

A quoi ressemblent les planètes extra-solaires : vers les planètes habitables

Xavier Delfosse
Laboratoire d'Astrophysique
Observatoire de Grenoble

Université J. Fourier
CNRS

Illustrations d'artistes : Lynette Cook



Planètes extra-solaires

Plan :

- 1./ Les méthodes de « mesures » (rappel de ce matin)
- 2./ Que nous apprennent les mesures de densités des planètes
- 3./ Caractérisations des atmosphères des planètes
- 4./ Autour de quelles planètes chercher la vie, et comment.

•

Méthodes de « mesures »

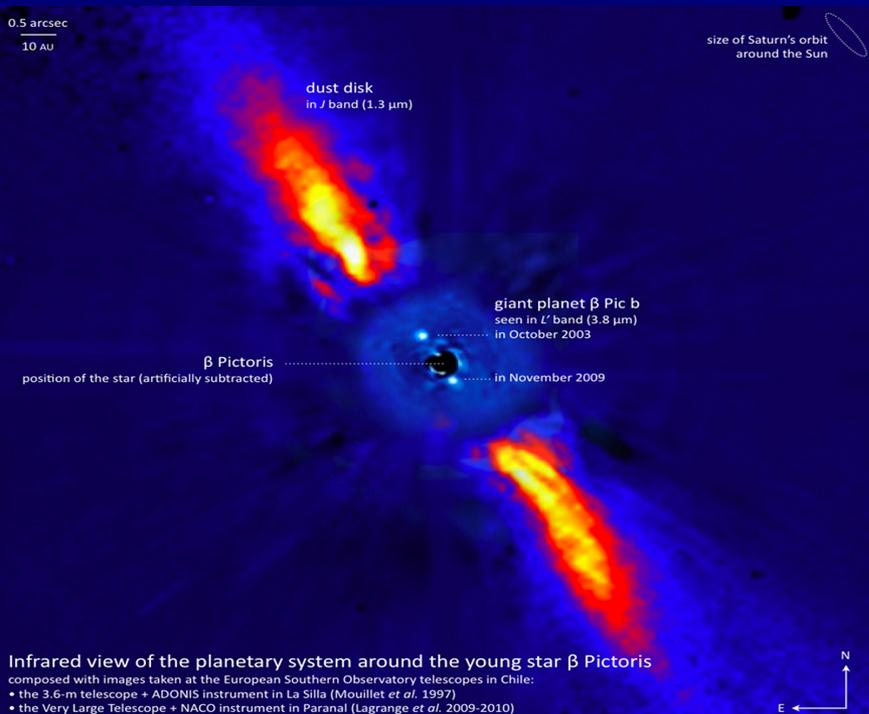


Méthode de mesure

1 Imagerie directe :

Planètes à plusieurs A.U. de leurs étoiles

Image obtenue au VLT/NAOS d'une planète de 8Mj
Autour de Beta Pictoris



Actuellement limité à des planètes très massives,
Jeunes, et à grande distance de leurs étoiles.

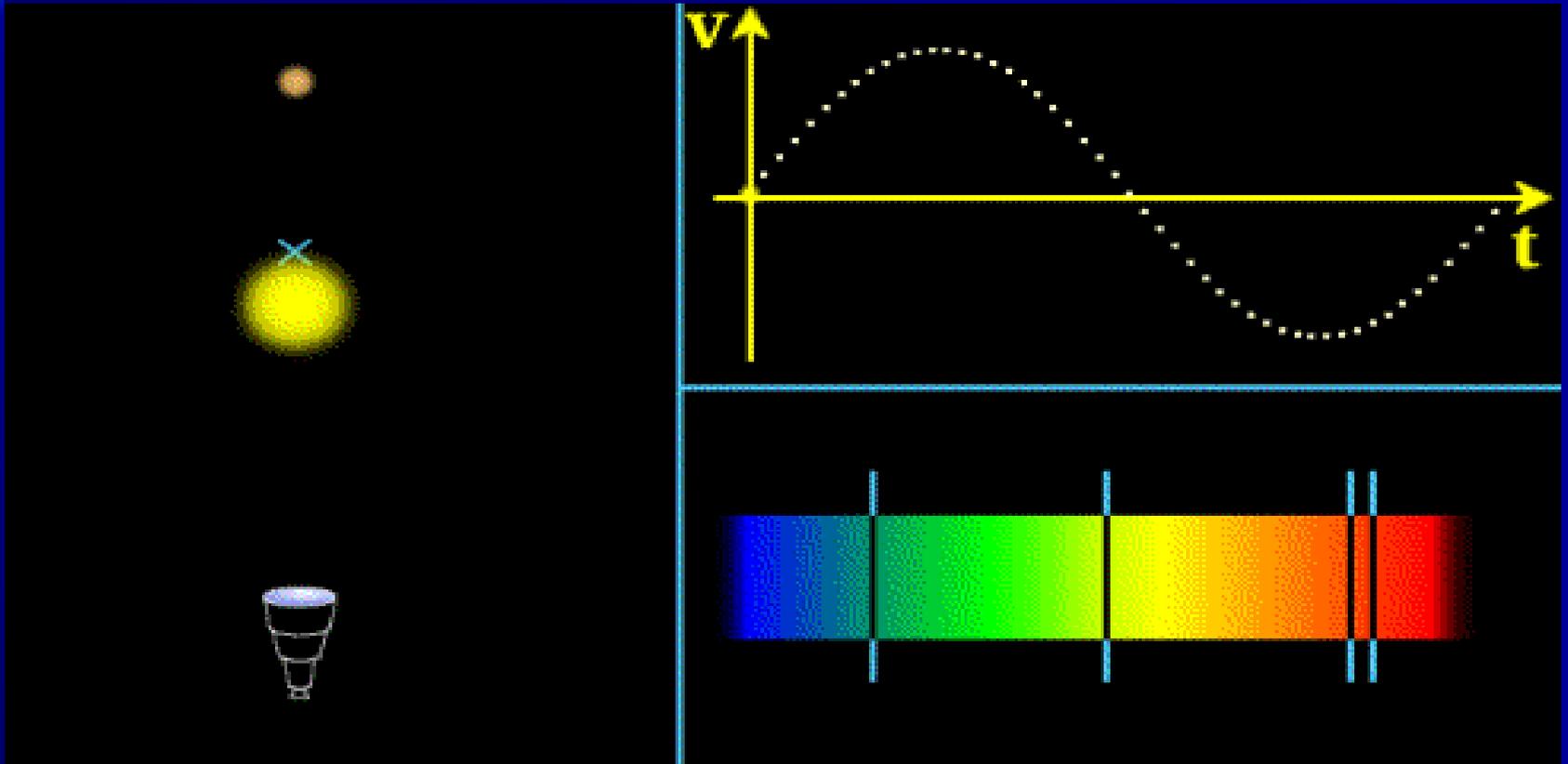
La masse de ces planètes n'est pas déterminée

N'apporte pour l'instant pas encore de
Caractérisations des planètes très poussée...

Mais méthode d'avenir...

Méthode de mesure

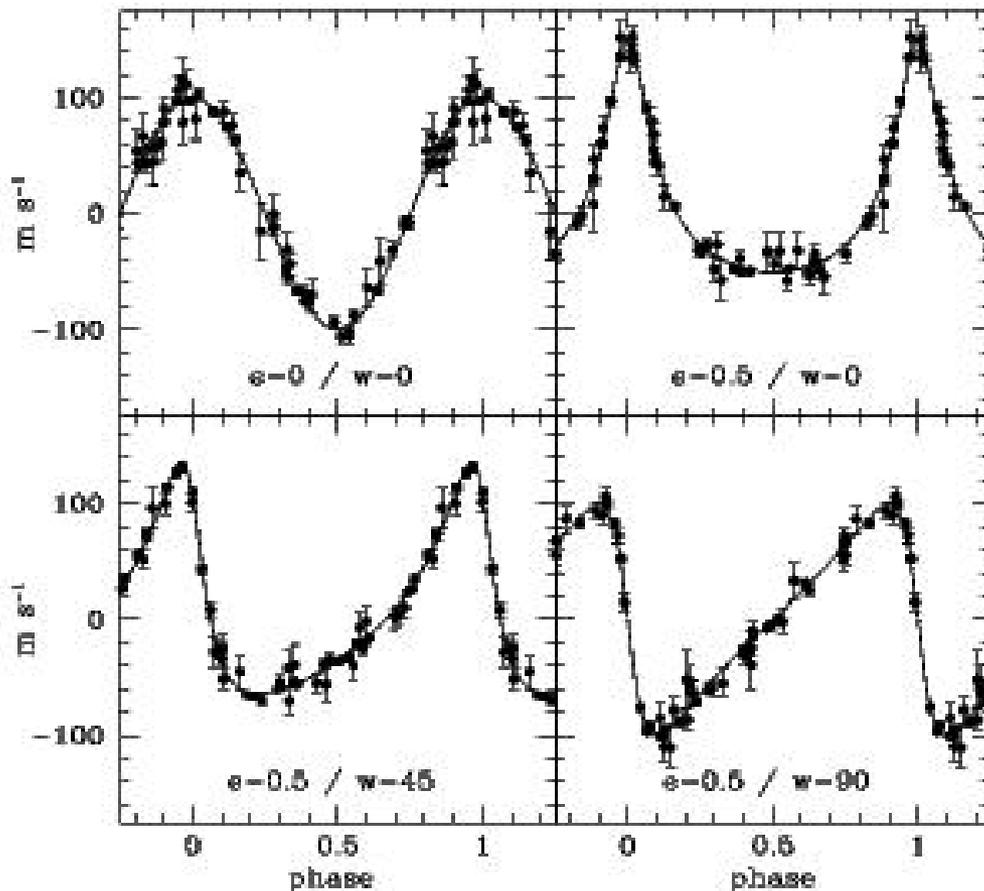
2 Vitesse radiale



Méthode de mesure

2 Vitesse radiale

- Permet Extraire les paramètres orbitaux



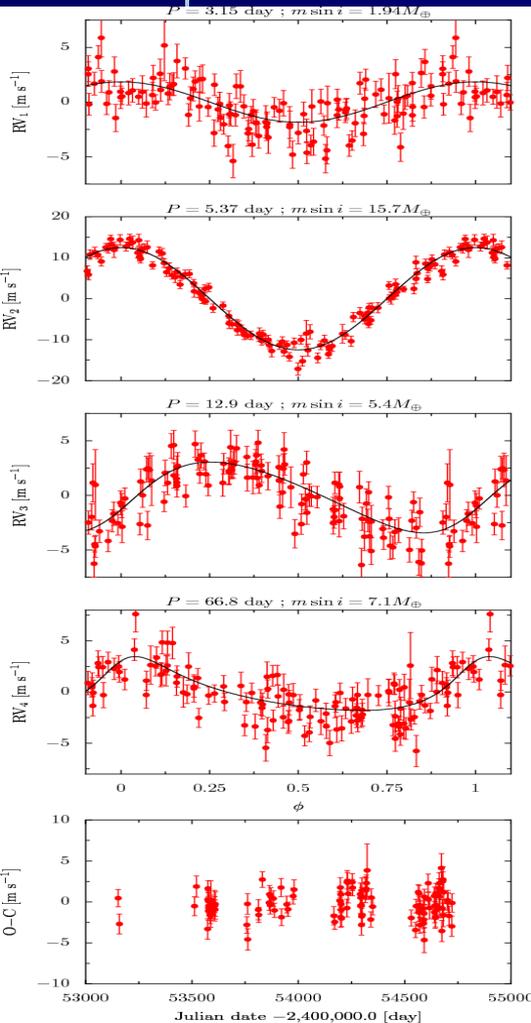
Le fit permet d'extraire :

Période
Masse (modulo $\sin i$)
Eccentricité

- La masse de la planète est déterminée : son premier paramètre de caractérisation

Méthode de mesure

2 Vitesse radiale



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

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

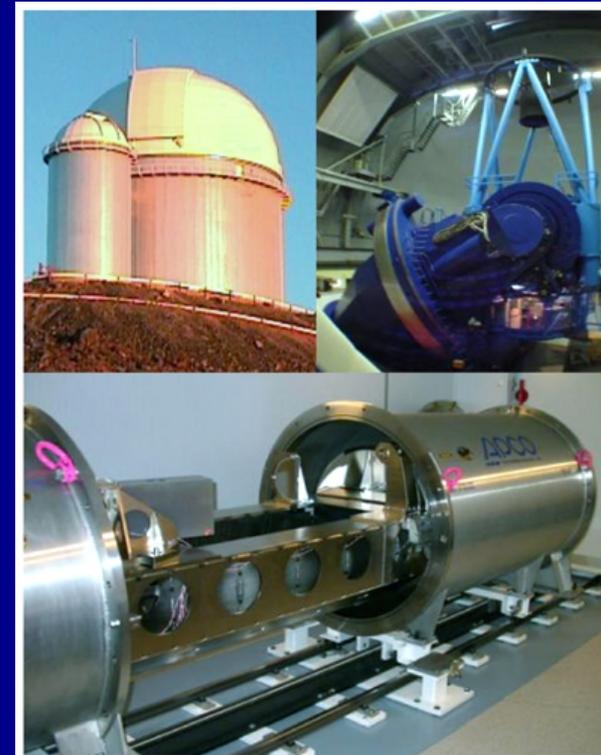
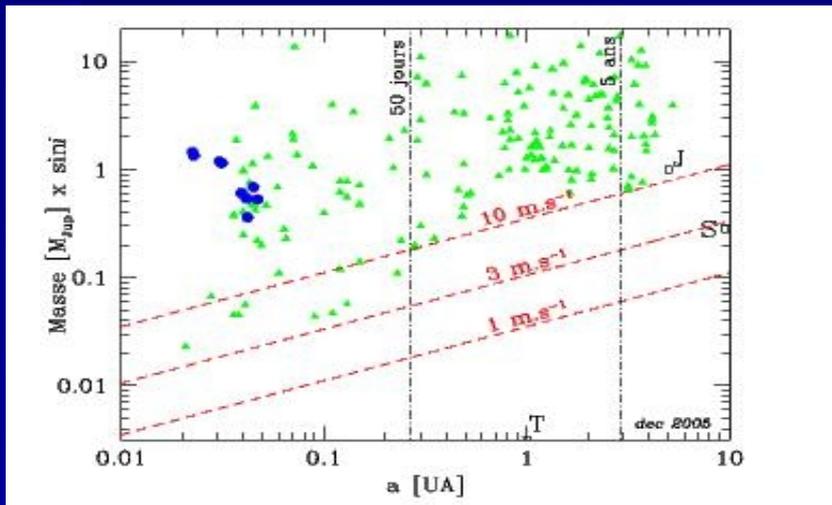
P : Période orbitale

a : séparation orbitale

Méthode de mesure

2 Vitesse radiale

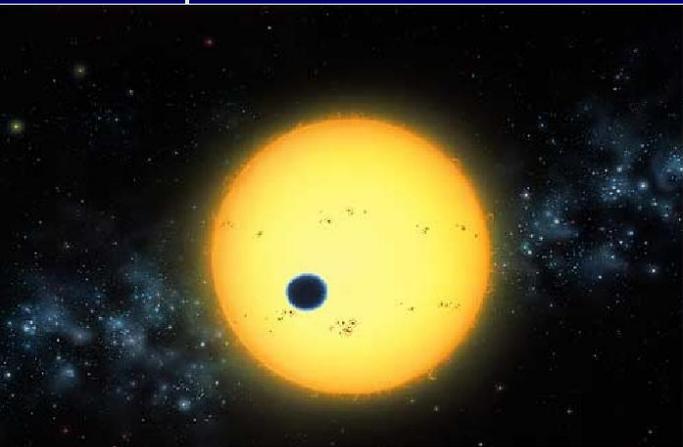
- Les mesures les plus précises actuelles sont réalisées au 3.6-m ESO avec le spectrographe HARPS : 1m/s de précision
- Possibilité de détecter des planètes de ~la masse de la Terre très proche de leurs étoiles



The HARPS Spectrograph and the 3.6m Telescope

Méthode de mesure

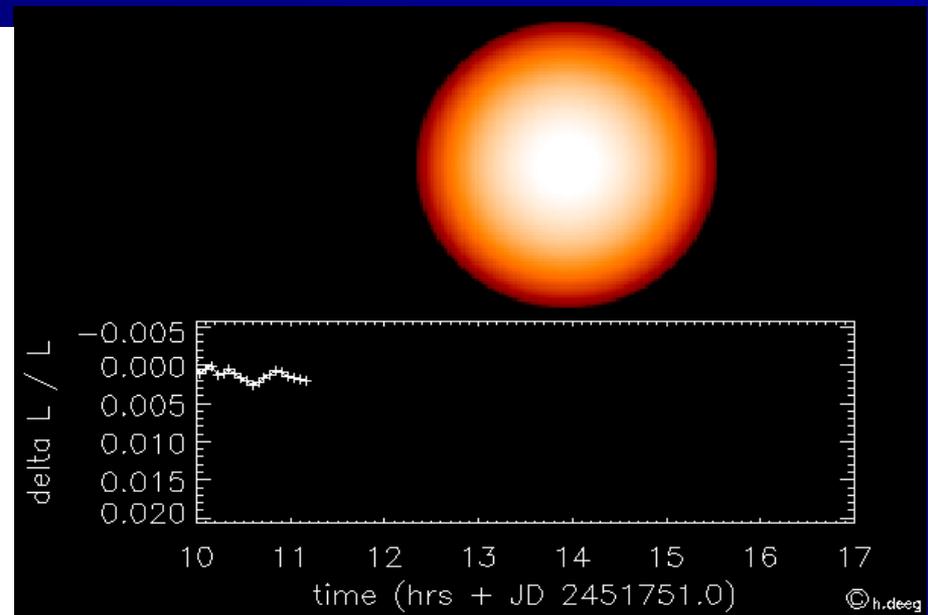
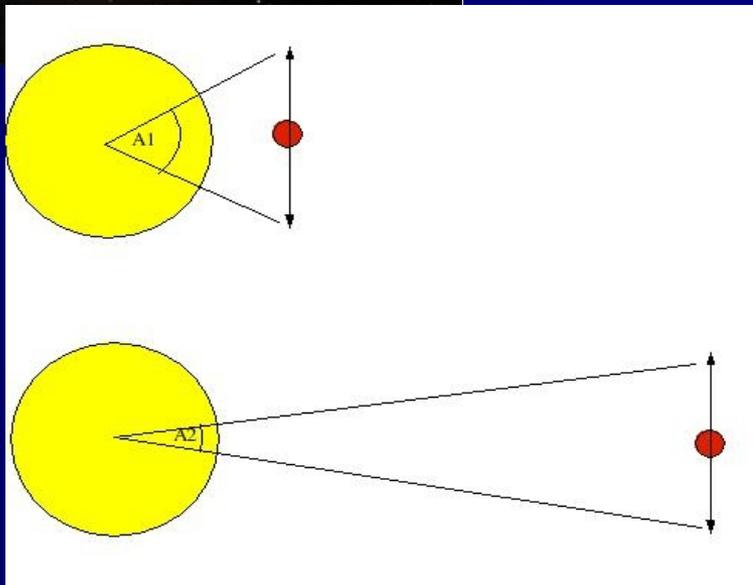
3 Détection par éclipse :



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



Méthodes de mesure

3 Détection par éclipse (ou transit) :

Profondeur du transit :

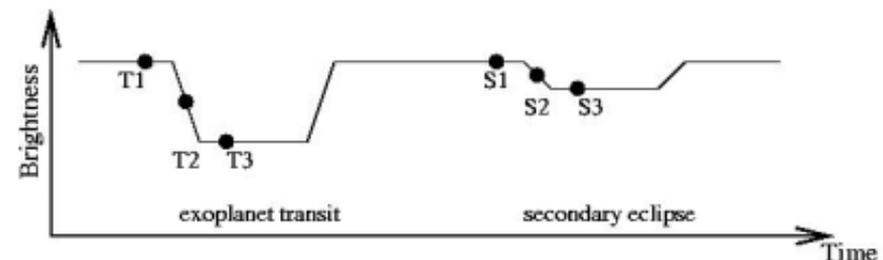
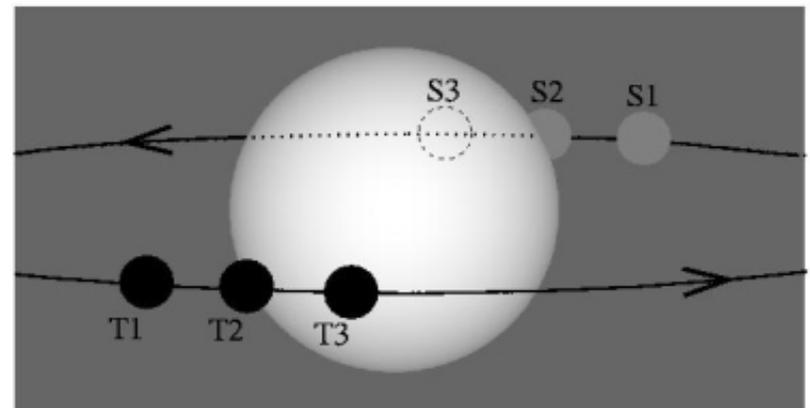
$$\Delta F = \frac{F_{off} - F_{on}}{F_{off}} = (r/R)^2 \quad (10)$$

F_{off} : Flux stellaire en dehors du transit

F_{on} : Flux stellaire au maximum du transit

r : rayon de la planète

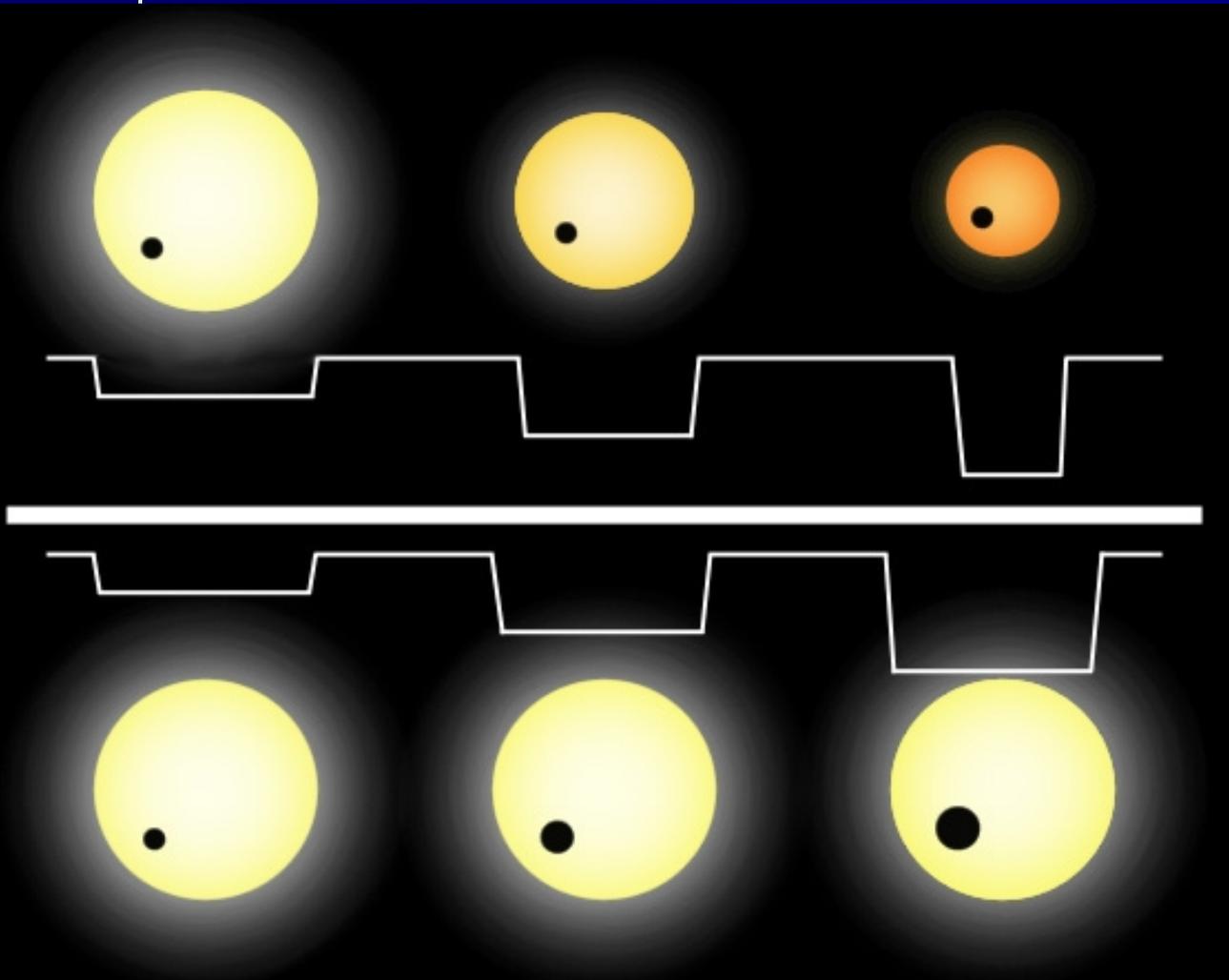
R : rayon de l'étoile



Permet de mesurer le rayon de la planète.

Méthodes de mesure

3 Détection par éclipse (ou transit) :



Permet de mesurer le rayon de la planète :

Durée du transit : rayon de l'étoile

Profondeur du transit : rapport des rayons

Méthodes de mesure

3 Détection par éclipse (ou 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

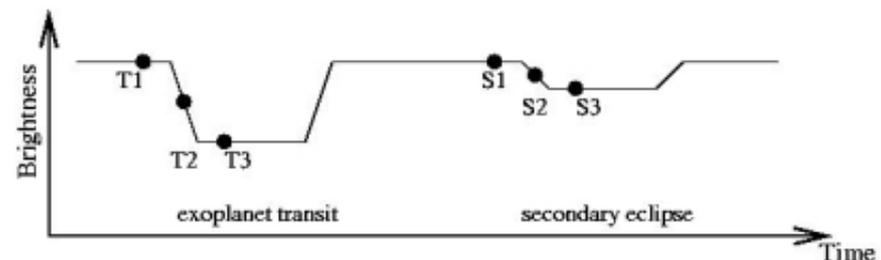
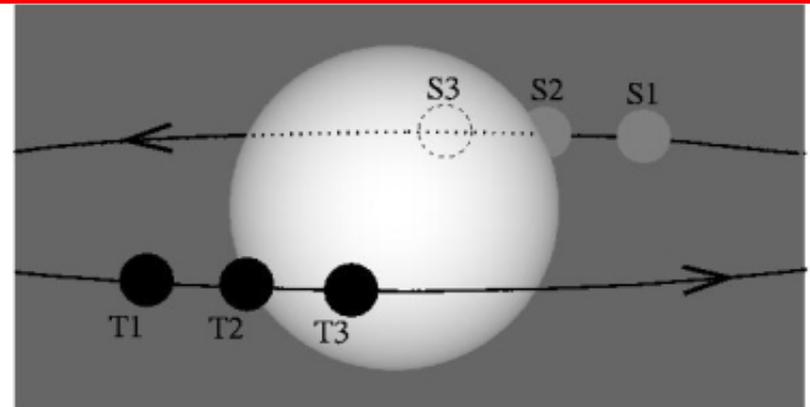
r : rayon de la planète

R : rayon de l'étoile

Permet de mesurer le rayon de la planète.

Si la masse est déterminée (via des mesures Vitesse radiale)

---> densité et donc « constitution »



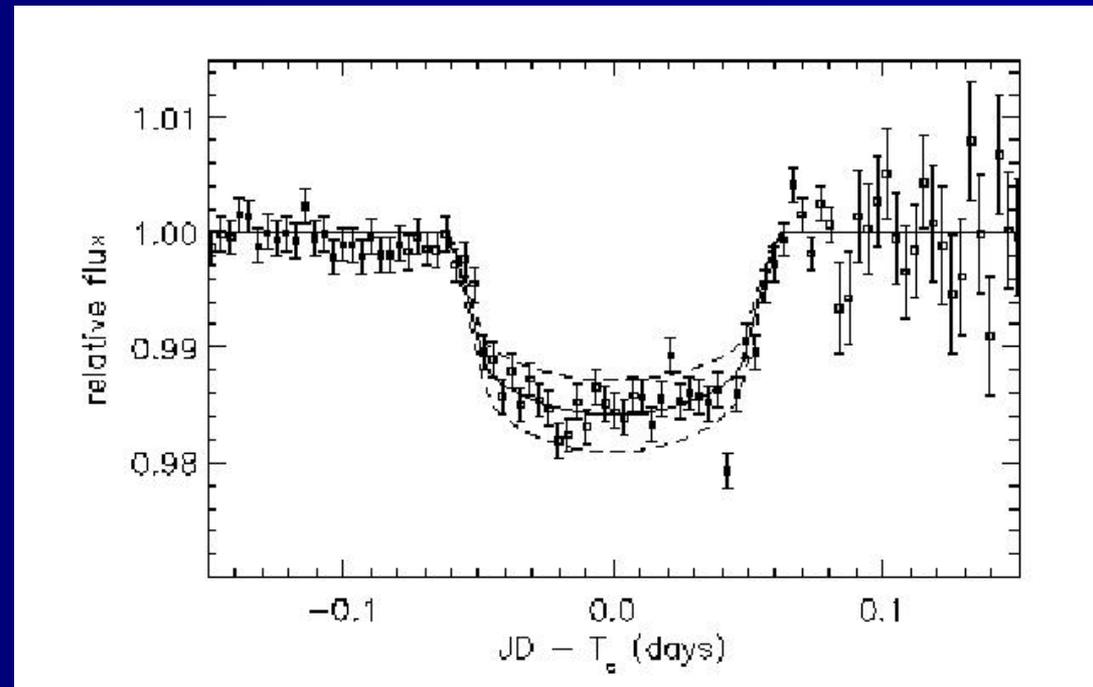
Méthodes de mesures

3 Détection par éclipse :

Premier cas observé en 2000

⇒ équipe USA-Genève-Grenoble
-Israel

⇒ HD 209458



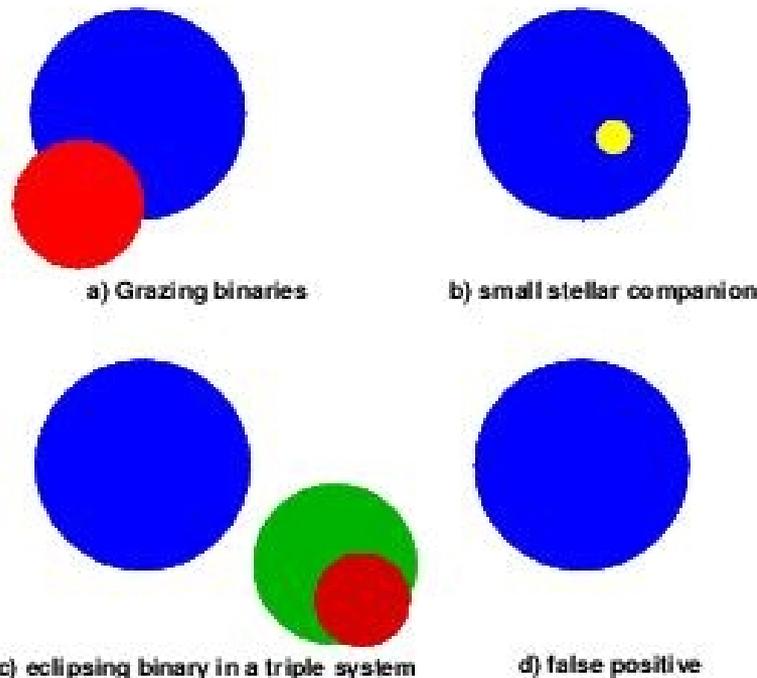
De nombreux relevés sont effectués de par le monde pour détecter des Planètes par transit. Du sol ou de l'espace :

Observer beaucoup d'étoiles en même temps, pour espérer trouver celles ayant une planète transitant

Méthodes de mesure

3 Détection par éclipse :

Attention aux fausses détections



Nécessité de faire des mesures en vitesse radiales pour confirmer les planètes

Figure 7.: Sketches of confusion cases: a) grazing binaries, b) binaries with an M dwarf companion, c) binaries in a triple system, d) false positive (caused by stellar activity or instrumental feature).

Méthodes de mesures

CoRoT

*Mission France/Europe/Brésil (France : 80%)
En opération depuis 2007*

Mars 2010 : fin de la mission nominale

Mars 2013 : fin de la mission étendue

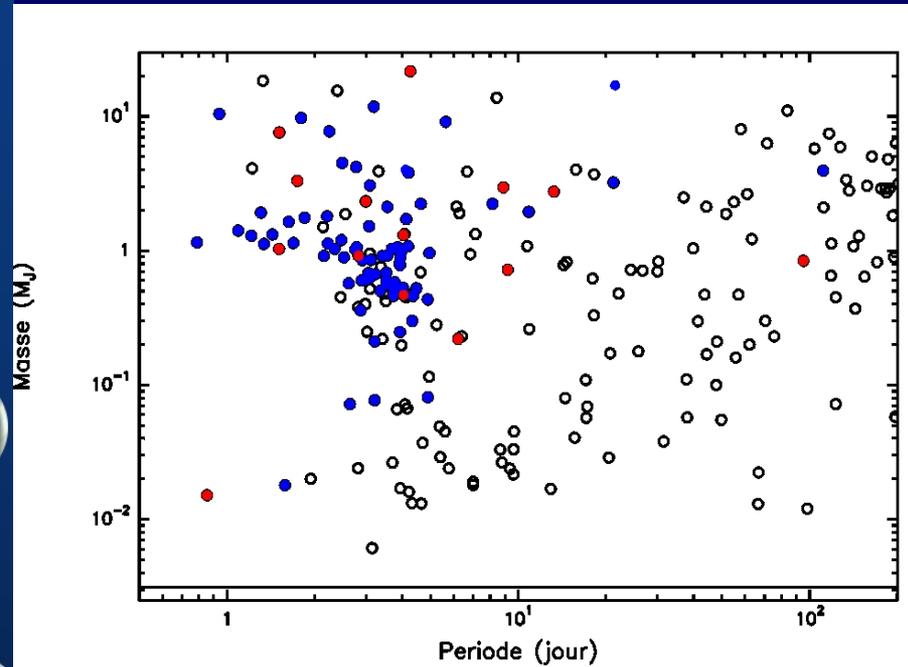


Un long processus de la courbe de lumière à l'annonce de la planète :

- plus de 50% des étoiles sont variables*
- Confirmer quelle étoile est variable dans le champs de vision :
 *Photométrie complémentaire au sol**
- Obtention de la vitesse radiale (SOPHIE + HARPS)
 *pour confirmation / mesure masse**

Méthodes de mesures

Vue générale des planètes CoRoT



Découverte notamment de :

- Super-Terre en transit : accès à la structure des planètes de faible masse
- Jupiter/Saturne « tièdes » : accès à la structure de planètes modérément illuminées
- Planètes massives/naines brunes en transit

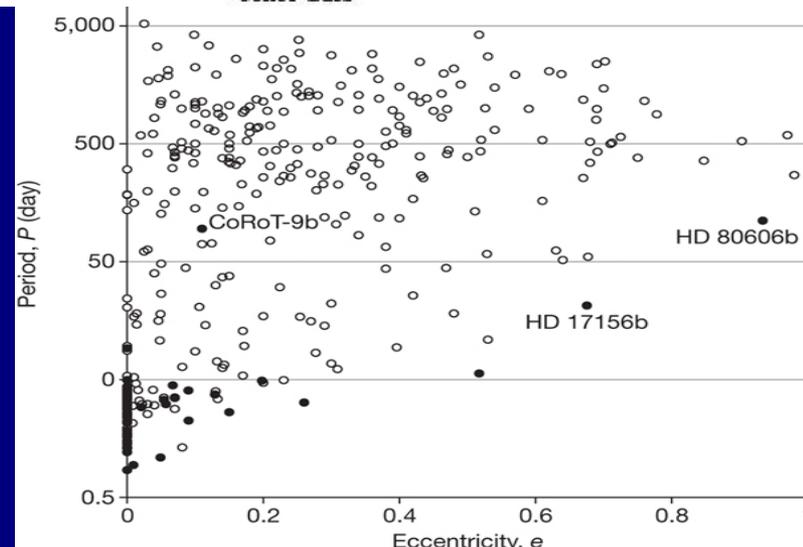
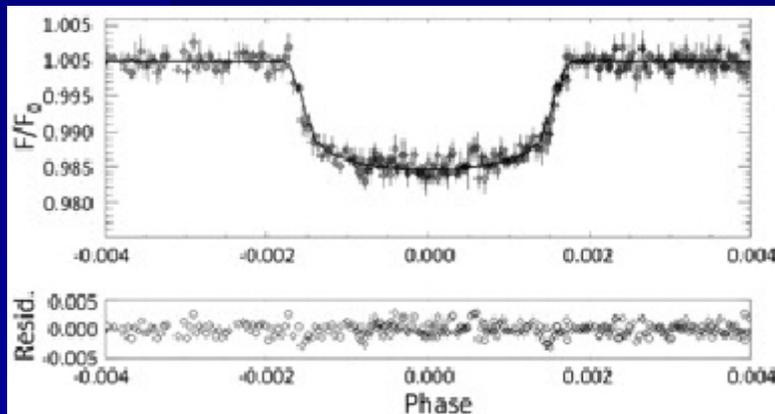
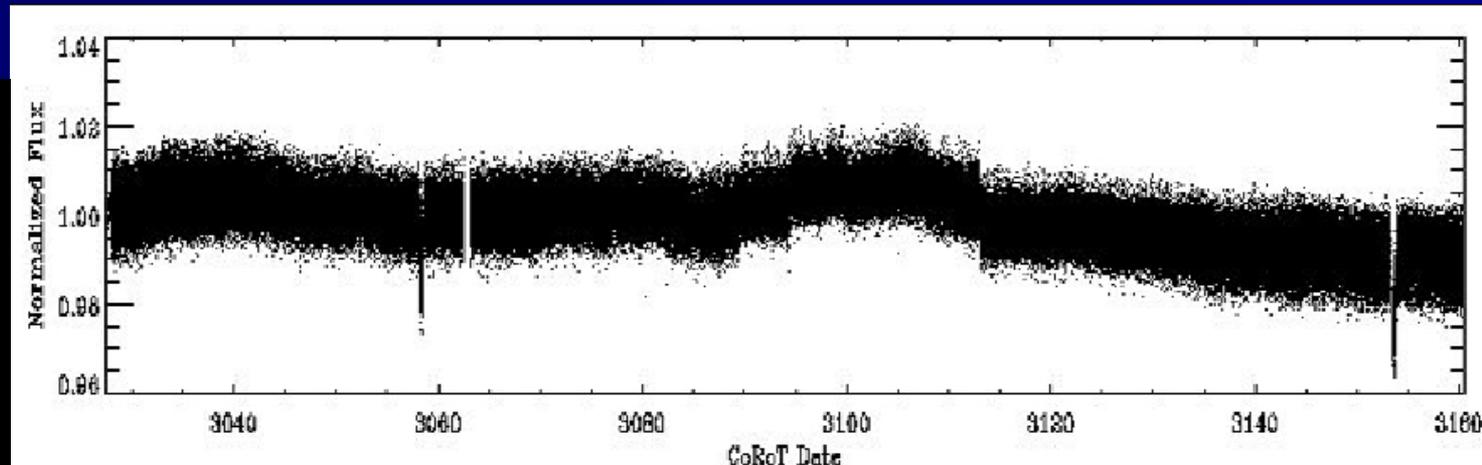
Méthodes de mesures

CoRoT 9-B :

Un Jupiter transitant sur une orbite similaire à Mercure

CoRoT-9b : 2 transits
G3V
Period = 95.27 days
 $M_p = 0.84 \pm 0.07 M_{Jup}$
 $R_p = 1.05 \pm 0.04 R_{Jup}$
 $\rho = 0.525 \pm 0.15 \text{ g/cm}^3$

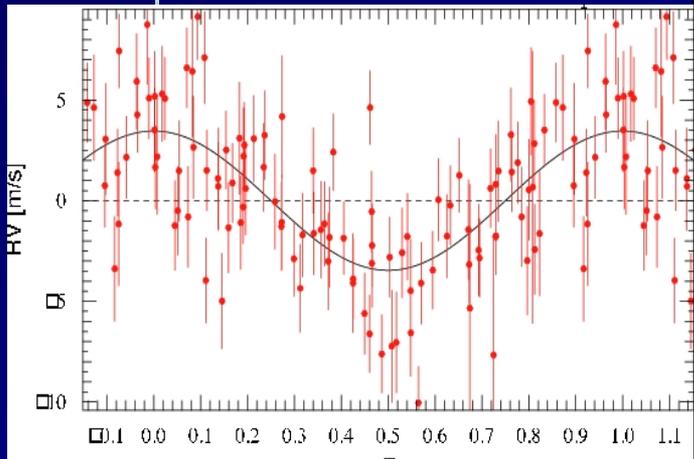
Deeg et al., Nature 2010



Méthodes de mesures

CoRoT 7-b :

Une Super-Terre surchauffée



Queloz et al. 2009

Lanza et al. 2010

CoRoT-7b

$P = 0.8536 \text{ d}$

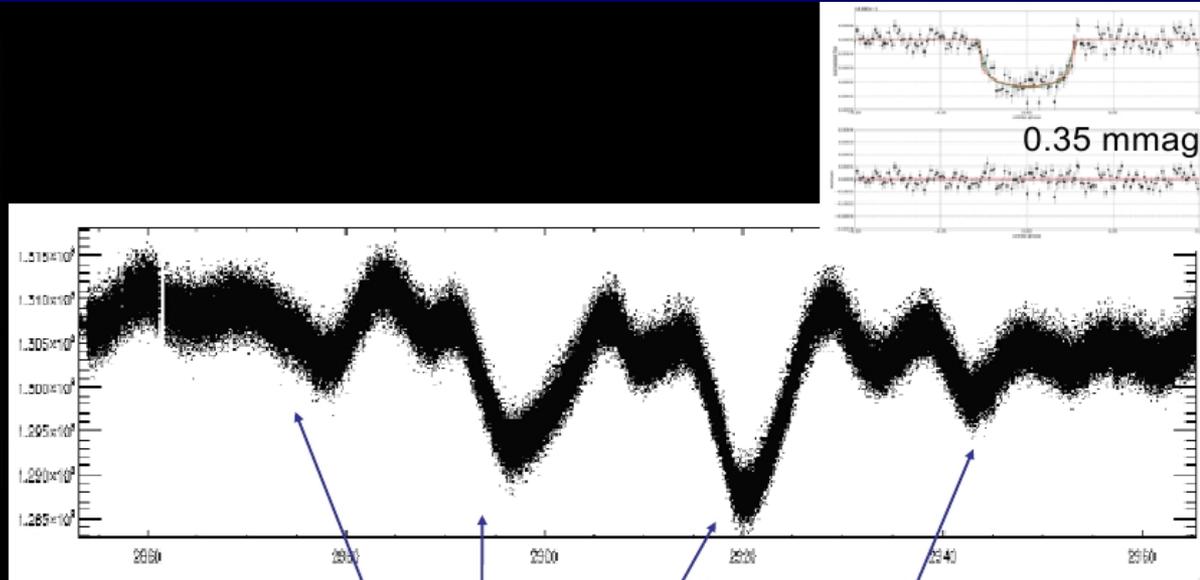
$a = 0.017 \text{ AU}$

$e = 0$

$m = 4.8 \pm 0.8 M_{\text{Earth}}$

$r = 1.68 \pm 0.09 R_{\text{Earth}}$

$\rho = 5.6 \pm 1.3 \text{ g.cm}^{-3}$

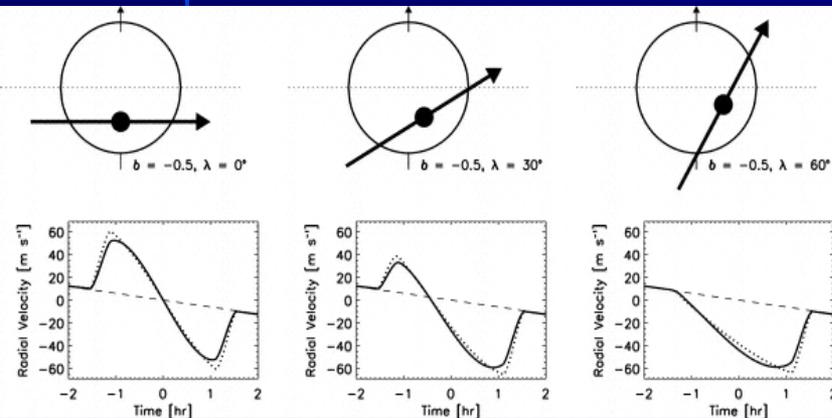


Rotational period ~ 23 days - star spots evolution

Léger et al., 2009, A&A

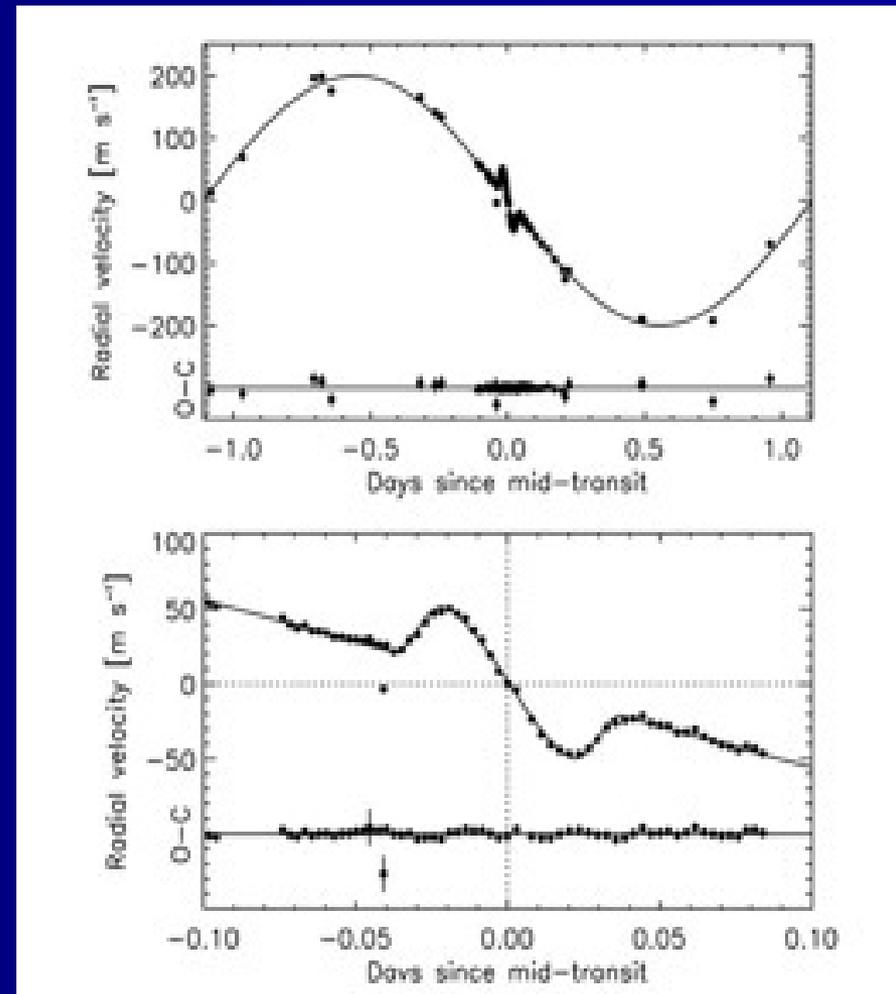
Méthodes de mesure

3 Détection par éclipse : mesure vitesse radiale pendant les éclipses



Pendant le transit, la planète cache des zones à différentes vitesses de l'étoile (à cause de la rotation de cette dernière).

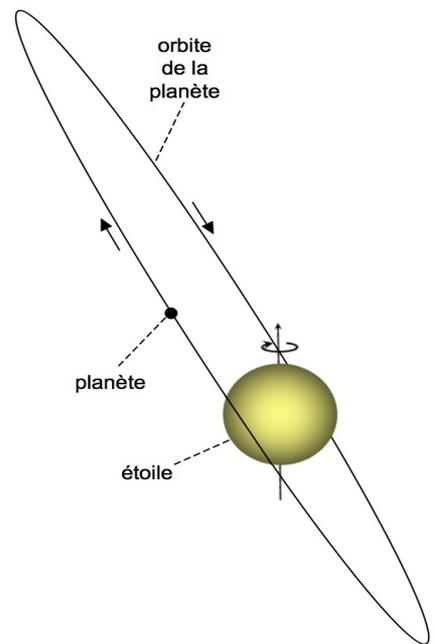
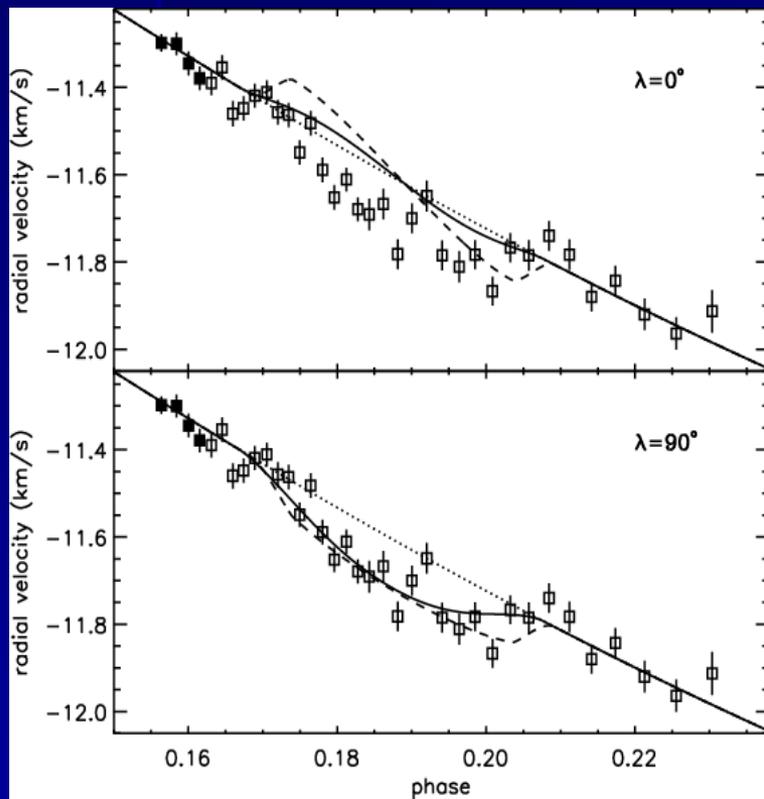
Cela a un effet sur la mesure globale de la vitesse de la planète; qui permet de remonter à l'orientation de l'orbite.



Méthodes de mesure

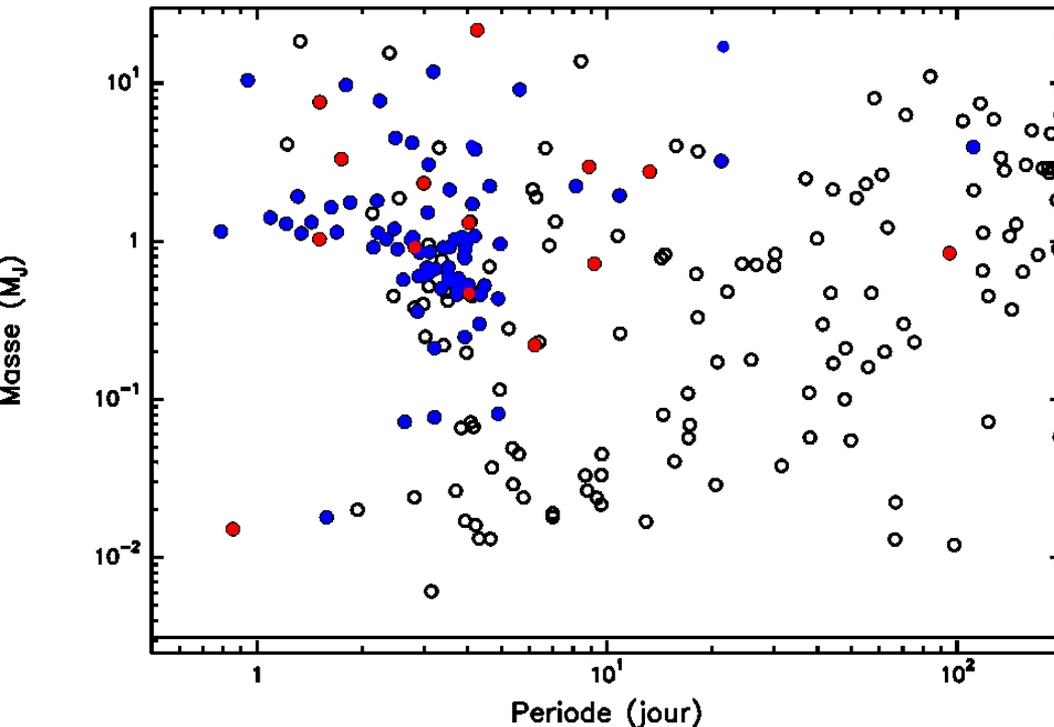
3 Détection par éclipse : mesure vitesse radiale pendant les éclipses

XO3 : cas de planète sur une orbite très inclinée par rapport à l'axe de rotation de l'étoile



Méthodes de mesure

4 Bilan :



Planètes avec des mesures de densité :

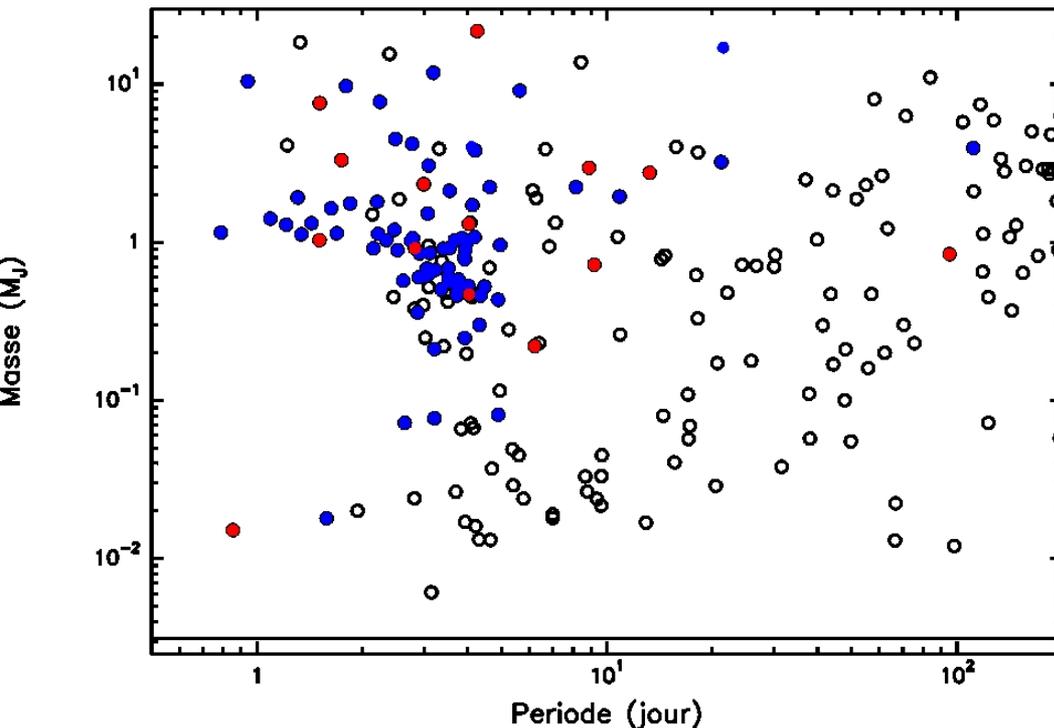
En bleu et rouge : planètes Transitant devant leurs étoiles et possédant des mesures vitesse radiales

En rouge : celles détectées par CoRoT

Essentiellement des planètes très proches de leurs étoiles, et donc chauffées de manière importante... mais quelques planètes à des distances et températures plus « communes »

Méthodes de mesure

4 Bilan :



Planètes avec des mesures de densité :

En bleue et rouge : planètes Transitant devant leurs étoiles et possédant des mesures vitesse radiales

En rouge : celles détectées par CoRoT

Beaucoup de planètes de la masse de Jupiter....
Mais aussi quelques Neptune
Et deux Super-Terre

Les densités des planète... ... et donc leur constitution

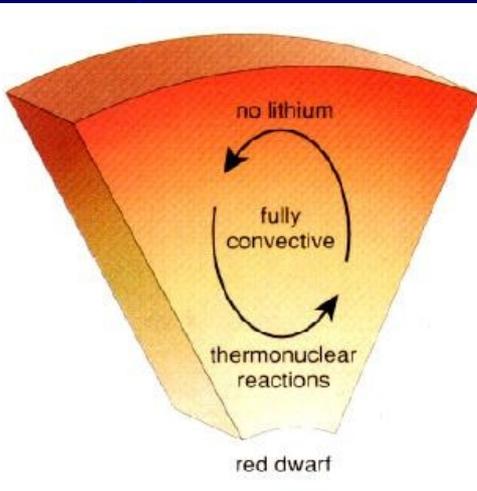


Vue d'artiste d'une Planète autour de l'étoile HD 209458

NASA and G. Bacon (STScI) • STScI-PRC01-38

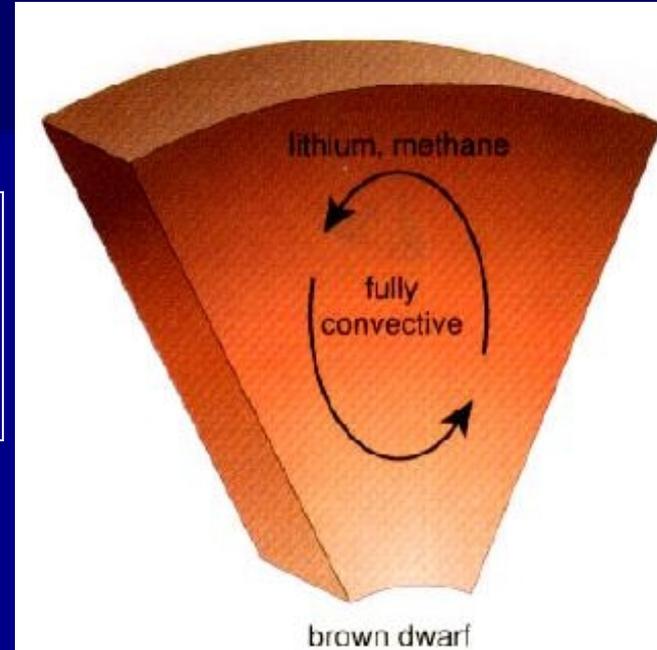
Densité / constitution

Types de planètes



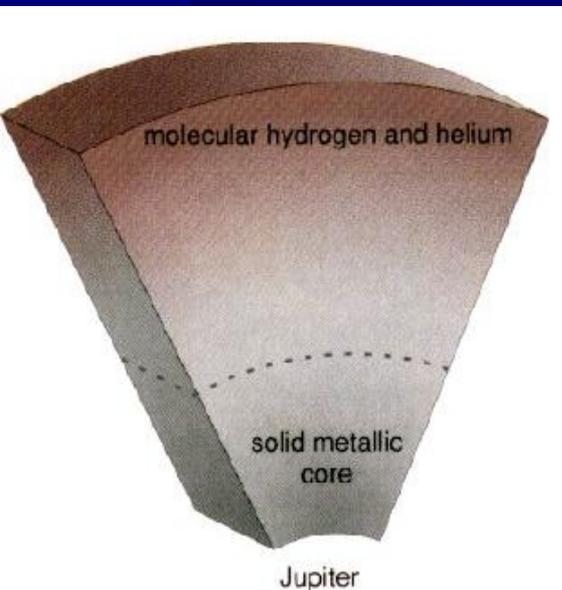
Etoiles de très faible masse
 $M < 70M_{\text{Jup}}$

Réactions nucléaires stables



Naines brunes
 $70M_{\text{Jup}} < M < 13M_{\text{Jup}}$

Fusion nucléaire temporaire



Planètes
 $13M_{\text{Jup}} < M$

Aucune fusion nucléaire

Cœur d'éléments lourds

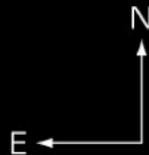
Densité / Constitution

2MASSWJ1207334-393254

Objets de masse planétaires
 $13M_{\text{Jup}} < M$

Sans cœur d'éléments lourds

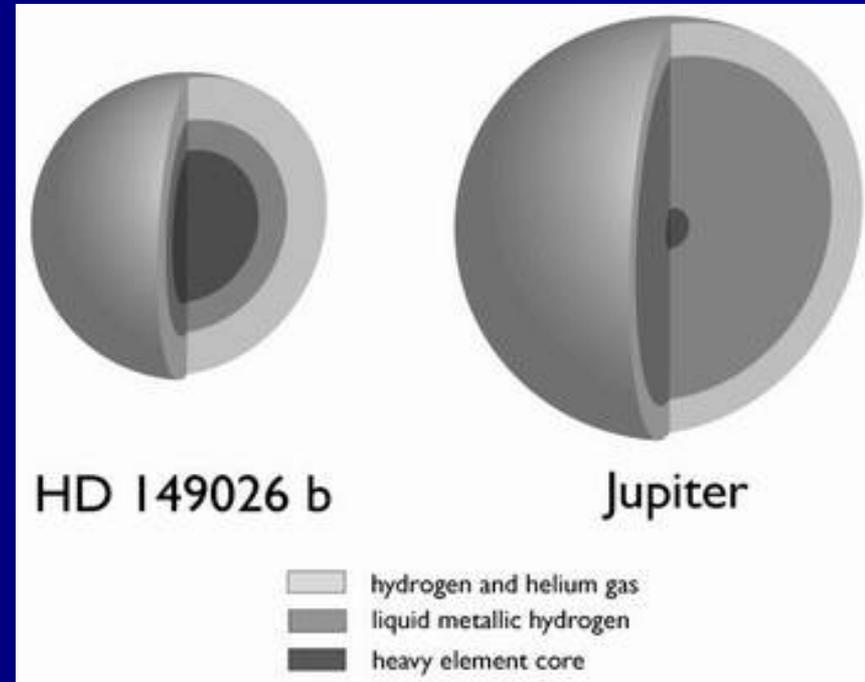
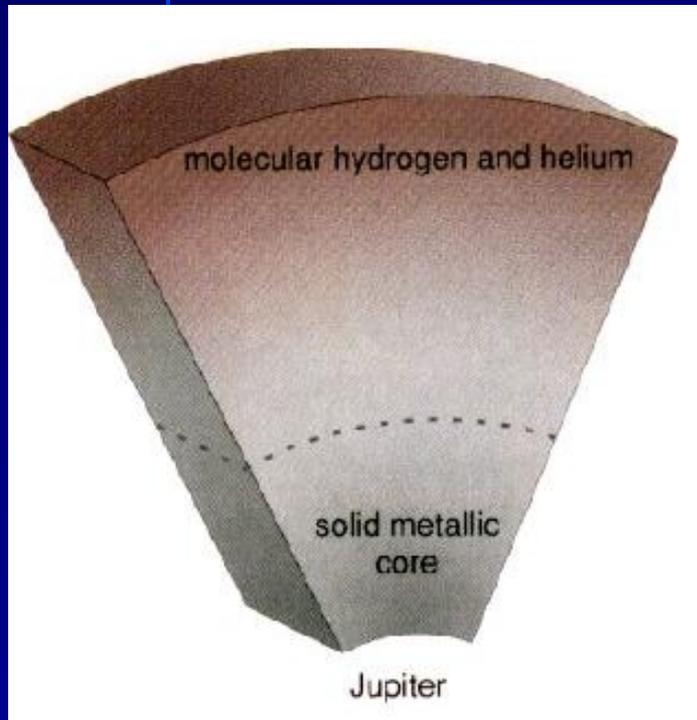
778 mas
55 AU at 70 pc



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

Densité / Constitution

Planètes géantes : Saturne; Jupiter ou plus massif

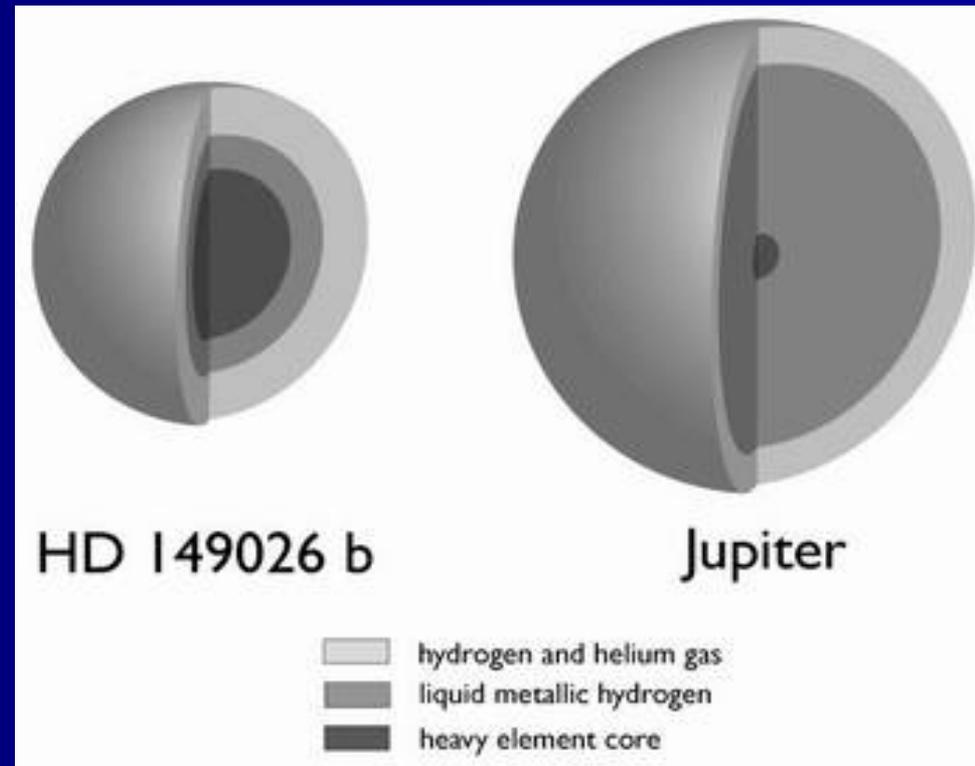
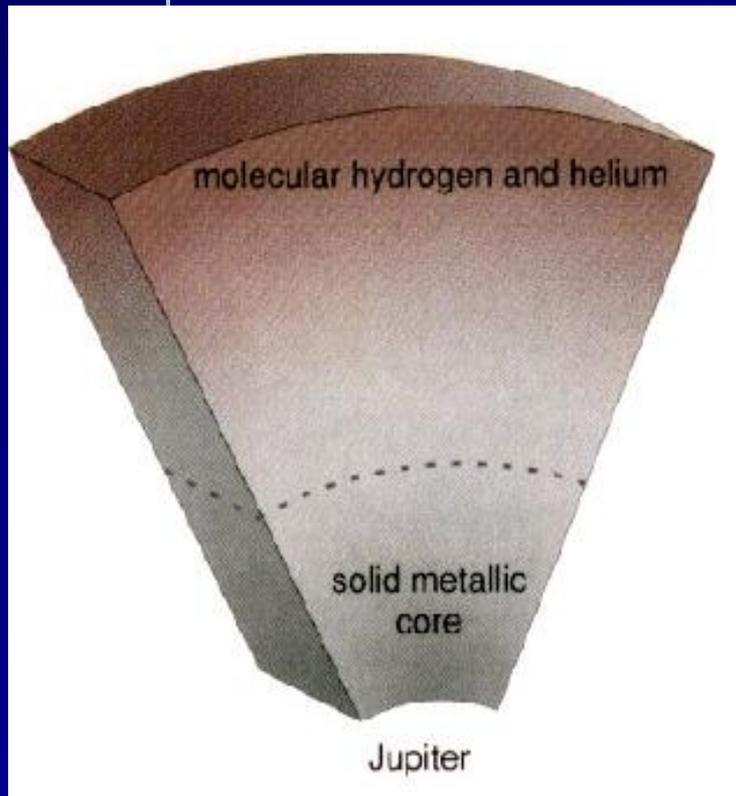


Cœur d'éléments lourds : a initié la formation

Enveloppe massive H-He (accréter par le cœur)²⁶

Densité / Constitution

Planètes géantes : Saturne; Jupiter ou plus massif

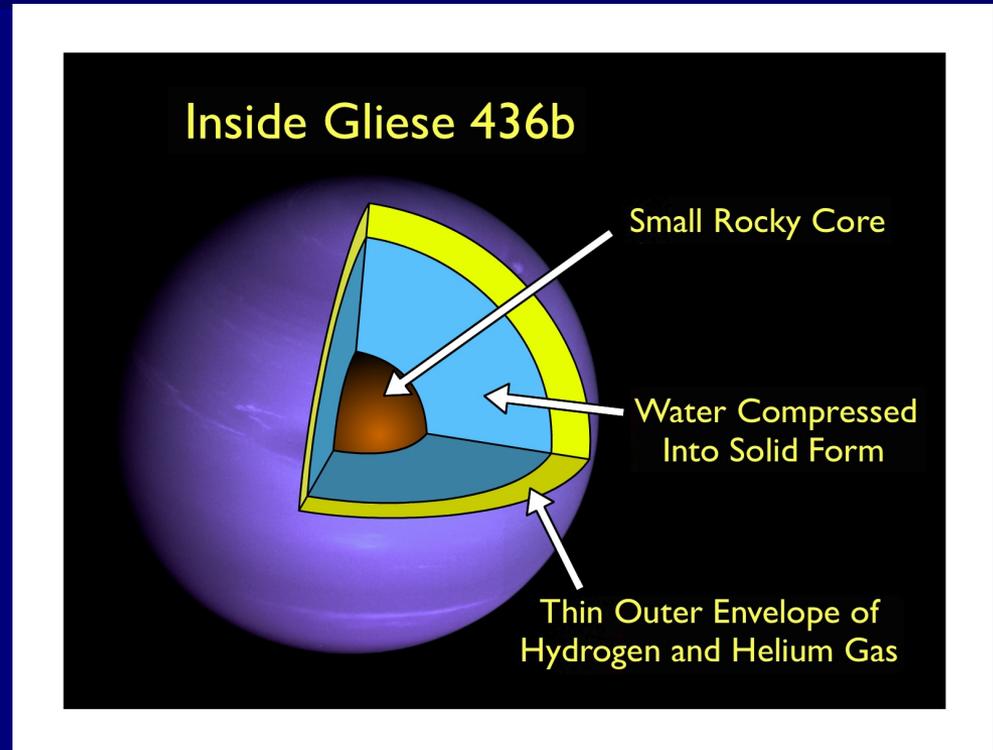
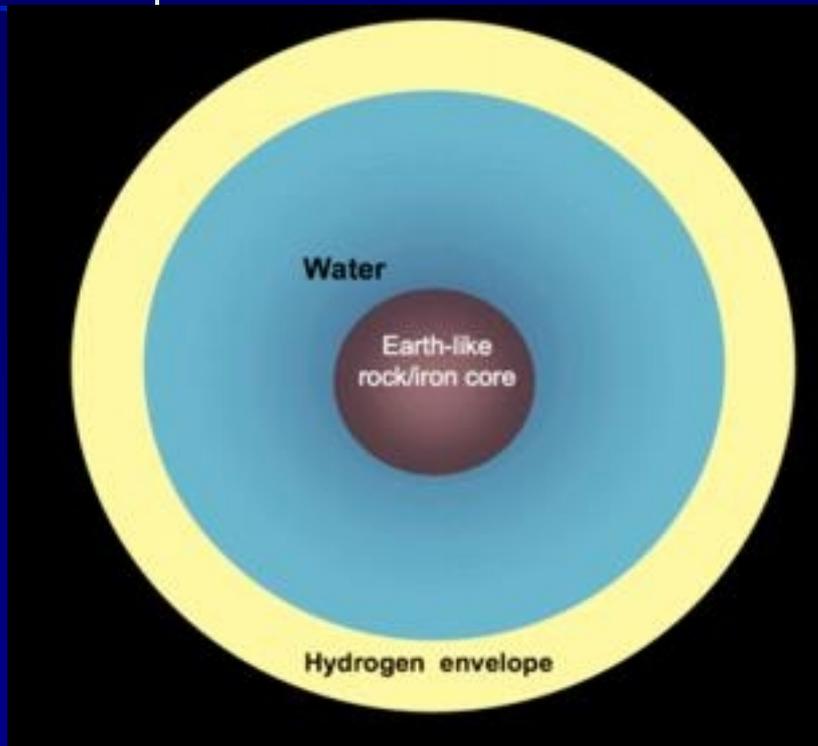


Planète peu dense (grande enveloppe H/He)

Jupiter : $1\,326\text{ kg/m}^3$ (Terre : $5\,515\text{ kg/m}^3$) ²⁷

Densité / constitution

Planètes type Neptune : $10 - qq\ 10 M_{\text{Terre}^{\oplus}}$

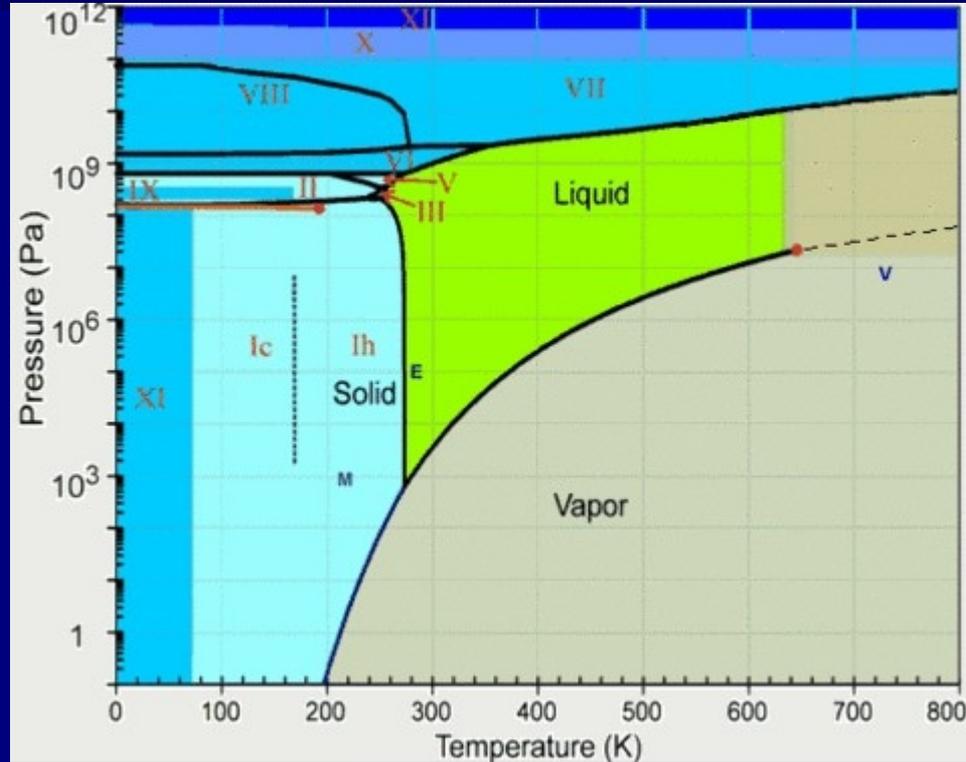
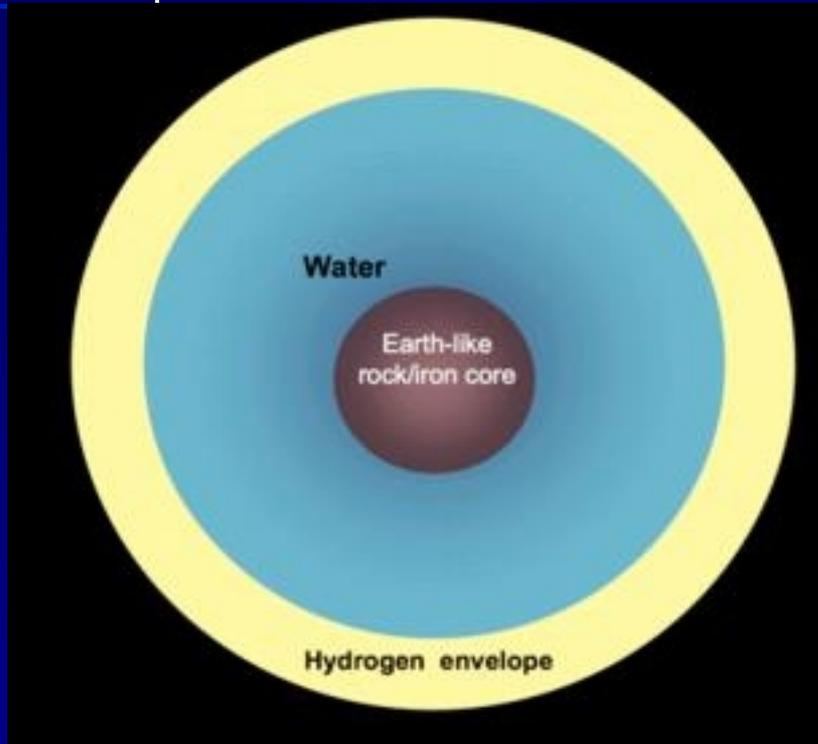


Cœur rocheux + enveloppe de glace : a initié la formation

Fine ($1 M_{\text{Terre}^{\oplus}}$) enveloppe H-He (---> le cœur n'a pas eu le temps d'accréter massivement)

Densité / constitution

Planètes type Neptune : 10 - qq 10 $M_{\text{Terre}^{\oplus}}$

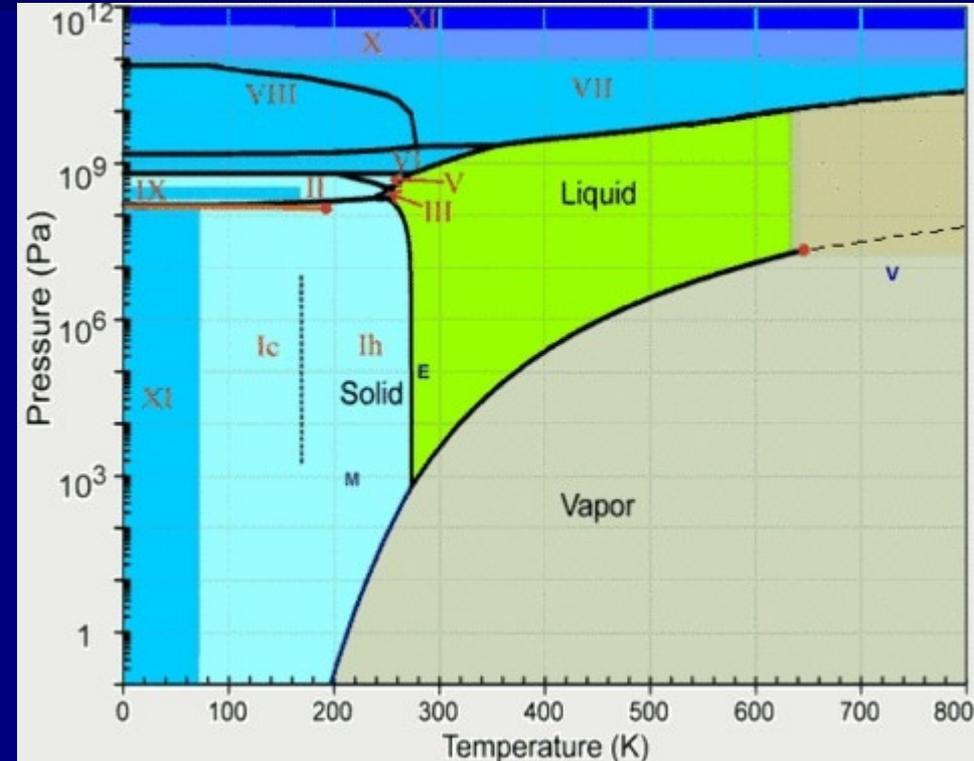
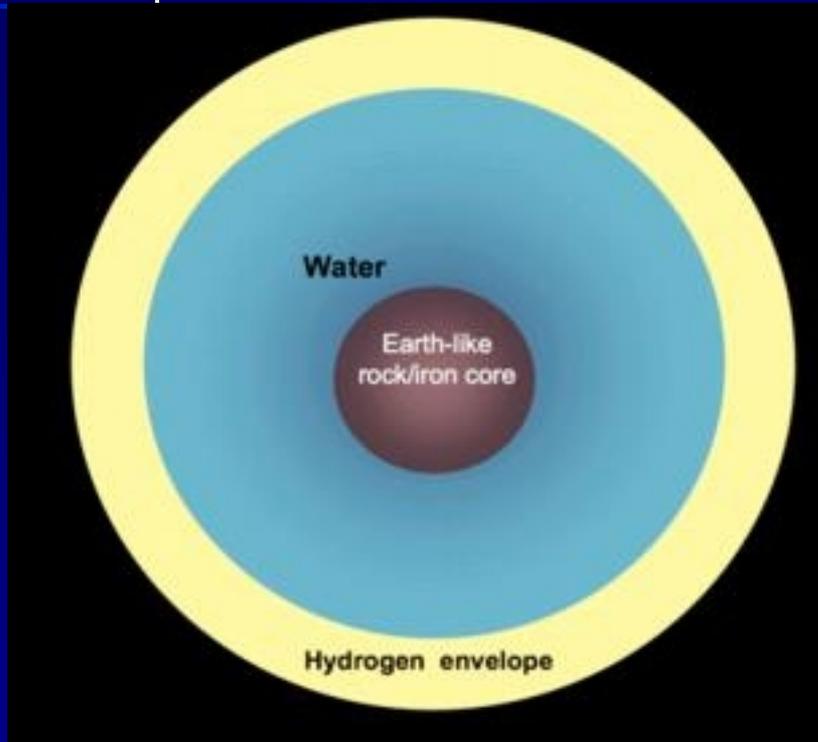


Cœur rocheux + enveloppe de glace : a initié la formation

Enveloppe H-He ---> Pression sous l'enveloppe importante : eau sous forme de glace

Densité / constitution

Planètes type Neptune : 10 - qq 10 $M_{\text{Terre}^{\oplus}}$

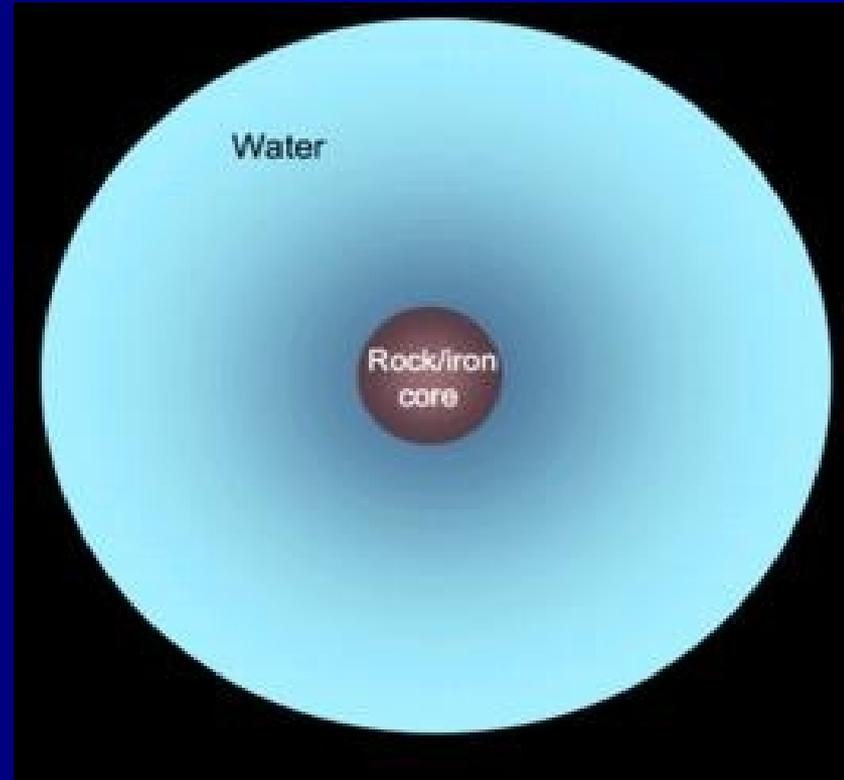


Densité intermédiaire

Neptune : 1 638 kg/m^3 (Terre : 5 515 kg/m^3)³⁰

Densité / Constitution

Planètes Super-Terre : $M < 10 M_{\text{Terre}}^{\oplus}$

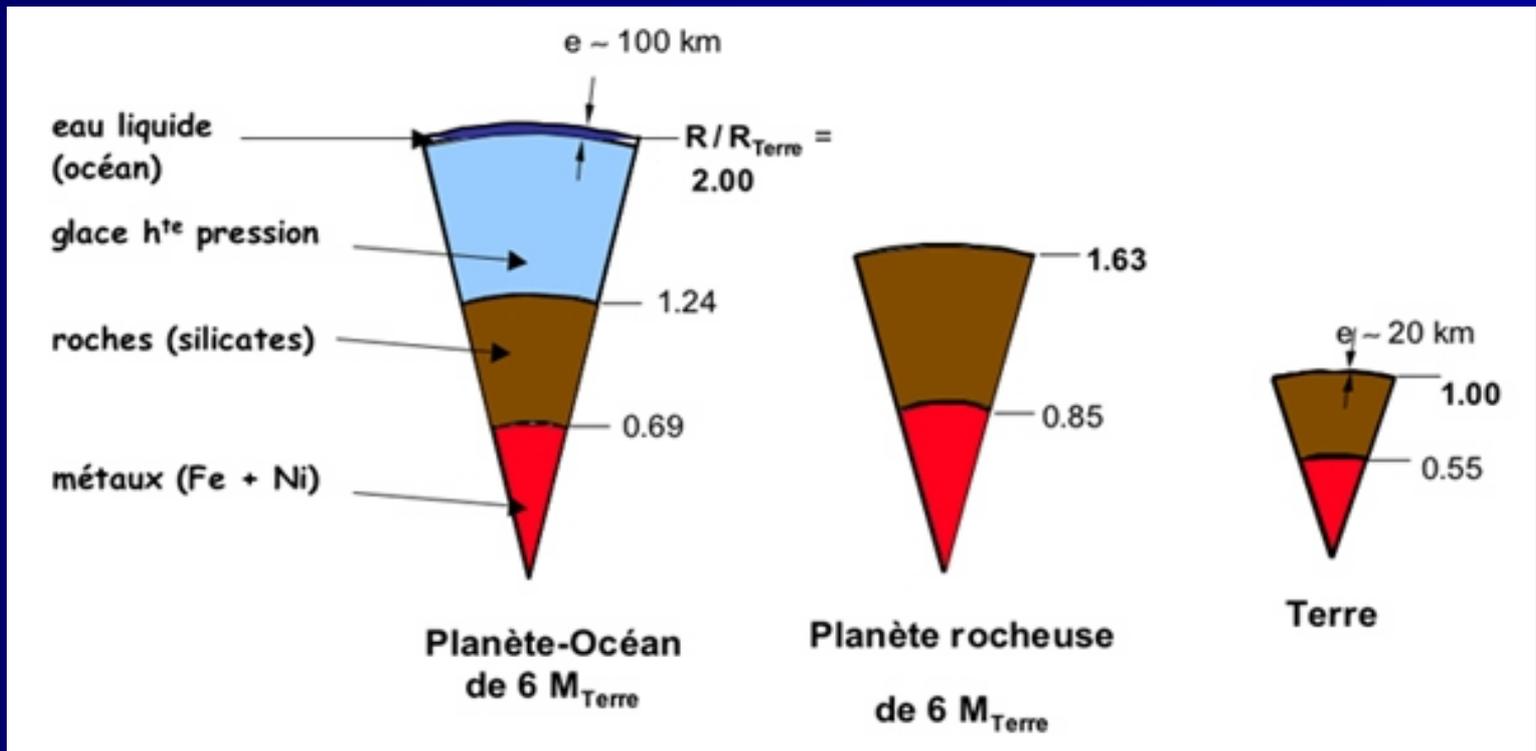


Planètes rocheuses
ou
cœur rocheux + enveloppe liquide (océan)

+ atmosphère fine

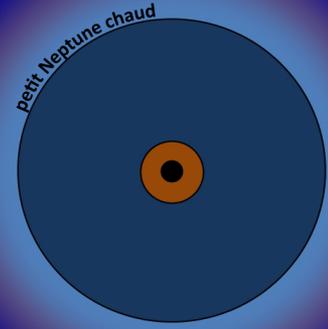
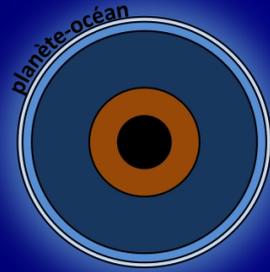
Densité / Constitution

Planètes Super-Terre : $M < 10 M_{\text{Terre}^{\oplus}}$



La densité va être différente s'il s'agit d'une Planète océan ou une planète de type terrestre

Densité / Constitution



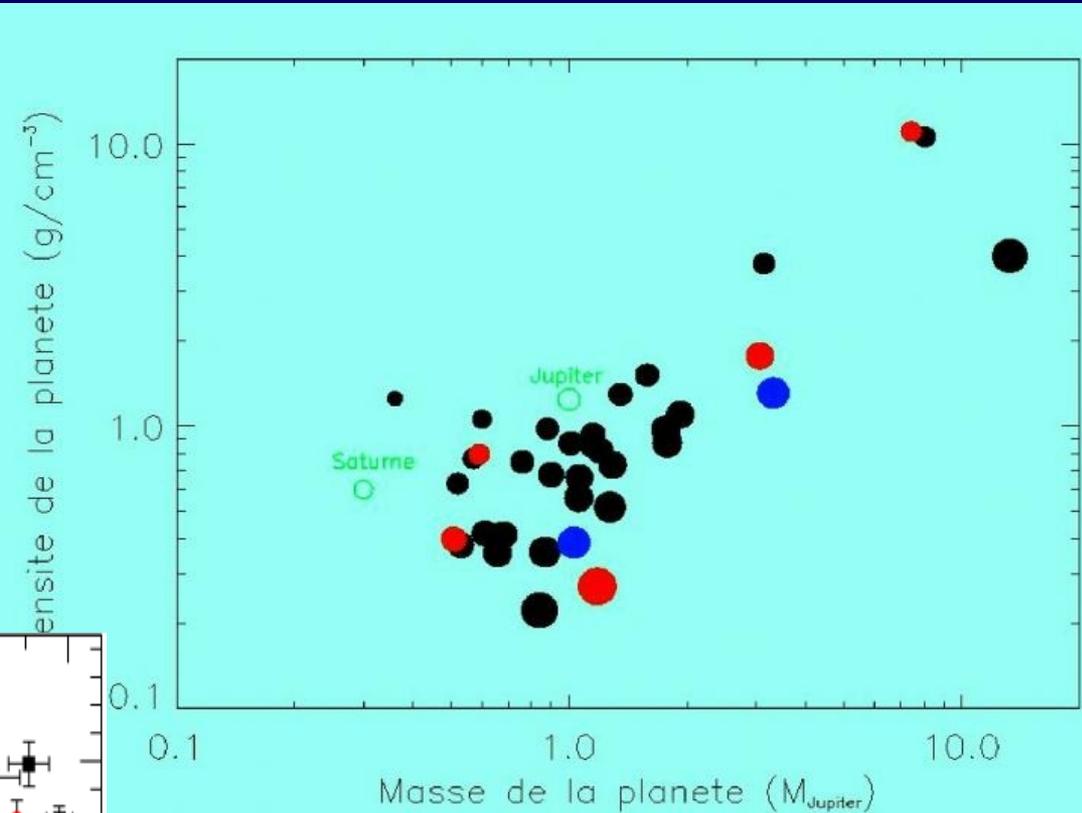
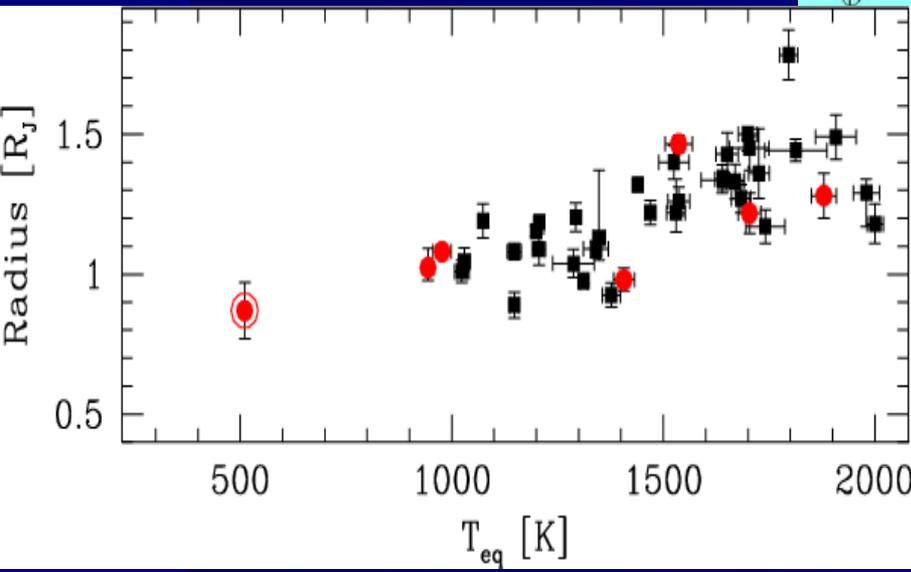
- Fe
- 'SiO'
- H₂O (VII)
- H₂O (Ih)
- H₂O (L)
- H₂O (V)
- H₂/He

La densité mesurée peut donner une « idée » de la constitution : ici rayons de planètes de la masse de la Terre en fonction de leurs constitutions

Densité / Constitution

Jupiters Chauds

- Grande diversité de densité; non encore expliquée

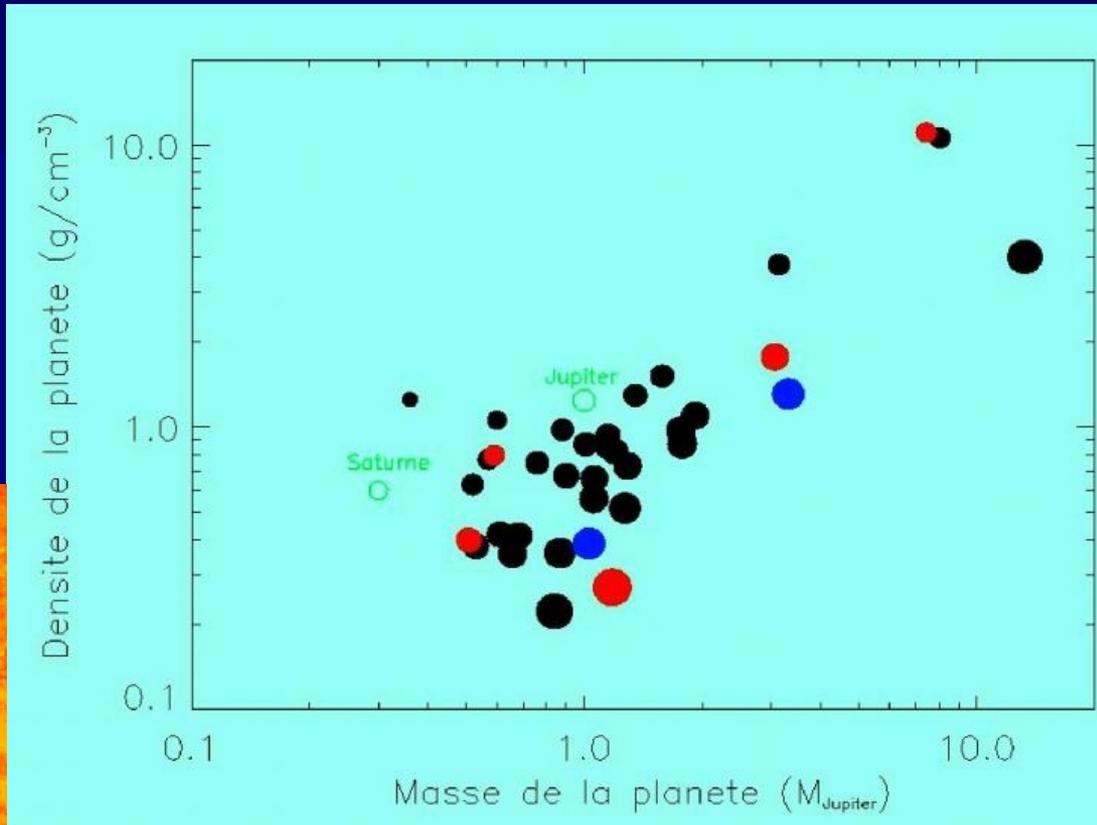


- Sûrement un rôle important de la température de la planète, surchauffée par leurs étoiles

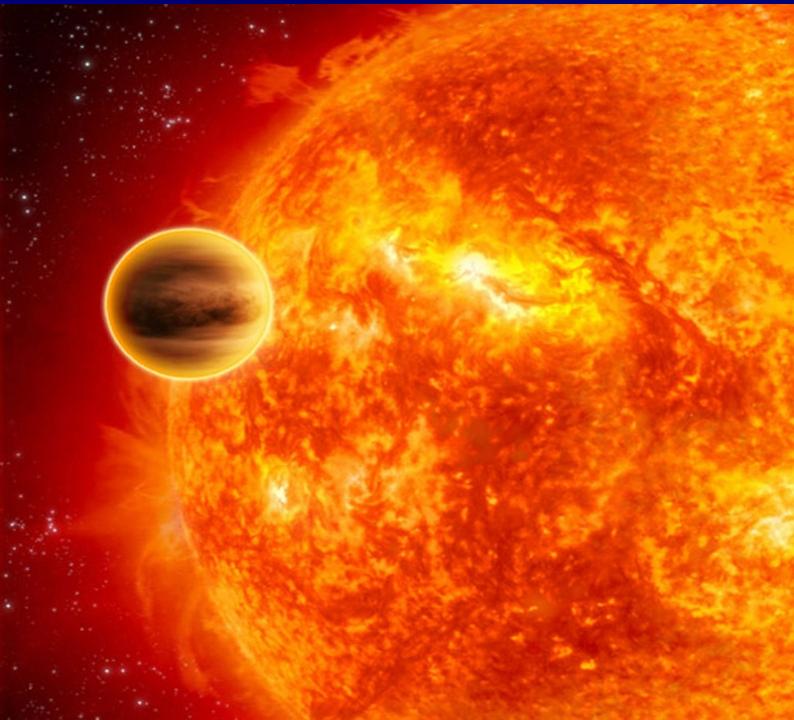
Densité / Constitution

Jupiters Chauds

- Grande diversité de densité; non encore expliquée



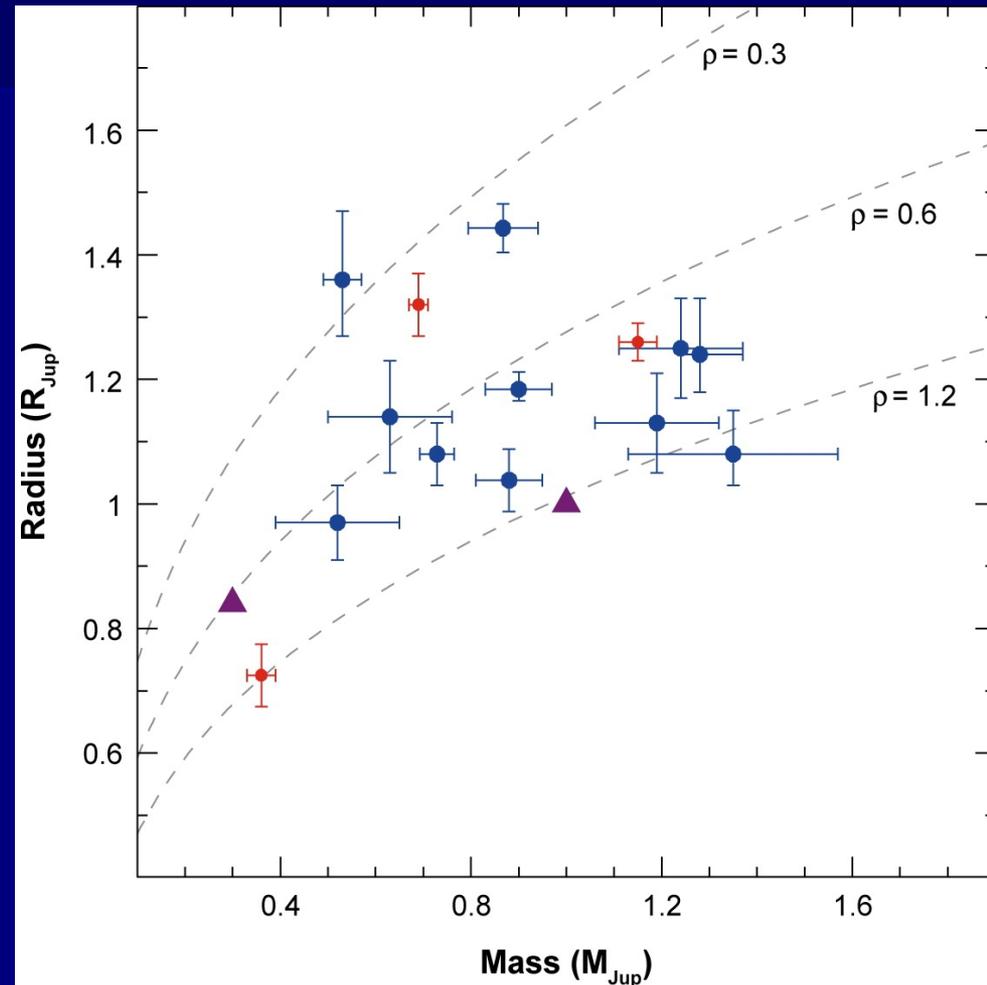
- Sûrement un rôle important de la température de la planète, surchauffée par leurs étoiles



Densité / Constitution

Jupiter chaud

- Grande diversité de densité; non encore expliquée
- Evocation également de densité du cœur dépendant de la composition chimique du système



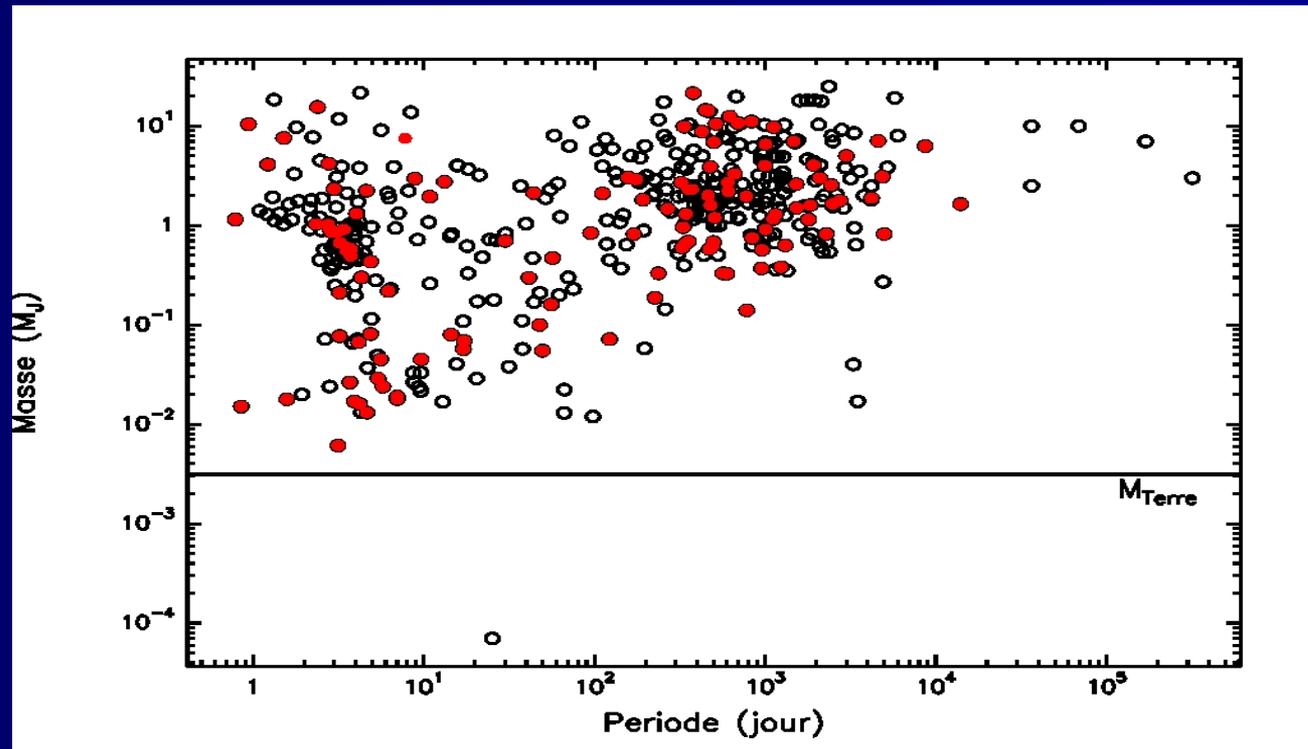
Udry S, Santos NC. 2007.

Annu. Rev. Astron. Astrophys. 45:397–439

Densité / Constitution

« Neptune » et « Super-Terre »

- ~25 « Neptunes » connues : 2 transits
- ~25 « Super-Terres » connues : 2 transits



Densité

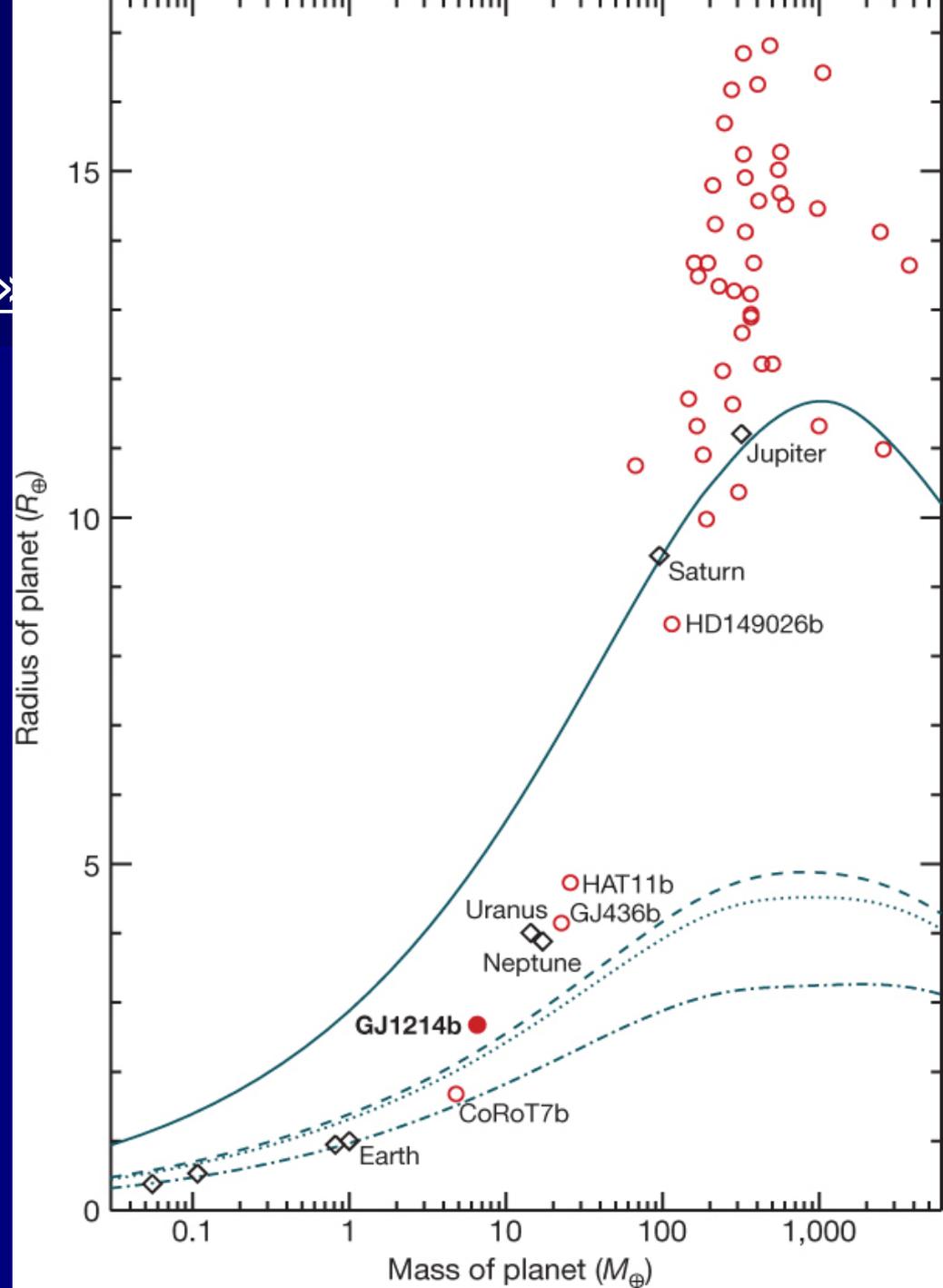
« Neptune » « Super-Terre »

- Gl436b et HAT 11b ont des densités similaires à celles des Neptune - Pas de surprises pour l'instant pour les « Neptunes »
- CoRoT 7b et GJ1214b présentent des différences notables....

----- H2O

..... 75% H2O, 22%Si, 3%Fe

-.-.-.- Terre : 67,5% Si, 32,5%Fe



Densité / Constitution

Les « Super-Terres »

COROT-7b : densité très proche de la Terre.

Planète surchauffée ($\sim 2000\text{K} - 3000\text{K}$)

A priori : surface de lave, pas d'atmosphère (soufflée par l'étoile)

CoRoT-7b

$$P = 0.8536 \text{ d}$$

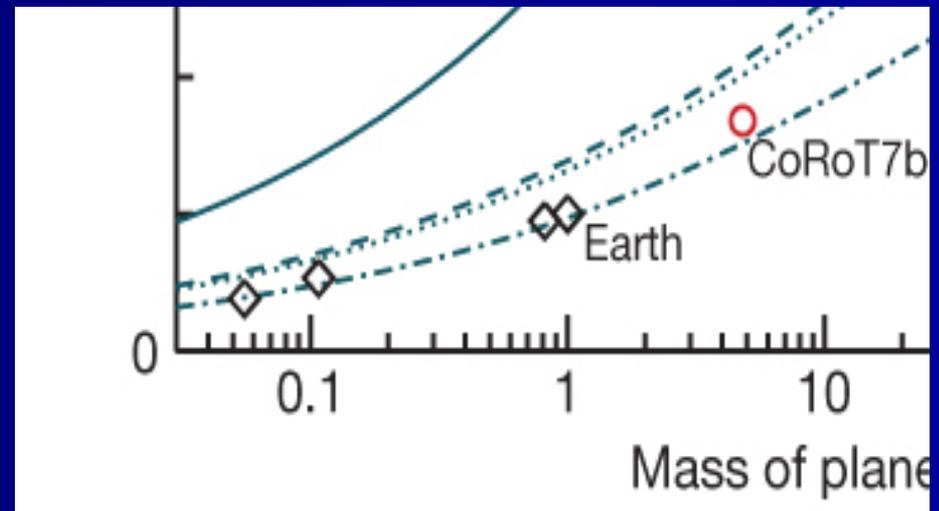
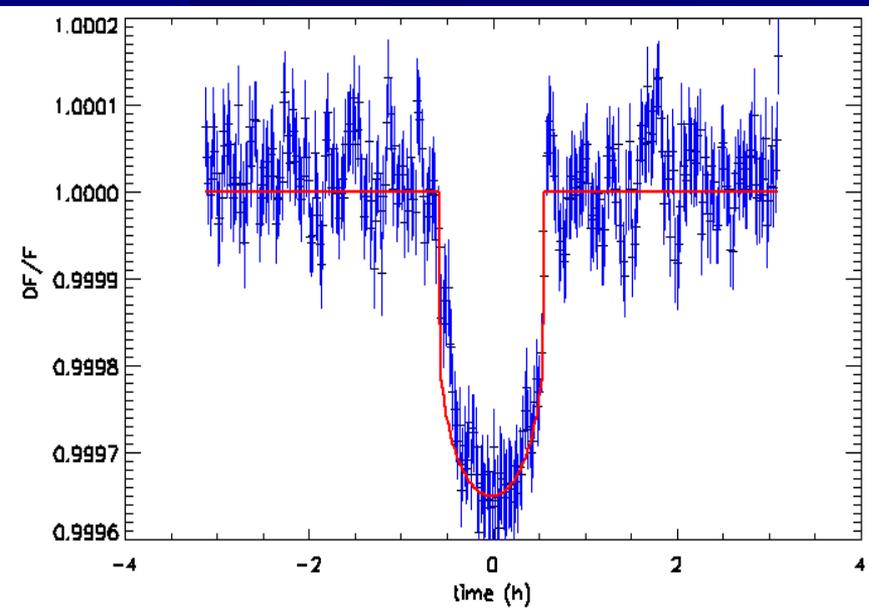
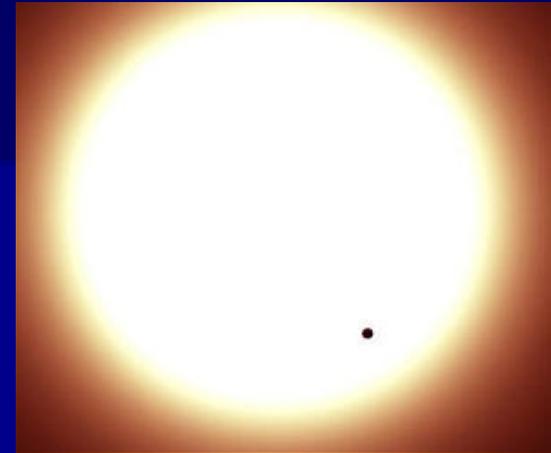
$$a = 0.017 \text{ AU}$$

$$e = 0$$

$$m = 4.8 \pm 0.8 M_{\text{Earth}}$$

$$r = 1.68 \pm 0.09 R_{\text{Earth}}$$

$$\rho = 5.6 \pm 1.3 \text{ g.cm}^{-3}$$



Densité / Constitution

Les « Super-Terres »

COROT-7b : densité très proche de la Terre.

Planète surchauffée (~2000K – 3000K)

A priori : surface de lave, pas d'atmosphère (soufflée par l'étoile)

CoRoT-7b

$P = 0.8536 \text{ d}$

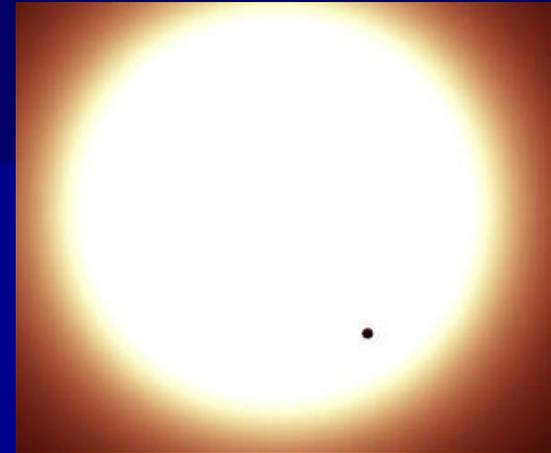
$a = 0.017 \text{ AU}$

$e = 0$

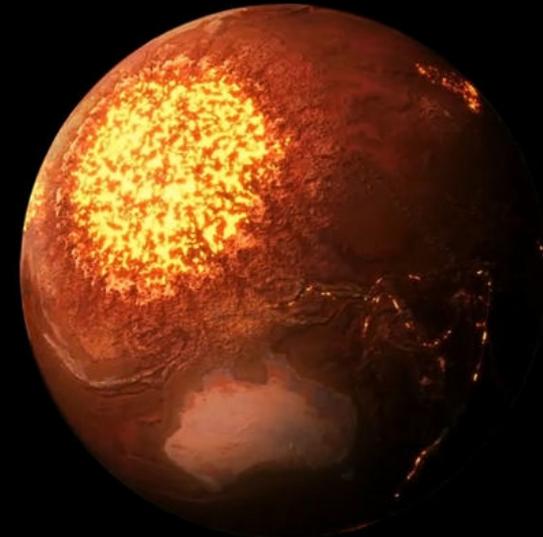
$m = 4.8 \pm 0.8 M_{\text{Earth}}$

$r = 1.68 \pm 0.09 R_{\text{Earth}}$

$\rho = 5.6 \pm 1.3 \text{ g.cm}^{-3}$



Earth



COROT-Exo-7b

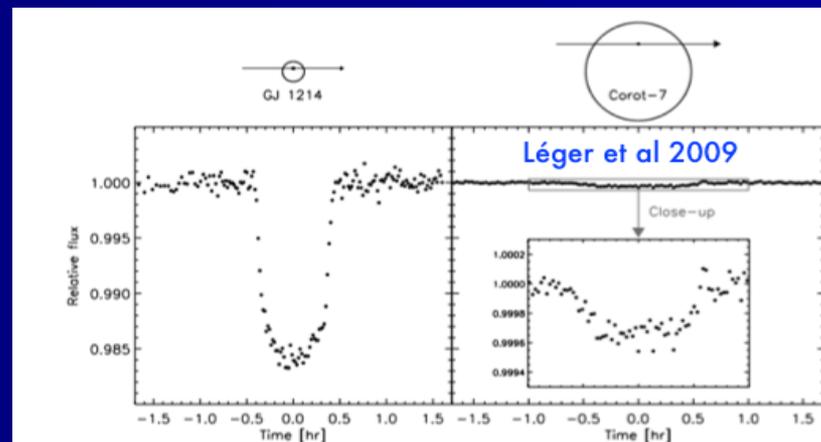
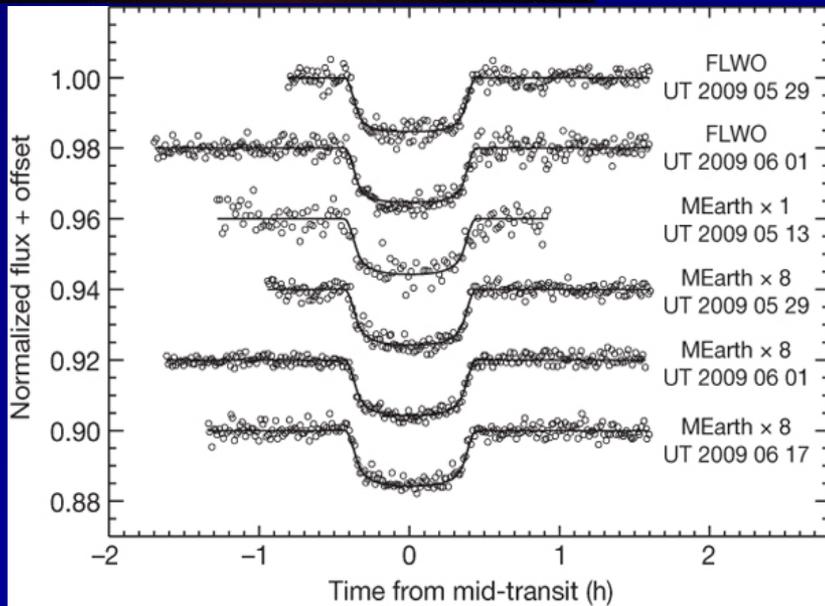
Densité / Constitution

GJ1214-b :

Une Super-Terre « enflée » autour d'une naine rouge
 Détectée par Mearth (du solr), Suivi Vr avec HARPS

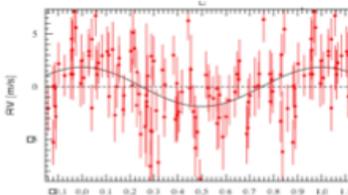
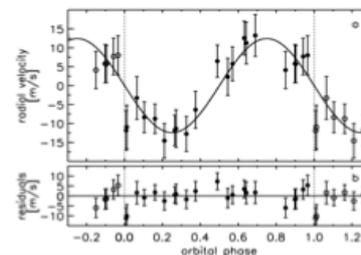


Planetary radius, R_p	$2.678 \pm 0.13 R_\oplus$
Planetary mass, M_p	$6.55 \pm 0.98 M_\oplus$
Planetary density, ρ_p (kg m^{-3})	1870 ± 400



Charbonneau et al 2009

Queloz et al 2009



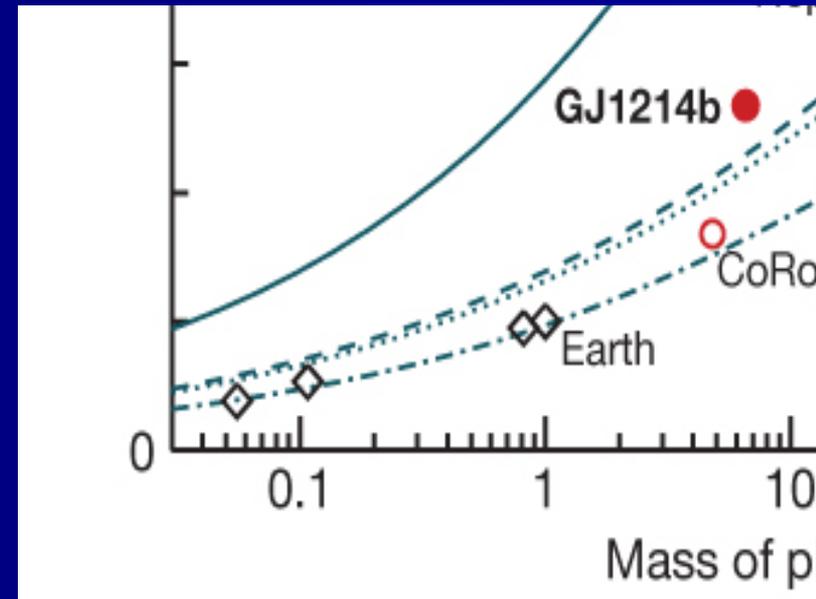
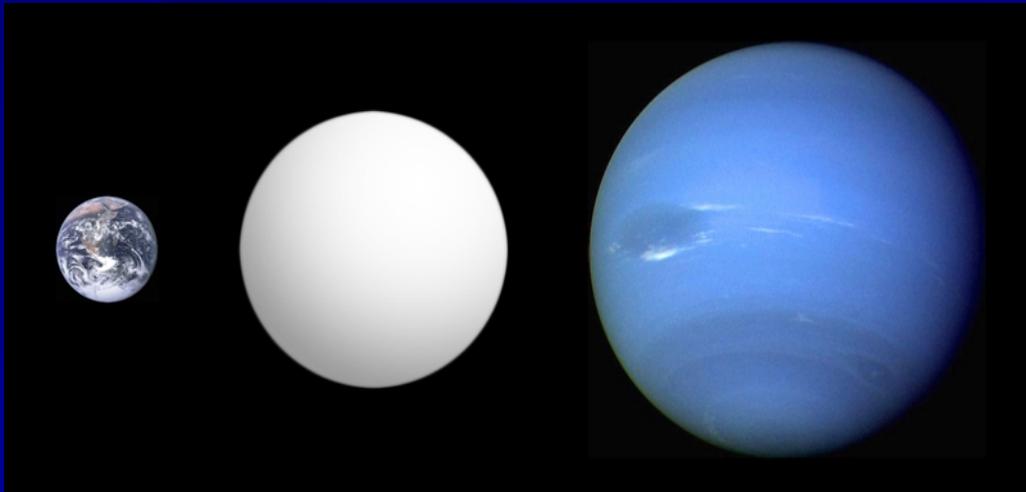
Densité / Constitution

Les « Super-Terres »

GJ1214b

Beaucoup moins chaude que CoRoT 7b : 150-250 deg Celsius

Compatible avec planètes rocheuses entourées d'une grande enveloppe H/He.... ou avec une planète océan

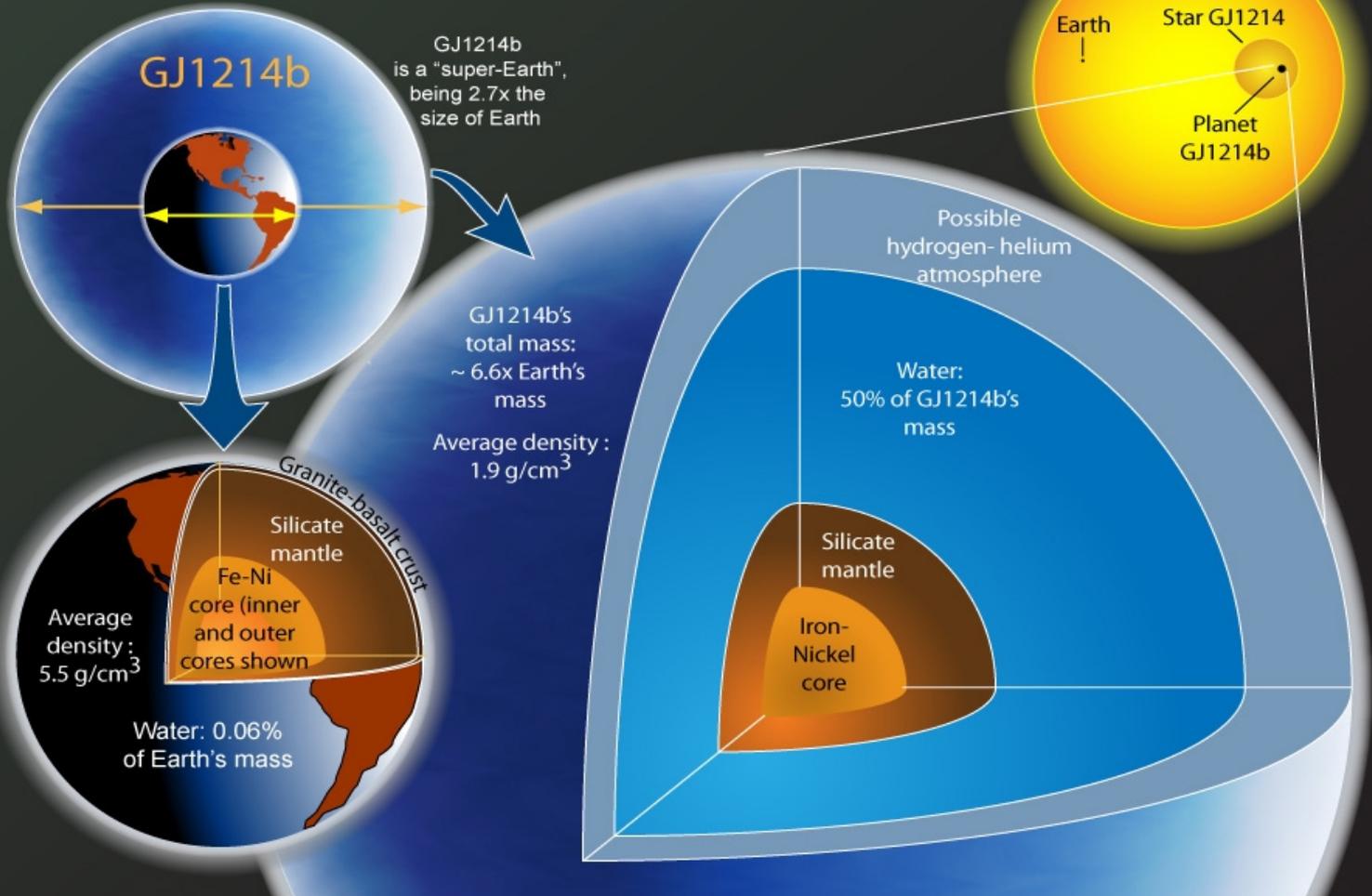


Densité / Constitution

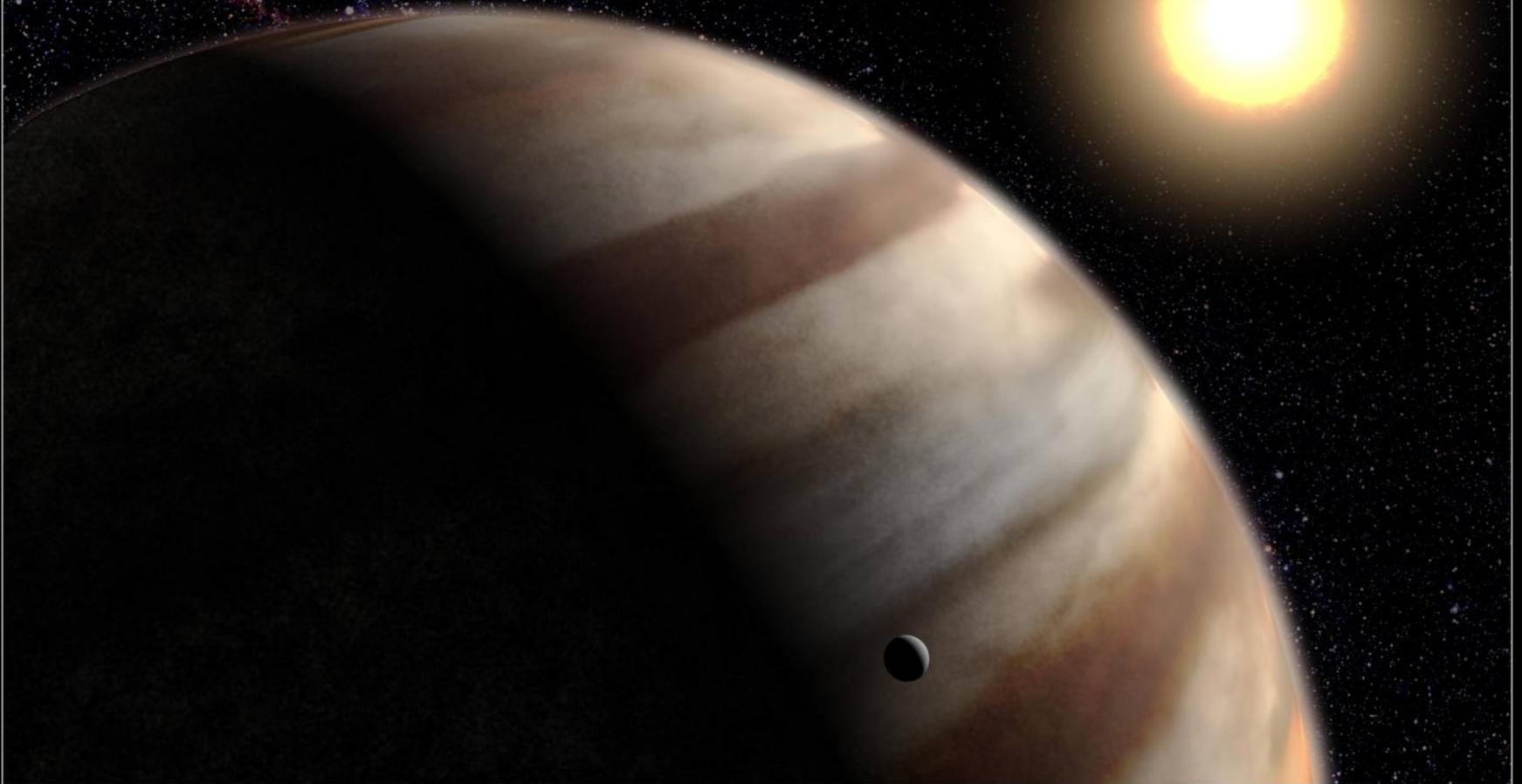
Les « Super-Terres »

Water World: Exoplanet GJ 1214b

From Nature 17 Dec. 2009; Review by Marcy; Letter by Charbonneau et al.
Illustration © copyright John Garrett



Les atmosphères des planètes extra-solaires



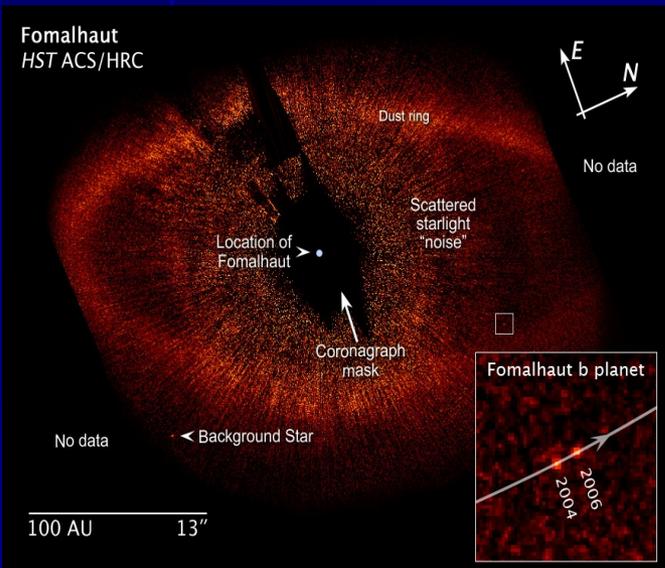
Vue d'artiste d'une Planète autour de l'étoile HD 209458

NASA and G. Bacon (STScI) • STScI-PRC01-38

Atmosphères

Comment mesurer l'atmosphère de planètes ?

- Dans le cas d'une planète imagée : possible de mesurer et d'analyser (en obtenir un spectre) la lumière en provenance de la planète, de l'isoler de celle de l'étoile. Mesure difficile, restreint actuellement à quelques objets très jeunes et massif, ressemblant à des naines brunes ... mais à suivre.

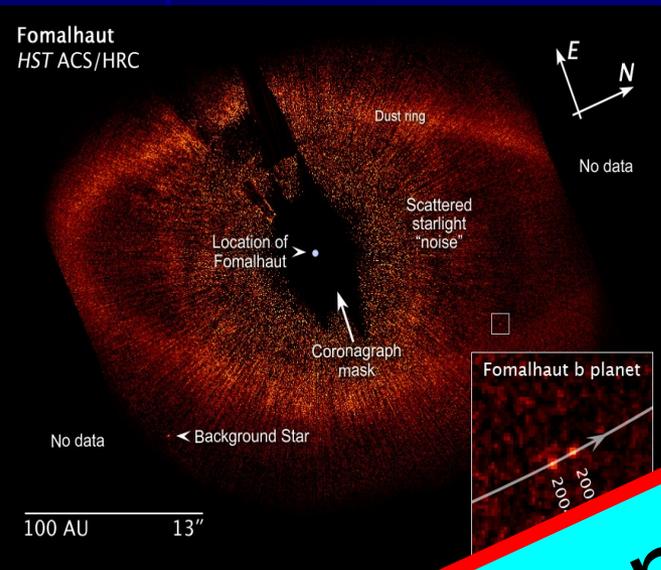


Pour les autres cas : comment faire une analyse de l'atmosphère sans voir la planète...

Atmosphères

Comment mesurer l'atmosphère de planètes ?

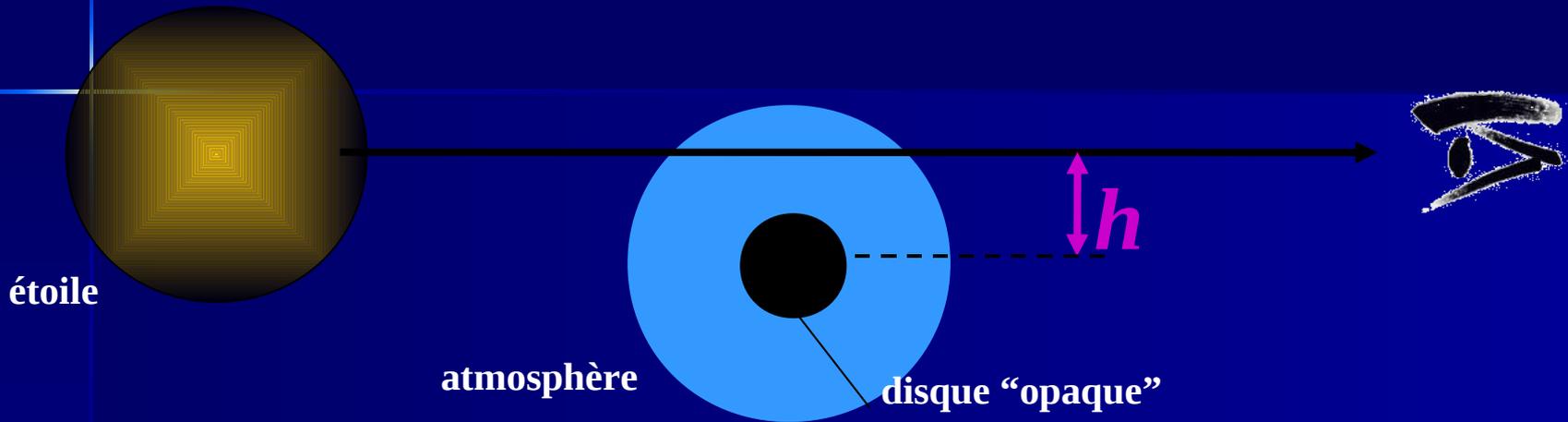
- Dans le cas d'une planète imagée : possible de mesurer et d'analyser (en obtenir un spectre) la lumière en provenance de la planète, de l'isoler de celle de l'étoile. Mesure difficile, restreinte actuellement à quelques objets proches et massif, ressemblant à des naines brunes ... mais à suivre.



Les transits planétaires...

Peut-on mesurer comment faire une analyse de l'atmosphère
Spectre...

Atmosphères



$$\Delta F/F = \int_0^{R_p+h} 2\pi h dh (1 - \exp[-\tau(\lambda, h)])$$

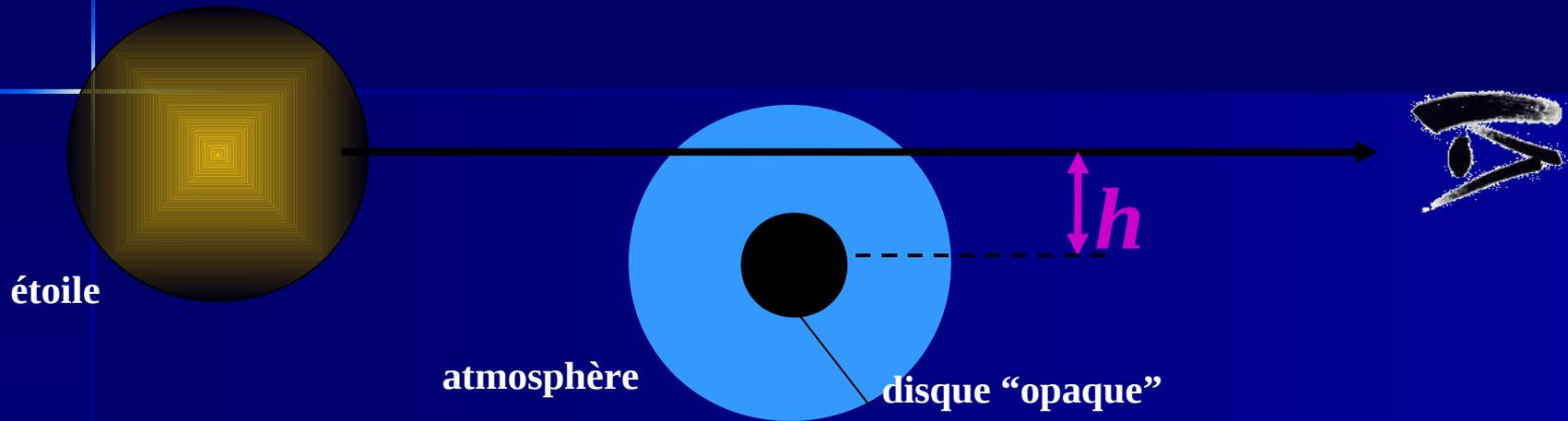
$\tau(\lambda, h)$

opacité le long de
la ligne de visée

dépend de

structure atmosphérique
composition atmosphérique

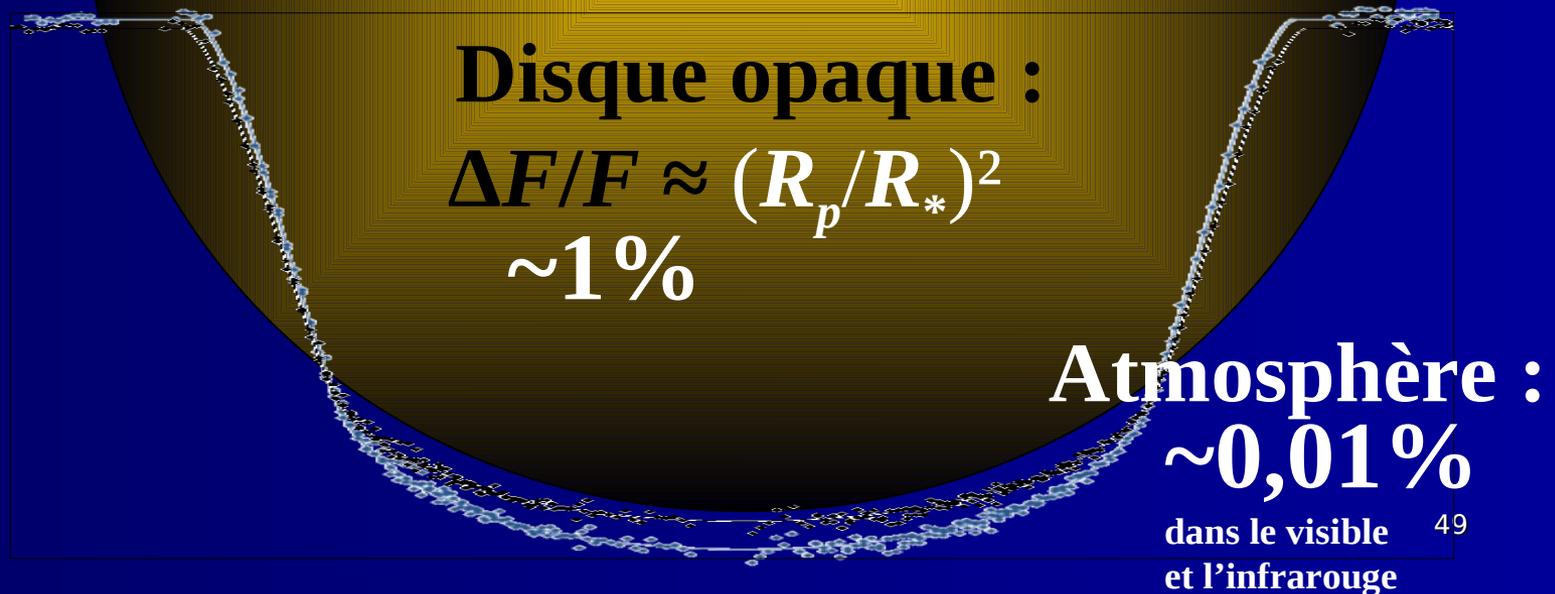
Atmosphères



Une partie de la lumière de l'étoile passe à travers l'atmosphère de la planète. Elle va être légèrement plus absorbée au longueur d'onde où l'atmosphère de la planète est la plus opaque.

Donne des indications sur la constitution de l'atmosphère et sur sa structure.

Atmosphères

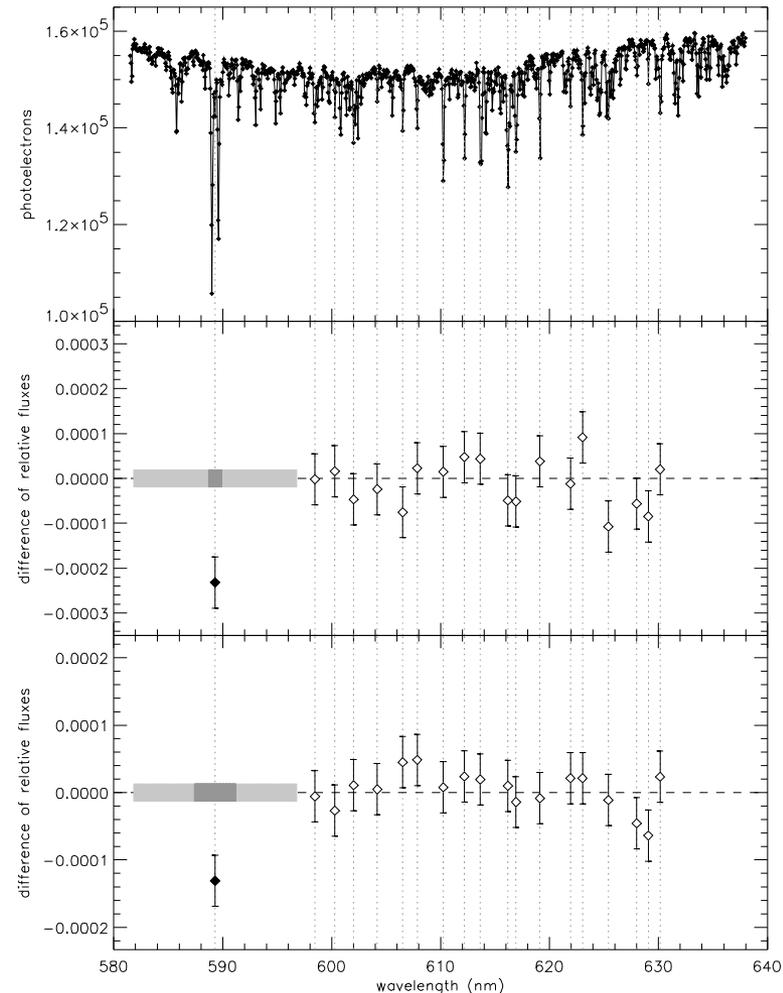
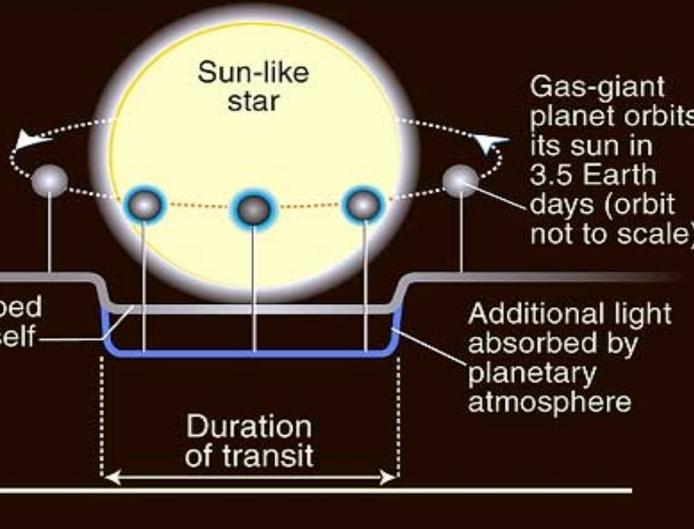
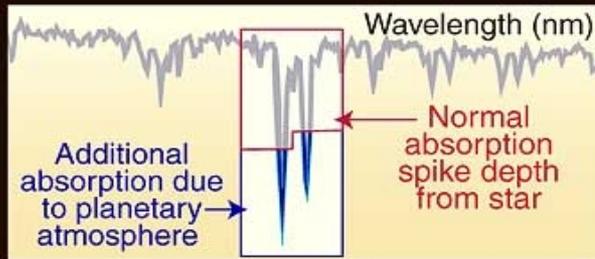


Atmosphères

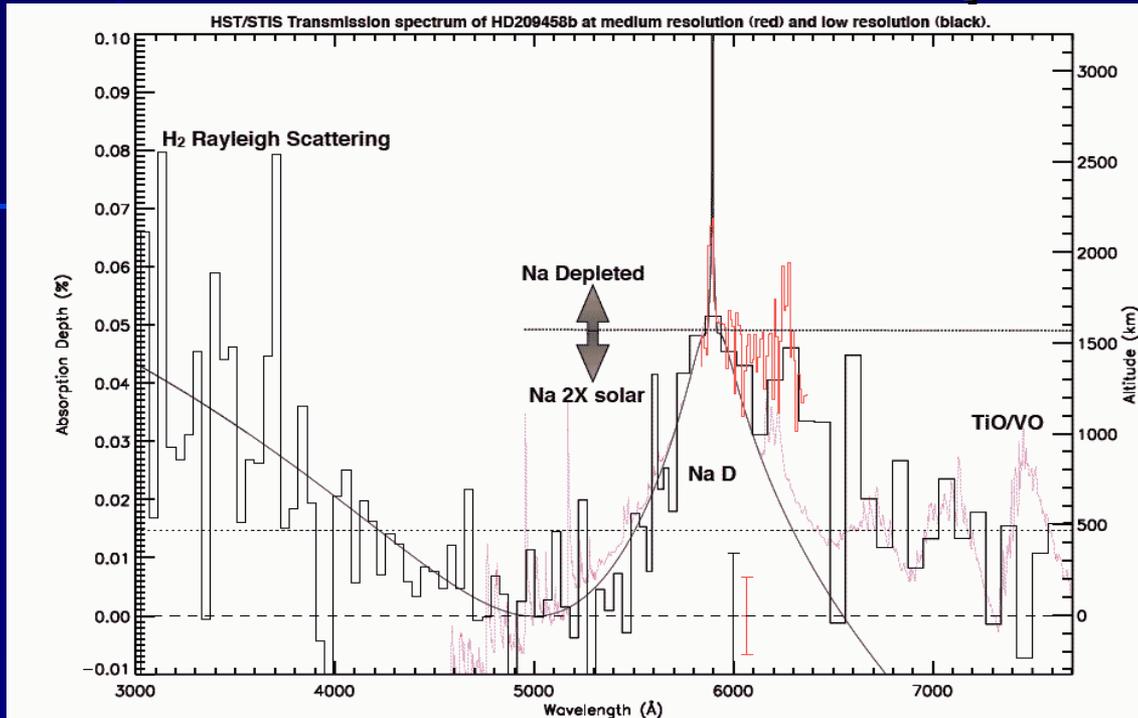
Première mesure en 2002 sur HD209458

- Raie du Sodium à 589nm est plus profonde de 2.3×10^{-4} . 1/3 de la valeur attendue pour une atmosphère sans nuage

HST detects additional sodium absorption due to light passing through planetary atmosphere as planet transits across star



Atmosphères

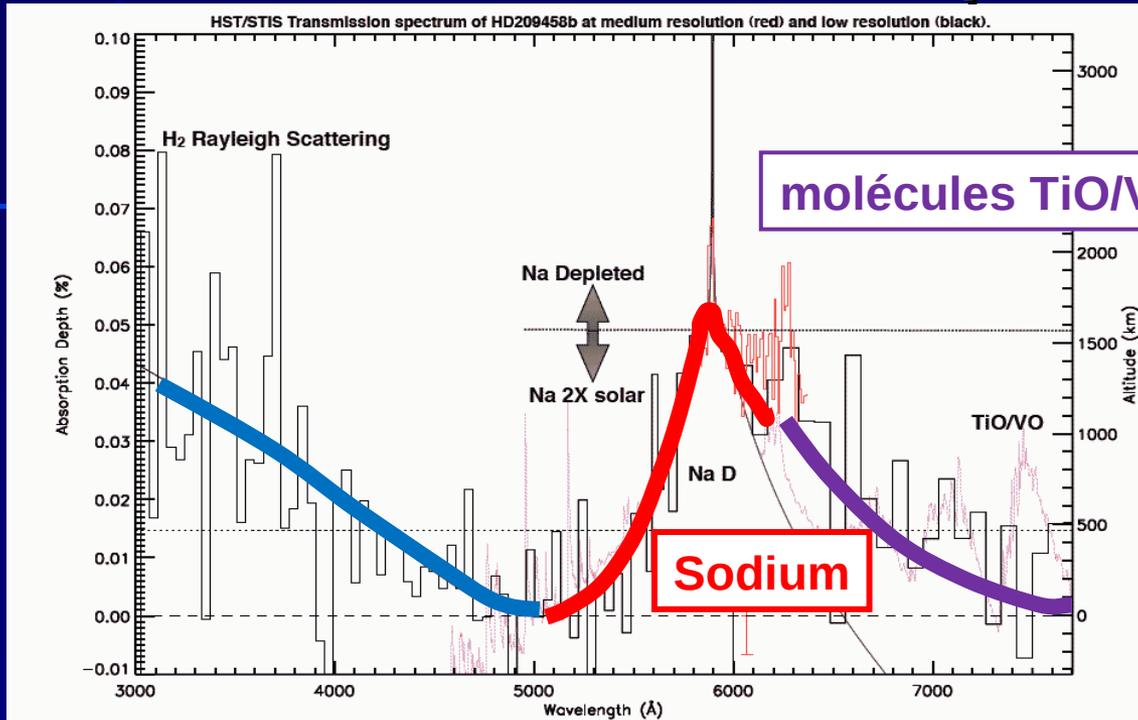


Et maintenant....

*Spectre visible de HD 209458
HST/STIS*

*Sing et al. 2008a, 2008b, Desert et al. 2008,
Lecavelier et al. 2008*

Atmosphères

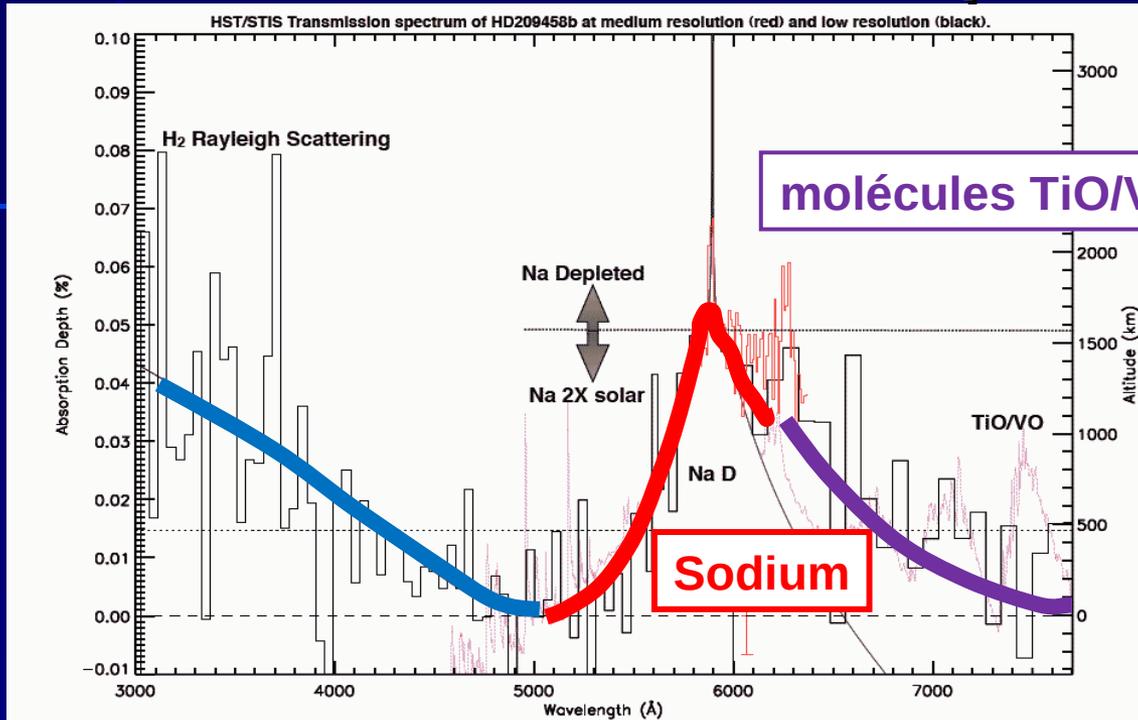


Diffusion Rayleigh
par l'hydrogène moléculaire (H₂)

*Spectre visible de HD 209458
HST/STIS*

*Sing et al. 2008a, 2008b, Desert et al. 2008,
Lecavelier et al. 2008*

Atmosphères



molécules TiO/VO?

Température de H₂ en surface :
 $T = 2350 \pm 150 \text{ K}$

Mesure des variations de température dans la haute atmosphère

Diffusion Rayleigh
par l'hydrogène moléculaire (H₂)

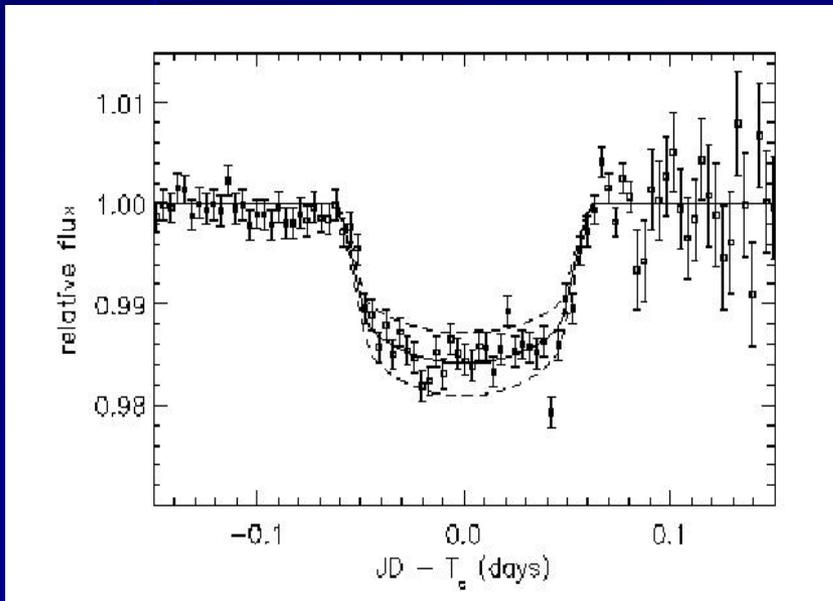
*Spectre visible de HD 209458
HST/STIS*

*Sing et al. 2008a, 2008b, Desert et al. 2008,
Lecavelier et al. 2008*

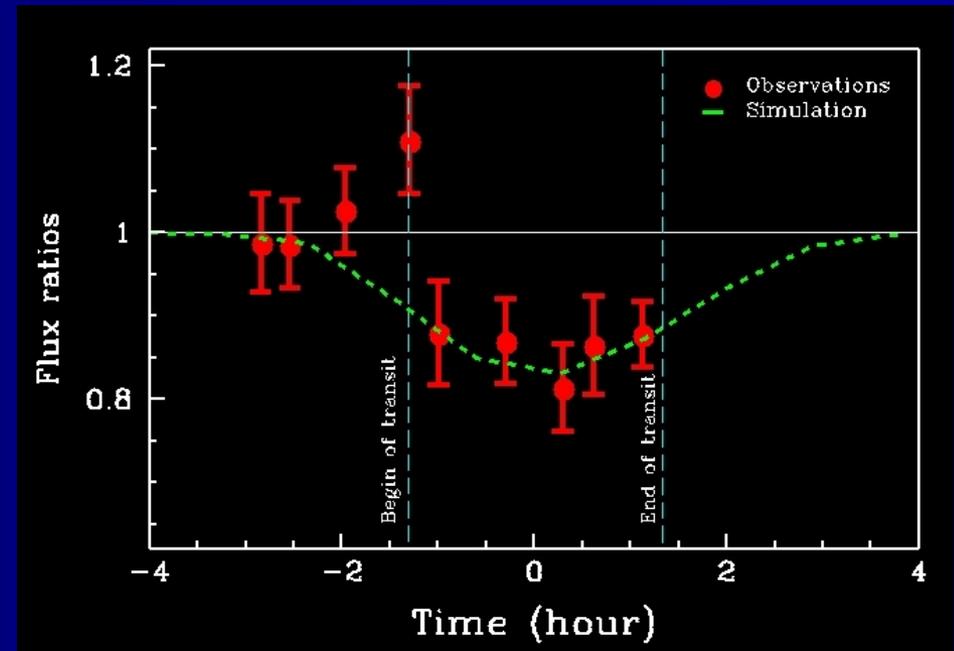
Atmosphères

Mesure de transit dans l'ultra-violet...

- Transit de $\sim 15\%$, alors qu'il n'est que de 1% dans le visible...



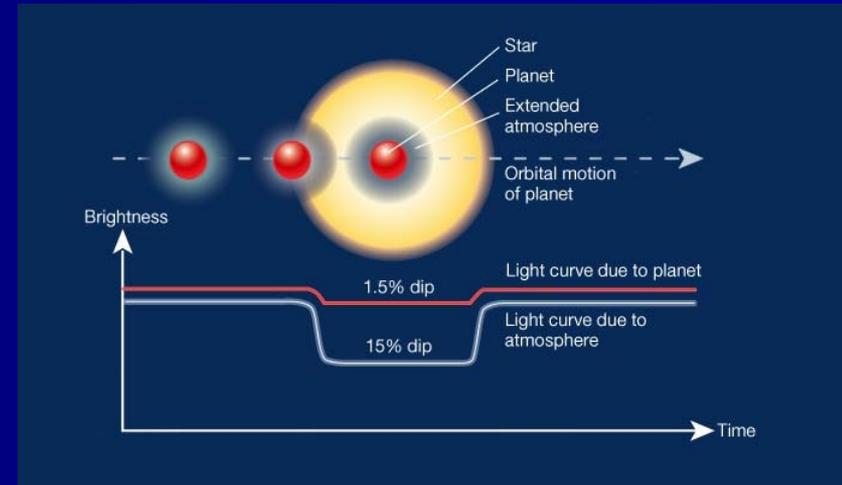
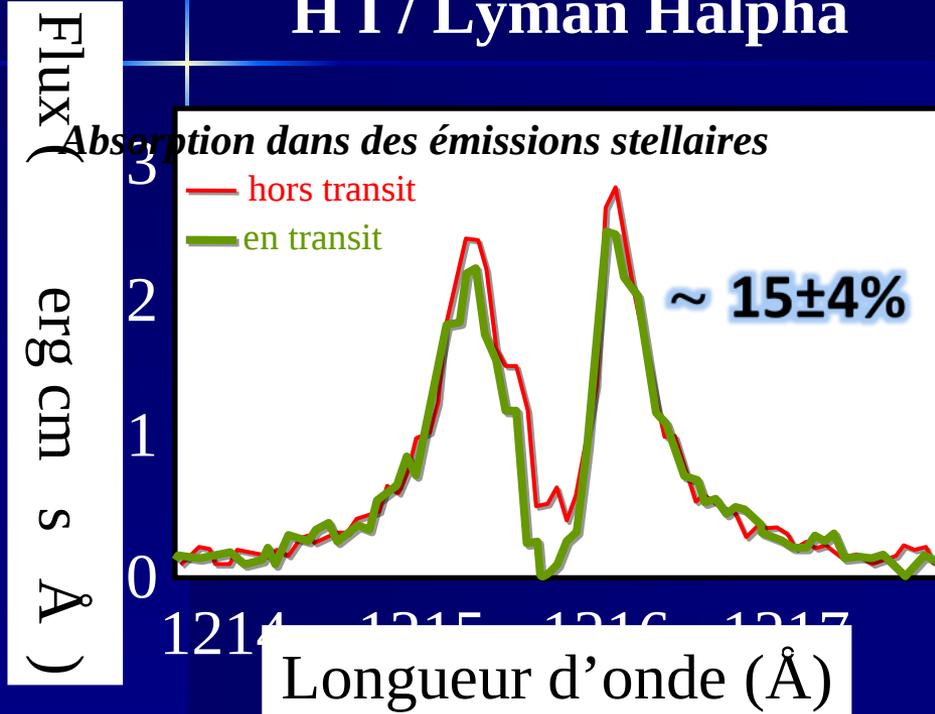
Visible



U.V.

Atmosphères

H I / Lyman Halpha

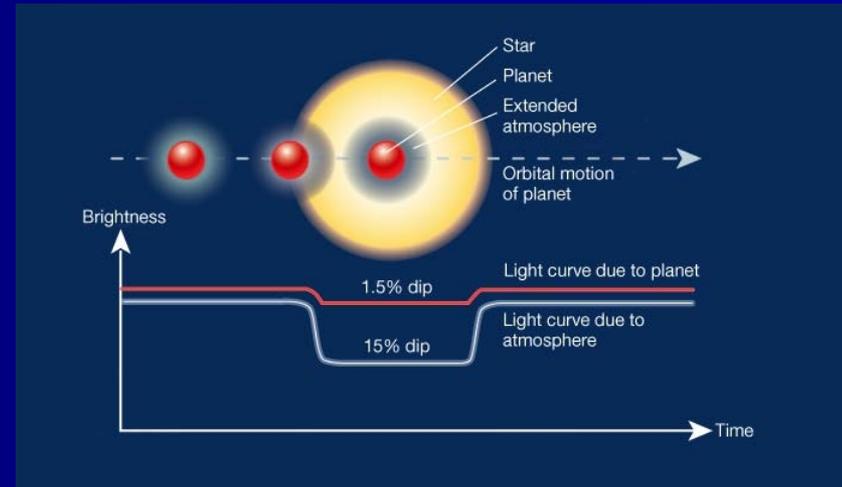
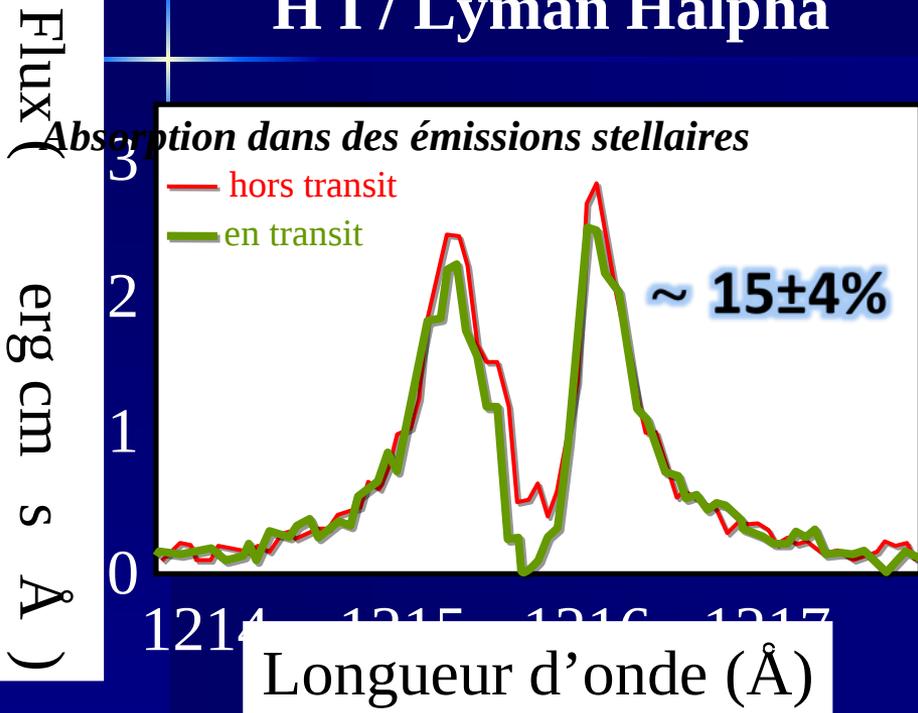


*L'absorption supplémentaire se fait dans une raie de l'hydrogène.
→ La planète est entourée d'un énorme enveloppe d'hydrogène.
→ Qui est en train de s'échapper...*

Vidal-Madjar *et al.* 2003, 2004, 2008
($12.8 \pm 3.5\%$)

Atmosphères

H I / Lyman Halpha



Ultraviolet:

*Détection de HI, OI, CII

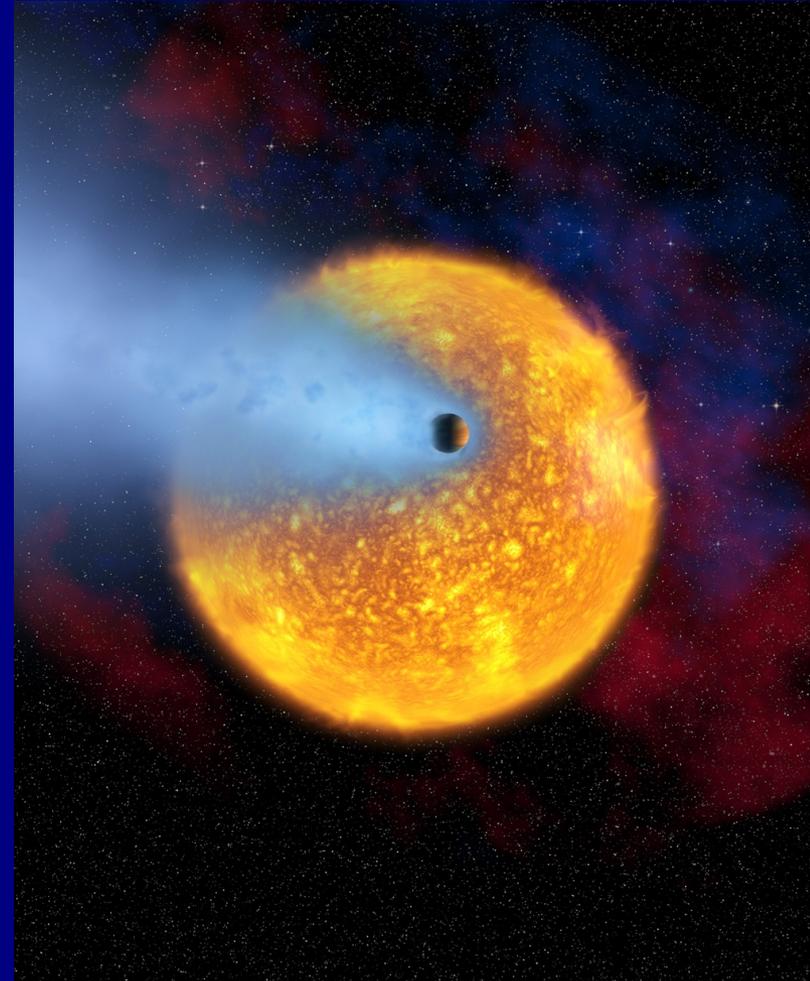
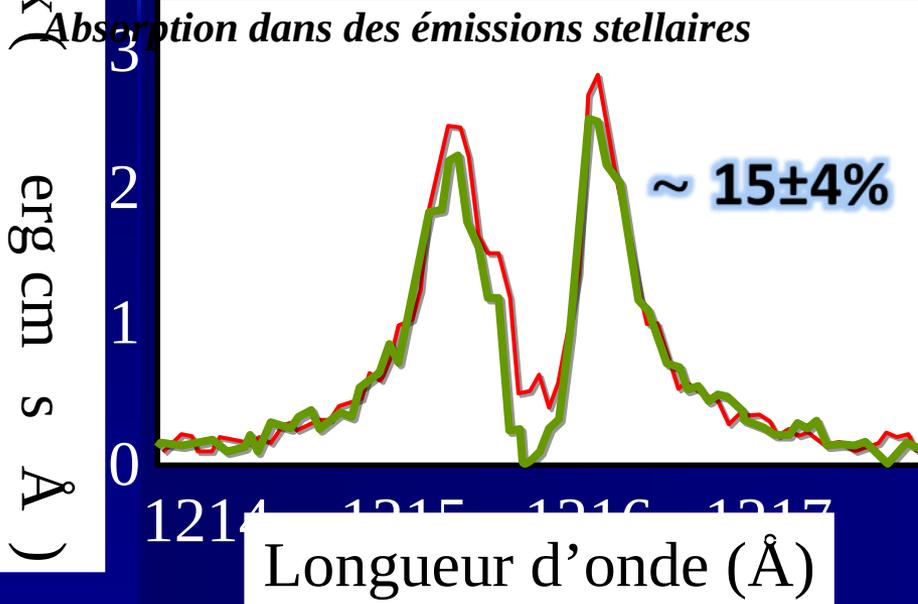
*Échappement atmosphérique $\sim 10^{10}$ g/s

Vidal-Madjar *et al.* 2003⁵⁶, 2004,
2008 (12.8 ± 3.5)%

Atmosphères

Mesure de transit dans l'ultra-violet...

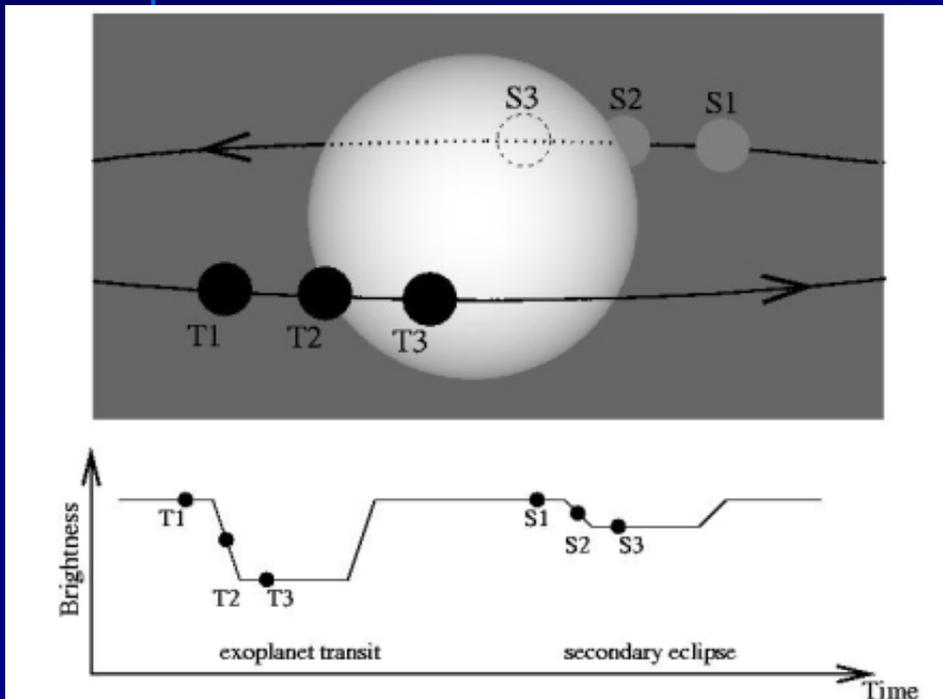
Flux (erg cm s Å)



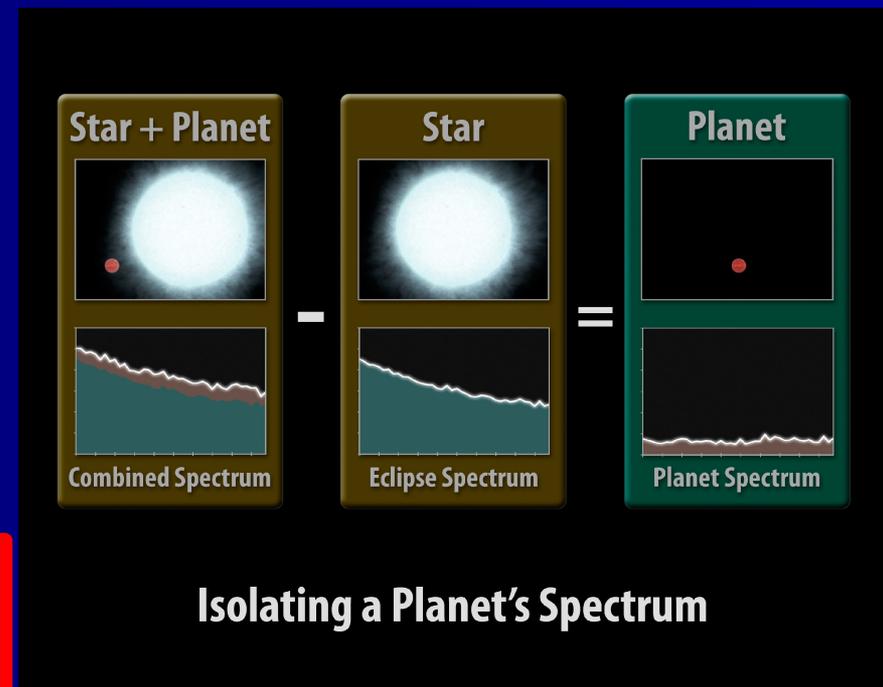
De la mesure à la vue d'artiste...

Atmosphères

Durant le transit secondaire.



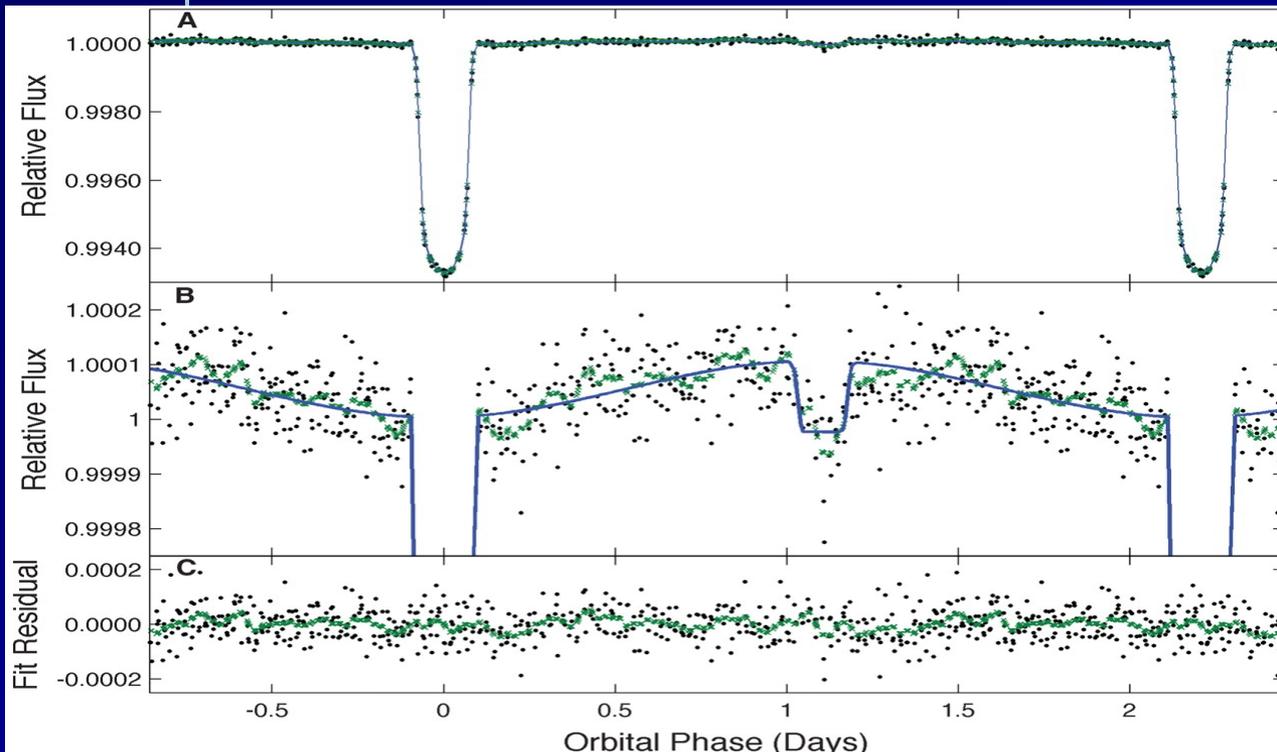
Le transit secondaire permet de mesurer le flux lumineux diffusé et émis par la planète.



Durant le transit primaire on observe l'absorption de l'atmosphère.
Durant le secondaire : son émission

Atmosphères

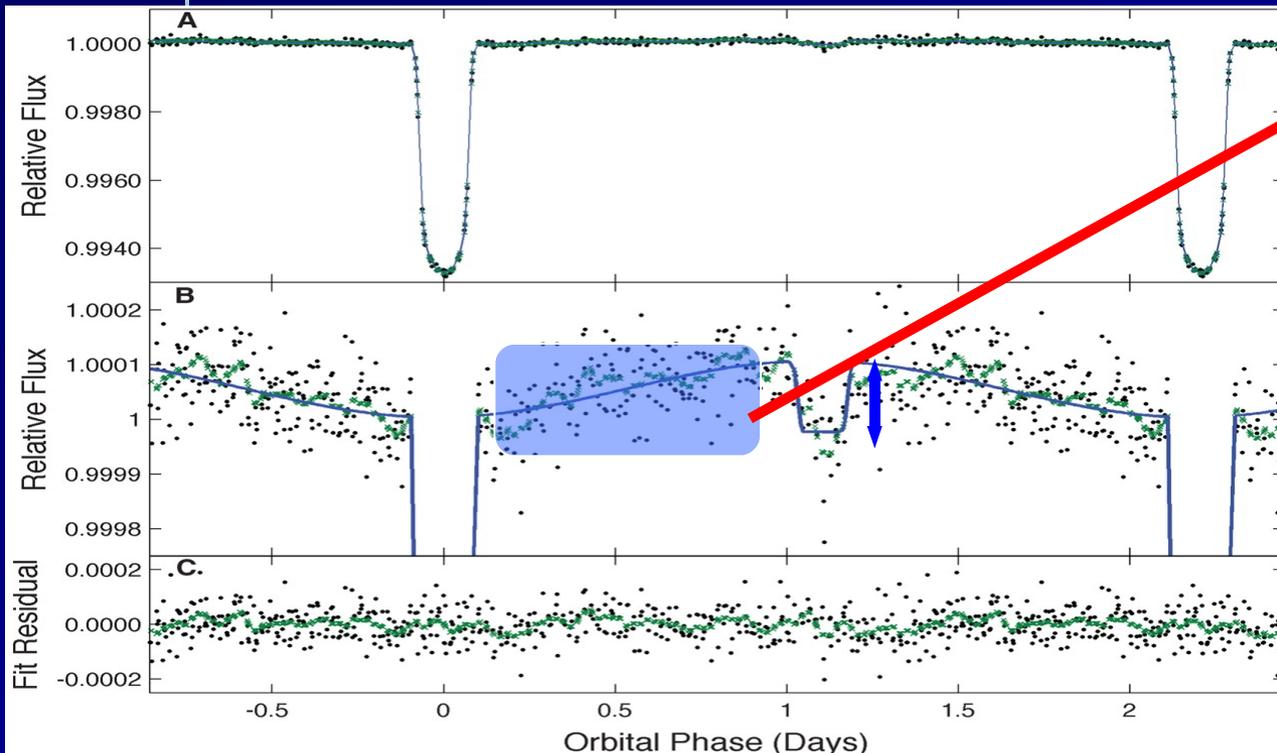
Transit secondaire



Le transit secondaire permet de mesurer le flux lumineux émis par la planète ET le contraste lumineux Entre hémisphères éclairé et sombre

Atmosphères

Transit secondaire



Contraste lumineux entre les 2 hémisphères de la planète

Flux lumineux diffusé par la planète

Le transit secondaire permet de mesurer le flux lumineux diffusé par la planète ET le contraste lumineux entre hémisphères éclairé et sombre

Atmosphère

Transit secondaire

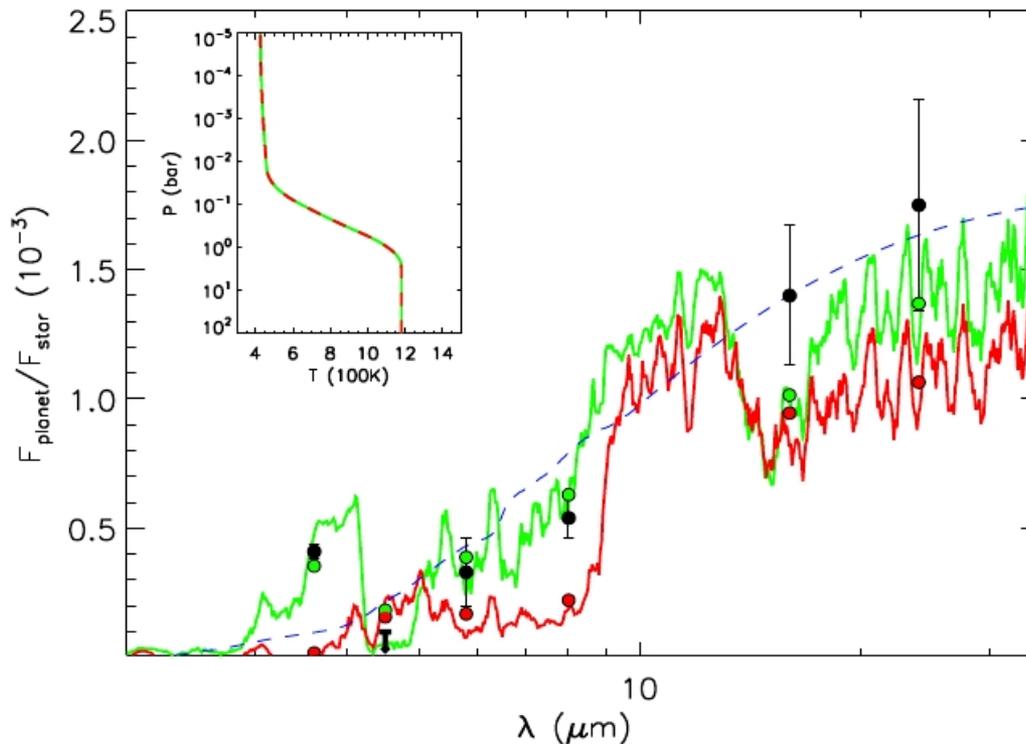


FIG. 4.— Observations and model spectra for day-side emission from GJ 436b. The black filled circles with error bars show the *Spitzer* observations in the six photometric channels, from Stevenson et al. 2010. The blue dashed lines shows a planet blackbody spectra at 800 K. The green and red curves show two model spectra, and the colored circles show the corresponding channel integrated model points. The green model is a best-fit model spectrum (see section 4.1.1) with molecular mixing ratios of $\text{H}_2\text{O} = 10^{-4}$, $\text{CO} = 7 \times 10^{-3}$, $\text{CH}_4 = 10^{-6}$, and $\text{CO}_2 = 6 \times 10^{-6}$. The red model has a composition close to solar abundance, with $\text{H}_2\text{O} = 2 \times 10^{-3}$, $\text{CO} = 10^{-5}$, and $\text{CH}_4 = 7 \times 10^{-4}$; it also contains $\text{CO}_2 = 10^{-6}$, which is allowed by photochemistry (e.g. Zahnle et al. 2009). Both models have the same pressure-temperature profile, shown in the inset.

Spectre infrarouge de GJ436b (Neptune chaud)

! seul les points noir sont des mesures....

Courbes rouges et verts sont de modélisations pour interpréter les mesures ...

Madhusan & Seager 2010

Atmosphères

Transit secondaire

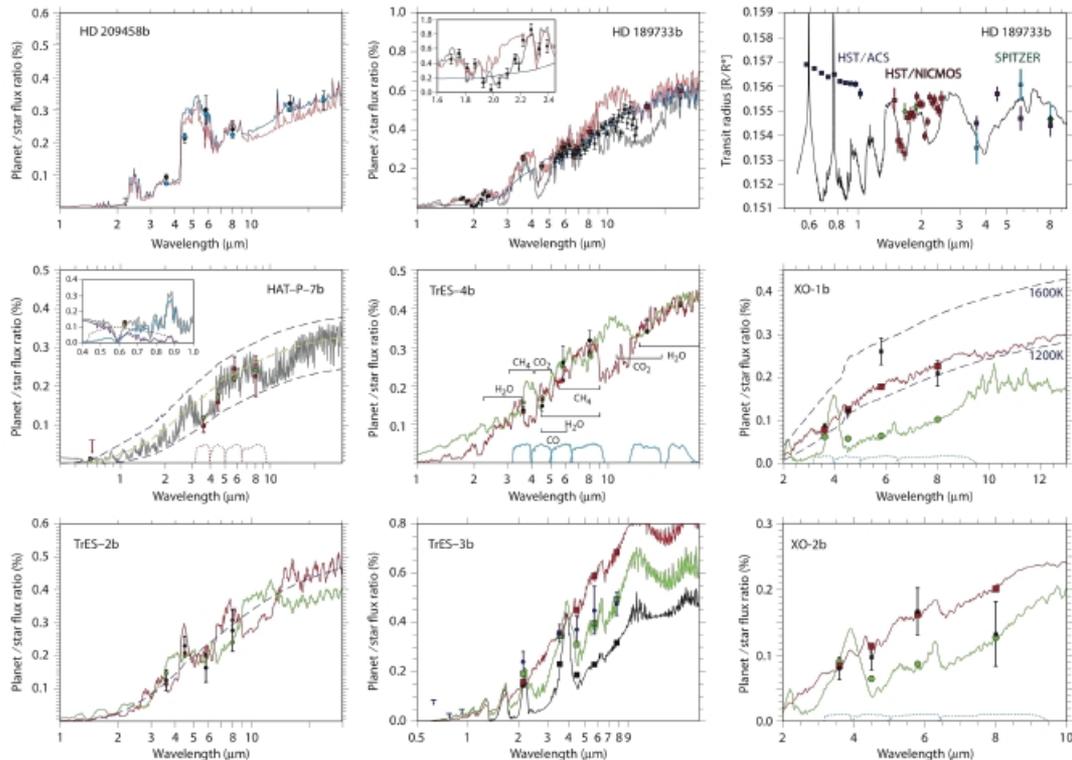


Figure 2. Collage of exoplanet atmosphere data and measurements. Most observed exoplanet atmospheres are the four *Spitzer*/IRAC bands via secondary eclipse. For references see Table 1.

Spectre infrarouge de
Plusieurs Jupiter chaud.

Atmosphères

Conclusions sur les atmosphères mesurées :

Les mesures durant les transits primaires ont permis d'explorer les atmosphères de deux Jupiter chaud : HD209458b et HD189733b. Les deux Jupiter chaud les plus brillants, tout deux découvert à l'OHP

Les transits secondaire ont permis de mesurer des points des spectres émis par 1 Neptune chaud et quelques Jupiters chauds.

→ Ces mesures vont pouvoir être portée dans l'avenir vers les Super-Terre et les Terre... Peuvent-elles nous donner des indications sur leur habitabilité, ou sur le fait qu'elles sont habitées.

Où chercher la vie ?



Où chercher la vie ?

Transparent présenté il y a 4 ans.... !!!!!!

Parmi les planètes connues :

- ⇒ La majorité sont des planètes géantes gazeuses (similaires à Jupiter ou Saturne)
- ⇒ Mais il est possible que des satellites rocheux existent autour de ces planètes

Avec les progrès instrumentaux, dans les 10 ans à venir nous devrions être à même de découvrir des planètes de la masse de la Terre.

Autour de quelles étoiles chercher ?

Le temps durant lequel une étoile est stable (séquence principale) dépend de sa masse :

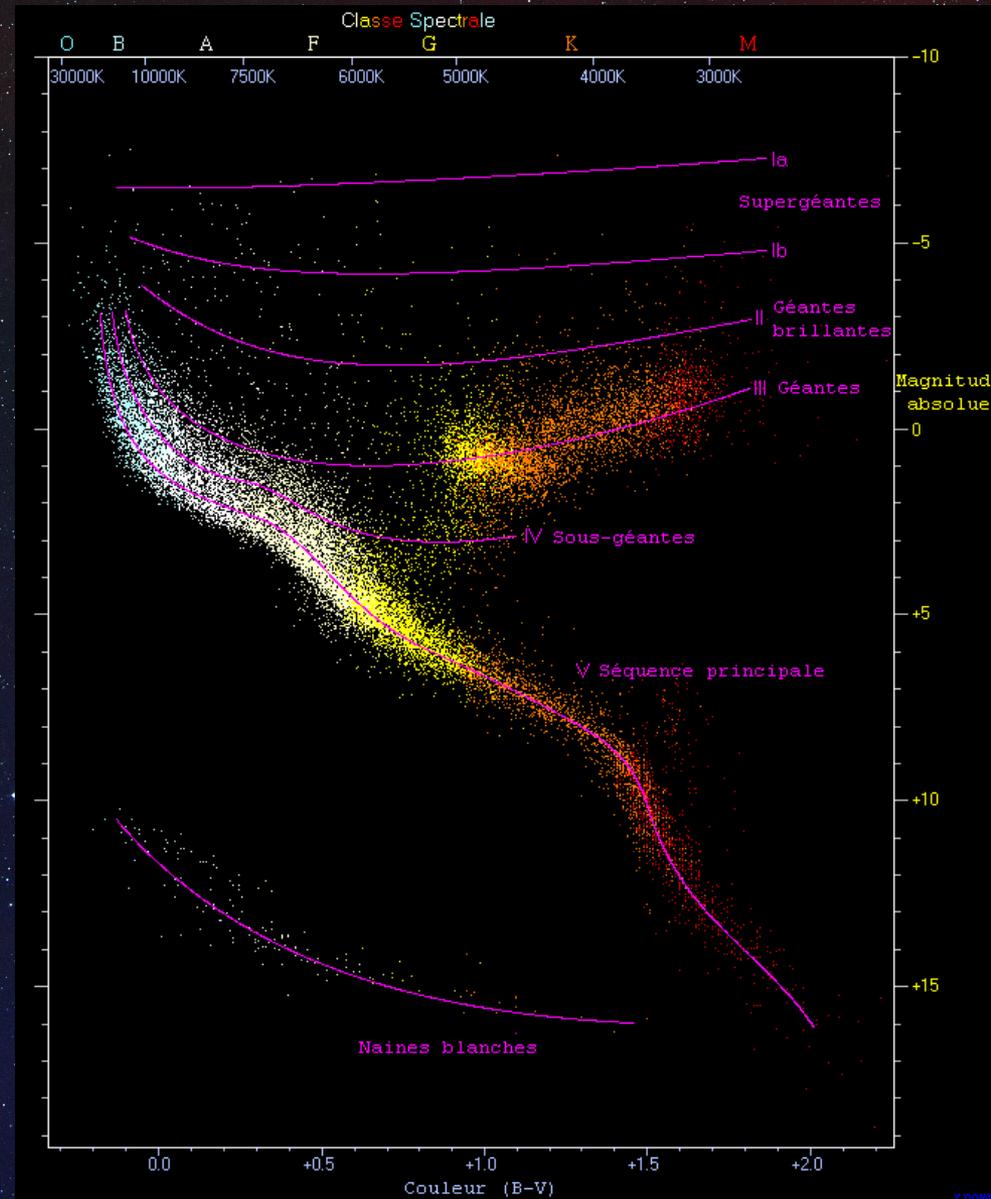
2 masses solaires : type spectral A
⇒ 1 milliard d'années

1.5 masses solaires : type spectral F
⇒ 6 milliards d'années

1 masse solaire : Soleil
⇒ 10 milliards d'années

0.7 masse solaire : type spectral K
⇒ 15 milliards d'années

0.2 masse solaire : type spectral M
⇒ 1000 milliards d'années



Où chercher la vie ?

Zone habitable :

- ⇒ Distance étoile-planète permettant la présence d'eau liquide à la surface de la planète
- ⇒ Correspond à la recherche d'une vie similaire à une vie terrestre
- ⇒ Dépend de la physique de l'atmosphère (importance de l'effet de serre) et de l'activité géologique de la planète

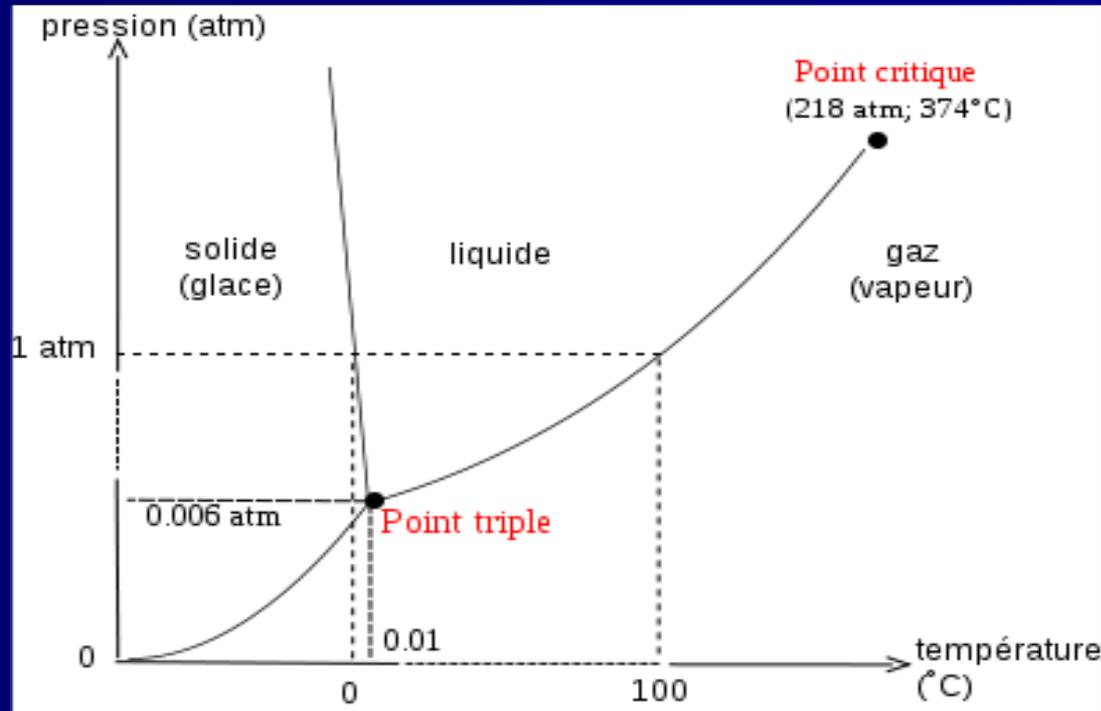


Où chercher la vie ?

Définition : Zone habitable autour d'une étoile

1./ Région dans laquelle l'eau liquide peut exister à la surface de la planète

→ Température de la surface de la planète entre 0 et 374 deg celsius



Ref : <http://www.exobio.cnrs.fr/spip.php?article109>

Où chercher la vie ?

Définition : Zone habitable autour d'une étoile

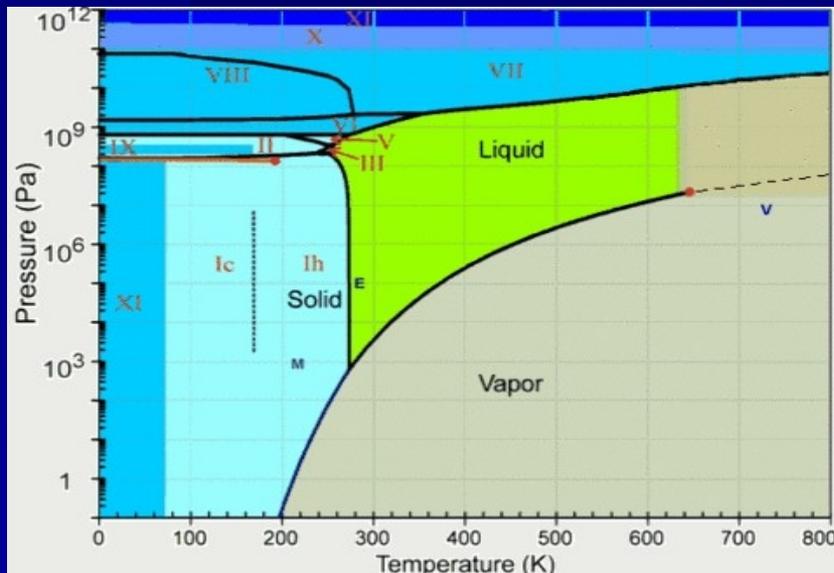
2./ La gravité doit être suffisante pour que l'atmosphère ne s'évapore pas

3./ Le volcanisme doit être présent pour renouveler le CO₂

→ Masse de la planète > 0.5M_{terre}

4./ La pression à la surface ne doit pas dépasser 10 000 bars

→ Pas d'enveloppe H/He... Masse de la planète < 8-10 M_{terre}



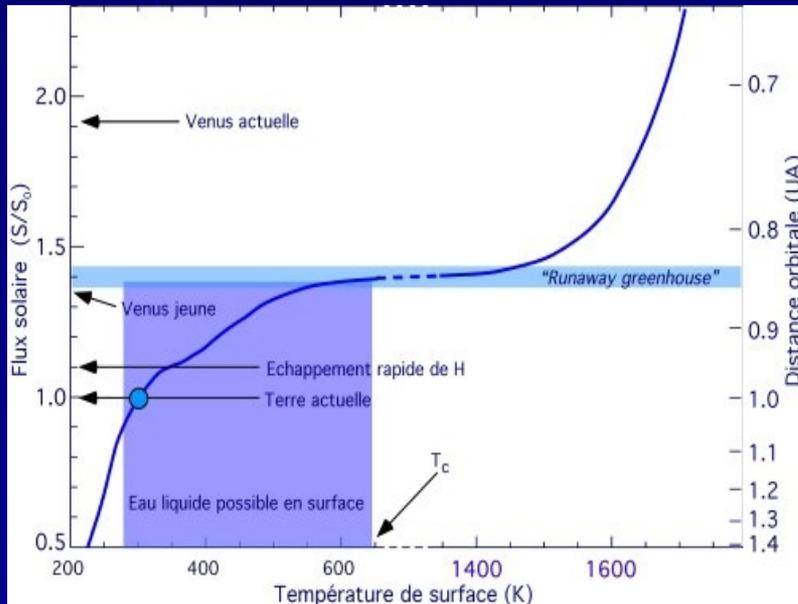
Ref : <http://www.exobio.cnrs.fr/spip.php?article109>

Selsis et al. 2007 A&A 476, 1373

Où chercher la vie ?

Zone habitable autour d'une étoile : limite interne

Si la Terre est rapprochée du Soleil : Température augmente
évaporation de H_2O : augmentation effet de serre
refroidissement plus efficace par convection



-----> Nouvelle équilibre à T et P plus élevé.

Où chercher la vie ?

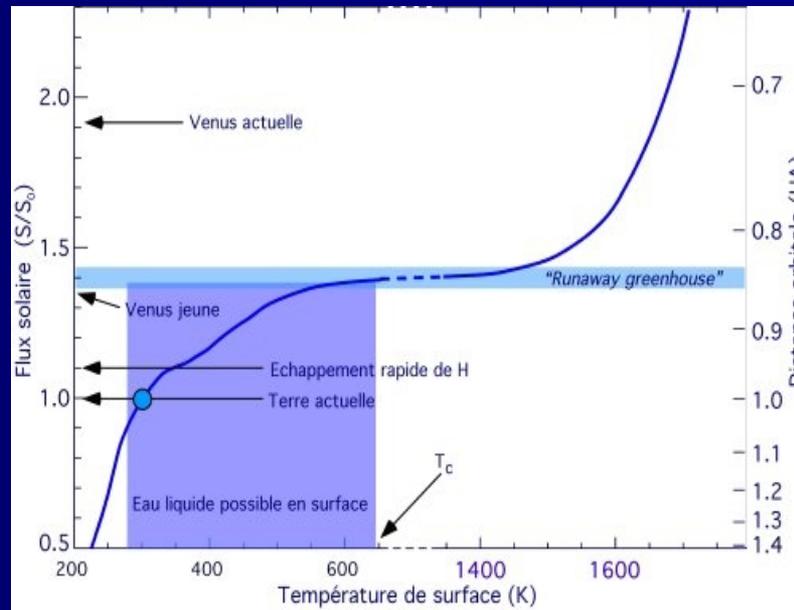
Zone habitable autour d'une étoile : limite interne

Lorsque $T > 420 \text{ K}$ (0.85au) :

Pression partielle H_2O de 1bar; atmosphère opaque en IR

La planète se refroidit uniquement par émission thermique de la haute atmosphère: ne peut évacuer plus de 300W/m^2

-----> « runaway greenhouse » : T augmente à 1600K



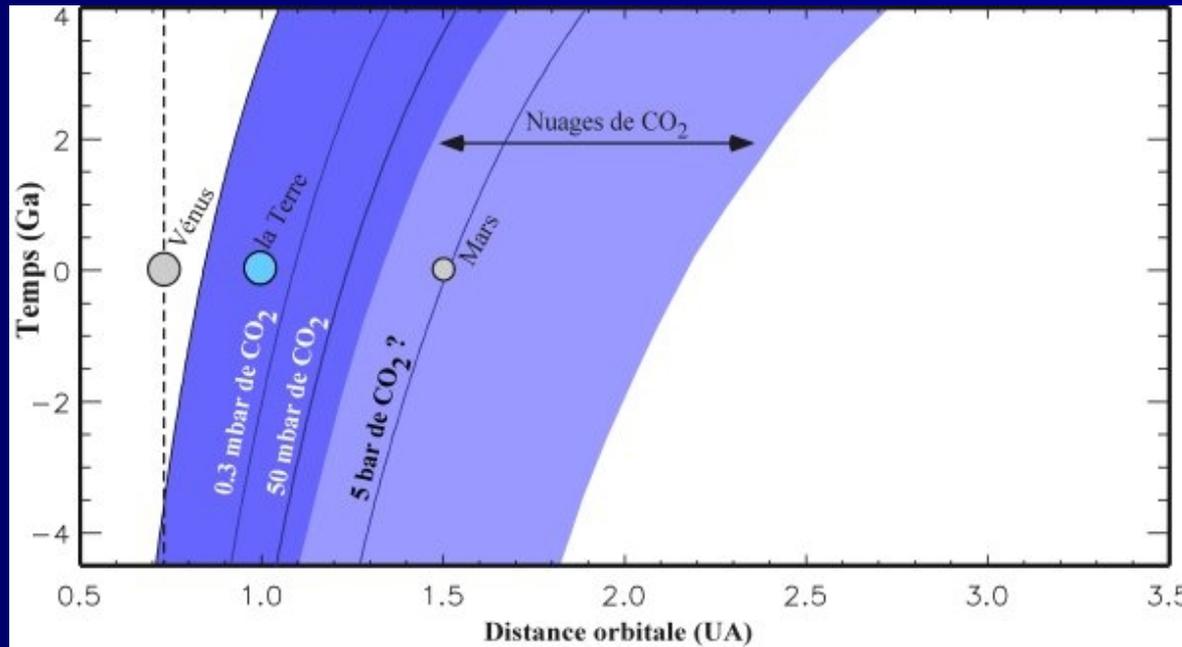
Où chercher la vie ?

Zone habitable autour d'une étoile : limite externe

Si la Terre éloignée du Soleil :

- 1./ T diminue; les océans gèlent
- 2./ CO₂ augmente (volcan) car plus piégé dans l'eau sous forme de carbonate
- 3./ Effet de serre augmente; T ré-augmente, océan a nouveau liquide
- 4./ Nouvelle équilibre production (volcan) piégeage (carbonate) de CO₂

----> T similaire et CO₂ plus important dans l'atmosphère
(volcanisme absolument essentiel)

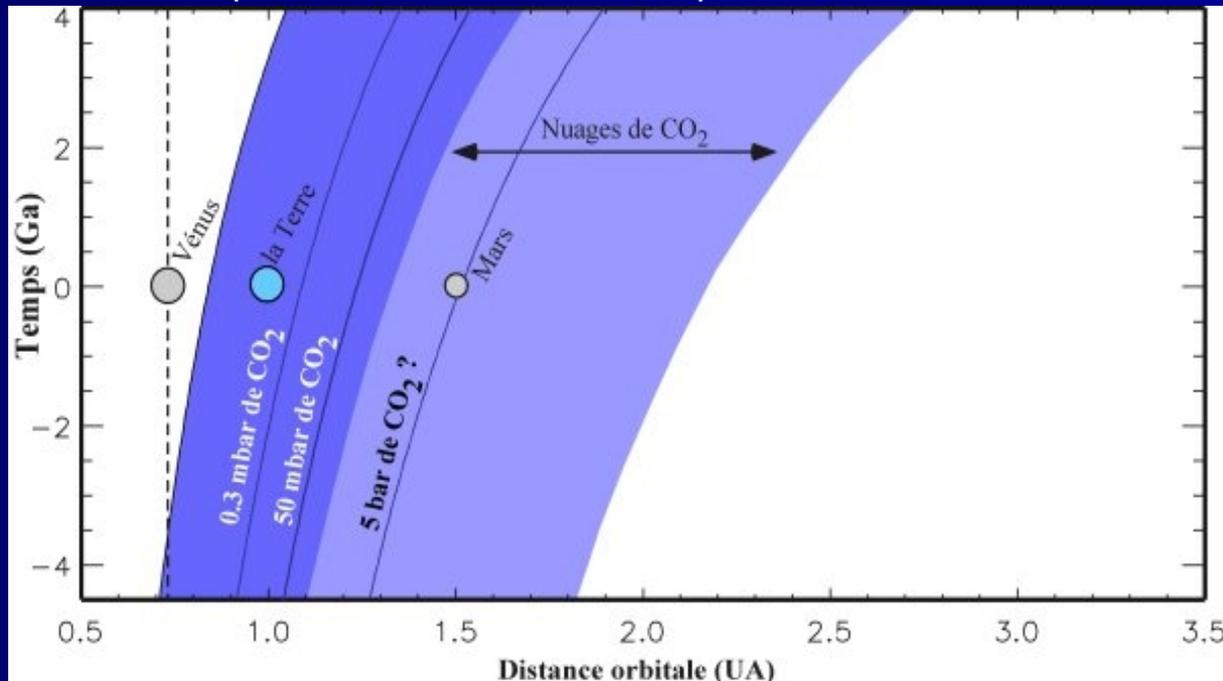


Où chercher la vie ?

Zone habitable autour d'une étoile : limite externe

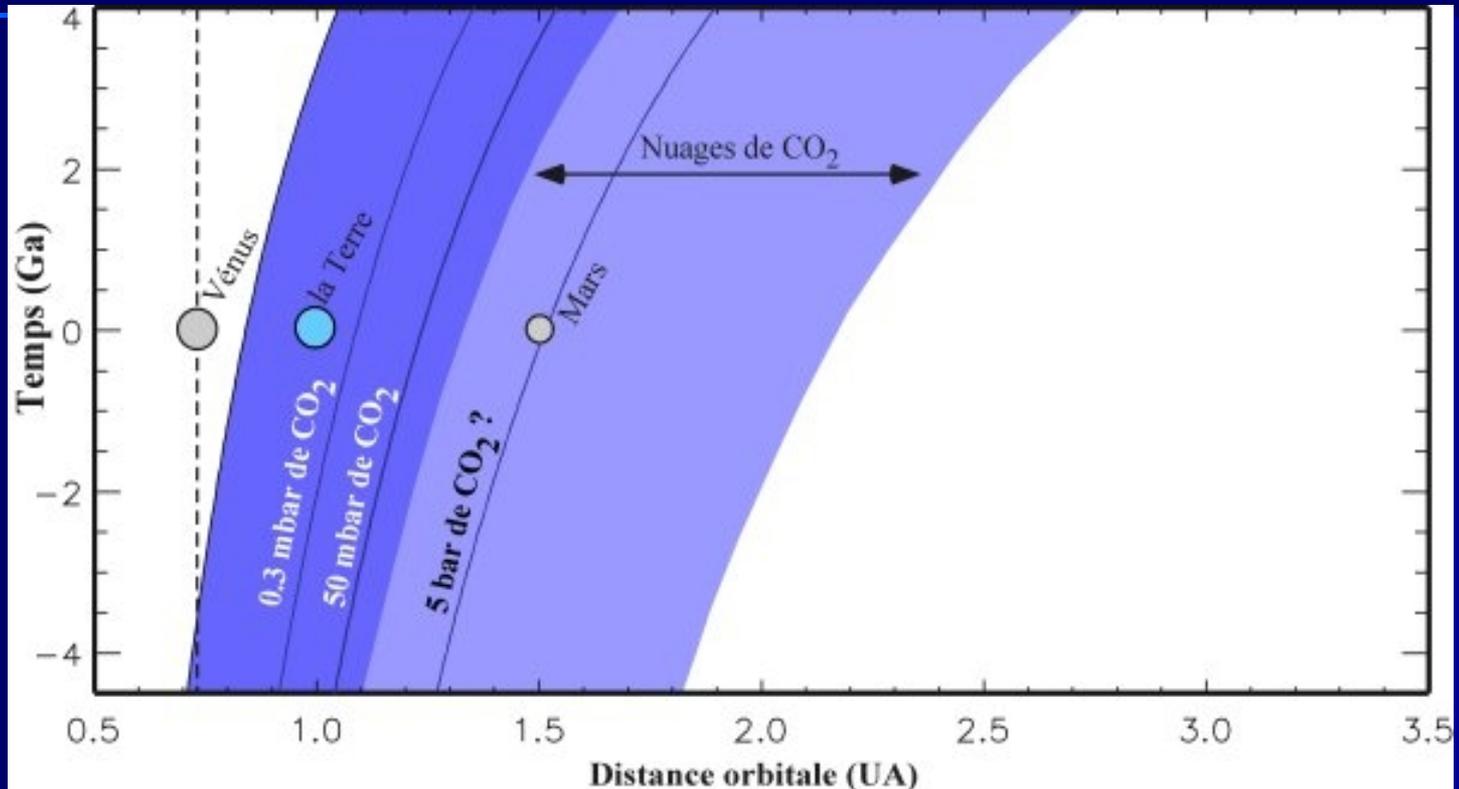
Si la Terre éloignée du Soleil :

5./ Au delà de 5-8 bars de pression partielle; CO_2 condense en cristaux de glace; augment albédo et peut faire baisser la température (vers 2 AU).



Où chercher la vie ?

Zone habitable autour du Soleil : 0.85 – 2 AU

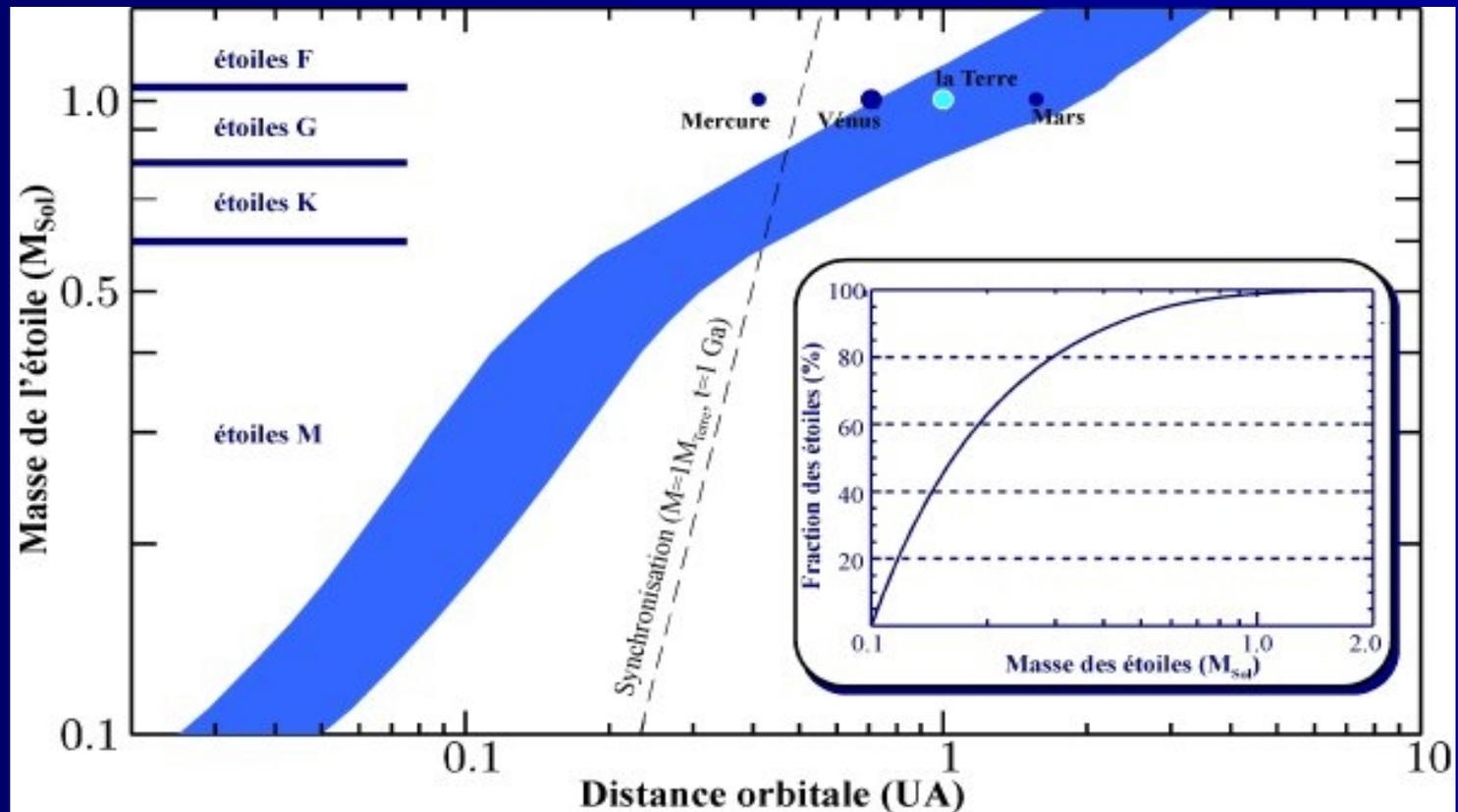


Où chercher la vie ?

Zone habitable autour du Soleil : 0.85 – 2 AU

En première approximation pour les autres étoiles :

$$D_{zh}^* = d_{zh}(\text{soleil}) \times (L^*/L_{\text{soleil}})^{1/2}$$



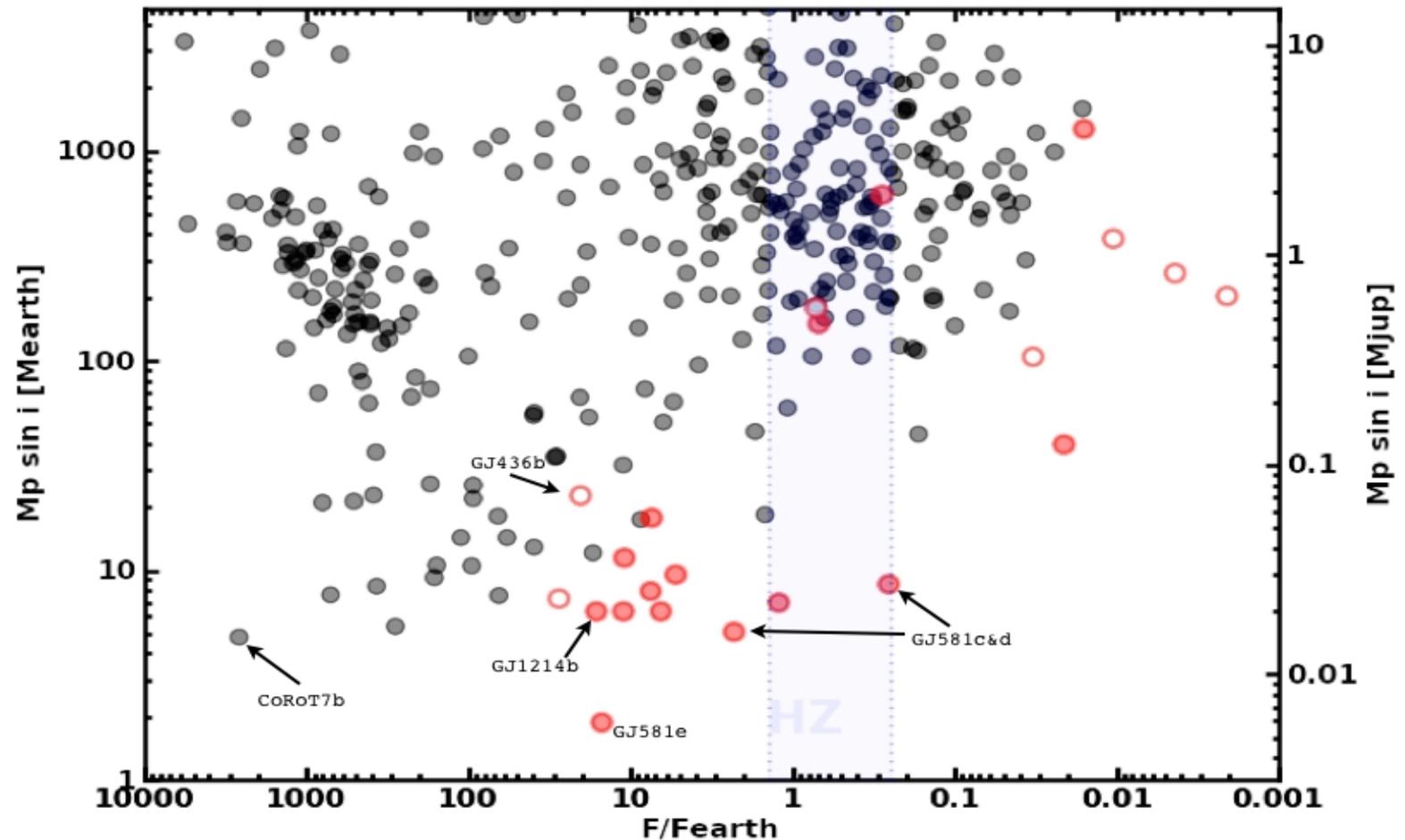
Où chercher la vie ?

Zone habitable :

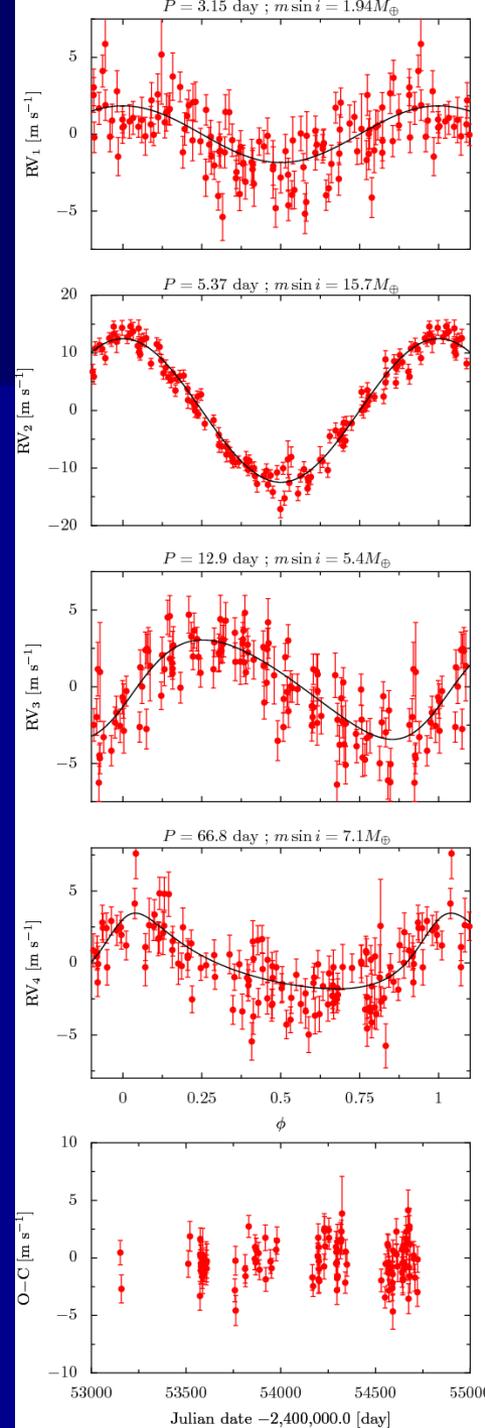
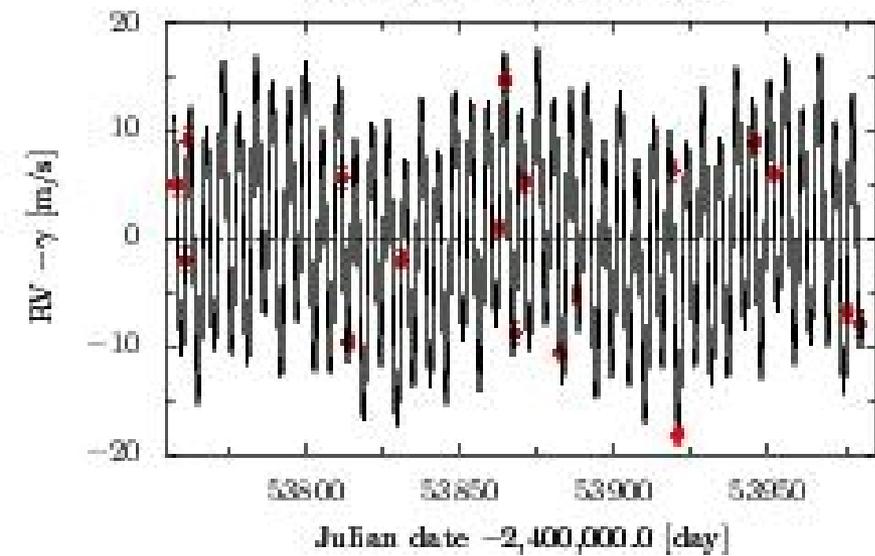
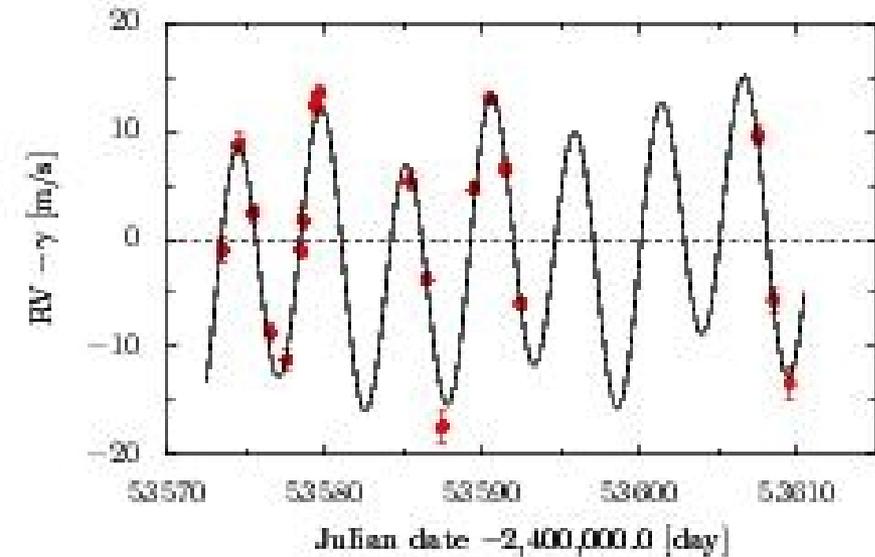


Où chercher la vie ?

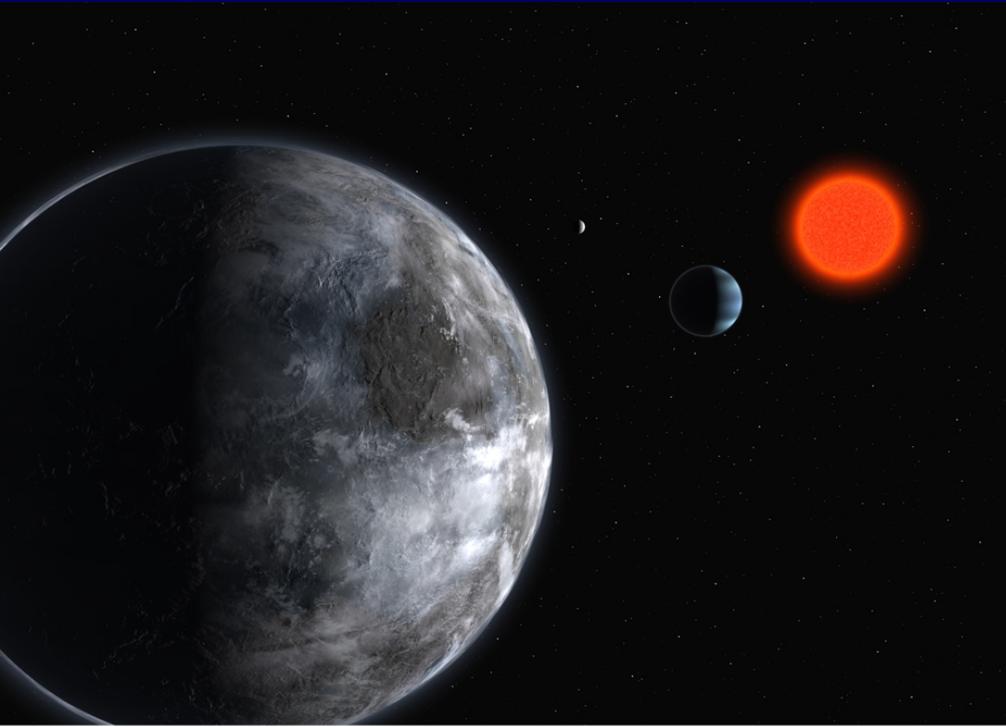
Énergie reçue par les planètes aujourd'hui détectées



Où chercher la vie : GI 581



Planète habitable : Gl 581d



Gl581a : étoile de 0.3 masse solaire

Gl581e : ~2 masses de la Terre (P~3j)

Gl581b : ~15 masses de la Terre (P~5j)

Gl581c : ~5 masses de la Terre (P~13j)

Gl581d : ~7 masses de la Terre (P~67j)

The Planetary System in Gliese 581
(Artist's Impression)

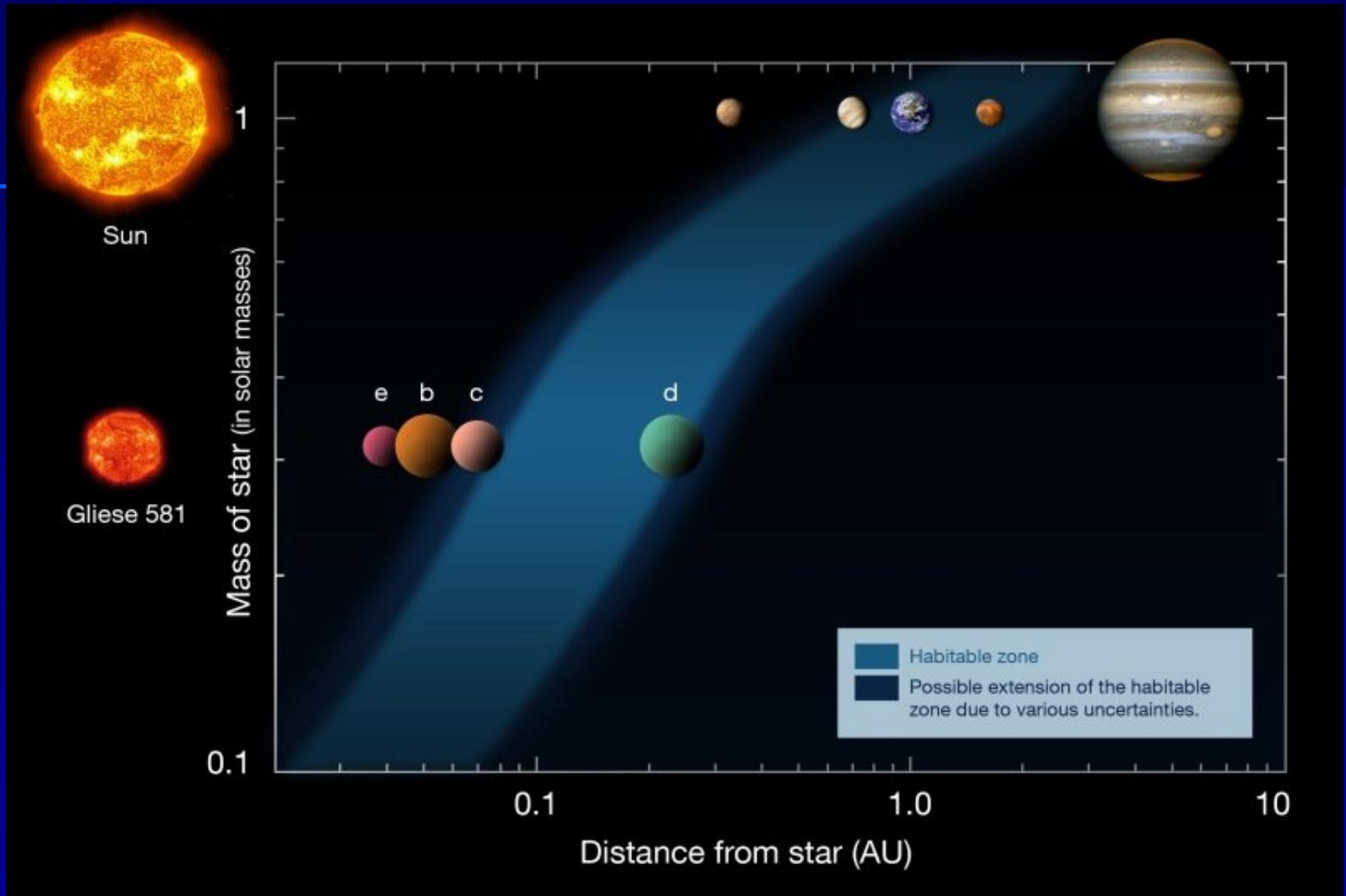


ESO Press Photo 22a/07 (25 April 2007)

This image is copyright © ESO. It is released in connection with an ESO press release and may be used by the press on the condition that the source is clearly indicated in the caption.

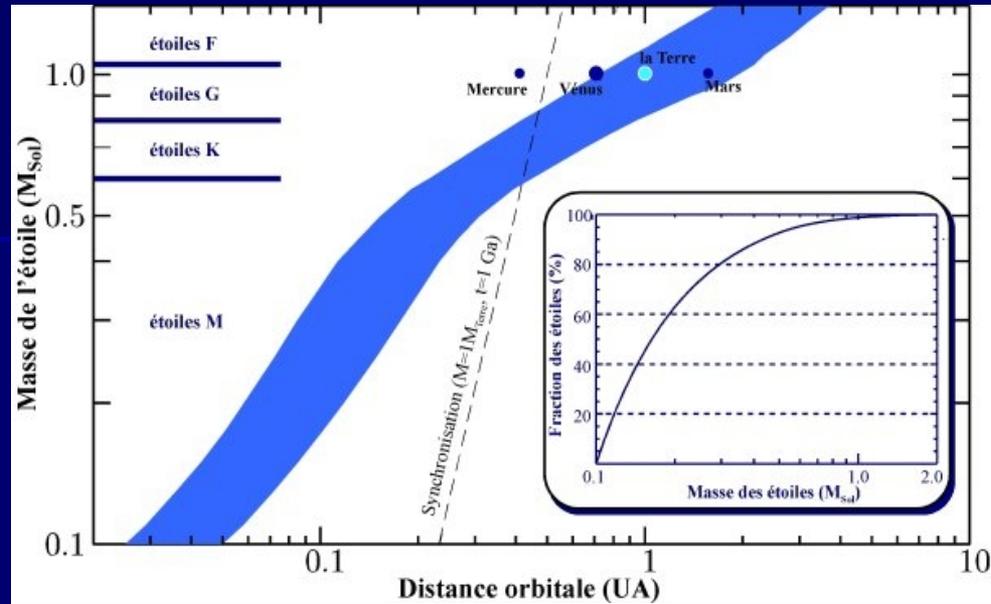


Planète habitable : Gl 581d



(Selsis et al. 2007 améliorée 2009)

Où chercher la vie ?



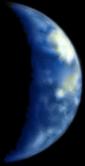
Et si c'était plus compliqué

- ⇒ Planètes synchronisées : est-ce un problème
- ⇒ Flux UV reçu : ni trop faible, ni trop fort...
- ⇒ Stabilité de l'axe de rotation

Où chercher la vie ?

Les axes de rotation de Vénus et Mars subissent des variations pouvant aller jusqu'à 180 degrés

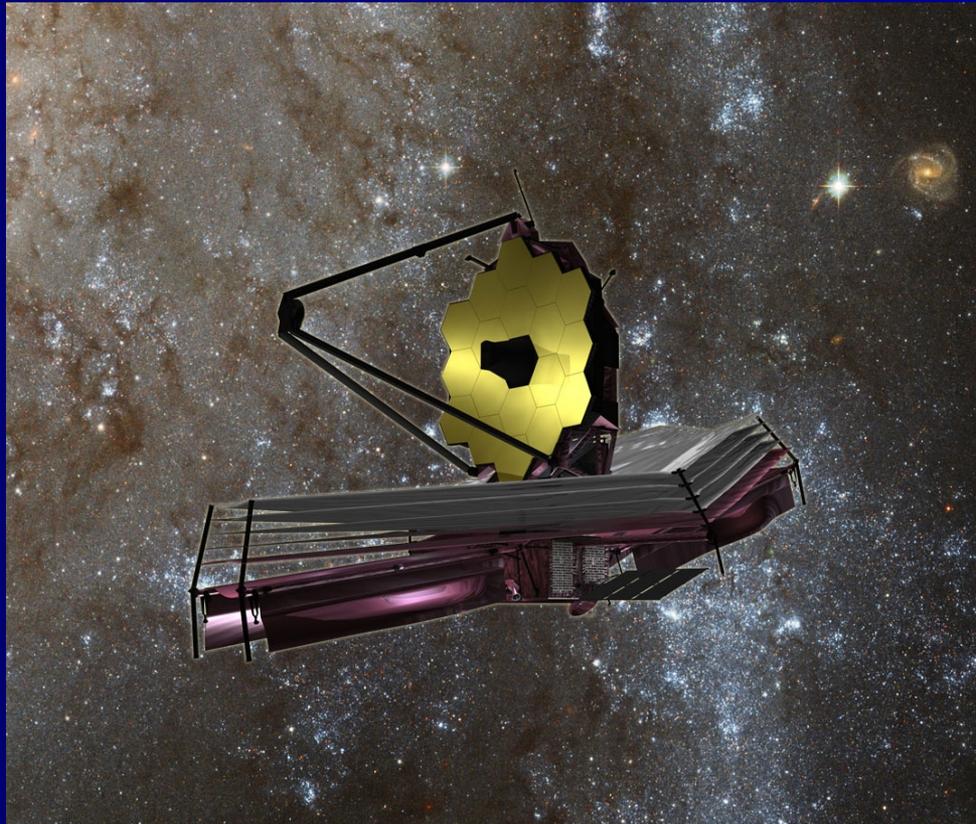
Celui de la Terre est stabilisé (15° de variation) uniquement grâce à La Lune



Le futur

Espace :

- JWST (2014) : analyse atmosphérique des « Super-Terre » transitant



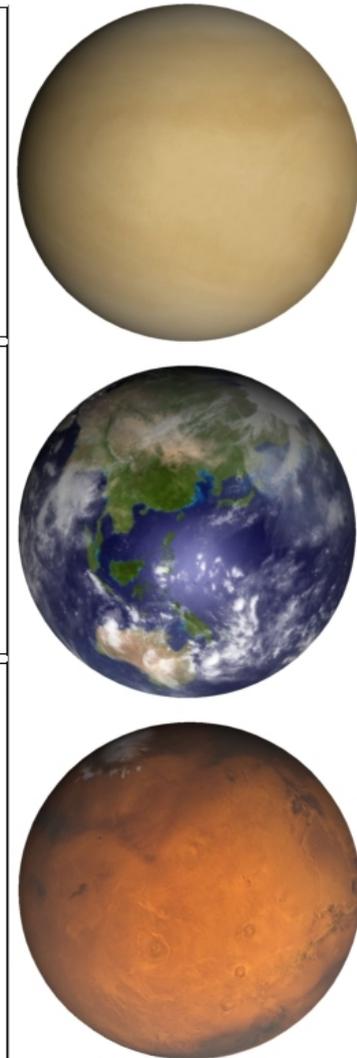
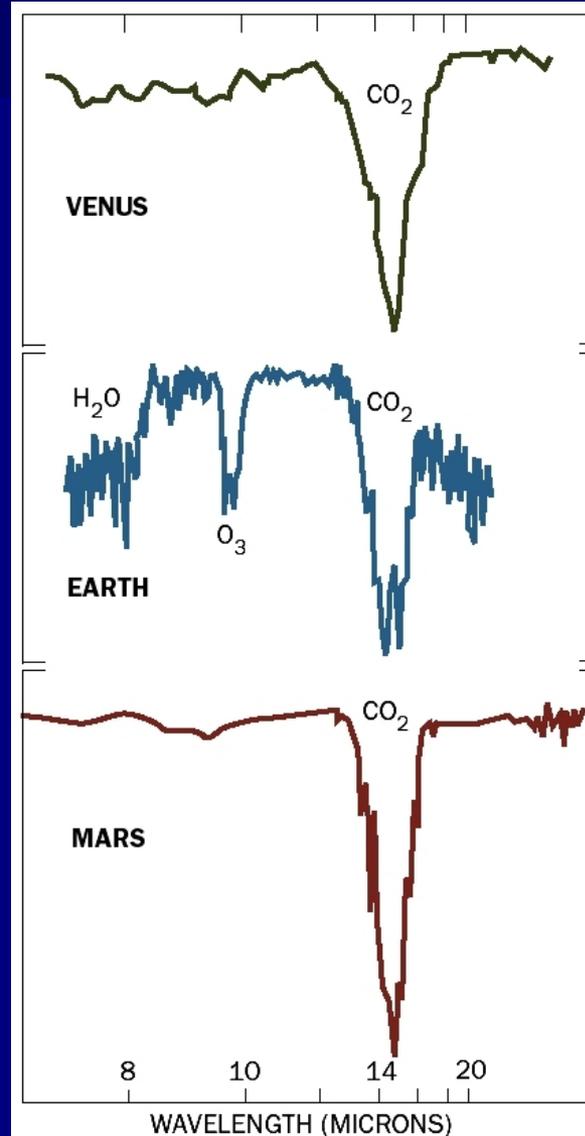
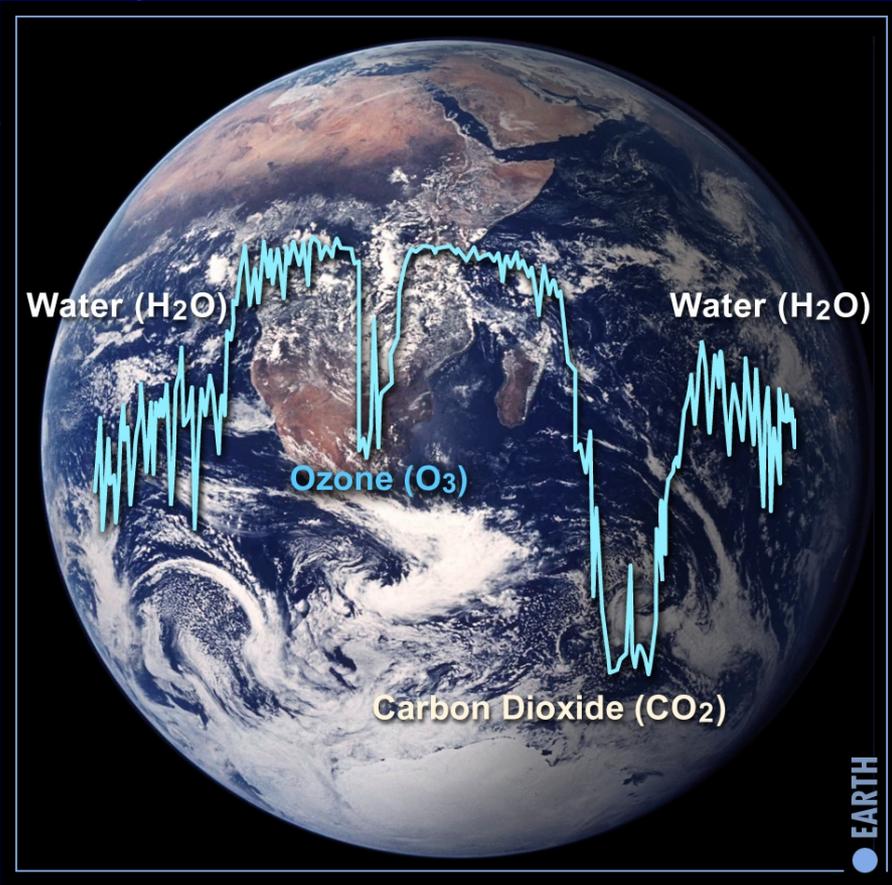
Le futur

Imagerie directe

Darwin (ESA) 2020-2030

Interféromètre spatial pouvant détecter des planètes "terre" et d'en faire une analyse spectrale

Le futur



Détection de vie à base de
Photosynthèse à partir de la
présence simultanée d'ozone,
d'eau et de dioxyde de carbone

Le futur



Détection de vie à base de Photosynthèse à partir de la présence simultanée d'ozone, d'eau et de dioxyde de carbone

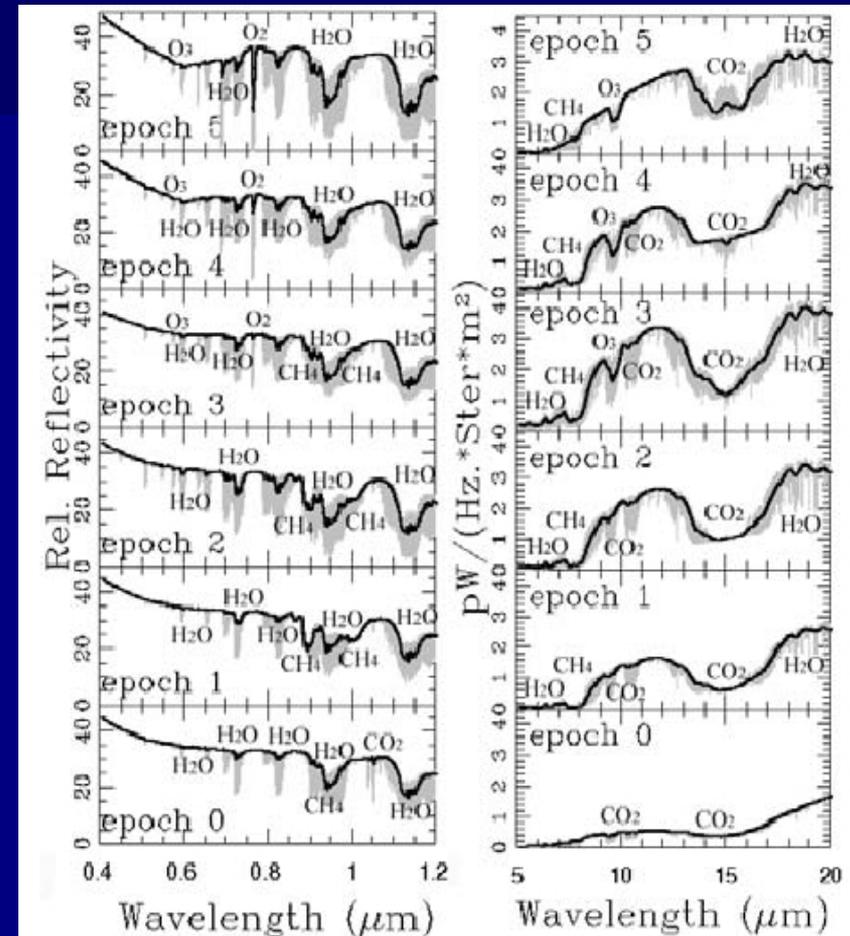


Fig. 3: The visible to near-IR (left panel) and mid IR (right panel) spectral features on an Earth-like planet change considerably over its evolution from a CO₂ rich (epoch 0) to a

Conclusion : café des sciences à 17h

Détecter des planètes habitables...

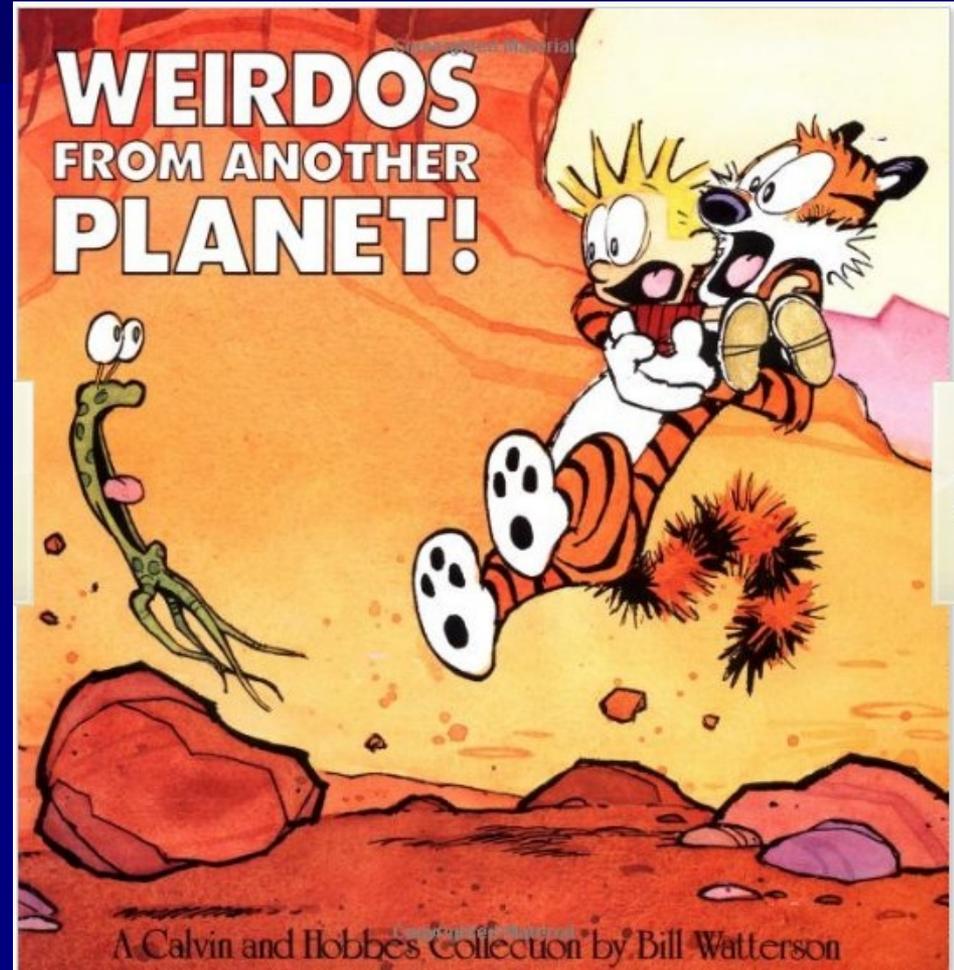
... mais la preuve formelle de
l'existence de la vie extra-terrestre
intelligente a déjà été apportée par
Watterson (1990)

Conclusion : café des sciences à 17h

Détecter des planètes habitables...

... mais la preuve formelle de la vie extra-terrestre intelligente a 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 »

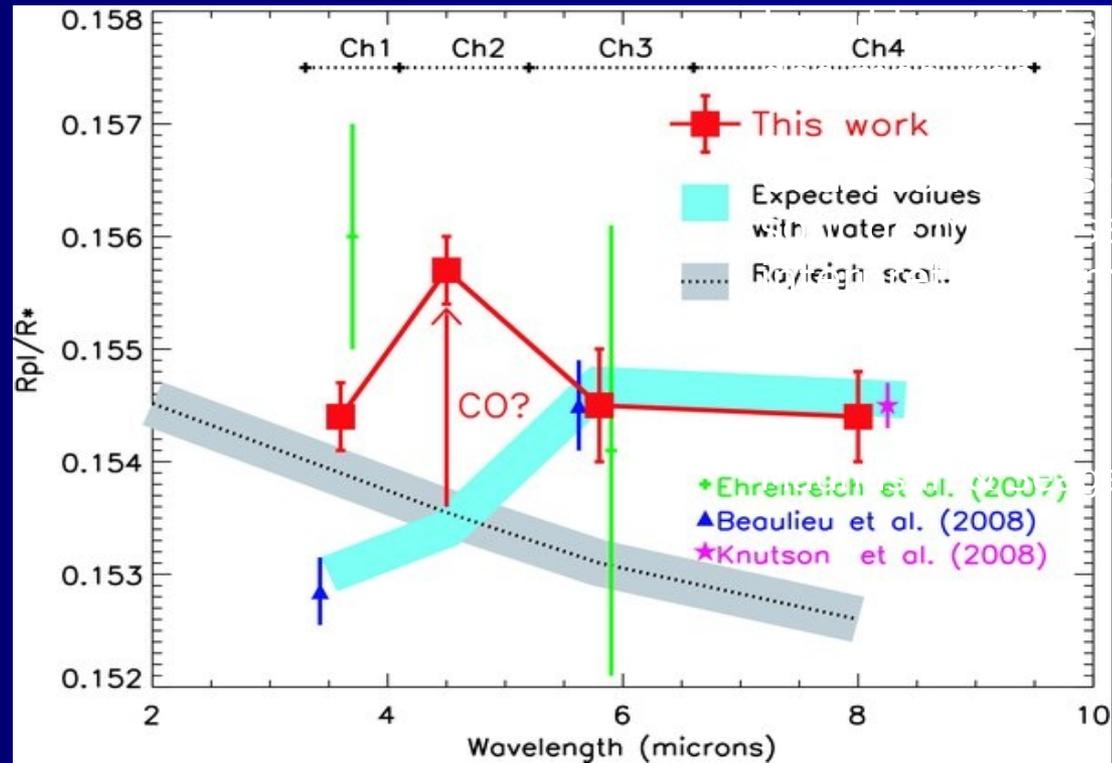


III. Découvertes

3.5 Mesures des compositions atmosphériques des planètes grâce aux transits

Des mesures d'absorption de l'atmosphère de la planète dans l'infrarouge pour HD189733 (Desert et al, 2009)

Spectre infrarouge de Gl436b (Neptune chaud)



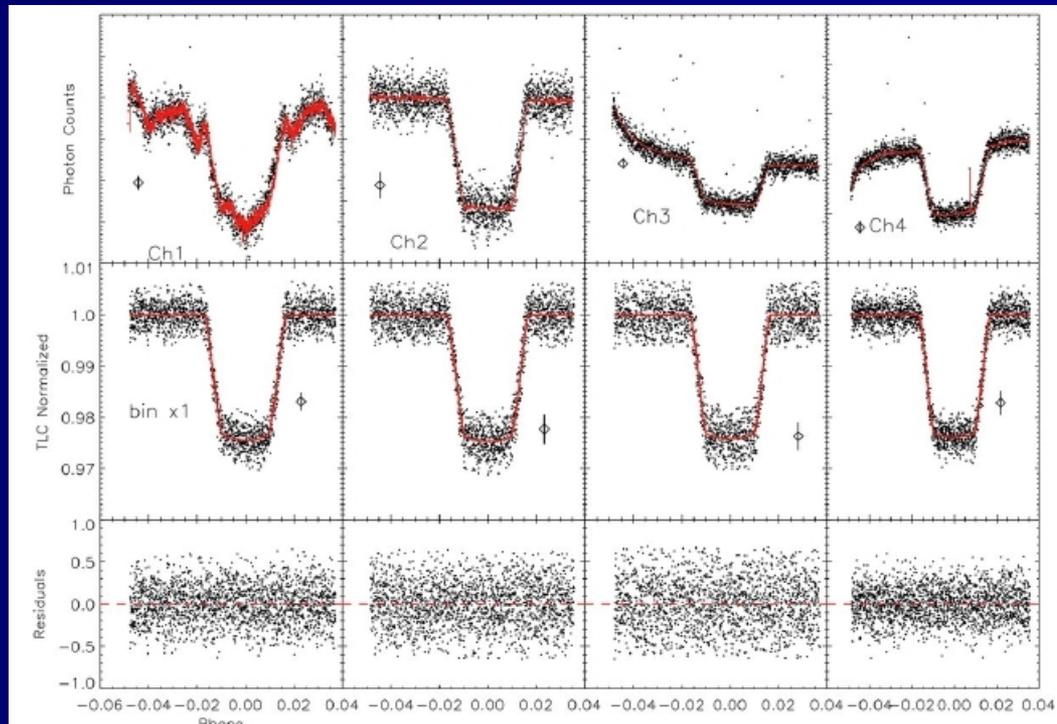
noir sont
et verts
ations pour
mesures ...

er 2010

III. Découvertes

3.5 Mesures des compositions atmosphériques des planètes grâce aux transits

Des mesures d'absorption de l'atmosphère de la planète dans l'infrarouge pour HD189733 (Desert et al, 2009)

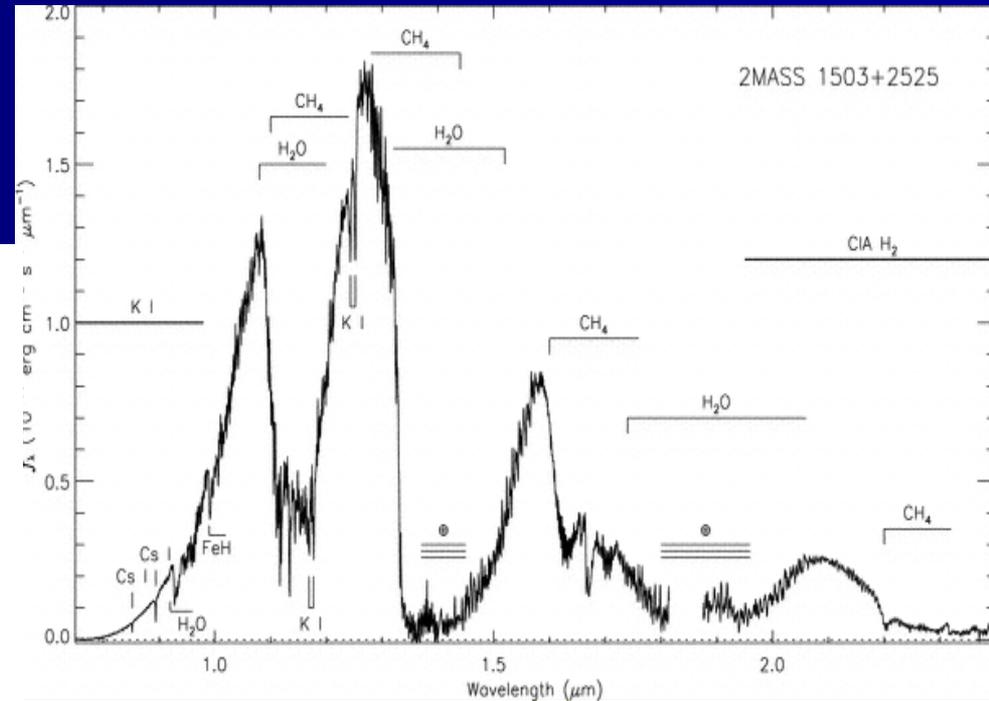
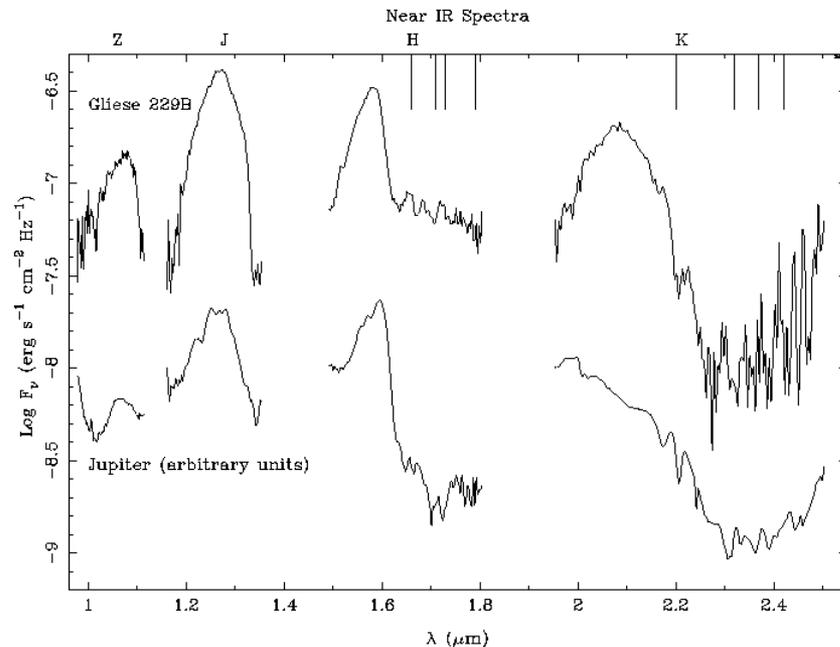


III Découvertes

3.4 Jupiters Chauds : leurs rayons et spectres

Pourquoi sommes nous capables de modéliser dès leurs découvertes des planètes de 700-2000K ??

Les naines brunes : objets connus avec T_{eff} de 2000 à 700K



Autour de quelles étoiles chercher ?

Zone habitable dans la Galaxie (prospectif) :

Coelum
Astronomia

The Pinwheel Galaxy by



Coelum
Astronomia

The Sculptor Galaxy by



Etoiles trop éloignées: pas assez d'éléments lourds pour former des planètes rocheuses

Etoiles trop proches du centre galactique: supernovae fréquentes

10% des ~200 milliards d'étoiles de la Galaxie sont dans la zone habitable galactique