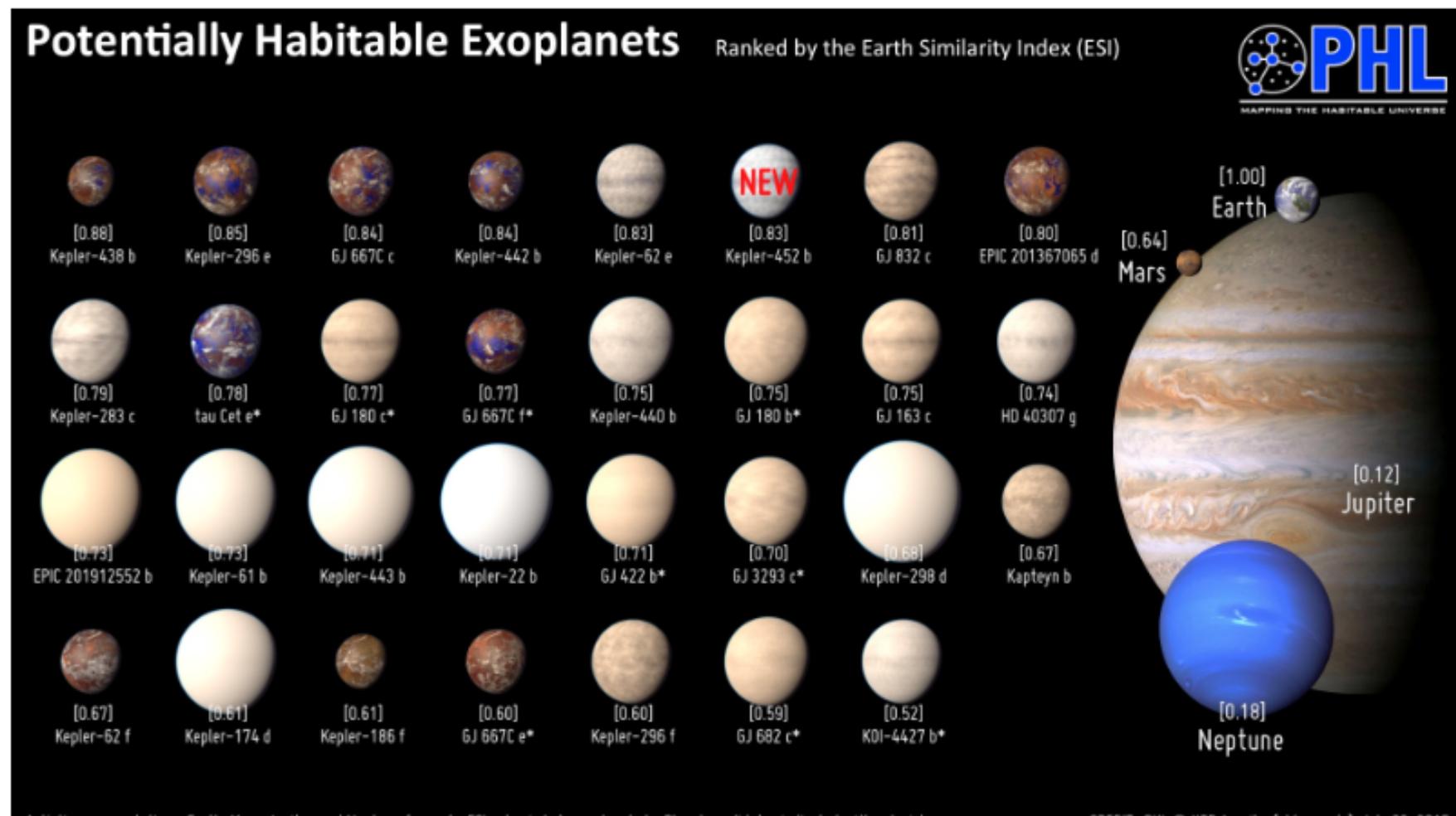


# Chercher la vie :

## Planètes en zone habitable

Aujourd'hui : ~10-15 planètes « confirmées » en zone habitable  
~20 autres candidats moins solides

Majorité autour de naines M :



# Chercher la vie

## Planètes en zone habitable

Number of Earths per HZ				
Paper	Eta Earth	HZ Inner Edge	HZ Outer Edge	Planet Properties
 <b>Bonfils+ 2013</b>	<b>0.41</b> (+0.54/-0.13)	Recent Venus (Selsis +2007)	Early Mars (Selsis+ 2007)	$1 < m \sin i < 10 M_{\text{Earth}}$
<b>Gaidos 2013</b>	<b>0.46</b> (+0.18/-0.15)	50% Clouds (Selsis+ 2007)	50% Clouds (Selsis+ 2007)	$R_p > 0.8 R_{\text{Earth}}$
<b>Kopparapu 2013 (Conservative)</b>	<b>0.48</b> (+0.12/-0.24)	Moist Greenhouse (Kopparapu+ 2013)	Max Greenhouse (Kopparapu+ 2013)	$0.5 < R_p < 1.4 R_{\text{Earth}}$
<b>Kopparapu 2013 (Optimistic)</b>	<b>0.61</b> (+0.07/-0.15)	Recent Venus (Kopparapu+ 2013)	Early Mars (Kopparapu+ 2013)	$0.5 < R_p < 2 R_{\text{Earth}}$
<b>Dressing &amp; Charbonneau 2013</b>	<b>0.15</b> (+0.13/-0.06)	Water Loss (Kasting+ 1993)	CO <sub>2</sub> Condensation (Kasting+ 1993)	$0.5 < R_p < 1.4 R_{\text{Earth}}$
<b>Dressing &amp; Charbonneau (in prep)</b>	<b>0.56</b> (+0.32/-0.13)	Moist Greenhouse (Kopparapu+ 2013)	Max Greenhouse (Kopparapu+ 2013)	$0.5 < R_p < 1.4 R_{\text{Earth}}$
<b>Dressing &amp; Charbonneau (in prep)</b>	<b>0.66</b> (+0.25/-0.12)	Moist Greenhouse with Clouds (Yang+ 2013)	Max Greenhouse (Kopparapu+ 2013)	$0.5 < R_p < 1.4 R_{\text{Earth}}$

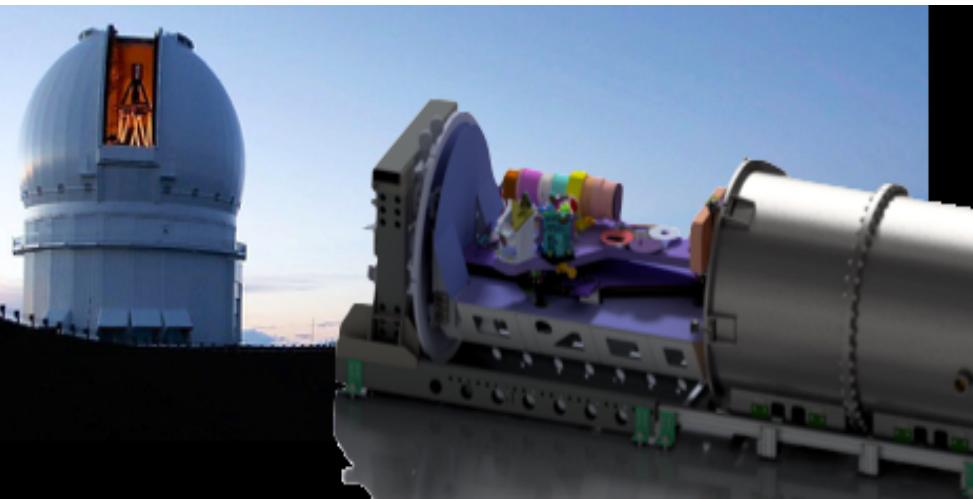
Le futur :



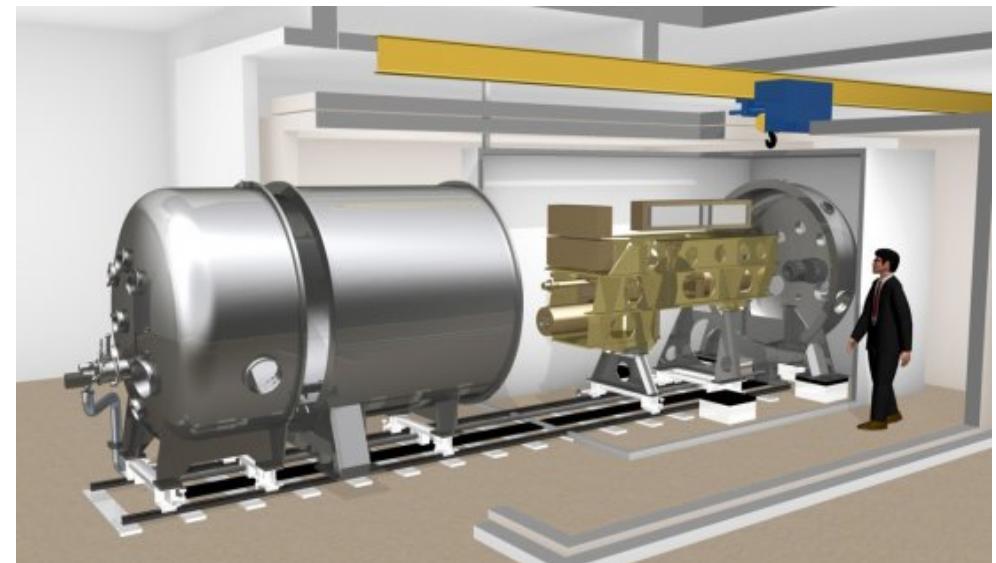
# Le futur vitesse radiale:

Trouver les planètes en plus grand nombre et plus proche :

Trouver « toutes » les planètes en zone habitable autour des étoiles du voisinage solaire : par vitesse radiale



SPIRou (France/Canada) (2019)



ESPRESSO (Europe) (2018)

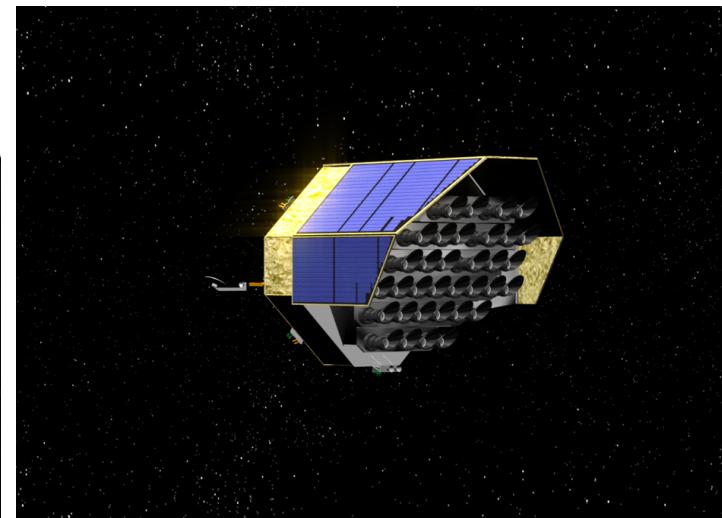
# Le futur transit :

Trouver les planètes en plus grand nombre et plus proche :

Trouver « toutes » les planètes en zone habitable autour des étoiles du voisinage solaire : par transit



TESS/NASA (2018)



PLATO/ESA  
(2024)



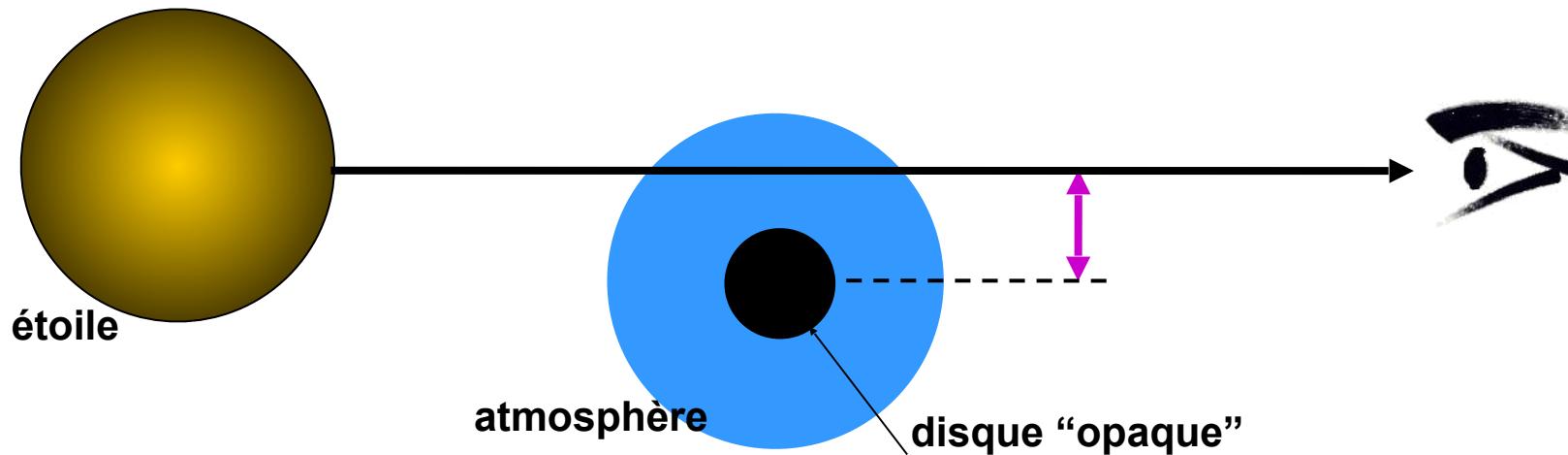
ExTrA / ESO  
(2019)



# Caractérisations :

## Atmosphères :

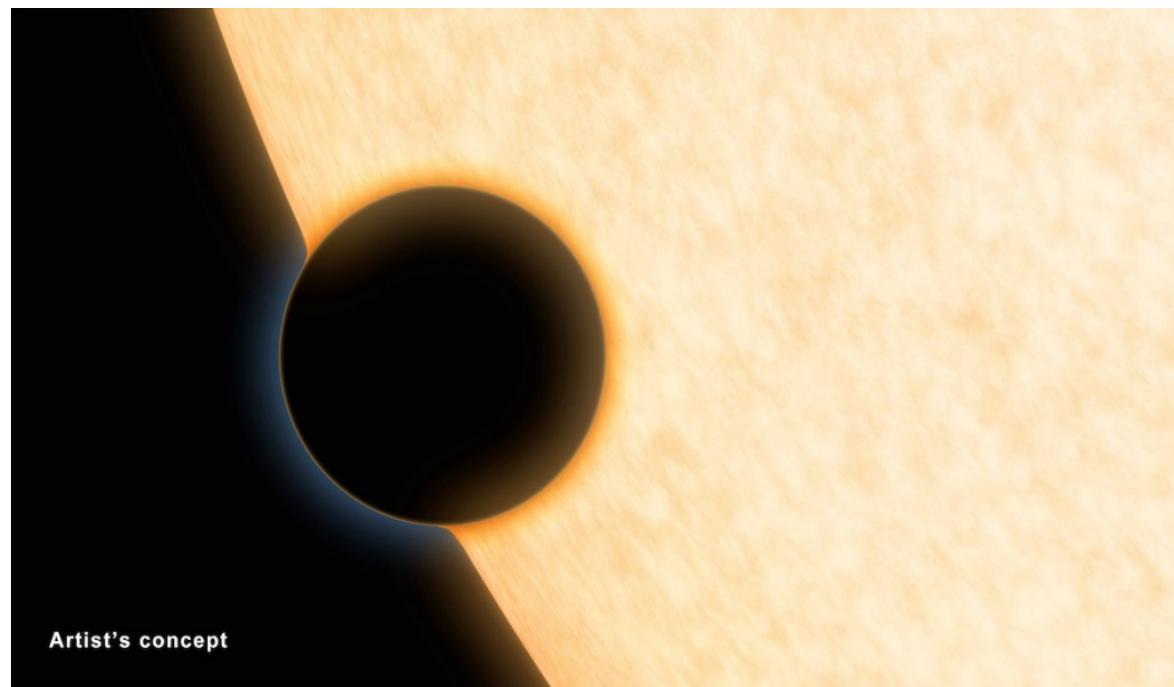
études sur les planètes détectées en transit



Spectroscopie en absorption de  
l'atmosphère durant le transit

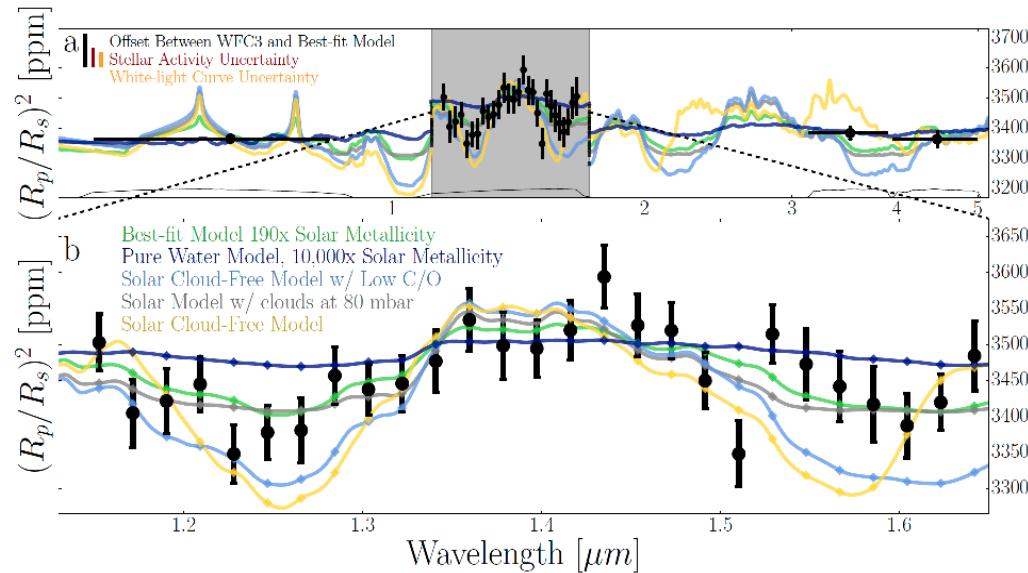
/

Le spectre hors transit sert de référence

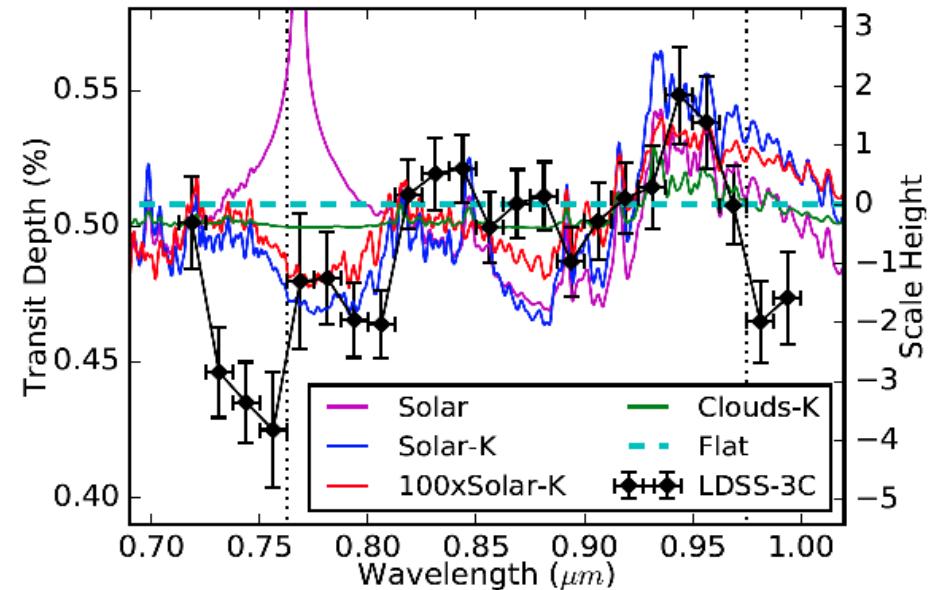


# Caractérisations :

## Atmosphères de Neptune :



HAT-P-11b ( $25M_{\text{TERRE}}$ ), détection de vapeur d'eau  
Fraine et al. 2014



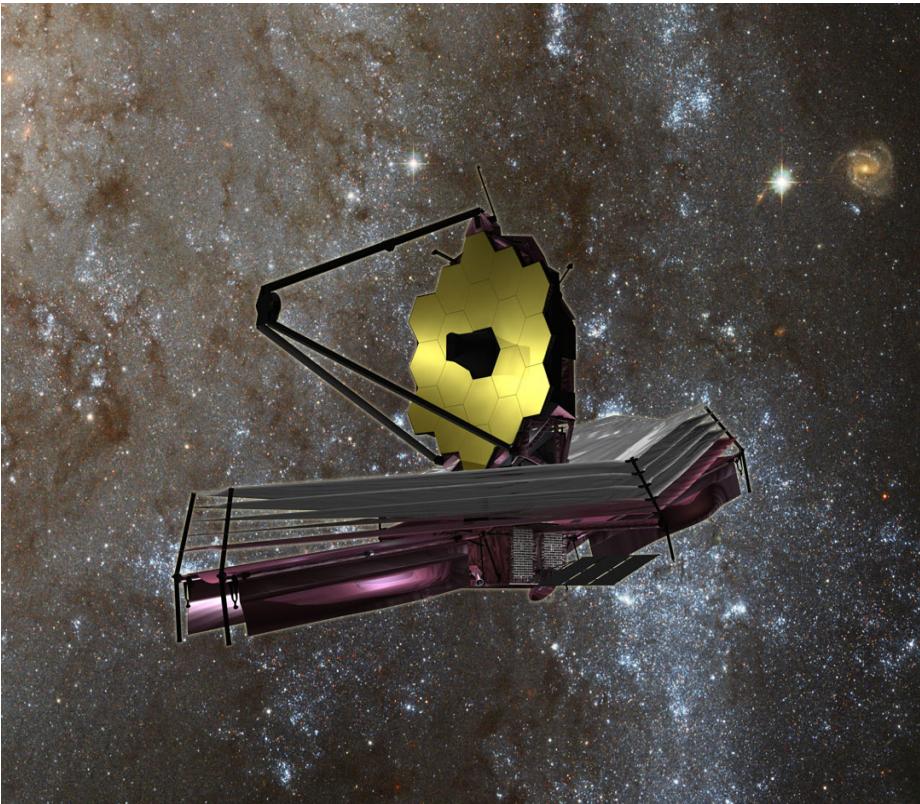
HAT-P-26b ( $18M_{\text{TERRE}}$ ), détection spectral mais des dégénérescence de solution  
Stevenson et al. 2016

Des signaux spectraux détectés dans les atmosphères de « Neptune » --> porter ces mesures vers les « Super-Terre »

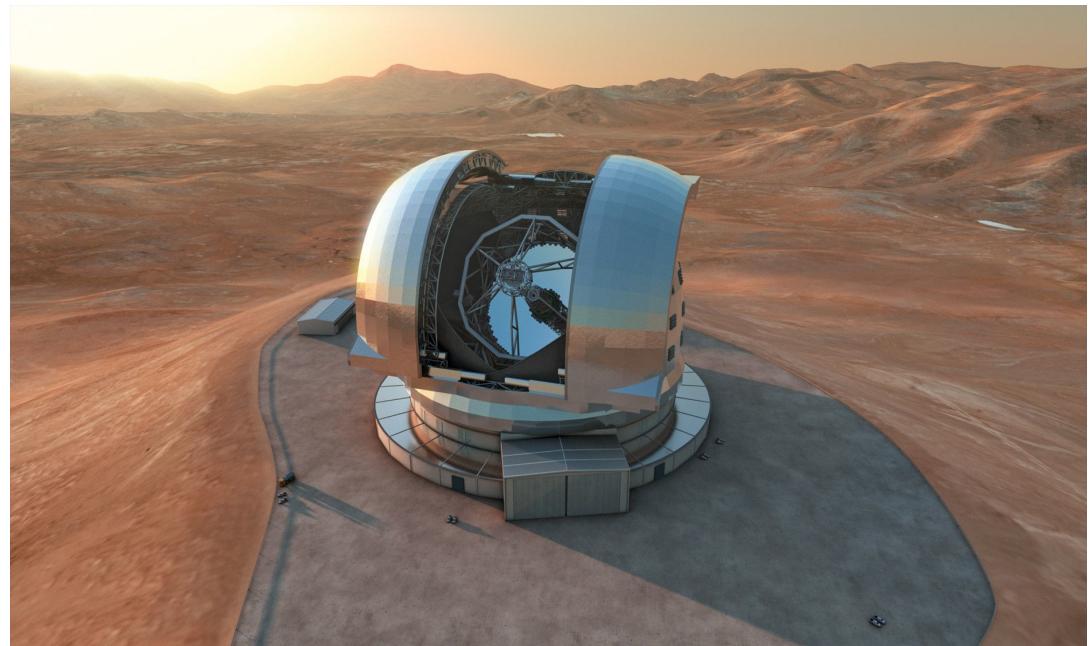
# Le futur :

Caractériser ces planètes, analyser leurs atmosphères :

Analyse atmosphérique des « Super-Terre » en transit



JWST/NASA (+10 % ESA) (2021)



ELT (ESO)  
(2025)



IPAG  
Institut de Planétologie  
et d'Astrophysique  
de Grenoble

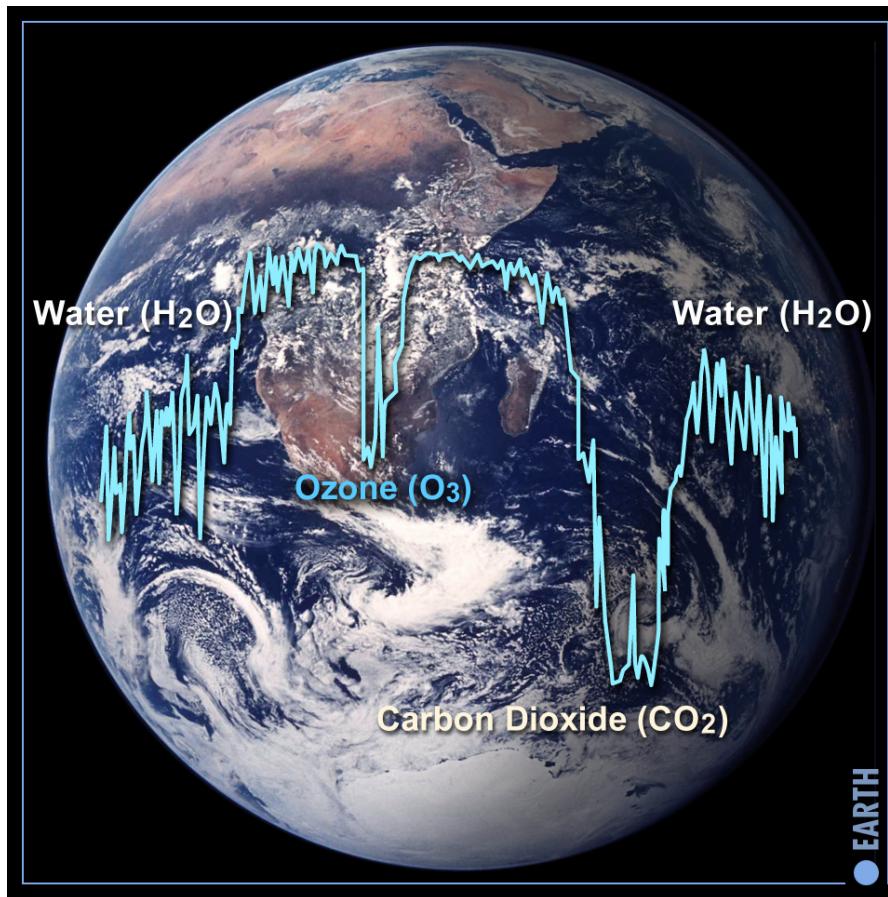


# Le futur :

Caractériser ces planètes, analyser leurs atmosphères :

Recherche de bio-marqueurs dans les atmosphères de planètes Terre / Super-Terre avec l'ELT ?  
Difficile mais pas complètement impossible

Quelle constitution d'atmosphère allons-nous observer ?  
Qu'est-ce qu'un bio-marqueur fiable ?



Selsis et al.

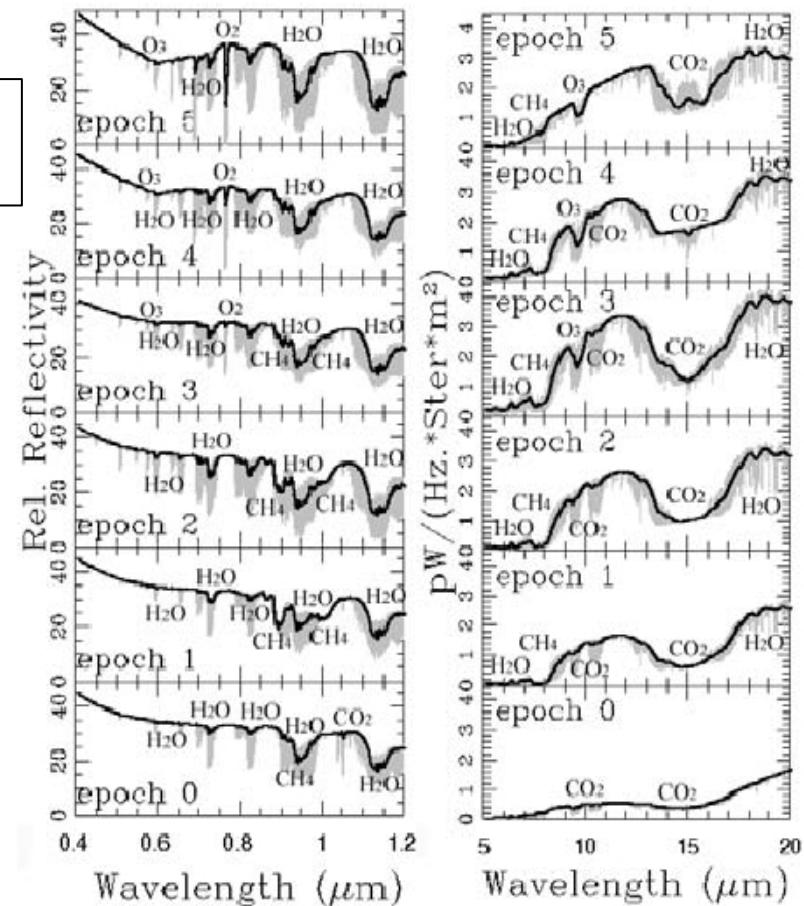


Fig. 3: The visible to near-IR (left panel) and mid IR (right panel) spectral features on an Earth-like planet change considerably over its evolution from a  $\text{CO}_2$  rich (epoch 0) to a

# Conclusions

1./ Il y a des planètes partout....

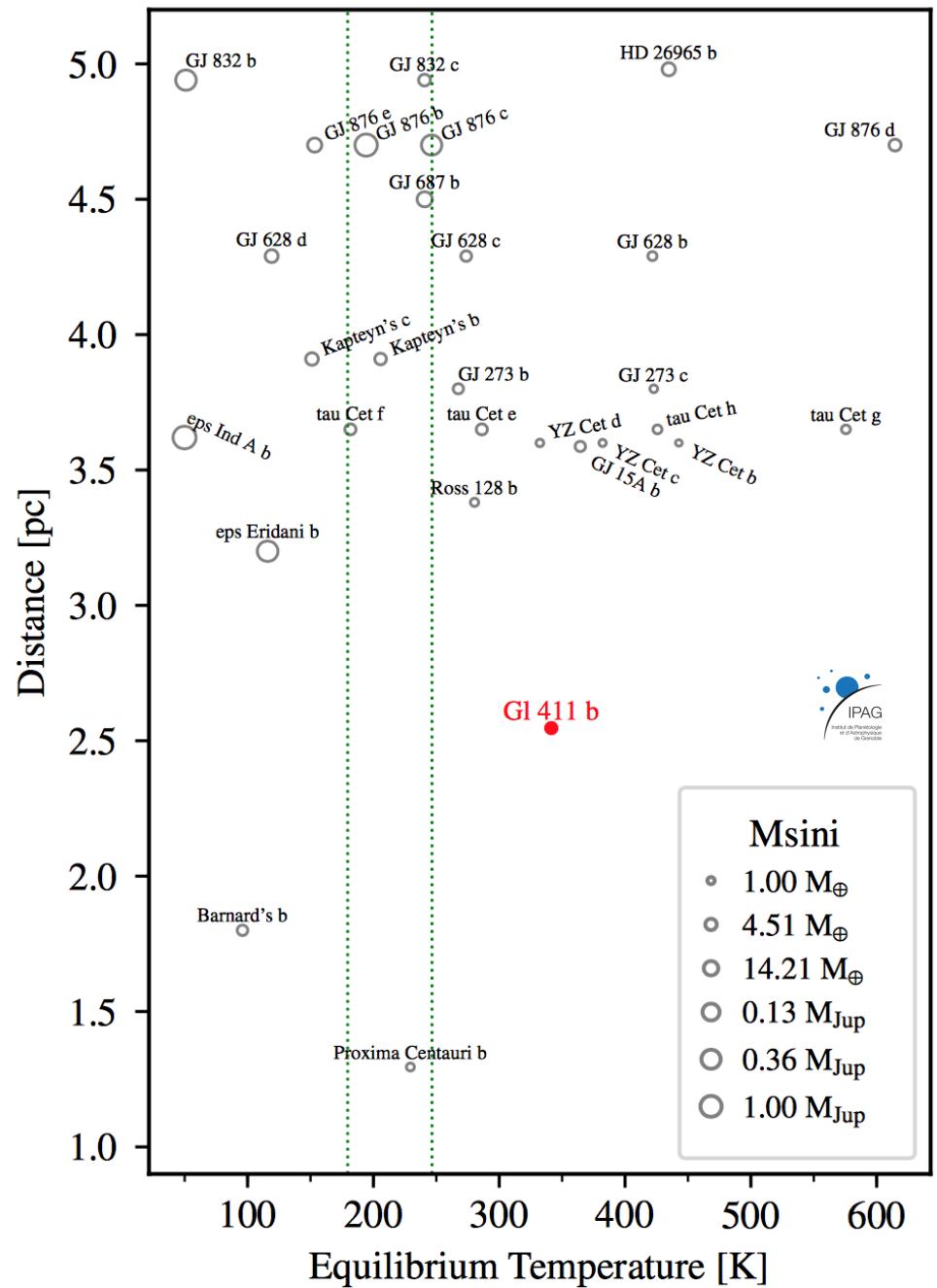
3 des 4 étoiles les plus proches de nous ont des systèmes détectés.

La petite nouvelle : Gl 411 (Diaz, Delfosse et al. 2019) vient d'être détectée à l'OHP



2./ D'énormes efforts instrumentaux en cours pour ...

Caractériser leurs atmosphères.



# Conclusion

1./ II

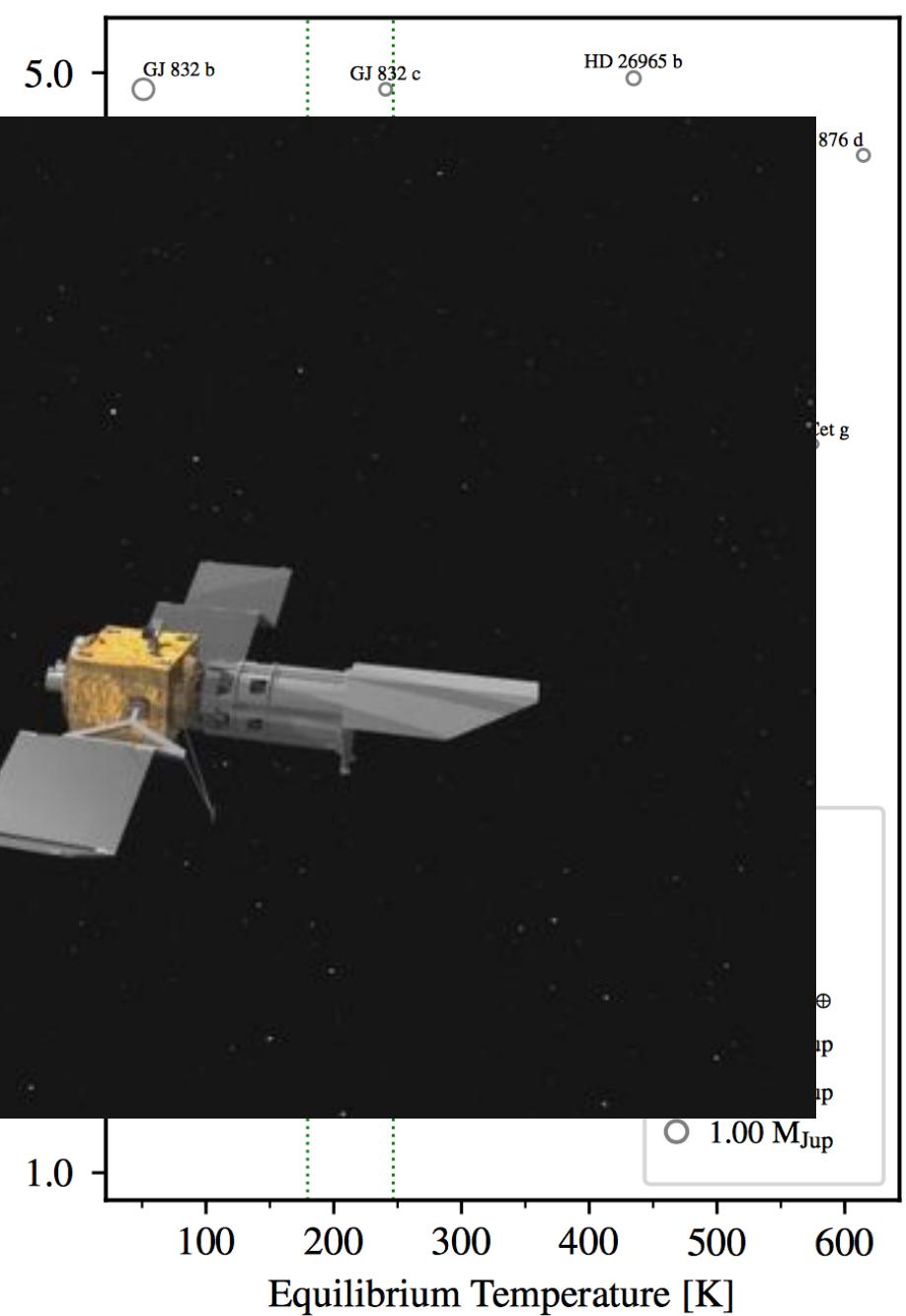
3 des  
des s

La pe  
al. 20



2./ D'énormes efforts instrumentaux  
en cours pour ...

Caractériser leurs atmosphères.



# Conclusion II

Détecter des planètes habitables...

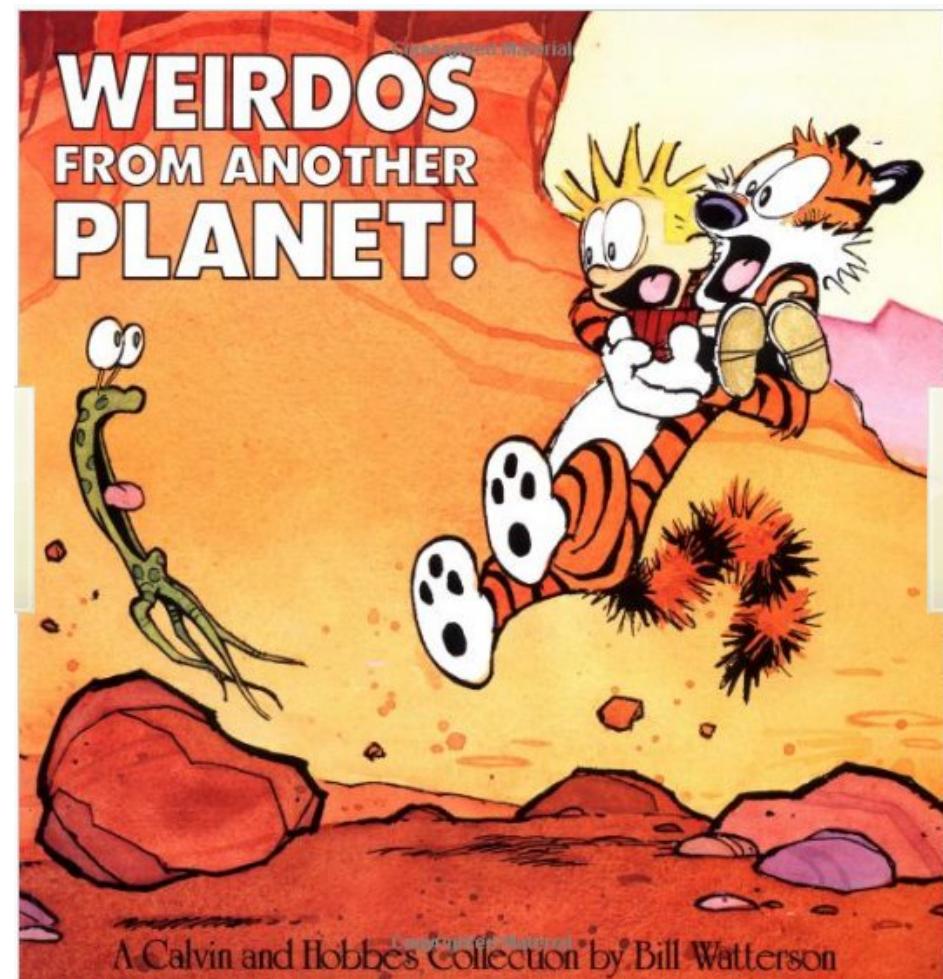
... mais la preuve formelle de la vie extra-terrestre intelligente a-t-elle déjà été apportée par Watterson (1990) ?

# Conclusion II

Déetecter des planètes habitables...

... mais la preuve formelle de la vie extra-terrestre intelligente a-t-elle déjà été apportée par Watterson (1990) ?

« La preuve qu'il y a des êtres intelligents ailleurs que sur Terre est qu'ils n'ont pas essayé de nous contacter »





# Origin of Life

## Univ. Grenoble Alpes



PAGE



4 équipes



2 équipes



2 équipes



2 équipes



1 équipe



1 chercheur



2 équipes



1 chercheur

**Aujourd'hui :**  
Une communauté de  
plus de 60 personnes