

Les planètes Super-Terre Détections & Caractérisations

Xavier Delfosse

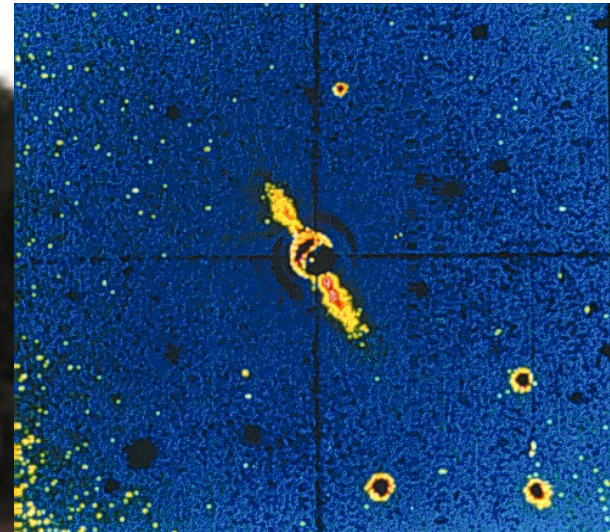
Institut de Planétologie et
d'Astrophysique de Grenoble

Observatoire de Grenoble /
Université Grenoble Alpes / CNRS



Intro :

Histoire & différents types de planètes



Intro :

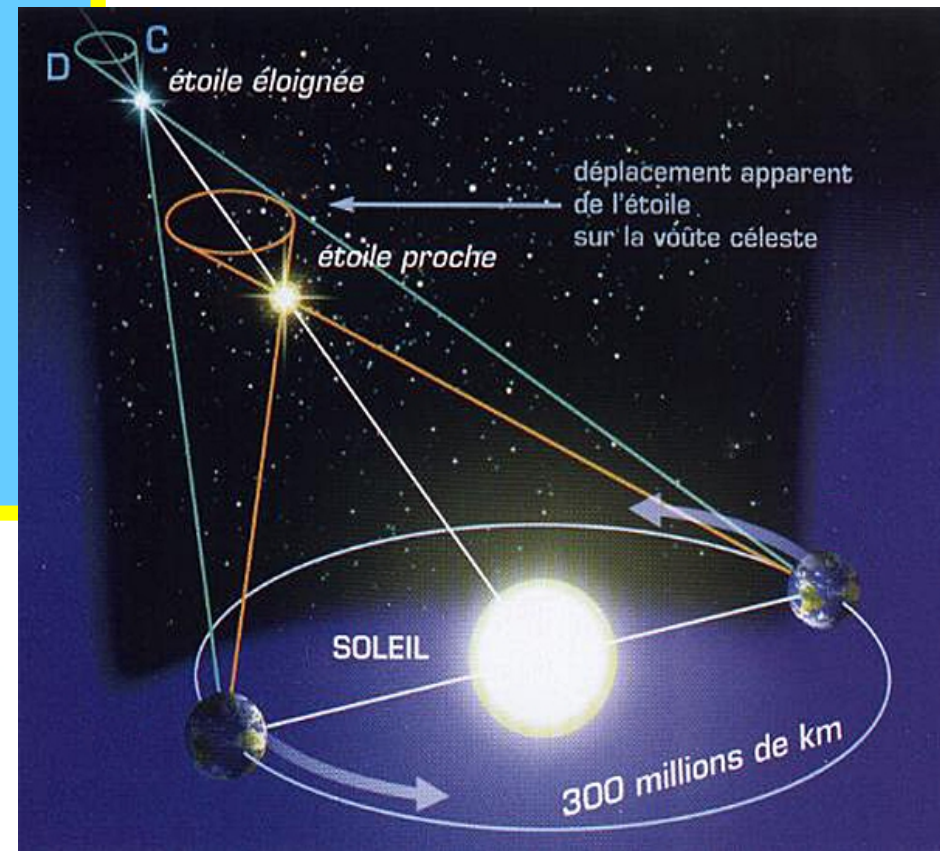
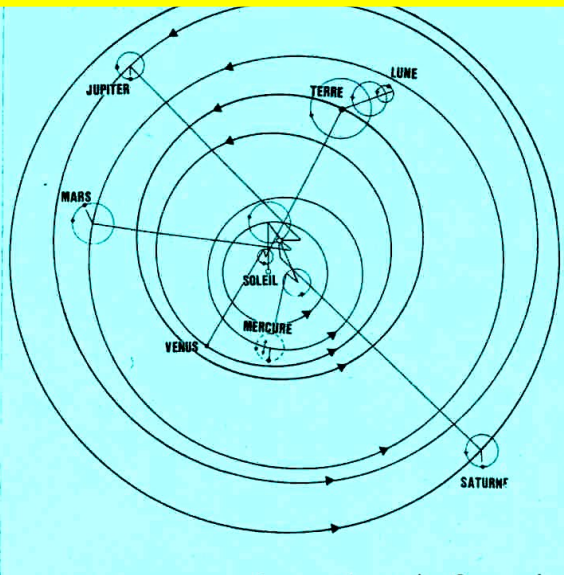
Histoire & différents types de planètes

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-mêmes, 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^{ème}
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-mêmes»

Les étoiles fixes sont autant de Soleils

fixe n'en aura-t-elle pas

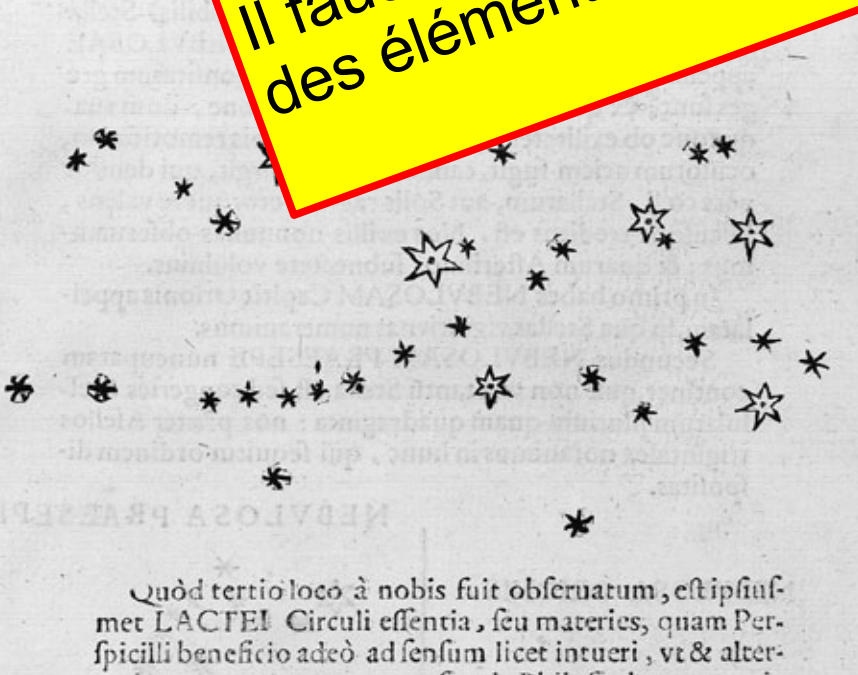
Pourquoi chaque étoile

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

La problématique est posée scientifiquement dès le XVII^{ème} siècle :

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

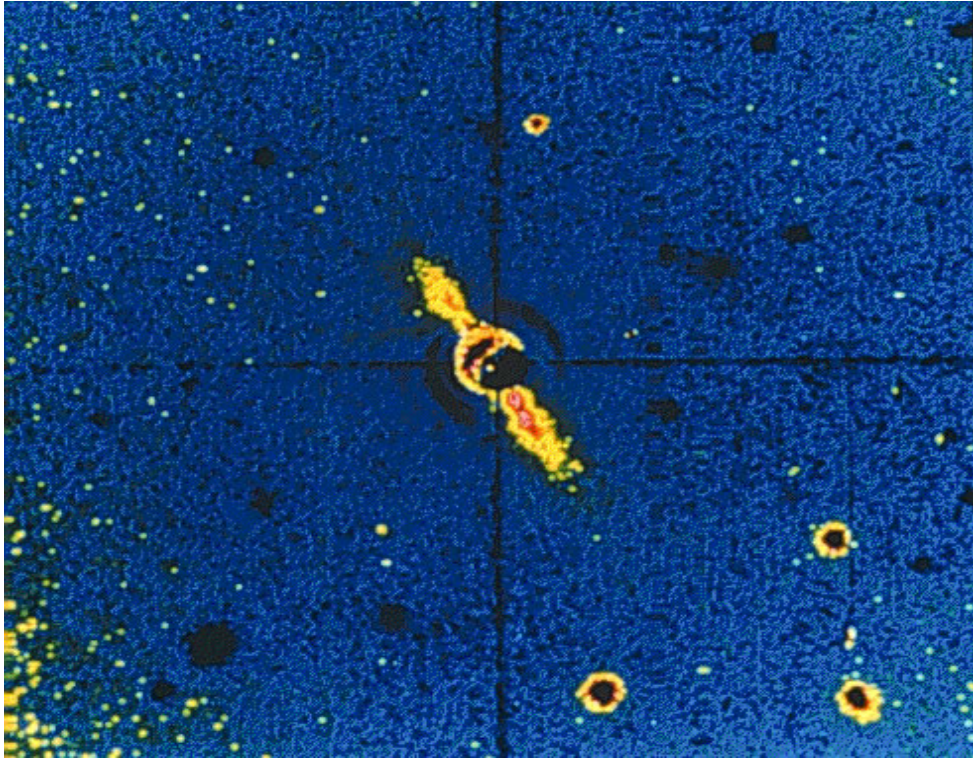
PLEI



Quòd tertio loco à nobis fuit obseruatum, est ipsius
met LACTEI Circuli essentia, seu materies, quam Per-
spicilli beneficio adeò ad sensum licet intueri, vt & alter-

Intro :

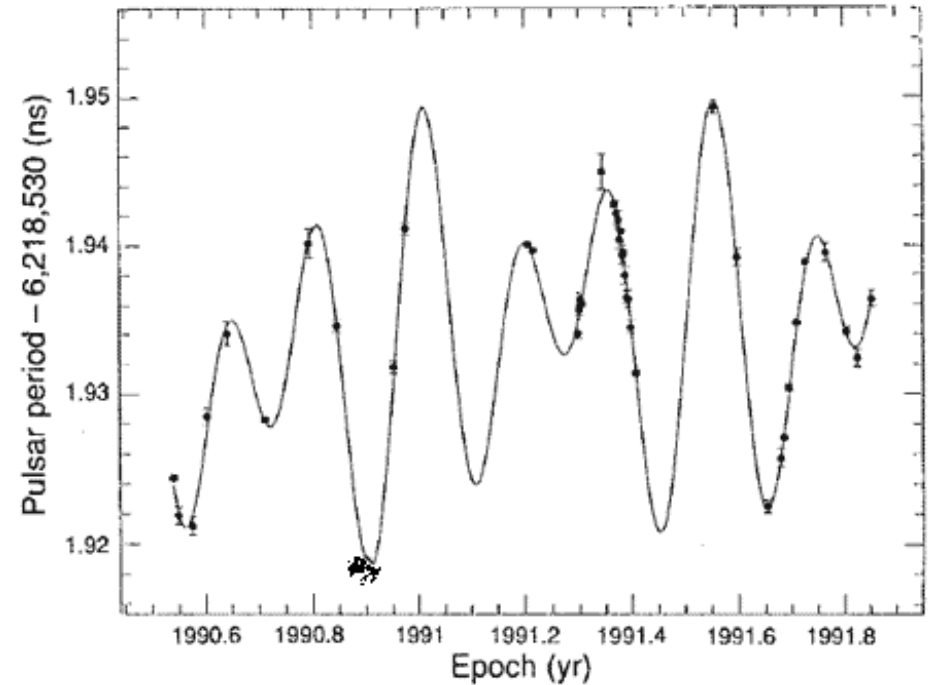
Histoire & différents types de planètes



Smith & Terrile 1984

Image d'un disque circumstellaire autour de β 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_{TERRE}).

Par chronométrage du pulsar

Intro :

Histoire & différents types de planètes

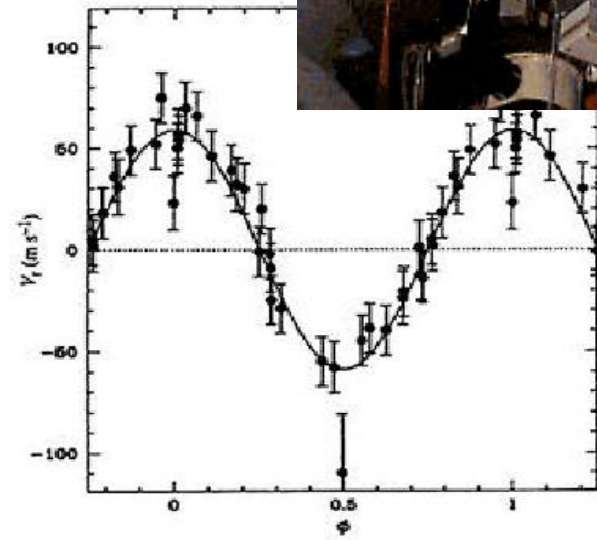


Mayor & Queloz (1995)

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

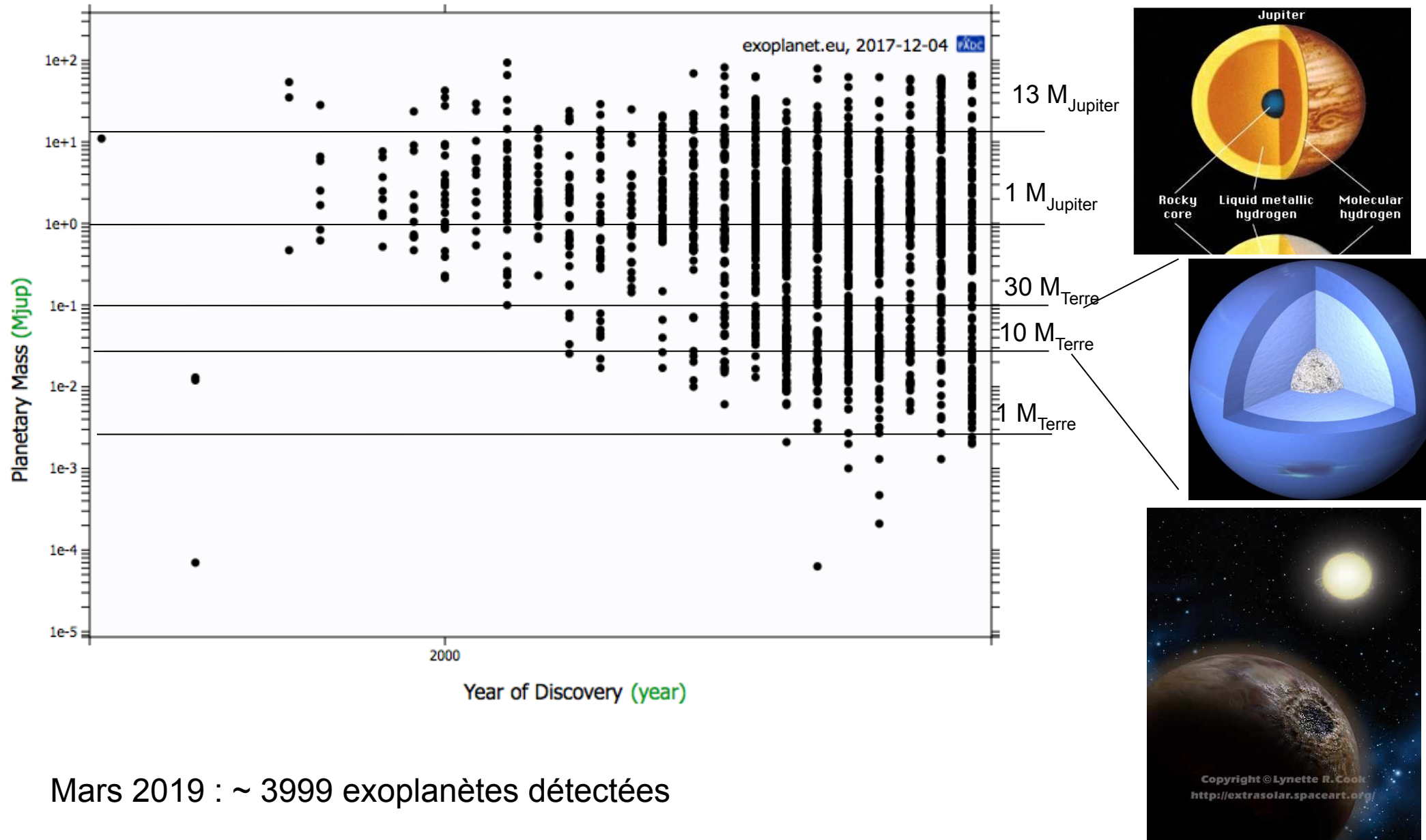
La moitié de la masse de Jupiter ($0.46 M_{\text{JUP}} = 146 M_{\text{TERRE}}$)

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



Intro :

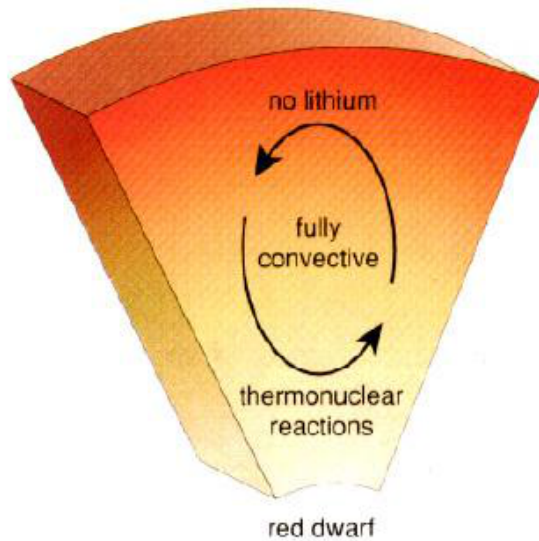
Histoire & différents types de planètes



Mars 2019 : ~ 3999 exoplanètes détectées

Intro :

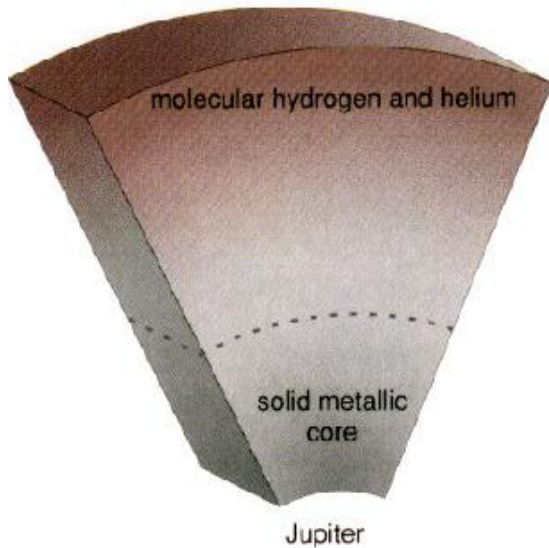
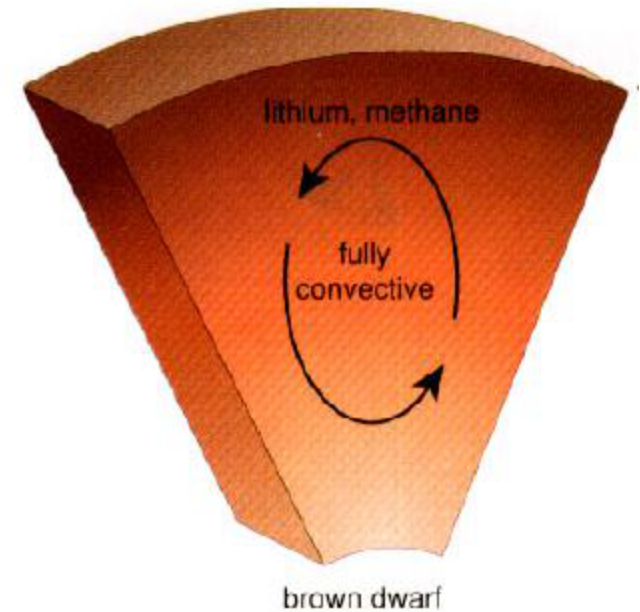
Définition Exoplanètes



Etoiles de très faible masse :

$M > 70M_{\text{JUP}}$

Réactions nucléaires stables



Planètes :

$M < 13M_{\text{JUP}}$

Aucune fusion nucléaire

Cœur d'éléments lourds

Naines brunes :

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

Fusion nucléaire temporaire

Astrometric Method

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

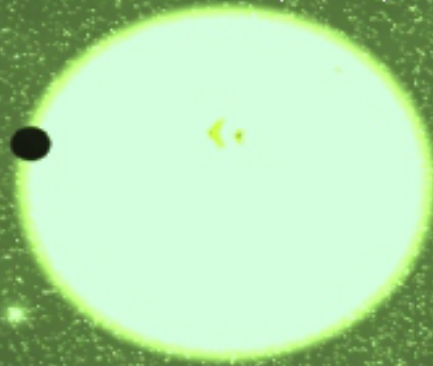
$$V_r(m/s) \approx \frac{30}{[P(yr)]^{1/3}} \frac{M_p(J) \sin i}{[M_*(\odot)]^{2/3}}$$

Microlensing Method

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

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

$$A = \frac{u^2 + 2}{u(u^2 + 4)^{1/2}}, \quad u = \text{impact parameter} \quad \longrightarrow \quad B \geq \frac{\lambda D}{r} \approx \left(\frac{\lambda}{10 \mu m} \right) \left(\frac{D}{10 pc} \right) \left(\frac{r}{1 AU} \right)^{-1} m$$



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

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

Effective Temperature

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

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

Transit Method

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

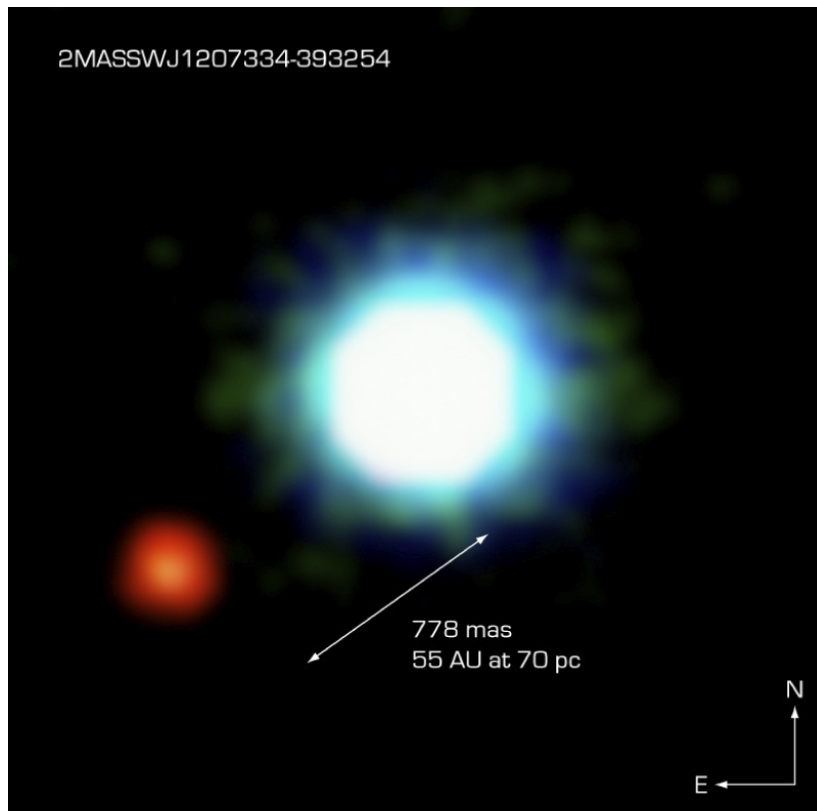
$$i_{\min} = \cos^{-1} \left(\frac{R_*}{a_p} \right), \quad \cos i = \frac{R_* \sin \delta}{a_p}$$

Détections



Détections :

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



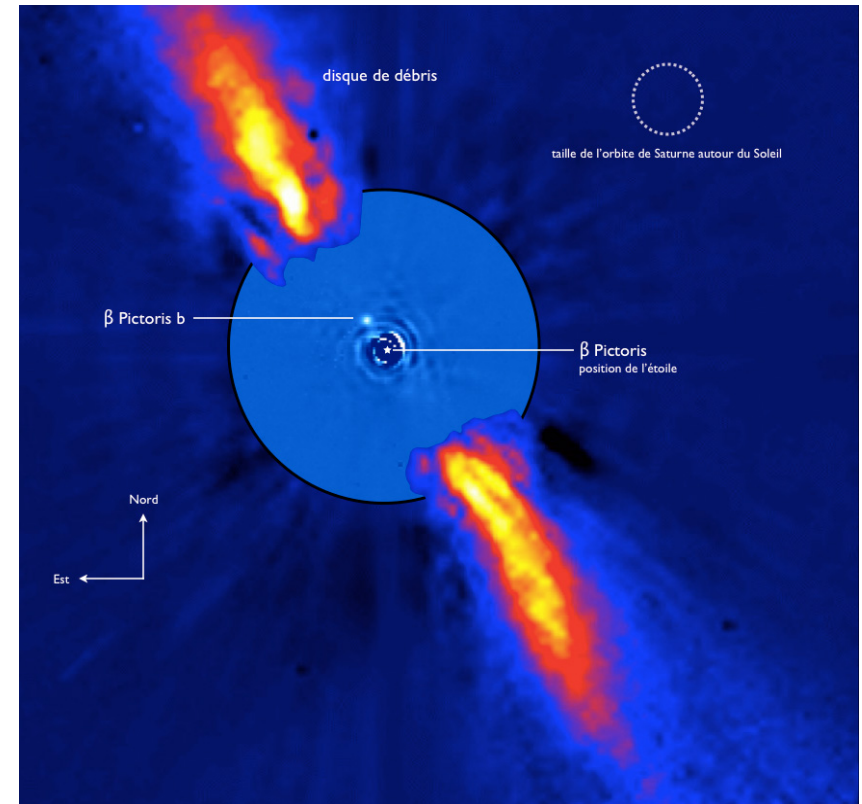
The Brown Dwarf 2M1207 and its Planetary Companion
(VLT/NACO)

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

© ESO



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



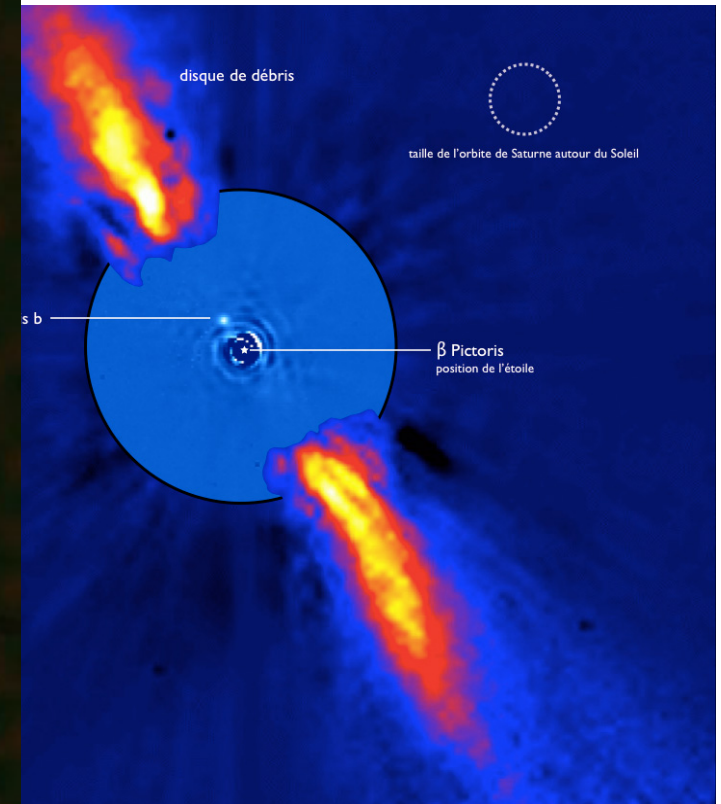
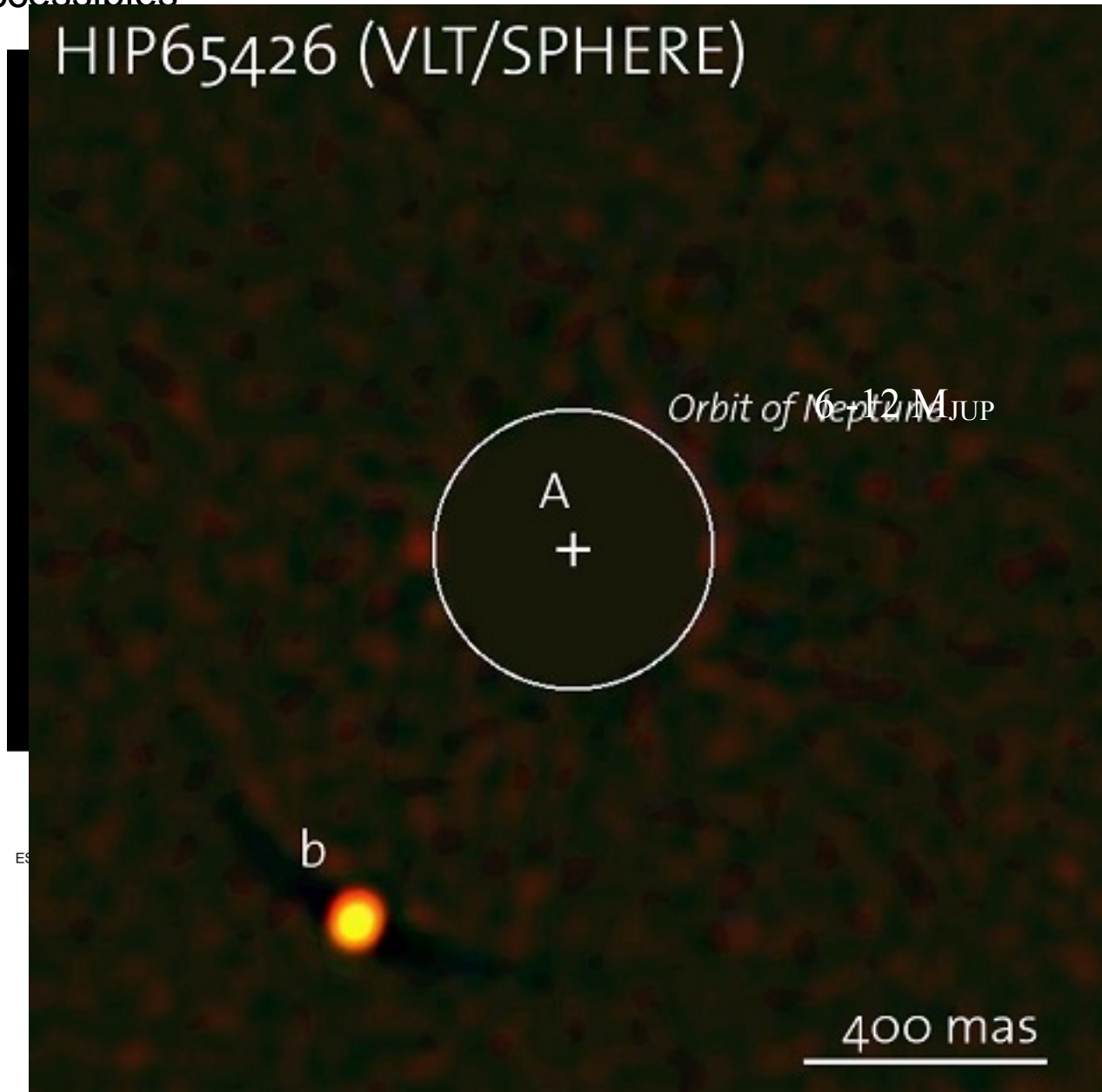
β Pict : Lagrange et al, 2008

planète massive (5-8 M_{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 (5-8 M_{JUP}), Objet jeune

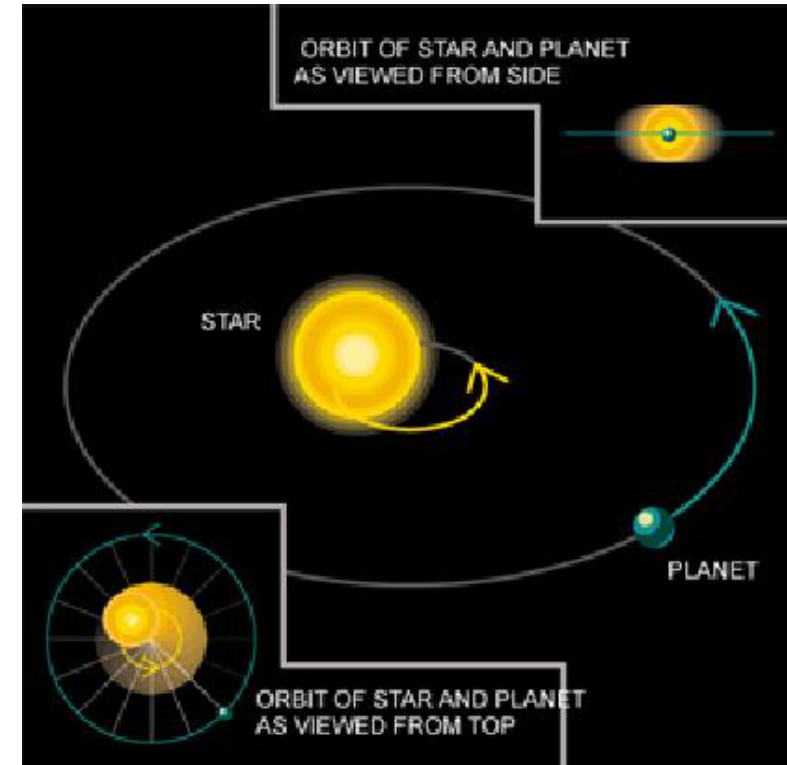
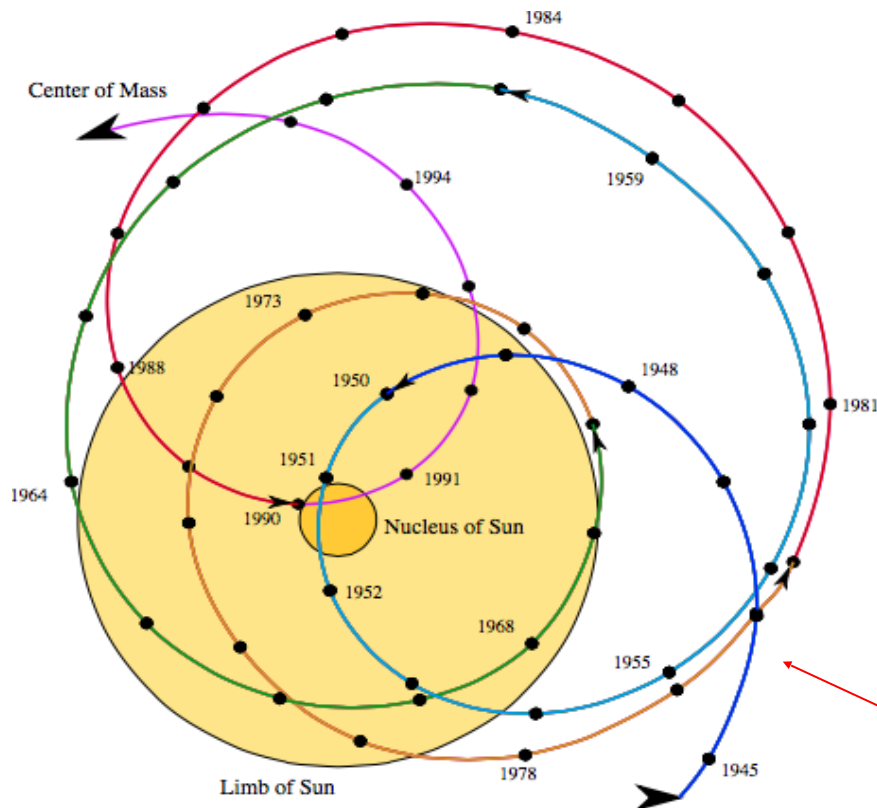


Détections :

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

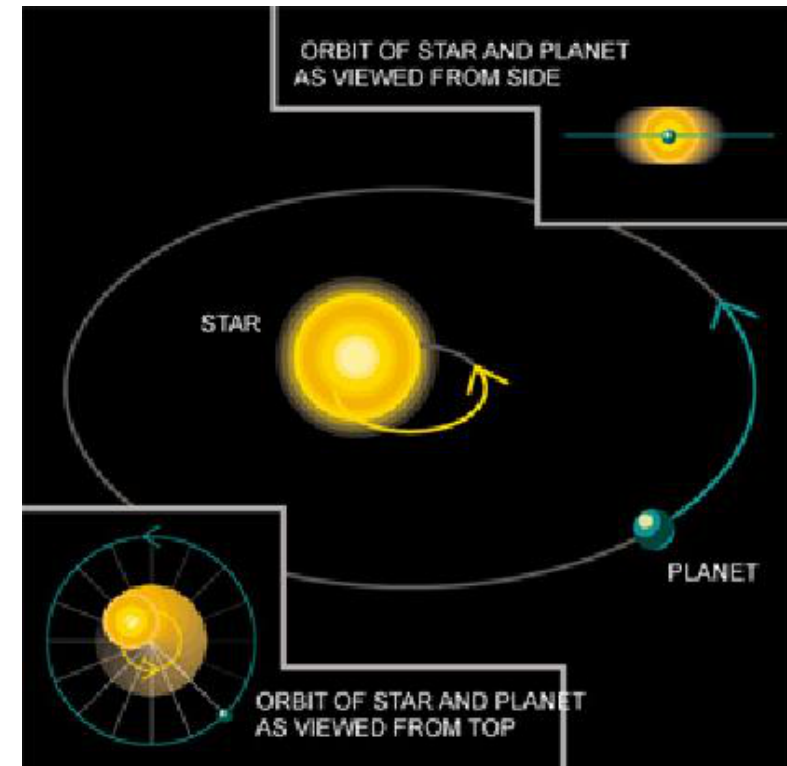
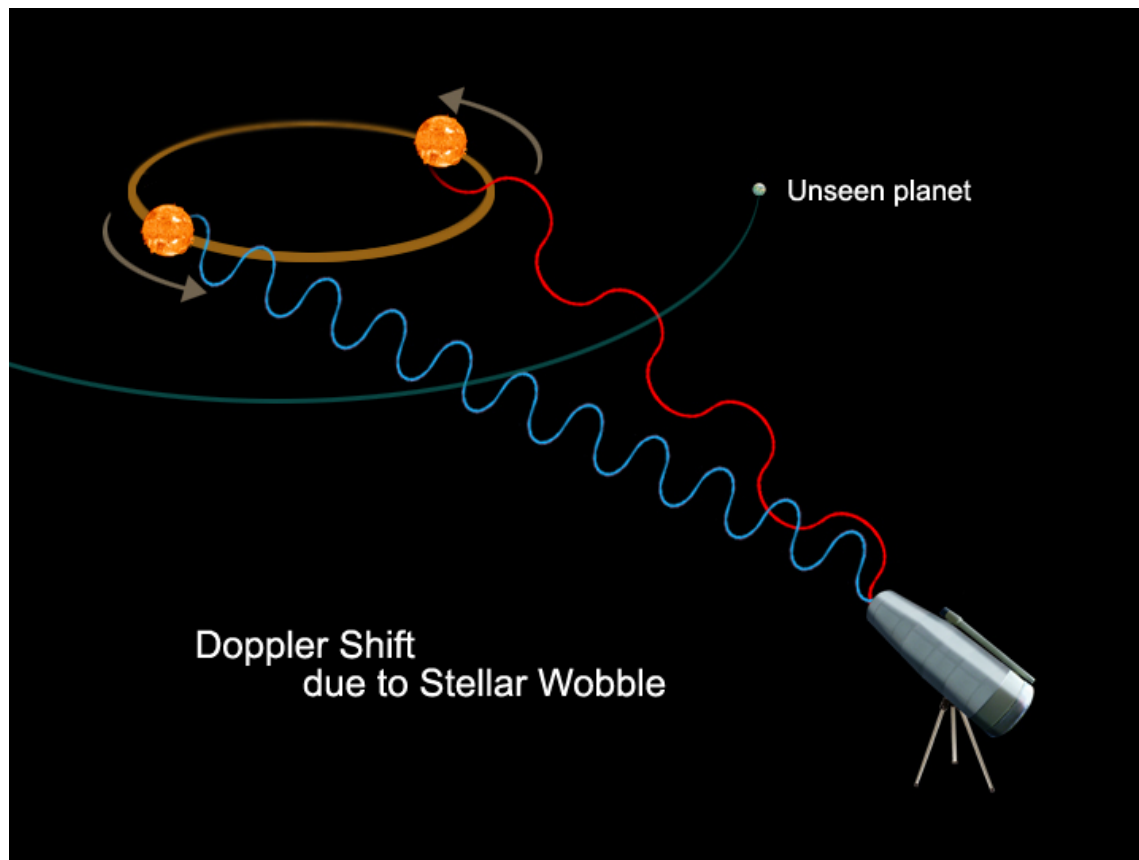


L'étoile subit un mouvement orbital détectable même si la planète est invisible

Mouvement du Soleil sur 50 ans

Détection indirecte :

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



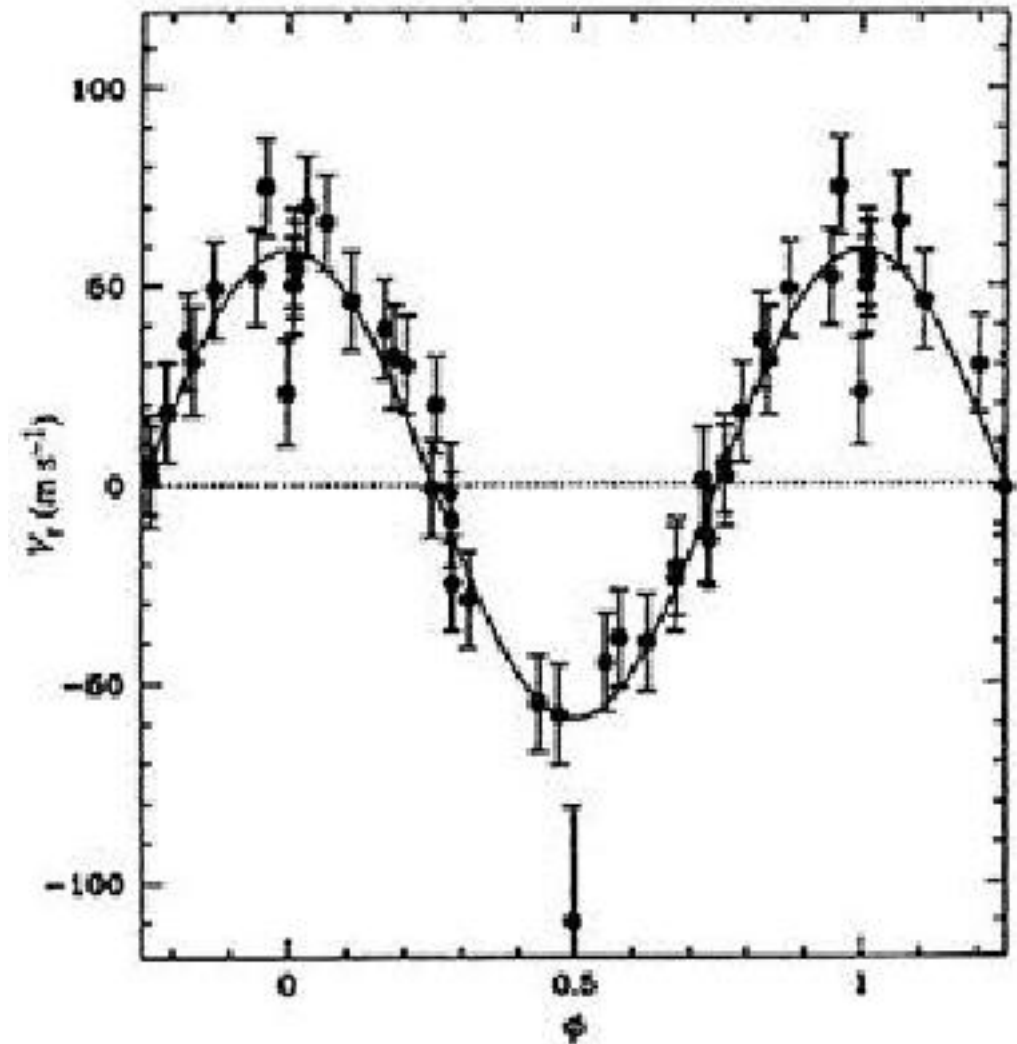
Détection indirecte par vitesse radiale

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

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

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

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

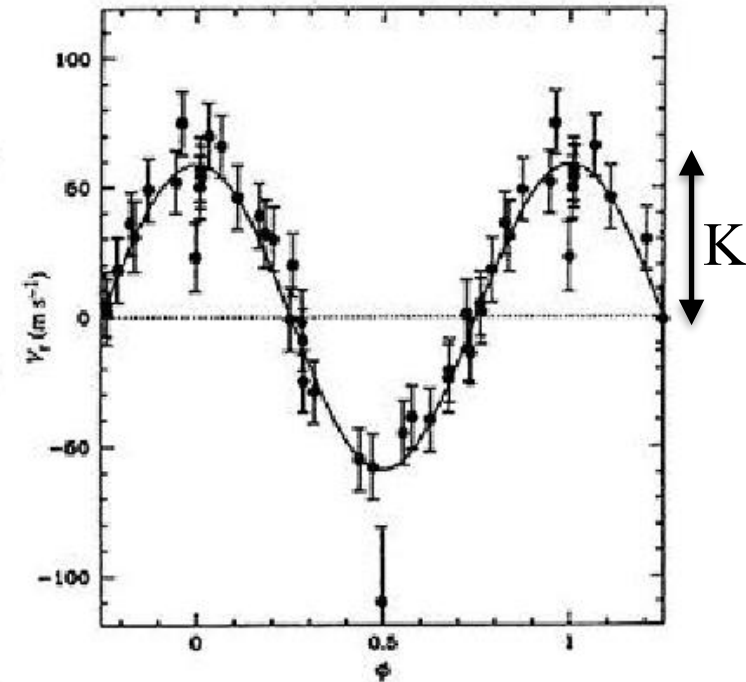
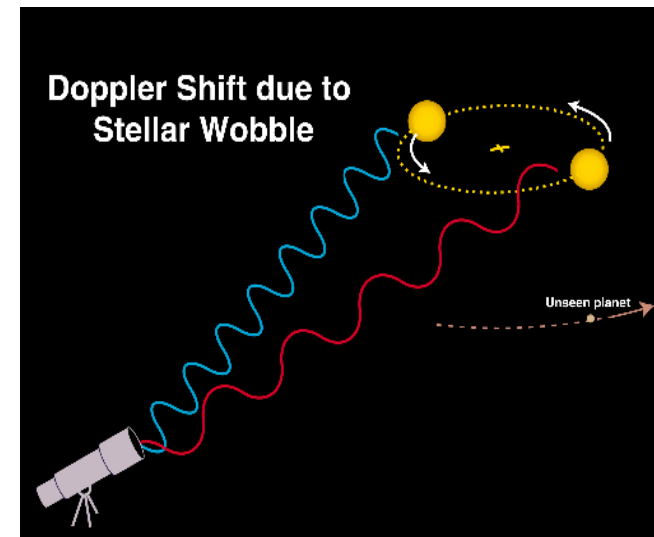
K : semi-amplitude de la vitesse radiale

m : masse de la planète

M_* : masse de l'étoile

P : Période orbitale

a : séparation orbitale



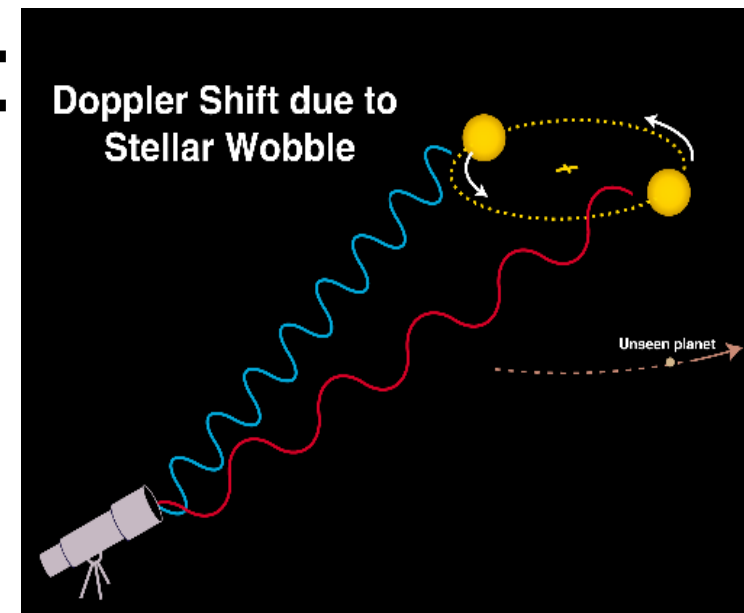
Une méthode plus sensible aux planètes proches de leurs étoiles

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 :

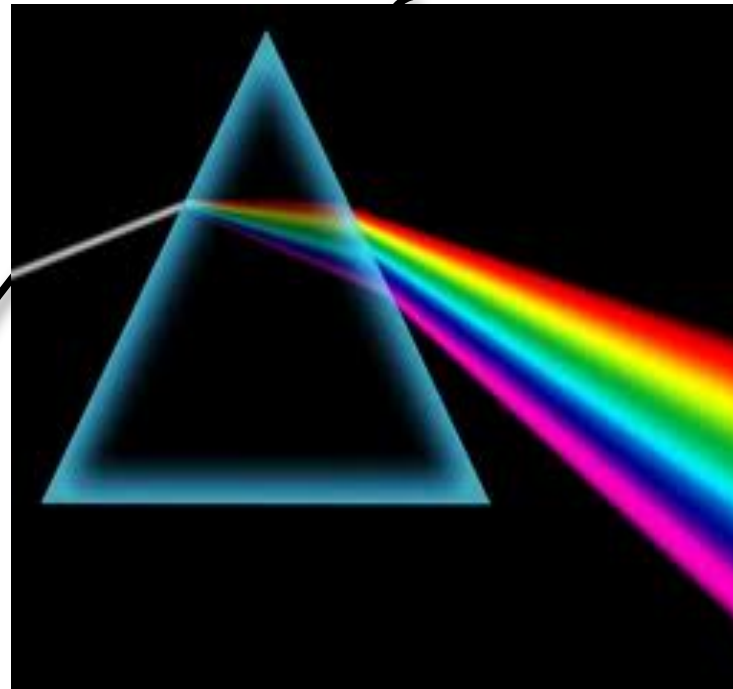
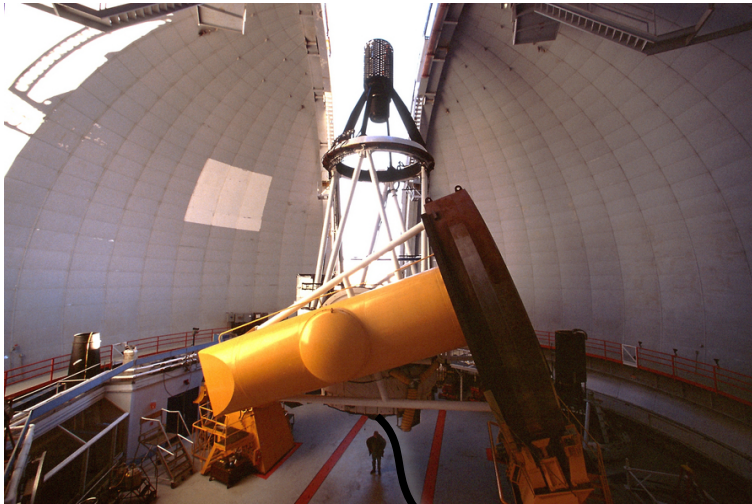
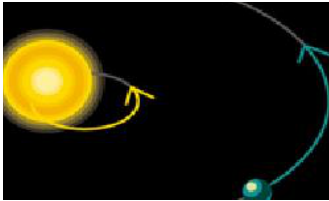


1./ Dans le cas d'une étoile de $1M_{\text{solaire}}$

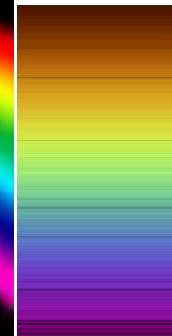
	$P = 10j$	$P = 100j$	$P = 1an$	$P = 10 \text{ ans}$
$10 M_{\text{TERRE}}$	3 m/s	1.4 m/s	0.9 m/s	0.4 m/s
$1 M_{\text{TERRE}}$	0.3 m/s	0.14 m/s	0.09 m/s	0.04 m/s

Détections :

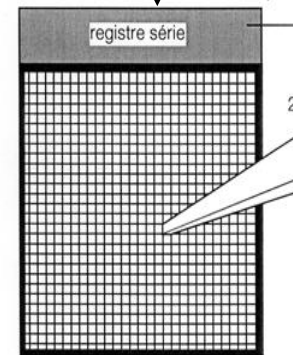
Détection indirecte par vitesse radiale :



Spectre
stellaire



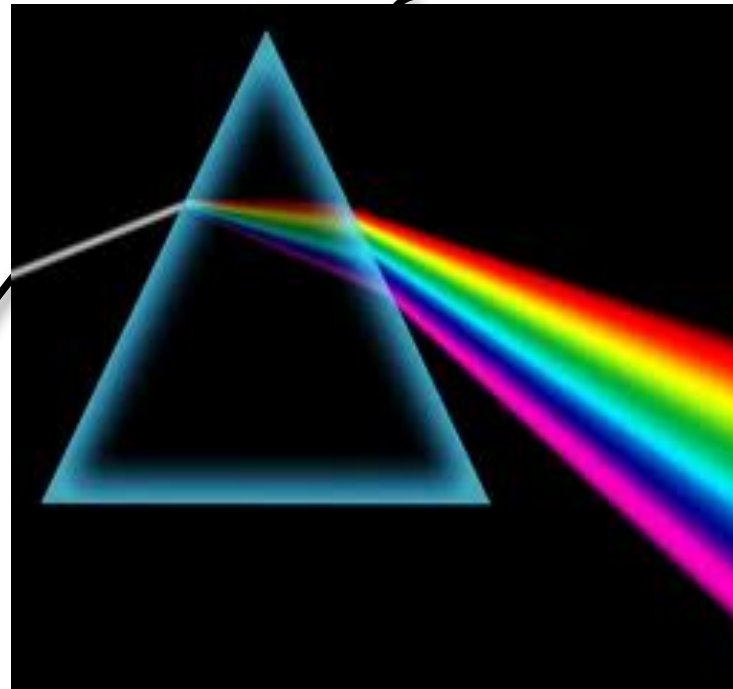
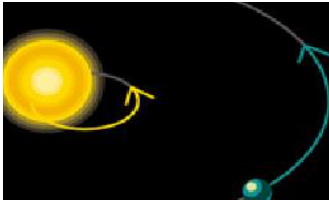
Projeté sur un
détecteur CCD



pavé de 512 x 512 pixels

Détections :

Détection indirecte par vitesse radiale :



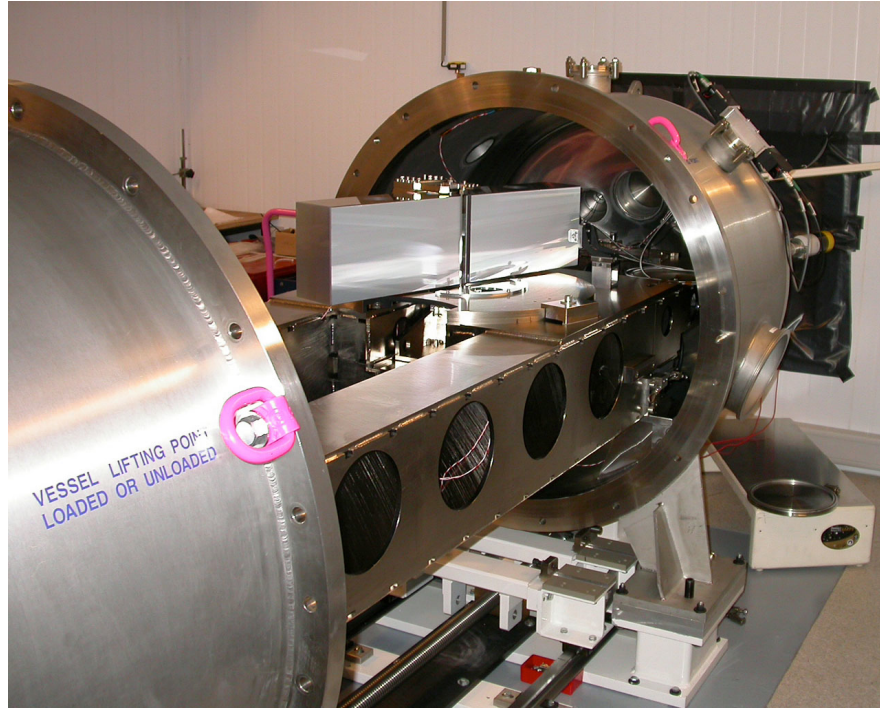
Déplacement du spectre
Sous effet Doppler pour
 $\Delta V_r = 1 \text{ m/s}$

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

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

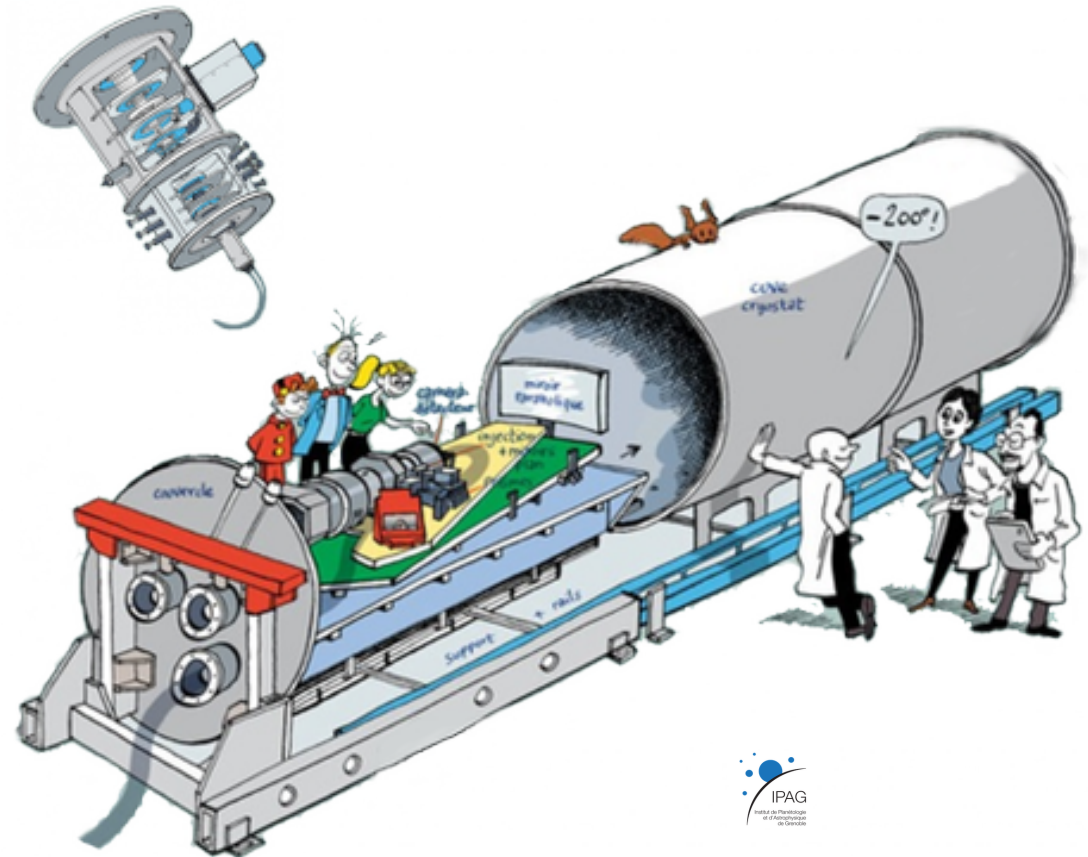
Détections :

Détection indirecte par vitesse radiale :



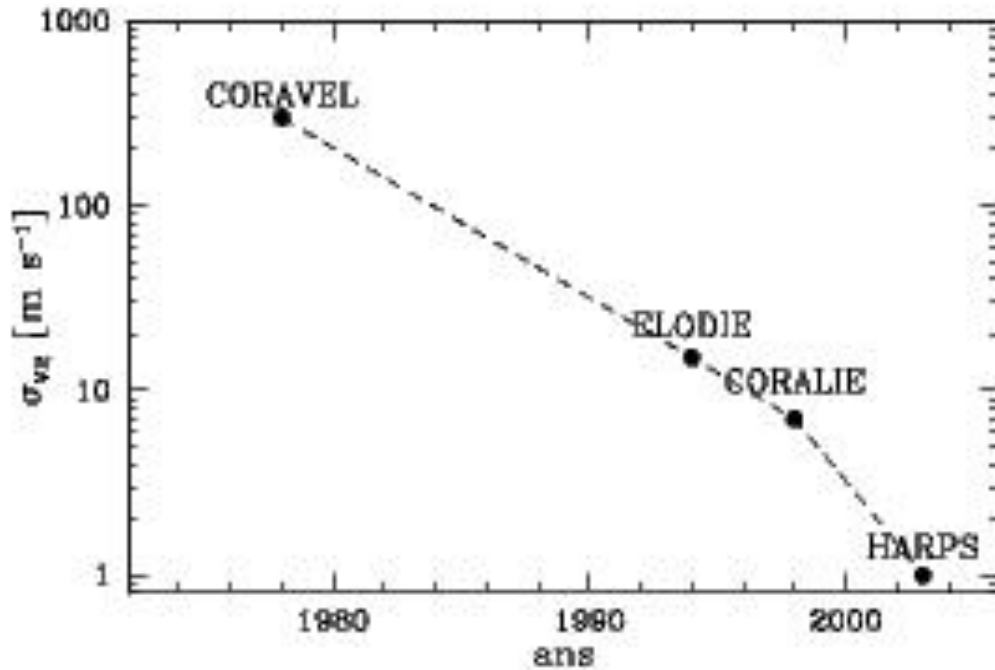
Besoin d'une grande stabilité :

instrument sous vide et stabilisé à 1/1000 K



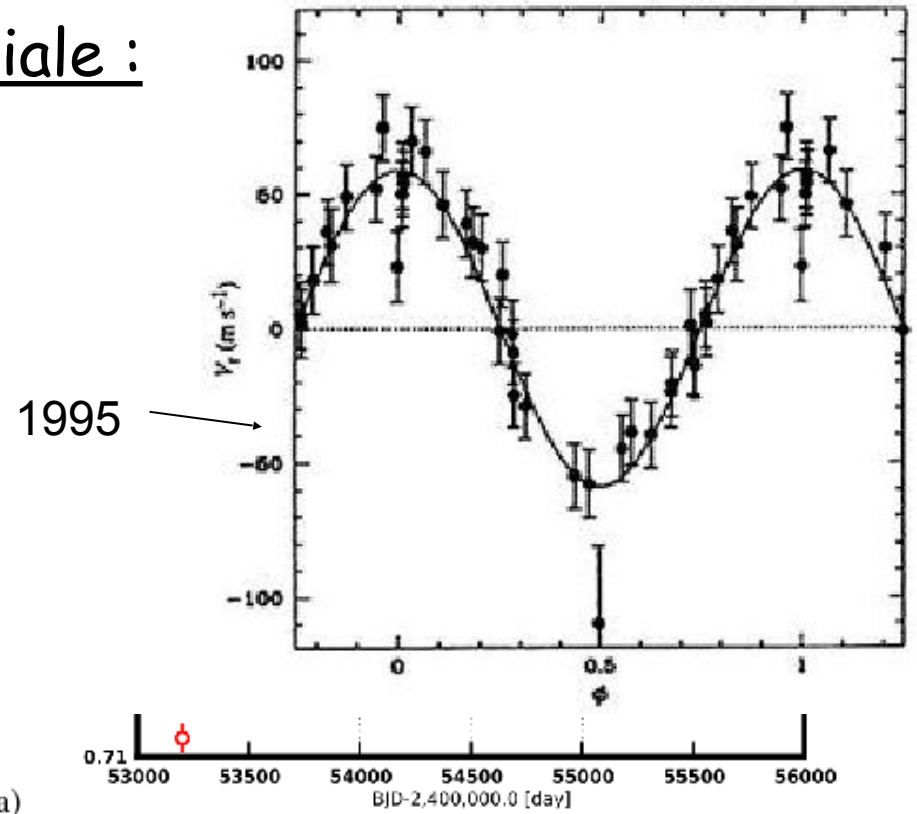
Détections :

Détection indirecte par vitesse radiale :

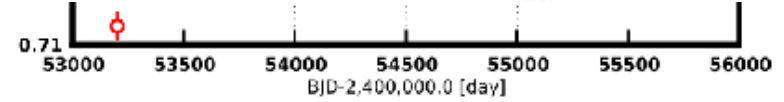


Actuellement : HARPS $\sim 1\text{m/s}$ sur le long terme

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

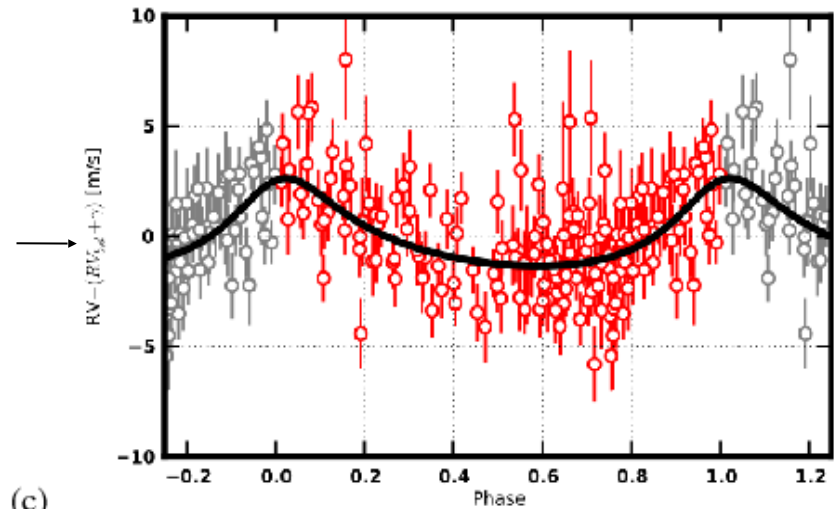


(a)



(b)

2012



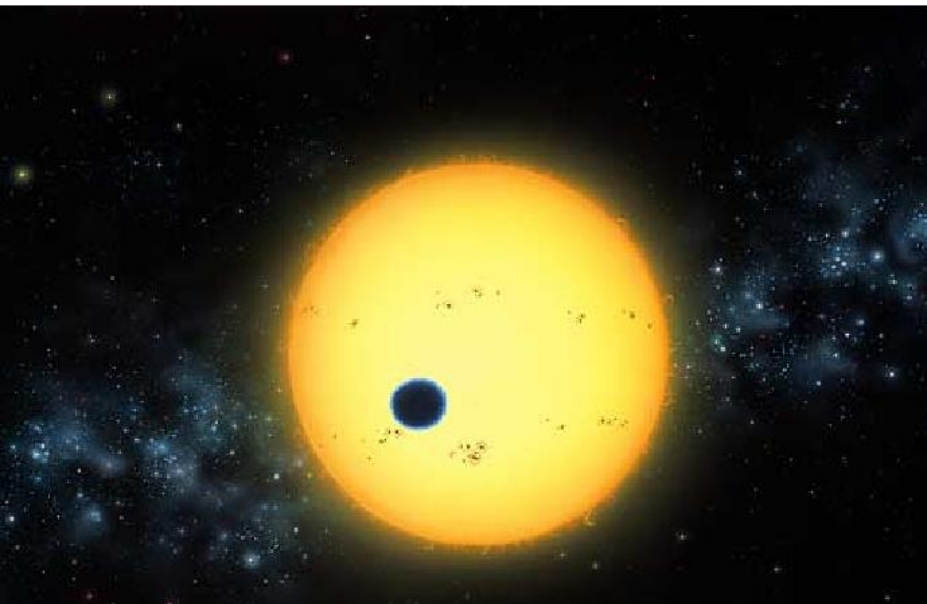
(c)



(d)

Détections :

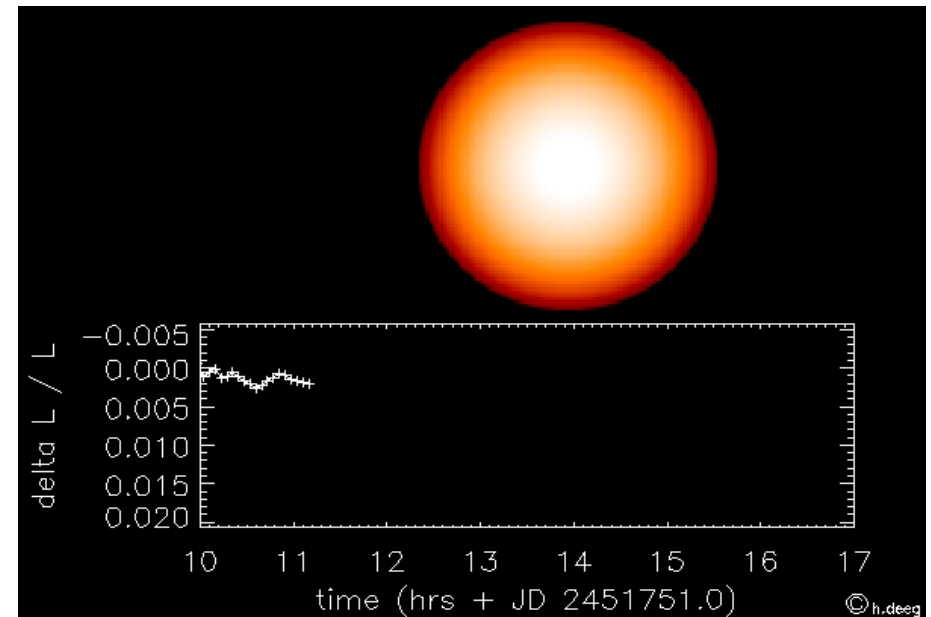
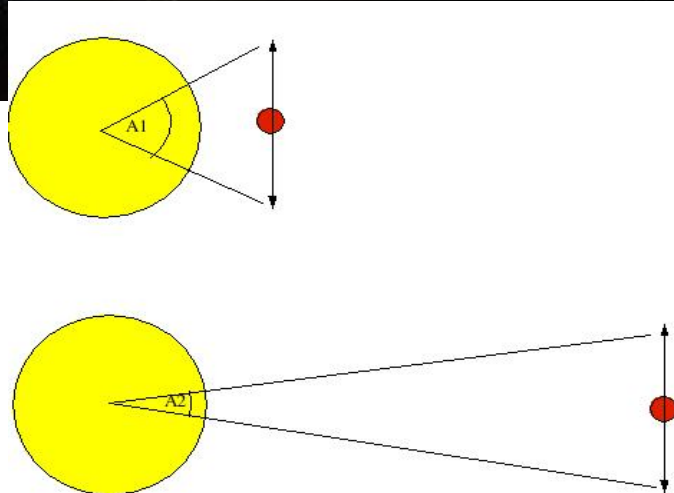
Transit :



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

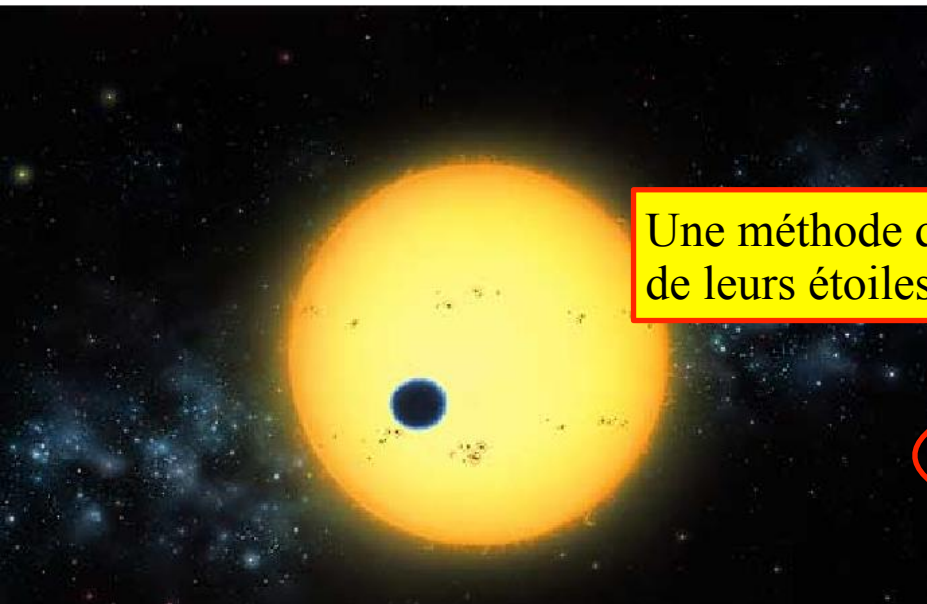
Ce sont des cas particuliers

Plus probable si la période de la planète est très courte



Détections :

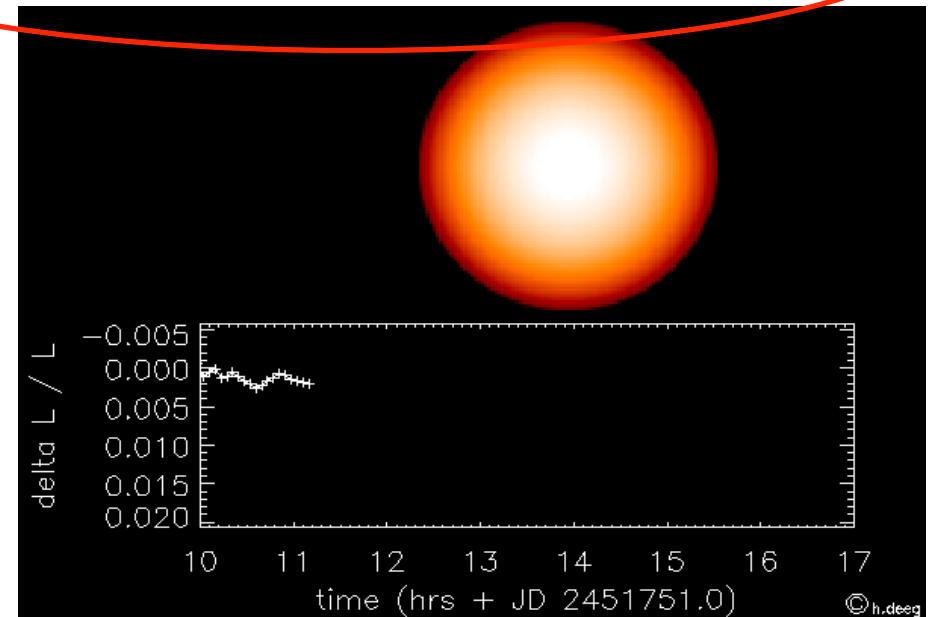
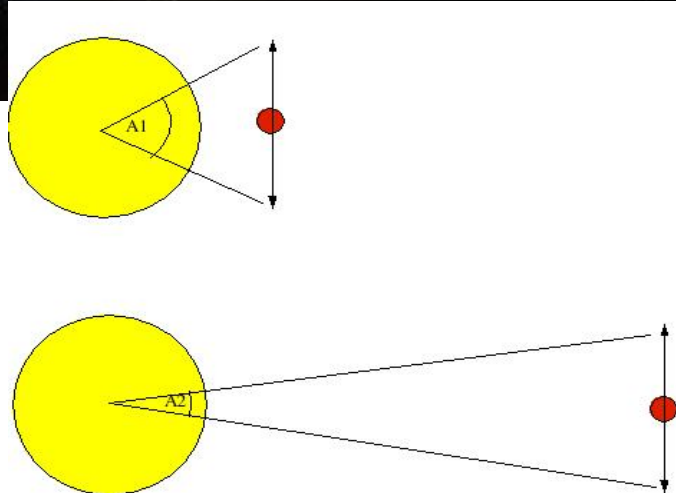
Transit :



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 :

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

F_{off} : Flux stellaire en dehors du transit

F_{on} : Flux stellaire au maximum du transit

r : rayon de la planète

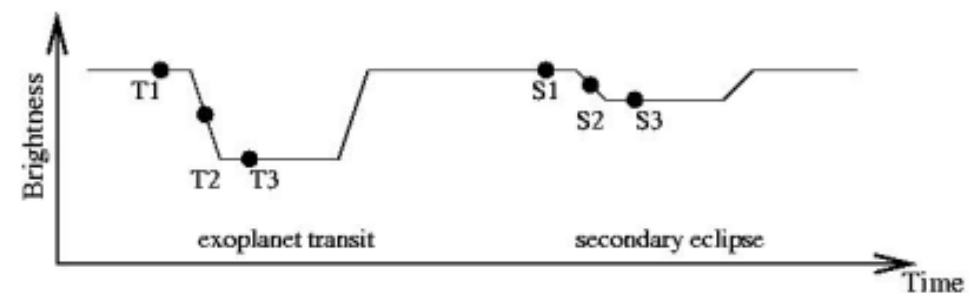
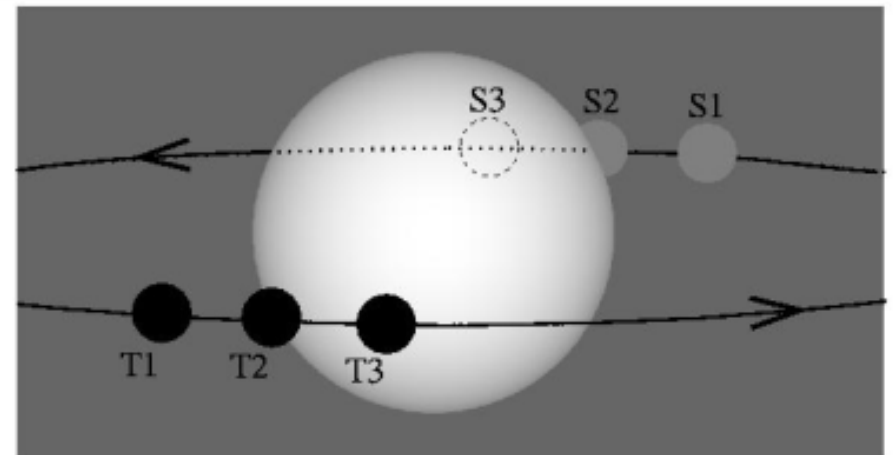
R : rayon de l'étoile

Permet d'extraire :

- période
- rayon de la planète

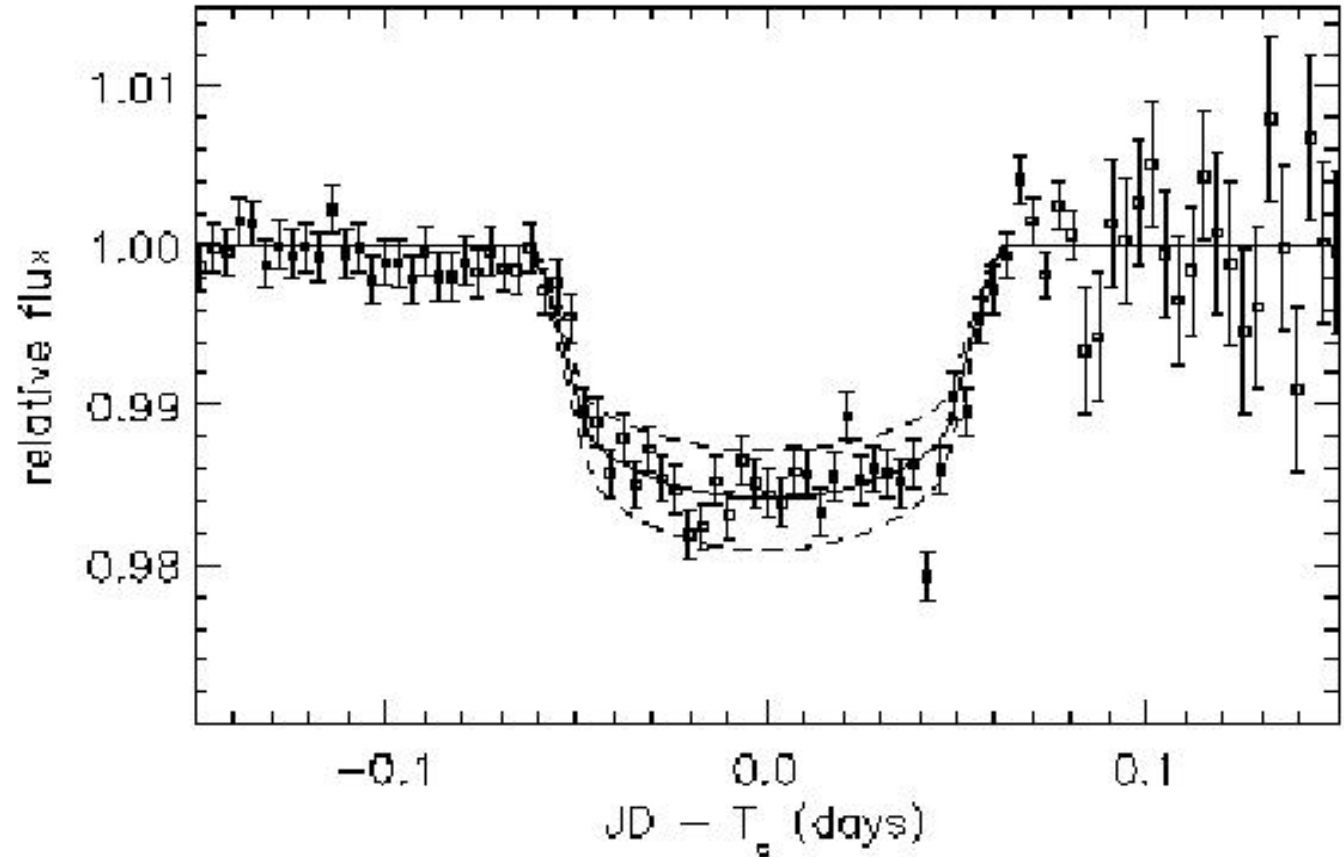
Plus probable pour :

- les périodes courtes



Détections :

Transit :



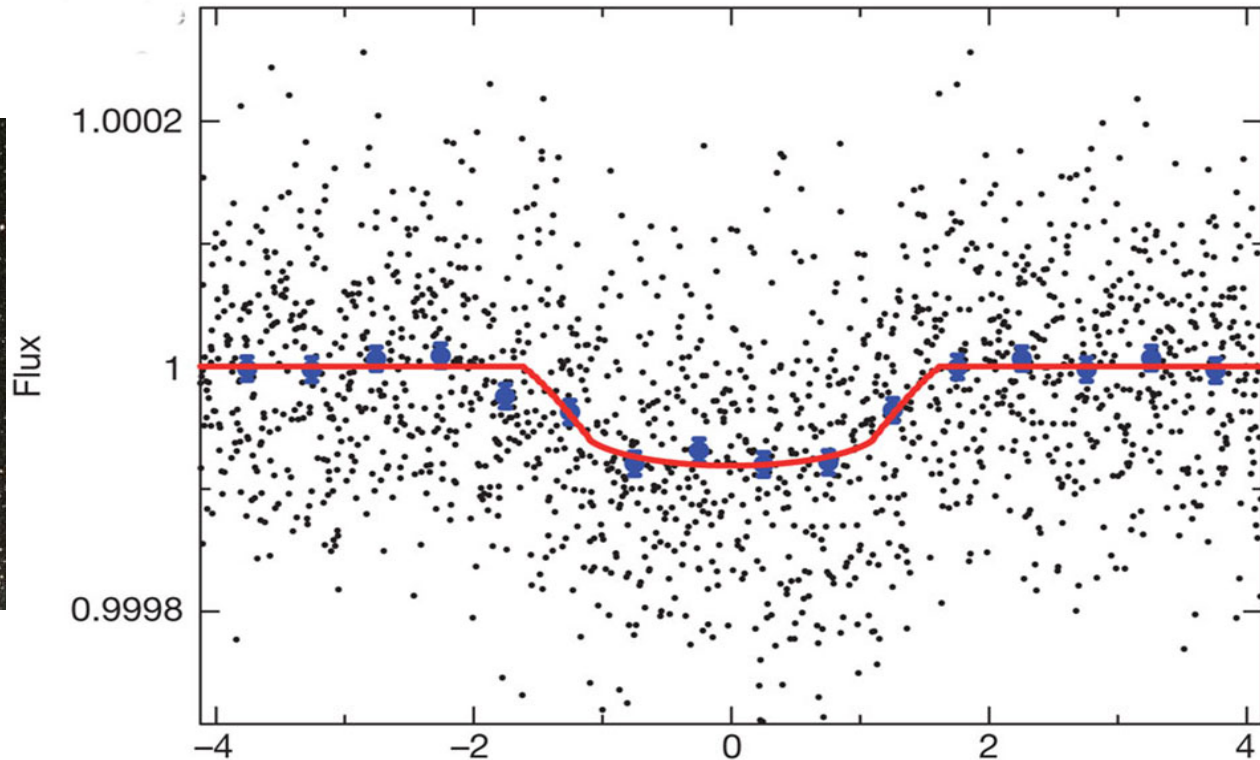
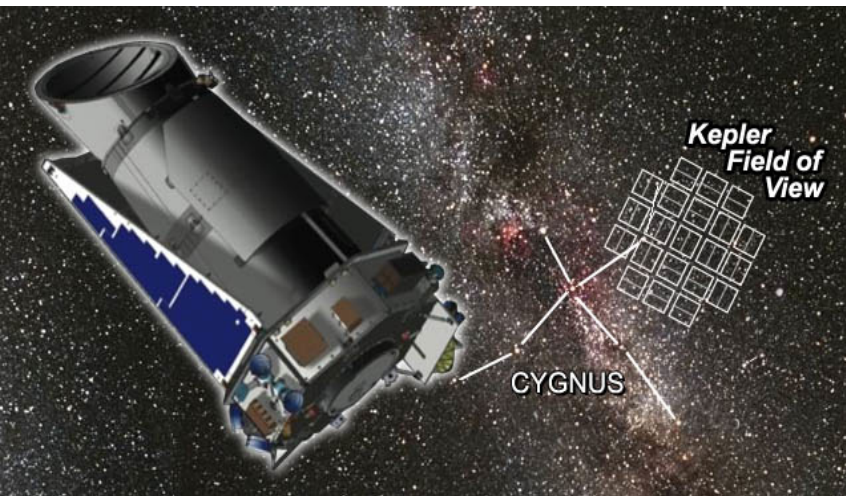
Premier cas observé en 2000

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

⇒ HD 209458

Détections :

Transit :

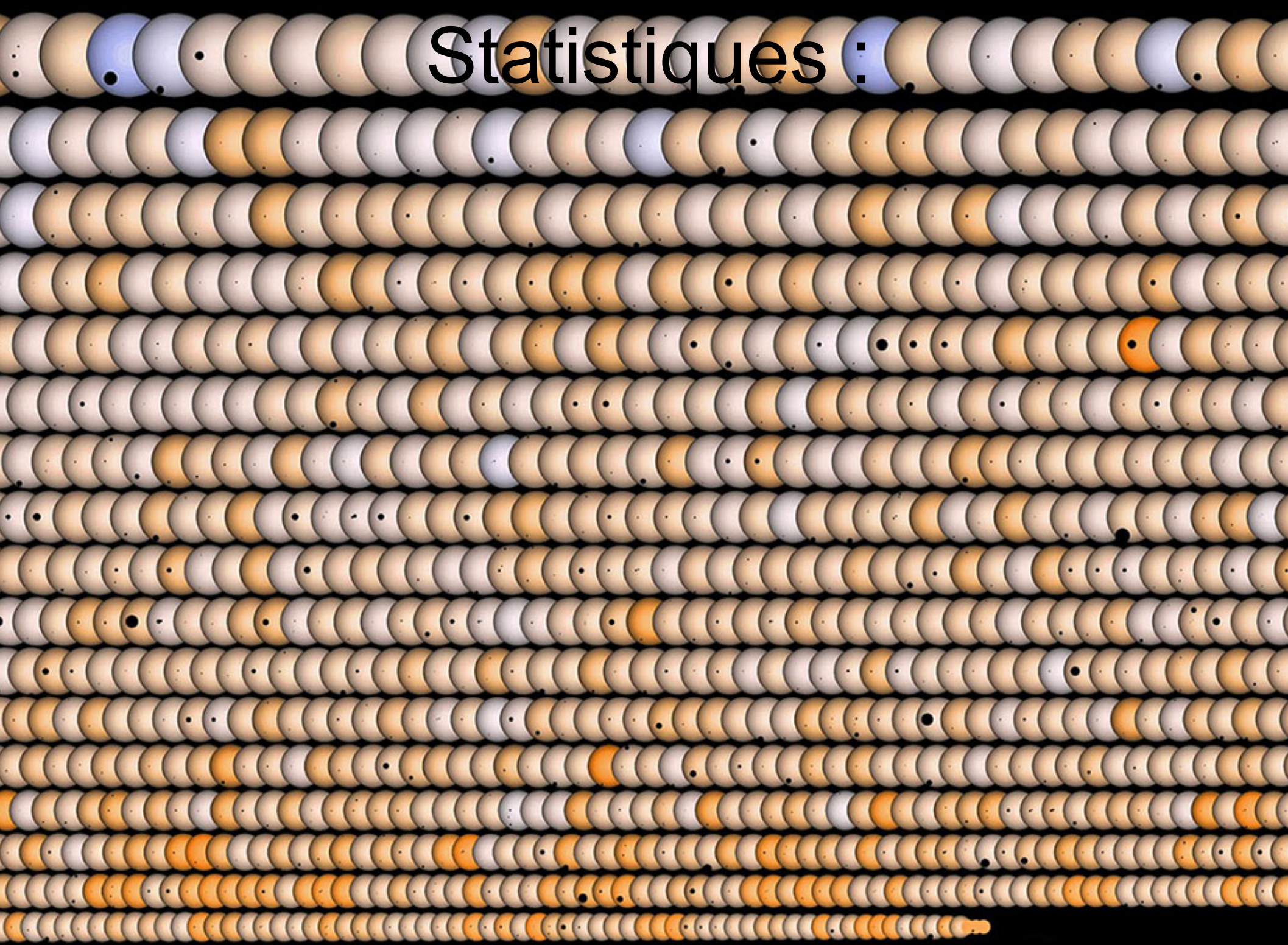


Le signal est parfois très faible... mesure via des satellites

Développements algorithmiques pour extraire le signal.

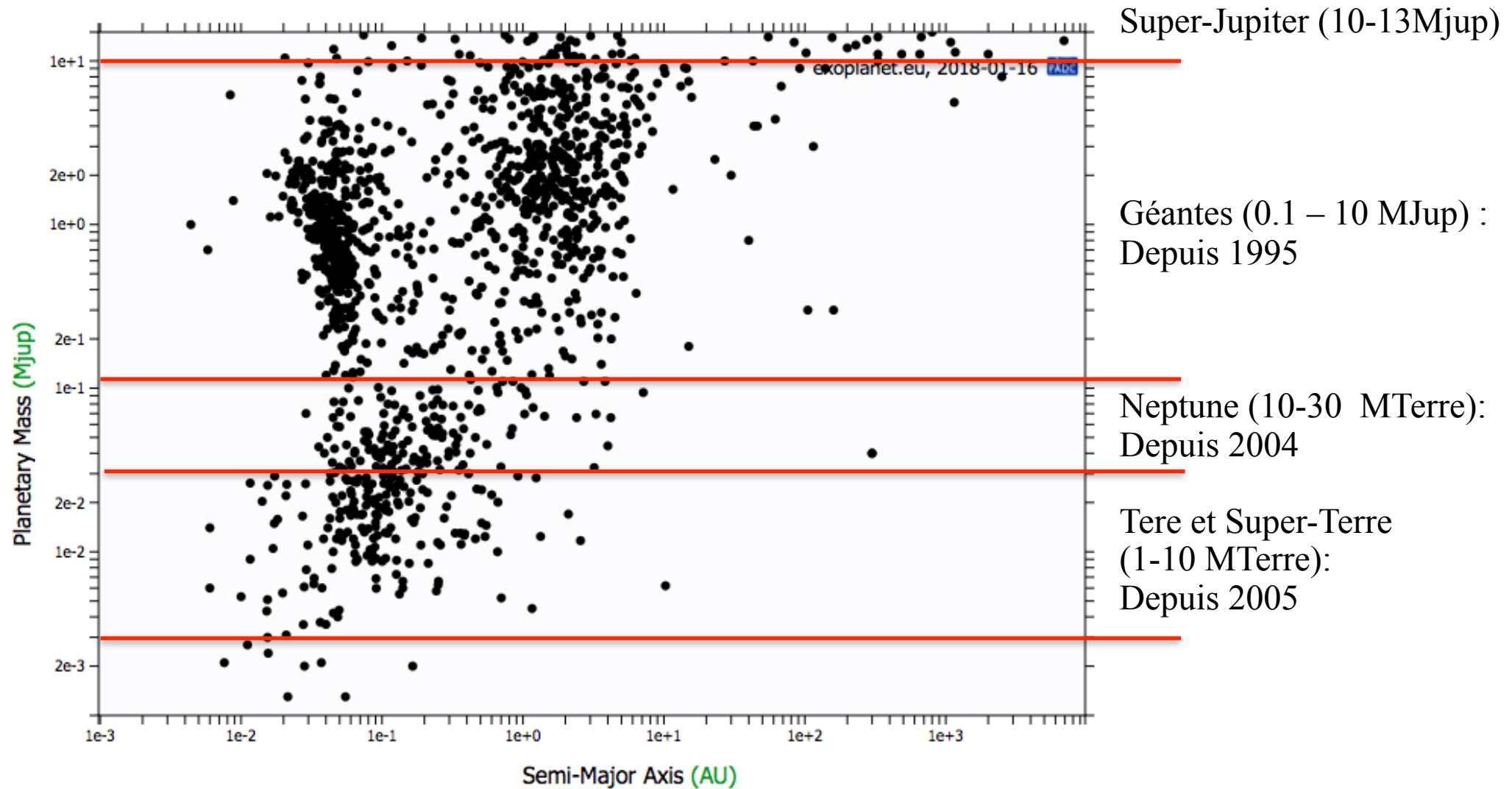
⇒ Kepler 186f : diamètre 15000km
profondeur du transit $\sim 1/10000$

Statistiques :



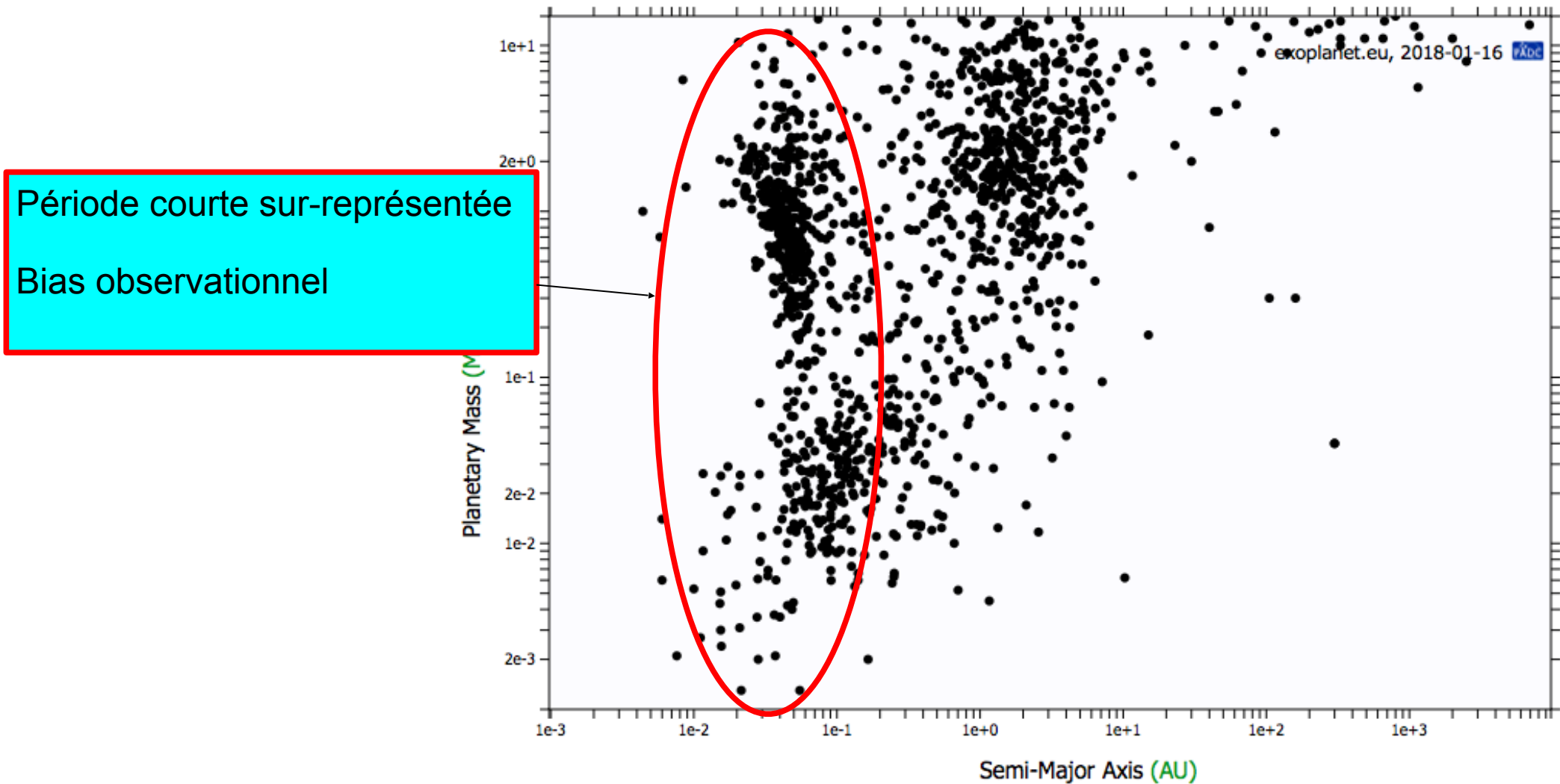
Statistiques :

Diagramme masse-période :



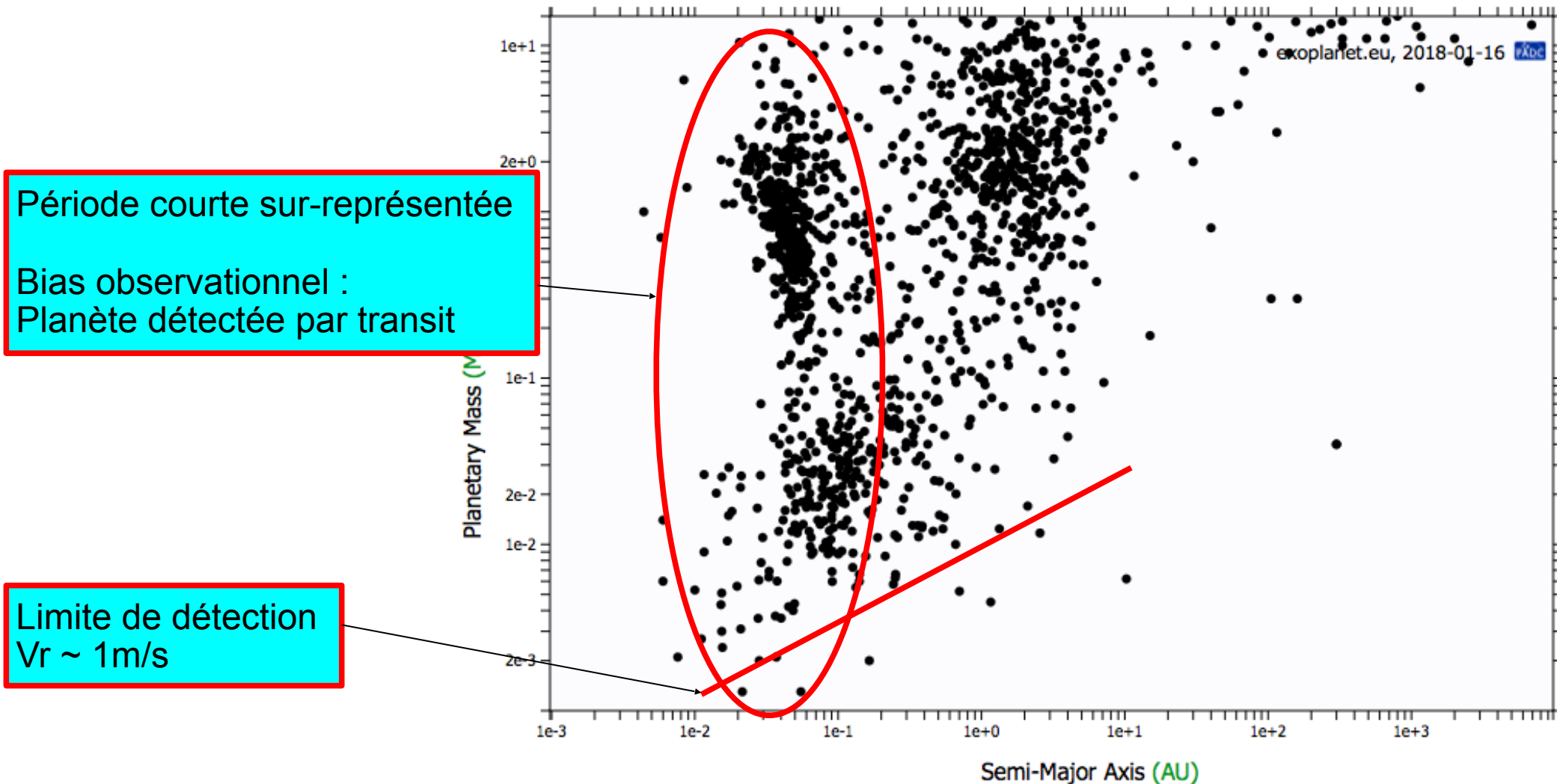
Statistiques :

Diagramme masse-période :



Statistiques :

Diagramme masse-période :



Statistiques :

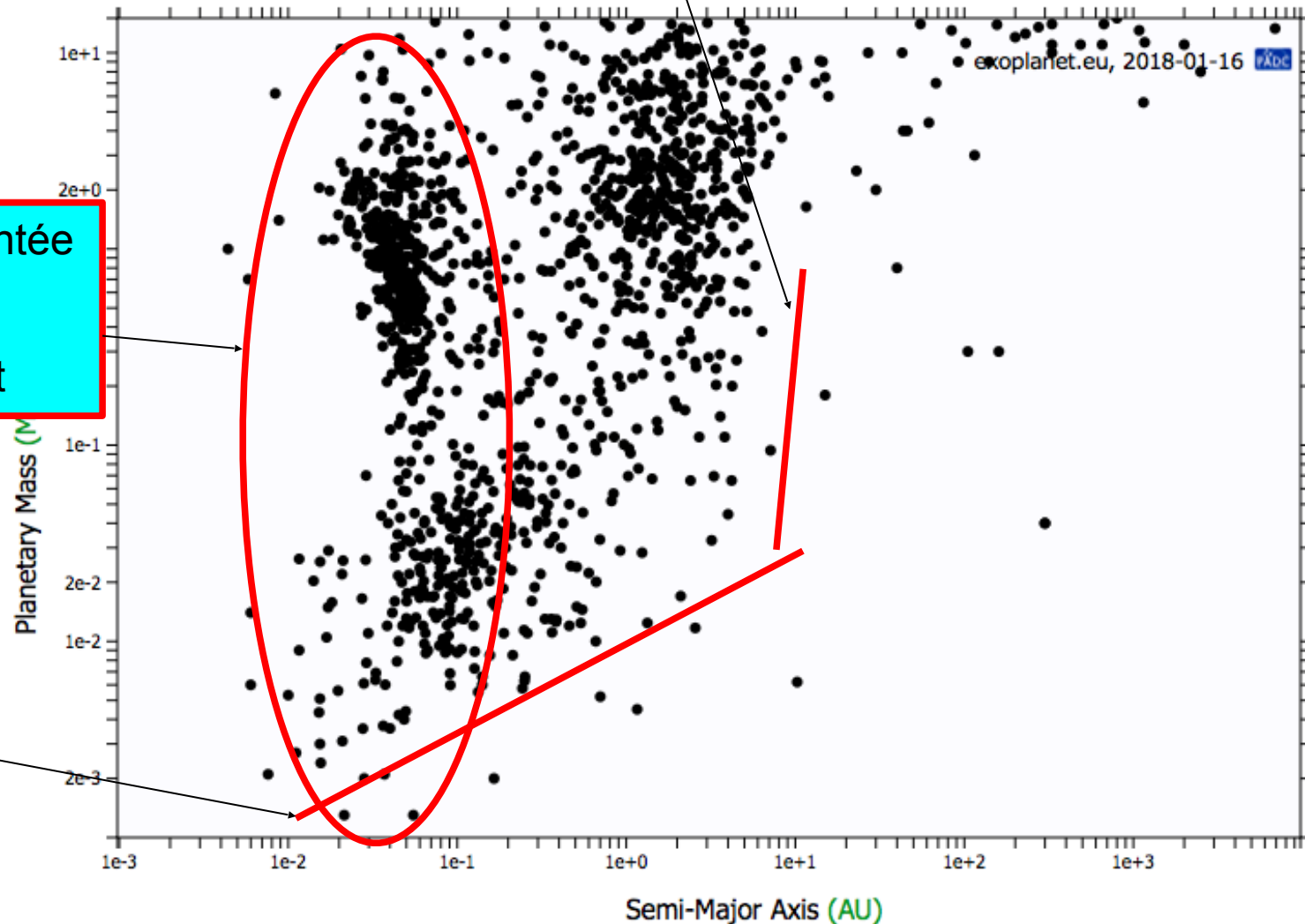
Diagramme masse-période :

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 :

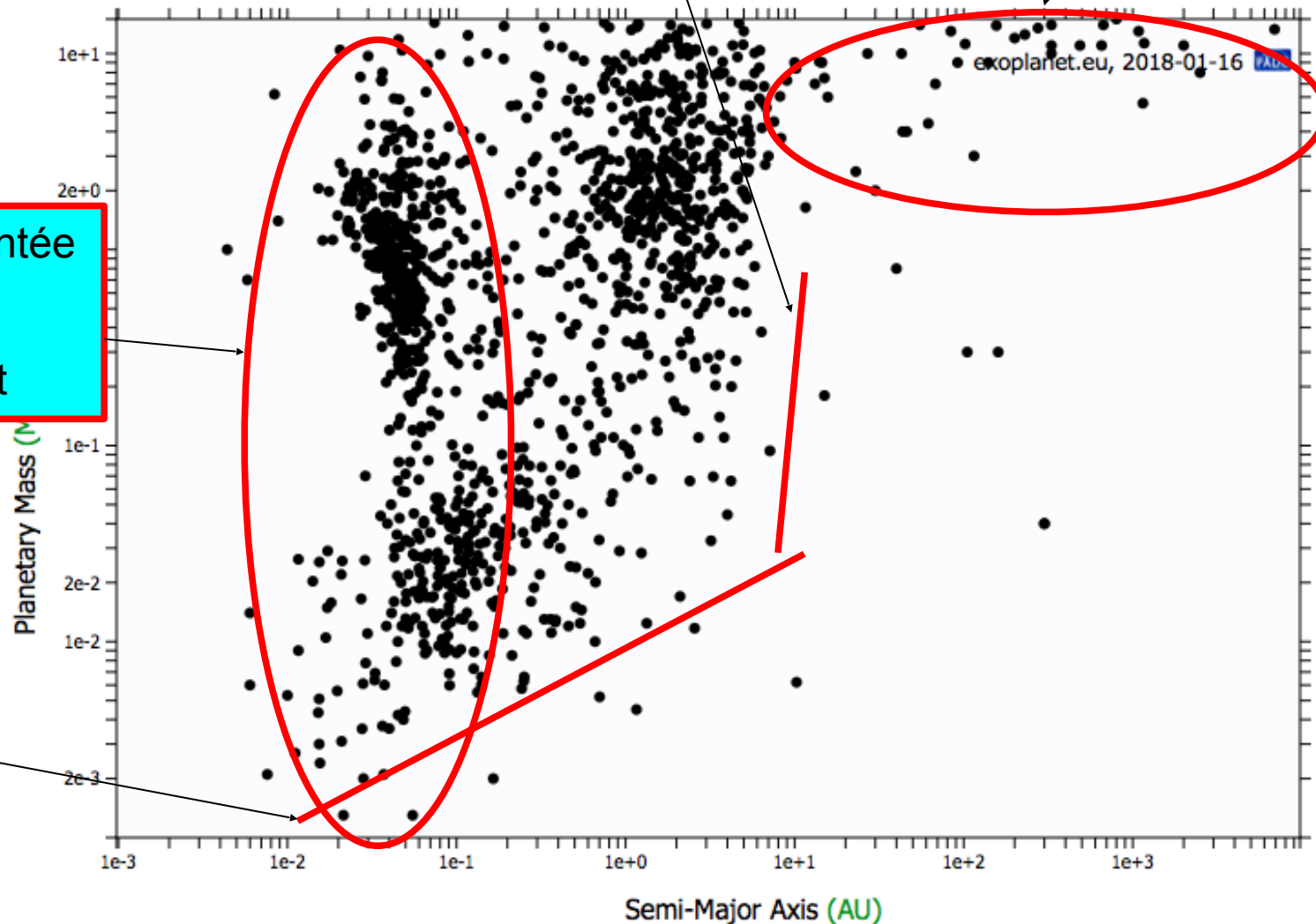
20 ans : durée typique
des relevés Vr

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 Vr

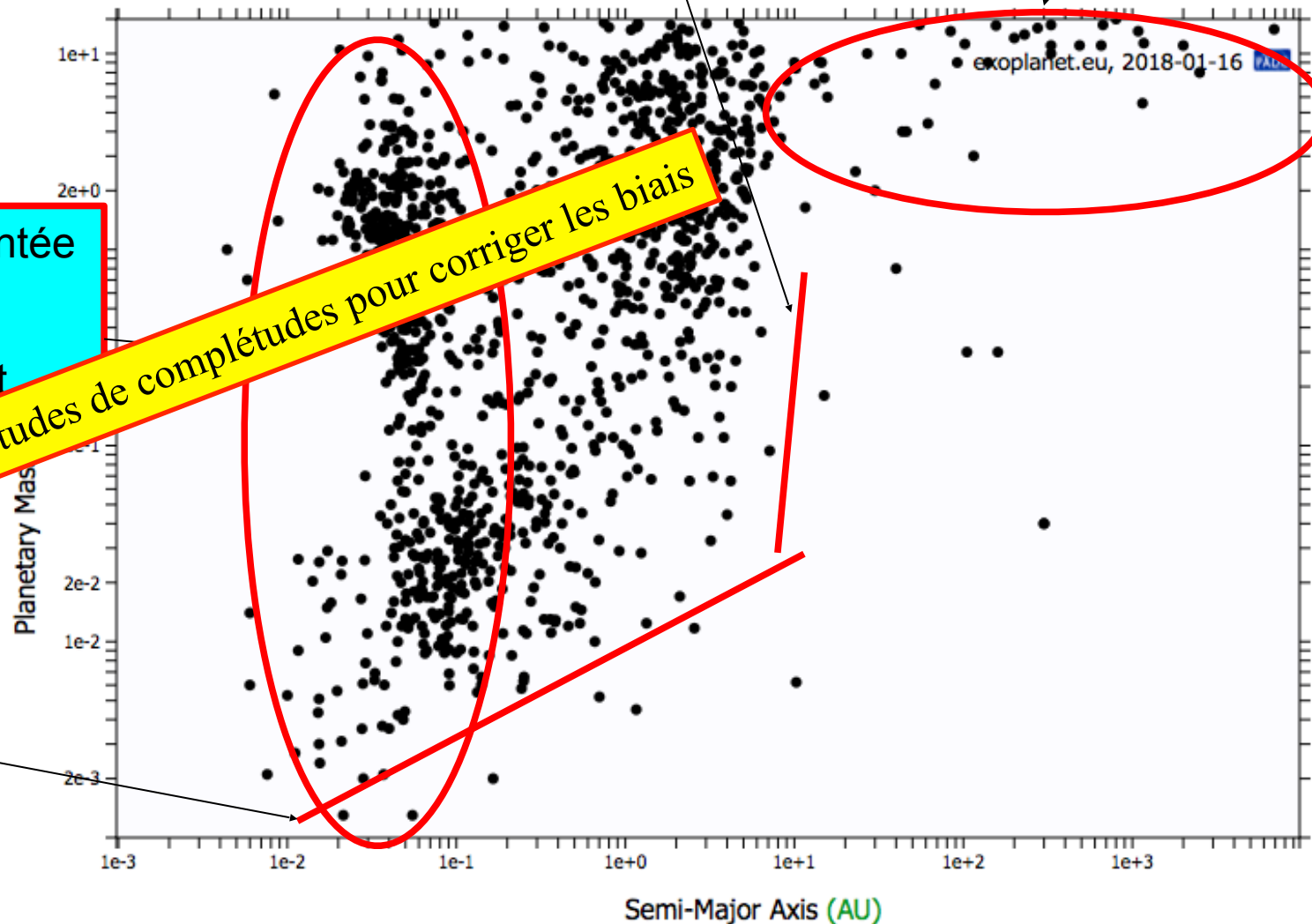
Détections par imagerie

Période courte sur-représentée

Bias observationnel :
Planète détectée par transit

Nécessite des études de complétudes pour corriger les biais

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



Statistiques :

Autour des étoiles de type solaire

⇒ 14% hébergent des planètes géantes
à moins de 10 ans de périodes.

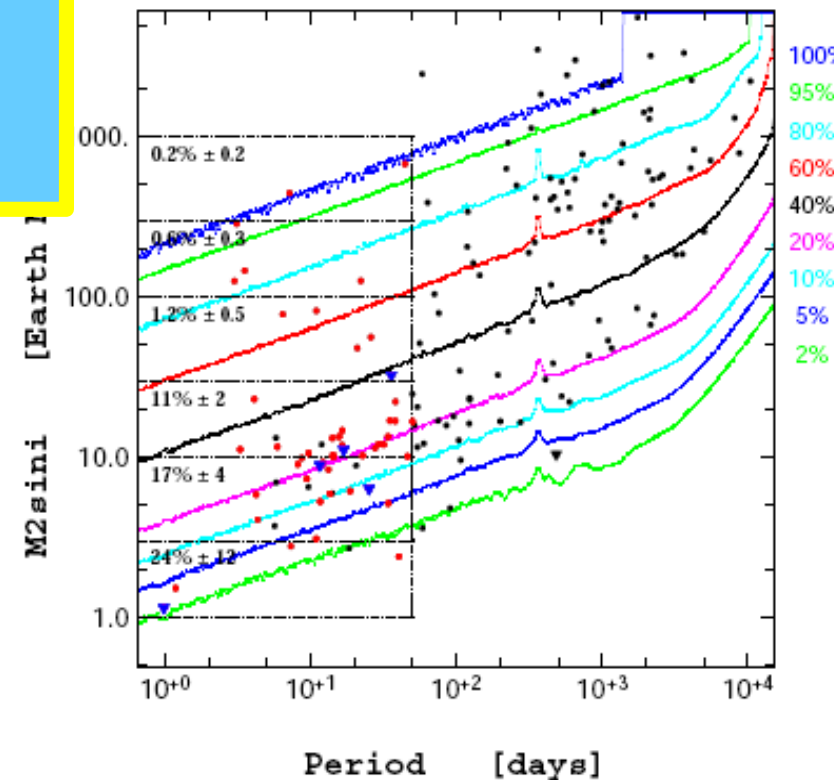
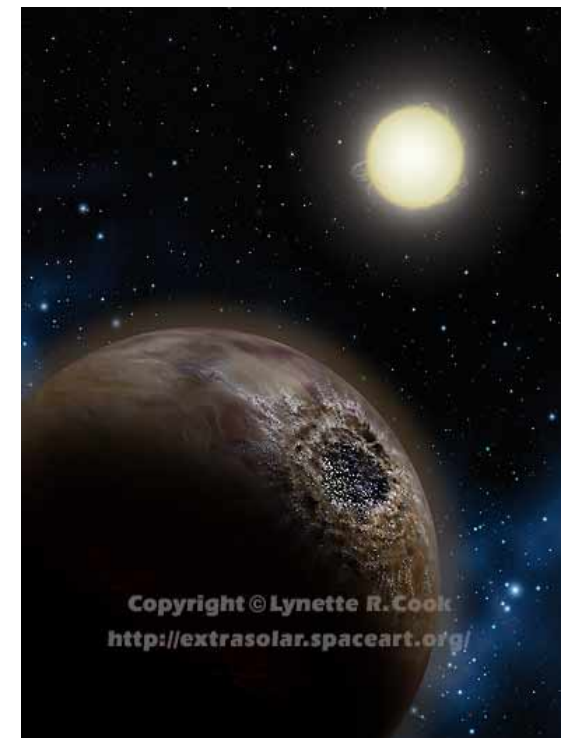
⇒ 50% hébergent des planètes
« super-terres » et « neptune » ($2-30 M_{\text{Terre}}$)
à moins de 100 jours de Période.

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** » ($2-10 M_{\text{Terre}}$)
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

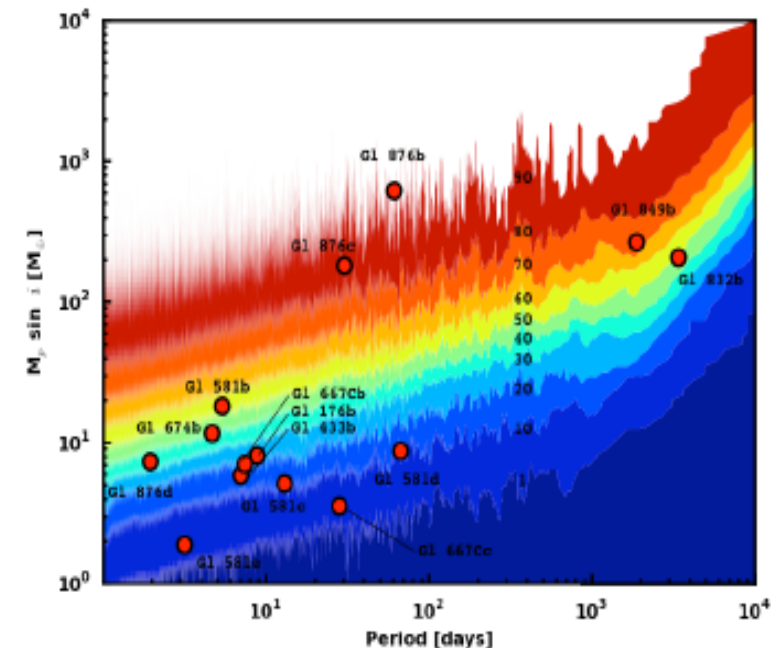
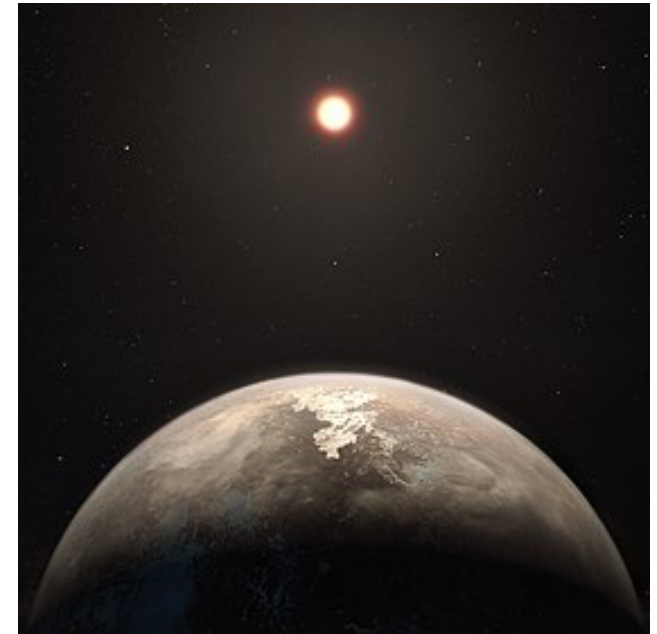
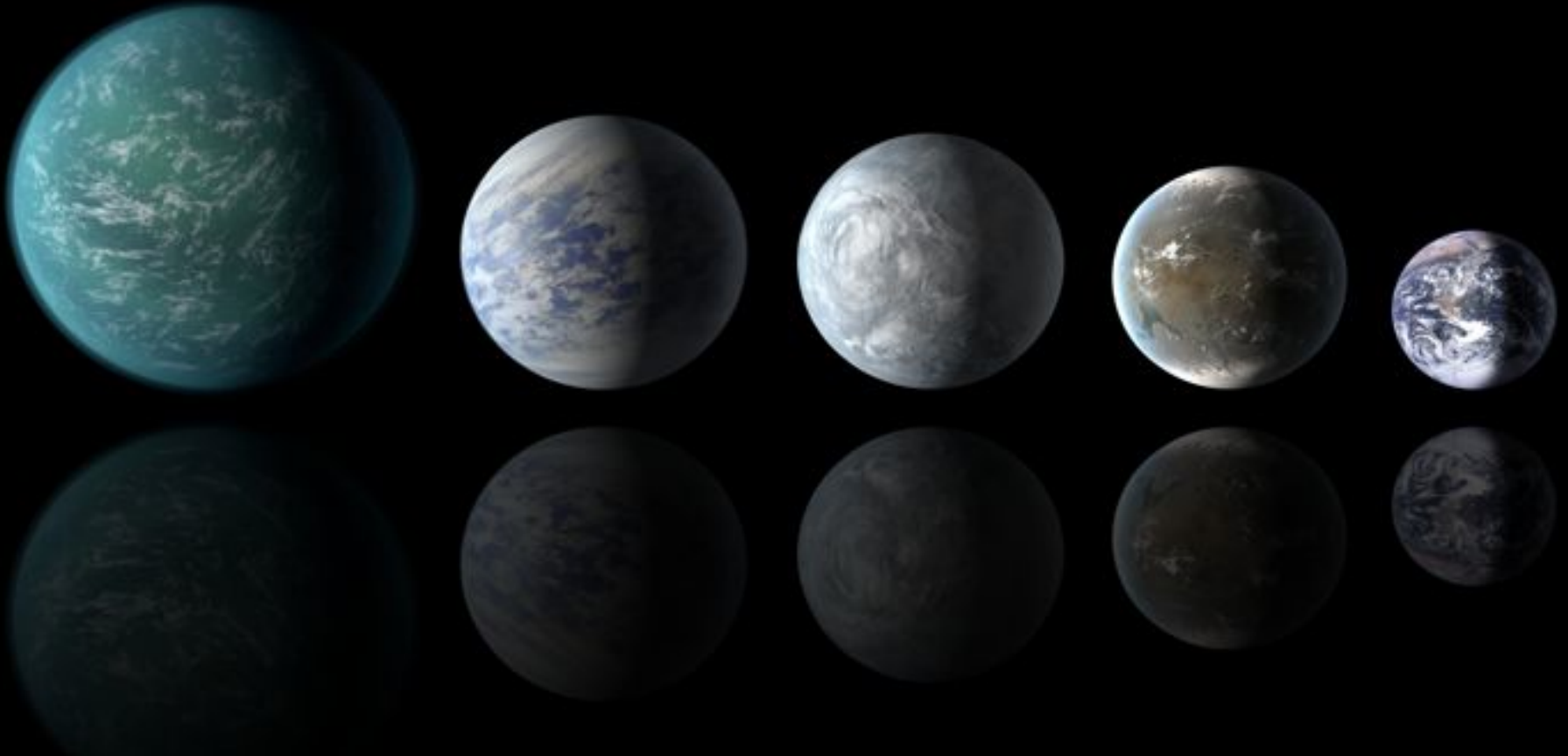


Fig. 15. Survey sensitivity derived from the combined phase-averaged detection limits on individual stars. Iso-contours are shown for 1, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 and 90 stars. Planet detected or confirmed by our survey are reported by red circles and labeled by their names.

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 :

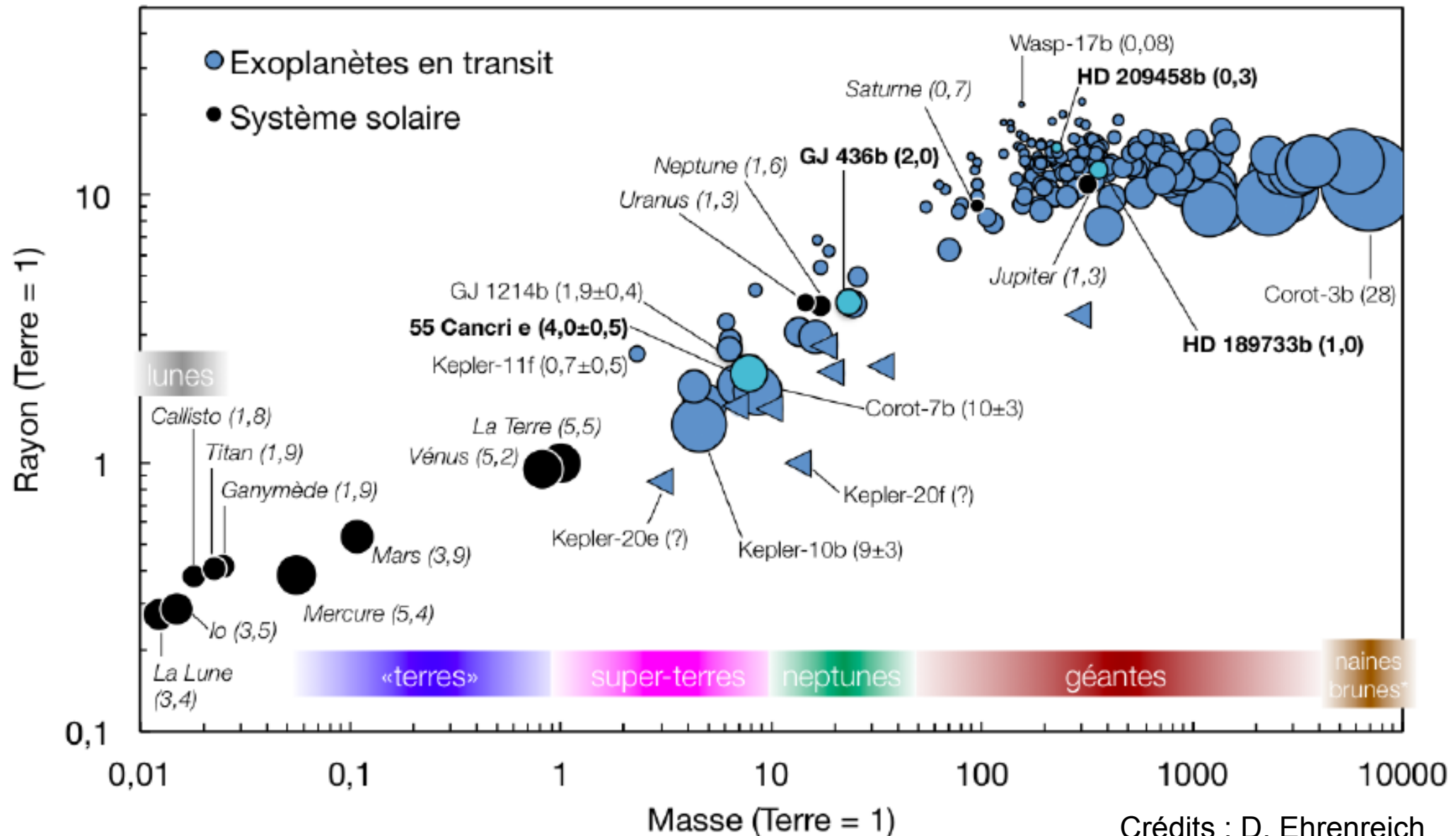
Si une planète est détectée par transit → mesure du rayon
+ par V_r → mesure de la masse

⇒ La densité moyenne de la planète est mesurée.

Caractérisations :

Densité / Constitution :

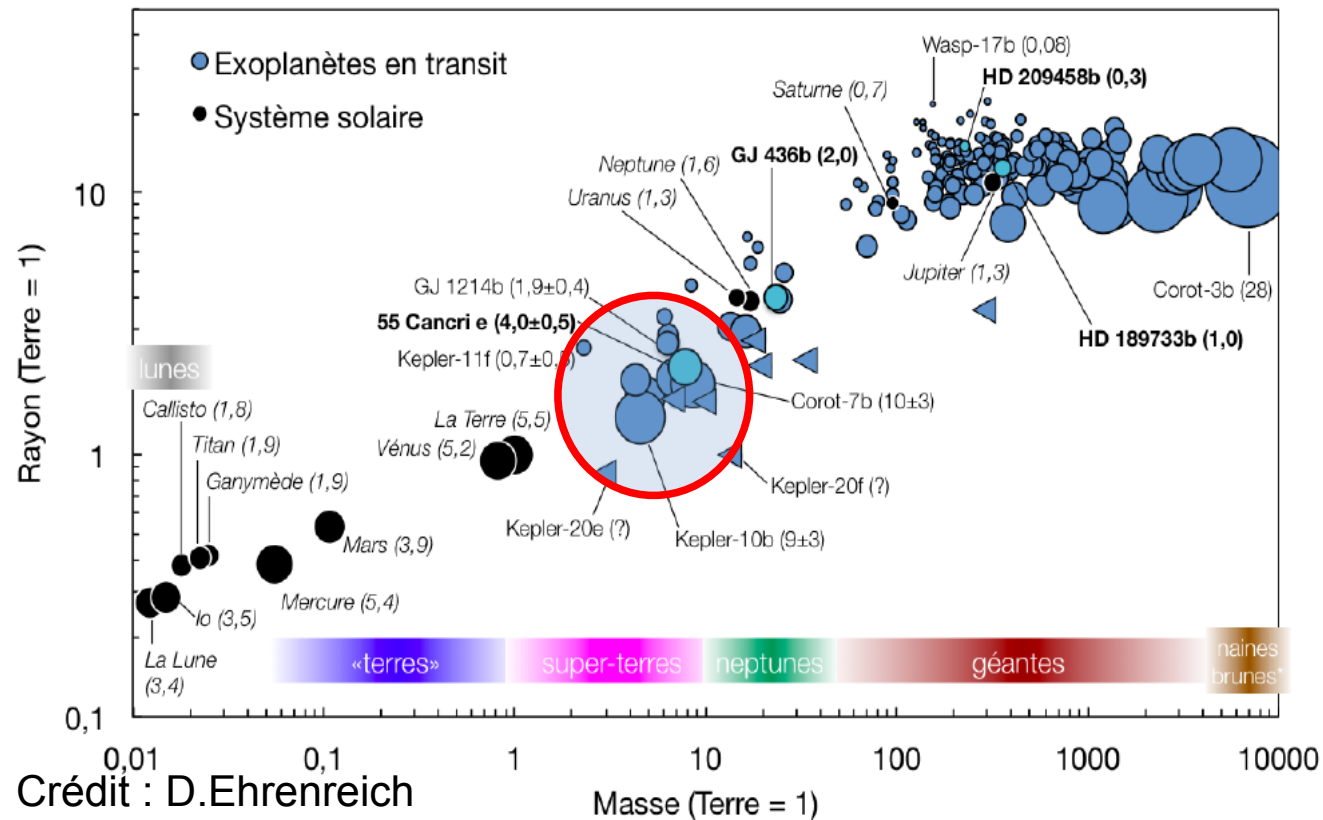
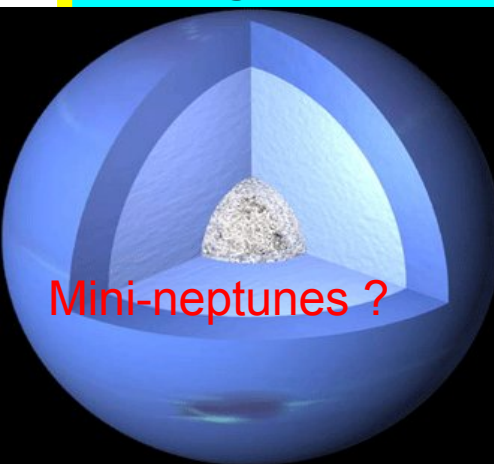
études sur les planètes détectées à la fois en vitesse radiale et transit



Densité ~ 1.6 à 9 g/cm^3

(Terre; densité = 5)

Des planètes de structures différentes dans cette gamme de masse



Super-Jupiter ($10-13 M_{\text{jup}}$)

jupiters ($0.1 - 10 M_{\text{Jup}}$) :

neptunes ($10-30 M_{\text{Terre}}$) :

super-terres ($2-10 M_{\text{Terre}}$) :

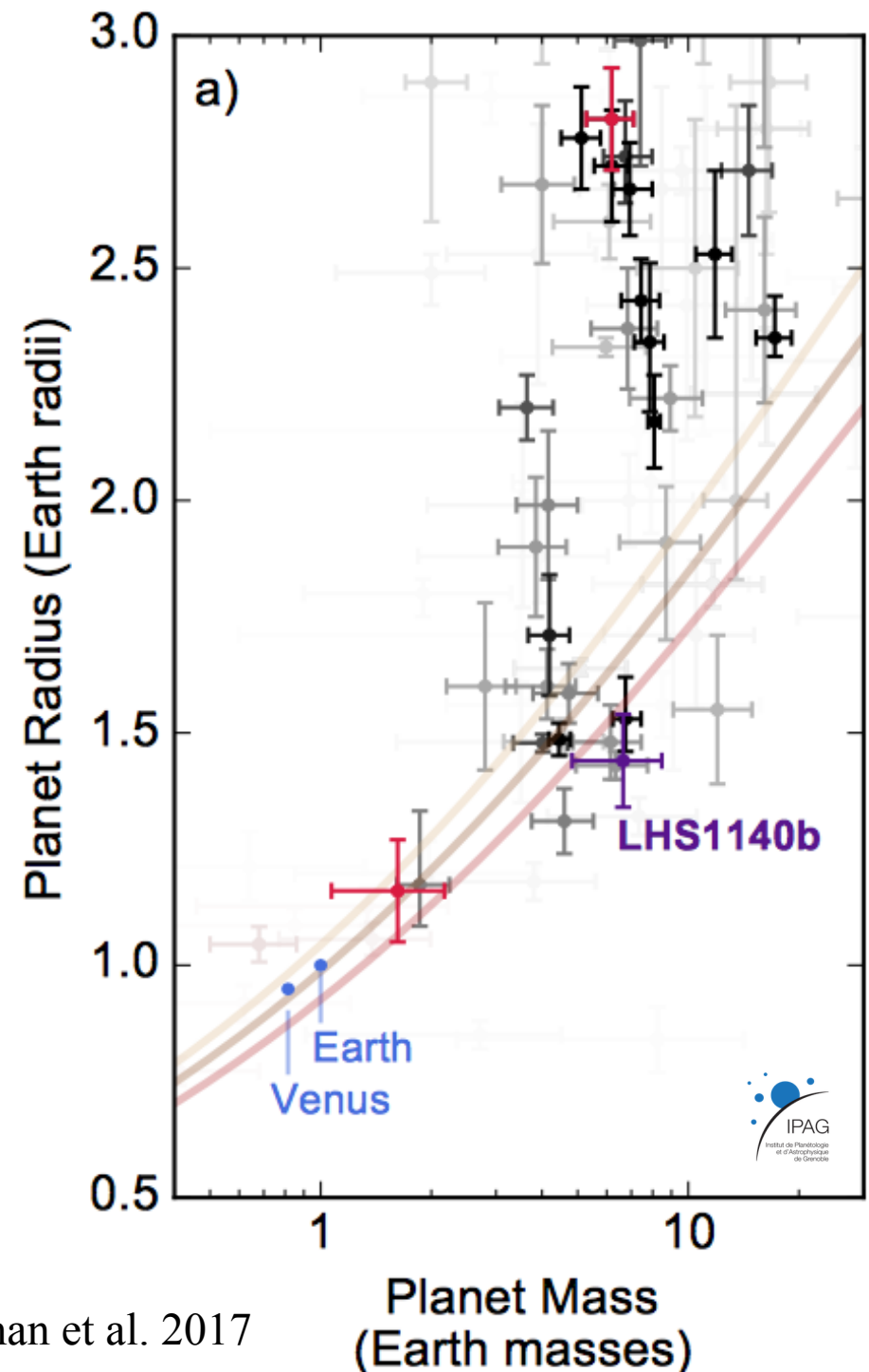
Caractérisations :

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

9

Chercher la vie ?



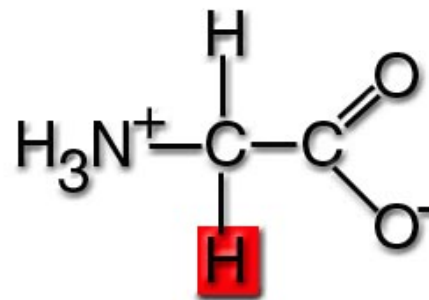
Chercher la vie ?

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 ?

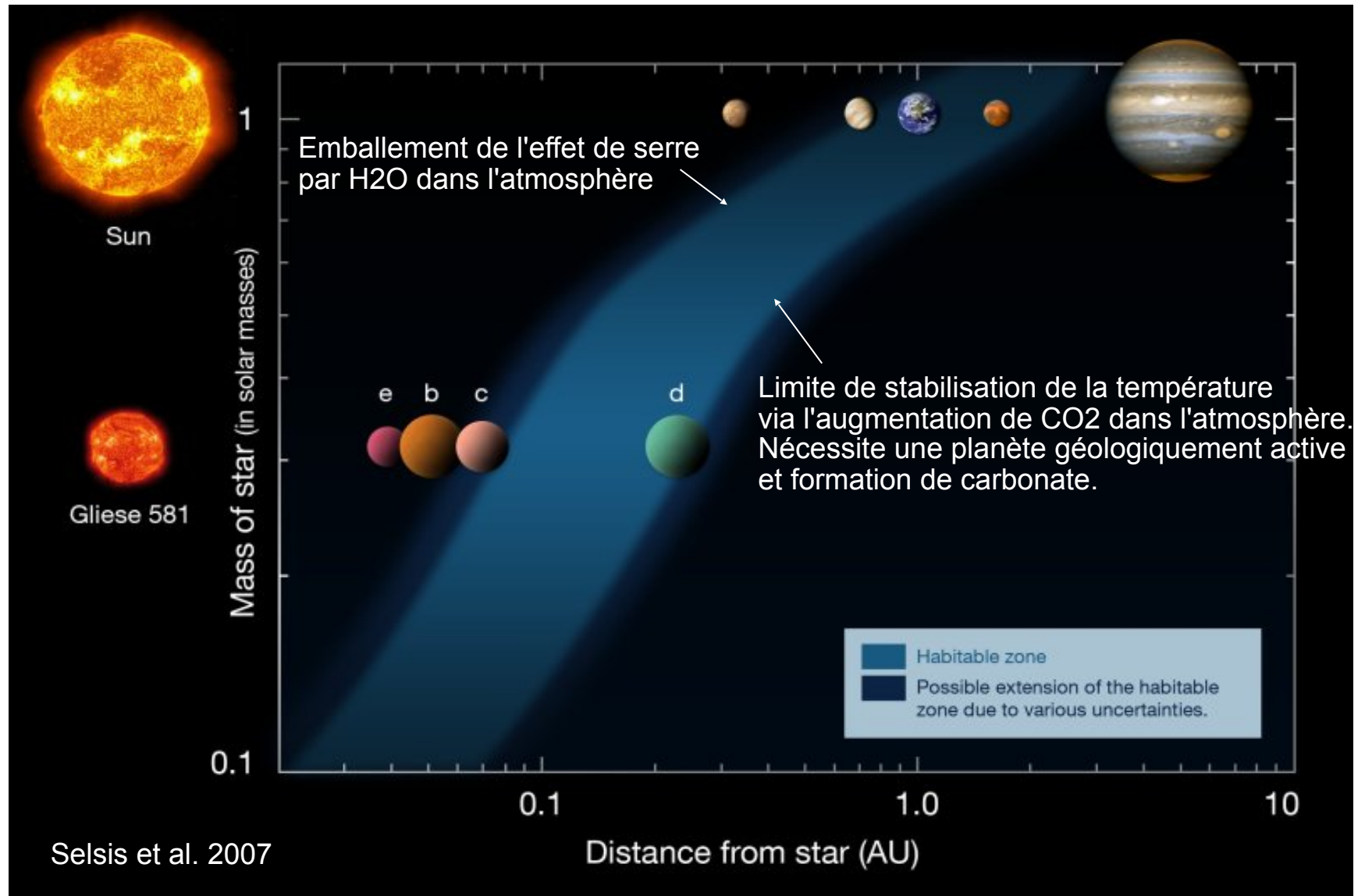


Définition : planètes habitables
=
planètes avec de l'eau liquide à la surface

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 ($P \sim 7j$)
Gl667Cc : ~ 4.2 masses de la Terre ($P \sim 28j$)

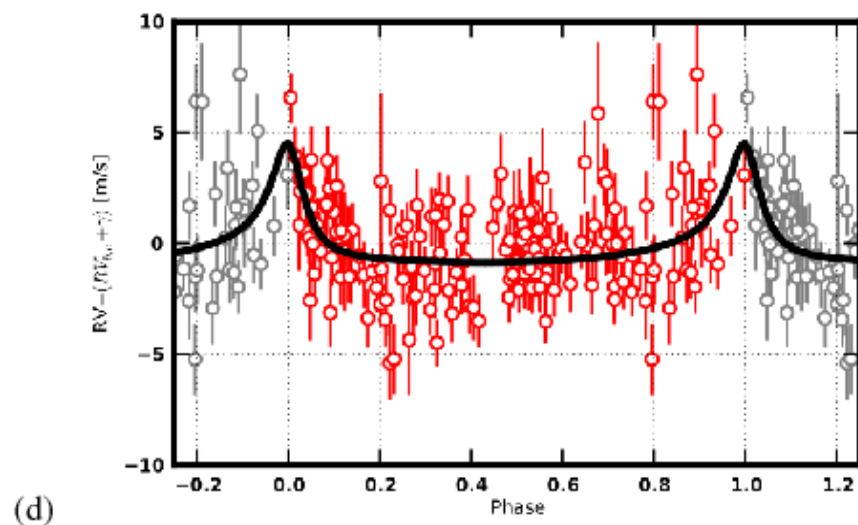
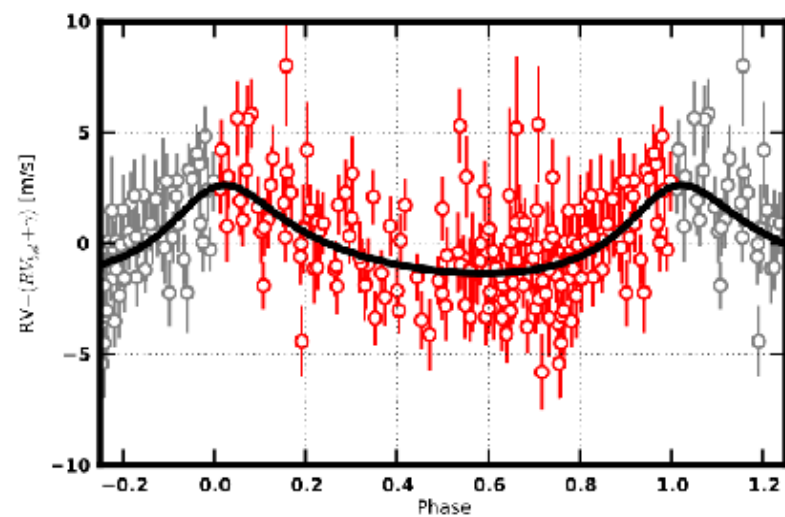
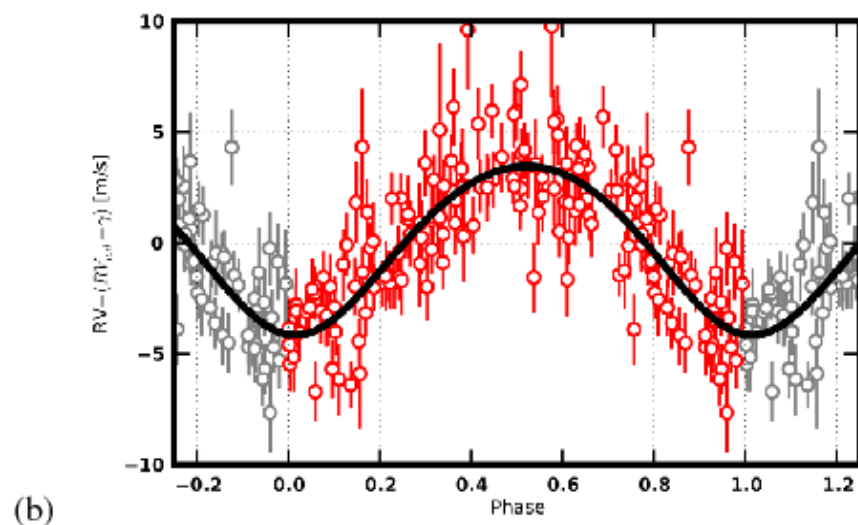
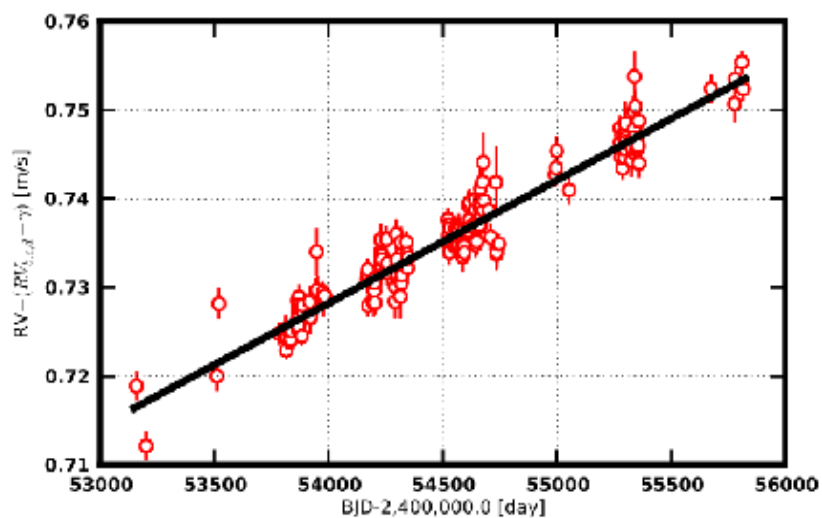
Delfosse et al. 2013



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

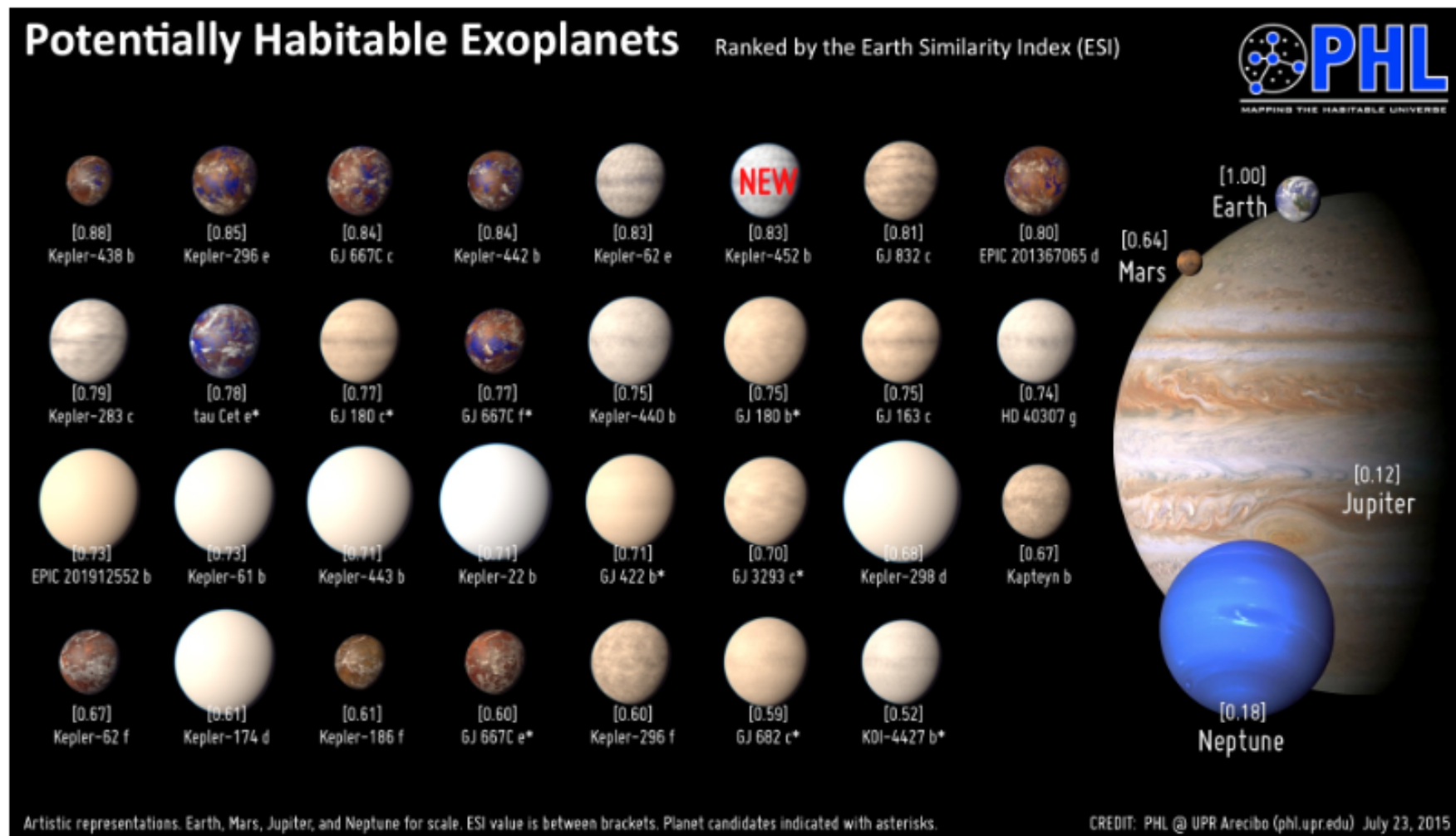


Chercher la vie :

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



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

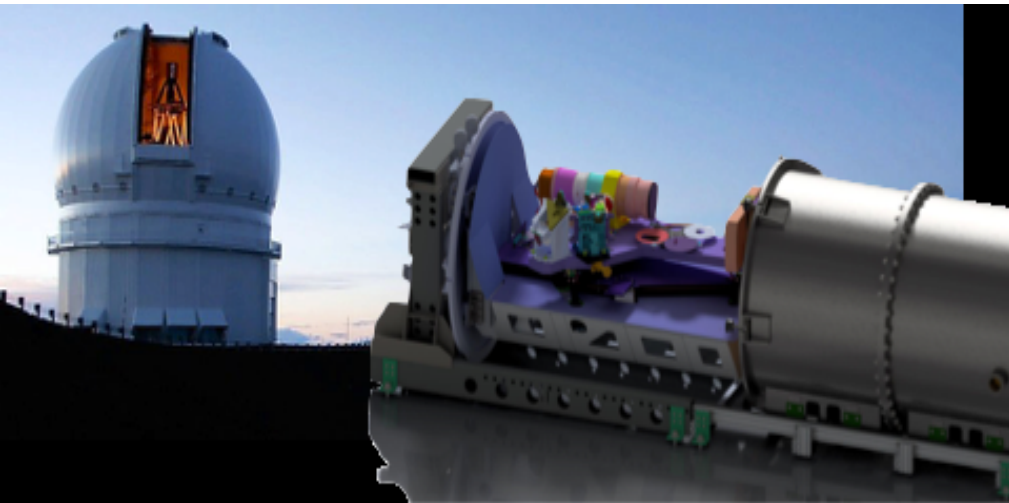
Le futur :



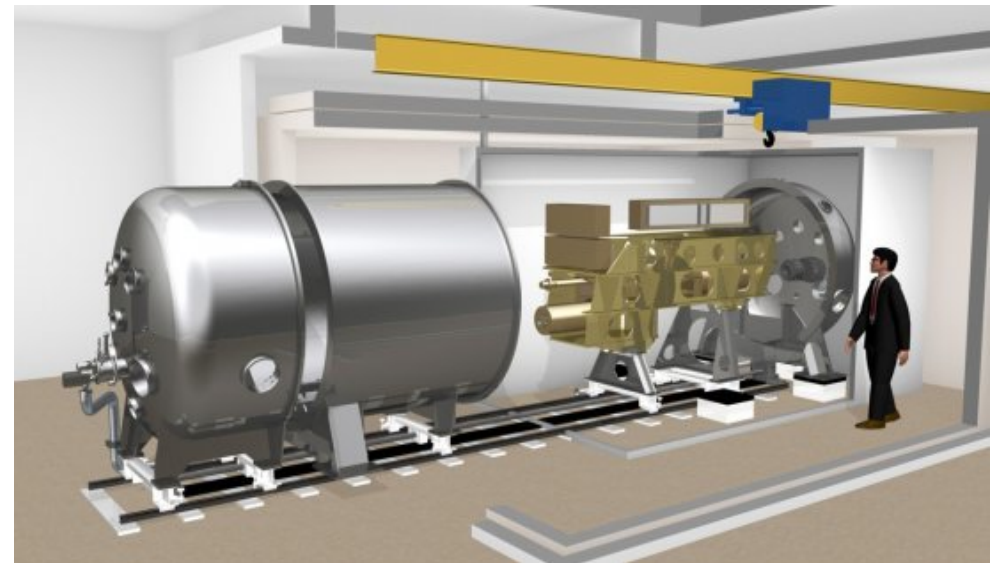
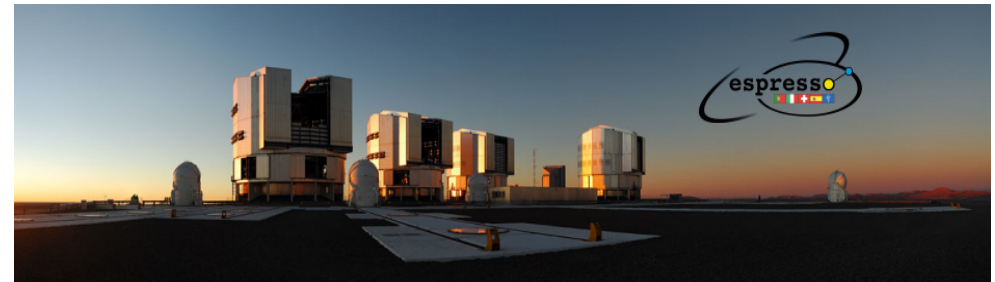
Le futur vitesse radiale:

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) 

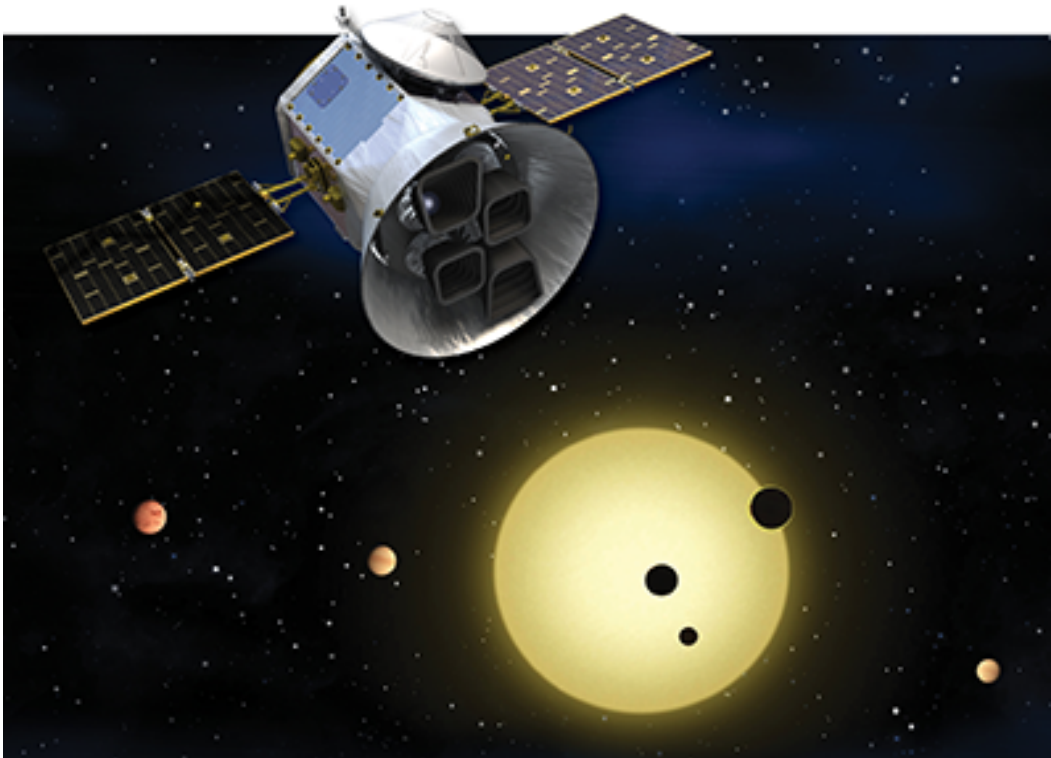


ESPRESSO (Europe) (2018)

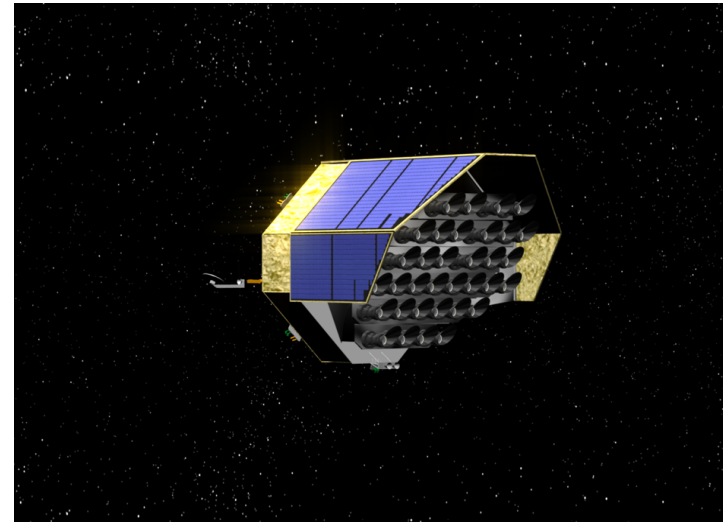
Le futur transit :

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)

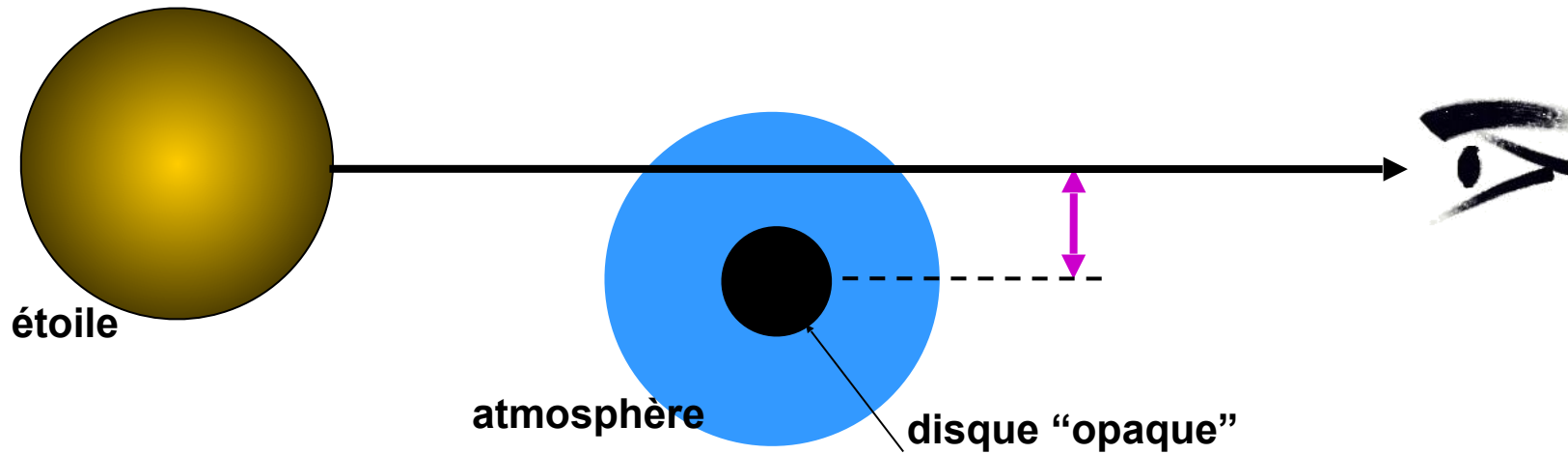


ExTrA / ESO
(2019)



Caractérisations :

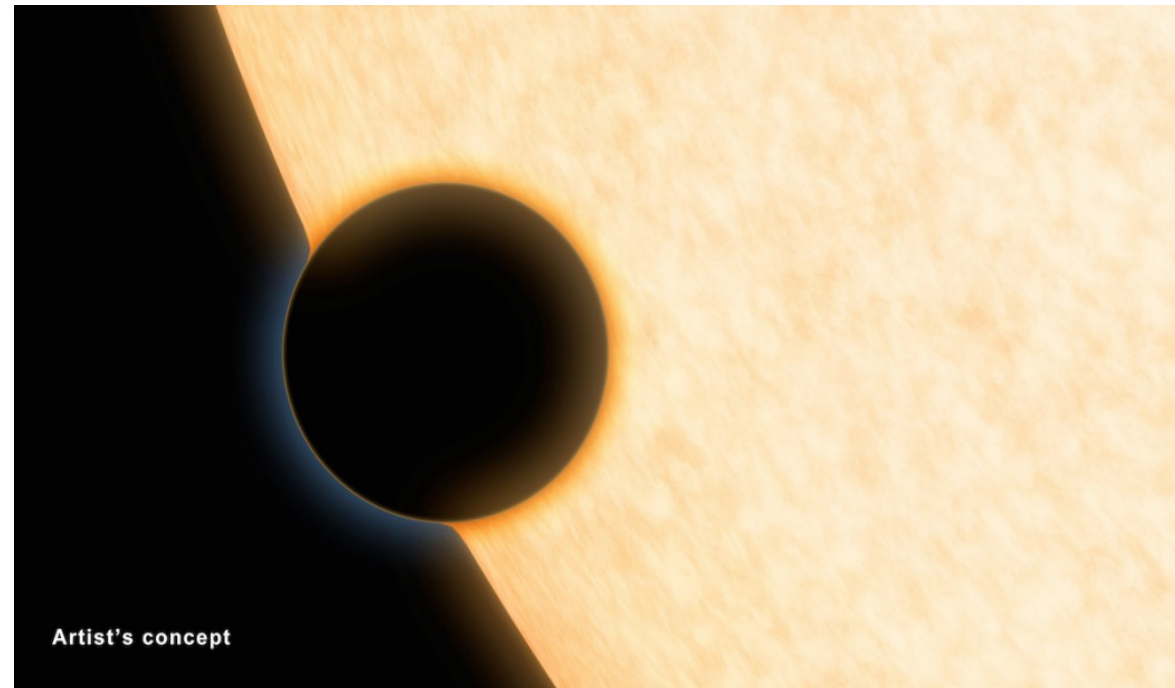
Atmosphères :
études sur les planètes détectées en transit



Spectroscopie en absorption de
l'atmosphère durant le transit

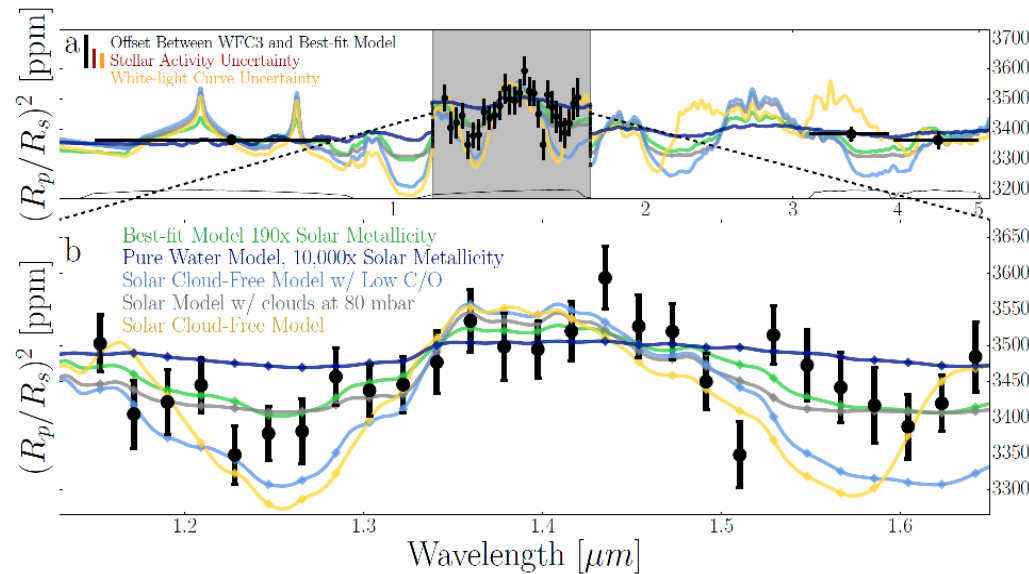
/

Le spectre hors transit sert de référence

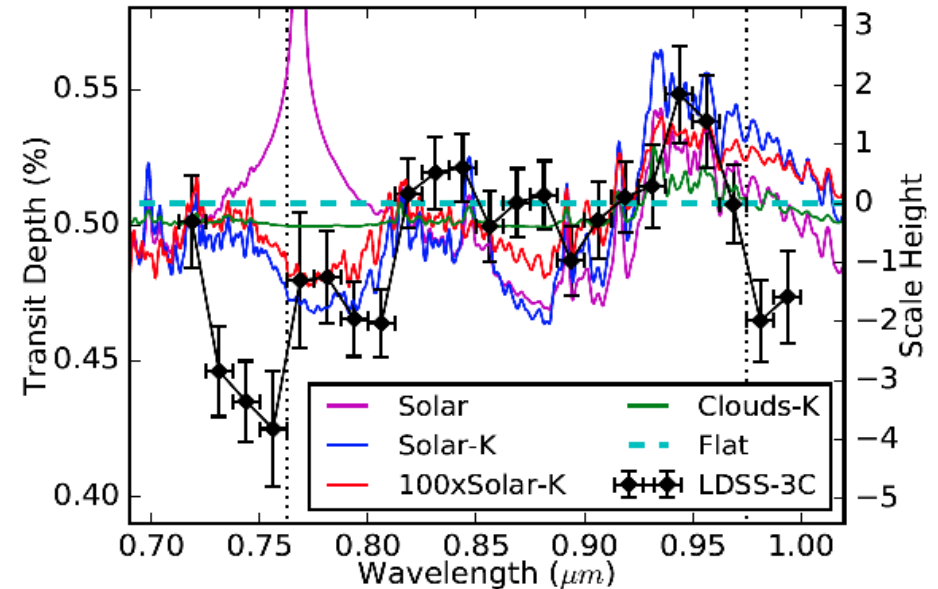


Caractérisations :

Atmosphères de Neptune :



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



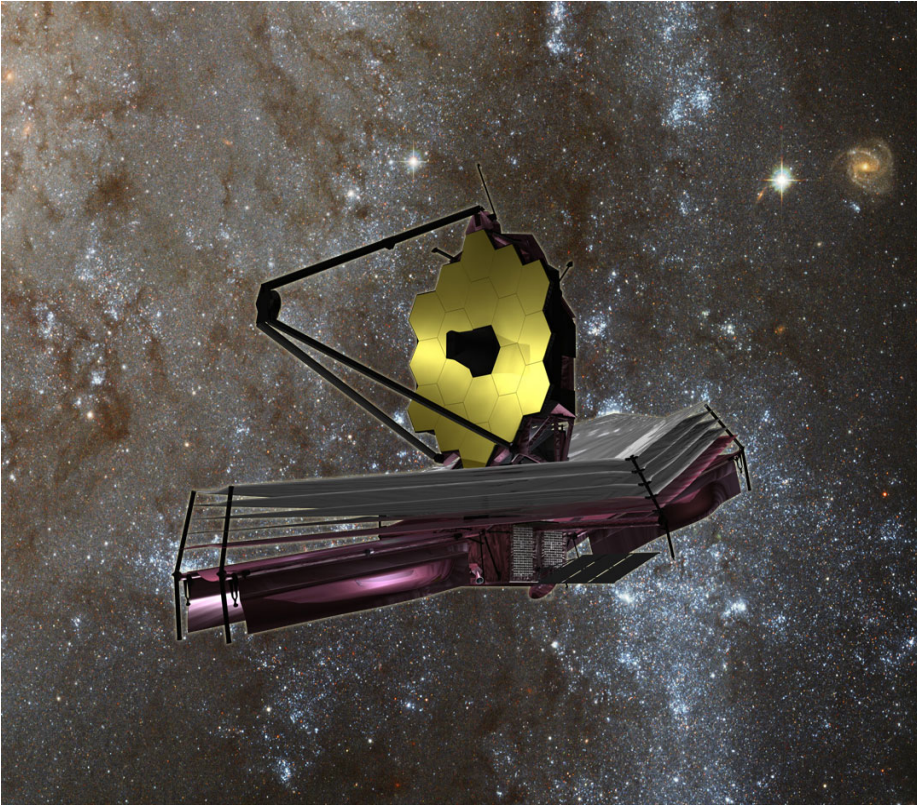
HAT-P-26b ($18M_{\text{TERRE}}$), détection spectral mais des
dégénérescence de solution
Stevenson et al. 2016

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

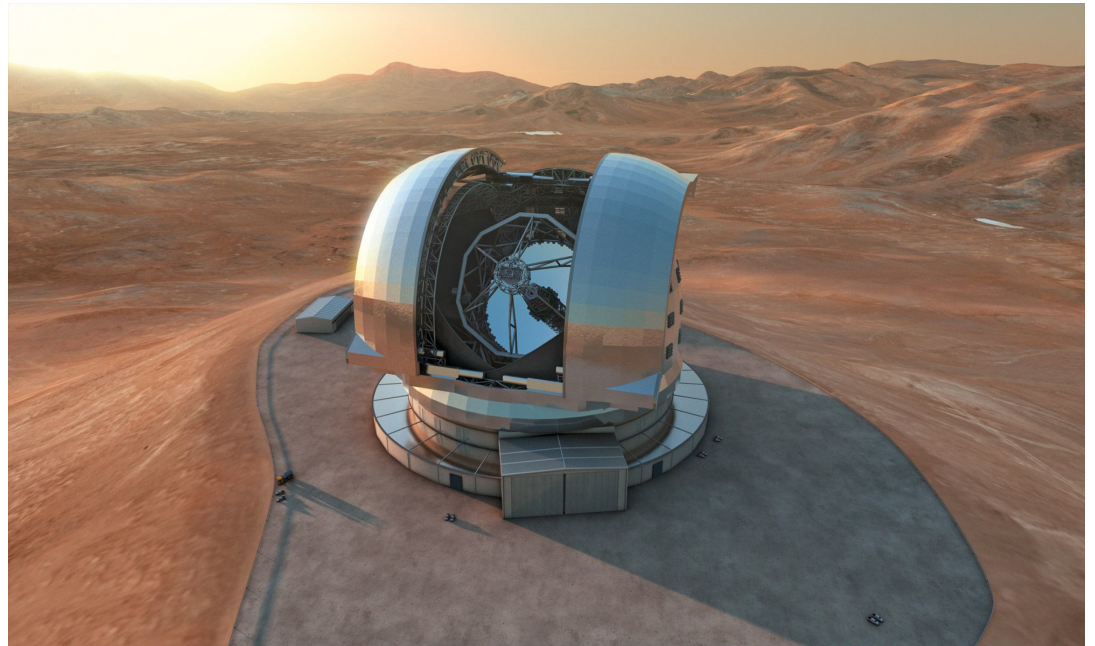
Le futur :

Caractériser ces planètes, analyser leurs atmosphères :

Analyse atmosphérique des « Super-Terre » en transit



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



ELT (ESO)
(2025)

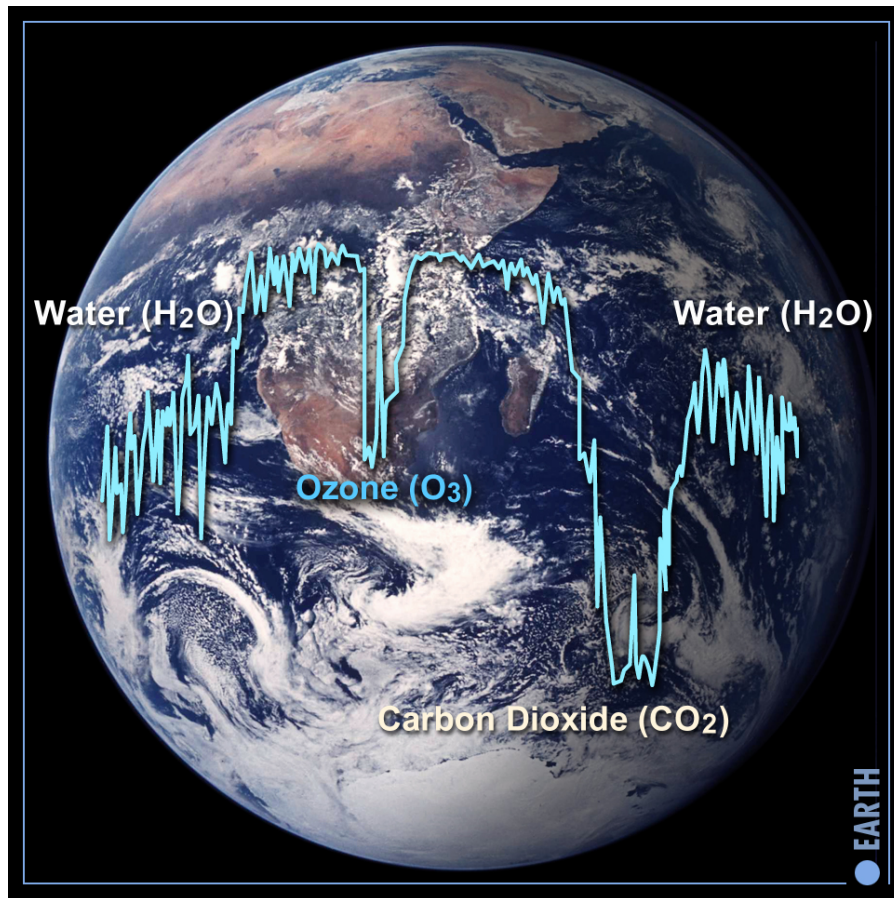


Le futur :

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.

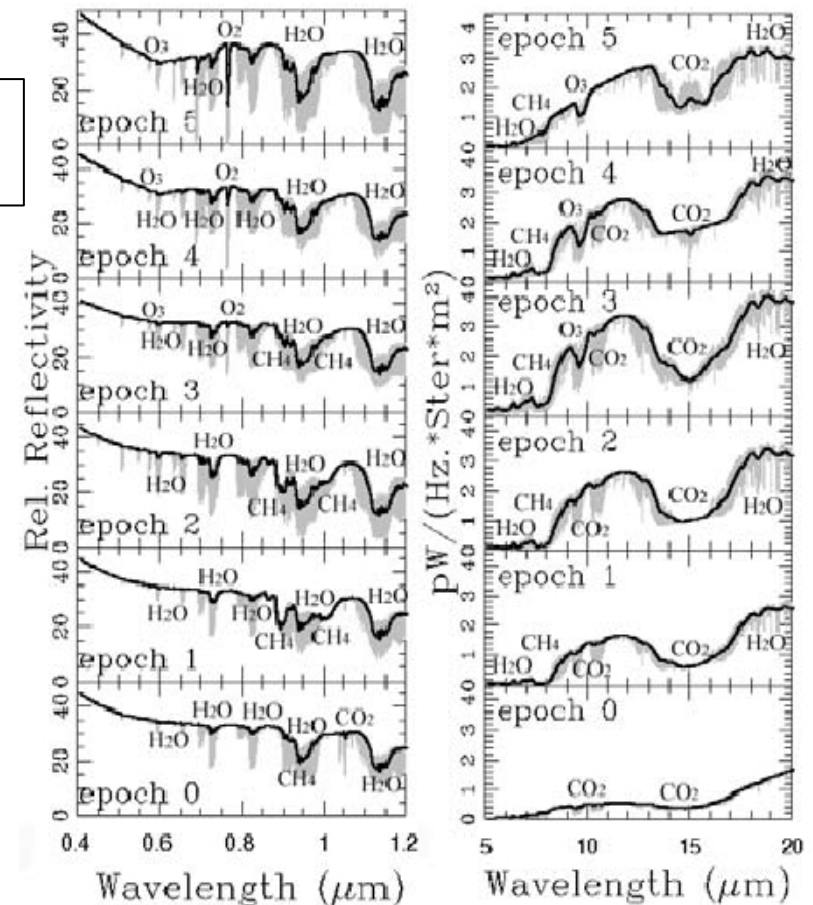


Fig. 3: The visible to near-IR (left panel) and mid IR (right panel) spectral features on an Earth-like planet change considerably over its evolution from a CO₂ rich (epoch 0) to a

Conclusions

1./ Il y a des planètes partout....

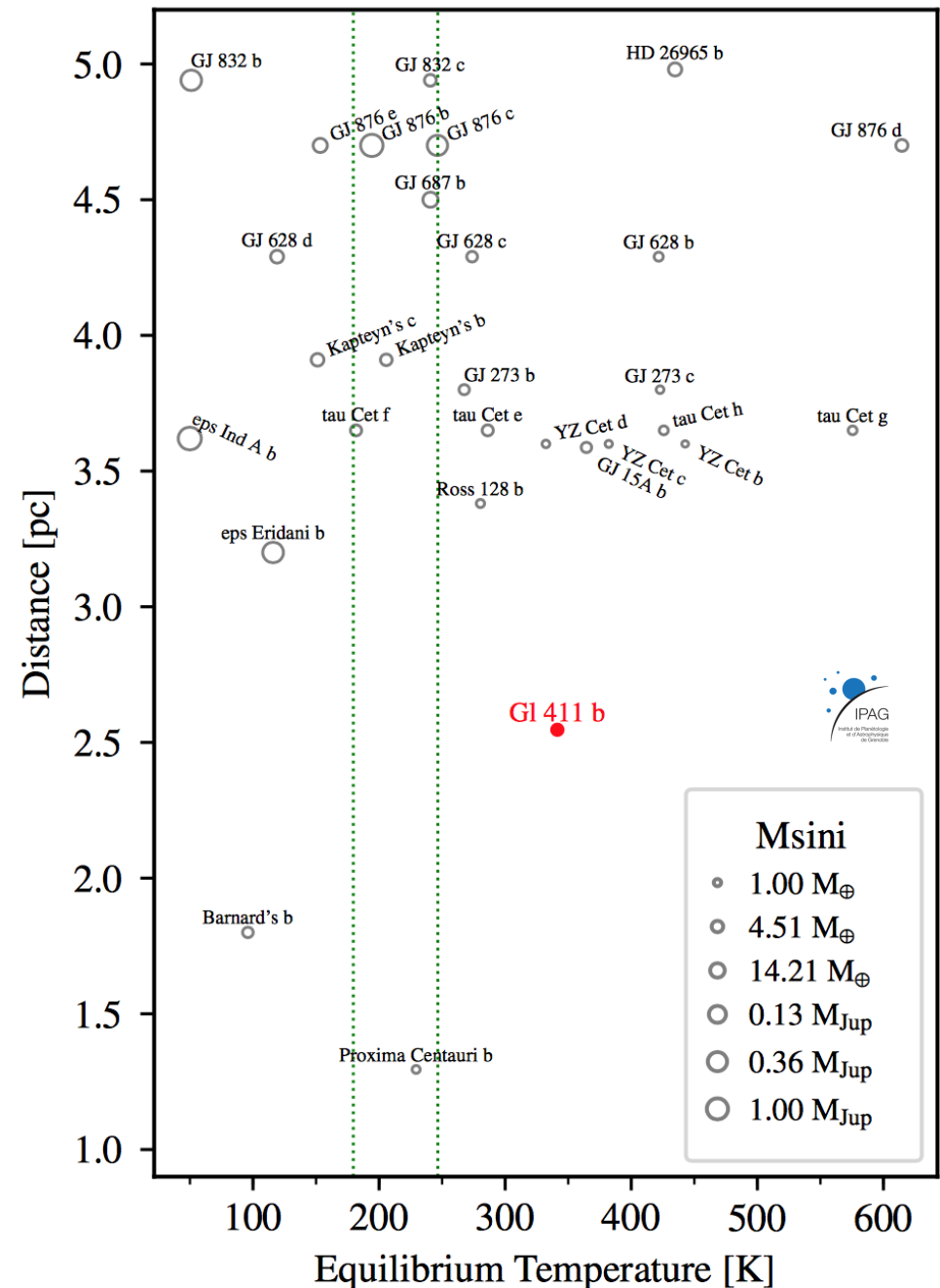
3 des 4 étoiles les plus proches de nous ont des systèmes détectés.

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

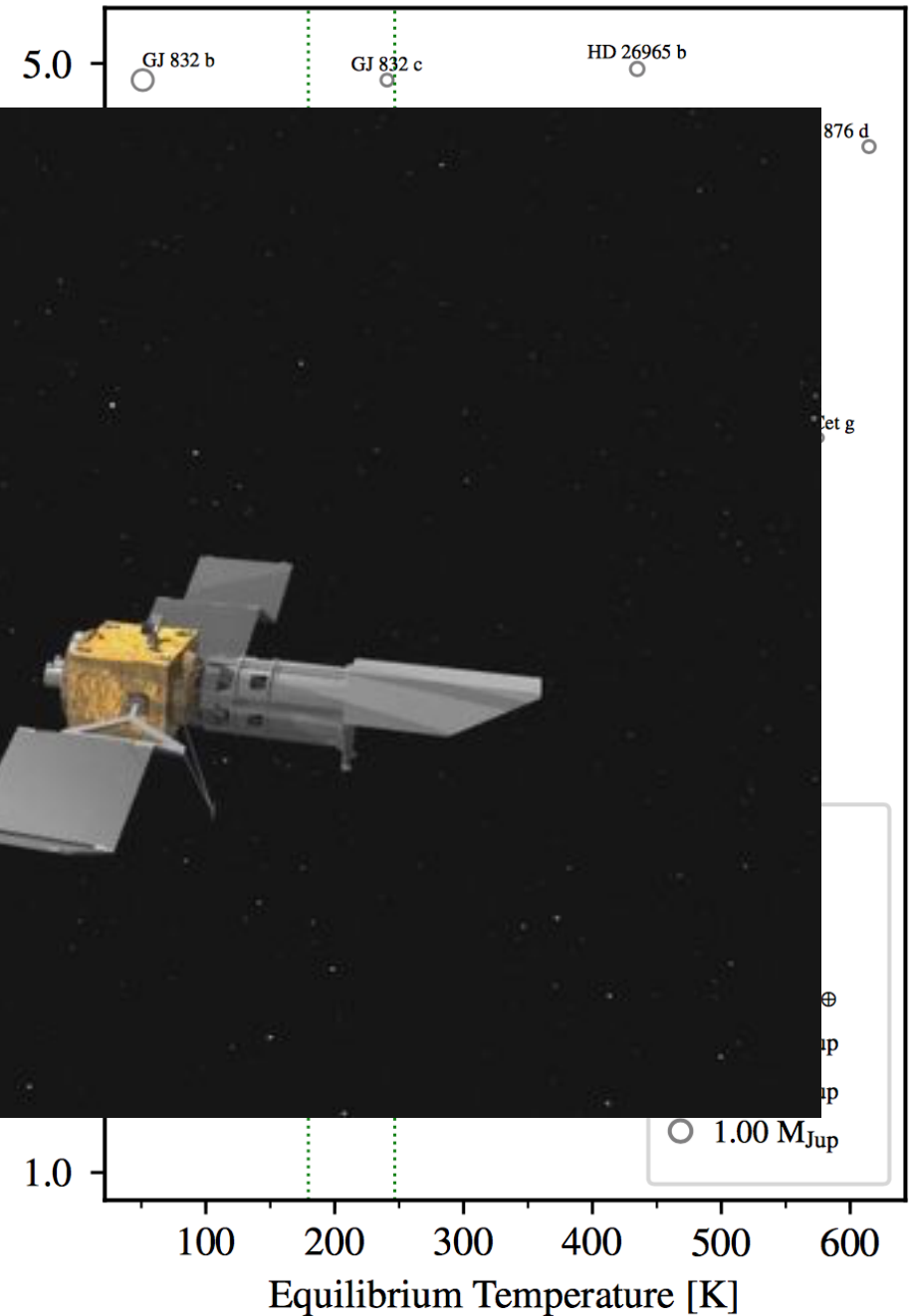
3 des
des s

La pe
al. 20



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

Caractériser leurs atmosphères.



Conclusion II

Détecter des planètes habitables...

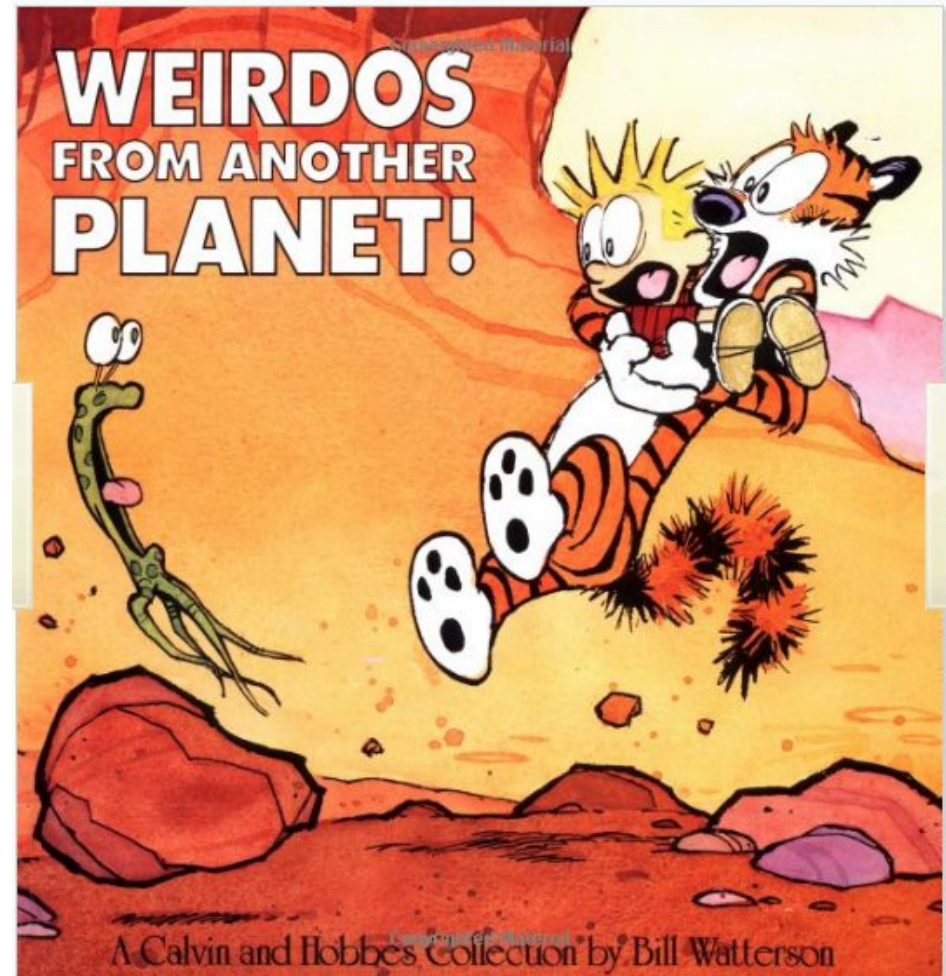
... mais la preuve formelle de la vie extra-terrestre intelligente a-t-elle déjà été apportée par Watterson (1990) ?

Conclusion II

Détecter des planètes habitables...

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

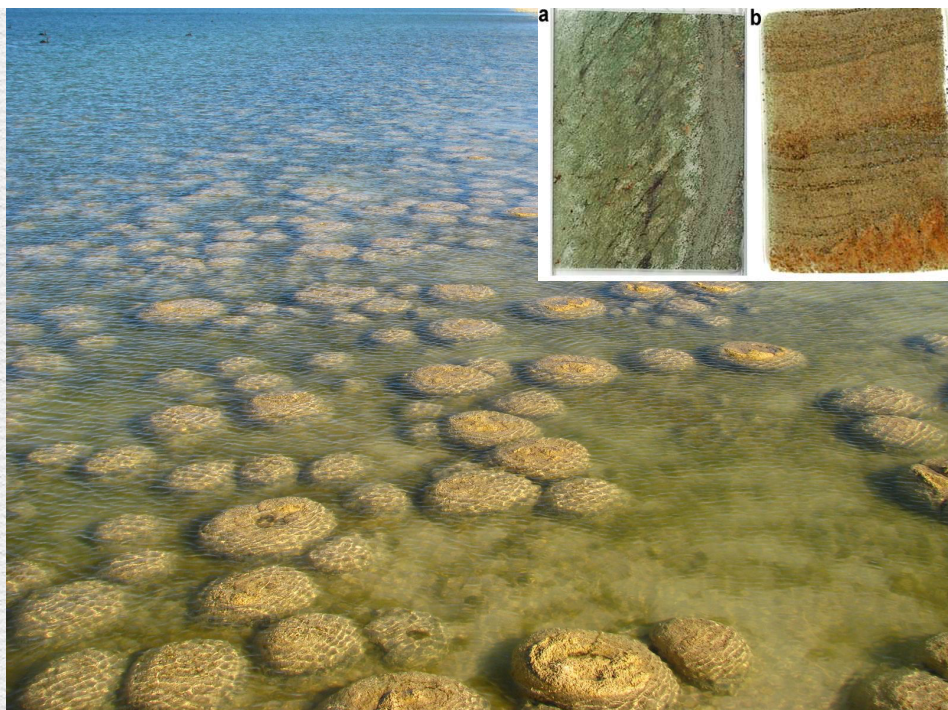
« La preuve qu'il y a des êtres intelligents ailleurs que sur Terre est qu'ils n'ont pas essayé de nous contacter »





Origin of Life

Univ. Grenoble Alpes



PAGE



4 équipes



2 équipes



1 chercheur

CBS



2 équipes



2 équipes



2 équipes

SHS



1 équipe

MSTIC



1 chercheur

Aujourd'hui :
Une communauté de
plus de 60 personnes

Communauté
UNIVERSITÉ Grenoble Alpes